المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

الفيزياء 12

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الأول

كتاب الطالب




المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الأول

كتاب الطالب

12

فريق التأليف

د. 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 لتطوير المناهج في جلسـته رقـم (2025/2)، تاريـخ 2025/2/25 م، وقرار مجلـس التربية والتعليم رقـم (2025/46)، تاريـخ 2025/4/30 م، بـدءًا مـن العام الـدراسي 2025 / 2026 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 - 799 - 7

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

بيانات الفهرسة الأولية للكتاب:

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

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

المراجعة والتعديل

ميمي محمد التكروري
أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
موسى محمود جرادات

التحكيم الأكاديمي

أ.د. راجي عوض الصرايرة

التصميم والإخراج

نايف محمد أمين مراشدة

التحرير اللغوي

سـامـر مـازن الخطيـب

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

الطبعة الأولى (التجريبية)
1446 هـ / 2025 م

قائمة المحتويات

الموضوع .... الصفحـة

المقدّمة 5

الوحدة الأولى: الزخَمُ الخطّي والتصادُمات 7

تجربة استهلاليّة: الزخَم الخطّي 9

الدرس الأول: الزخَم الخطّي والدفع 10

الدرس الثاني: تطبيقات على حفظ الزخم الخطّي 22

الوحدة الثانية: الحركةُ الدورانيّة 41

تجربة استهلاليّة: الاتزان السكوني ومركز الكتلة 43

الدرس الأول: العزم والاتّزان السكونيّ 44

الدرس الثاني: ديناميكا الحركة الدورانية 58

الدرس الثالث: الزخَم الزاويّ 67

الوحدة الثالثة: الكهرباء السُكونية 83

تجربة استهلاليّة: تخطيط المجال الكهربائي المُنتظم 85

الدرس الأول: المجال الكهربائي 86

الدرس الثاني: الجهد الكهربائي 102

الدرس الثالث: المُوَاسعة الكهربائية 117

الوحدة الرابعة: التيّار الكهربائيّ 139

تجربة استهلاليّة: استقصاء العلاقة بين الجُهد والتيّار بين طرفي مقاومة 141

الدرس الأول: المقاومة والقوّة الدافعة الكهربائيّة 142

الدرس الثاني: الدارة البسيطة والقدرة الكهربائية 152

الدرس الثالث: توصيلُ المقاومات وقاعدتا كيرشوف 160

مسرد المصطلحات 178

جدول النسب المثلّثية 182

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، والكهرباء السكونية، والتيّار الكهربائيّ. 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

الزَخَم 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. ولحفظ الزخَم الخطّي أهمّية كبيرة في حياتنا اليومية.

الدرس الثاني: تطبيقات على حفظ الزخم الخطي.

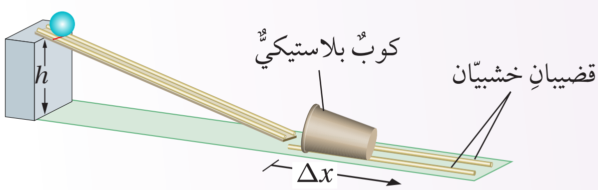
Conservation of Linear Momentum Applications

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

الزخم الخطّي

الموادّ والأدوات: كرة زجاجية أو فلزّية، كرةُ تنس، سطح خشبيّ مستوٍ أملس يحتوي 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 (h). 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، وأُدوّن الارتفاع (h).
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.

الزخَم الخطّي والدفع
Linear Momentum and Impulse

◄ **الفكرة الرئيسة:**

ترتبط مفاهيمُ الدفع والقوّة والتغير في الزخَم الخطّي بعلاقاتٍ رياضيّة. ولحفظ 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.
- 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؟

يُعرَّف **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 نفسِه. ولاحظتُ في أثناء تنفيذي التجربة الاستهلالية أن تأثيرَ جسم متحرّك في جسم آخر عند التصادم 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 التغيّر في الزخَمِ الخطّي

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

للجسم والقوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه، علمًا أنّ العالِم 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 مدّة زمنية معينة (Δt)؛ فإنّه يُمكنُ إعادة كتابة العلاقة السابقة بالصورة الآتية:

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

ينصُّ القانون الثاني لنيوتن في الحركة بحسب هذه الصيغة أنَّ: "المعدل الزمنيَّ لتغيُّر الزخَم الخطّي لجسم يساوي القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه". ويكون مُتّجه التغيُّر في الزخَم الخطّي باتّجاه القوّة المُحصّلة دائمًا.

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** (I) Impulse 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:

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

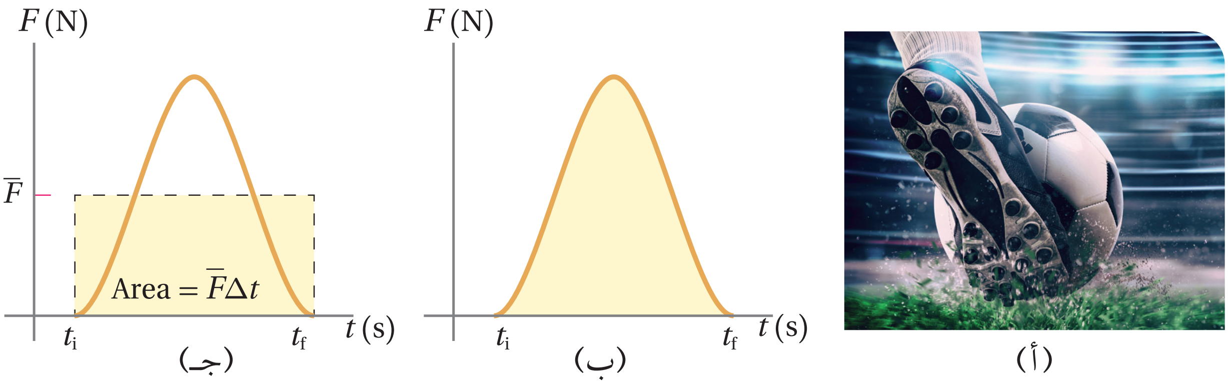
تسمّى هذه المعادلة **مبرهنةَ (الزخَم الخطّي – الدفع) Impulse – momentum theorem**، وتنصُّ على: "دفعُ قوّة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسمٍ يساوي التغيُّر في زخَمه الخطّي"، والدفعُ كمّيـة متّجهة، يكون باتّجـاه تغيُّر الزخَم الخطّي، وهو اتّجاه القوّة المُحصّلة نفسُه. وبما أن الزخَم الخطّي والدفع والقوّة كميّاتٌ مُتّجهةٌ؛ فإنّ الإشاراتِ الموجبةَ والسالبة ضروريةٌ لتحديد اتّجاهاتها، لذا؛ سنختار في هذا الدرس نظام إحداثيّاتٍ يكون فيه الاتّجاه الموجب نحو محور $(+x)$.

أفكّر: هل يُمكن أن يكون مقدار الزخم الخطّي لسيارة مساويًا مقدار الزخم الخطّي لشاحنة كبيرة كتلتها عشرة أضعاف كتلة السيارة؟ أفسر إجابتي.

أتحقّق: أُعرّف القوّة المحصّلة المؤثّرة في جسم بدلالة الزخم الخطي.

الربط بالتكنولوجيا

تنتفخ الوسادة الهوائية في أثناء حدوث تصادم لسيارة، إذ تُحفّز القوّة الناتجة عن التصادم مجسًّا يُطلق تفاعلًا كيميائيًّا ينتج عنه غاز يؤدي إلى انتفاخ الوسادة بسرعة. وتعمل الوسادة الهوائية على زيادة زمن تأثير القوّة الذي خلاله يتوقّف جسم الراكب عن الحركة، وبالتالي تقليـل مقدار القوّة المؤثّرة فيـه؛ فيقلّل ذلـك من احتمال حدوث الإصابات أو خطورتها. كما تعمل الوسادة الهوائية على توزيع القوّة على مساحة كبيرة من جسم الراكب، فيقل ضغط هذه القوة المؤثّر فيه.



الشكل (2): (أ) لاعب يركُل كرة، (ب) منحنى (القوّة – الزمن) يبيّنُ تغيُّرَ القوّة المؤثّرة في الكرة مع الزمن، (ج) القوّة المُتغيرة والقوّة المتوسطة 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 تغيُّرِ مقدارِ تلك القوّة مع الزمن أثناء مُلامَسةِ قدم اللاعب للكرة لفترةٍ زمنيّةٍ (Δt). يُحسَبُ مقدارُ الدفعِ المؤثّر في الكرةِ عن طريق إيجاد المساحة Area المحصورة بين منحنى (القوّة– الزمن) ومحور 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 بين منحنى (القوّة المتوسّطة – الزمن) ومحور 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 القوّة المُتغيّرة أثناء الفترةِ الزمنيّة نفسِها.

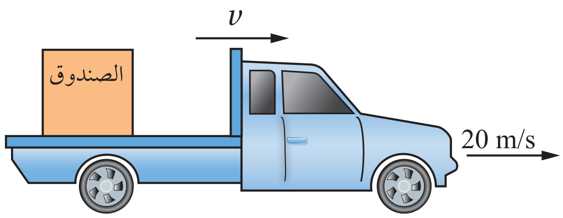
تُستخدم مُبرهنة (الزخَم الخطّي – الدفع) في توضيح نقطتين مهمتين:

1. عند ثبات القوّة المُحصّلة المؤثّرة، يزدادُ التغيُّر في الزخَم الخطّي بزيادة زمن تأثير هذه القوّة. فمثلًا؛ عند دفع عربةِ تسوّقٍ ساكنة بقوةٍ، يزدادُ التغيُّر في زخَمها الخطّي بزيادة المدة الزمنية لتأثير القوة من لحظة تحريك العربة وحتى تركها. أنظر الشكل (3/ أ).
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.

✓ **أتحقّق:** ما العلاقةُ بين دفع قوّة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسمٍ والتغيُّر في زخَمه الخطّي؟

الشكل (3):
(أ) شخص يؤثر في عربة تسوق بقوة مدةً من الزمن فيُحدث دفعًا يغير زخمها الخطّي.
(ب) يَثني المظليُّ رجليهِ لحظة ملامسة قدميه سطحَ الأرض لزيادة زمن التغيُّر في زخَمه الخطّي.

المثال 1



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

وُضعَ صندوقٌ كتلتُهُ (100 kg) في شاحنةٍ تتحرّك بسرعة (20 m/s) شرقًا، 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 ما يأتي:

أ . الزخَم الخطّي الابتدائيَّ للصُّندوق.

ب. الدفع المؤثّر في الصُّندوق.

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

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

المطلوب: $\boldsymbol{p}_i = ?,\ \mathbf{I} = ?,\ \bar{f}_s = ?$

$+x$

الحلّ:

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

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

$$p_i = mv_i = 100 \times 20$$
$$= 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}$$
$$\boldsymbol{p}_i = 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}\ ,\ +x$$

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

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

$$\text{I} = \Delta p = p_f - \text{p}_i$$
$$= mv_f - 2 \times 10^3 = 100 \times 0 - 2 \times 10^3$$
$$= -2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}$$
$$\mathbf{I} = 2 \times 10^3\ \text{kg.m/s}, -x$$

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

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

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

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

المثال 2

الشكل (5): لاعب يركل كرة قدم.

يركُل لاعبٌ كرةَ قدمٍ ساكنةً كتلتُها (0.450 kg)؛ فتنطلِقُ بسرعة (30.0 m/s) في اتّجاه محور $+x$. أنظرُ الشكل (5). إذا علمتُ أنّ القوّة المتوسّطةَ المؤثّرةَ في الكرةِ خلالَ زمنِ تلامُسِها مع قدم اللاعب يُساوي (135 N)؛ فأحسبُ 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 تأثير القوة من قدم اللاعب.

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

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

الحلّ:

أ . أحسبُ الزخَم الخطّي النهائي للكرة لحظة ابتعادِها عن قدم اللاعب.

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

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 مُبَرهنةَ (الزخَم الخطّي – الدفع) لحساب الدفع.

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

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:

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

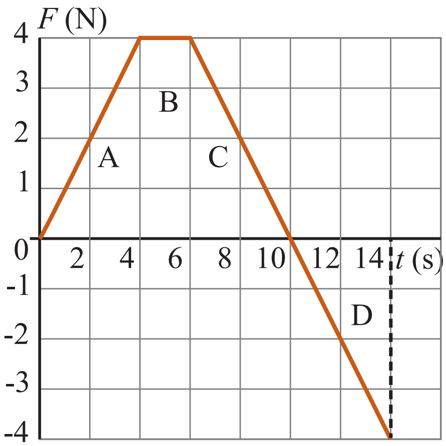
المثال 3

تؤثّر قوّةٌ محصّلةٌ باتّجـاه محور x في صندوقٍ سـاكنٍ كتلتـهُ (4 kg) مدّةً زمنيةً مقدارُها (14 s). إذا علمتُ أنّ مقدار القوّة المُحصّلة واتجاهها يتغيران بالنسبة للزمـن كما هـو مُوضّـح في منحنى (القوّة – الزمـن) في الشكل (6)؛ فأحسبُ ما يأتي:

أ . الدفع الكليّ المؤثّر في الصُّندوق نتيجةً لتأثير القوّة المُحصّلة.

ب. السرعة النهائيّةُ للصُّندوق في نهاية المدة الزمنيّة لتأثير القوّة المُحصّلة.

جـ. القوّة المتوسطة المؤثّرة في الصُّندوق خلال هذه المدة 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: $\mathbf{I} = ?,\ \boldsymbol{v}_f = ?\ ,\ \overline{F} = ?$

الحلّ:

أ. الدفعُ المؤثّر في الصُّندوق خلالَ زمن 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:

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

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

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

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

اتّجاه الدفع باتّجاه محور $+x$.

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

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

$$16 = m v_f - 0$$

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

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 $+x$.

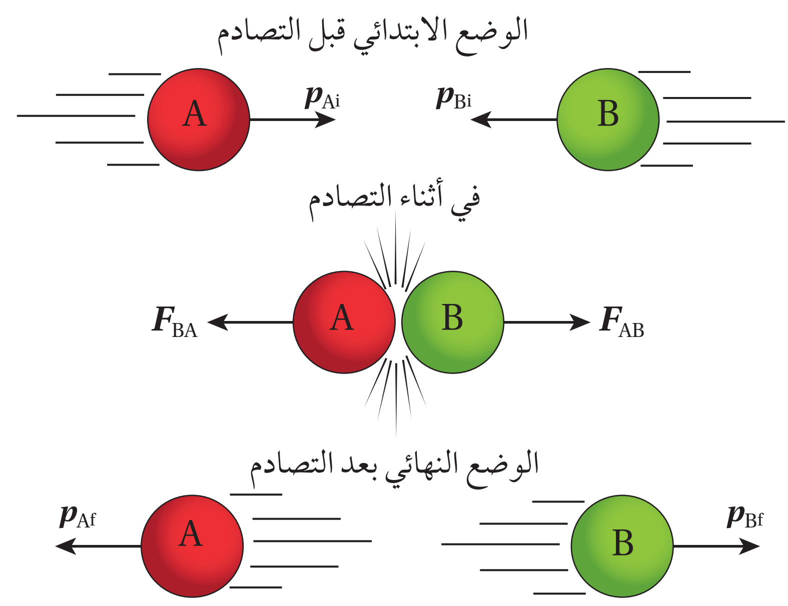
تمرين

أستخدم الأرقام: كرةُ تنسٍ كتلتُها (0.060 kg)؛ يرميها لاعبٌ إلى أعلى قليلًا، وعند بلوغها أقصى ارتفـاعٍ يضربُها أُفقيًّا بالمَضرِب؛ فتنطلـقُ بسرعـةٍ (55 m/s) في اتّجاهِ محور $+x$. أنظر الشكل (7). إذا علمتُ أنّ زمنَ تلامُس الكرة مع المَضرِب (4.0×10^{-3} s)؛ أحسبُ 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): مراحل تصادم كرتي بلياردو في بُعد واحد.

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، حيث يتحرك الجسمان قبل التصادم على امتداد الخط المستقيم نفسه، ويتصادمان رأسا برأس، وتبقى حركتهما بعد التصادم على المسار المستقيم نفسه.

أتذكّرُ أنّ النظام المعزولَ Isolated system هو النظامُ الذي تكونُ القوّةُ المُحصّلةُ الخارجيّةُ المؤثّرة فيه صفرًا، وتكونُ القوى المؤثّرةُ قوىً داخليّةً فقط. ويُعدّ النظام المُكوّن من كرتي البلياردو في الشكل (8) معزولًا؛ إذ إنّ القوى الخارجيةَ المؤثّرةَ فيه، مثلُ قوّة الاحتكاكِ تكونُ صغيرةً مُقارنةً بالقوى الداخلية المؤثرة في النظام وهي قوى الفعل ورد الفعل التي تؤثّر بها كلٌّ من الكرتين في الأُخرى في أثناء التصادُم؛ لذا نهمل قوى الاحتكاك الخارجية.

✓ **أتحقّق:** متى يمكن إهمال القوى الخارجية المؤثـرة في نظام كي يُعدّ نظامًا معزولًا؟

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 لتَلامُسِ الكُرتين. تكونُ هاتان

القُوّتانِ مُتساويتين في المقدار ومُتعاكستين في الاتّجاه؛ بحسب القانون الثالث لنيوتن في الحركة، إذ إنّهما تُمثّلان زوجي تأثيرٍ مُتبادلٍ (فعلٌ وردُّ فعلٍ)، وأُعبّر عنهما كما يأتي:

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

وبضرب طرفَي المُعادلة بالفترة الزمنية لتلامُس الكُرتين، أتوصل إلى العلاقة الآتية:

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

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

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

$$\Delta \boldsymbol{p}_{\mathrm{B}} = -\Delta \boldsymbol{p}_{\mathrm{A}}$$

أي أن:

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

وبإعادة ترتيب حدود هذه المُعادلةِ نحصلُ على معادلةِ قانونِ حفظ الزخَم الخطّي:

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

حيث $\boldsymbol{v}_{\mathrm{Ai}}$ و $\boldsymbol{v}_{\mathrm{Af}}$ تمثّلانِ السرعتينِ المُتجهتَين للجسم الأوّل قبل التصادُم وبعدَهُ مباشرةً على الترتيب، و $\boldsymbol{v}_{\mathrm{Bi}}$ و $\boldsymbol{v}_{\mathrm{Bf}}$ 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 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. وسوف نتعامل مع الأنظمة جميعها في هذه الوَحدة على أنها معزولةً.

✓ **أتحقّق**: أذكر نص قانون حفظ الزخَم الخطّي.

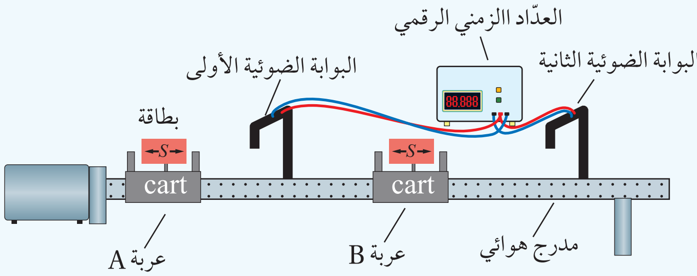
✓ **أتحقّق**: ما العلاقة بين اتّجاه الدفع المؤثّر في جسم واتّجاه التغيّر في زخمه الخطي؟

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

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 الأُخرى.

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_{Af}،t_{Bf}) في عبور البوابتين الأولى والثانية على الترتيب بعد التصادُم.

6 . أُكرّرُ الخطوة السابقة بوضع أثقالٍ على العربة A؛ بحيث تصبح كتلتُها مثلي كتلة العربة B، وأُدوّن قياسات الكتلة والزمن في الجدولين (1 و 2) للمحاولة 2 .

التحليل والاستنتاج:

1 . **أستخدم الأرقام:** أحسب السُّرعات الابتدائيّة والنهائيّة للعربتين لكلِّ محاولةٍ باستخدام العلاقة: $v = \dfrac{S}{\Delta t}$، وأُدوّن السرعات المُتّجهةَ للعربتين في الجدولين (1 و 2)، مع افتراض أنّ اتّجاه الحركة إلى اليمين موجب.

2 . **أستخدم الأرقام:** أحسب الزخمين الخطيين الابتدائي والنهائي لكلِّ عربةٍ وأدونهما في الجدول (2).

3 . **أستخدم الأرقام:** أحسب الزخَم الخطّي الكليَّ الابتدائيّ والزخَم الخطّي الكلي النهائي لنظام العربتين لكلّ محاولةٍ وأدونهما في الجدول (2).

4 . **أُقارنُ:** ما العلاقة بين الزخَم الخطّي الكُلّي الابتدائي والزخَم الخطّي الكُلّي النهائي لنظام العربتين؟ أُفسّر نتائجي.

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

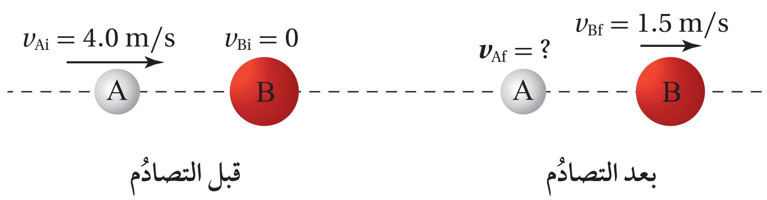
6 . **أتوقّعُ** مصادر الخطأ المُحتمَلة في التجربة.

ألاحظُ بعد تنفيذ التجربة أن الزخَم الخطّي الكُلّي لنظام العربتين قبل التصادُم يساوي الزخَم الخطّي الكُلّي لنظام العربتين بعد التصادُم. وهذ يتوافق مع قانون حفظ الزخَم الخطّي في الأنظمة المعزولة.

يُمكن أن يحتوي النظام أعدادًا 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، وفي الدرس الثاني سوف تُناقش الأنواع المختلفة للتصادمات وحفظ الزخم فيها، كما سيناقش حفظ الزخم في الانفجارات، حيث يتجزأ الجسم الواحد إلى أجزاء عدة.

المثال 4

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



الشكل (9): تصادم كرتين.

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_{Af} = ?$

الحلّ:

بتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطّي على نظام الكُرَتين.

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

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

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

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

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

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

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

مراجعة الدرس

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

2. **أستنتج**: بحسب علاقة تعريف الزخَم الخطّي $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$؛ تكون وحدةُ قياسهِ kg.m/s، وبحسب مبرهنة (الزخَم الخطّي - الدفع) تكون وحدةُ قياسهِ (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. **أُفسرُ ما يأتي:**

أ . يسند الصياد كعب بندقية الصيد إلى كتفه بإحكام عند إطلاق الرصاص.

ب. تغيّر المركبة الفضائية من مقدار سرعتها أو اتجاه حركتها عن طريق التحكم بكمية الغازات المندفعة منها واتجاه اندفاعها.

6. **أستخدم الأرقام**: تنزلق عربة (A) كتلتها (0.2 kg) على مدرج هوائي (عديم الاحتكاك) بسرعة (5 m/s) باتجاه $(+x)$، فتصطدم بعربة أخرى (B) ساكنة على المدرج كتلتها (0.6 kg). إذا كان التغير في الزخم الخطّي للعربة (A) نتيجة التصادم يساوي $(-1.6\ \text{kg.m/s})$؛ أحسب ما يأتي:

أ . سرعة كُلّ من العربتين بعد التصادم مباشرةً.

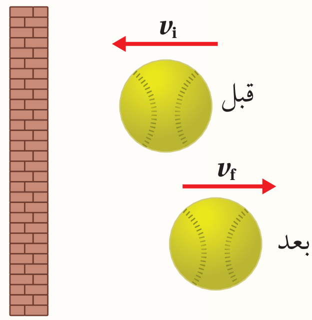
ب. زمن التلامس بين العربتين إذا كانت القوة التي أثرت بها إحدى العربتين في الأخرى (5.0 N).

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

1. أثرت قوة محصلة مقدارها (3.2 N) في جسم ساكن كتلته (4 kg) مدةً زمنيةً مقدارُها (20 s)، وحركته باتجاهها. إنّ مقدار السرعة النهائية للجسم بوحدة (m/s) يساوي:

أ . 64 ب. 16 جـ. 4 د . 0.04

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

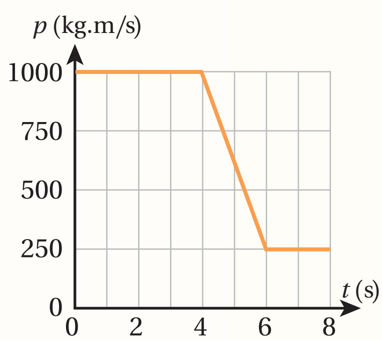


أ. 80
ب. 30
جـ. 20
د. 5

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

أ. $\Delta P_2 > \Delta P_1 , \Delta t_2 > \Delta t_1$
ب. $\Delta P_2 < \Delta P_1 , \Delta t_2 < \Delta t_1$
جـ. $\Delta P_2 = \Delta P_1 , \Delta t_2 > \Delta t_1$
د. $\Delta P_2 > \Delta P_1 , \Delta t_2 < \Delta t_1$

* يبين الشكل المجاور تمثيلًا بيانيًا لزخم دراجة هوائية متحركة خلال مدّة (8.0 s). عند اللحظة ($t = 4.0$ s) استخدم راكب الدراجة المكابح. معتمدًا على الرسم البياني، أجيب عن الفقرتين الآتيين:



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

أ. 125 N
ب. 250 N
جـ. 375 N
د. 750 N

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

أ. 15 m/s
ب. 10 m/s
جـ. 8 m/s
د. 5 m/s

الدرس 2

تطبيقات على حفظ الزخم الخطي

Conservation of Linear Momentum Applications

الفكرة الرئيسة:

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

نتاجات التعلّم:

- أُصنّف التصادُمات إلى مَرِنةٍ وغير مرنة وفقًا للتغيُّرات التي تطرأ على الطاقة الحركية للأجسام المُتصادمة.
- أُفسّر التغيّر في الطاقة الحركيّة في أثناء التصادُم في ضوء انتقال الطاقة وتحوُّلاتها ومبدأ حفظ الطاقة.
- أفسر مبدأ عمل تطبيقات عملية تقلل من الأضرار الناتجة عن تصادم جسمين.
- أُطبّق بحلّ مسائلَ على التصادُمات.

المفاهيم والمصطلحات:

تصادُم مرنٌ Elastic Collision

تصادُم غير مرنٍ Inelastic Collision

الطاقة الحركية والزخم الخطي في الأنظمة المعزولة

Kinetic Energy and Linear Momentum in Isolated Systems

تعلمت أن الجسم المتحرك يمتلك زخمًا خطيًّا، كذلك تعلمتُ في صفوف سابقة أن الجسم المتحرك يمتلك طاقة حركة انتقالية، تعتمد على كل من كتلة الجسم، ومقدار سرعته، و يعبر عنها بالمعادلة الآتية:

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

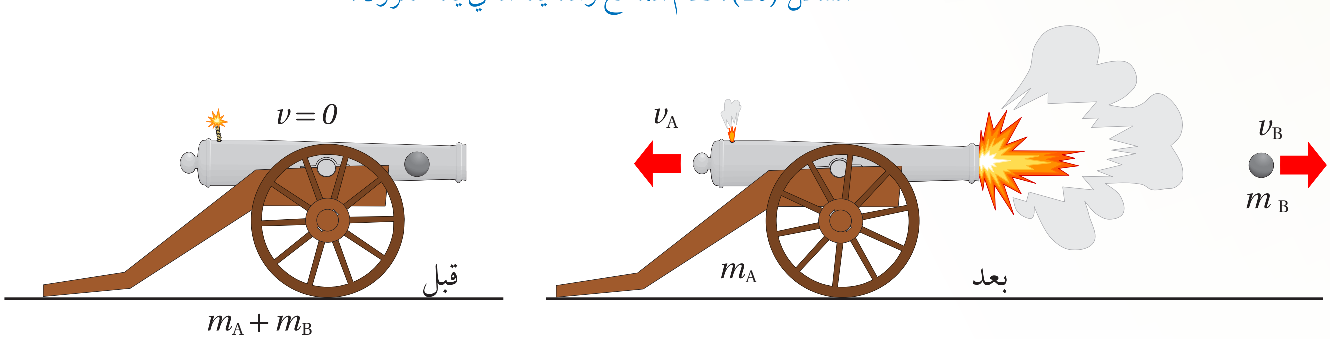
في الأنظمة المعزولة يكون الزخم الخطي محفوظًا، أما الطاقة الحركية فلا تكون محفوظة دائمًا. في هذا الدرس سأتعرف على كيفية تطبيق قانون حفظ الزخم، وكيفية حساب التغير في الطاقة الحركية لنوعين من الأنظمة المعزولة؛ الأول: تفكّك جسم إلى جسمين مثل إطلاق مدفع لقذيفة، وانفصال صاروخ فضائي إلى جزأين خلال مراحل حركته. أما النوع الثاني فيخصّ التصادمات.

حفظ الزخم الخطي عند إطلاق قذيفة

Linear Momentum Conservation when Firing a Shell

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

الشكل (10): نظام المدفع والقذيفة الذي يُعدّ معزولًا.



بعد الانفجار، يكون الزخم الخطّي الكُلّي للنظام مساويًا للزخم الخطي الكلي قبل الانفجار؛ ويساوي صفرًا. ومع ذلك فإن طاقة الحركة للنظام ليست محفوظة. إذ يكتسب النظام مقدارًا كبيرًا من طاقة الحركة بعد الانفجار؛ هذه الزيادة في طاقة الحركة للنظام مصدرها الطاقة الناتجة عن الانفجار نفسه.

في الأنظمة المعزولة التي يكون فيها الجسم مُتحركًا قبل الانقسام (انفصال صاروخ إلى جزأين مثلا)، يكون الزخم الخطي محفوظًا أيضًا، ويمتلك النظام طاقةً حركيةً قبل الانقسام، وبعد الانقسام يزداد مقدار هذه الطاقة عمّا كان عليه قبل الانقسام.

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

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

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

المثال 5

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

أ . الدفعُ الذي تؤثّر به القذيفة في المدفع.

ب. سرعة ارتداد المدفع.

المعطيات: أفترض رمز المدفع A ورمز القذيفة B.

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

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

الحلّ:

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.

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

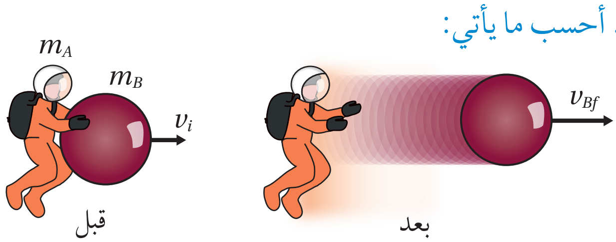
بما أن السرعة النهائيّة للمدفع (A) سالبةٌ، فهذا يعني أن اتّجاه سرعته باتّجاه محور $-x$.

المثال 6

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

أ . سرعة رائد الفضاء بعد قذفه للجسم.

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



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

المعطيات: $m_{\mathrm{A}} = 80\ \mathrm{kg},\ m_{\mathrm{B}} = 40\ \mathrm{kg},\ v_{\mathrm{i}} = 6\ \mathrm{m/s},\ v_{\mathrm{Bf}} = 21\ \mathrm{m/s}$

المطلوب: $v_{\mathrm{Af}} = ?,\ \Delta KE = ?$

الحلّ:

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

$$\Sigma p_{\mathrm{i}} = \Sigma p_{\mathrm{f}}$$

$$(m_{\mathrm{A}} + m_{\mathrm{B}})\ v_{\mathrm{i}} = m_{\mathrm{A}}\, v_{\mathrm{Af}} + m_{\mathrm{B}}\, v_{\mathrm{Bf}}$$

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

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

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

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

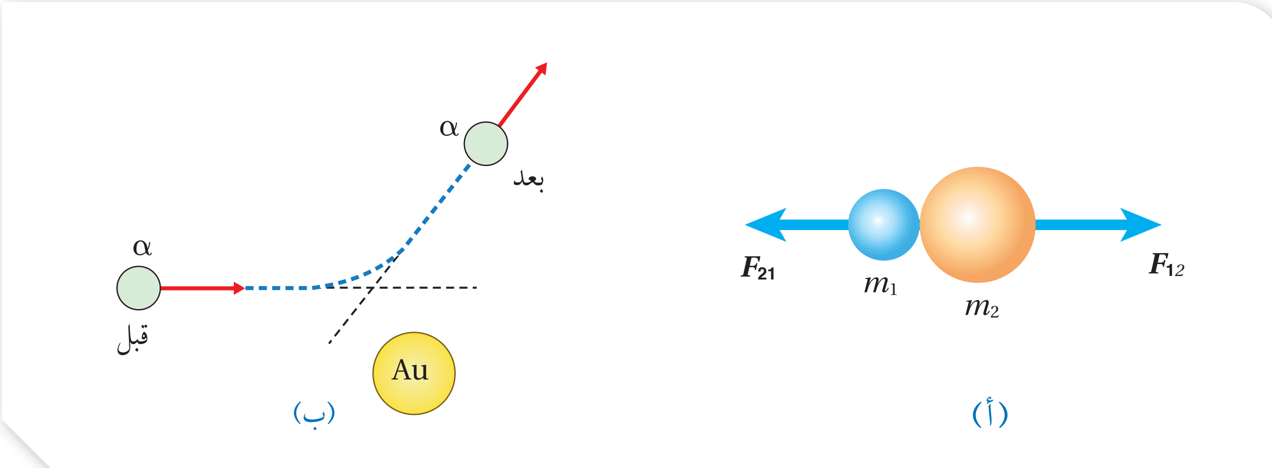
ب. التغير في الطاقة الحركية:

$$\Delta KE = \frac{1}{2}\, m_{\mathrm{A}}(v_{\mathrm{Af}})^2 + \frac{1}{2}\, m_{\mathrm{B}}\, (v_{\mathrm{Bf}})^2 - \frac{1}{2}\, (m_{\mathrm{A}} + m_{\mathrm{B}})\ (v_i)^2$$

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

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

نستنتج من الإشارة الموجبة للتغير في الطاقة الحركية أن النظام اكتسب طاقة حركية إضافية مصدرُها شغل قوة عضلات رائد الفضاء؛ وهي قوة داخلية في النظام.



الشكل (13):
(أ) تصادُم جسمين على المستوى الجاهريّ.
(ب) تصادم جسيمين مشحونين على المستوى دون الجاهريّ. (الشكل ليس ضمن مقياس رسم).

الطاقة الحركية والزخم الخطي في التصادمات
Kinetic Energy and Linear Momentum in Collisions

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

تعرفت أنّ الزخم الخطي محفوظ دائمًا في الأنظمة المعزولة، فعند تصادم الأجسام بعضها ببعض؛ يكون مجموع الزخم الخطّي لمكونات النظام قبل التصادم يساوي مجموع الزخم الخطّي لهما بعد التصادم.

تختلف طاقة الحركة في التصادمات عن الزخم الخطّي؛ إذ أنها ليست محفوظةً دائمًا، مع أن النظام يكون معزولًا والزخم الخطّي الكُلّي له يكون محفوظًا. عدم حفظ الطاقة الحركية يعني أنّ جزءًا منها تحوّل إلى شكل أو أشكال أخرى من الطاقة، مثل الطاقة الحرارية أو الصوتية أو المرونية، وهذا يُحقّق مبدأ حفظ الطاقة العام عندما تتحول من شكل إلى آخر. وتأسيسًا على حفظ الطاقة الحركية أو عدمه؛ تُصنف التصادمات إلى نوعين رئيسين، هما:

الشكل (14): تصادم كرات البلياردو.

التصادُم المَرن Elastic Collision

في **التصادُم المَرن Elastic collision** يكونُ مجموع طاقة الحركة لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقة الحركة لها بعد التصادُم؛ أي أنّ طاقة الحركة للنظام محفوظةٌ. ومن الأمثلة عليها التصادُمات بين كرات البلياردو، كما في الشكل (14)، 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:

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

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

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

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

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

$$m_{\mathrm{A}}(v_{\mathrm{Ai}} - v_{\mathrm{Af}}) = m_{\mathrm{B}}(v_{\mathrm{Bf}} - v_{\mathrm{Bi}})$$

وكتابة معادلة حفظ الطاقة الحركية على الصورة:

$$m_{\mathrm{A}}(v_{\mathrm{Ai}}^2 - v_{\mathrm{Af}}^2) = m_{\mathrm{B}}(v_{\mathrm{Bf}}^2 - v_{\mathrm{Bi}}^2)$$

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

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

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

❋ اشتقاق العلاقة غير مطلوب

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 (15). أحسبُ سرعة الكرة (B) بعد التصادُم.

الشكل (15): تصادم مرن لكرتين في بُعد واحد.

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

المطلوب: $v_{Bf} = ?$

الحلّ:

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:

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

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

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

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

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

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

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

بحل المعادلتين (1)، (2) بالحذف:

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

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

نتوصل إلى أن:

$$2v_{Bf} = 4$$

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

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.

التصادُم غيرُ المَرن Inelastic Collision

في **التصادُم غيرِ المرن Inelastic collision** لا يكونُ مجموع طاقة الحركة لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقة الحركة لها بعد التصادُم؛ أي أنّ طاقة الحركة 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 (16). 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 (16): يُعد تصادم كرة مطاطية بالمضرب تصادمًا غير مرن.

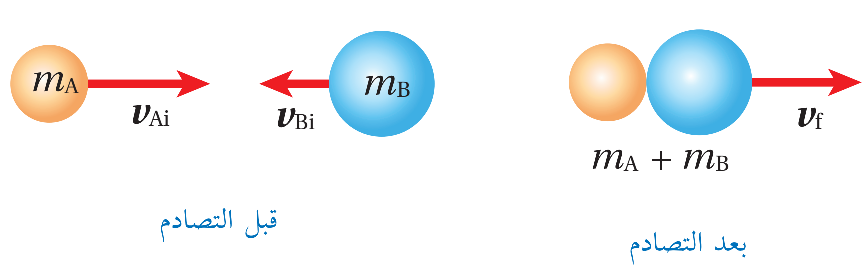
ويوصَفُ التصادُم غيرُ المَرن بأنه **تصادُمٌ عديم المرونة Perfectly inelastic collision** عندما تلتحم الأجسام المتصادمة معًا بعد التصادُم، لتصبح جسمًا واحدًا تساوي كتلتهُ مجموع كتل الأجسام المتصادمة. ومثالُ ذلك ما يحدث عند اصطدام كُرَتي صلصالٍ معًا، أو اصطدام سيارتين وتحرُّكهما معًا بعد التصادُم. وأحسبُ مقدار السرعة النهائية لتصادُمٍ عديم المرونة بين جسمين، كما هو موضّحٌ في الشكل (17)، بتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطّي على النظام المُكوّن منهما كما يأتي:

$$m_A \boldsymbol{v}_{Ai} + m_B \boldsymbol{v}_{Bi} = (m_A + m_B)\boldsymbol{v}_f$$

$$\boldsymbol{v}_f = \frac{m_A \boldsymbol{v}_{Ai} + m_B \boldsymbol{v}_{Bi}}{m_A + m_B}$$

أفكّر: عند تصادم جسمين في بُعد واحد تصادمًا عديم المرونة، ما الشرط الضروري لتُفقد الطاقة الحركية الابتدائية للنظام جميعها بعد الاصطدام؟

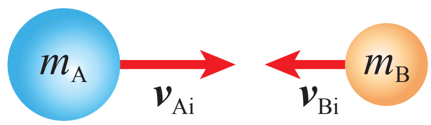
✓ **أتحقّق:** أقارن -في جدول- بين التصادم المرن، والتصادم غير المرن، والتصادم عديم المرونة في الأنظمة المعزولة، من حيث: حفظ الزخم الخطّي، حفظ الطاقة الحركية، التحام الأجسام بعد التصادُم.



الشكل (17): تصادم عديم المرونة بين جسمين.

المثال 8

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 (18). بعد التصادُم تحرّكت الكرة (B) بسرعةٍ (2.0 m/s) باتجاه محور $+x$. إذا علمتُ أن ($m_A = 5.0$ kg, $m_B = 3.0$ kg)، فأُجيبُ عمّا يأتي:



الشكل (18): تصادم كرتين في بُعد واحد.

أ . أحسبُ سرعة الكرة (A) بعد التصادُم.

ب. أُحدّد نوع التصادُم.

المعطيات:

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

المطلوب:

$v_{Af} = ?$

الحلّ:

أ. أُطبق قانونَ حفظ الزخَم الخطّي على نظام الكرتين.

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

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

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

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

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.

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

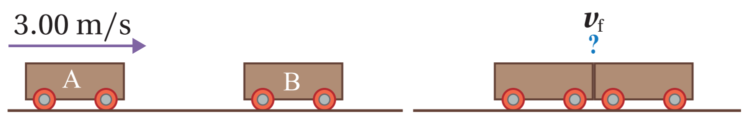
$$\Delta KE = \frac{1}{2} \times \left[5.0 \times (3.0)^2 + 3.0 \times (2.0)^2\right] - \frac{1}{2} \times \left[5.0 \times (6.0)^2 + 3.0 \times (3.0)^2\right]$$

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

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 9

عربة قطارٍ (A) كتلتُها $(1.80 \times 10^3\ \text{kg})$ تتحرّك في مسارٍ أُفقيٍّ مستقيم لسكة حديدٍ بسرعةٍ $(3.00\ \text{m/s})$ باتّجاه محور $+x$، فتصطدم بعربة أُخرى (B) كتلتُها $(2.20 \times 10^3\ \text{kg})$ 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 سرعة عربتي القطار بعد التصادُم.

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

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_f = ?$

الحل:

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 يوجد نقص في الطاقة الحركية، والعربتان التحمتا معًا بعد التصادُم، لذا؛ فإن التصادُمَ عديم المرونة.

تمرين

أستخدم الأرقام: تتحرك عربة قطار (A) في مسار أفقي مستقيم بسرعة (2.00 m/s) شرقًا فتصطدم بعربة (B) تتحرك على المسار نفسه بسرعة (1.00 m/s) غربًا، وتلتحمان معا. إذا علمت أن ($m_A = m_B = 5000\ kg$)، أحسب الطاقة الحركية المفقودة في التصادم.

تطبيق: البندول القذفيّ

البندول القَذفِيّ Ballistic pendulum يُستخدم لقياس مقدارِ سُرعة مقذوفٍ، مثل الرصاصة. إذ تُطلق رصاصةٌ كتلتُها (m_A) باتّجاه قالب كبير ساكن من الخشب كتلته (m_B)، مُعلّق رأسيًا بخيطين خفيفين. فتخترق الرصاصة قطعة الخشب وتستقرُّ داخلَها، ويتحرّك النظام المُكوّن منهما كجسم واحد، ويرتفع إلى أقصى مسافةً رأسيّةً (h). أنظرُ الشكل (20). ويمكن حسابُ مقدار سرعة الرصاصة قبل اصطدامها بقطعة الخشب بمعرفة مقدار (h).

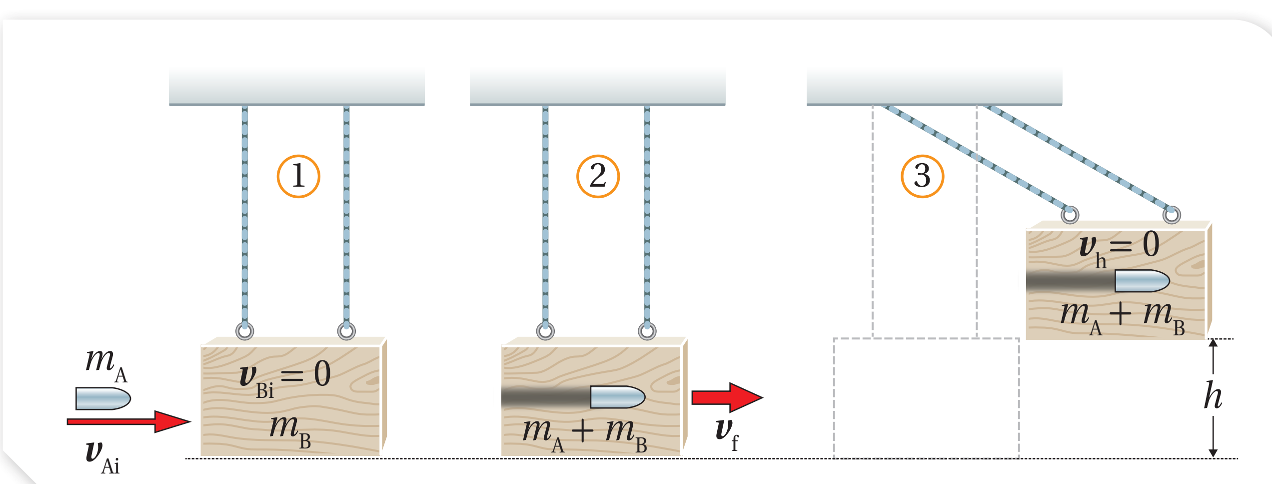
سوف أستخدم الرقم (1) ليُمثّل النظام قبل التصادُم مباشرةً، والرقم (2) ليُمثّل النظام بعد التصادُم مباشرةً عندما تتحرك قطعة الخشب و الرصاصة بالسرعة نفسها، أما الرقم (3) فيمثّل النظام عند أقصى ارتفاع (h). وألاحظ من الشكل (20) أنّ اتّجاه حركة النظام المُكوّن من قطعة الخشب والرصاصة بعد التصادُم مباشرةً يكون باتّجاه حركة الرصاصة نفسه قبل التصادُم؛ أي باتّجاه محور ($+x$) أطبّق قانون حفظ الزخَم الخطّي على النظام قبل التصادُم مباشرةً وبعد التصادُم مباشرةً كما يأتي:

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

وبإعادة ترتيب المعادلة، فإن السرعة الابتدائية للرصاصة تعطى بالعلاقة:

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

الشكل (20): تحرّك البندول القذفي جانبيًا بعد اختراق الرصاصة له.



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

$$ME_2 = ME_3$$

$$KE_2 + PE_2 = KE_3 + PE_3$$

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

$$v_f^2 = 2g\,h \longrightarrow v_f = \sqrt{2g\,h}$$

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

المثال 10

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 ($10\ m/s^2$)، وبإهمال القوى الخارجية، أُجيبُ 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 التصادم. كما تكونُ الطاقة الميكانيكيّة محفوظةً للبندول والسهم بدءًا من حركتهما معًا بعد التصادُم مباشرة من الموضع (2)، وحتى وصولهما إلى أقصى ارتفاع في الموضع (3).

جـ. أحسبُ مقدار السرعة النهائية للنظام (بعد التصادم مباشرة) بتطبيق قانون حفظ الطاقة الميكانيكية عند انتقال النظام من الموضع (2) إلى الموضع (3):

$$KE_2 + PE_2 = KE_3 + PE_3$$

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

$$v_f = \sqrt{2g\,h} = \sqrt{2 \times 10 \times 0.2} = 2\ \text{m/s}$$

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

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

$$v_{Ai} = \frac{(m_A + m_B)v_f}{m_A} = \frac{(0.72 + 0.03) \times 2}{0.0.03} = 50\ \text{m/s}$$

تمرين

1. **أستخدم الأرقام:** 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. 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 الكُرتين الخارجيّتين نحو الخارج ثم إفلاتها؛ فإنّها تصطدم تصادمًا مرنًا بالكرة التي كانت مجاورة لها، أُلاحظ أنّ الكرة الخارجية على الجانب الآخر من اللعبة تقفز في الهواء.

أ . **أُفسّر** ما 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.

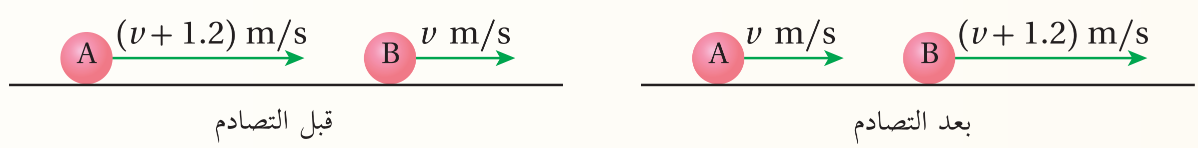
3. **أستنتج**: تصادَم جسمان تصادُمًا مرنًا. أُجيب عمّا يأتي:

أ . هل يتساوى الزخَم الخطّي لكلّ جسمٍ قبل التصادُم مع زخَمه الخطّي بعد التصادُم؟ أُفسّر إجابتي.

ب. هل تتساوى الطاقة الحركية لكلّ جسمٍ قبل التصادُم مع طاقته الحركية بعد التصادُم؟ أُفسّر إجابتي.

4. **أستخدم الأرقام**: 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 كتلة الكرة الثانية.

5. **أستنتج**: 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.

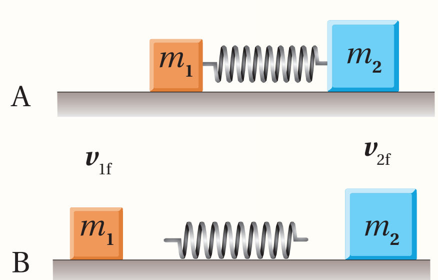


6. **أُصدر حُكمًا**: تتحرّك شاحنة غربًا بسرعةٍ ثابتة؛ فتصطدم تصادمًا عديم المرونة مع سيارةٍ صغيرةٍ تتحرّك شرقًا بمقدار سرعة الشاحنة نفسه. أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّهما يكون التغير في مقدار زخمها الخطّي أكبر؛ الشاحنة أم السيارة؟

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

7. **أستنتج**: وضعت إسلام نابضًا خفيفًا مضغوطًا بين صندوقين كتلتيهما m_1 و m_2 موضوعين على سطح أفقي أملس، كما هو مبيّن في الشكل A. لحظة إفلات إسلام الصندوقين، تحركتا باتجاهين متعاكسين كما في الشكل B. إذا علمت أنّ $m_2 = 2m_1$، فأجد ما يأتي:

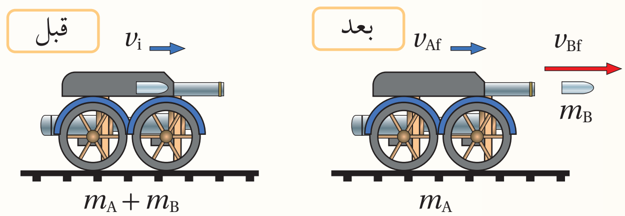


1. نسبة مقدار سرعة الصندوق الأول إلى مقدار سرعة الصندوق الثاني لحظة ابتعاد كلّ منهما عن النابض.

2. نسبة طاقة الحركة للصندوق الأول إلى طاقة الحركة للصندوق الثاني.

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

1. عربة مدفع كتلتها والقذيفة بداخلها (500 kg) تتحرك على سكة حديد أفقية، كما في الشكل. أطلقت العربة قذيفةً كتلتها (20 kg) بسرعة (200 m/s) شرقًا، فأصبحت سرعة العربة بعد الإطلاق (5 m/s) شرقًا.



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

أ . (3.2)   ب. (8.5)   جـ. (12.8)   د. (13)

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

أ . (0.4) غربًا.   ب. (0.4) شرقًا.   جـ. (4.4) غربًا.   د. (4.4) شرقًا.

* كرة (A) كتلتها (0.8 kg) تتحرك بسرعة (5 m/s) شرقًا؛ اصطدمت بكرة ساكنة (B) كتلتها (2.4 kg) تصادمًا مرنًا. فأجيب عن الفقرتين الآتيتين:

3. سرعة الكرة (B) بعد التصادم مباشرة بوحدة (m/s):

أ . (2.5) شرقًا.   ب. (7.5) شرقًا.   جـ. (2.5) غربًا.   د. (7.5) غربًا.

4. طاقة حركة الكرة (B) بعد التصادم مباشرة بوحدة جول (J) تساوي:

أ . (2.5).   ب. (5).   جـ. (7.5).   د. (10).

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

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

أ . ($\frac{1}{3}v$) باتجاه ($+x$).   ب. ($\frac{1}{3}v$) باتجاه ($-x$).

جـ. (v) باتجاه ($+x$).   د . (v) باتجاه ($-x$).

6. الطاقة الحركية للنظام المكوّن من العربتين قبل التصادم بدلالة كل من (m) و (v) تساوي:

أ . ($\frac{1}{2}mv^2$).   ب. ($\frac{2}{3}mv^2$).   جـ. (mv^2).   د. ($\frac{3}{2}mv^2$).

تصميم السيارة والسلامة
Car Design and Safety

تصادم رأس برأس في اختبار تصادم.

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

يوجد في مقدّمة السيارة ونهايتها مناطق انهيار (ماصّات صدمات Crumple zones)؛ تنبعج وتتشوّه بطريقةٍ يحدث 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 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 (فهو يعتمد على كتلة الراكب وسرعة السيارة سواءً استخدم حزام الأمان أم لم يستخدمه)؛ فإنّ مقدار القوّة المُؤثّرة فيه يصبح أقلَّ نتيجةَ زيادة زمن توقف جسم الراكب. 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 في جسمه لإيقافه عندما لا يستخدم الحزام.

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 وثُبِّتت 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.

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

1. كلّما زاد زمن تأثير قوّة (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.

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

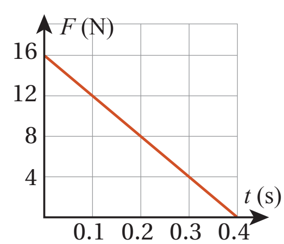
أ . إنقاص معدل تغير الزخم الخطي. ب. إنقاص التغير في الزخم الخطي.

جـ. زيادة معدل تغير الزخم الخطي. د. زيادة التغير في الزخم الخطي.

3. 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. 18×10^4 N.s جـ. 0 N.s د. -9×10^4 N.s

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



أ . الدفع (0.4 N.s)، والقوة المتوسطة (4 N) .

ب. الدفع (3.2 N.s)، والقوة المتوسطة (8 N).

جـ. الدفع (4.6 N.s)، والقوة المتوسطة (4 N).

د . الدفع (12.8 N.s)، والقوة المتوسطة (8 N).

5. 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. $p_A > p_B, KE_A > KE_B$

6. رُميَتْ كرةٌ كتلتُها m أُفقيًّا بسرعة مقدارها v نحو جدار؛ فارتدّت أُفقيًّا بمقدار السرعة نفسه. بإهمال تأثير الجاذبية فإنّ مقدار التغيُّر في الزخَم الخطّي للكرة يساوي:

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

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

أ . (350) شرقًا. ب. (350) غربًا. جـ. (375) شرقًا. د. (375) غربًا.

* أُسقطت كرة كتلتها (0.2 kg) نحو الأسفل فاصطدمت بسطح الأرض بسرعة (4 m/s)، وارتدّت إلى الأعلى بسرعة (3 m/s)، معتمدًا على هذه البيانات؛ أجيب عن الفقرتين الآتيتين:

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

أ . (0.2) إلى الأسفل. ب. (0.2) إلى الأعلى. جـ. (1.4) إلى الأسفل. د. (1.4) إلى الأعلى.

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

أ . (−0.7) ب. (0.7) جـ. (1.6) د. (−1.6)

10. 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 سرعة الكرة (B) بعد التصادم تساوي:

أ . 2 m/s شرقًا. ب. 2 m/s غربًا. جـ. 1 m/s شرقًا. د. 1 m/s غربًا.

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

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

12. تقفز شذى من قاربٍ ساكنٍ على سطح الماء كتلته (300 kg) إلى الشاطئ بسرعةٍ أفقيّةٍ مقدارُها (3 m/s). إذا علمتُ أن كتلة شذى (50 kg) فما سرعة القارب؟

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.

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

13. ما سرعة الشاحنة قبل التصادم مباشرةً؟

أ . (5 m/s) شرقًا. ب. (4 m/s) شرقًا. جـ. (5 m/s) غربًا. د. (4 m/s) غربًا.

14. ما الزخم الخطّي الكُلّي للنظام المُكوّن من الشاحنة والسيارة قبل التصادم؟

أ . (-10×10^3 kg.m/s). ب. (10×10^3 kg.m/s).

جـ. (-30×10^4 kg.m/s). د. (30×10^4 kg.m/s).

15. ما التغير في الطاقة الحركية للنظام نتيجة التصادم؟

أ . (90×10^3 J). ب. (-90×10^3 J). جـ. (40×10^3 J). د. (-40×10^3 J).

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.

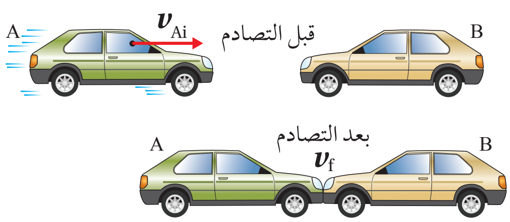
3. يقف صيّاد على سطح قاربٍ صيدٍ ساكنٍ على سطح الماء، ثم يتحرك من نهاية القارب نحو مقدمته. أُجيب عمّا يأتي:
أ . **أُفسّر:** هل يتحرك القارب أم لا؟ أُفسّر إجابتي.
ب. **أُقارن** بين مجموع الزخَم الخطّي للقارب والصيّاد قبل بدء حركة الصيّاد وبعد حركته.

4. **أقارن:** 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. **أستخدم الأرقام:** تتحرّك سيارةٌ كتلتها $(1.35 \times 10^3\ \mathrm{kg})$ بسرعة $(15\ \mathrm{m/s})$ شرقًا، فتصطدم بجدارٍ وتتوقف تمامًا خلال فترة زمنيّةٍ $(0.115\ \mathrm{s})$، **فأحسبُ** ما يأتي:
أ . التغيُّر في الزخَم الخطّي للسيارة.
ب. القوّة المتوسطة التي يؤثر بها الجدار في السيارة.

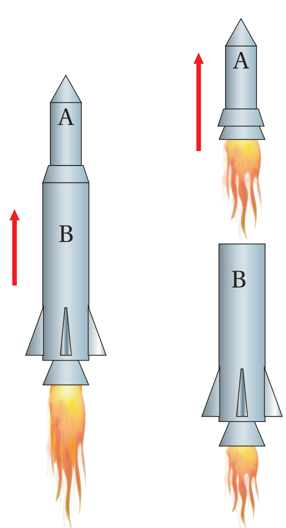
7. **أستخدم الأرقام:** السيارة (A) كتلتها $(1.1 \times 10^3\ \mathrm{kg})$ تتحرّك بسرعة $(6.4\ \mathrm{m/s})$ باتّجاه محور $+x$، فتصطدم رأسًا برأس بسيارةٍ ساكنةٍ (B) كتلتها $(1.2 \times 10^3\ \mathrm{kg})$؛ وتلتحم السيارتان معًا بعد التصادُم وتتحرّكان على المسار المستقيم نفسه قبل التصادُم، كما هو موضح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

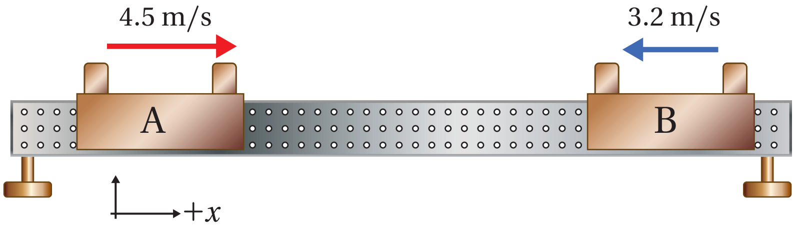


تصادم سيارتين

8. **أستخدم الأرقام:** أثّرت قوّة محصلة مقدارها $(1 \times 10^3\ \mathrm{N})$ في جسم ساكن كتلته $(10\ \mathrm{kg})$ وحرّكته باتّجاهها مدّة زمنيةً $(0.01\ \mathrm{s})$. أحسبُ مقدار ما يأتي:
أ . التغيُّر في الزخَم الخطّي للجسم.
ب. السرعة النهائية للجسم.

9. **أستخدم الأرقام:** صاروخ فضائي كتلته $(3600\ \mathrm{kg})$، في المرحلة الأولى من حركته انطلق إلى الأعلى بسرعة $(4900\ \mathrm{km/s})$، ثم بدأت المرحلة الثانية لحركته بانفجار صغير فصل الصاروخ إلى جزأين (A, B)؛ العلوي (A) كتلته $(1200\ \mathrm{kg})$، وواصل حركته إلى الأعلى بسرعة $(5700\ \mathrm{km/s})$. بافتراض أن النظام معزول؛ أجد ما يأتي:
أ . سرعة الجزء السفلي (B) من الصاروخ بعد الانفصال مباشرةً.
ب. التغير في الطاقة الحركية للنظام، مفسرًا مصدر هذا التغيُّر.





10. أستنتج: عربتان (A و B)، تنزلقان باتّجاهين متعاكسين على مسار أُفقي مستقيم أملس كما هو موضح في الشكل، فتصطدمان رأسًا برأس وترتدان باتّجاهين متعاكسين على المسار المستقيم نفسه. إذا علمتُ أنّ كتلة العربة A تساوي (0.28 kg)، وسرعة العربتين بعد التصادُم مباشرةً: $(v_{Af} = -1.9\ m/s)$ و $(v_{Bf} = 3.7\ m/s)$، فأُجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ كتلة العربة (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. أستخدم الأرقام: أطلقت مريمُ سهمًا كتلته (0.20 kg) أُفقيًا بسرعة (15 m/s) باتّجاه الغرب نحو هدف ساكن كتلته (5.8 kg)، فاصطدم به واستقرّ فيه وتحرّكا كجسم واحد نحو الغرب. أحسبُ ما يأتي:

أ . سرعة النظام (السهم والهدف) بعد التصادُم.

ب. التغيُّر في الطاقة الحركية للنظام.

12. أستخدم الأرقام: تتحرك كرة زجاجية كتلتها (1.0 kg) باتّجاه الغرب بسرعة (0.5 m/s)، فتصطدم رأسًا برأس بكرة زجاجية أخرى كتلتها (2.0 kg) تتحرك بسرعة (0.4 m/s) شرقًا. بعد التصادُم ارتدّت الكرة الأولى شرقًا بسرعة (0.7 m/s).

أُجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ سرعة الكرة الثانية بعد التصادُم.

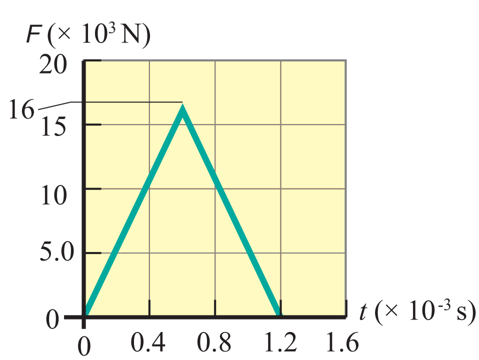
ب. أُحدّد نوع التصادُم.

13. أستنتج: يوضح الشكل المجاور منحنى (القوّة – الزمن) للقوة المُحصّلة المؤثّرة في كرة بيسبول كتلتها (145 g) في أثناء زمن تلامسها مع المضرب. مستعينا بالمنحنى أحسب مايأتي، بإهمال وزن الكرة:

أ. الدفع المؤثّر في الكرة نتيجة تلامسها مع المضرب.

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

جـ. 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، 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 الأبواب 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: تُوصَف الحركة الدورانية باستخدام مفاهيم خاصة منها: الإزاحة الزاويّة، والسرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ، والعلاقات بينها.

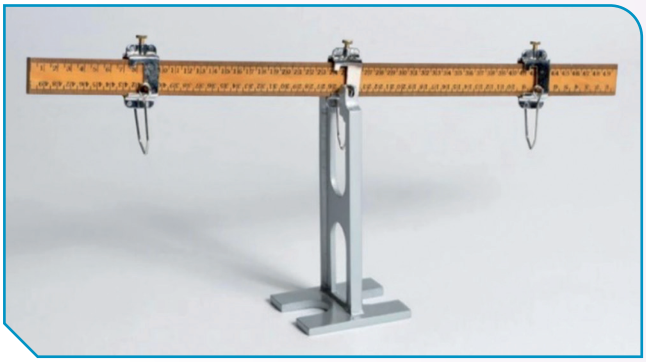
الدرس الثالث: الزخَم الزاويّ

Angular Momentum

الفكرة الرئيسة: للزخم الخطي نظيرٌ في الحركة الدورانية يُسمى الزخم الزاويّ، ويكون الزخم الزاويّ محفوظًا في الأنظمة المعزولة؛ حيث العزم المحصل المؤثر في الجسم يساوي صفرًا.

تجربة استهلاليّة

الاتّزان السكوني ومركز الكتلة



المـواد والأوات: مسطرة متريـة، ثقلان كتلتاهما (150 g) و (250 g)، خطافان لتعليق الكتل، ميزان إلكتروني، حامل فلزي (نقطة ارتكاز).

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأثقال على القدمين.

خطوات العمل:

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

2 أثبت المسطرة على الحامل الفلزي ، وأُحرّكها يمينًا ويسارًا، إلى أن تتزن بوضع أفقي، وأضع إشارة على المسطرة عند موقع الاتّزان؛ من المفترض أن تتّزن المسطرة عند منتصفها (عند التدريج 50 cm)، تسمى هذه النقطة مركز كتلة المسطرة.

3 أُعلّق ثقلًا كتلته (150 g) عند التدريج (20 cm)، وألاحظ اتجاه ميلان المسطرة. أُحرّك نقطة الارتكاز إلى أن تستعيد المسطرة وضع الاتزان، أضع إشارة عند هذه النقطة وأرمز لها بالرمز (O).

4 أُعلّق ثقلًا إضافيًا كتلته (250 g) عند التدريج (70 cm)، وأُكرّرُ الخطوة السابقة؛ لإيجاد موقع نقطة الارتكاز (O) الذي يحقق الاتّزان للمسطرة.

التحليل والاستنتاج

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

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

3 . **أُصدر حُكمًا:** معتمدًا على المخططات التي رسمتُها، ماذا أستنتج عن موقع نقطة الارتكاز التي تحقق الاتّزان للنظام؟

◀ الفكرة الرئيسة:

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

◀ نتاجات التعلّم:

- أُعرّف التأثيرَ الدورانيّ للقوّة على جسم (العزم).
- أُحدّد مركز الكتلة لجسم مُنتظم الشكل وجسم غير مُنتظم الشكل عمليًّا.
- أُحدّد مركز الكتلة لنظام يتكون من جسمين 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

نشاهد في حياتنا اليومية 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 ($\boldsymbol{\tau}$)، ويُعرّف رياضيًّا بأنه يُساوي ناتج الضرب المُتّجهيّ لمُتّجه القوّة ($\boldsymbol{F}$) ومُتّجه موقع نقطة تأثير القوّة ($\boldsymbol{r}$) 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:

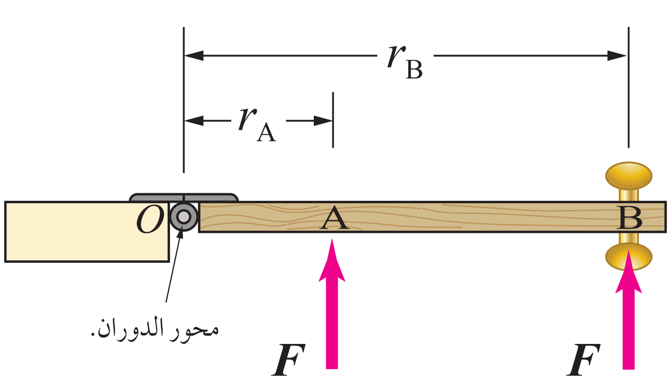
$$\tau = r\,F \sin\theta$$

حيث (θ) الزاوية المحصورة بين المُتّجهين $\boldsymbol{r}$ و $\boldsymbol{F}$.

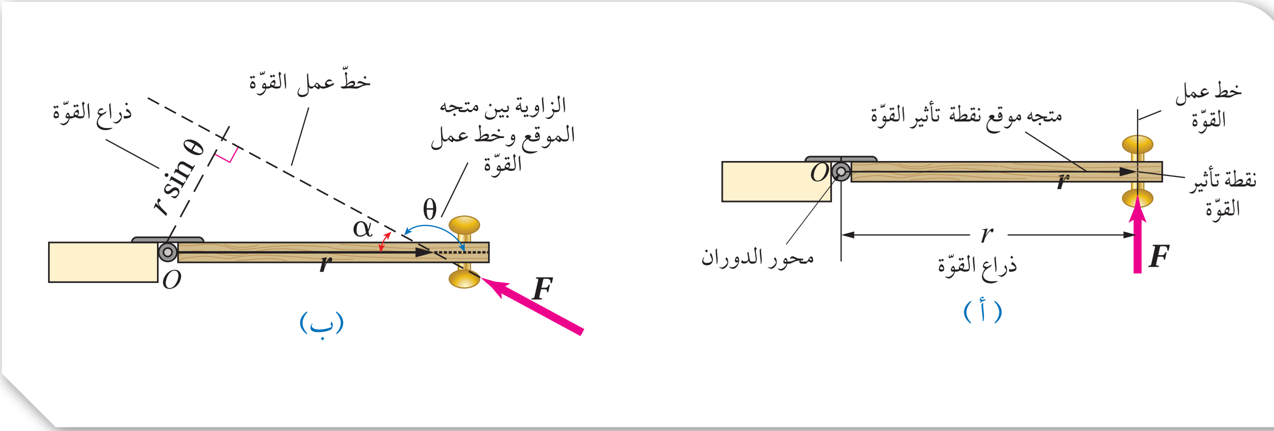
يوضح الشكل (2) منظرًا عُلويًّا لباب؛ ولفتح هذا الباب أو إغلاقه نؤثر بقوةٍ في مقبضه (النقطة B)، بدلًا من التأثير بها عند النقطة (A) بالقرب من محور الدوران، للحصول على أكبر مقدار للعزم، وذلك بجعل نقطة تأثير القوة أبعد ما يمكن عن محور الدوران. ويزداد مقدار العزم عند التأثير بهذه القوّة بزاويةٍ قائمةٍ بالنسبة لمستوى سطح الباب.

✔ **أتحقّق:** أُفسّر دفع الباب بقوة عمودية على مستوى سطح الباب أفضل من دفعه جانبيًّا بقوة تميل عن مستوى سطح الباب بزاوية.

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



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



الشكل (3):
(أ) طول ذراع القوّة عند تأثير قوّةٍ عموديًّا على مستوى سطح الباب،
(ب) وعند تأثيرها بشكلٍ مائلٍ.

للتوصـل إلـى العوامـل التـي يعتمـد عليهـا عـزم القـوة؛ أنظُـر الشـكل (3) الـذي يوضـح منظـرًا عُلويًّا لبـاب تؤثر في مقبضه قوة (F). يُسـمّى امتـدادُ مُتّجه القـوّة خـطّ عمـل القـوّة، أمـا البُعـد العمـوديُّ بيـن خـطّ عمـل القـوّة ومحور الـدوران فيُسـمّى ذراع القـوّة **Lever arm**.

عندما تؤثر القـوة (F) عموديًا على مسـتوى سـطح الباب، كمـا في الشكل (3/ أ) يكون طول ذراع القوّة أكبر ما يُمكن، ويكون مساويًا مقدار المُتّجه (r).
أمـا عنــدما لا يكـونُ اتّجـاه القـوّة (F)؛ عموديًّـا على سـطح البـاب، كما فـي الشـكل (3/ ب) فإن طـول ذراع القوّة يسـاوي ($r \sin\alpha = r \sin\theta$)، حيث ($\sin\alpha = \sin\theta$)، لأنّ مجمـوع الزاويتيـن يسـاوي $180°$.
أسـتنتج ممّـا سـبق أنّ مقدار العزم يتناسـب طرديًّا مـع كلٍّ من مقـدار القوّة (F) وطـول ذراعها ($r \sin\theta$).
وبمـا أنّ العـزم كمّيـة مُتّجهة؛ فإنّنا نعدّهُ موجبًا عندما يسـبّب دورانَ الجسـم فـي عكـس اتجـاه حركـة عقارب السـاعة، وسـالبًا عندما يسـبب دوران الجسـم فـي اتّجـاه حركـة عقارب السـاعة.

الربطُ معَ الرياضيات

إذا كان مجموع الزاويتان α و β يساوي $180°$ فإنّ

$\sin\alpha = \sin\beta$

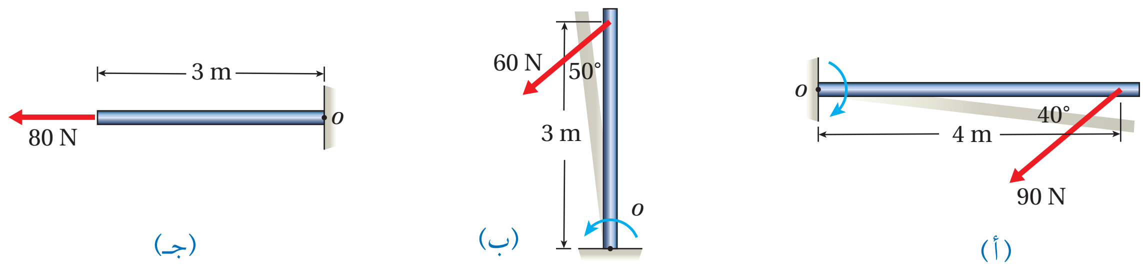
إذا كان مجموع الزوايتين α و β يساوي 90 فإن:

$\sin\alpha = \cos\beta$

أتحقّق: ما المقصود بالعزم؟ وعلام يعتمد؟

المثال 1

أحسب عزوم القوى المؤثرة في الأجسام المبيّنة في الشكل (4) حول محور دوران يمرُّ بالنقطة (O).



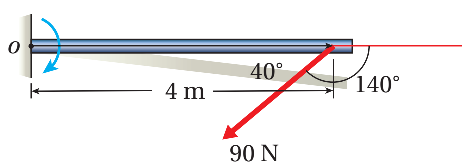
الشكل(4): قوى تؤثر في أجسام قابلة للدوران حول محور ثابت.

المعطيات: الشكل والبيانات المثبتة فيه.

المطلوب: عزم كل قوة.

الحل:

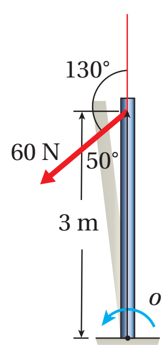
يُحسَب العزم من العلاقة الآتية: $\tau = Fr\sin\theta$



الشكل(أ):

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

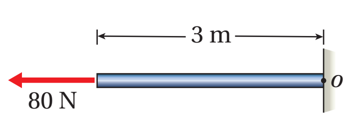
$$\tau = -90 \times 4 \times \sin 140°$$
$$= -231.4 \text{ N.m}$$



الشكل (ب):

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

$$\tau = 60 \times 3 \times \sin 130°$$
$$= 137.9 \text{ N.m}$$

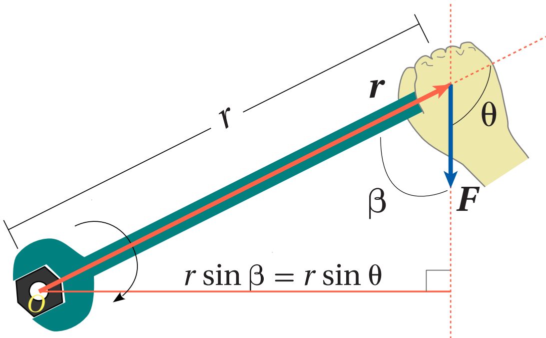


الشكل (جـ):

الزاوية بين متجهي (F) و (r) تساوي ($\theta = 0°$)؛ فيكون العزم ($\tau = 0$).

المثال 2

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

المطلوب: $\tau = ?$

الحلّ:

يحسب العزم باستخدام العلاقة:

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

علمًا أنّ: $\beta + \theta = 180°$، فتكون $\theta = 105°$، و $\sin 105° = \sin 75°$.

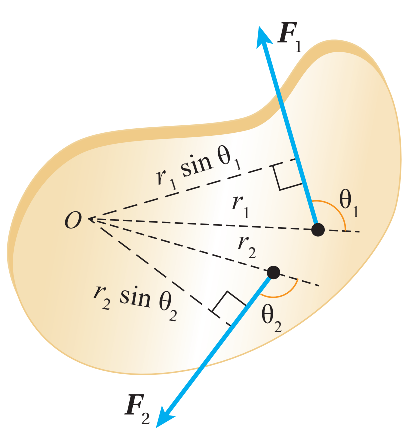
ويكون العزم سالبًا لأن القوّة تعمل على تدوير مفتاح الشدِّ باتّجاه حركة عقارب الساعة.

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

إيجاد العزم المحصّل Finding Net Torque

يُحسب العزم المحصّل المؤثّر في جسم عندما تؤثر فيه أكثر من قوة؛ بحساب العزم الناتج عن كل قوة على حدة، مع مراعاة اتجاه الدوران، ثم تُجمع العزوم مع إشاراتها. فمثلًا؛ يُبين الشكل (6) جسمًا تؤثر فيه قوّتان: (F_1) تعمل على تدويره بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة، و (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 بجمع العزمين مع مراعاة إشارة كلٍّ منهما، كما يأتي:

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

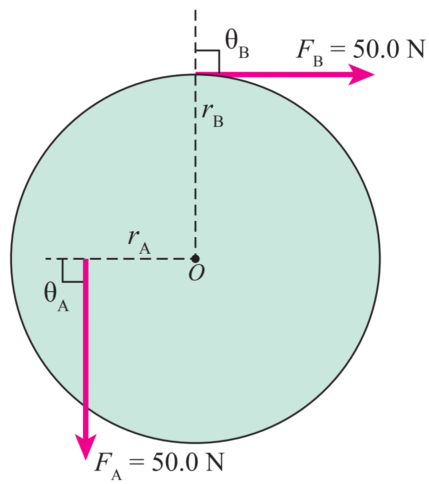


الشكل (6): جسم قابل للدوران حول محور يمرُّ بالنقطة (O) عموديًّا على مستوى الصفحة، ويؤثر فيه قوتان F_1 و F_2.

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

المثال 3

بكرة مُصمَتة نصف قُطرها (r_B)، يمرّ في مركزها (O) محور دورانٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة؛ كما هو موضّحٌ في الشكل (7). 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 حيثُ ($r_B = 50.0$ cm)، واعتمادًا على المعلومات المُثبتة في الشكل؛ أحسبُ مقدار العزم المُحصّل المؤثّر في البكرة، وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (7): 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؛ لذا يكون عزمها موجبًا، أمّا القوّة ($\boldsymbol{F}_B$) فتعمل على تدويرها باتجاه حركة عقارب الساعة؛ لذا يكون عزمها سالبًا. فيُحسب العزم المُحصّل حول محور دوران البكرة كما يأتي:

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

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

تمرين

أستخدم الارقام: يدفع عامل عربةً كما هو موضّحٌ في الشكل (8)، 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 (8): عامل يدفع عربة.

عزم الإزدواج Torque of a Couple

يُبيّنُ الشكل (9) منظرًا لمقود سيارة تؤثر فيه قوتان تعملان على تدويره بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة. القوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا وخطّا عملهما غيرُ متطابقين؛ فتشكلان ما يعرف بالازدواج Couple، ويسمى العزم الناتج عنه بعزم الازدواج، ويحسب عزم الإزدواج بإيجاد العزم المحصل حـول محور الدوران نفسه كما يأتي:

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2$$
$$= F\,r + F\,r$$
$$= F\,(2r)$$
$$= F\,d$$

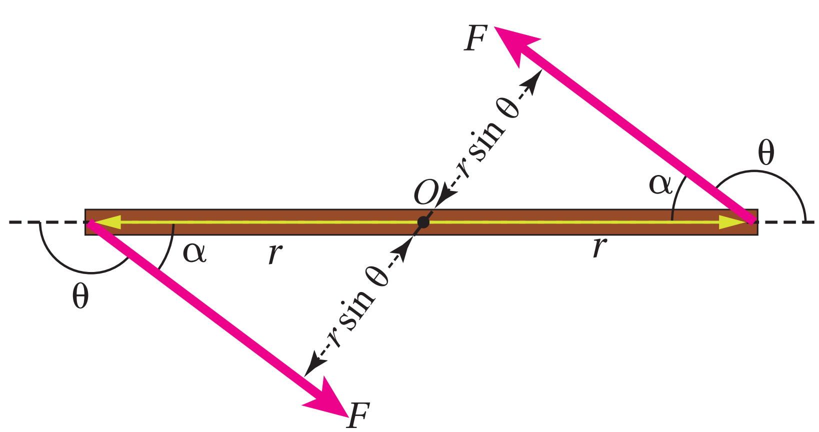
حيث (d) البُعد العموديُّ بين خطيّ عمل القوّتين.

عمومًا، فإن عزم الازدواج عندما تصنعُ قوتا الازدواج زاويةً غير قائمةٍ مع المُتّجه ($\boldsymbol{r}$)، كما هو موضّحٌ في الشكل (10)، يُحسب باستخدام العلاقة الآتية:

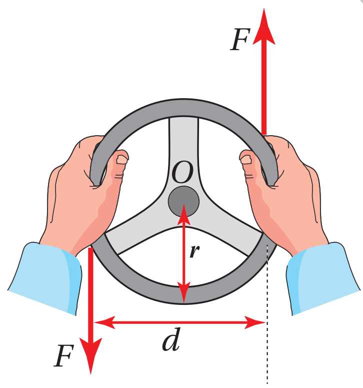
$$\tau_{\text{couple}} = 2F\,r\sin\theta = F\,(2r\sin\theta) = Fd$$

أستنتج أن عزم الازدواج يساوي ناتج ضرب إحدى القوتين في البعد العمودي بينهما.

أتحقّق: ما الشروط اللازم تحققها في قوتين كي تشكلان إزداوجا؟

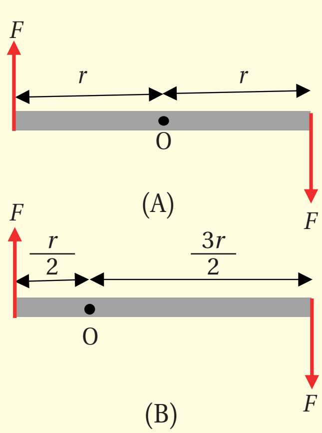


الشكل (10): تصنع قوتا الازدواج زاويةً غير قائمة مع قضيب فلزّي قابلٍ للدوران حول محورٍ ثابتٍ عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ في منتصف القضيب عند النقطة (O).



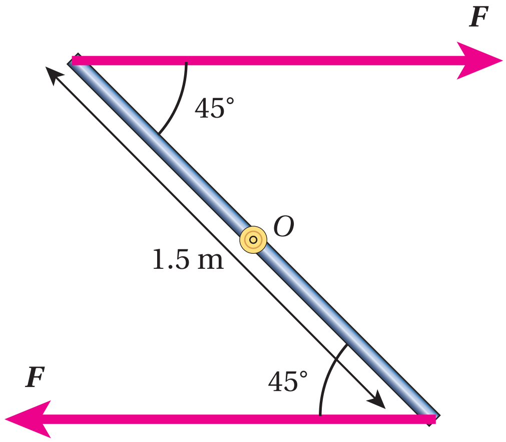
الشكل (9): الازدواج المؤثّر في مقود سيارة.

أفكّر: تُشكّل القوتان الموضحتان في الشكل (A) إزداوجًا يعمل على تدوير الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة. إذا تغير موقع محور الدوران ليصبح كما في الشكل (B)، وبثبوت القوتين؛ فهل نعدُّ القوتين إزدواجًا في هذه الحالة؟ وهل يكون العزم المحصل متساويًا في الحالتين؟ أوضح إجابتي رياضيًا.



المثال 4

قوتان تشكلان إزدواجًا وتؤثران بالاتجاهات المثبتة في الشكل (11/ أ)، عند طرفي قضيب فلزّي طوله (1.5 m) قابل للدوران حول محور عمودي على الصفحة ويمر بالنقطة (O) إذا علمتُ أن عزم الإزدواج يساوي (130 N.m)؛ فما مقدار كُلٍّ من القوتين؟ وما اتجاه دوران القضيب؟



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

المعطيات:

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

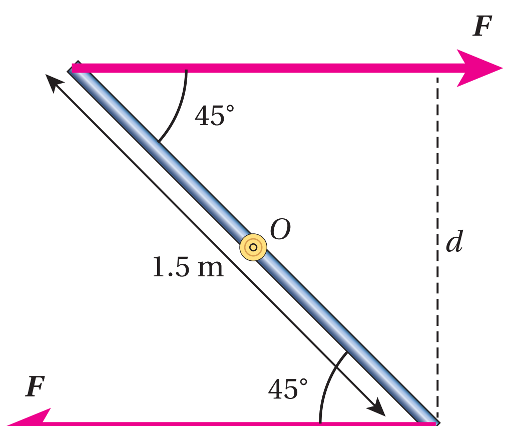
المطلوب:

$$F = ?$$

الحل:

نحسب البعد العمودي بين خطي عمل القوتين (d)، ألاحظ الشكل (11/ ب):

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



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

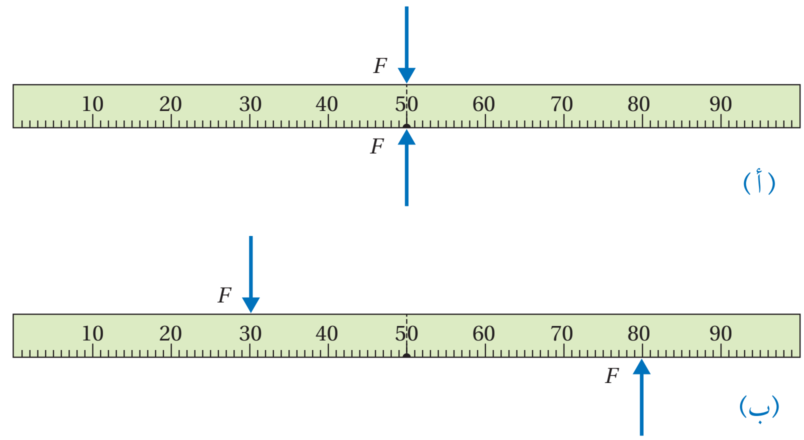
ثم نجد (F) باستخدام العلاقة:

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

$$130 = F \times 1.1$$

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

يعمل الإزدواج على تدوير القضيب الفلزي باتجاه حركة عقارب الساعة.



الشكل (12):
(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 مستقيم يكون في حالة اتّزانٍ حركي، وفي الحالتين تكون القوّة المُحصّلة المؤثّرة في هذه الأجسام تساوي صفرًا؛ $(\sum \boldsymbol{F} = 0)$. وهذا الشرط يحقق الاتزان للجسم عندما تكون القوى المؤثرة فيه في الموقع نفسه، مثل المسطرة المبينة في الشكل (12/ أ).

يوضّح الشكل (12/ أ) مسطرةً متريّةً موضوعةً على سطح طاولة؛ وتؤثّر فيها قوّتان أفقيتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا في الموقع نفسه، حيث تكون المسطرة في حالة اتزان سكوني، لأنّ القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيها تساوي صفرًا. أمّا الشكل (12/ ب) فيوضّح المسطرة نفسَها عند تأثير القوّتين نفسيهما فيها في موقعين مختلفين. هنا لا بد من توافر شرطٍ ثانٍ يحقق الاتّزان، وهذا الشرط مرتبط بالعزم؛ فالمسطرة في هذه الحالة غير مُتّزنة على الرغم من أن القوة المحصلة تساوي صفرًا؛ لأن العزم المحصل المؤثر فيها لا يساوي صفرًا. يمكن القول: إنه عندما تؤثر في الجسم قوًى عدة في مواقع مختلفة، يكون الجسم مُتّزنًا عندما يُحقّق 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 $(\sum \boldsymbol{\tau} = 0)$.

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

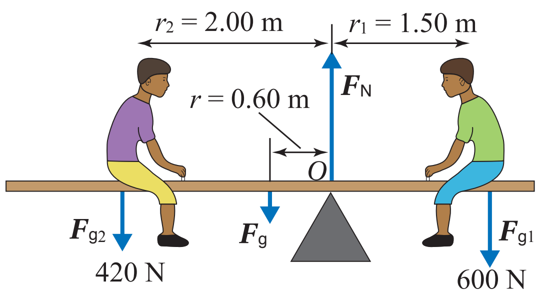
✓ **أتحقّق**: لماذا لا تعد المسطرة المبينة في الشكل (12/ ب) متزنة؟

المثال 5

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 (13). إذا كان النظام المكوّن من اللّعبة والطفلين في حالة اتّزان سكونيٍّ واللوحُ الخشبيّ في وضعٍ أُفقيّ، وبالاستعانة بالبيانات المثبتة في الشكل؛ أحسب ما يأتي:

أ . وزن اللّوح الخشبي (F_g).

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



الشكل (13): طفلان يجلسان على لعبة See – saw متزنة أُفقيًّا.

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

المطلوب: $F_g = ?,\ F_N = ?$

الحلّ:

أ . يتأثر اللّوح الخشبيّ بأربع قوًى، هي: وزنا الطفلين (F_{g1}) و(F_{g2})، ووزن اللّوح (F_g) الذي يؤثر في منتصفه، والقوّة العمودية (F_N) التي تؤثّر بها نقطة الارتكاز في اللوح. وبما أن مقداري القوّة العمودية ووزن اللوح غيرُ معلومين؛ فإن تطبيق الشرط الثاني للاتّزان حول محور دوران يمرُّ في إحدى نقطتي تأثير هاتين القوتين، يجعل عزم تلك القوة يساوي صفرًا.

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

$$\sum \tau = 0$$

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

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

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

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

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

$$\sum F_y = 0$$

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

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

$$= 100 + 600 + 420$$

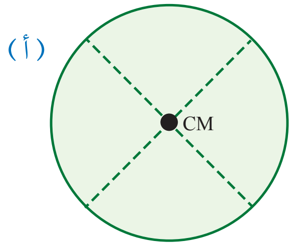
$$= 1120 \text{ N}$$

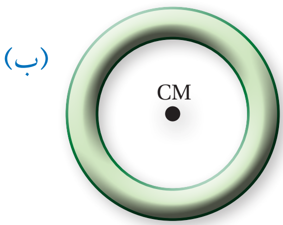
مركز الكتلة Centre of Mass

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.

ينطبق موقع مركز كتلة أي جسمٍ مُتماثلٍ مُنتَظم توزيع الكتلة (متجانس) على مركزه الهندسيّ. فمثلًا؛ يقع مركز كتلة قضيب فلزّي، أو مسطرة، أو أسطوانة أو كرة في المركز الهندسيّ لكُلّ منها، كذلك يقع مركز كُرَة مجوفة أو حلقة دائرية في المركز الهندسي لكُلٍّ منها بالرغم من عدم وجود مادة الكرة أو الحلقة عند تلك النقطة. أنظر الشكل (14).

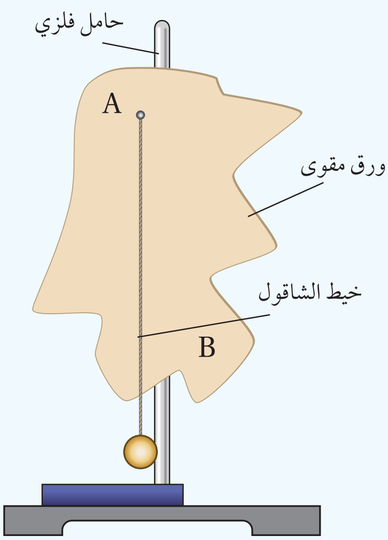
أما الجسمُ غير منتظم الشكل، فيكون مركزُ كتلته أقرب إلى المنطقة ذات الكتلة الأكبر. ويمكن تحديد موقع مركز الكتلة عمليًّا؛ باتباع الخطوات الموضحة في التجربة الآتية:





الشكل (14): (أ) قرص مصمت أو مجوّف، (ب) حلقة دائرية.

التجربة ١ مركز كتلة جسم غير منتظم الشكل



الموادّ والأدوات: قطعة ورقٍ مقوّى، حامل فلزيّ، 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:

1. 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.
2. **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.
3. أرسمُ خطًّا رأسيًّا على قطعة الورق المُقوّى على امتداد خيط الشاقول؛ كما هو موضّحٌ في الشكل.
4. أُكرّر الخطوة السابقة بتعليق قطعة الورق المقوّى من الثقب الآخر.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج:** أُحدّد نقطة تقاطع الخطّين على قطعة الورق المُقوّى، ما الذي تمثّله هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟
2. **أقارنُ** بين موقع مركز الكتلة لجسم غير منتظم الشكل، وآخر منتظم الشكل ومتجانس.
3. **أتوقّعُ** ما يحدث لقطعة الورق المُقوّى غير المُنتظمة عند تعليقها من نقطة تقاطع الخطّين. أُفسر إجابتي.

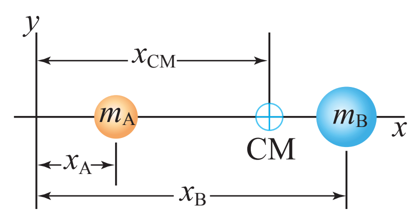
مركز الكتلة لنظام من جسمين
Centre of Mass of System of Two Masses

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

عندما يتكون النظام من جسمين متساويين في الكتلة، كما في الشكل (15) الذي يُوضّح رافع أثقال يرفع ثقلين متساويين في الكتلة؛ فإنّ مركز كتلة النظام يقع عند منتصف المسافة بين الجسمين.

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

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



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

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

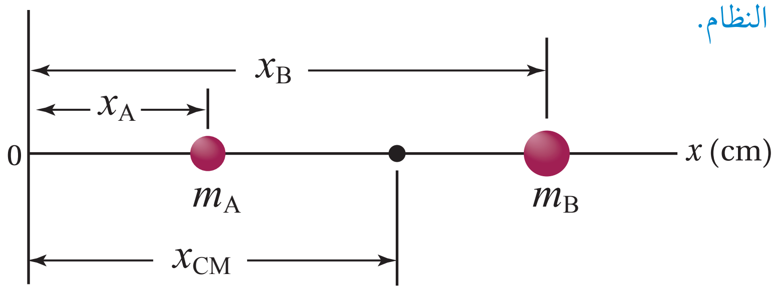
أتحقّق: أين يقع مركز كتلة جسمٍ مُنتظمٍ متماثل؟ وأين يقع مركز كتلة جسمٍ غير منتظم الشكل؟

الربطُ بالحياة

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

المثال 6

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}):

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

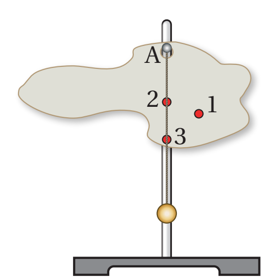
$$= \frac{1.0 \times 5.0 \times 10^{-2} + 3.0 \times 15.0 \times 10^{-2}}{1.0 + 3.0}$$

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

أُلاحظُ أن موقع مركز الكتلة أقرب للكتلة الأكبر.

تمرين

أجرت طالبة تجربة مماثلة للتجربة (1) لإيجاد موقع مركز الكتلة لصفيحة غير منتظمة الشكل. حددت الطالبة ثلاث نقاط توقعت أن مركز الكتلة يقع عندها، ثم علقت الصفيحة من النقطة (A) وانتظرت إلى أن توقف الشاقول المعلق عن التأرجح، واستقر كما في الشكل.



أصدر حكما: أي من النقاط الثلاث من المحتمل أن يقع مركز الكتلة عندها؟ أبرر إجابتي.

أقترح خطوة إضافية على الطالبة أن تقوم بها لتحدد موقع مركز الكتلة بدقة.

أُفكّر: في المثال (6)؛ أثبتُ أن مجموع العزوم الناتجة عن أوزان مكونات النظام حول محور عمودي على الصفحة يمر في مركز الكتلة يساوي صفرًا.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: ما الشرطان اللذين يجب أن يتحققا معًا كي يكون الجسم أو النظام متزنًا؟

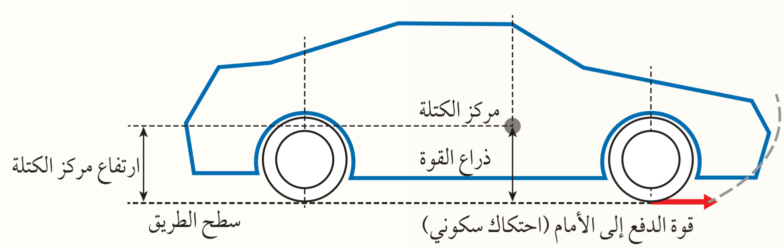
2. أُوضّحُ المقصود بمركز كتلة جسم.

3. **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؟ أبرر إجابتي.

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

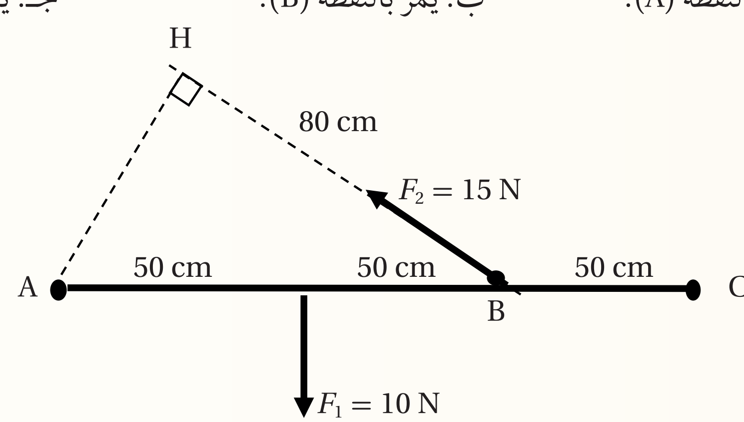
5. **أتوقع**: رأت ذكرى أخاها يحاول فكَّ إطار سيارته المثقوب باستخدام مفتاح شدٍّ لفكّ الصواميل التي تُثبّت الإطار، لكنه لم يستطع فكّها. أذكر طريقتين -على الأقل- يُمكن أن تقترحهما ذكرى على أخيها لمساعدته على فكّ الصواميل. أُفسّر إجابتي.

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



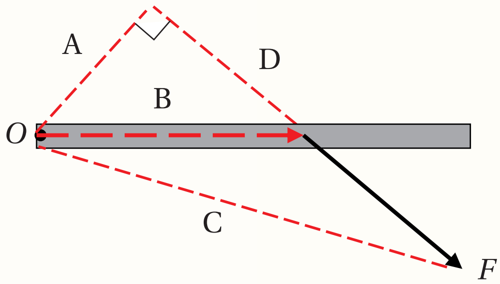
7. **أستخدم الأرقام**: في الشكل المجاور أحسب العزم المحصل للقوى المبينة في الشكل، حول محور دوران عمودي على الصفحة:

أ. يمر بالنقطة (A). ب. يمر بالنقطة (B). جـ. يمر بالنقطة (C).



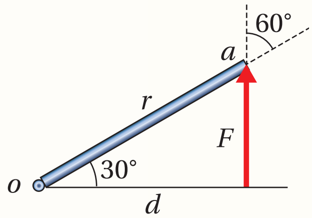
8. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

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



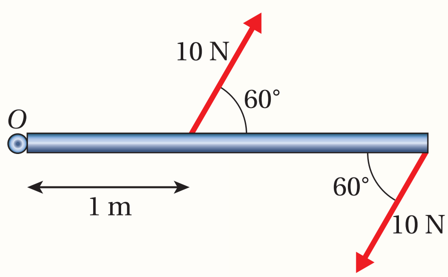
أ . A
ب. B
جـ. C
د . D

2 . يبين الشكل جسمًا قابلًا للدوران حول محور يمرُّ بالنقطة (O)، تؤثر فيه قوة (F) عند النقطة (a). معتمدا على الشكل وبياناته؛ فإن عزم هذه القوة يساوي:



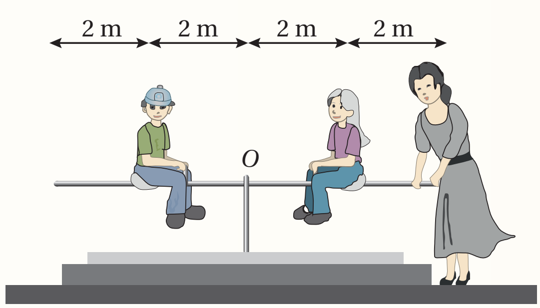
أ. $+rF\sin 150°$
ب. $-rF\sin 60°$
جـ. $-dF$
د . $+dF$

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



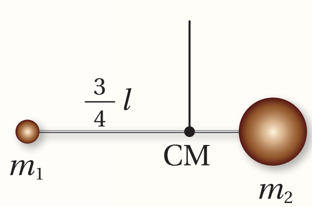
أ . $35\sin60°$، عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.
ب. $35\sin60°$، مع اتجاه حركة عقارب الساعة.
جـ. $15\sin120°$، عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.
د . $15\sin120°$، مع اتجاه حركة عقارب الساعة.

4 . تجلس فتاة وأخوها على لعبة (see–saw)، كما هو مبين في الشكل، كتلة الفتاة (40 kg) وكتلة الولد (50 kg). وكي يبقى اللوح متزنًا تمسك الأم بطرف اللوح، وتؤثر فيه بقوة مقدارها واتجاهها:



أ . 50 N، للأعلى.
ب. 50 N، للأسفل.
جـ. 100 N، للأعلى.
د. 100 N، للأسفل.

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



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

الفكرة الرئيسة:

تُوصف الحركة الدوانية باستخدام مفاهيم منها، الإزاحة الزاويـّة، السرعـة الزاويـّة، التسارُع الزاويّ، وعزم القصور الذاتي.

نتاجات التعلّم:

- أوضّح المقصود بكل من: الإزاحة الزاويـة، والسـرعة الزاويّة المتوسّـطة، والتسـارُع الـزاويُّ المتوسـط.
- أحسبُ مقدار كل من: السـرعة الزاويّة، والتسارع الزاويّ.
- أستنتج أنّ عزم القصور الذاتي لجسم هو مقياسٌ لممانعة الجسم لإحداث تغيّرٍ في حركته الدورانية.
- أُعبّر عن عـزم القصـور الذاتي لجسـم بمعادلة.
- أُعبّر عن القانون الثاني لنيوتن لجسمٍ 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.

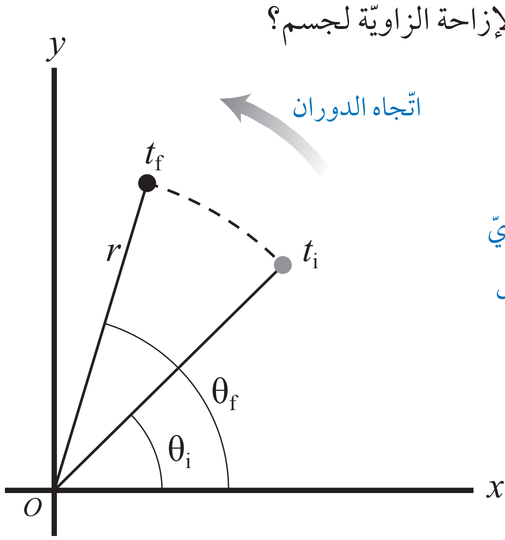
الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

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 $+x$)، وتقاس بوحدة الراديان (rad). يبين الشكل (19) التغيُّر في الموقع الزاويّ لجُسيم يقع على جسم يدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة. عند اللحظة (t_i) يكون الموقع الزاويّ للجسيم (θ_i)، وعند اللحظة (t_f) يصبح الموقع الزاوي (θ_f). أمّا **الإزاحةُ الزاويّة** ($\Delta\theta$) **Angular displacement**؛ فهي التغيُّر في الموقع الزاويّ، وتحسب باستخدام العلاقة الآتية:

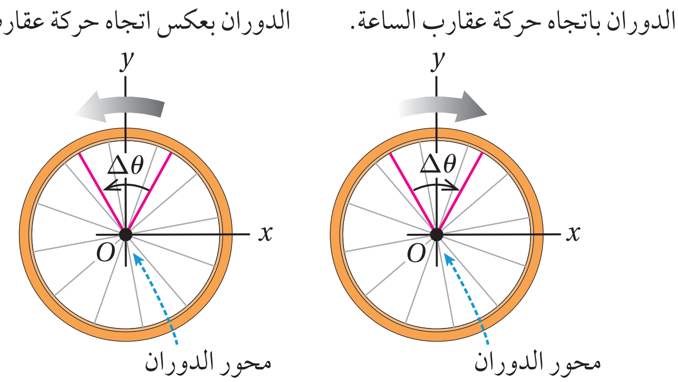
$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$$

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



الشكل (20): عند دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة تكون الإزاحة الزاويّة والسرعة الزاويّة موجبةً، وعند دوران الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة تكون كلٌّ من الإزاحة الزاويّة والسرعة الزاويّة سالبةً.

السرعة الزاويّة Angular Velocity

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

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

ووحدةُ قياسِها هي (rad/s). أمّا السرعةُ الزاويّة لجسمٍ عندَ لحظةٍ زمنيّةٍ مُعيّنةٍ؛ فتُسمّى السرعةَ الزاويّةَ اللحظيّةَ (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.

يبين الشكل (20) جسمًا يدور حول محور يمر بالنقطة (O) عموديا عليها. عند دوران الجسم 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.

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 ($\bar{\alpha}$) ويُقاس بوحدة (rad/s^2):

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

أما التسارُع الزاويّ لجسمٍ عند لحظةٍ زمنيّةٍ مُعيّنةٍ؛ فيُسمّى التسارُع الزاويّ اللحظيّ (α) Instantaneous angular acceleration.

الربط مع الفلك

كوكبُ الأرض جسم 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.

أتحقّق: ما المقصودُ بالسرعة الزاويّة المتوسّطة؟

عند دوران جسم بتسارُع زاويّ ثابتٍ؛ فإنّ تسارُعه الزاويّ المتوسط يُساوي تسارُعه الزاويّ اللحظيّ؛ أي أن $\bar{\alpha} = \alpha$. وأينما ورد مُصطلح التسارُع الزاويّ فإنه يعني التسارع الزاويّ اللحظيّ.

تستخدم إشارة كل من السرعة الزاويّة والتسارُع الزاويّ لمعرفة 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 زمنيّة مُعيّنة، وبذلك فإن لأجزاء الجسم جميعها السرعة الزاويّة نفسُها والتسارع الزاويّ نفسه. لذا فإنّ السرعة 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 7

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 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:

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

الحلّ:

أ . أستخدم المعادلة الآتية لحساب التسارُع الزاويّ المتوسط:

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

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

ب. أستخدم معادلة التسارع الزاويّ لحساب السرعة الزاويّة:

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

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

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

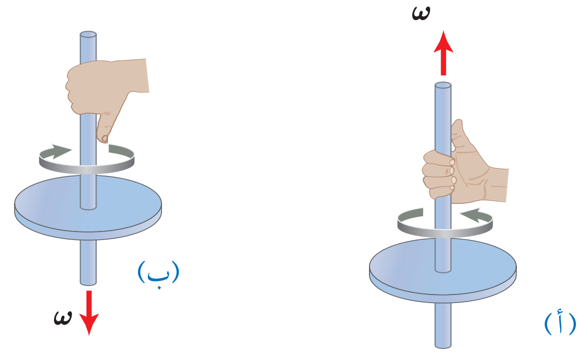
تمرين

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 rad/s^2) مدّة زمنيّة مقدارُها (10.0 s).

أحسبُ ما يأتي:

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

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



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

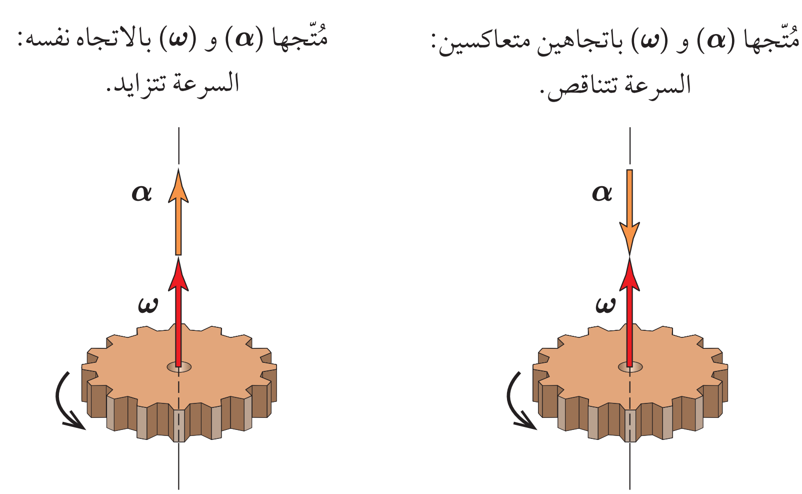
متجه السرعة الزاويّة ومتجه التسارع الزاويّ
Angular Velocity and Angular Acceleration Vectors

السرعة الزاويّة كمية متجهة، حيث يرسم متجه السرعة الزاويّة على امتداد محور الدوران، وتستخدم قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاهه، وذلك عن طريق لفّ أصابع اليد اليمنى حول محور الدوران بحيث تُشير إلى اتّجاه دوران الجسم، فيُشير الإبهام إلى اتّجاه السرعة الزاويّة. أنظر الشكل (21).

فمثلًا؛ عند دوران جسم حول المحور y بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة يكون متّجه السرعة الزاويّة باتّجاه محور $(+y)$. أمّا عند دوران الجسم باتّجاه حركة عقارب الساعة حول المحور نفسه فيكونُ مُتّجه السرعة الزاويّة باتّجاه محور $(-y)$.

أما متّجه التسارع الزاويّ فيكون باتجاه متّجه السرعة الزاوية عندما يدور الجسم بتسارع، وبعكس اتجاه متجه السرعة الزاويّة عندما يدور الجسم بتباطؤ. ألاحظ الشكل (22).

✓ **أتحقّق:** كيف أحدد اتجاه كل من السرعة الزاوية والتسارع الزاوي لجسم يدور حول محور (z) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بسرعة متناقصة؟



الشكل (22): العلاقة بين متجهي السرعة الزاويّة والتسارُع الزاويّ.

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

عندما يؤثر عزم محصل ثابت في جسم؛ فإنه يكتسب تسارُعًا زاويًّا ثابتًا. وهذا يناظر القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية؛ فالقوة المحصلة الثابتة تُكسب الجسم تسارُعًا خطيًا ثابتًا.

في الحركة الانتقالية يكتب القانون الثاني لنيوتن في الصورة الآتية: $\sum F = ma$؛ ويمكن التوصل إلى صيغة مقابلة لهذه الصيغة للحركة الدورانية، حيث مقدار العزم المُحصّل يناظر القوة المحصلة، والتسارع الزاويّ يُناظر التسارع الخطي. أما الكتلة (m) التي تعد مقياسًا لممانعة الجسم للتغيُّر في حركته الانتقالية فيقابلها ما يعرف بعزم القصور الذاتي.

يعدُّ **عـزم القصور الذاتي** (I) **Moment of inertia** مقياسًا لممانعة الجسم لتغيير حالته الحركية الدورانيّة، تمامًا كما الكتلة (m) مقياس لمُمانعة الجسم لتغيير حالته الحركية الانتقالية. وبذلك يمكن كتابةُ العلاقة الآتية للحركة الدورانية والتي تقابل القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية:

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

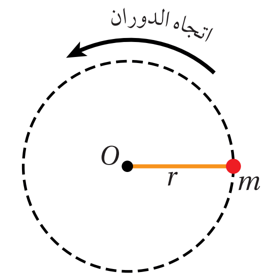
حيث $\sum \tau$ مقدار العزم المحصل المؤثر في جسم أو نظام.

يُحسب عـزم القصـور الذاتي (I) لجسيم نُقطي، كتلتـه (m)، يبعد مسافة عموديّة (r) عن محور دوران عمودي على مستوى الصفحة يمر بالنقطة (O) كما يبين الشكل (23)، باستخدام العلاقة الآتية:

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

ويُقاس بوحدة $(\mathrm{kg.m^2})$ حسب النظام الدولي للوحدات. ويوضّح الجدول (1) عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة.

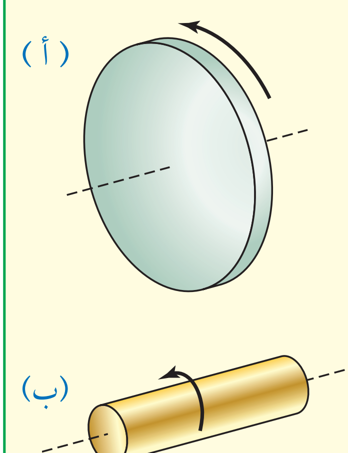
يعتمد عزم القصور الذاتي على كيفية توزيع الكتلة حول محور الدوران، فكلما توزّعت كتلة الجسم بعيدًا عن محور دورانه؛ فإن عزم القصور الذاتي له يكون أكبر. فمثلًا، عزم القصور الذاتي لحلقةٍ رقيقةٍ نصفُ قطرها (r) وكتلتها (m) كما هو مبيّن في الجدول (1) يساوي (mr^2). أمّا عزم القصور الذاتي لأسطوانة مُصمَتة كتلتُها (m)، ونصف قطرها (r)؛ فيساوي $(\frac{1}{2} mr^2)$.



الشكل (23): جُسيم نُقطيّ يدور حول محول ثابت.

أفكّر: يبين الشكل (24) أسطوانتين (أ) و (ب) متساويتان في الكتلة. مُعتمدًا على الشكل؛ أُجيب عن الاسئلة الآتية، موضّحًا إجابتي:

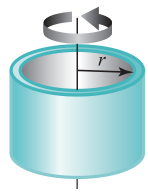
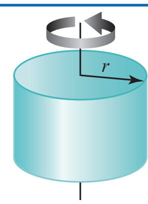
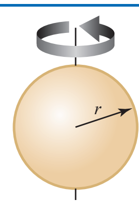
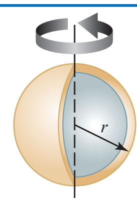
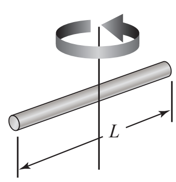
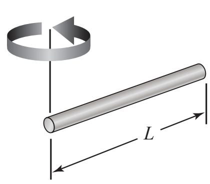
1. أيهما أصعب؛ تحريك الإسطوانة (أ) أم (ب) بالسرعة الزاويّة نفسها؟
2. أيهما أصعب؛ إيقاف الإسطوانة (أ) أم (ب) عندما تتحركان حركة دورانية بالسرعة الزاوية نفسها؟



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

✓ **أتحقّق**: ما المقصود بعزم القصور الذاتي؟	كذلك يعتمد عزم القصور الذاتي على موقع محور الدوران، كما هو موضّح 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 أنه يلزم عزمٍ أقلّ لتدوير القضيب حول محورٍ عموديٍّ عليه، ويمرُّ في منتصفه مقارنةً مع الحالة عندما يكون محور الدوران عموديًّا عليه ويمرُّ في أحد طرفيه.

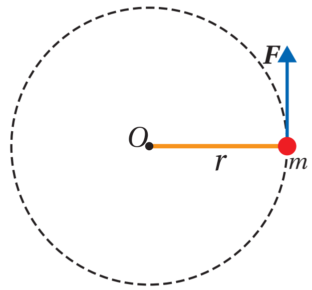
الجدول 1: عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة كتلةُ كلٍّ منها (m).*

الجسم	موضع محور الدوران	الشكل	عزم القصور الذاتي
حلقةٌ رقيقةٌ أو أسطوانةٌ مجوّفة.	يمرّ بالمركز عموديًّا على مستوى قاعدتها.		$I = mr^2$
أُسطوانةٌ مُصمَتة منتظمةٌ أو قرصٌ دائري.	يمرُّ بالمركز عموديًّا على مستوى قاعدتها.		$I = \frac{1}{2}\, mr^2$
كرةٌ مُصمَتة منتظمة.	يمرُّ بمركزها.		$I = \frac{2}{5}\, mr^2$
كرةٌ مجوّفة.	يمرُّ بمركزها.		$I = \frac{2}{3}\, mr^2$
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 8

كرةٌ كتلتُها (3.0 kg) مثبّتةٌ في نهاية قضيب فلزيٍّ خفيفٍ طولُه (0.80 m)، وتتحرّك حركةً دورانيّةً في مستوًى أُفقيٍّ بتأثير قوّةٍ مماسيّةٍ (F) ثابتةٍ في المقدار حول محورٍ ثابتٍ (O) عموديٍّ على مستوى الصفحة يمرُّ في النهاية الأخرى للقضيب، كما هو موضّحٌ في الشكل (25). إذا بدأت الكرة حركتَها من السكون بتسارُعٍ زاويٍّ ثابت؛ بحيث أصبحت سرعتها الزاويّة (8π rad/s) خلال (5.0 s)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي بإهمال كتلة القضيب الفلزّي:



الشكل (25): 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.

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

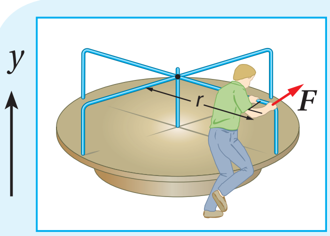
جـ. أستخدم علاقة العزم لحساب مقدار القوّة المماسيّة المؤثّرة.

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

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

تمرين

أستخدم الأرقام لعبةُ القرص الدوّار الموضّحة في الشكل (26)؛ 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 (26): 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 جُسيمًا نُقطيًّا.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: ما الكمّيات الفيزيائيّة اللازمة لوصف الحركة الدورانية لجسم؟

2. **أستنتج**: السرعة الزاويّة لجسمٍ عند لحظةٍ زمنيةٍ مُعيّنةٍ تساوي $(-3\ \mathrm{rad/s})$، وتسارعُه الزاويّ عند اللحظة نفسها $(-2\ \mathrm{rad/s^2})$. أُجيب عمّا يأتي:

   أ . هل يدور الجسم باتّجاه حركة عقارب الساعة أم بعكسه؟ أُفسّر إجابتي.

   ب. هل يتزايد مقدار سرعته الزاويّة أم يتناقص؟ أُفسّر إجابتي.

3. **أستنتج**: يدور إطار درّاجة بسرعة زاويّة ثابتة حول محورٍ ثابت. هل تتغير السرعة الزاويّة لأجزاء الإطار بالانتقال من داخله إلى حافّته الخارجية؟ أُوضّح إجابتي.

4. علامَ يعتمدُ عزم القصور الذاتي لجسم؟

5. **أستخدم الارقام**: إطار دراجة نصف قطره $(0.5\ \mathrm{m})$ وعزم القصور الذاتي له $(2.0\ \mathrm{kg.m^2})$، ويدور بسرعة زاويّة ابتدائية $(10\ \mathrm{rad/s})$ باتجاه حركة عقارب الساعة . أثرت في الأطار قوة احتكاك مماسية مقدارها $(8\ \mathrm{N})$ فتوقف عن الحركة. أحسب المدة الزمنية من لحظة تأثير القوة إلى أن توقف الإطار عن الحركة.

6. **أُقارن**: يبين الشكل قضيبًا فلزيًا طوله (L) مهمل الكتلة مثبت في طرفيه كرتين متماثلتين مهملتي الأبعاد. دُوّر النظام حول محور عمودي على مستوى الصفحة يمر في (أ): منتصف القضيب الفلزي، (ب): إحدى الكرتين. في أي من الحالتين (أ) و (ب) يلزم عزمٌ محصلٌ أكبر لبدء تدوير النظام؟ أفسر إجابتي حسابيًا.

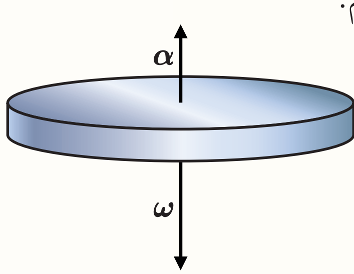
نظام الكرتين والقضيب الفلزّي.

7. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل 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. $\omega_A < \omega_B$ ب. $\omega_A > \omega_B$ جـ. $\omega_A = \omega_B \neq 0$ د. $\omega_A = \omega_B = 0$

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



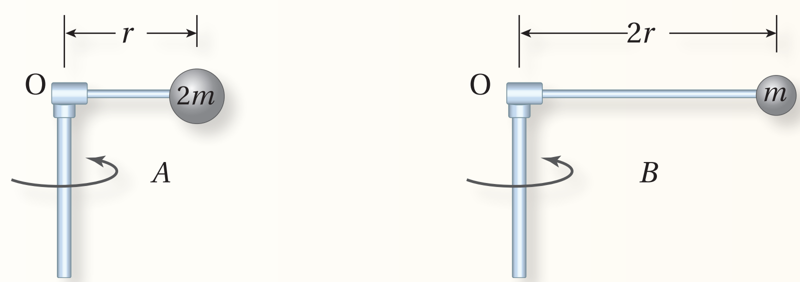
أ . يتسارع، وحركته باتجاه حركة عقارب الساعة.

ب. يتباطأ، وحركته باتجاه حركة عقارب الساعة.

جـ. يتسارع، وحركته عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

د . يتباطأ، وحركته عكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

3. يبيّنُ الشكلُ كرتين فلزّيتين مهملتي الأبعاد، كتلتيهما ($m_A = 2m$) و ($m_B = m$). تتصل كُلٌّ منهما بقضيب فلزّي كتلته مهملة، وتدوران حول محور يمر بالنقطة (O) كما يبيّن الشكل. العلاقة بين عزمي القصور الذاتي للنظامين:



أ . $I_A = 2I_B$

ب. $I_A = \frac{1}{2} I_B$

جـ. $I_A = \frac{1}{4} I_B$

د. $I_A = I_B$

4. قرص صلب متجانس نصف قطره (1 m) وكتلته (75 kg) قابل للدوران حول محور يمرُّ في مركزه، أثّرت فيه قوة مماسيّة ثابتة؛ فحركته من السكون بتسارع زاويّ ثابت، بحيث أصبحت سرعته الزاويّة (2π rad/s) بعد مرور (2.5 s). فإن مقدار عزم القوة بوحدة (N.m) يساوي:

أ . 56.4

ب. 78.2

جـ. 128.8

د . 94.2

5. كرة مصمتة كتلتها (5.0 kg)، ونصف قطرها (10 cm)، تتحرك حركةً دورانيةً حول محور ثابت يمرُّ في مركزها. فتتغير سرعتُها الزاويّة من (20 rad/s) إلى (40 rad/s) خلال (5 s)؛ إذًا فإنّ مقدار العزم المحصل المؤثر في الكرة خلال هذه الفترة الزمنية:

أ . 8×10^{-2} N.m

ب. $8 \times 10^{+2}$ N.m

جـ. 4×10^{-2} N.m

د . $4 \times 10^{+2}$ N.m

◀ **الفكرة الرئيسة:**

للزخم الخطيّ نظيرٌ في الحركة الدورانية يسمى الزخم الزاويّ، ويكون الزخم الزاويّ محفوظًا في الأنظمة المعزولة؛ حيث العزم المُحصّل المؤثر في الجسم يساوي صفرا.

◀ **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

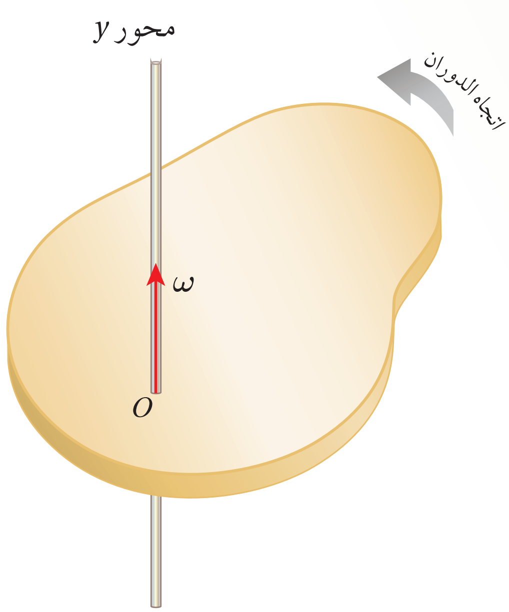
الطاقة الحركيّة الخطّية لجسمٍ ترتبط بحركته الانتقاليّة. أمّا الجسم الذي يدور حول محورٍ ثابتٍ فإنّه لا ينتقلُ من مكانٍ إلى آخر، ولكنّه يمتلك طاقةً حركيّةً دورانيّة.

يوضّح الشكل (27) 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 الخطّية ($\frac{1}{2}mv^2$) والطاقة الحركيّة الدورانيّة ($\frac{1}{2}I\omega^2$)، حيثُ تُقابل الكمّيتان (ω ، I) في الحركة الدورانية الكمّيتين (v ، m) في الحركة الخطّية على الترتيب.



الشكل (27): جسمٌ يتحرّك حركةً دورانيّةً حول محور y؛ بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتة (ω).

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

المثال 9

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.

المعطيات:

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

المطلوب:

$$KE_{\text{R}} = ?$$

الحل:

بالرجوع إلى الجدول (1)؛ فإن عزم القصور الذاتي للقرص المصمت:

$$\begin{aligned} \text{I} &= \frac{1}{2}mr^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 2.0 \times (0.50)^2 = 0.25\ \text{kg.m}^2 \end{aligned}$$

ثم تُحسب الطاقة الحركية الدورانية باستخدام العلاقة:

$$\begin{aligned} KE_{\text{R}} &= \frac{1}{2}\text{I}\,\omega^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.25 \times (8)^2 \\ &= 8\ \text{J} \end{aligned}$$

أفكّر: في المثال 9؛ إذا تغيّر موقع محور الدوران للقرص، مع بقاء مقدار السرعة الزاويّة ثابتًا، فهل تتغير الطاقة الحركيّة الدورانيّة؟ أوضّح إجابتي.

تمرين

أستخدم الأرقام: يتحرّكُ جزيءُ أُكسجينٍ (O_2) حركةً دورانيّةً حول محورٍ ثابتٍ 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 يساوي (1.95×10^{-46} kg.m^2) عند درجة حرارة الغرفة؛ فأحسبُ الطاقة الحركيّة الدورانيّة للجزيء.

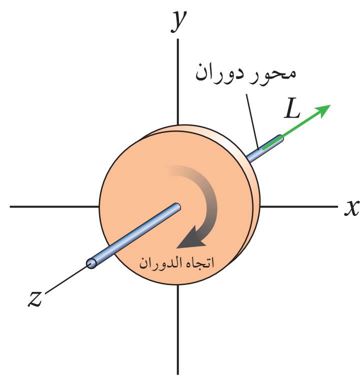
الزخَم الزاويّ وحفظهُ
Angular Momentum and it's Conservation

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

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

$$L = I\omega$$

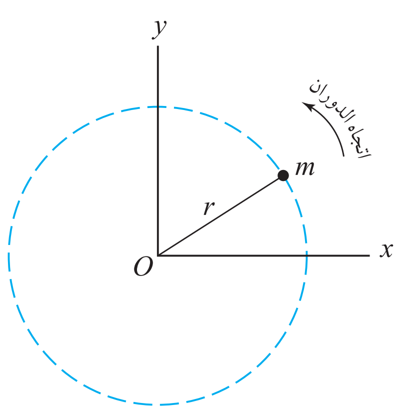
ويكون اتّجاهُ الزخَم الزاويّ باتّجاه السرعة الزاويّة المُتّجهة، فمثلًا؛ عند دوران قرص حول محور (z)، باتجاه حركة عقارب الساعة كما هو موضح في الشكل (28)، يكون متجه الزخم الزاوي داخلًا إلى الصفحة باتجاه ($-z$). أما عند دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، يكون متجه الزخم الزاوي خارجًا من الصفحة باتجاه ($+z$).



الشكل (28): متجه الزخم الزاوي.

المثال 10

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 (29). أحسبُ مقدار الزخَم الزاويّ للجُسيم حول هذا المحور، وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (29): جسيم يتحرّك في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطره (r) حول محور z.

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

المطلوب: $L = ?$

الحلّ:

أحسب مقدارَ الزخَم الزاويّ للجُسيم بالعلاقة:

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

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

الزخَم الزاويّ والعزم Angular Momentum and Torque

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

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

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

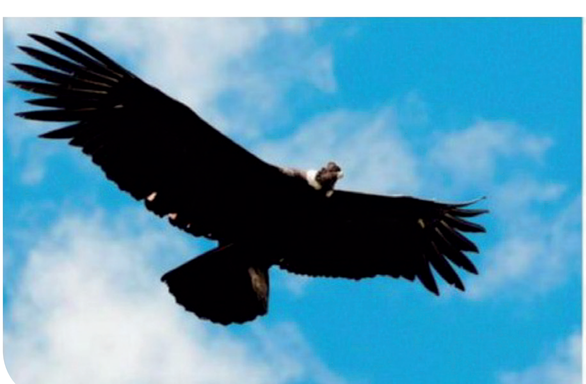
وعند حدوث تغيُّر في الزخَم الزاويّ (ΔL) خلال فترةٍ زمنيّةٍ (Δt)؛ فإنّه يُمكن كتابة العلاقة السابقة في الحركة الدورانيّة كما يأتي:

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

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

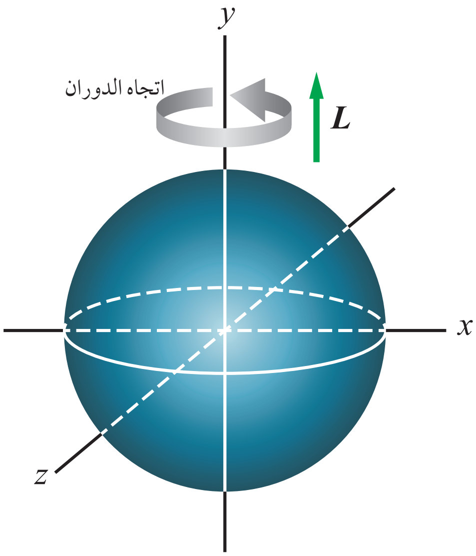
الرّبط بالعلوم الحياتيّة

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



المثال 11

كرةٌ مُصمَتــةٌ منتظمةُ توزيعِ الكتلة، كتلتُها (5.0 kg) ونصفُ قطرهــا (10.0 cm)، تتحـرّك حركـةً دورانيّـةً حـول محورٍ ثابـتٍ (محور y) يمـرُّ فـي مركزهـا، بسـرعةٍ زاويّـة ثابتـةٍ (20 rad/s) بعكـس اتّجـاه حركـة عقارب السـاعة عنـد النظـر إليها من أعلـى، كما هـو موضّحٌ فـي الشـكل (30). أحسـبُ مقـدار الزخَـم الـزاويّ للكرة حـول هذا المحـور، وأُحـدّد اتّجاهه.



الشكل (30): 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 توزيع الكتلة 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

أستخدم الأرقام: 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 القوّة المُحصّلة المؤثّرة في النظام تساوي صفرًا. ويمكن التوصُّل إلى علاقةٍ مُماثلةٍ في الحركة الدورانيّة عندما يكون العزم المحصّل المؤثّر في جسمٍ أو نظامٍ صفرًا ($\sum \boldsymbol{\tau} = 0$)؛ عندها يكون الزخَم الزاويّ ثابتًا مع مرور الزمن، أي أنّ:

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

وهذا يعني؛ أنّ الزخَم الزاويّ ($\boldsymbol{L}$) للنظام محفوظ، أي 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 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.

إذا أُعيد توزيع كتلة النظام المعزول الذي يتحرّك حركةً دورانيّة؛ فإنّ عزمَ القصور الذاتيّ والسرعة الزاويّة للنظام يتغيّران بحيث يبقى الزخَم الزاويّ ثابتًا. أي يمكنُ التعبير عن قانون حفظ الزخم الزاويّ بالصورة الآتية:

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

يبيّن الشكل (31) مُتزلّجًا على الجليد يدور حول محورٍ عموديٍّ على سطح الأرض ويمرُّ بمركز كتلته. يمكنُ التعامُل مع المُتزلّج على أنّه نظامٌ معزولٌ، حيثُ وزنه والقوة العموديّة تؤثّران في الاتّجاه الرأسيّ وعزم كلٍّ منهما حول محور الدوران يساوي صفرًا. إضافةً إلى ذلك؛ فإن 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 (31): يقل عزم القصور الذاتي للمتزلج عندما يضم يديه نحو جسمه ويضم قدميه معًا، فيزداد مقدار سرعته الزاويّة بحسب قانون حفظ الزخم الزاويّ.

المثال 12

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، ويُحسب باستخدام المعادلة الآتية:

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

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، ويحسب 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:

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

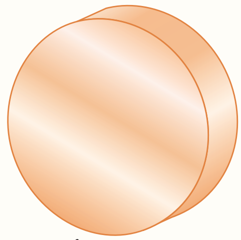
ومنها أجدُ أنّ مقدار السرعة الزاويّة النهائي يساوي:

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

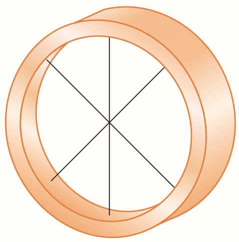
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: أقارن بين الكميات الخطية الآتية وما يناظرها في الحركة الدورانية:
الطاقة الحركية الخطية، القانون الثاني لنيوتن، الزخم الخطي، حفظ الزخم الخطي.

2. يبيّنُ الشكل المجاور أُسطوانتين إحداهما مُصمَتةٌ والأُخرى مجوّفة، متماثلتين في الكتلة والأبعاد والسرعة الزاويّة، وتدوران حول محورٍ ثابتٍ عمودي على المركز الهندسي لكلٍّ منهما. أجيب عن الأسئلة الآتية:



(أ)



(ب)

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

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

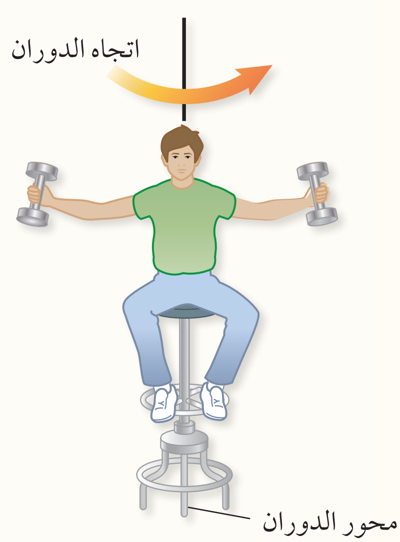
جـ. **أستخدم الأرقام**: أحسب مقدار السرعة الزاويّة الثابتة للأسطوانة (أ) عندما تكون طاقتها الحركية الدورانية (32 J). علما بأن كتلتها (2.0 kg)، ونصف قطرها (0.50 m).

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، فيكون عزم القصور الذاتي للنظام (I) طلب المعلّم من الطالب ضمّ ذراعيه؛ كما في الشكل B؛ فأصبحت سرعة الزاوية النهائية (5) أضعاف سرعته الزاويّة الابتدائية. أجيب عن الأسئلة الآتية:

أ . ما سبب الزيادة في السرعة الزاويّة؟

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

(B)



(A)

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

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

أ . 9 ب. 3 جـ. $\frac{1}{3}$ د. $\frac{1}{9}$

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

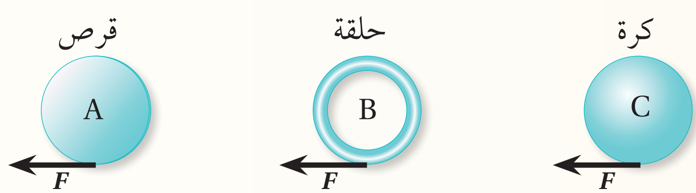
أ . ω يزداد، L يقل. ب. ω يقل، L يزداد.

جـ. ω يزداد، L يبقى ثابت. د . ω يقل، L يبقى ثابت.

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

أ . 2 ب. 2.4 جـ. 2.67 د. 4

* يبين الشكل كرةً مصمتةً وحلقةً وقرصًا تتساوى في نصف القطر والكتلة. أثّرت في الأجسام الثلاثة قوًى مماسية متساوية فحركتها من السكون ، حول محور ثابت يمر في مركز كل منها عموديا عليه. معتمدا على البيانات المثبتة في الشكل أجيب عن الفقرتين الآتيين:



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

أ . الكرة المصمتة لها أكبر زخم زاوي. ب. الحلقة لها أكبر زخم زاوي

جـ. القرص له أكبر زخم زاوي. د. الأجسام الثلاثة متساوية في الزخم الزاوي.

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

أ . $\omega_A > \omega_B > \omega_C$ ب. $\omega_A > \omega_C > \omega_B$

جـ. $\omega_C > \omega_A > \omega_B$ د . $\omega_B > \omega_A > \omega_C$

اتّزان الجسور

Equilibrium of Bridges

جسر عبدون

يتطلّب بناءُ المنشآت -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.

تصمم الجسور بأشكال مختلفة، ويتعرض كلٌّ منها لقوًى مختلفةٍ تؤثّر في مكوّناته، تعمل على شدّها أو ضغطها. إذ تؤثّر 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 دقيقةً مضبوطةً لهذه القوى ومواقع دعامات الجسر والمسافات بينها ومقدار أكبر ثقل يُمكن أن يتحمّله الجسر دون أن ينهار.

مراجعة الوحدة

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

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

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

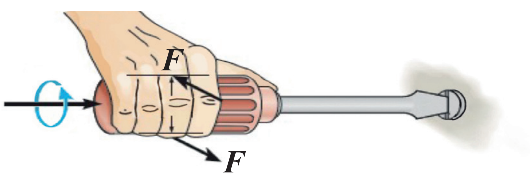
2. وحدة قياس عزم القصور الذاتي حسب النظام الدولي للوحدات هي:

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

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

أ. $1.6\ rad/s^2, +z$ ب. $1.6\ rad/s^2, -z$ جـ. $0.2\ rad/s^2, +z$ د. $0.2\ rad/s^2, -z$

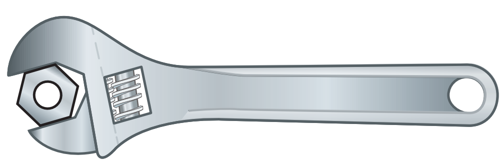
4. تستخدم سلمى -كما يُبيّن الشكل- مِفكّ براغي لفكّ برغيٍّ ولم تتمكّن من ذلك. يجب على سلمى استخدام مفكّ آخر يكون مقبضه:



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.

5. 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. أقل سُمكًا من سُمك مفتاح الشدّ المستخدم.

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

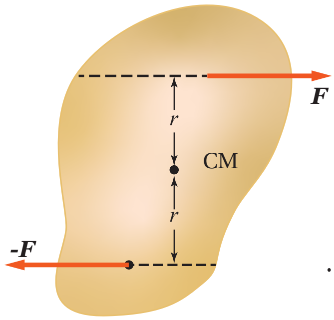
أ . الجزء الموجود على اليمين.

ب. الجزء الموجود على اليسار.

جـ. كلا الجزأين له الكتلة نفسُها.

د . لا يمكن تحديده.

7. 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؟



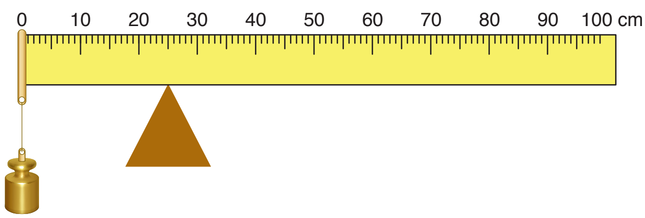
أ. الجسم في حالة اتّزانٍ سكونيٍّ؛ حيث القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه تساوي صفرًا.

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.

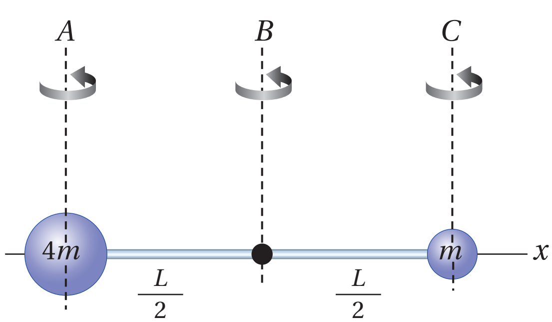
د. الجسم ليس في حالة اتّزان سكونيٍّ، ويبدأ الدوران باتّجاه حركة عقارب الساعة.

8. مسطرةٌ متريّةٌ مُنتظمةٌ متماثلةٌ ترتكزُ على نقطةٍ عند التدريج (25 cm). عُلّق ثقلٌ كتلتُه (m) عند التدريج (0 cm) للمسطرة، فاتّزنت أُفقيًّا، كما هو موضّحٌ في الشكل المجاور. إنّ كتلة المسطرة تساوي:



أ. m ب. $0.5\ m$ جـ. $0.4\ m$ د. $0.2\ m$

9. قضيبٌ فلزيّ خفيف مهمل الكتلة، طوله (L)، ثُبّتت على طرفيه كُرتان نُقطيتان كتلتاهما ($m, 4m$)، كما في الشكل المجاور. (A, B, C) ثلاثة محاور يمكن للنظام أن يدور حولها. إذًا يكون عزم القصور الذاتي للنظام أكبر ما يمكن عند دورانه حول:



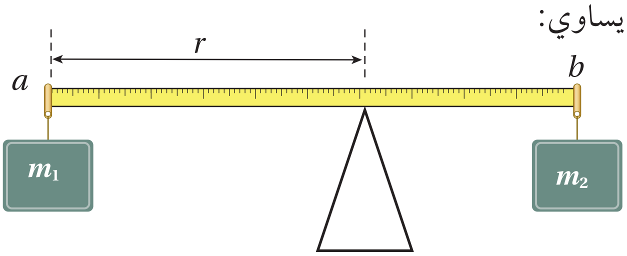
أ. المحور (A).

ب. المحور (B).

جـ. المحور (C).

د. عزم القصور الذاتي متساو في الحالات الثلاثة.

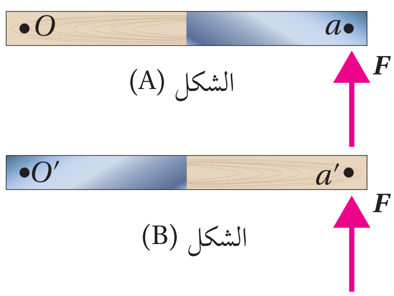
10. يبين الشكل مسطرةً متريّةً مُنتظمةً كتلتها مهملة، ومعلق بطرفيها (a) و (b) ثقلين كتلتيهما (m_1) و (m_2). كي تتزن المسطرة؛ فإن بُعدَ نقطة الارتكاز (r) عن الطرف (a) يساوي:



أ. $\frac{m_2}{m_2 + m_1}$ ب. $\frac{m_1 + m_2}{m_2}$

جـ. $\frac{1}{m_1 - m_2}$ د. $m_1 - m_2$

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



* يوضّح الشكل المجاور مسطرةً متريّةً نصفُها خشبٌ ونصفُها الآخر فولاذ. في الشكل (A) المسطرةُ قابلةٌ للدوران حول محورٍ عموديٍّ عليها عند نهايتها الخشبيّة (النقطة O)، وأثرتُ فيها بقوة ($\boldsymbol{F}$) عند نهايتها الفولاذية (النقطة a). وفي الشكل (B) جعلتُ المسطرة قابلةً للدوران حول محورٍ عموديٍّ عليها عند نهايتها الفولاذيّة (النقطة O`)، وأثرتُ فيها بالقوة ($\boldsymbol{F}$) نفسها عند نهايتها الخشبية (النقطة $a$`).

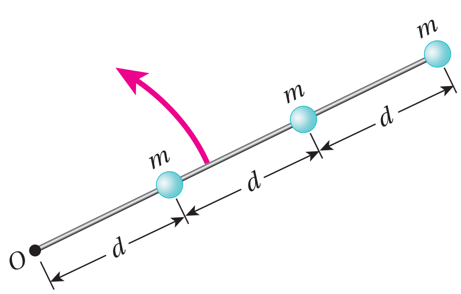
11. العلاقتان الصحيحتان اللتان تصفان عزم القصور الذاتي، والتسارع الزاويّ للمسطرتين حول محوري دورانيهما:

أ. $I_A > I_B , \alpha_A > \alpha_B$ ب. $I_A < I_B , \alpha_A > \alpha_B$ جـ. $I_A > I_B , \alpha_A < \alpha_B$ د. $I_A = I_B , \alpha_A = \alpha_B$

12. باستخدام القانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية، وإذا علمت أن المسطرتين بدأتا الدوران من السكون؛ فإن الجملة الصحيحة التي تصف الزخم الزاوي للمسطرتين بعد مدة من الزمن:

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

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

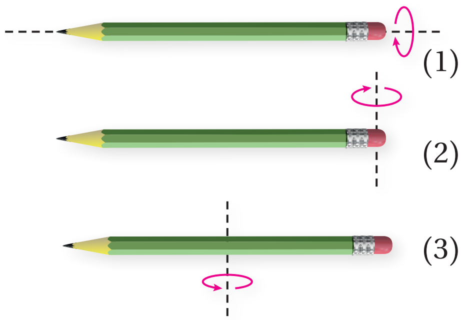


أ. $m\omega d^2$ ب. $\frac{4}{3} m\omega d^2$
جـ. $\frac{1}{3} m\omega d^2$ د. $4\, m\omega d^2$

2. **أُفسّرُ** ما يأتي:
أ. عند حساب العزم المحصّل المؤثّر في جسمٍ؛ تُهمل القوى التي يمرُّ خطُّ عملها في محور الدوران.
ب. يعتمد عزم القصور الذاتيّ لجسمٍ على موقع محور دورانه.

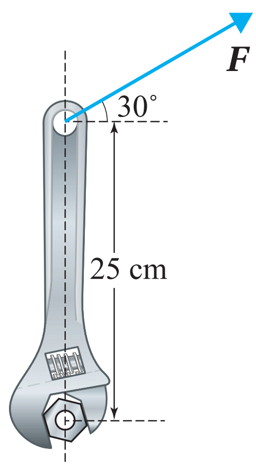
3. **أُقارن** بين كتلة جسمٍ وعزم القصور الذاتي له.

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



5. **أستنتج:** 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. **أفسر:** يقفز غطّاس عن لوح غطسٍ مُتّجهًا نحو سطح الماء في البركة. وبعد مغادرته لوح الغطس بدأ بالدوران، وضمَّ قدميه وذراعيه نحو جسمه. لماذا ضمّ الغطّاس قدميه وذراعيه نحو جسمه في أثناء أدائه لحركات الدوران؟

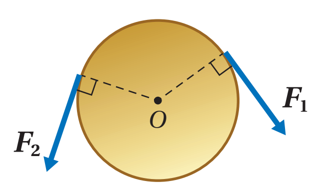


7. **أستخدم الأرقام:** تستخدم فاتن مفتاح شدٍّ لشدِّ صامولةٍ؛ كما هو موضح في الشكل المجاور. أستعينُ بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي، علمًا أنّ مقدار العزم اللازم لفكّ الصامولة يساوي (50.0 N.m).

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

ب. أُحدّد اتّجاه دوران مفتاح الشدّ.

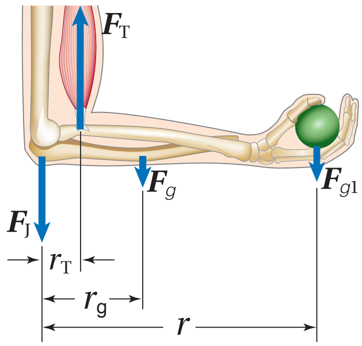
8. **أستخدم الأرقام:** قرص نصف قطره (2.0 cm)، وكتلته (20.0 g)، أثرت فيه القوى المماسية المبينة في الشكل، فبدأ بالدوران من السكون حول محور عمودي على مركزه (O)، بحيث أصبحت سرعته الزاوية (250 rad/s) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة وذلك بعد مرور (1.25 s) من بدء الحركة. إذا كان مقدار القوة ($F_1 = 0.1$ N) فما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



9. **أستخدم 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.

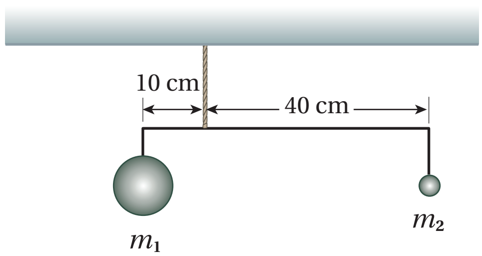
ب. السرعة الزاويّة للّعبة عندما تنتقل هناء إلى موقع على بُعد (2 m) من محور دوران اللعبة.



10. **أستخدم الأرقام:** ترفع جمانة بيدها ثقلاً وزنُه (40.0 N)، في أثناء ممارستها للتمارين الرياضية في نادٍ رياضيّ. إذا علمتُ أنّ نقطة التقاء العضلة ثنائيّةَ 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 وزن الثقل المحمول في اليد ($r = 35.0$ cm) عن المرفق، والساعد متّزنٌ أفقيًّا والقوى جميعها رأسية في الوضع الموضّح في الشكل، فأحسبُ ما يأتي:

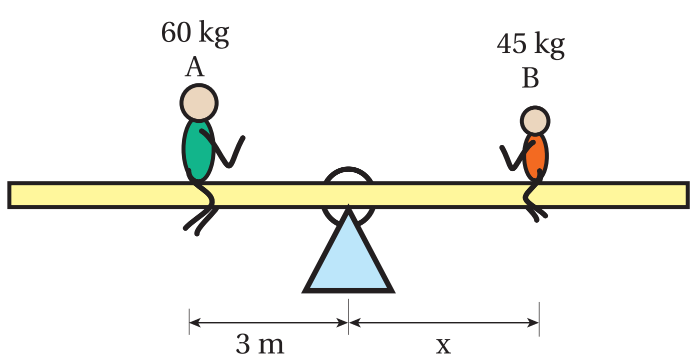
أ . قوّة الشدّ في العضلة (F_T) المؤثّرة في الساعد.

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



11. **أستخدم الأرقام:** في الشكل المجاور كرتان معلقتان بقضيب أفقي مهمل الكتلة، إذا كان مقدار كل من الكتلتين ($m_1 = 11$ kg) و ($m_2 = 2$ kg). أين يجب تعليق كتلة ثالثة ($m_3 = 3$ kg) بالنسبة إلى نقطة تعليق النظام كي يكون النظام متزنًا؟

12. يبين الشكل المجاور ولدين كتلتيهما ($m_A = 60$ kg) و ($m_B = 45$ kg)، يجلسان على لعبة (See–Saw) تتكون من لوح خشبي، فيتزن اللوح عند نقطة الارتكاز الواقعة عند منتصفه.



أ . **أستخدم الأرقام:** أحسب بعد الولد (B) عن نقطة الارتكاز.

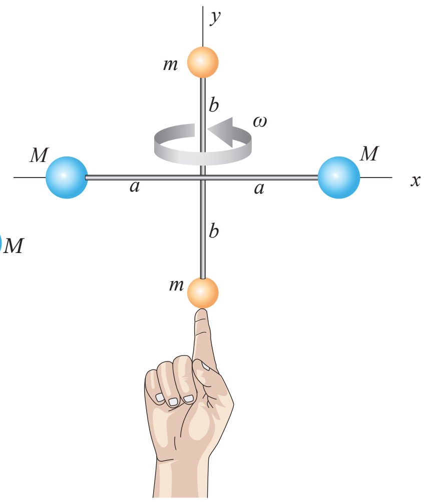
ب . **أصدر حكما:** هل سيبقى اللوح مُتّزنًا أم لا، للحالتين الآتيتين، ثمّ أوضح إجابتي.

- إذا تحرك كل ولد نحو نقطة الارتكاز مسافة (1 m).
- إذا تحرك الولد (A) مسافة (1 m) مبتعدا عن نقطة الارتكاز، بينما تحرك الولد (B) مسافة ($\frac{4}{3}$ m) مبتعدا عن نقطة الارتكاز.

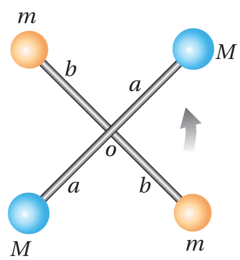
13. **أستخدم الأرقام:** يدور نظامٌ يتكوّن من أربع كراتٍ صغيرةٍ مثبّتةٍ في نهايات قضيبين مُهمَلي الكتلة كما هو موضّحٌ في الشكل المجاور. إذا علمتُ أنّ $(a = b = 20\ \text{cm})$، و$(m = 50\ \text{g})$، و$(M = 100\ \text{g})$، وأنصافَ أقطارِ الكرات مهملةً مقارنةً بطولي القضيبين؛ بحيث يُمكن عدُّها جُسيماتٍ نقطيّةً؛ أحسب الطاقة الحركية الدورانية للنظام عندما يدور بسرعة زاوية (2rad/s) حول:

أ. محور (y) كما في الشكل (أ).

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

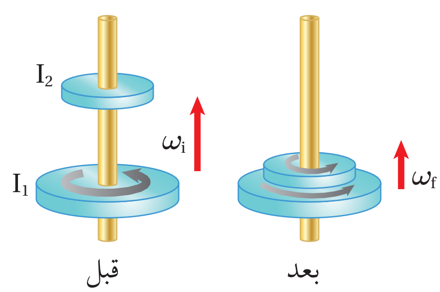


(أ)



(ب)

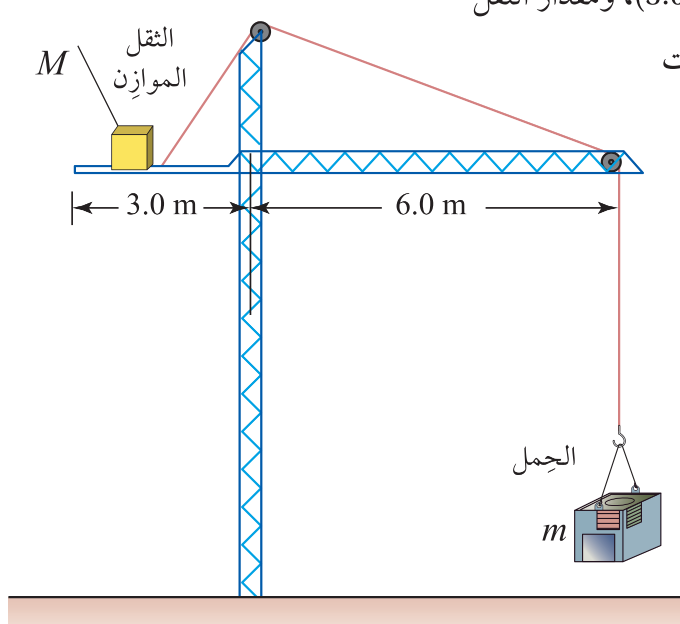
14. **أستخدم الارقام:** يدور قرص عزم القصور الذاتي له (I_1) حول محور ثابت أملس بسرعة زاوية $(\omega_i = 20\ \text{rad/s})$، أُسقط نحوه قرص ساكن عزم القصور الذاتي له (I_2) فتحركا كجسم واحد، كما يبين الشكل المجاور. إذا علمتُ أن عزم القصور الذاتي (I_1) ثلاث أضعاف (I_2). أحسب السرعة الزاوية النهائية (ω_f).



15. **أستخدم الأرقام:** تُستخدم بعضُ أنواع الروافع لرفع الأحمال الثقيلة إلى أعالي الأبراج والبنايات العالية. ويجب أن يكون العزم المُحصّل المؤثّر في هذه الرافعة صفرًا؛ كي لا تدور أو تسقط؛ لذا يوجد ثقلٌ موازِنٌ M على الرافعة لتحقيق اتّزانها، حيث يُحرّك عادةً هذا الثقل تلقائيًّا عبر أجهزة استشعارٍ ومحرّكاتٍ لموازنة الحِمل بدقّة. يبيّن الشكل المجاور رافعةً في موقع بناءٍ ترفع حِملًا مقداره $(3.0 \times 10^3\ \text{kg})$، ومقدار الثقل الموازِن $(1.0 \times 10^4\ \text{kg})$. أستعينُ بالشكل والبيانات المثبّتة فيه للإجابة عمّا يأتي، وبإهمال كُتلة الرافعة.

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

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



الوحدة 3

الكهرباء السكونية

Static Electricity

أتأمّل الصورة

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

تتعرض طائرات الركاب بشكل متكرر للبرق في أثناء مرورها خلال الغيوم. ماذا يحدث للطائرة عندما يضربها البرق وهي محلّقة في الجو؟ هل تشكل الصواعق خطرًا على الطائرات وركّابها؟

الفكرة العامّة:

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

الدرس الأول: المجال الكهربائي

Electric Field

الفكرة الرئيسة: عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تستقر على سطحه الخارجي، ولحساب المجال الكهربائي الناشىء عن موصل مشحون نستخدم قانون غاوس.

الدرس الثاني: الجهد الكهربائي

Electric Potential

الفكرة الرئيسة: عندما يتحرك جُسيم مشحون في مجال كهربائي؛ فإنّ المجال يؤثّر فيه بقوة كهربائية يمكن أن تبذل شغلًا على الجسيم. هذا الشغل يُوصف باستخدام مفهومين هما طاقة الوضع الكهربائية، وفرق الجهد الكهربائي.

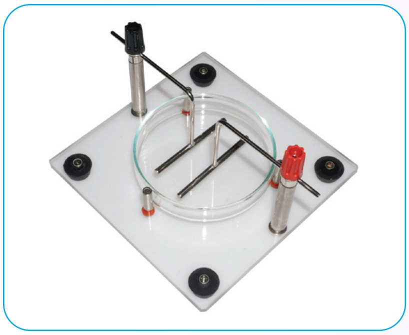
الدرس الثالث: المُوَاسعة الكهربائية

Electrical Capacitance

الفكرة الرئيسة: تختلف المواسعات الكهربائيّة في أشكالها ومقادير مواسعاتها وطرائق توصيلها معًا؛ وتكمن أهمّيتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائيّة، وتُستعمل في الكثير من التطبيقات العملية.

تخطيط المجال الكهربائيّ المنتظم

الموادّ والأدوات: مصدر كهربائيّ عالي القدرة (0–3 kV) أو مولّد فان دي غراف، طبق بتري زجاجي، قطبان كهربائيان من الألمنيوم، قِطَع بلاستيكية عازلة لتثبيت القطبين، زيت الخروع أو أيّ زيت نباتيّ قليل اللزوجة، بذور أعشاب صغيرة الحجم (مثل بذور البقدونس).



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

تحذير: جهد كهربائيّ عالٍ جدًّا يُسبّب صعقة كهربائيّة.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذ الخطوات الآتية:

1. أضع كمّيةً من الزيت في الطبق الزجاجيّ حتى ارتفاع (0.5 cm) تقريبًا، ثمّ أنثرُ فوقها كمّيةً قليلةً من بذور الأعشاب، وأُحرّك الزيت بقضيب زجاجي رفيع كي تنتشر بذور الأعشاب فوق الزيت.
2. أُثبّت القطبين الكهربائيين في العازل بحيث ينغمس طرفاهما في الزيت، ثم أوصلهما بمصدر الطاقة الكهربائيّة أو بمولّد فان دي غراف (عند استعماله بدلًا عن مصدر الطاقة عالي الجهد).
3. بمساعدة معلمي/ معلمتي؛ أضبطُ مصدر الطاقة على جهد يقع بين (2,000 – 3,000 volts)، أو أُشغّل مولّد فان دي غراف (عند استعماله بدلًا عن مصدر الطاقة عالي الجهد).
4. **أُلاحظ** اصطفاف البذور في الحيّز بين الصفيحتين، حيث يمثّل النمط الذي أحصل عليه خطوط المجال الكهربائي في الحيّز بين الصفيحتين.
5. بمساعدة معلمي/ معلمتي؛ أُطفئ مصدر الطاقة، أو أوقف مولّد فان دي غراف وأُفرّغ شحنته، ثمّ أُغيّر المسافة بين القطبين داخل الزيت، وأُكرّر خطوات التجربة.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُفسّر** سبب استعمال زيت نباتي، وعدم استعمال الماء في الطبق الزجاجي.
2. أصف خطوط المجال الكهربائي في الحيّز بين الصفيحتين، وأوضّحُ إجابتي بالرسم.
3. **أُفسّر** سبب تأثّر بذور الأعشاب بقوى كهربائيّة؛ على الرغم من عدم شحنها قبل التجربة.

المجال الكهربائي
Electric Field

الفكرة الرئيسة:

عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تستقر على سطحه الخارجي، ولحساب المجال الكهربائي الناشيء عن موصل مشحون نستخدم قانون غاوس.

نتاجات التعلم:

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

المفاهيم والمصطلحات:

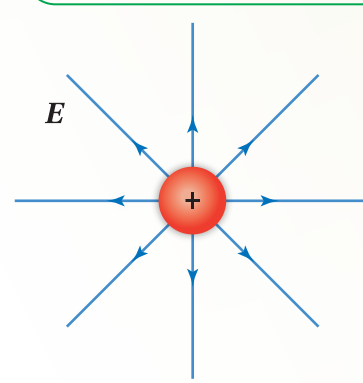
التدفق الكهربائي Electric Flux
قانون غاوس Gauss's Law
الكثافة السطحية للشحنة Surface Charge Density
مجال كهربائي منتظم Uniform Electric Field

خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines

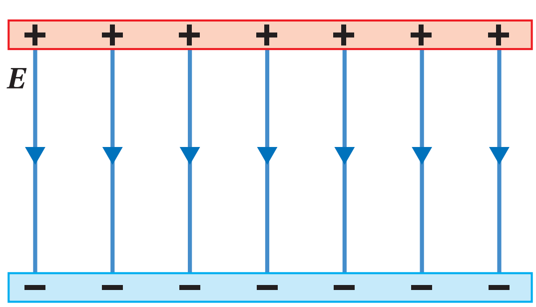
يُولّد الجسم المشحون في الحيز المحيط به مجالًا كهربائيًا؛ يظهر تأثيره على شكل قوة كهربائية تؤثّر في الأجسام المشحونة الأخرى التي تقع ضمن المجال.

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

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



(أ): خطوط المجال لشحنة نقطية موجبة.



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

الشكل (1): خطوط المجال الكهربائي.

التدفق الكهربائي Electric Flux

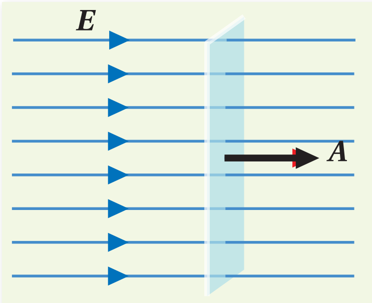
يبين الشكل (2/ أ) خطوط مجال كهربائي منتظم مقداره (E)، تخترق سطحًا مستطيلًا مساحته (A)، ومستواه عمودي على المجال. وقد تعلمت مسبقًا؛ أن عدد خطوط المجال لكل وحدة مساحة يتناسب طرديًا مع مقدار المجال، لذلك؛ فإن عدد الخطوط الكُلّي التي تخترق السطح يتناسب طرديًا مع ناتج الضرب (EA)، ويُسمى الناتج بالتدفق الكهربائي.

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

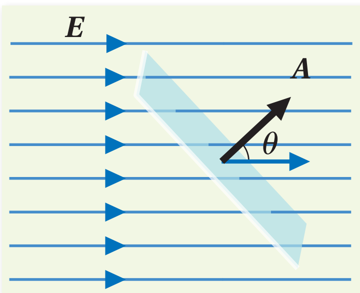
بصورة عامة، يعرف **التدفق الكهربائي Electric flux** بأنه ناتج الضرب النقطي لمتجه المجال الكهربائي ($\boldsymbol{E}$) في متجه المساحة ($\boldsymbol{A}$)، ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Phi = \boldsymbol{E}.\boldsymbol{A} = EA\cos\theta$$

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



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



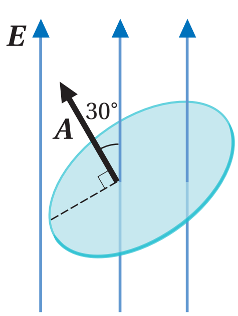
(ب) : التدفق الكهربائي عبر سطح مستواه يميل عن المجال بزاوية.

الشكل (2): التدفق الكهربائي.

أتحقّق: ما العوامل التي يعتمد عليها التدفق الكهربائي عبر سطح مستوٍ؟

المثال 1

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



الشكل (3): حساب التدفق الكهربائي.

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

المطلوب: $\Phi = ?$

الحل:

مساحة السطح، تحسب من العلاقة :

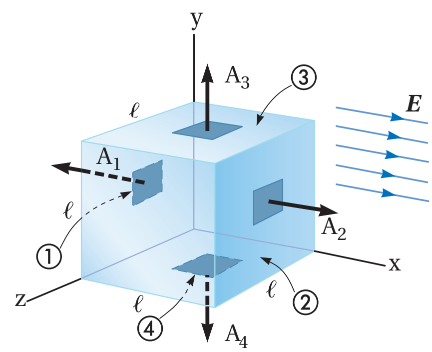
$$A = \pi r^2 = \pi(0.1)^2 = 0.0314\ \mathrm{m^2}$$

ثم يحسب التدفق الكهربائي من العلاقة:

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

التدفُّق الكهربائي عبر سطح مغلق

Electric Flux Through a Closed Surface



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

يبين الشكل (4) مُكعبًا موضوعًا في مجال كهربائي منتظم. يُعدُّ المكعب مثالًا على سطح مغلق. ويمكن حساب التدفق عبر أحد أوجه المكعب باستخدام العلاقة ($\Phi = EA\cos\theta$)؛ وذلك برسم متجه المساحة عموديًا على ذلك السطح نحو الخارج، ثم تحديد الزاوية (θ) بين متجهي المجال والمساحة، ويبين الشكل متجهات المساحة المرسومة على أربعة من أوجه المكعب الستة. ويتضح من الشكل الأمور الآتية:

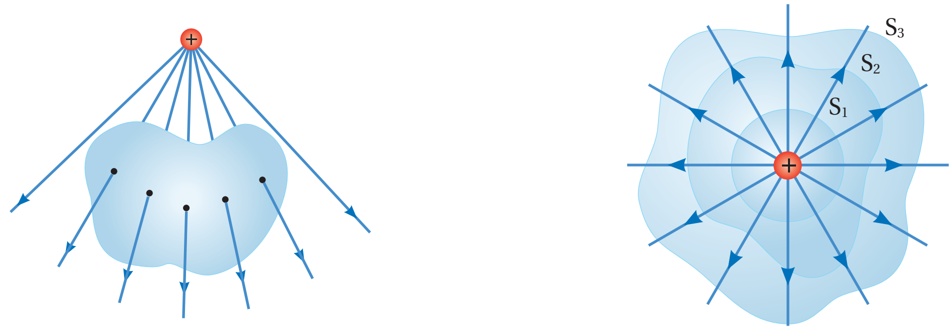
- تخترق خطوط المجال السطح (2) خارجة منه، والزاوية بين متجهي المجال والمساحة ($\theta = 0°$)، فيكون التدفق عبر السطح موجبًا ($E_1 = EA\cos0° = EA$).
- تخترق خطوط المجال السطح (1) داخلة فيه، والزاوية بين متجهي المجال والمساحة ($\theta = 180°$)؛ فيكون التدفق عبر السطح سالبًا ($E_2 = EA\cos180° = -EA$).
- لا تخترق خطوط المجال السطحين العلوي والسفلي (3، 4) حيث الزاوية ($\theta = 90°$)، كذلك لا تخترق الخطوط الأسطح الجانبية الموازية للمجال؛ فيكون التدفق عبر هذه الأسطح يساوي صفرًا.
- التدفق الكُلّي (Φ_{net}) عبر المكعب هو مجموع التدفق عبر سطوح المكعب ويساوي صفرًا.

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

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

عند رسم متجه المساحة يجب مراعاة الفرق بين حساب التدفق عبر سطح مغلق وحساب التدفق عبر سطح مستوي، فالأسطح ثلاثية الأبعاد ؛ مثل الكرة أو المكعب هي أسطح مغلقة، يرسم متجه المساحة دائما عموديًّا عليها نحو الخارج، فإذا كانت خطوط المجال خارجة من السطح يكون التدفق موجبًا، وإذا كانت خطوط المجال داخلة في السطح يكون التدفق سالبًا. أما عندما تخترق خطوط المجال سطحا مستويًا؛ مثل المربع أو الدائرة، فلا توصف خطوط المجال بأنّها داخلة أو خارجة من السطح، ويرسم متجه المساحة عادةً مع اتجاه خطوط المجال.

أتحقّق: قد يكون التدفق الكهربائي عبر جزء من سطح مغلق موجبًا أوسالبًا. علام تدل إشارة التدفق؟



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

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

الشكل (5): التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق.

قانون غاوس Gauss's law

يوضح قانـون غاوس العلاقـة بين التدفق الكهربائي الكُلّي عبر سطح مغلق، والشحنـة الكهربائيـة المحتواة داخـله، وينـصُّ **قانون غاوس Gauss's law** أن: التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق يساوي الشحنة الكلية داخـل السطح مقسومةً على السماحية الكهربائية للهواء (الوسط المحيط بالشحنة). ويعطى بالعلاقة الآتية:

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

حيث: (q_{in}) الشحنة الكلية المحتواة داخل السطح.

(ε_o) السماحية الكهربائية للهواء.

تخبرنا هذه العلاقة أن التدفق الكهربائي الكُلّي عبر سطح مغلق، لا يعتمد على شكل السطح؛ فإذا افترضنا أن ثلاثة أسطح مختلفة (S_1, S_2, S_3) تحيط بشحنة نقطية (q)، كما يبين الشكل(5/ أ)؛ فإن التدفق الكُلّي يكون متساويًا عبر الأسطح الثلاثة؛ لأن عدد الخطوط الكُلّي التي تخترق كُلًّا من الأسطح الثلاثة يكون متساويًا.

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

أُفكّر: سطح غاوس كروي الشكل يحيط بشحنة نقطية (q)، موضوعة عند مركز السطح. أوضح ما يحدث للتدفق الكهربائي في الحالات الآتية:

أ . إزاحة الشحنة عن المركز مع بقائها داخل السطح.

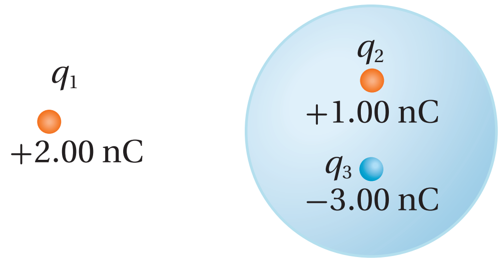
ب. مضاعفة الشحنة داخل السطح ثلاث مرات.

جـ. مضاعفة نصف قطر السطح الكرويّ المحيط بالشحنة (q) مرتين.

د . استخدام مكعب يحيط بالشحنة (q) بدلًا من السطح الكروي.

المثال 2

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



الشكل (6): التدفق عبر سطح كروي بداخله شحنات نقطية.

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

المطلوب: $\Phi = ?$

الحل:

التدفق الكهربائي يعتمد على الشحنة الكلية داخل السطح فقط:

$$\Phi = \frac{q_{in}}{\varepsilon_o} = \frac{q_2 + q_3}{\varepsilon_o}$$

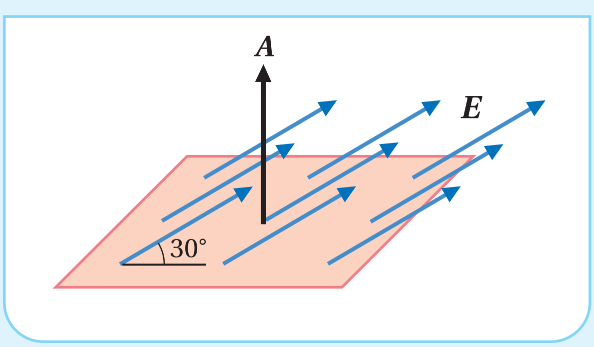
$$= \frac{1.00 \times 10^{-9} - 3.00 \times 10^{-9}}{8.85 \times 10^{-12}}$$

$$= -2.26 \times 10^{2}\ N.m^2/C$$

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

تمرين

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



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

المجالات الكهربائية لتوزيعات متصلة من الشحنات

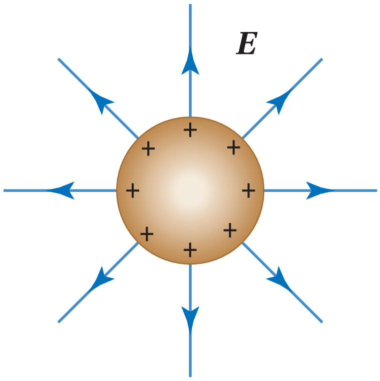
Electric Fields of a Continuous Charge Distributions

من التطبيقات المهمة لقانون غاوس، استخدامه في حساب المجالات الكهربائية الناشئة عن توزيعات مُتّصلة من الشحنات الكهربائية، ومن الأمثلة على توزيع متصل من الشحنات؛ الموصل الكروي المشحون المبين في الشكل (8).

عند شحن جسم موصل؛ فإن الشحنات تتباعد عن بعضها بعضًا بسبب تنافُرها وتستقر على السطح الخارجي للموصل. ويمثل ناتج قسمة شحنة الموصل (Q) على مساحة سطحه (A)، ما يعرف **بالكثافة السطحية للشحنة Surface charge density**، ورمزها (σ)، وتُعرف بأنها كمية الشحنة لكل وحدة مساحة، ووحدة قياسها (C/m^2)، وتعطى بالعلاقة الآتية:

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

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



الشكل (8): تتوزع الشحنات الكهربائية على السطح الخارجي للموصل الكروي بانتظام؛ فتولّد حوله مجالًا كهربائيًا، وتُرسم خطوط المجال الكهربائي عموديةً على سطح الموصل.

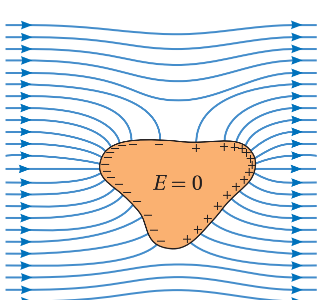
أتحقّق: لماذا تتوزّع الشحنات على السطح الخارجي للموصل المشحون، ولا تستقر في الداخل؟

الربطُ بالتكنولوجيا

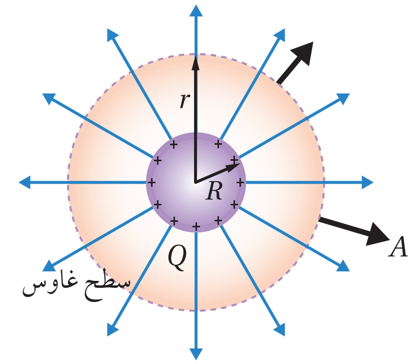
قفص فارادي؛ عبارةٌ عن وعاء أو جسم موصل يمنع المجال الكهربائي من اختراقه. سُمِّيَ قفص فارادي نسبة إلى العالم مايكل فارادي الذي ابتكر هذا القفص لأول مرة في عام 1836م.

وتتمثل آلية عمله في أن المجال الكهربائي الخارجيّ يتسبب في شحن القفص الفلزّي بالحث، كما هو مبين في الشكل، فينشأ داخله مجال كهربائي مساوٍ للمجال الخارجي ومعاكس له في الاتجاه؛ فيكون المجال المحصل داخل القفص صفرًا.

من التطبيقات العملية على قفص فاردي؛ حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهرمغناطيسية عن طريق تغليفها بمادة موصلة، كذلك؛ فإن هيكل السيارة أو الطائرة هو قفص فارادي يوفر الحماية لمن بداخلها في أثناء تعرُّضها إلى صاعقة برق.



المجال الكهربائي لكرة موصلة مشحونة
Electric Field of a Charged Conducting Sphere



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

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

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

$$\Phi = EA$$

حيث مساحة سطح غاوس ($A = 4\pi r^2$)

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

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

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

- نعوض شحنة الكرة على أنها الشحنة داخل سطح غاوس ($q_{in} = Q$)؛ فنتوصل إلى أن المجال الكهربائي:

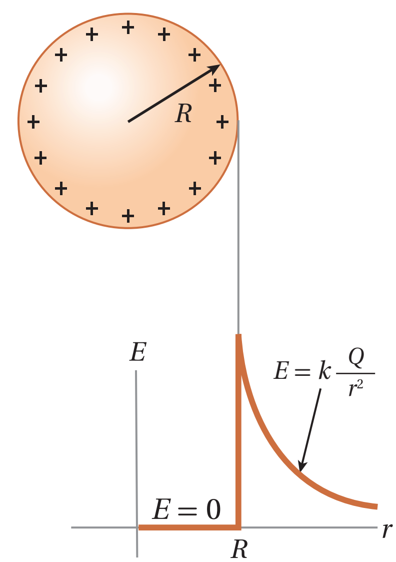
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r^2}$$

يمكن التعبير عن الثوابت بالرمز ($k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$)، حيث ($K = 9 \times 10^9\ \mathrm{Nm^2/C^2}$).

وبذلك يمكن التعبير عن المجال الكهربائي بالصورة الآتية:

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

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



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

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

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

المثال 3

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

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

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

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

المعطيات: $R = 0.2\ m,\ \sigma = 3.1 \times 10^{-7}\ C/m^2,\ \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$

المطلوب: اثبات العلاقة ، $E = ?$

الحل:

أ . المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون يعطى بالعلاقة:

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

وبتعويض الشحنة (Q) بدلالة الكثافة السطحية للشحنة:

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

فإن المجال الكهربائي يمكن التعبير عنه بالصورة الآتية:

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

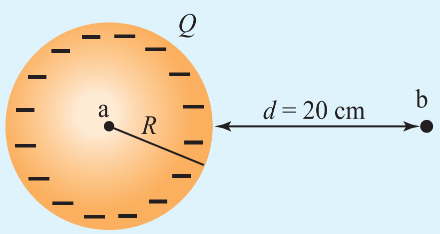
ب. لحساب المجال الكهربائي عند نقطة قريبة جدًا من السطح؛ فإن $(r \to R)$:

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

$$= \frac{3.1 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 3.5 \times 10^4\ N/C$$

تمرين

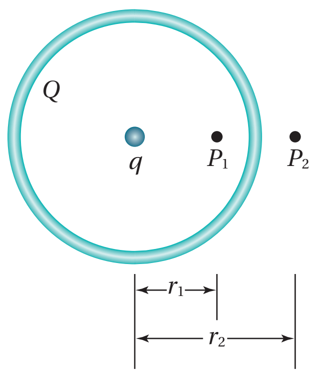
أستخدم الارقام: يوضّح الشكل (11) كرة نحاسية نصف قطرها (10 cm)، موضوعة في الهواء ومشحونة بشحنة سالبة (−12 μC). مستعينًا بالشكل؛ أجد المجال الكهربائيّ عند كل من النقطتين (b,a).



الشكل (11): كرة نحاسية مشحونة بشحنة سالبة.

المثال 4

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



الشكل (12/ أ): كرة مجوفة وشحنة نقطية.

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

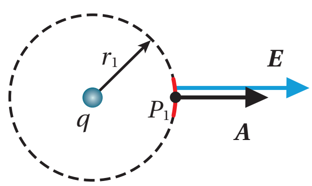
المطلوب: $E_1 = ?\ ,\ E_2 = ?$

الحل:

لحساب المجال الكهربائي عند النقطة (P_1):

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

ثم نرسم متجه المجال عموديًا على السطح خارجًا منه؛ لأن الشحنة الكلية داخل السطح موجبة $(q_{in} = q)$. فتكون الزاوية بين متجهي المجال والمساحة تساوي صفرًا $(\theta = 0°)$.



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

نطبق قانون غاوس:

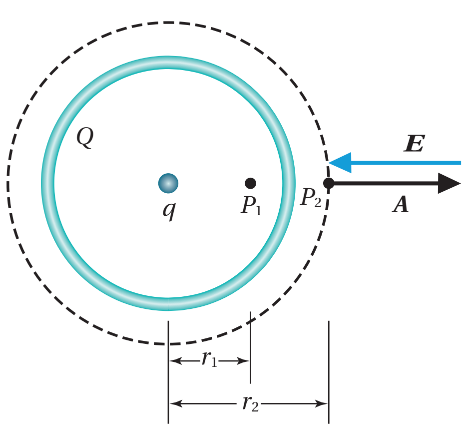
$$EA\cos 0° = \frac{q_{in}}{\varepsilon_o}$$

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

$$E = \frac{5e}{4\pi\varepsilon_o \times (6.0 \times 10^{-2})^2}$$

$$= \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{36 \times 10^{-4}} = 2.0 \times 10^{-6}\ N/C$$

لحساب المجال الكهربائي عند النقطة (P_2)؛ نتبع الخطوات ذاتها، فنرسم سطح غاوس كما يبين الشكل (12/ جـ)، ونلاحظ أن الشحنة الكلية داخل سطح غاوس سالبة $(q_{in} = Q + q = -11e)$؛ فنرسم متجه المجال داخلًا في السطح، وتكون الزاوية بين متجهي المجال والمساحة $(\theta = 180°)$. وبتطبيق قانون غاوس:



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

$$E\,A\cos(180°) = \frac{q_{net}}{\varepsilon_o} \rightarrow E = \frac{-11e}{4\pi\varepsilon_o \times (12.0 \times 10^{-2})^2}$$

$$= 1.1 \times 10^{-6}\ N/C$$

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

يبين الشكل (13) مقطعًا من قشرة رقيقة مستوية لا نهائية الأبعاد، القشرة مشحونة بشحنة موجبة تتوزع على سطحها بكثافة سطحية منتظمة (σ)، ويبين الشكل أن خطوط المجال الكهربائي عمودية على سطح القشرة، كما يبين الشكل أن اتجاه المجال على أحد جانبي القشرة عكس اتجاهه على الجانب الآخر.

باستخدام قانون غاوس؛ يمكن حساب المجال الكهربائي الناتج عن القشرة، باتباع الخطوات الآتية:

- نختار جزءًا من القشرة مساحته (A)، ونرسم سطح غاوس الذي يحيط بهذا الجزء على شكل اسطوانة مساحة كل من قاعدتيها (A).
- نرسم متجه المساحة عموديًا على قاعدتي الاسطوانة، فيكون المتجه (A) موازيًا للمجال ($\theta = 0°$) على جانبي القشرة، أما السطح الجانبي للاسطوانة فلا تخترقه خطوط المجال.
- نطبق قانون غاوس لحساب التدفق الكُلّي عبر سطح غاوس:

$$E(2A) = \frac{q_{in}}{\varepsilon_o}$$

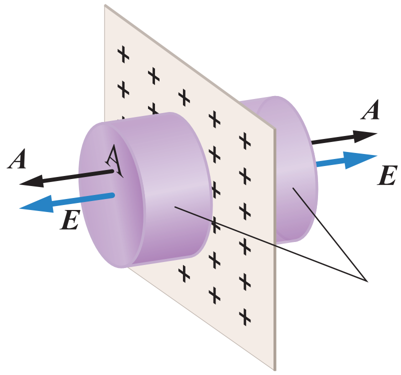
حيث يمثل ($2A$) مجموع مساحتي وجهي الاسطوانة.

- نعوض الشحنة داخل سطح غاوس ($q_{in} = \sigma A$)؛ فنتوصل إلى أن المجال الكهربائي:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o}$$

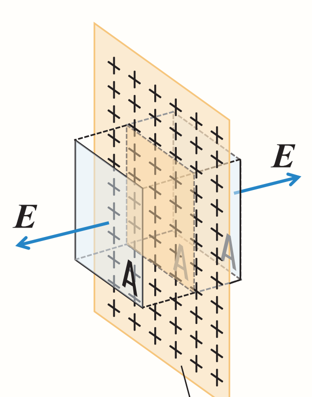
توضح هذه العلاقة أن المجال الكهربائي للقشرة اللانهائية الأبعاد مجالٌ منتظم لا يعتمد على بعد النقطة التي يُقاس عندها المجال عن القشرة. وتستخدم لحساب مقدار المجال الكهربائي سواء كانت شحنة القشرة موجبة أو سالبة. حيث تعوض الكثافة السطحية للشحنة بدون الإشارة.

✓ **أتحقّق:** أصف خطوط المجال الكهربائي الناشئ عن قشرة رقيقة مستوية لا نهائية الأبعاد مشحونة بشحنة موجبة.



الشكل (13): قشرة رقيقة مستوية لا نهائية الأبعاد، مشحونة بشحنة موجبة .

أُفكّر: هل يمكن التوصّل إلى حساب المجال الكهربائيّ الناتج عن قشرة مشحونة لانهائية الأبعاد؛ بافتراض سطح غاوس الوهمي، على شكل مكعّب مساحة وجهه (A)، كما في الشكل. أُوضّح إجابتي.



المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field

يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم **Uniform Electric Field** بوضع صفيحتين موصلتين متماثلتين متوازيتين ومتقابلتين، وتفصل بينهما مسافة قصيرة مقارنة بأبعادهما، كما يبين الشكل (14)، ثم شحنهما بشحنتين مختلفتين نوعًا، متساويتين مقدارًا.

يمكن حساب المجال الكهربائي في المنطقة الواقعة بين الصفيحتين، بافتراض أن كل صفيحة قشرة رقيقة؛ فيكون المجال الناشئ عن الصفيحة الموجبة (E_1)، والمجال الناشئ عن الصفيحة السالبة (E_2)، ويكون المجال المحصل (E) مساويًا لناتج جمع المجالين؛ لأنهما بالاتجاه نفسه.

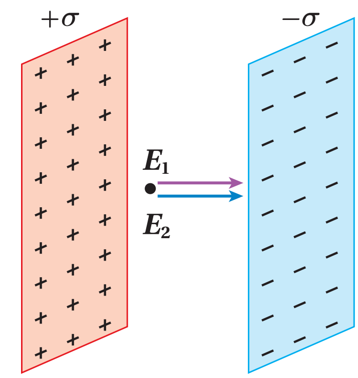
$$E = E_1 + E_2$$

$$= \frac{\sigma}{2\varepsilon_o} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_o}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o}$$

حيث (σ) مقدار الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحة الواحدة.

✔ **أتحقّق**: كيف يمكن حساب المجال الكهربائي في الحيز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين مختلفتين نوعًا متساويتين مقدارًا؟



الشكل (14): المجال الكهربائي عند نقطة بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين يساوي المجال المحصل الناتج عن الصفيحتين.

المثال 5

كرة صغيرة مشحونة، كتلتها (10.0 g) وشحنتها (0.700 μC)، تستقر ساكنة فوق قشرة رقيقة مستوية لا نهائية الأبعاد مشحونة بشحنة موجبة تتوزع على سطحها بانتظام، أحسب الكثافة السطحية للشحنة الموزعة على سطح القشرة ($g = 10.0\ \mathrm{m/s^2}$).

المعطيات: $m = 10.0\ \mathrm{g},\ q = -0.700\mu\mathrm{C},\ g = 10.0\mathrm{m/s^2}$

المطلوب: $\sigma = ?$

الحل:

الكرة متزنة تحت تأثير قوتين متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا، هما الوزن (للأسفل) والقوة الكهربائية (للأعلى):

$$mg = Eq$$

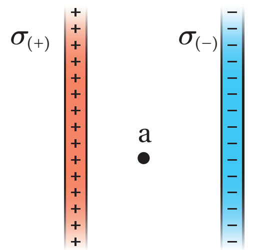
$$mg = \frac{\sigma}{2\varepsilon_\circ} q$$

$$\sigma = \frac{2\varepsilon_\circ mg}{q}$$

$$= \frac{2 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10 \times 10^{-3} \times 10}{0.700 \times 10^{-6}} = 2.53 \times 10^{-6}\ \mathrm{C/m^2}$$

المثال 6

يبين الشكل (15/ أ) صفيحتان موصلتان مشحونتان بشحنتين كهربائيتين؛ إحداهما موجبة والأخرى سالبة، موزعة عليهما بانتظام؛ بكثافة سطحية ($\sigma = 3.54 \times 10^{-7}\ C/m^2$)، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرةً بالنسبة للمسافة الفاصلة بينهما، أجدُ المجال الكهربائي عند كل من النقطتين (a)، و (b).



الشكل (15/ أ): صفيحتان متوازيتان مشحونتان.

المعطيات: $\sigma = 3.54 \times 10^{-7}\ C/m^2,\ \varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$

المطلوب: $E_a = ?\ ,\ E_b = ?$

الحل:

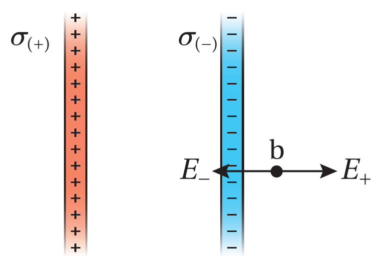
النقطة (a) تقع في الحيز بين الصفيحتين؛ فيكون المجال عندها:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} = \frac{3.54 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 4 \times 10^{4}\ \ N/C$$

النقطة (b) تقع خارج الصفيحتين، ولحساب المجال عند النقطة؛ نفترض وجود شحنة اختبار موجبة ونحدد اتجاه المجال الناشئ عن كل صفيحة، كما في الشكل (15/ ب). فيكون المجال المحصل:

$$E = E_{+} + E_{-}$$

$$= \frac{\sigma}{2\varepsilon_o} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_o} = 0$$



الشكل (15/ ب): المجال الكهربائي عند النقطة (b).

حركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم

Motion of a charged Particle in a Uniform Electric Field

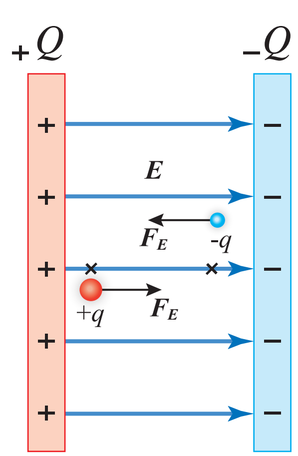
عندما يوضع جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم؛ فإن المجال يؤثر في الجسيم المشحون بقوة ثابتة في المقدار والاتجاه أينما كان موقعه داخل المجال، ويبين الشكل (16) أن اتجاه القوة المؤثرة في جسيم موجب الشحنة يكون باتجاه المجال، ويكون بعكس اتجاه المجال للجسيم سالب الشحنة. وتعطى القوة الكهربائية (F_E) بالعلاقة الآتية:

$$F_E = qE$$

حيث: (q)مقدار شحنة الجسيم المشحون

(E) مقدار المجال الكهربائي المنتظم.

بافتراض أن وزن الجسيم مهمل مقارنةً بالقوة الكهربائية؛ فإن القوة الكهربائية (F_E) تمثل القوة المحصلة ($\sum F$) المؤثرة في الجسيم المشحون،



الشكل (16): تتحرك الشحنة الموجبة والشحنة السالبة الموضوعتين في مجال كهربائي منتظم، باتجاهين متعاكسين.

وبتطبيق القانون الثاني لنيوتن $(\Sigma F = ma)$؛ فإن القوة الكهربائية ستُكسب الجسيم المشحون، وكتلته (m)، تسارعًا ثابتًا يعطى بالعلاقة:

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

يكون اتجاه التسارع باتجاه القوة الكهربائية، وبما أن التسارع ثابت؛ فإن حركة الجسيم يمكن وصفها باستخدام معادلات الحركة بتسارع ثابت وهي:

$$v_f = v_i + at$$

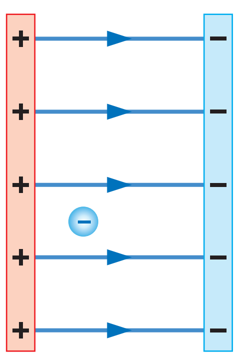
$$\Delta x = v_i t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$$

ستقتصر دراستنا على تطبيق معادلات الحركة على الجسيمات المتحركة في بعد واحد (موازية للمجال).

المثال 7

جُسيم كتلته $(200\ \text{mg})$ يحمل شحنة مقدارها $(-4.00 \times 10^{-6}\ \text{C})$، وُضِع في حالة سكون داخل مجال كهربائي منتظم مقداره $5.40 \times 10^3\ \text{N/C}$، كما في الشكل (17). بإهمال قوّة الجاذبية الأرضية بالنسبة إلى القوّة الكهربائيّة، أحسبُ التسارع الذي يكتسبه الجُسيم.



الشكل (17): جسيم مشحون في مجال كهربائيّ منتظم.

المعطيات: $E = 5.40 \times 10^3\ \text{N/C},\ q = -4.00 \times 10^{-6}\ \text{C},\ m = 200 \times 10^{-6}\ \text{kg}$

المطلوب: $a = ?$

الحلّ:

$$F_E = Eq = 5.40 \times 10^3 \times 4.00 \times 10^{-6}$$

$$F_E = 2.16 \times 10^{-2}\ \text{N}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.16 \times 10^{-2}}{200 \times 10^{-6}} = 108\ \text{m/s}^2$$

بما أنّ شحنة الجسيم سالبة؛ فإنّ اتّجاه القوّة والتسارع يكون معاكسًا لاتّجاه المجال الكهربائيّ؛ أي إنّ اتّجاه التسارع باتّجاه محور $(-x)$.

المثال 8

جُسيم كتلته (40 mg) يحمل شحنة سالبة (-5.0×10^{-5} C)، دخل مجالًا كهربائيًّا منتظمًا بسرعة ابتدائية (600 m/s)، باتّجاه محور ($+x$)، إذا كان مقدار المجال الكهربائيّ (3.2×10^{3} N/C)، واتّجاهه مع محور ($+x$)، وبإهمال تأثير قوّة الجاذبية الأرضية؛ فأحسبُ الزمن اللازم لتوقّف الجُسيم عن الحركة.

المعطيات : $E = 3.2 \times 10^{3}$ N/C, $q = -5.0 \times 10^{-5}$ C, $m = 40 \times 10^{-6}$ kg, $v_i = 600$ m/s

المطلوب: $t = ?$

الحلّ:

$$F_E = Eq = 3.2 \times 10^{3} \times 5.0 \times 10^{-5}$$

$$F_E = 1.6 \times 10^{-1}\ \text{N}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-1}}{40 \times 10^{-6}} = 40 \times 10^{2}\ \text{m/s}^2$$

بما أنّ الجُسيم سالب الشحنة؛ فإنّ اتّجاه القوّة المؤثّرة فيه يكون بعكس اتّجاه المجال، وكذلك يكون اتّجاه التسارع؛ أي باتّجاه ($-x$)، وهنا أستعملُ معادلات الحركة، كما يأتي:

$$v_f = v_i + at$$

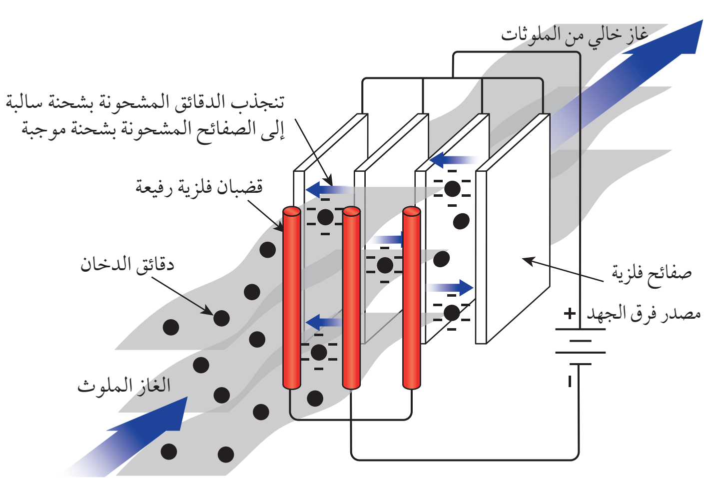
$$0 = 600 - (40 \times 10^{2})t$$

$$t = 0.15\ \text{s}$$

الربطُ مع الصناعة

المرشِّح الكهرستاتيكي هو جهاز تنقية يُستخدم لإزالة الجسيمات الدقيقة مثل الدخان من الغاز المنبعث من مداخن المصانع.

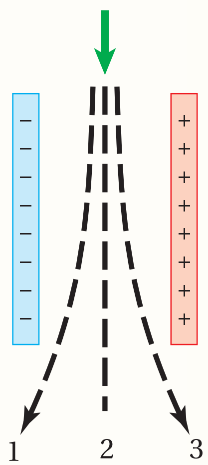
يحتوي الجهاز على قضبان فلزّية رفيعة وصفائح فلزية تشحن باستخدام مصدر فرق جهد عال؛ فينشأ حول القضبان مجال كهربائي يؤدي إلى إكساب دقائق الدخان شحنةً سالبةً في أثناء مرورها عبر الجهاز، فتنجذب نحو الصفائح الفلزّية المشحونة بشحنة موجبة.



مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أصف المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون، والمجال الكهربائي بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين مقدارًا ومختلفتين نوعًا.

2. **أستنتج:** يتحرك إلكترون بسرعة ابتدائية باتجاه محور ($-y$)، ويدخل إلى منطقة مجال كهربائي منتظم في الحيّز بين صفيحتين متوازيتين، كما يبين الشكل المجاور. فيتأثر بقوة كهربائية تُكسِبه تسارعًا ثابتًا.



أ . ما اتجاه كل من القوة الكهربائية، والتسارع؟

ب . أحدد أيّ المسارات (1، 2، 3) يمثّل مسار حركة الإلكترون داخل المجال، أُفسّر إجابتي.

جـ. عند دخول بوزترون (شحنته $+e$ وكتلته تساوي كتلة الالكترون) يتحرك بالسرعة نفسها إلى منطقة المجال نفسه، أيّ المسارات (1، 2، 3) يمثّل مسار حركته داخل المجال؟

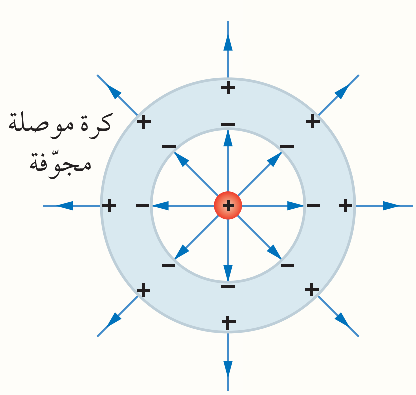
3. **أستخدم الأرقام:** قشرة رقيقة تتوزع الشحنة على سطحها بانتظام وبكثافة سطحية ($-3.00 \times 10^{-12}\ C/m^2$). أحسب مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في إلكترون يوضع بالقرب من القشرة.

4. **أستخدم الأرقام:** صفيحتان فلزّيتان مشحونتان بشحنتين كهربائيتين متساويتين؛ إحداهما موجبة والأُخرى سالبة، موزّعة عليهما بانتظام بكثافة سطحية ($7.1 \times 10^{-7}\ C/m^2$)، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرة مقارنة بالمسافة الفاصلة بينهما، فأجد:

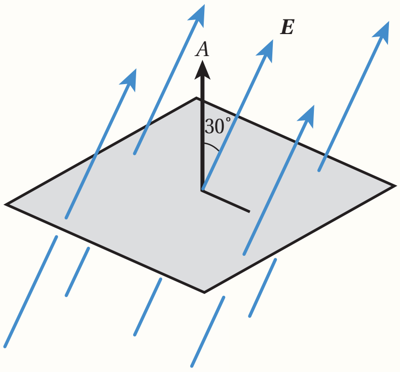
أ. المجال عند نقطة بين الصفيحتين.

ب. تسارع جسيم كتلته ($5.0 \times 10^{-4}\ kg$) وشحنته ($2.0 \times 10^{-7}\ C$) عند وضعه بين الصفيحتين، بإهمال وزن الجسيم.

5. **التفكير الناقد:** وضعت شحنة نقطية ($+Q$) في مركز كرة موصلة مجوفة ومتعادلة كهربائيًا؛ فشحنت الكرة بالحث كما يبين الشكل المجاور.
مستخدمًا قانون غاوس؛ أصف المجال الكهربائي عند نقطة تقع داخل مادة الكرة، وعند نقطة تقع خارج الكرة.



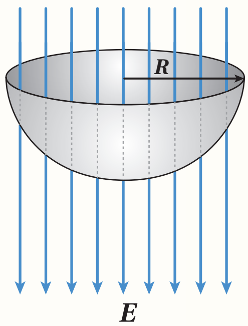
6. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:**



1. مربع طول ضلعه (l)، تخترقه خطوط مجال كهربائي منتظم كما يبين الشكل المجاور، فيكون التدفق عبره (Φ). فإن مقدار المجال (E) يساوي:

أ. $\dfrac{\Phi}{l \cos 30°}$ ب. $\dfrac{\Phi}{l^2 \cos 30°}$

جـ. $\dfrac{l^2 \cos 30°}{\Phi}$ د. $\dfrac{\Phi}{l^2 \sin 30°}$



2. سطح غاوس على شكل نصف كرة مجوفة نصف قطرها (R)، كما هو مبين في الشكل، موضوعة في مجال كهربائي (E) باتجاه محور ($-y$). التدفق الكهربائي عبر السطح الجانبي لنصف الكرة:

أ. $\pi R^2 E$ ب. $-\pi R^2 E$

جـ. $2\pi RE$ د. $-2\pi RE$

3. صفيحتان متوازيتان مساحة كل منهما (A)، شحنتا بشحنتين مختلفتين نوعًا، ومقدار الشحنة على كل صفيحة (Q)؛ فتولّد في الحيز بينهما مجال كهربائي (E). عند مضاعفة كل من (A) و (Q)؛ فإن مقدار المجال الكهربائي يصبح:

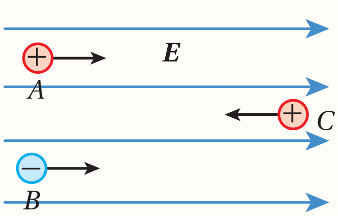
أ. $\dfrac{E}{4}$ ب. $\dfrac{E}{2}$ جـ. E د. $2E$

4. كرة موصلة نصف قطرها (R)، وكرة موصلة ثانية نصف قطرها ($\dfrac{R}{2}$)، تحملان شحنتين متساويتين، ولا تؤثران في بعضهما بعضًا. إذا كان المجال الكهربائي على بعد ($r > R$) من مركز الكرة الأولى (E_1)؛ فإن المجال الكهربائي على البعد نفسه من مركز الكرة الثانية يعطى بالعلاقة:

أ. $E_2 = 2E_1$ ب. $E_2 = \dfrac{1}{2} E_1$ جـ. $E_2 = \dfrac{1}{4} E_1$ د. $E_2 = E_1$

5. ثلاث جسيمات مشحونة أدخلت إلى مجال كهربائي منتظم بالسرعة الابتدائية نفسها، والشكل يبين اتجاه حركة كل جسيم لحظة دخوله إلى المجال. الجسيمان (A,C) موجبا الشحنة، والجسيم (B) شحنته سالبة.

أي من الجسيمات ستزداد سرعته مباشرة بعد دخوله إلى منطقة المجال؟



أ. A فقط. ب. A و B

جـ. A و C د. C و B

الجهد الكهربائي
Electric Potential

الفكرة الرئيسة:

عندما يتحرك جسيم مشحون في مجال كهربائي؛ فإن المجال يؤثر فيه بقوة كهربائية يمكن أن تبذل شغلًا على الجسيم. هذا الشغل يوصف باستخدام مفهومين هما؛ طاقة الوضع الكهربائية، وفرق الجهد الكهربائي.

نتاجات التعلم:

- أربط التغيُّر في طاقة الوضع الكهربائية بالشغل الذي يبذله المجال في تحريك الشحنة من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي.
- أحسب فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.
- أحسب الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون وخارجه.
- أعرف سطح تساوي الجهد.

المفاهيم والمصطلحات:

سطوح تساوي الجهد
Equipotential Surfaces

الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائية
Electric Potential and Electric Potential Energy

تعلمتُ مُسبقًا أنه عند نقل شحنة اختبار $(+q_0)$ بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي، كما يبين الشكل (18)؛ فإنه يلزم التأثير في الشحنة بقوة خارجية، تبذل عليها شغلًا (W)، وبافتراض أن اللانهاية هي النقطة المرجعية التي تكون طاقة الوضع الكهربائية عندها صفرًا؛ فإن هذا الشغل يختزن في نظام (الشحنة – المجال الكهربائي) على شكل طاقة وضع كهربائية (PE)، وسنشير إليها بأنها طاقة الوضع الكهربائية للشحنة الموضوعة عند نقطة في المجال الكهربائي.

ناتج قسمة طاقة الوضع (PE) على الشحنة (q_0) كمية فيزيائية تسمى الجهد الكهربائي عند نقطة، ويعرف بأنه طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات الموضوعة عند النقطة، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = \frac{W}{q_0} = \frac{PE}{q_0}$$

بدراسة تعريف الجهد الكهربائي؛ أستنتج ما يأتي:

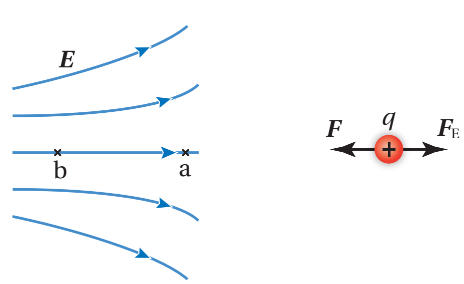
- الجهد الكهربائي كمية قياسية، يقاس بوحدة (J/C) وتعرف بالفولت (V).
- الجهد الكهربائي عند نقطة هو خاصية للشحنة المولدة للمجال، ولا يعتمد على الشحنة الموضوعة عند النقطة.
- إذا أصبح الجهد الكهربائي عند نقطة معلومًا، ووضعت شحنة (q) عند تلك النقطة؛ فإن طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة الموضوعة عند تلك النقطة تُعطى بالعلاقة:

$$PE = qV$$

وعند انتقال الشحنة (q) من نقطة ابتدائية جهدها (V_i) إلى نقطة نهائية جهدها (V_f)؛ فإن التغيُّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة يعطى بالعلاقة:

$$\Delta PE = q\Delta V = q(V_f - V_i)$$

أتحقّق: ما الفرق بين الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائية؟



الشكل (18): نقل شحنة اختبار من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي.

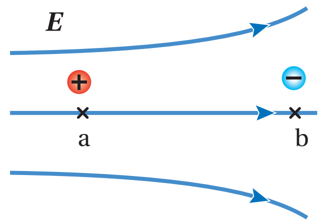
المثال 9

شحنتان نقطيتان $(+q)$ و$(-q)$، وضعتا في حالة السكون عند النقطتين (a) و (b) في مجال كهربائي، كما يبين الشكل (19)، أستعين بالشكل للإجابة عن الأسئلة الآتية:

أ . أيّ النقطتين (a) أم (b) الأعلى جهدًا؟ أُفسّر إجابتي.

ب. أحدد اتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في كلّ من الشحنتين.

جـ. أصف التغيُّر في كل من: طاقة الحركة، وطاقة الوضع الكهربائية للشحنتين في أثناء حركتهما داخل المجال بدءًا من السكون.



الشكل (19): حركة شحنتين في مجال كهربائي باتجاه القوة الكهربائية.

المعطيات: الشكل والبيانات المثبتة عليه.

المطلوب: ترتيب جهد النقاط، معرفة اتجاه القوة الكهربائية، وصف التغيُّر في طاقة الحركة وطاقة الوضع الكهربائية.

الحل:

أ . النقطة (a) أعلى جهدا من النقطة (b)؛ لأن اتجاه خط المجال يكون دائمًا باتجاه تناقص الجهد؛ أي من النقطة الأعلى جُهدًا إلى النقطة الأقل جُهدًا.

ب. الشحنة $(+q)$ تتأثر بقوة كهربائية باتجاه محور $(+x)$ والشحنة $(-q)$ تتأثر بقوة كهربائية باتجاه محور $(-x)$.

جـ. طاقة الحركة تزداد، وطاقة الوضع تقلّ لكلّ من الشحنتين.

إذا تحركت شحنة كهربائية (موجبة أو سالبة) من السكون تحت تأثير القوة الكهربائية فقط وباتجاهها؛ فإن ذلك يؤدي إلى زيادة طاقتها الحركية، مقابل نقصان مساوٍ في طاقة الوضع الكهربائية؛ لأن القوة الكهربائية قوة محافظة، فتكون الطاقة الميكانيكة للنظام محفوظة، $(\Delta KE + \Delta PE = 0)$؛ أي أن النقصان في أحد شكلي الطاقة يقابله زيادة مساوية في الشكل الآخر.

تمرين

أستنتج: في الشكل (19) ؛ لنقل شحنة $(+q)$ من (b) إلى (a) بسرعة ثابتة يلزم التأثير فيها بقوة خارجية مساوية للقوة الكهربائية مقدارًا ومعاكسة لها اتجاهًا.

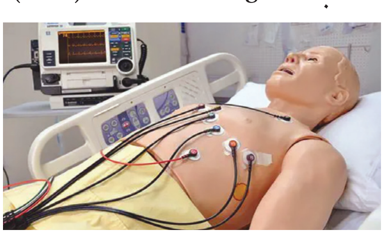
أ . هل تبذل القوة الخارجية شغلًا موجبًا أم سالبًا؟

ب. ما الشغل الكُلّيُّ المبذول على الشحنة؟ أفسر إجابتي مستخدمًا مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)؛ $W_{\text{Total}} = \Delta KE$.

جـ. أصف التغيُّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة المنقولة.

الربط بالتكنولوجيا الطبية

تصدُرُ من القلب نبضات كهربائية صغيرة، يمكن الكشف عنها باستخدام جهاز تخطيط القلب electrocardiogram (ECG). يقيس جهاز (ECG) إشارات الجهد الكهربائي التي ينتجها القلب مع كل نبضة، حيث تعمل هذه الإشارات على تنظيم عملية انقباض القلب لضخ الدم إلى الجسم. يقوم الجهاز بتسجيل هذه الإشارات وتحويلها إلى رسم بياني يُظهِر النشاط الكهربائي للقلب، مما يساعد الأطباء في تقييم صحة القلب.



فرق الجهد في المجال الكهربائي المنتظم

Potential Difference in a Uniform Electric Field

عند وضع شحنة موجبة $+q$ عند نقطة مثل a في مجال كهربائيّ منتظم $\boldsymbol{E}$ كما في الشكل (20)، فإنّها تتأثر بقوّة كهربائيّة حسب العلاقة: $\boldsymbol{F}_E = q\boldsymbol{E}$، والشغل الذي تبذله القوّة الكهربائيّة لتحريك تلك الشحنة من النقطة a إلى النقطة b، يُعطى بالعلاقة:

$$W_{\mathrm{a \to b}} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{d}$$

حيث $\boldsymbol{d}$ الازاحة من النقطة a الى النقطة b. وبتعويض مقدار القوّة الكهربائيّة فإنّ علاقة الشغل تؤول إلى:

$$W_{\mathrm{a \to b}} = q\,\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{d} = qEd\cos\theta$$

وبما أن شغل القوة الكهربائية يرتبط بفرق الجهد بالعلاقة الآتية:

$$W_{\mathrm{a \to b}} = -q\,\Delta V = -q(V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}})$$

وبمساواة المعادلتين السابقتين للشغل:

$$\Delta V = (V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}}) = -Ed\cos\theta$$

تستخدم هذه العلاقة لحساب فرق الجهد $(V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}})$ بين نقطتين في المجال الكهربائي المنتظم فقط.

حيث E: مقدار المجال الكهربائيّ المنتظم.

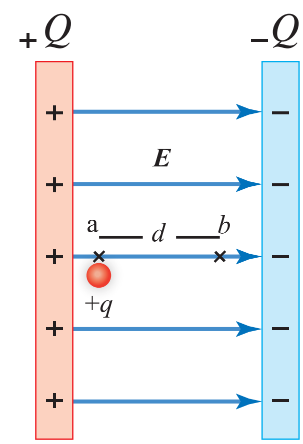
d: مقدار الإزاحة من نقطة البداية a إلى نقطة النهاية b $(d_{\mathrm{a \to b}})$.

θ: الزاوية بين اتّجاه المجال $\boldsymbol{E}$ وإتجاه الإزاحة $\boldsymbol{d}$ $(0^\circ < \theta < 180^\circ)$.

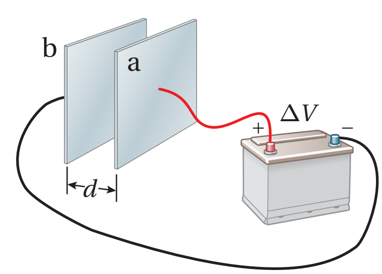
يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم في الحيّز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين مقدارًا ومختلفتين نوعًا، عندما تكون المسافة بين الصفيحتين صغيرةً مقارنةً بأبعاد الصفيحتين. ويمكن شحن الصفيحتين بوصلهما بقطبي بطارية، كما يبين الشكل (21)، فإذا كان فرق الجُهد بين قطبي البطارية (ΔV)؛ سينشأ بين الصفيحتين فرق جهد (ΔV) مساوٍ لفرق جُهد البطارية.

باستخدام العلاقة $(V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}} = -Ed\cos\theta)$؛ يمكن التوصل إلى أن مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين يعطى بالصورة الآتية:

$$E = \frac{|\Delta V|}{d}$$



الشكل (20): فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.



الشكل (21): شحن صفيحتين متوازيتين بوصلهما بقطبي بطارية.

أُفكّر: وحدة قياس المجال الكهربائي في النظام العالمي للوحدات هي (N/C)، وبحسب العلاقة $\frac{\Delta V}{d}$؛ فإن وحدة المجال (V/m). أثبتُ أن:

$$1\,\mathrm{N/C} = 1\,\mathrm{V/m}$$

حيث: $|\Delta V|$ القيمة المطلقة لفرق الجهد بين الصفيحتين.

(d) البعد بين الصفيحتين.

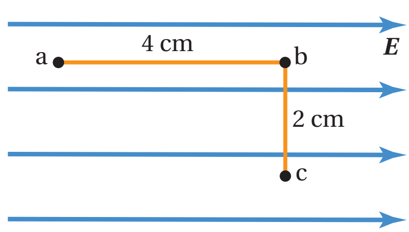
توضح هذه العلاقة أنه يمكن التعبير عن وحدة المجال الكهربائي بالصورة (V/m)،
وبذلك يمكن وصف المجال الكهربائي بأنه مقياس لتغيُّر الجُهد مع تغيُّر الموقع.

المثال 10

مجال كهربائي منتظم مقداره $(2 \times 10^4\ V/m)$، تقع داخله ثلاث نقاط (a,b,c)، كما في الشكل (22)، أحسب:

أ . فرق الجهد الكهربائي $(V_b - V_a)$، $(V_b - V_c)$.

ب. التغيُّر في طاقة الوضع الكهربائية لشحنة $(q = 3 \times 10^{-9}\ C)$ عند انتقالها من النقطة (a) إلى النقطة (b).



الشكل (22): ثلاث نقاط داخل مجال كهربائي منتظم.

المعطيات: $d_{a\to b} = 4\ cm,\ d_{c\to b} = 2\ cm,\ q = 3 \times 10^{-9}\ C,\ E = 2 \times 10^4\ V/m$

المطلوب: $V_b - V_a = ?,\ V_b - V_c = ?,\ \Delta PE = ?$

الحل:

أ . يُحسب فرق الجُهد من العلاقة:

$$V_b - V_a = -E\, d_{a\to b} \cos\theta$$
$$= -2 \times 10^4 \times 4 \times 10^{-2} \times \cos 0° = -8 \times 10^2\ V$$

$$V_b - V_c = -E\, d_{c\to b} \cos\theta$$
$$= -2 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-2} \times \cos 90°$$
$$V_b - V_c = 0$$

أي أن النقطتين (V_c) و (V_b) متساويتان في الجهد. والنقاط التي تقع على امتداد الخط (b c) المتعامد مع خط المجال جميعها تكون متساويةً في الجهد. ويمكن القول أن النقاط الواقعة على سطح عمودي على المجال المنتظم جميعها تكون متساويةً في الجهد.

ب. التغيُّر في طاقة الوضع يُحسب من العلاقة:

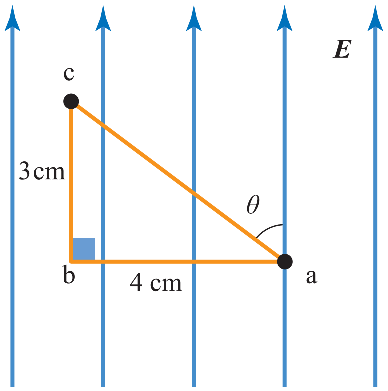
$$\Delta PE_{a\to b} = q\Delta V = q(V_b - V_a)$$
$$= 3 \times 10^{-9} \times (-8 \times 10^2) = -2.4 \times 10^{-6}\ J$$

المثال 11

يمثل الشكل (23) مجالًا كهربائيًا مُنتظمًا، تقع داخله ثلاث نقاط (a, b, c) . إذا علمتُ أن فرق الجهد ($V_c - V_b = -600$ V)، أحسبُ ما يأتي:

أ . مقدار المجال الكهربائي.

ب. فرق الجهد ($V_c - V_a$).



الشكل (23): ثلاث نقاط في مجال منتظم.

المعطيات: $d_{a\rightarrow b} = 4$ cm, $d_{b\rightarrow c} = 3$ cm, $V_c - V_b = -600$ V

المطلوب: $E = ?, V_c - V_a = ?$

الحل:

أ. يُحسب المجال الكهربائي من العلاقة:

$$(V_c - V_b) = -E\, d_{b\rightarrow c} \cos 0°$$

$$E = \frac{-600}{-3 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^{4}\ \text{V/m}$$

ب. يُحسب فرق الجهد من العلاقة:

$$V_c - V_a = -E\, d_{a\rightarrow c} \cos\theta$$

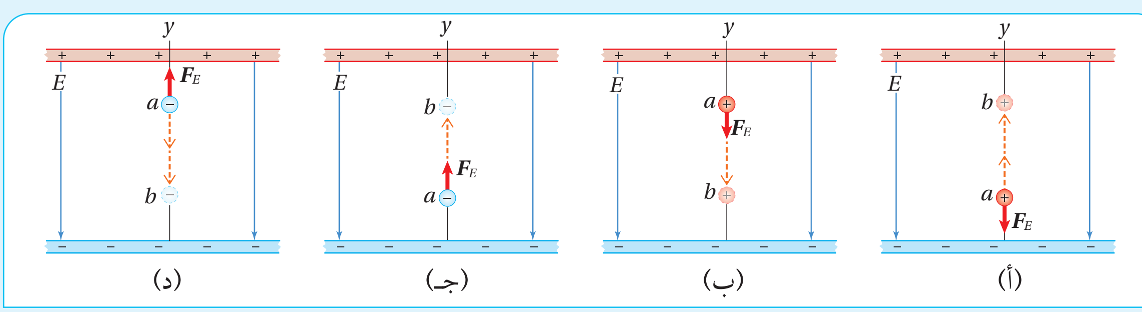
$$= -2 \times 10^{4} \times d_{a\rightarrow c} \times \frac{3 \times 10^{-2}}{d_{a\rightarrow c}} = -600\ \text{V}$$

كما يمكن التوصل إلى النتيجة نفسها بملاحظة أن ($V_b = V_a$)؛ فيكون فرق الجهد:

$$V_c - V_a = V_c - V_b = -600\ \text{V}$$

تمرين

أربع شحنات تتحرك في مجال كهربائي منتظم، كما هو مُبيّن في الشكل (24). حيث يدل السهم البرتقالي على اتجاه الحركة، والسهم الأحمر على اتجاه القوة الكهربائية (F_E) المؤثرة فيها في أثناء حركتها بين نقطتين (a) و (b). مستعينًا بالبيانات المُثبّتة في الشكل؛ أجيب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (24): أربع شحنات تتحرك في مجال كهربائي منتظم.

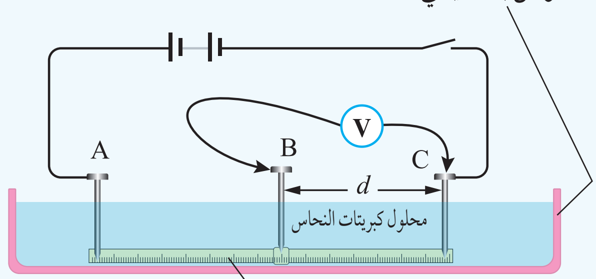
أ . أحدد: هل تبذل القوة الكهربائية شغلًا موجبًا أم سالبًا لكل حالة من الحالات المبينة في الشكل؟

ب. **أستنتج:** ماذا يحدث لطاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة عند انتقالها بين النقطتين؟

جـ. **أستنتج** العلاقة بين التغيُّر في طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة، واتجاه حركتها في المجال.

التجربة 1

العلاقة بين فرق الجهد الكهربائيّ والمجال الكهربائيّ



الموادّ والأدوات: مصدر طاقة (تيار مستمر DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، (3) لواقط فلزيّة، مسطرة بلاستيكية (30 cm)، حوض بلاستيكي، محلول كهرلي قليل التركيز (محلول كبريتات النحاس)، (3) مسامير.

إرشادات السلامة:

الحذر في التعامل مع محلول كبريتات النحاس.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1 . أُثبّت كلًّا من المسطرة البلاستيكية أسفل الحوض، ومسمارًا عند كل طرف من طرفَي المسطرة في النقطتين (A و C)، ثمّ أسكب محلول كبريتات النحاس بحذر في الحوض بحيث تبقى قاعدة المسمارين بارزة فوق المحلول كما في الشكل.

2 . أصل أجزاء الدارة الكهربائيّة؛ بحيث أُثبّت طرف السلك المتّصل بالقطب الموجب للفولتميتر بقاعدة مسمار عند النقطة B قابل للحركة بين النقطتين (A و C).

3 . **أتوقّع:** كيف تتغيّر قراءة الفولتميتر كلّما تحرّك المسمار B نحو النقطة A بعد إغلاق الدارة؟

4 . **ألاحظ:** أُغلقُ الدارة وأُحرّك رأس المسمار B أفقيًّا بخطّ مستقيم إلى نقطة تبعد (3 cm) عن النقطة C وأُدوّن كلًّا من قراءة الفولتميتر والإزاحة d في الجدول.

5 . أُكرّر الخطوة (4) مرات عدّة؛ بزيادة الإزاحة d مقدار (3 cm) في كل مرة $(d = 6, 9, \ldots 27\ cm)$، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

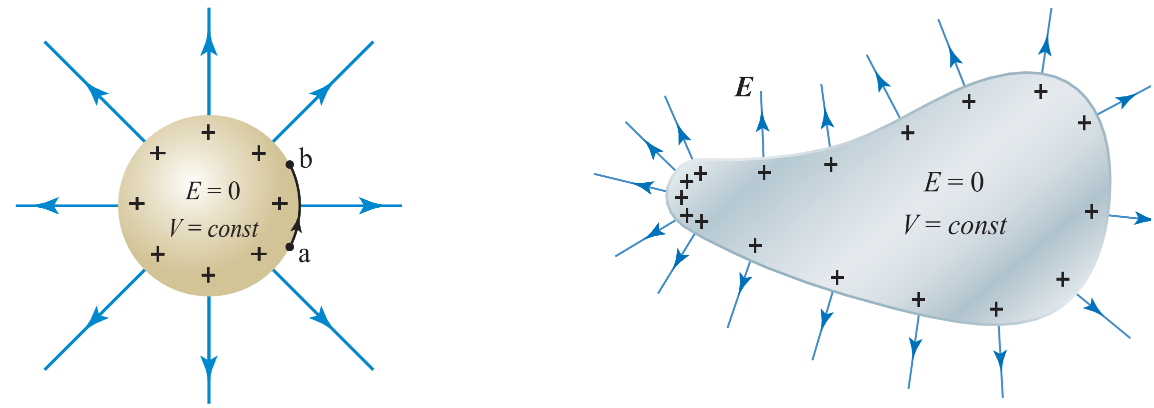
1 . **أرسمُ بيانيًّا** العلاقة بين فرق الجهد الكهربائيّ (قراءة الفولتميتر) على محور y والإزاحة d على محور x؛ بحيث يكون فرق الجهد بوحدة V (volt) والإزاحة بوحدة m (meter).

2 . **أستخدم الأرقام:** أحسب ميل الخط بين النقطتين $(d = 9\ cm)$؛ و $(d = 21\ cm)$؛ إذ يُمكن افتراض المجال بينهما منتظمًا، والعلاقة بين فرق الجهد والإزاحة خطّية تقريبًا.

3 . **أستنتج:** ما العلاقة بين ميل الخط ومقدار المجال الكهربائيّ؟

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

5 . **أفسر:** ما سبب استبعاد بداية الخط في الرسم البياني ونهايته؟



(أ) : خطوط المجال الكهربائي لموصل مشحون غير منتظم الشكل.

(ب): خطوط المجال لموصل كروي مشحون.

الشكل (25): عند شحن موصل تستقر الشحنات على سطحه الخارجي.

الجهد الكهربائي لموصل مشحون

Electric Potential Due to a Charged Conductor

عند شحن موصل معزول؛ فإن الشحنات تتحرك مبتعدة عن بعضها تحت تأثير قوة التنافر الكهربائي، إلى أن تستقر على السطح الخارجي للموصل. ويختلف توزيع الشحنات على حسب شكل الموصل، فإذا كان الموصل غير منتظم الشكل، كما في الشكل (25/ أ)؛ فإن الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المُدبّبة، وإذا كان الموصل منتظم الشكل مثل الموصل الكروي المبين في الشكل (25/ ب)؛ فإن الشحنة تتوزع على سطحه بانتظام.

إن استقرار الشحنات على سطح الموصل يجعل المجال الكهربائي داخله يساوي صفرًا، وهذا يعني أن الشغل الذي يبذله المجال لنقل شحنة بين أيِّ نقطتين داخل الموصل، أو من نقطة داخل الموصل إلى نقطة على سطحه يساوي صفرًا. وبما أن الشغل يعطى بالعلاقة $(W = -q\Delta V)$؛ فإن فرق الجهد بين النقطتين يساوي صفرًا، ممّا يعني أن الجهد عند النقاط جميعها داخل الموصل متساو، ويساوي الجهد عند سطح الموصل. وهذا يتفق مع استقرار الشحنات، فلو كان هناك فرق في الجهد بين أي نقطتين؛ لأدى ذلك إلى حركة الشحنات من النقطة ذات الجهد المرتفع إلى النقطة ذات الجهد المنخفض.

كذلك، يبين الشكل (25)، أن خطوط المجال الكهربائئ تكون دائمًا عموديةً على سطح الموصل؛ فيعني ذلك أن المجال الكهربائي لا يبذل شغلًا عند نقل شحنة من نقطة مثل (a) إلى نقطة (b) على سطح الموصل.

ستتعرف في هذا الدرس إلى كيفية حساب الجُهد الكهربائي داخل موصلٍ كرويّ مشحونٍ وخارجَه.

أتحقّق: أقدم دليلا على أن الجهد الكهربائي يكون متساويًا عند جميع النقاط على سطح الموصل المشحون.

أفكّر: فـي الشكـل (25/ أ)، أي المناطق تكون كثافة خطوط المجال عندها أكبر؟ على ماذا يدل ذلك؟

الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون

Electric Potential of a Charged Conducting Sphere

عند حساب الجهد الكهربائي الناشئ عن موصل كروي مشحون؛ فإننا نعدُّ الشحنة وكأنها في مركز الكرة، فيكون الجهد الكهربائي عند أي نقطة خارج الكرة مماثلًا للجهد الناشئ عن شحنة نقطية (تعلمتُ مُسبقًا حساب الجهد الناشئ عن شحنة نقطية).

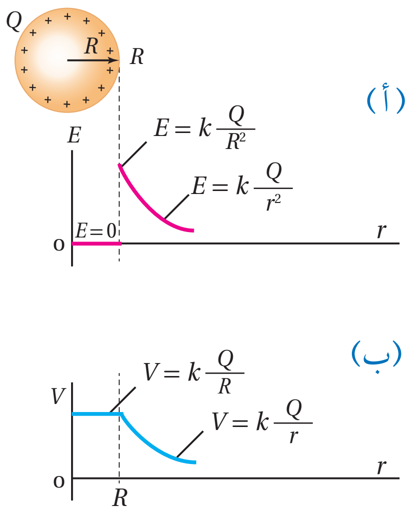
وعليه؛ فإن الجهد الكهربائي عند أي نقطة خارج موصلٍ كُرويّ نصف قُطره (R)، وشحنته (Q)، وعلى بعد $(r > R)$ من مركزه يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = k\frac{Q}{r}$$

أما الجهد عند أي نقطة على سطح الموصل أو داخله حيث $(r \leq R)$؛ فمقداره ثابت ويُعطى بالعلاقة:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

يبين الشكل (26/ أ) تمثيلًا بيانيًا لتغيُّر المجال الكهربائي بتغير بُعْد النقطة عن مركز الموصل الكُرويّ المشحون، أما الشكل (26/ ب) فيبيّنُ تمثيلًا بيانيًا لتغيُّر الجهد الكهربائي بتغير بُعْد النقطة عن مركز الموصل نفسه.



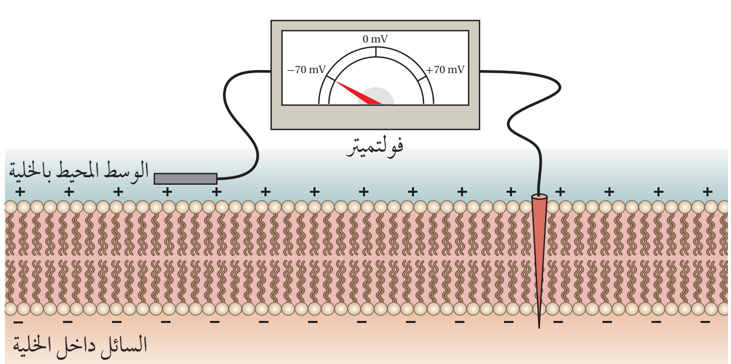
الشكل (26): تغيرات المجال الكهربائي، والجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون بشحنة موجبة.

ما أوجه التشابه وأوجه الإختلاف بين الشكلين (أ) و (ب)؟

الرّبط بالعلوم الحياتيّة

تحتوي الخلية العصبية أيونات موجبة مثل الصوديوم والبوتاسيوم وجزيئات بروتين سالبة الشحنة. تسمح قنوات خاصة في الغشاء الخلوي لأيونات الصوديوم والبوتاسيوم بالحركة عبر الغشاء الخلوي من داخل الخلية إلى خارجها، لكنّ جزيئات البروتين الأكبر حجمًا لا تتمكن من ذلك؛ فينتج عن ذلك أن يصبح داخل الخلية مشحونًا بشحنة سالبة، والسائل خارج الخلية مشحون بشحنة موجبة؛ فينشأ فرق في الجهد الكهربائي -بين داخل الخلية وخارجها- يولّد مجالًا كهربائيًا.

هذا المجال يؤثر في تدفق الأيونات من داخل الخلية إلى خارجها، وبالعكس في وقت الراحة وعند تعرض الخلية إلى مُنبّه عصبي.



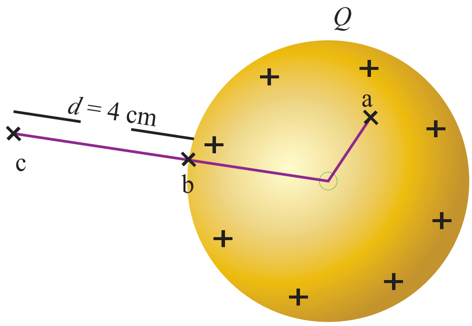
المثال 12

موصلٌ كرويٌّ من النحاس نصف قطره (4 cm) مشحون ومعزول، موضوع في الهواء كما في الشكل (27)، إذا علمتُ أنّ جهد النقطة a يساوي (2000 V)؛ فأحسبُ:

أ . جهد الموصل الكروي.

ب. شحنة الموصل.

جـ. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائيّة لنقل شحنة (−8 nC) من النقطة c إلى النقطة b.



الشكل (27): الجهد الناشئ عن موصل كروي مشحون.

المعطيات:

$$V_a = 2000\ \text{V},\ d_c = 4\ \text{cm},\ q = -8\ \text{nC},\ R = 4\ \text{cm}$$

المطلوب:

$$V_{sph} = ?,\ Q = ?,\ W_{c\to b} = ?$$

الحلّ:

أ. جهد الموصل:

$$V_{sph} = V_b = V_a = 2000\ \text{V}$$

ب. شحنة الموصل:

$$V_b = k\frac{Q}{R}$$

$$2000 = 9 \times 10^9 \times \frac{Q}{4 \times 10^{-2}} \Rightarrow Q = 8.9 \times 10^{-9}\ \text{C}$$

جـ.

$$V_c = k\frac{Q}{r} = 9 \times 10^9 \times \frac{8.9 \times 10^{-9}}{8 \times 10^{-2}} = 1000\ \text{V}$$

$$W_{c\to b} = -q(V_b - V_c) = -(-8 \times 10^{-9}) \times (2000 - 1000) = 8 \times 10^{-6}\ \text{J}$$

تمرين

أستنتج: كرةٌ موصلةٌ ومشحونةٌ نصف قطرها R وجهدها V، أجد بدلالة V جهد نقطة تبعد مسافة $4R$ عن مركزها.

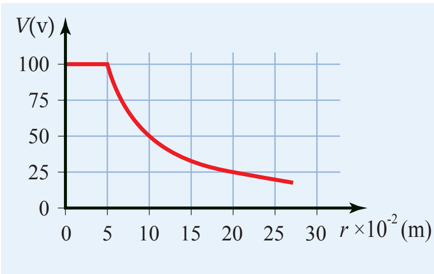
المثال 13

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (28) العلاقة بين الجهد الكهربائيّ والبُعد عن مركز موصل كروي مشحون. معتمدًا على الشكل أجد:

أ. نصف قطر الموصل.

ب. الجهد الكهربائيّ عند نقطة تبعد (20 cm) عن مركز الموصل.

جـ. شحنة الموصل.



الشكل (28): العلاقة بين جهد موصل كروي مشحون والبُعد عن مركزه.

الحلّ:

أ . نصف قطر الموصل: $R = 0.05 \text{ m}$

ب . $V_{0.2} = 25 \text{ V}$

جـ. من الشكل، جهد الموصل $(V_{sph} = 100 \text{ V})$

وبتطبيق المعادلة:

$$V_{sph} = k\frac{Q}{R}$$

$$100 = 9 \times 10^9 \frac{Q}{0.05} \Rightarrow Q = 5.5 \times 10^{-10} = 0.55 \text{ nC}$$

الربط بالحياة

ملفّ تسلا جهاز اخترعه العالم الكرواتي نيكولا تسلا عام 1891 م، يولّد الملفّ جهدًا كهربائيًّا عاليًا جدًّا يُمكن أن يصل إلى مليون فولت، ويُمكن عن طريقه نقل الطاقة الكهربائيّة لاسلكيًّا، حيث يعمل الملف على تخزين طاقة وضع كهربائية، تطلق في صورة شرارة تشبه البرق.

يمكن استخدام ملف تسلا بوصفه ملف اشتعال في آلات الاحتراق الداخلي في السيارات، بالإضافة إلى استخدامه في العروض التعليمية وفي مجال الترفيه لإنشاء البرق الاصطناعي.

سطوح تساوي الجُهد Equipotential Surfaces

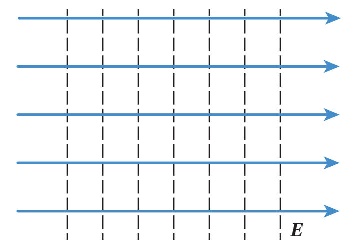
تعلمت من دراستي للمجال الكهربائي المنتظم أن الجهد الكهربائي يكون متساويًا عند النقاط الواقعة جميعها على سطح عمودي على المجال، مثل هذا السطح يعرف بسطح تساوي جهد.

سطح تساوي الجهد **Equipotential Surface** هو السطح الذي يكون الجهد الكهربائي عند نقاطه جميعها متساويًا. ويبين الشكل (29/ أ) سطوح تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم، حيث تبدو السطوح متوازيةً والمسافات بينها متساوية. أما الشكل (29/ ب)؛ فيبين سطوح تساوي الجهد لشحنة نقطية موجبة، وهي سطوح كروية متحدة المركز مع الشحنة، كذلك يبين الشكل (29/جـ) أن سطوح تساوي الجهد لموصل كروي مشحون تكون كروية الشكل، وتتحد معه بالمركز، ويعدُّ سطح الموصل المشحون سطح تساوي جهد.

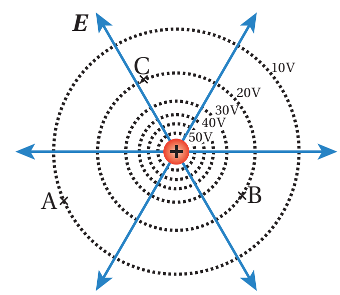
يُمثّل كل سطح تساوي جهد مقدارًا محدّدًا من الجهد الكهربائيّ كما هو مُبيّن في الشكل (29/ ب). ويكون فرق الجهد بين أيّ نقطتين على سطح تساوي الجهد مساويًا للصفر. ولا يلزم بذل شغل لنقل شحنة من نقطة إلى أخرى على سطح تساوي الجهد نفسه.

كما أنّ لخطوط المجال الكهربائيّ خصائص معينة؛ فإن لسطوح تساوي الجهد كذلك خصائص يمكن ملاحظتها من الشكل (29) وهي:

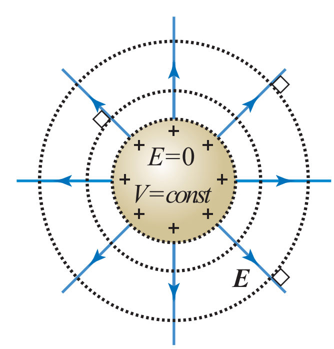
- سطوح تساوي الجهد التي يكون الفرق في الجهد بينها متساويًا؛ تتقارب كلّما اقتربنا من الشحنة؛ لأنّ المجال الكهربائيّ يزداد مقداره وتتقارب خطوطه في أثناء الاقتراب من الشحنة، كذلك تتباعد سطوح تساوي الجهد كلّما ابتعدنا عن الشحنة. وعموما؛ حيثما تقاربت سطوح تساوي الجهد دلت على منطقة مجال كهربائي قوي.
- لا تتقاطع؛ لأنها لو تقاطعت عند نقطة لوجدنا أكثر من قيمة للجهد الكهربائيّ عند تلك النقطة وهذا غير ممكن.
- تتعامد سطوح تساوي الجهد مع خطوط المجال الكهربائيّ.



الشكل (29/ أ): سطوح تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم.



الشكل (29/ ب): سطوح تساوي الجهد لشحنة نقطية موجبة.



الشكل (29/ جـ): الجهد الكهربائيّ لموصل كروي مشحون وسطوح تساوي الجهد حوله.

التجربة 2

رسم خطوط تساوي الجهد عمليًّا

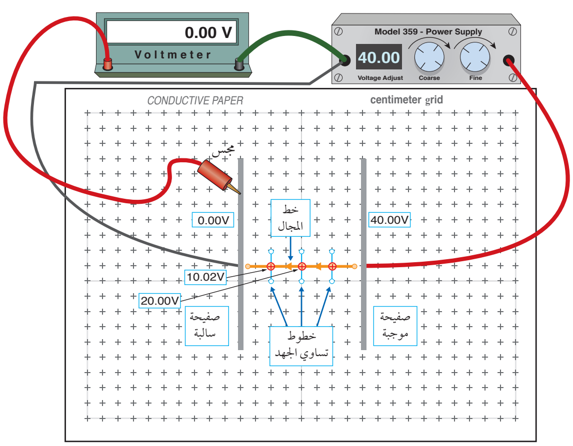
الموادّ والأدوات: لوح رسم خرائط المجال الكهربائيّ، ورق رسم بياني، قلم رصاص، فولتميتر رقمي، مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC) رقمي، كُرتان فلزّيتان صغيرتان، صفيحتان فلزّيتان، أسلاك توصيل، مجسّ.

إرشادات السلامة: الحذر في التعامل مع التوصيلات الكهربائيّة أو تطبيق جهد كبير.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أصل الأدوات كما في الشكل وعدم غلق الدارة الكهربائيّة إلّا بعد التأكّد منها من قِبَل المعلم/ المعلمة.
2. **أقيس:** أُثبّت مصدر الجهد على جهد معين (40 V)، وأتأكّد أنّ قراءة الفولتميتر تساوي صفرًا عند ملامسة المجسّ للصفيحة السالبة كما في الشكل، ثمّ أُحرّك المجسّ المتّصل بالقطب الموجب للفولتميتر مبتعدًا عن الصفيحة السالبة حتى يقرأ الفولتميتر جهدًا محدّدًا (10 V مثلًا)، وأُحدّد موقع تلك النقطة باستعمال ورقة الرسم البياني.
3. أُحدّد مواقع (4) نقاط أخرى مساوية لجهد النقطة السابقة، ثم أرسمُ الخط المارّ بالنقاط الخمس والذي يُمثّل خطًّا من خطوط تساوي الجهد.
4. أُكرّر الخطوتين (2 – 3) مرّات عدّة باستعمال قراءات أخرى للفولتميتر (20 V, 30 V).
5. أُكرّر الخطوات (2 - 4)؛ باستعمال كرة فلزّية بدلًا من إحدى الصفيحتين.



التحليل والاستنتاج:

1. **أتوقّع** قراءة الفولتميتر عند وضع المجسّ على الصفيحة السالبة، ثم أتأكّد من ذلك عمليًّا.
2. أصف خطوط تساوي الجهد التي رسمتها.
3. أرسمُ خطوط المجال الكهربائيّ بناءً على خطوط تساوي الجهد.
4. **أستخدم الأرقام:** أحسب مقدار المجال الكهربائيّ بين الصفيحتين؛ باستعمال فرق الجهد والمسافة بينهما.

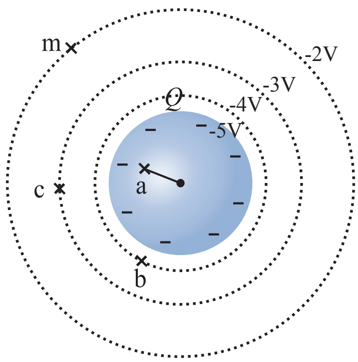
المثال 14

بناءً على الشكل (30) الذي يُمثّل سطوح تساوي الجهد لموصل كروي مشحون بشحنة سالبة، أحسبُ:

أ . فرق الجهد ($V_c - V_b$) و ($V_a - V_b$).

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية؛ لنقل إلكترون بسرعة ثابتة من النقطة m إلى النقطة c.

جـ. شحنة الموصل، علمًا أنّ نصف قطره 9 cm .



الشكل (30): سطوح تساوي الجهد حول موصل كروي مشحون.

المعطيات: البيانات على الشكل.

المطلوب: $(V_c - V_b) = ?, (V_a - V_b) = ?, W_{m\to c}, Q = ?$

الحلّ:

أ.

$$V_a - V_b = -5 - (-4) = -1 \text{ V}$$

$$V_c - V_b = (-3) - (-4) = 1 \text{ V}$$

ب.

$$W_{m\to c} = q(V_c - V_m)$$

$$W_{m\to c} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-3-(-2))$$

$$W_{m\to c} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

جـ. جهد الموصل يساوي (5 V −)، ولإيجاد شحنته أُطبّق العلاقة الآتية:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

$$-5 = 9 \times 10^{9} \times \frac{Q}{9 \times 10^{-2}}$$

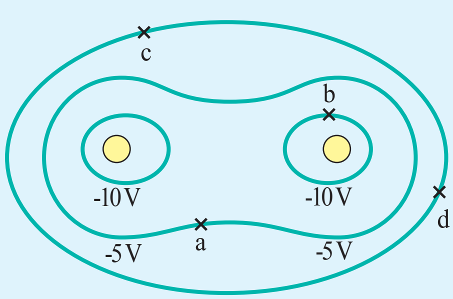
$$Q = -5 \times 10^{-11} \text{ C} = -50 \text{ pC}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: يُبيّن الشكل (31) سطوح تساوي الجهد لشحنتين نقطيتين سالبتين متساويتين في المقدار. أجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ فرق الجهد ($V_a - V_b$).

ب. هل يلزم بذل شغل لنقل بروتون من النقطة c إلى النقطة d؟ أفسر إجابتي.

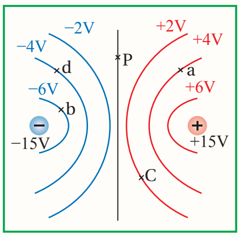


الشكل (31): سطوح تساوي الجهد لشحنتين نقطيتين.

مراجعة الدرس

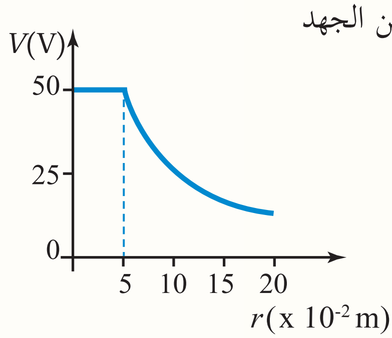
1. **الفكرة الرئيسة**: أصف التغيرات في الجهد الكهربائي للحالتين الآتيتين:
– عند الانتقال بين نقطتين داخل مجال كهربائي منتظم باتجاه خط المجال.
– عند الانتقال من مركز موصل كروي مشحون إلى خارج الموصل.

2. **أستنتج**: يُمثّل الشكل سطوح تساوي الجهد لشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع، أُجيب عمّا يأتي:



أ . أيّ النقاط جهدها يساوي صفرًا.
ب. ما فرق الجهد $(V_a - V_c), (V_b - V_d)$؟
جـ. أحسبُ الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية لنقل شحنة (5 nC) من النقطة d إلى النقطة a.

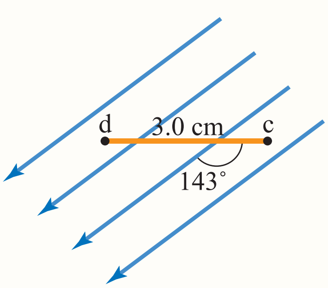
3. **أستخدم الأرقام**: كرة من النحاس مشحونة بشحنة موجبة، مُثّلت العلاقة بين الجهد الكهربائيّ والبُعد عن مركز الكرة كما في الشكل، أحسبُ:



أ . الجهد الكهربائيّ عند نقطة تبعد (4 cm) عن مركز الكرة.
ب. شحنة الكرة.
جـ. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائيّة لنقل شحنة (6 μC) من مركز الكرة إلى نقطة تبعد (8 cm) عن مركز الكرة.

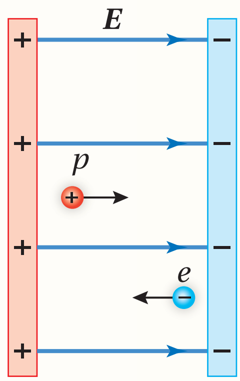
4. **أستخدم الأرقام**: جسيم مشحون بشحنة موجبة اكتسب طاقة وضع كهربائيّة مقدارها 1.6×10^{-16} J خلال تحرّكه مسافة (3 cm) في مجال كهربائيّ منتظم مقداره 2×10^{4} V/m، أحسبُ شحنة الجسيم.

5. **أستخدم الأرقام**: نقطتان c و d في مجال كهربائيّ منتظم مقداره 3.0×10^{3} V/m كما في الشكل، أحسبُ:



أ . فرق الجهد الكهربائيّ $(V_c - V_d)$.
ب. الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية لنقل بروتون من النقطة d إلى النقطة c بسرعة ثابتة، علمًا بأنّ شحنة البروتون $(1.6 \times 10^{-19}$ C).

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



1. إلكترون وبروتون بدآ بالحركة من السكون بالقرب من صفيحتين فلزّيتين، كما هو مبين في الشكل المجاور، عندما يصل كل منهما إلى الصفيحة المقابلة نجد أن:

أ . البروتون والإلكترون متساويان في السرعة.

ب. سرعة البروتون أكبر من سرعة الإلكترون.

جـ. البروتون والإلكترون متساويان في الطاقة الحركية.

د . الطاقة الحركية للإلكترون أكبر من الطاقة الحركية للبروتون.

2. يتحرك جسيم كتلته (m)، وشحنته (q) من السكون في مجال كهربائي منتظم بين نقطتين فرق الجهد بينهما (ΔV)؛ فتكون سرعته النهائية (v). عندما يتحرك جسيم ثاني كتلته $(\frac{m}{2})$، وشحنته $(2q)$ من السكون بين نقطتين فرق الجهد بينهما $(2\Delta V)$، فإن السرعة النهائية لهذا الجسيم بدلالة (v):

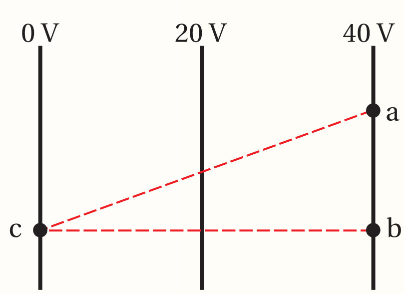
أ . $\sqrt{2}\, v$ ب. $2\sqrt{2}\, v$ جـ. $4v$ د. $8v$

3. صفيحتان متوازيتان (X,Y)، شُحنتا بشحنتين متساويتين مقدارًا ومختلفتين في النوع فتولد في الحيّز بينهما مجال كهربائي منتظم. تحرك إلكترون من السكون باتجاه القوة الكهربائية من الصفيحة (X) إلى الصفيحة (Y)؛ فكانت الزيادة في طاقته الحركية $(6.4 \times 10^{-19} J)$. نستنتج أن الجهد الكهربائي للصفيحة (X):

أ . أعلى من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (4 V). ب. أقل من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (4 V).

جـ. أعلى من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (0.25 V). د . أقل من جهد الصفيحة (Y) بمقدار (0.25 V).

* يبين الشكل سطوح تساوي جهد كهربائي ناتجٍ عن مجال كهربائي منتظم. بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل؛ أُجيبُ عن الفقرتين الآتيتين:



4. يكون اتجاه المجال الكهربائي باتجاه محور:

أ . $+x$ ب. $-x$

جـ. $+y$ د . $-y$

5. تزداد طاقة الوضع الكهربائية لشحنة سالبة عند انتقالها من:

أ . النقطة (a) إلى النقطة(b). ب. النقطة (b) إلى النقطة (c).

جـ. النقطة (c) إلى النقطة (a). د. النقطة (b) إلى النقطة (a).

الدرس 3

المواسعة الكهربائيّة
Electrical Capacitance

الفكرة الرئيسة:

تختلف المواسعات الكهربائيّة في أشكالها ومقادير مواسعاتها وطرائق توصيلها معًا؛ وتكمن أهمّيتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائيّة، وتُستعمل في الكثير من التطبيقات العملية.

نتاجات التعلّم:

- أُعرّف المواسعة الكهربائيّة لموصل رياضيًّا وبالكلمات.
- أُمثّل بيانيا العلاقة بين تغيّرات الجهد الكهربائيّ بين صفيحتَي مواسع وشحنته.
- أُوظّف الرسم البياني للعلاقة بين الجهد الكهربائيّ بين صفيحتَي مواسع وشحنته في حساب الطاقة المختزنة في المواسع.
- أحسبُ المواسعة الكهربائيّة المكافئة لمجموعة مواسعات متّصلة على التوالي أو على التوازي.
- أحسبُ كمّيـة الشحنـة على كلّ مواسع وفرق جهده.

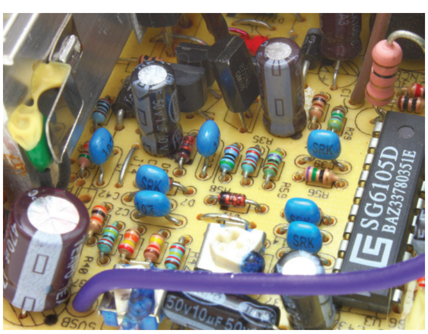
المفاهيم والمصطلحات:

المواسع	Capacitor
المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين	Parallel–Plate Capacitor
الفاراد	Farad
المواسعة	Capacitance
المواسعة المكافئة	Equivalent Capacitance

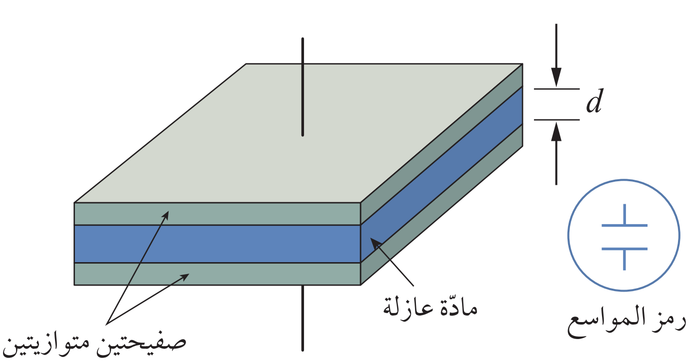
المواسع الكهربائيّ Electric Capacitor

تتكون الأجهزة الكهربائية من دارات كهربائية ودارات إلكترونية متنوعة. ويلزمُ في كثيرمن الدارات وجود أداة تستخدم لتخزين الطاقـة؛ تُسـمى **المواسـع الكهربائي Capacitor**. تختلف المواسعات في أشكالها وأحجامها حسب استعمال كل منها. ومعظم الأجهزة الإلكترونية تحتوي على مواسعات كما في لوحة الحاسوب المبينة في الشكل (32).

معظم المواسعات المستعملة في التطبيقات العملية، تتكوّن من صفيحتين موصلتين متوازيتين تفصلهما طبقة من مادّة عازلة، ويُسمّى **المواسع ذا الصفيحتين المتوازيتين Parallel Plate Capacitor**، ويُرمـز لـه بخطّيـن متوازيين كما في الشكل (33)، وشكل الصفيحتين يُمكن أن يكون مربّعًا أو مستطيلًا أو دائريًّا، حسب الاستعمال. أمّا المادّة العازلة فتتكوّن من مادّة مناسبة مثل البوليستر أو المايكا أو الهواء في بعض الحالات.



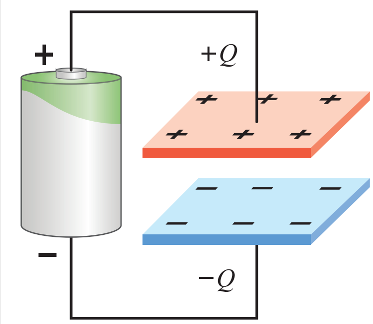
الشكل (32): لوحة حاسوب تحتوي على أنواع مختلفة من المواسعات.



الشكل (33): مواسع ذو صفيحتين متوازيتين ورمزه.

شحن المواسع Charging a Capacitor

عند وصل مواسع ذي صفيحتين متوازيتين مع بطّارية؛ فإنّ البطّارية تنقل الإلكترونات عبر الدارة من إحدى صفيحتي المواسع إلى الصفيحة الأخرى، فتعمل على شحن الصفيحة الموصولة بالقطب السالب بشحنة سالبة، بينما تُشحن الصفيحة الموصولة مع القطب الموجب بشحنة موجبة كما في الشكل (34)، وبزيادة تراكم الشحنات على صفيحتي المواسع يزداد فرق الجهد بين الصفيحتين، وتستمر عملية الشحن حتى يُصبح فرق الجهد بين صفيحتَي المواسع مساويا لفرق جهد البطارية. والشغل الذي تبذله البطارية لنقل الشحنات يُختزن في المواسع على شكل طاقة وضع كهربائيّة.

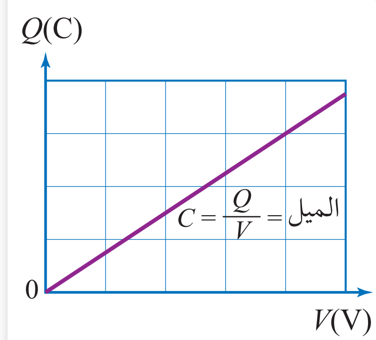


الشكل (34): شحن المواسع.

أتحقّق: إلى متى تستمر عملية شحن المواسع عند وصل صفيحتيه ببطّارية؟ ما شكل الطاقة المختزنة فيه؟

المواسعة الكهربائيّة Electrical Capacitance

في أثناء شحن المواسع يزداد فرق الجهد بين صفيحتي المواسع بزيادة الشحنات الكهربائية على صفيحتيه. يُستخدم الرمز (V) ليدل على فرق الجهد بين صفيحتي المواسع (جهد المواسع)، ويستخدم الرمز (Q) ليدل على مقدار الشحنة على أيٍّ من صفيحتي المواسع، وعند تمثيل العلاقة بين جهد المواسع وشحنته بيانيًّا؛ نجد أنّها علاقة خطّية تُمثّل بخطّ مستقيم يمرّ بنقطة الأصل كما في الشكل (35) وميل الخطّ المستقيم يساوي مقدارًا ثابتًا يُمثّل المواسعة الكهربائيّة ويُرمز لها بالرمز C:



الشكل (35): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.

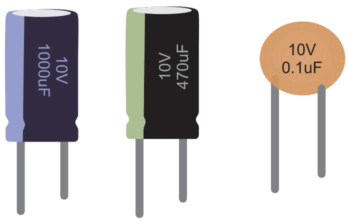
$$\text{الميل} = C = \frac{Q}{V}$$

حيث Q: شحنة المواسع عند أيّ لحظة.

V: جهد المواسع عند تلك اللحظة.

لذا تُعرّف **المواسعة الكهربائيّة Electrical Capacitance** بأنّها الشحنة الكهربائيّة المختزنة لوحدة فرق الجهد الكهربائيّ.

تُقاس المواسعة بوحدة الفاراد F ‏$(1\ F = 1\ C/V)$، ويُعرّف **الفاراد Farad** بأنّه مواسعة مواسع يختزن شحنة كهربائيّة (1C) عند تطبيق فرق جهد (1V) بين صفيحتيه. والفاراد وحدة كبيرة نسبيًّا، ومعظم قِيَم المواسعات المستعملة في الدارات الإلكترونية صغيرة جدًّا؛ لذا تُستعمل البادئات (μ, n, p). أمّا المواسعات الفائقة التخزين فتصل مواسعاتها إلى مئات الآلاف من الفاراد. ويبين الشكل (36) مُواسعاتٍ مختلفة المواسعة، وعادةً يُكتب على المواسع رقمين؛ الأول يبين مواسعته، والثاني يُبين أكبر فرق جُهدٍ آمنٍ يُمكن تطبيقُه بين صفيحتيّ المُواسع، فإذا تجاوز الجهد القيمة المحدّدة للمواسع؛ فإنّ ذلك يؤدّي إلى تلفه.



الشكل (36): مواسعات مختلفة الجهد والمواسعة.

أُقارن بين المواسعة وأقصى جهد يُطبّق بأمان لكلّ من المواسعات الثلاثة.

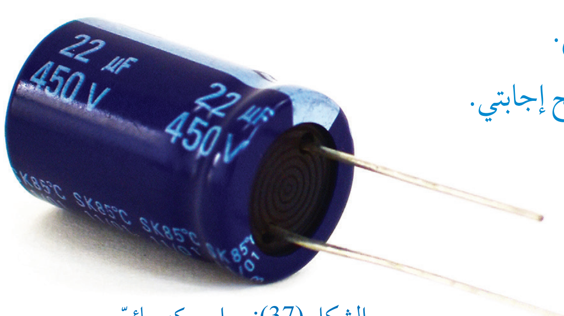
✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالمواسعة الكهربائيّة؟ وكيف تتناسب شحنة المواسع مع فرق الجهد بين طرفيه؟

المثال 15

بناءً على البيانات المثبّتة على المواسع المُبيّن في الشكل (37)، أُجيب عمّا يأتي:

أ . أُحدّد القيمة العظمى للشحنة التي يُمكن تخزينها بأمان في المواسع.

ب. هل يُمكن تطبيق جهد مقداره (600 V) بين طرفَي المواسع؟ أُوضّح إجابتي.



الشكل (37): مواسع كهربائيّ.

المعطيات: من الشكل $C = 22\ \mu F,\ \ V = 450\ V$

المطلوب: $Q = ?$

الحلّ:

أ . أُطبّق العلاقة:

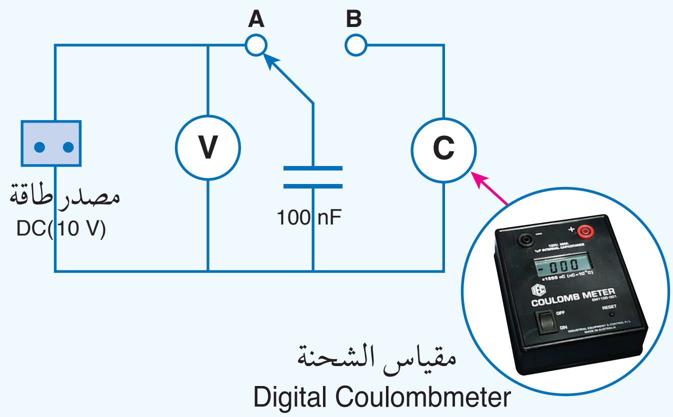
$$C = \frac{Q}{V}$$

$$Q = CV = 22 \times 10^{-6} \times 450 = 9.9 \times 10^{-3}\ C$$

ب . لا؛ لأنّ أقصى جهد يتحمّله المواسع (450 V) حسب ما كُتب عليه. ومن ثمّ، إذا طُبّق عليه جهد أعلى من ذلك يتلف.

التجربة 3

قياس مواسعة مواسع عمليًّا



مقياس الشحنة
Digital Coulombmeter

الموادّ والأدوات: مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC)، فولتميتر، مواسع، مقياس الشحنة (Coulomb Meter) يقيس لغاية (2000 nC)، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر من تطبيق جهد أعلى من الجهد المكتوب على المواسع، ومن لمس طرفَي المواسع بعد شحنه.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُعاير كلًّا من الفولتميتر ومقياس الشحنة، ثم أصل أجزاء الدارة الكهربائيّة كما في الشكل؛ باستعمال جهد محدّد (مثلًا 0.5 V) مع إبقاء الطرف الحر للمواسع غير متّصل بأيّ طرف.
2. **أقيس:** أصل الطرف الحر للمواسع مع الطرف A حتى يُشحن المواسع، ثم أُدوّن قراءة الفولتميتر في الجدول، التي تُمثّل فرق الجهد بين طرفّي المواسع.
3. **أقيس:** أفصل الطرف الحر للمواسع مع الطرف A، ثم أصله مع الطرف B مدة زمنية كافية لتفريغ شحنة المواسع خلال مقياس الشحنة، ثمّ أُدوّن قراءته في الجدول، وهي تُمثّل مقدار الشحنة المختزنة في المواسع.
4. أستعملُ مصدر الطاقة لتغيير قراءة الفولتميتر لعدّة قِيَم (1 V, 1.5 V, 2 V, 2.5 V, 3 V)، وأُكرّر الخطوتين الثانية والثالثة عند كل قراءة، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أرسمُ بيانيًّا** العلاقة بين جهد المواسع (قراءة الفولتميتر) بوحدة (V) على محور $+x$ وشحنته (مقياس الشحنة) بوحدة (C) على محور $+y$، ثمّ أرسمُ أفضل خطّ مستقيم يمرّ بمعظم النقاط.
2. **أستخدم الأرقام:** أحسب ميل الخطّ المستقيم ($\frac{\Delta Q}{\Delta V}$). ما الكمّية الفيزيائية التي يُمثّلها الميل؟
3. **أُقارن** النتيجة التي حصلت عليها للمواسعة مع مقدار المواسعة المكتوب على المواسع. ما سبب الاختلاف إن وُجد؟

مواسعة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين

Capacitance of Parallel-Plate Capacitor

يُبيّن الشكل (38) مواسعًا ذا صفيحتين متوازيتين، مساحة كلّ منهما A وتفصلهما مسافة d والوسط الفاصل بينهما فراغ (أو هواء). عند شحن المواسع ينشأ بين صفيحتيه مجال كهربائيّ منتظم مقداره:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

ولكنّ الكثافة السطحية للشحنة σ تُعطى بالعلاقة: $\sigma = \frac{Q}{A}$ ومن ثمّ، فإنّ:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$$

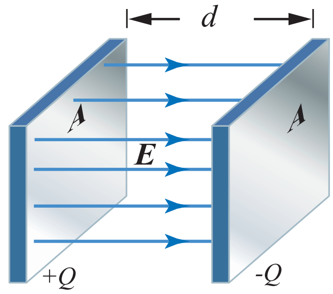
وبما أنّ جهد المواسع V يُعطى بالعلاقة: $V = Ed$ فإنّه يمكن التعبير عن مواسعة المواسع على النحو الآتي:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{\frac{Q}{\varepsilon_0 A}d}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

تُشير المعادلة السابقة إلى أنّ مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين تعتمد على: الأبعاد الهندسية للمواسع (مساحة صفيحتيه، والبعد بينهما)، وعلى السماحية الكهربائية للمادة العازلة بين صفيحتيه، وستقتصر دراستُنا على المواسع الذي يكون الفراغ أو الهواء عازلًا بين صفيحتيه.

أتحقّق: ما الطرائق التي يمكن بوساطتها زيادة مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين؟

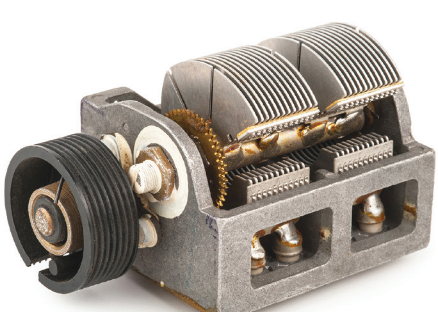


الشكل (38): مواسع ذو صفيحتين متوازيتين.

أفكّر: هل تؤدّي زيادة جهد المواسع أو شحنته الكهربائيّة إلى زيادة مواسعته؟ أُفسّر إجابتي.

الربطُ بالحياة

توجد مواسعات متغيّرة المواسعة تحتوي على عدّة صفائح فلزّية قابلة للدوران حول محور. ومن ثمّ، يمكن التحكّم بمواسعة المواسع عن طريق تغيير عدد الصفائح أو مساحتها أو المسافة بينها، ويُرمز له في الدارات الكهربائيّة بخطّين متوازيين عليهما سهم، أنظرُ إلى الشكل.



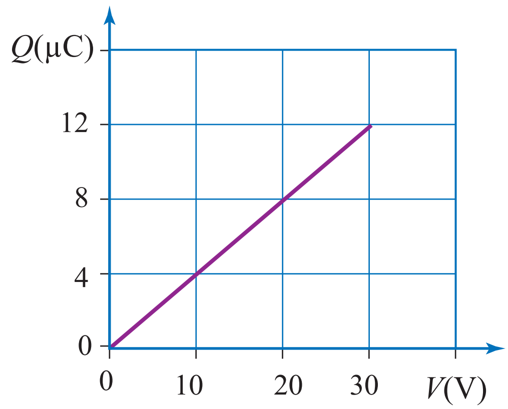
المثال 16

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (39) العلاقة بين شحنة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين وجهده، في أثناء عملية الشحن عند وصله مع بطّارية جهدها (40 V)، مستعينًا بالشكل أحسبُ:

أ . مواسعة المواسع.

ب. شحنة المواسع عندما يكون جهده (18 V).

جـ. شحنة المواسع بعد اكتمال عملية الشحن.



الشكل (39): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.

المطلوب: $C = ?, \quad Q = ?$

الحلّ:

أ . ميل الخط المستقيم يساوي مواسعة المواسع، أي إنّ:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{12 \times 10^{-6}}{30} = 4 \times 10^{-7}\ \text{F} = 0.4\ \mu\text{F}$$

ب. شحنة المواسع عندما يكون جهده (18 V):

$$Q = CV = 4 \times 10^{-7} \times 18 = 7.2 \times 10^{-6}\ \text{C} = 7.2\ \mu\text{C}$$

جـ. تكتمل عملية شحن المواسع؛ عندما يُصبح جهده مساويًا لجهد البطّارية (40 V)، عندئذ تُختزن في المواسع قيمة عظمى للشحنة تساوي:

$$Q = CV = 4 \times 10^{-7} \times 40 = 1.6 \times 10^{-5}\ \text{C} = 16\ \mu\text{C}$$

الربط بالحاسوب

استعمال المواسعات في لوحة مفاتيح الحاسوب

يوضع مواسع ذو صفيحتين متوازيتين أسفل كل حرف في لوحة مفاتيح الحاسوب؛ بحيث تُثبّت إحدى صفيحتَي كل مواسع بمفتاح والصفيحة الأخرى تكون ثابتة، وعند الضغط على المفتاح يقلّ البُعد بين الصفيحتين فتزداد مواسعة المواسع؛ وهذا يجعل الدارات الإلكترونية الأخرى في الحاسوب تتعرّف إلى المفتاح الذي جرى الضغط عليه.

المثال 16

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، البُعد بينهما (2 mm) ومساحة كل من صفيحتيه (8×10^{-4} m²)، يتّصل ببطّارية جهدها (50 V) أحسبُ:

أ . مواسعة المواسع.

ب. جهد المواسع (V') عندما يختزن شحنة (Q') مقدارها (100 pC).

جـ. إذا تضاعفت المسافة بين الصفيحتين مع بقاء البطّارية موصولة بالمواسع، فأحسبُ كلّ من شحنة المواسع (Q'') ومواسعته (C').

المعطيات: $d = 2 \text{ mm},\ A = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2, Q' = 100 \text{ pC}, V = 50 \text{ V}$

المطلوب: $C = ?, V' = ?,\ Q''=?,\ C'=?$

الحلّ:

أ .

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-3}} = 3.54 \times 10^{-12} \text{ F} = 3.54 \text{ pF}$$

ب. عندما تصبح شحنة المواسع (Q') تبقى مواسعته ثابتة (C) ولكنّ جهده يتغيّر (V'):

$$C = \frac{Q'}{V'}$$

$$3.54 \times 10^{-12} = \frac{100 \times 10^{-12}}{V'} \Rightarrow V' = 28.2 \text{ V}$$

جـ. عند مضاعفة المسافة بين صفيحتَي المواسع ($d' = 4$ mm) تتغيّر مواسعة المواسع (C') وتتغير شحنته (Q'') بينما يبقى جهده ثابتًا ويساوي جهد البطّارية ($V = 50$ V).

$$C' = \frac{\varepsilon_0 A}{d'} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2 \times 2 \times 10^{-3}} = 1.77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1.77 \text{ pF}$$

$$Q'' = C'V = 1.77 \times 10^{-12} \times 50 = 8.85 \times 10^{-11} \text{ C} = 88.5 \text{ pC}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مواسعته (0.04 nF) والمسافة بين صفيحتيه (0.25 cm)، شُحن حتى أصبح جهده (100 V)، أحسبُ:

أ . مساحة كلّ من صفيحتّي المواسع.

ب. شحنة المواسع.

الطاقة المختزنة في المواسع Energy Stored in a Capacitor

يعدُّ المواسع المشحون مخزنًا لطاقة الوضع الكهربائية، فعند وصل طرفي بطارية مع صفيحتي مواسع؛ فإنّ البطارية تبذل شغلًا لنقل الشحنات إلى صفيحتيه، وهذا الشغل يساوي طاقة الوضع الكهربائية المُختزنة فيه.

ذكرنا سابقا أنه في أثناء شحن المواسع يزداد جهده بزيادة الشحنات عليه، والشكل (40) يوضح العلاقة بينهما. ألاحظ أنه عند زيادة شحنة المواسع بمقدار ΔQ عند متوسّط جهد مقداره V_1 فإنّ ذلك يتطلّب شغلًا يساوي مساحة المستطيل: $V_1\,\Delta Q$، وكلّما ازدادت شحنة المواسع تزداد مساحة المستطيل $V_2\Delta Q$ نتيجة لزيادة الجهد، وهذا يتطلّب بذل شغل أكبر. والمساحة الكلية تحت المنحنى (المساحة المغلقة بين الخط المستقيم والمحور الأفقي) التي تُمثّل مساحة المثلث تساوي الشغل الكلي W المبذول في شحن المواسع إلى شحنة Q وجهد V؛ أي إنّ:

$$W = \frac{1}{2}QV$$

هذا الشغل المبذول في شحن المواسع يساوي طاقة الوضع الكهربائيّة المختزنة في المواسع:

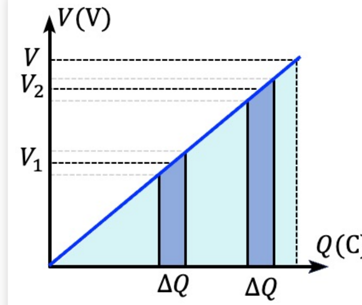
$$PE = \frac{1}{2}QV$$

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ:

$$PE = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

وإذا فُصِلت البطّارية عن المواسع - بعد شحنه - ووُصِل طرفا المواسع بجهاز كهربائيّ ضمن دارة كهربائيّة؛ فإنّ الطاقة الكهربائيّة المختزنة في المواسع تتحوّل إلى شكل آخر من الطاقة، إذ تنتقل الإلكترونات من صفيحة المواسع السالبة إلى الصفيحة الموجبة على شكل تيّار كهربائيّ في الدارة؛ يتلاشى بالتدريج خلال مدّة زمنية قصيرة لتصبح شحنة المواسع النهائية صفرًا، وتُسمى هذه العملية تفريغ المواسع Discharging a Capacitor.

أتحقّق: ماذا تمثل المساحة الكلية تحت منحنى $(Q - V)$؟



الشكل (40): الطاقة المختزنة في المواسع.

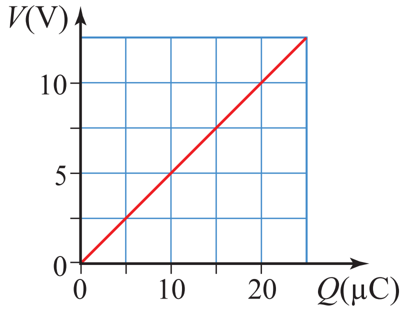
أفكّر: عند وصل طرفي مواسع مشحون ومعزول بمصباح، ماذا يحدث لكل من الكميات الآتية للمواسع: مواسعته، جهده، شحنته، الطاقة الكهربائيّة المختزنة فيه؟

المثال 17

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (36) العلاقة بين جهد المواسع والشحنة الكهربائيّة المختزنة فيه، بناءً عليه أحسبُ:

أ. مواسعة المواسع.

ب. الطاقة الكهربائيّة المختزنة في المواسع عندما يصبح جهده (10 V).



الشكل (36): العلاقة بين جهد المواسع وشحنته.

المطلوب: $PE = ?, C = ?$

الحلّ:

أ . ميل الخط المستقيم يساوي $\frac{1}{C}$؛ أي إنّ:

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C}$$

$$\frac{5}{10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{C} \Rightarrow C = 2 \times 10^{-6}\ \text{F}$$

ب.

$$PE = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \times (10)^2 = 1 \times 10^{-4}\ \text{J}$$

الربط بالطب

جهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED) جهاز يُستعمل لمساعدة الأشخاص الذين يعانون من توقّف القلب المفاجئ، أنظرُ إلى الشكل. وهو جهاز طبي متطوّر خفيف الوزن ومحمول وسهل الاستعمال، يُمكنه تحليل نبضات القلب، وإذا اكتشف نبضًا غير طبيعي للقلب؛ فإنّه يعمل على مساعدة القلب وإعادة تنظيم ضرباته الطبيعية عن طريق صدمة كهربائيّة عبر الصدر إلى القلب؛ إذ يطلب برنامج الجهاز من المستعمل الضغط على زر لإصدار صدمة كهربائيّة. وفي بعض الأجهزة المتطوّرة يجري ذلك تلقائيًّا من دون تدخّل المستعمل.

ويجري توفير هذه الأجهزة في الأماكن العامة مثل القاعات الرياضية.

يتركّب الجهاز من عدّة أجزاء رئيسة منها مواسع كهربائيّ، وهو الجزء المسؤول عن تأمين الشحنات الكهربائيّة اللازمة لحدوث الصدمة؛ عن طريق تفريغ الشحنات بشكل لحظي، ويجري شحنه باستعمال بطّارية مشحونة وجاهزة للاستعمال.

جهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED).

توصيل المواسعات Combining Capacitors

تُصنع المواسعات بحيث تكون لها مواسعة محددة، وتعمل على فرق جُهد محدد، وقد يلزم أحيانًا في دارة إلكترونية قيمة لمواسعة غير متوافرة، عندئذٍ يُمكن الحصول عليها بوصل مجموعة من المواسعات معًا. توصل المواسعات معًا بعدّة طرائق منها طريقتان بسيطتان وشائعتان، هما التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي أو الجمع بينهما، ويُطلق على المواسعة الكلية لمجموعة مواسعات تتّصل معًا في دارة كهربائيّة **المواسعة المكافئة Equivalent Capacitance**.

التوصيل على التوازي Parallel Combination

يُبيّن الشكل (37) ثلاث مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتّصل على التوازي مع بطّارية، إذ تتّصل صفيحتا كلّ مواسع مع قطبَي البطارية نفسها؛ أي إنّ الصفائح المتصلة مع القطب الموجب للبطارية تُشحن بشحنة موجبة، والصفائح المتصلة مع القطب السالب تُشحن بشحنة سالبة، بحيث يكون فرق الجهد بين صفيحتَي كلّ مواسع متساويًا ويساوي جهد البطارية V (قراءة الفولتميتر).

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ الشحنة المختزنة في كل مواسع:

$$Q_1 = C_1V, \quad Q_2 = C_2V, \quad Q_3 = C_3V$$

والشحنة الكلّية المختزنة في المواسعات الثلاثة Q تساوي مجموع شحنات هذه المواسعات:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ:

$$CV = C_1V + C_2V + C_3V$$

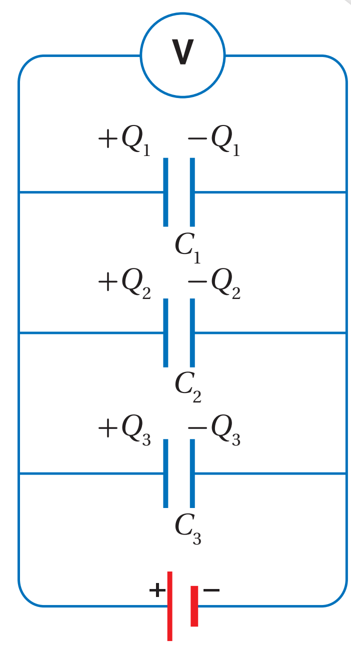
وبالقسمة على V نحصل على:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

حيث C: المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتصلة على التوازي.

وبشكل عام، فإنّ المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتّصل معًا على التوازي تساوي المجموع الجبري لقِيَم هذه المواسعات، أي إنّ:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots$$



الشكل (37): التوصيل على التوازي.

التوصيل على التوالي Series Combination

يُبيّن الشكل (38) ثلاثة مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتّصل معًا على التوالي مع بطّارية، تُشحن صفيحة المواسع الثالث الموصولة مع القطب السالب للبطّارية بشحنة سالبة $(-Q)$، بينما تُشحن صفيحة المواسع الأول الموصولة مع القطب الموجب للبطّارية بشحنة موجبة $(+Q)$، أمّا بقية الصفائح بينهما فتُشحن بالحث؛ بحيث تشحن الصفيحة اليسرى للمواسع C_3 بشحنة موجبة $+Q$ والصفيحة اليمنى للمواسع C_2 بشحنة سالبة $-Q$ وهكذا لبقية الصفائح، بمعنى أنّ شحنة المواسعات متساوية وتساوي الشحنة التي تحملها المواسعة المكافئة. أمّا المجموع الجبري لجهود المواسعات الثلاثة فيساوي جهد البطّارية V:

$$V = V_1 + V_2 + V_2$$

وبما أنّ: $C = \frac{Q}{V}$ فإنّ المعادلة تؤول إلى:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

وبالقسمة على Q نحصل على:

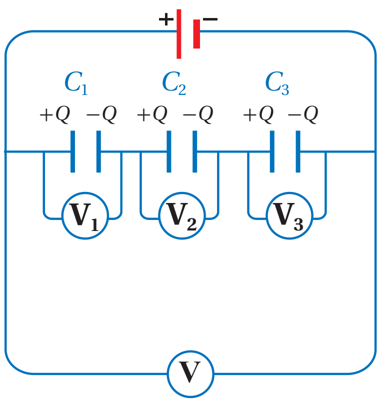
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

حيث C: المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتّصلة على التوالي.

وبشكل عامّ؛ فإنّ المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتّصل معًا على التوالي تُعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots$$

ولإيجاد المواسعة المكافئة لعدّة مواسعات تتّصل معًا على التوالي أو على التوازي بطريقة عملية، يمكن إجراء التجربة الآتية:

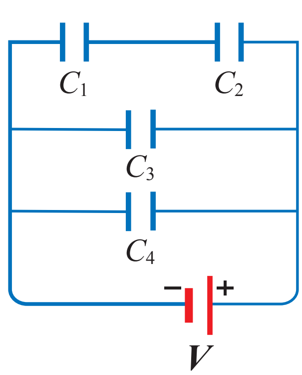


الشكل (38): التوصيل على التوالي.

أتحقّق: تتّصل مجموعة مواسعات مع بطّارية كما في الشكل، بناءً عليه أُحدّد:

أ. مواسعًا جهده يساوي جهد البطارية.

ب. مواسعين شحنتيهما متساويتين.

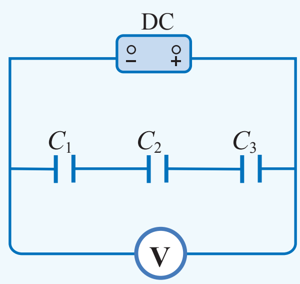


التجربة 4

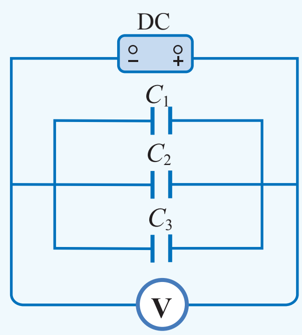
المواسعة المكافئة لعدّة مواساعات تتّصل على التوالي، أو التوازي

الموادّ والأدوات:

(3) مواسعات، مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، لواقط فلزّية.



(ب)



(أ)

إرشادات السلامة: الحذر من رفع جهد المصدر إلى جهد عالٍ، ما يؤدّي إلى تلف المواسعات إضافة إلى خطورته.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أتأكّد من أنّ المواسعات غير مشحونة $(V = 0)$؛ عن طريق توصيل سلك سميك بين طرفَي المواسع.
2. أصل المواسعات الثلاثة على التوازي كما في الدارة المبيّنة في الشكل (أ)، ثم أُغلق الدارة.
3. أقيس: أرفع جهد مصدر الطاقة حتى تُصبح قراءة الفولتميتر أقل من الجهد المكتوب على المواسع (10 V مثلًا)، ثم أفصل الفولتميتر وأستعملُه لقياس جهد كلّ مواسع من المواسعات الثلاثة، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
4. أفصل الدارة وأُفرّغ المواسعات من شحنتها، ثم أُعيد توصيلها على التوالي كما في الشكل (ب)، وأُغلق الدارة.
5. أُكرّر الخطوة (3)، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. أُقارن - عن طريق النتائج العملية - بين المواسعات في حالة التوصيل على التوازي والتوصيل على التوالي من حيث الشحنة والجهد. هل تتّفق النتائج العملية مع ما تعلّمتُه نظريًّا؟
2. أستخدم الأرقام: أحسب المواسعة المكافئة المقيسة والمواسعة المكافئة المتوقّعة، وأُقارن بينهما.
3. أتوقّع مصادر الخطأ المحتملة في التجربة. كيف يُمكنني تجنّبها؟

المثال 20

مواسعان، مواسعة الأول ($5\ \mu F$) والثاني ($10\ \mu F$) وُصِلا على التوازي مع بطّارية جهدها ($30\ V$)، أحسبُ:

أ . المواسعة المكافئة.

ب. شحنة كلّ من المواسعين الأول والثاني.

المعطيات: $V = 30\ V,\ C_1 = 5\ \mu F,\ C_2 = 10\ \mu F$

المطلوب: $Q_1 = ?,\ Q_2 = ?,\ C = ?$

الحلّ:

أ . المواسعة المكافئة:

$$C = C_1 + C_2 = 5 + 10 = 15\ \mu F = 15 \times 10^{-6} F$$

ب. جهد كل من المواسعين يساوي جهد البطارية وبالتالي:

$$Q_1 = C_1 V = 5 \times 10^{-6} \times 30 = 1.5 \times 10^{-4} C$$

$$Q_2 = C_2 V = 10 \times 10^{-6} \times 30 = 3 \times 10^{-4} C$$

المثال 21

يُمثّل الشكل (40/ أ) جزءًا من دارة كهربائيّة يحتوي على (3) مواسعات، أحسبُ المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة.

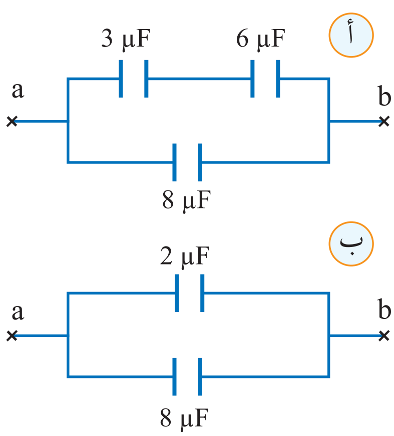
المعطيات: $C_3 = 3\ \mu F,\ C_6 = 6\ \mu F,\ C_8 = 8\ \mu F$

المطلوب: $C = ?$

الحلّ: المواسعان ($3\ \mu F,\ 6\ \mu F$) على التوالي ومواسعتهما المكافئة $C_{3,6}$:

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_6}$$

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{6+3}{18} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_{3,6} = 2\ \mu F$$



الشكل (40): المواسعة المكافئة.

لذا؛ يمكن استبدال مواسع مواسعته $2\ \mu F$ بالمواسعين ($3\ \mu F, 6\ \mu F$) بحيث يوصل على التوازي مع المواسع ($8\ \mu F$) كما في الشكل (42/ ب)، ومواسعتهما المكافئة C: $C = C_{3,6} + C_8 = 2 + 8 = 10\ \mu F$

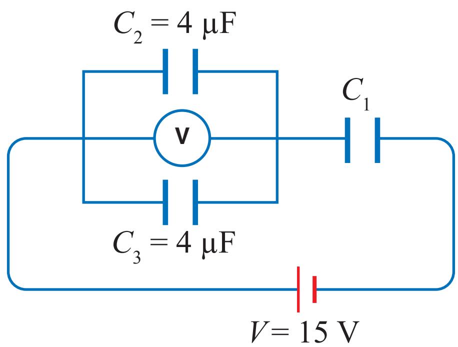
المثال 22

يُبيّن الشكل (41) ثلاث مواسعات تتّصل مع بطّارية جهدها (15 V)، إذا كانت قراءة الفولتيمتر (10 V)؛ فأحسبُ:

أ. جهد المواسع C_1.

ب. الطاقة الكهربائيّة المختزنة في المواسع C_2.

جـ. مواسعة المواسع C_1.



الشكل (41): المواسعة المكافئة.

المعطيات: $V = 15\ V,\ V_2 = V_3 = 10\ V$

المطلوب: $V_1 = ?,\ C_1 = ?,\ PE_2 = ?$

الحلّ:

أ. قراءة الفولتميتر تمثل جهد المواسعين المتصلين على التوازي:

$$V_2 = V_3 = V_{23} = 10\ V$$

وفرق جهد المصدر:

$$V = V_1 + V_{23}$$

$$15 = V_1 + 10 \Rightarrow V_1 = 5\ V$$

ب. الطاقة المختزنة في المواسع الثاني:

$$PE_2 = \frac{1}{2} C_2 V_2^2 = \frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} \times (10)^2 = 2 \times 10^{-4}\ J$$

جـ. أحسب أولا المواسعة (C_{23}) ثم أحسب الشحنة (Q_{23}):

$$C_{23} = C_2 + C_3 = 4 + 4 = 8\ \mu F$$

$$Q_{23} = C_{23} V_{23}$$

$$Q_{23} = 8\times 10^{-6} \times 10 = 8 \times 10^{-5}\ C$$

بما أن المواسع (C_1) يتصل مع المواسع (C_{23}) على التوالي، فإن:

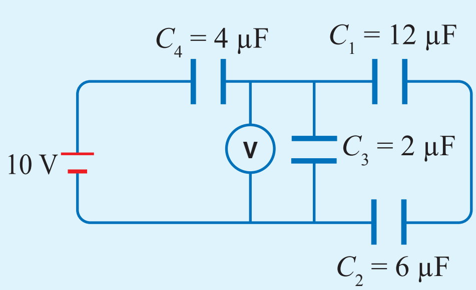
$$Q_1 = Q_{23} = 8 \times 10^{-5}\ C$$

مواسعة المواسع C_1:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{8 \times 10^{-5}}{5} = 1.6 \times 10^{-5}\ F = 16\ \mu F$$

تمرين

أستخدم الارقام: تتّصل (4) مواسعات مع بطّارية جهدها (10 V) كما في الشكل، أحسبُ:



أ. المواسعة المكافئة.

ب. شحنة المواسع الرابع.

جـ. قراءة الفولتميتر.

د. الطاقة الكهربائيّة المختزنة في المواسع الثالث.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من المفاهيم والمصطلحات الآتية: المواسع الكهربائيّ، المواسعة الكهربائيّة، المواسعة المكافئة.

2. **أستنتج:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، كيف يمكن زيادة مواسعته إلى (4) أضعاف؟

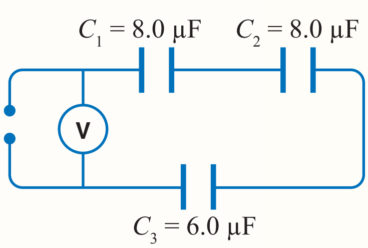
3. **أستنتج:** ماذا نعني بقولنا مواسعة مواسع $(5\ \mu F)$؟

4. **أستخدم الأرقام:** أحسبُ الطاقة الكلّية المختزنة في ثلاثة مواسعات مواسعة كل منها $(30\ \mu F)$ تتّصل على التوازي مع بطّارية جهدها $(12\ V)$.

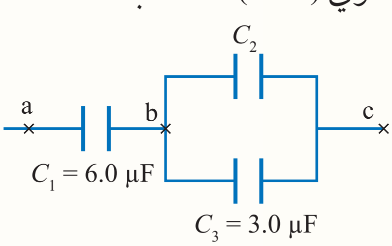
5. **أصدر حكمًا:** في أثناء عمل مهندس في صيانة الحواسيب، لزمه مواسع مواسعته $(5\ nF)$ وليس لديه سوى مواسعين مواسعة كل منهما $(10\ nF)$. ما طريقة التوصيل الأنسب للمواسعين للحصول على المواسعة المطلوبة؟ أُوضّح إجابتي.

6. **أستخدم الأرقام:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مساحة كلّ من صفيحتيه $(2.0 \times 10^{-3}\ m^2)$ والبُعد بينهما $(0.10\ cm)$، مشحون بشحنة مقدارها $(6.0\ nC)$ ومفصول عن مصدر الطاقة (البطارية)، أحسبُ:
   أ . مواسعة المواسع.
   ب. جهد المواسع.
   جـ. إذا أصبحت المسافة بين صفيحتيه نصف قيمتها الابتدائية، ماذا يحدث لكلّ من: مواسعة المواسع وجهده، والطاقة الكهربائيّة المختزنة فيه.

7. **أستخدم الأرقام:** تتّصل ثلاثة مواسعات مع مصدر طاقة كما في الشكل المجاور. إذا علمتُ أنّ شحنة المواسع C_3 تساوي $3.0 \times 10^{-5}\ C$ فأحسبُ:
   أ . المواسعة المكافئة.
   ب. قراءة الفولتميتر.



8. **التفكير الناقد:** يُمثّل الشكل المجاور جزءًا من دارة كهربائيّة تحتوي على ثلاثة مواسعات. إذا علمتُ أنّ فرق الجهد بين النقطتين a و c يساوي $(20\ V)$، وبين النقطتين b و c يساوي $(12\ V)$، فأحسبُ:
   أ . شحنة المواسع C_1.
   ب. مواسعة المواسع C_2.
   جـ. الطاقة الكلّية المختزنة في المواسعات الثلاثة.



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

1. مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، متصل ببطارية. عندما تزداد مساحة كل من صفيحتيه إلى مثليّ ما كانت عليه ويقل البعد بينهما إلى النصف مع بقائه متصلاً بالبطارية، فإن الطاقة المختزنة فيه:

أ . تقل إلى النصف. ب. تقل إلى الربع. جـ. تزداد إلى المثلين. د. تزداد أربعة أمثال.

2. مواسعان مواسعتيهما $(C_1 = 6\ \mu F, C_2 = 4\ \mu F)$ يتصلان على التوازي مع بطارية، إذا كانت الطاقة المختزنة في المواسع الأول $(3\ \mu J)$ فإن الطاقة المختزنة في المواسع الثاني بوحدة μJ:

أ . 2 ب. 4 جـ. 6 د. 3

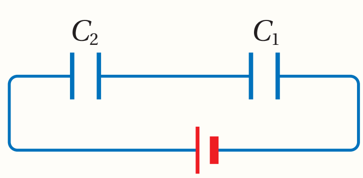
3. مواسع ذو صفيحتين متوازيين مواسعته C، إذا ازدادت مساحة كلّ من صفيحتيه إلى مثلَي ما كانت عليه، وقلّت المسافة بينهما إلى النصف؛ فإنّ مواسعته تُصبح:

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

4. في الشكل المجاور إذا كانت مواسعة المواسع الثاني مثلي مواسعة المواسع الأول فإن نسبة الطاقة المختزنة في المواسع الأول إلى الطاقة المختزنة في المواسع الثاني $\frac{PE_1}{PE_2}$ تساوي:

أ . $\frac{1}{4}$ ب. $\frac{1}{2}$

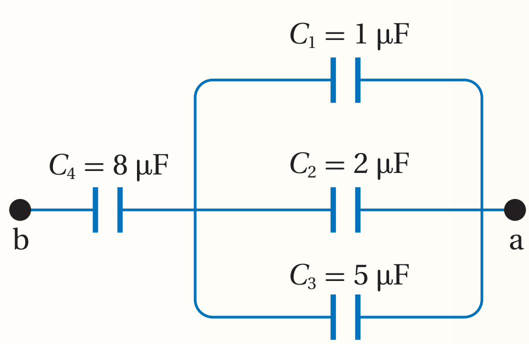
جـ. 2 د. 4



5. أربع مواسعات مشحونة تتصل معًا كما هو مبين في الشكل. معتمدًا على الشكل وبياناته وإذا علمت أن قيم المواسعة بالميكروفاراد، وأن المواسع (C_4) شحنته تساوي $(48\ \mu C)$، فإن فرق الجهد بين النقطتين (a) و (b) بوحدة (V):

أ . 4 ب. 6

جـ. 12 د. 24

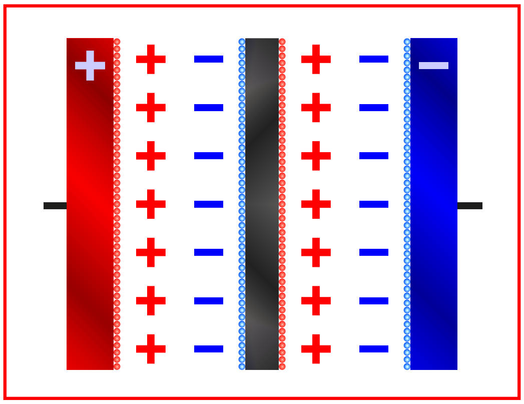


الإثراء والتوسّع

المواسع الفائق Supercapacitor

المواسعات الفائقة Supercapacitors أو Ultracapacitors كلّها تسميات لنمط واحد من المواسعات، وهي تكنولوجيا حديثة في مجال تخزين الطاقة. فما المواسعات الفائقة؟ وما مميّزاتها؟

بدأت عملية تطوير المواسعات منذ عشرات السنين لتخزين طاقة أكبر عن طريق المواسعات الفائقة، التي تُدعى أحيانًا المواسعات ذات الطبقة المضاعفة Double layer capacitors (DLC) كونها الأكثر انتشارًا، أنظرُ إلى الشكل المجاور. وهي مواسعات ذات مواسعة عالية جدًّا تصل إلى مئات الآلاف من الفاراد وبحجم مماثل للمواسعات العادية، ولكنّ جهدها قليل يتراوح بين (2.5 - 2.75 V) مقارنة مع جهود المواسعات العادية كما في الشكل، ولكن يُمكن توصيل عدّة مواسعات على التوالي للحصول على جهد أكبر.



عند المقارنة بين المواسعات الفائقة والبطّاريات المستعملة حاليًّا مثل بطّارية الليثيوم؛ فإنّ المواسعات الفائقة تتميّز عن البطّاريات بما يأتي:

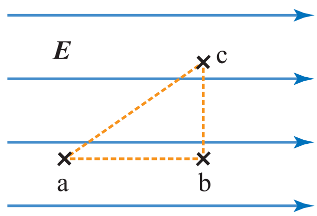
- زمن الشحن والتفريغ قليل جدًّا.
- عدد دورات الشحن والتفريغ التي يُمكن إجراؤها قد تصل إلى مليون دورة، بينما لا تصل في البطارية إلى أكثر من (1000) دورة.
- آمنة ولا تحتوي على موادّ سامّة في تركيبها، وتكلفتها المادّية قليلة.
- قدرتها على تحمّل تغيّر درجات الحرارة (-50°C) – (80°C).

مواسع عادي

مواسع فائق المواسعة

مراجعة الوحدة

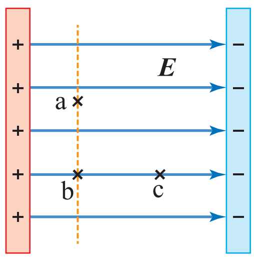
1. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:**



1. تزداد طاقة الوضع الكهربائيّة لبروتون في مجال كهربائيّ منتظم، كما في الشكل، عند انتقاله:

أ . من النقطة c إلى النقطة b .   ب. من النقطة b إلى النقطة c.

جـ. من النقطة a إلى النقطة c.   د. من النقطة c إلى النقطة a.



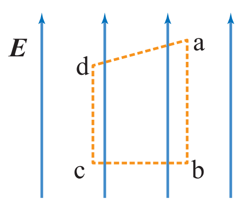
2. ثلاث نقاط في مجال كهربائيّ منتظم كما في الشكل، أيّ المقارنات الآتية صحيحة بين جهد تلك النقاط:

أ . $V_a = V_b = V_c$ ب. $V_a > V_b = V_c$

جـ. $V_a = V_b > V_c$ د. $V_a = V_b < V_c$

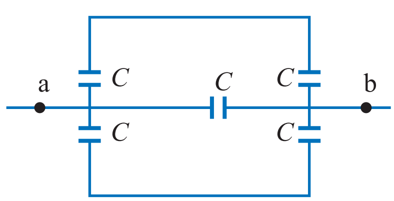
3. الجهد الكهربائيّ عند نقطة تقع على سطح موصل كروي مشحون ومعزول نصف قطره R يساوي (400 V). ما مقدار الجهد الكهربائيّ عند نقطة تبعد مسافة $\frac{R}{2}$ عن مركزه؟

أ. 200 V   ب. 400 V   جـ. 800 V   د. 0 V



4. يُبيّن الشكل (4) نقاط على رؤوس شبه منحرف في مجال كهربائيّ منتظم، النقطتان اللتان يكون فرق الجهد بينهما يساوي صفرًا هما:

أ. (a,b)   ب. (b,c)   جـ. (c,d)   د. (d,a)



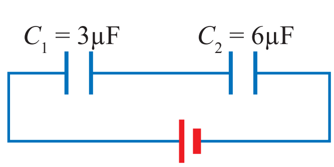
5. مقدار المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات بين النقطتين (a ,b) في الشكل يساوي:

أ. $\frac{C}{2}$ ب. C جـ. $2\,C$ د. $5\,C$

6. ما التغيّر الذي يحدث للطاقة المختزنة في مواسع عند زيادة فرق الجهد بين صفيحتيه إلى المثلين مع بقاء مواسعته ثابتة؟

أ . تزداد إلى المثلين.   ب. تقلّ إلى النصف.

جـ. تزداد إلى أربعة أمثال.   د. تقلّ إلى الربع.

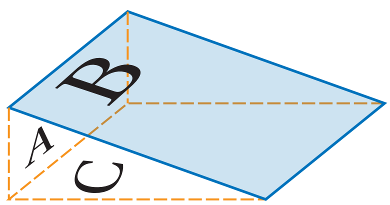


7. مواسعان يتّصلان مع بطّارية كما في الشكل، عند المقارنة بين المواسعين؛ أيّ العبارات الآتية صحيحة؟

أ. $V_2 = 2V_1$ ب. $V_2 = V_1$

جـ. $Q_2 = 2Q_1$ د. $Q_2 = Q_1$

8. يبين الشكل سطحا مغلقا على شكل منشور ثلاثي، وضع في مجال كهربائي منتظم، فكان التدفق عبر الأسطح الثلاثة كما يأتي: التدفق عبر السطح (A) صفر، التدفق عبر السطح (B) سالب، التدفق عبر السطح (C) موجب، التدفق الكلي صفر.

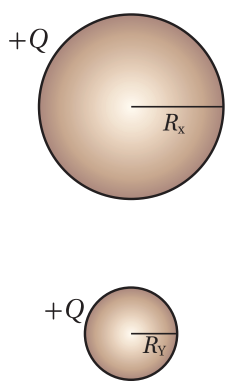


بناء على هذه النتيجة فإن اتجاه المجال يكون باتجاه محور:

أ. $+x$ ب. $-x$

جـ. $+y$ د. $-y$

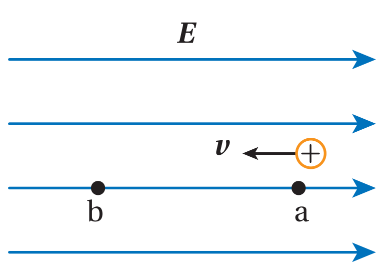
9. كرتان موصلتان (X, Y) مشحونتان بمقدار الشحنة نفسه. الكثافة السطحية للشحنة على سطح الكرة (X) تساوي (σ) إذا علمت أن نصف قطر الكرة (X) مثلي نصف قطر الكرة (Y)، فإن مقدار المجال الكهربائي عند نقطة تقع بالقرب من سطح الكرة (Y) بدلالة (σ) يساوي:



أ. $\dfrac{4\,\sigma}{\varepsilon_\circ}$ ب. $\dfrac{2\,\sigma}{\varepsilon_\circ}$

جـ. $\dfrac{\sigma}{2\,\varepsilon_\circ}$ د. $\dfrac{\sigma}{4\,\varepsilon_\circ}$

10. انطلق جسيم شحنته موجبة من النقطة (a) داخل مجال كهربائي منتظم بسرعة ابتدائية $(1\times10^5\ m/s)$ بالاتجاه المبين في الشكل، وتوقف عند النقطة (b) بعد مرور $(2.5\times10^{-6}\ s)$. بإهمال قوة الجاذبية الأرضية، فإن تسارع الجسيم مقدارًا واتجاهًا يساوي:



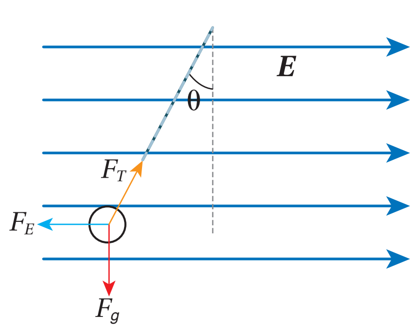
أ. $2.5\times10^{11}\ m/s^2, +x$

ب. $2.5\times10^{11}\ m/s^2, -x$

جـ. $4\times10^{10}\ m/s^2, +x$

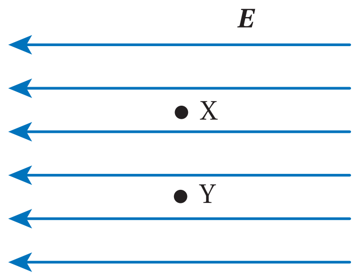
د. $4\times10^{10}\ m/s^2, -x$

11. كرة صغيرة مشحونة وزنها (F_g)، علقت رأسيا بخيط داخل مجال كهربائي منتظم مقداره (E)، فاتزنت كما هو مبين في الشكل. مقدار شحنة الكرة، ونوعها يساوي:



أ. $\dfrac{F_g \tan\theta}{E}$، موجبة ب. $\dfrac{F_g \tan\theta}{E}$، سالبة

جـ. $\dfrac{E}{F_g \tan\theta}$، موجبة د. $\dfrac{E}{F_g \tan\theta}$، سالبة



12. جسيمان (X, Y) مشحونان بشحنتين متساويتين، أطلقا من السكون داخل مجال كهربائي منتظم، من النقطة نفسها، كما يبين الشكل. وبعد مرور مدة من الزمن وُجد أن سرعة الجسيم (X) أكبر من سرعة الجسيم (Y). المعلومة المؤكدة التي أستنتجها عن الجسيمين:

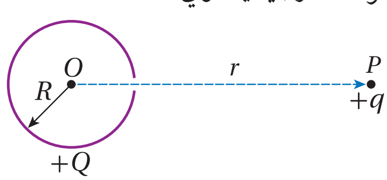
أ . القوة الكهربائية المؤثرة في الجسيم (X) أقل من المؤثرة في الجسيم (Y).

ب. الطاقة الحركية للجسيم (X) أقل من الطاقة الحركية للجسيم (Y).

جـ. كتلة الجسيم (X) أقل من كتلة الجسيم (Y).

د . شغل القوة الكهربائية على الجسيم (X) أقل من الشغل على الجسيم (Y).

13. شحنة نقطية $(+q)$ موضوعة عند نقطة (P) تبعد مسافة (r) عن مركز كرة مجوفة غير موصلة، نصف قطرها (R)، ومشحونة بشحنة $(+Q)$ تتوزع على سطحها بانتظام، ويوجد على سطحها فتحة صغيرة كما هو مبين في الشكل. لنقل الشحنة $(+q)$ من النقطة (P) إلى مركز الكرة (O) بسرعة ثابتة، بفعل قوة خارجية فإن شغل القوة الخارجية يساوي :



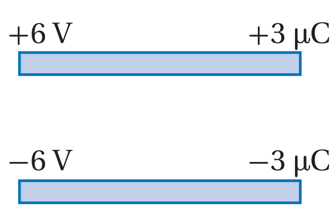
أ . $\frac{k\,qQ}{r}$

ب. $\frac{k\,qQ}{R}$

جـ. $\frac{k\,(Q-q)}{R}$

د . $k\,qQ(\frac{1}{R}-\frac{1}{r})$

14. بالاعتماد على البيانات المثبتة على المواسع الكهربائي المبين في الشكل فإن شحنة المواسع وجهده على الترتيب:



أ . $Q=0,\ V=0$

ب. $Q=3\ \mu C,\ V=6\ V$

جـ. $Q=6\ \mu C\ ,\ V=12\ V$

د . $Q=3\ \mu C\ ,\ V=12\ V$

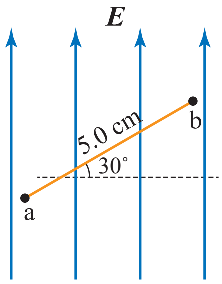
15. مواسعان البعد بين صفيحتي كل منهما متساوي، ومساحة كل من صفيحتي الأول (A) والثاني $(3A)$. وصلا مع بطارية على التوازي، إذا كان المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع الأول (E) وشحنته (Q)، فإن مقدار المجال والشحنة للمواسع الثاني:

أ . $E,\ Q$

ب. $E\ ,3Q$

جـ. $\frac{1}{3}\ E,\ Q$

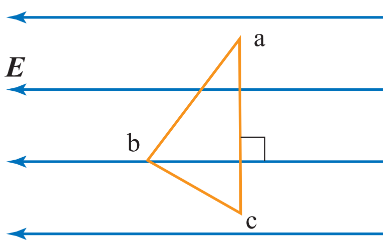
د. $\frac{1}{3}\ E,\ 3Q$



2 . **أستخدم الأرقام:** مجال كهربائيّ منتظم مقداره 3.0×10^4 N/C كما في الشكل، مستعينًا بالشكل أحسبُ:

أ . فرق الجهد $(V_a - V_b)$.

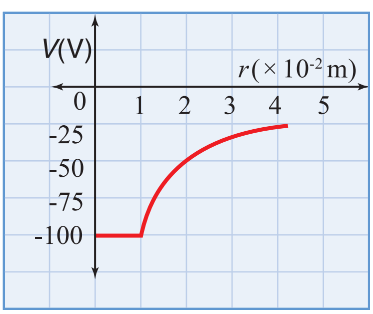
ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائيّة لشحنة مقدارها (−6.0 pC) عند انتقالها من النقطة a إلى النقطة b.



3 . **التفكير الناقد:** (3) نقاط (a, b, c) في مجال كهربائيّ منتظم كما في الشكل، إذا بذلت القوّة الكهربائيّة شغلًا مقداره (100 J) لنقل بروتون من النقطة a إلى النقطة b، فأحسب:

أ . التغيّر في طاقة الوضع الكهربائيّة عند انتقال البروتون من النقطة a إلى النقطة c.

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائيّة لنقل البروتون من النقطة c إلى النقطة b.



4 . **أستنتج:** يُمثّل الرسم البياني في الشكل، العلاقة بين الجهد الكهربائيّ والبُعد عن مركز موصل كروي مشحون بشحنة سالبة، مستعينًا بالشكل أحسبُ:

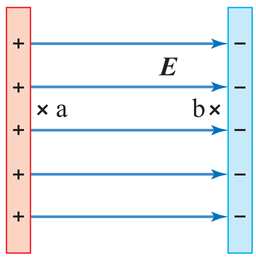
أ . جهد الموصل الكروي.

ب. الشغل المبذول من قِبَل القوّة الكهربائيّة لنقل شحنة (+6.0 nC) من نقطة تبعد (4 cm) إلى نقطة أخرى تبعد (2 cm) عن مركز الموصل.

5 . **أستخدم الأرقام:** يُستعمل مواسع مواسعته (180 μF) في وحدة إضاءة (فلاش) الكاميرا كما في الشكل لتخزين الطاقة الكهربائيّة؛ لتُفرّغ من المواسع خلال جزء من الثانية على شكل طاقة ضوئية في أثناء التقاط الصورة. إذا شُحِن المواسع حتى أصبح جهده (200 V) بوساطة بطارية؛ فأحسبُ:

أ. شحنة المواسع الكلية.

ب. الطاقة الكهربائيّة المختزنة في المواسع.



6 . جسيم كتلته (m) وشحنته (q)، بدأ حركته من السكون داخل مجال كهربائي منتظم (E)، كما هو مبين في الشكل. الجسيم بدأ حركته من النقطة (a) بالقرب من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة. إذا علمت أن الإزاحة التي قطعها من (a) إلى (b) تساوي (d)، فأثبت أن سرعة الجسيم (v) لحظة وصوله إلى النقطة (b) تعطى بالعلاقة الآتية:

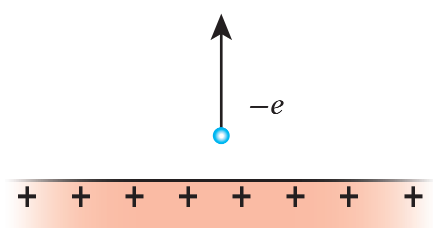
$$v = \sqrt{\frac{2qEd}{m}}$$

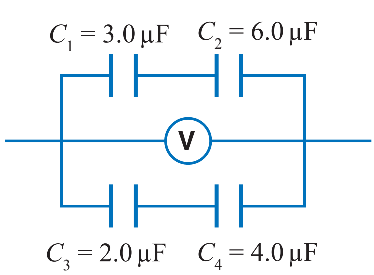
7. **التفكير الناقد:** يبين الشكل قشرة رقيقة لا نهائية الأبعاد في وضع أفقي، مشحونة بشحنة موجبة تتوزع على سطحها بانتظام، وبكثافة سطحية (σ). أطلق إلكترون من نقطة بالقرب من القشرة رأسيا إلى أعلى بسرعة ابتدائية $(2.0 \times 10^5\ m/s)$، فكانت المدة الزمنية من لحظة إطلاقه إلى لحظة رجوعه إلى نقطة الإطلاق $(14.0 \times 10^{-12}\ s)$.

(بإهمال الوزن، واعتبار أن القوة الوحيدة المؤثرة في الإلكترون هي القوة الكهربائية) أحسب:

أ . تسارع الإلكترون

ب. الكثافة السطحية للشحنة (σ).

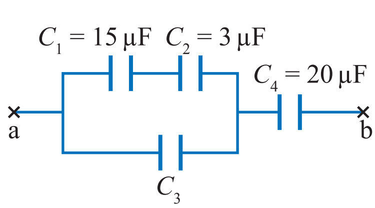




8. **أستخدم الأرقام:** يُمثّل الشكل جزءًا من دارة كهربائيّة. إذا علمتُ أنّ قراءة الفولتميتر $(12\ V)$؛ فأحسبُ:

أ . المواسعة المكافئة.

ب. الطاقة الكلية المختزنة في المواسعات.



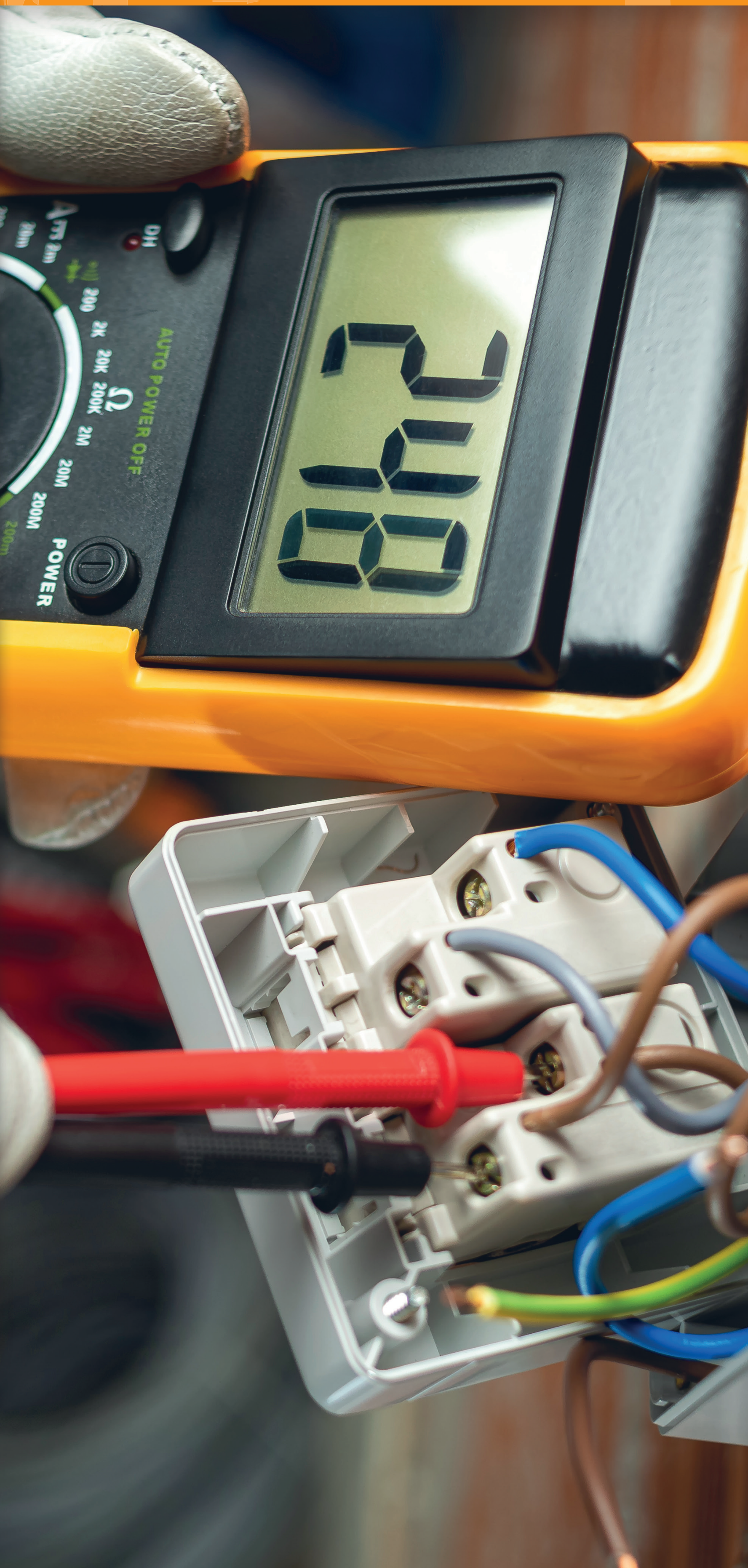
9. **أستخدم الأرقام:** تتّصل أربع مواسعات معًا في جزء من دارة كهربائيّة كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ شحنة المواسع C_4 تساوي $(30\ \mu C)$؛ وفرق الجهد بين النقطتين a و b يساوي $4.5\ V$، أحسب المواسعة (C_3).

الوحدة 4

التيّار الكهربائيّ
Electric Current

أتأمّل الصورة

انتشرت السيارات التي تعمل كليًا أو جزئيًا بالطاقة الكهربائية، بمختلف الأشكال والفئات والأحجام. تستخدم السيارات الكهربائية الطاقة الكهربائية المخزنة في البطارية، حيث تحتوي السيارات الكهربائية على بطارية كبيرة السعة قابلة لإعادة الشحن. ما العوامل التي تحدد المدة الزمنية اللازمة لإعادة شحن بطارية السيارة؟



الفكرة العامّة:

أحدثت الطاقة الكهربائية ثورة في مجالات الحياة المختلفـة، حتى أصبح من غير الممكن أن نتخيل الحياة من غير الكهرباء. كي نتمكن من نقل الطاقة الكهربائية واستخدامها في حياتنا اليومية، يجب أن تتحرك الشحنات الكهربائية على شكل تيار كهربائي في دارات مغلقة.

الدرس الأول: المقاومة 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 وقِيَمها باختلاف الغرض من استخدامها. ولسريان التيّار الكهربائي في المقاومات؛ فلا بدّ من توافُر قوّة دافعة كهربائيّة في الدارة.

الدرس الثاني: الدارة البسيطة والقدرة الكهربائية
Simple Circuit and Electric Power

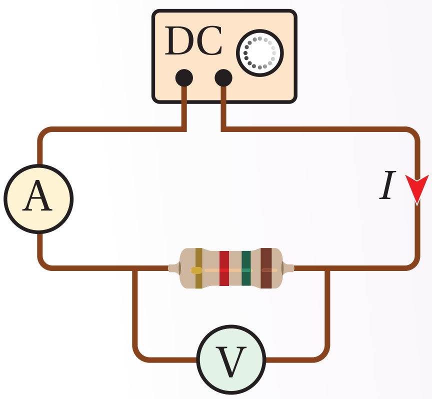
الفكرة الرئيسة: تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً وداراتٍ كهربائيـةً؛ تتفاوت من البسيطة، مثل دارة مصباح المكتب، إلى المعقّدة مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكلّ جهازٍ كهربائيٍّ قدرةٌ كهربائيّةٌ تناسب الهدف من استخدامه.

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 احتـوت تفرُّعـاتٍ تشتمل على مقاومـات، نستخدم قواعد جمع المقاومات لدراستها، وفي حال احتوت التفرُّعات على بطارياتٍ ومقاومات، نستخدم قاعدتي كيرشوف إضافةً إلى ما سبق.

تجربة استهلاليّة

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 قيمة الجُهد، أحرِصُ على عدم زيادتها عن قياس (6 V) من أجل عدم رفع درجة حرارة المقاومة.

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 موادّ أخرى مختلفة؛ هل تسلك جميعُها سلوكَ المقاوماتِ من حيثُ النسبة بين فرق الجُهد والتيار؟

المقاومة والقوة 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 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.

◄ المفاهيم والمصطلحات:

مقاومة	Resistance
مقاوميّة	Resistivity
قوّة دافعة كهربائيّة	Electromotive Force
قانون أوم	Ohm’s law

التيّار الكهربائيّ Electric Current

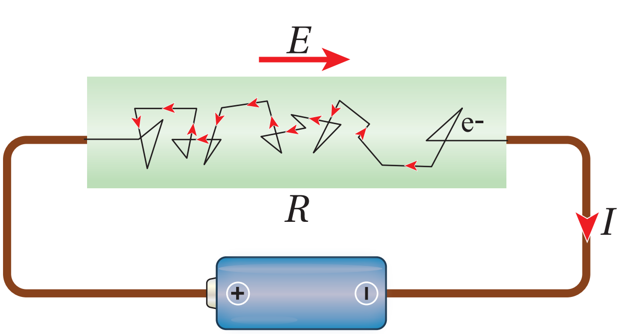
أتذكّر أنّ الفلزّات تحتوي على شحنات حرّة (إلكترونات) تتحرّك في اتجاهات مختلفة، وعند تطبيق فرق جهد بين طرفَي موصل فلزّي ينشأ داخله مجال كهربائي يؤثّر بقوة كهربائية في الإلكترونات الحرّة فيدفعها للحركة في اتّجاه واحد فيسري فيه تيّار كهربائي. ويعتمد مقدار التيّار (I) على كمّية الشحنة التي تعبُر مقطعًا عرضيًّا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

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

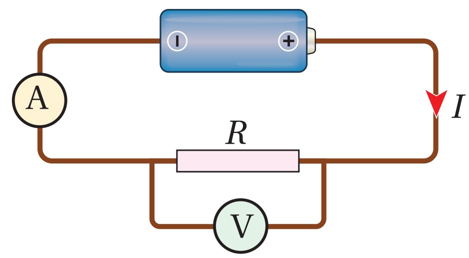
حيث (ΔQ) كمّية الشحنة، (Δt) زمن عبورها، كما تعلمت أنّ اتّجاه «التيّار الاصطلاحي» يكونُ بعكس اتّجاه حركة هذه الإلكترونات. يقاس التيّار الكهربائيّ بوحدة أمبير ampere (A)، والأمبير هو مقدار التيّار الكهربائيّ الذي يسري في موصلٍ في موصل عندما تعبُر مَقطَع هذا الموصل شحنةٌ مقدارُها (1 C) في ثانيةٍ واحدة. 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 سريان تيار كهربائي في موصل؛ فإن الإلكترونات الحرة تتصادم في ما بينها، كما تتصادم مع ذرات الموصل؛ مما يعني أنها تواجه ممانعة لحركتها عند مرورها في الموصل، وتسلك مسارات متعرجة. ويبين الشكل (1) المسار المتعرج لأحد هذه الإلكترونات بسبب هذه التصادمات. 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): مسار حركة أحد الإلكترونات الحرّة في موصل.



الشكل (2): قياس كُلٍّ من؛ التيار الكهربائي الذي يسري في مقاومة كهربائيّة وفرق الجهد بين طرفيها.

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 «عند ثبات درجة حرارة الموصل، 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:

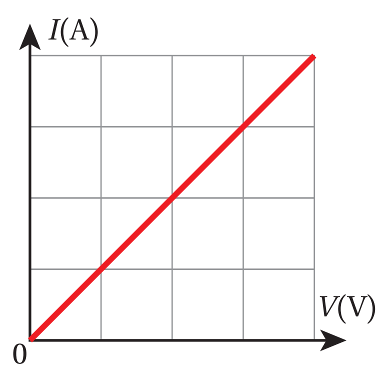
$$\Delta V = IR$$

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

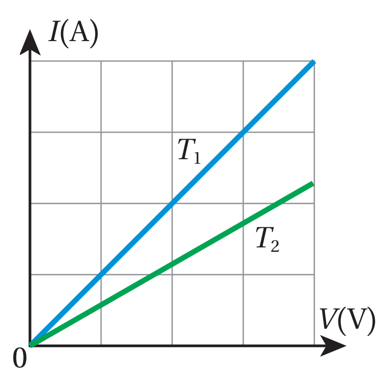
الموصلات الأوميّة Ohmic Conductors

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 (2)، واستُخدمَ جهاز أميتر (A) لقياس التيّار الذي يسري في المقاومة، وجهاز فولتميتر (V) لقياس فرق الجُهد بين طرفيها، وعندما مُثّلت العلاقة بين المُتغيّرين بيانيًا، عند ثبات درجة الحرارة كانت خطًّا مُستقيمًا، كما في الشكل (3/ أ). ومثل هذه المُوصِلات التي يكون منحنى ($I-V$) لها خطًّا مستقيمًا عند ثبات درجة حرارتها، تُوصَف بأنها تحقّق قانون أوم؛ لذلك تُسمّى موصلاتٍ أوميّةً. وبإيجاد ميل الخط المستقيم الذي يساوي مقلوب المقاومة؛ فإنّه يمكن حساب مقدارها.

يبَين الشكل (3/ ب) منحنى ($I-V$) لموصل أوميّ عند درجتي حرارة مختلفتين T_1 و T_2. أستنتج من الشكل أن مقاومة الموصل الأوميّ تبقى ثابتة عند ثبوت درجة الحرارة. وفي حال تم تثبيت درجة حرارة الموصل الأوميّ عند قيمة جديدة T_2 أكبر من T_1؛ فإن المقاومة تثبت عند قيمة جديدة أكبر.



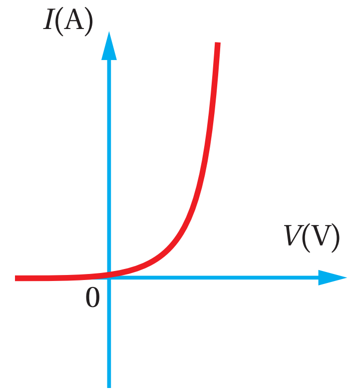
الشكل (3/ أ): منحنى ($I-V$) لموصل أومي.



الشكل (3/ ب): منحنى ($I-V$) لموصل أومي عند درجتي حرارة مختلفتين.

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 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.

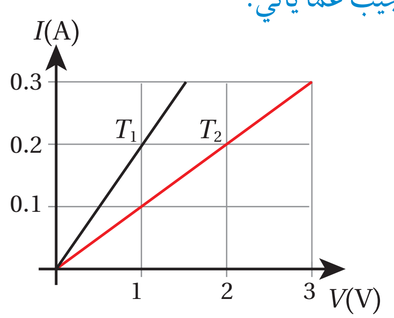
أتحقّق: كيف أميّز بين الموصلات الأوميّة والمواد اللا أوميّة؟

المثال 1

يبين الشكل المجاور العلاقة $(I-V)$ لموصل فلزي عند درجتي حرارة مختلفتين (T_1 , T_2)، معتمدًا على بيانات الشكل، أجيب عما يأتي:

أ . ما مقدار مقاومة الموصل عند كلٍ من الدرجتين؟

ب. أميّز أي درجتي الحرارة أعلى، مبررًا إجابتي.



المعطيات: الرسم البياني

المطلوب: $R_1 = ?, R_2 = ?$

الحل:

أ . المقاومة تساوي مقلوب ميل الخط المستقيم :

$$R_1 = \frac{1}{0.2} = 5\ \Omega$$

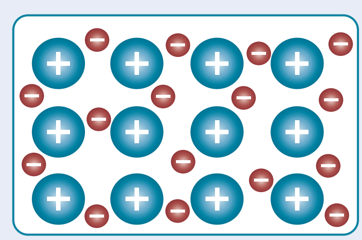
$$R_2 = \frac{2}{0.2} = 10\ \Omega$$

ب. مقاومة الموصل الأومي تكون أكبر عند درجة الحرارة الأعلى. وبما أن (R_2) أكبر من (R_1)، فتكون درجة الحرارة (T_2) أكبر من درجة الحرارة (T_1).

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

الربط مع الكيمياء

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

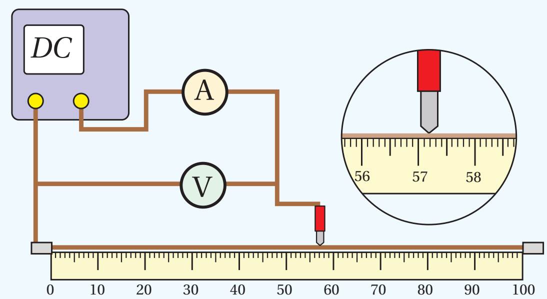


أيون الفلز

إلكترون حرّ

التجربة 1 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 مستقيم 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؟

العوامل المؤثرة في المقاومة Factors Affecting the Resistance

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؛ ممّا 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 يزيد عدد الإلكترونات الحرة التي تعبر مقطع الموصل في الثانية الواحدة، فيزداد التيّار وتقلّ المقاومة. ويمكن تشبيه مرور التيّار الكهربائي في الموصلات بتدفّق الماء في الخُرطوم، فكلّما زادت مساحة مَقطع الخُرطوم زادت كمّية الماء التي تتدفّق خلاله في الثانية الواحدة كما في الشكل (5).

نوع مادة الموصل: تختلفُ الموادّ عن بعضها في مقاومتها لسريان التيّار الكهربائيّ فيها؛ إذ تعدُّ بعض الفلزات؛ مثل النحاس، والفَضّة، 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: عند سريان التيار الكهربائي في موصل فلزي تصطدم الإلكترونات الحرة في أثناء انتقالها عبر الموصل بذرات الفلز، فينتقل جزءٌ من طاقتها الحركية إلى الذرات؛ ممّا يؤدي إلى زيادة سعة اهتزاز هذه الذرات وارتفاع درجة حرارة الموصل. وبزيادة سعة اهتزاز الذرات يزداد احتمال تصادمها مع الإلكترونات، فتزداد إعاقة الموصل لحركة الإلكترونات داخله، وتصبح مقاومتة لسريان التيار أكبر.

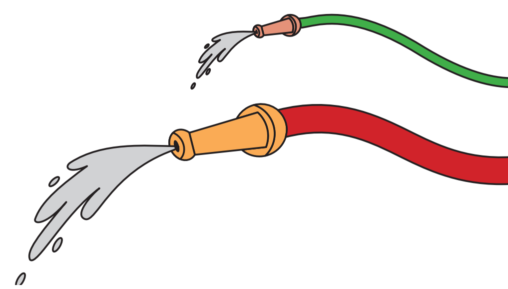
في مراحل التجربة السابقة جميعها؛ ضُبطَ عامل درجة الحرارة. وبثبوت درجة الحرارة؛ فإن المقاومة الكهربائية للموصل تتناسب طرديًّا مع طول الموصل (L) وعكسيًّا مع مساحة مَقطَعِه (A)، ويمكن كتابة علاقة التناسب هذه على الصورة:

$$R \propto \frac{L}{A}$$

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

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

أفكّر: عند تشغيل مدفأة كهربائية ألاحظ احمرار سلك التسخين وأشعر بسخونته، بينما لا يسخن سلك التوصيل الذي يصل المدفأة بمقبس الجدار. ما تفسير ذلك؟



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

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

بإعادة ترتيب حدود العلاقة تُصبح على الصورة:

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

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

الجدول (1) يبيّنُ مقاوميّة بعض المواد، وبمعاينة الجدول؛ أجدُ أنّ مقاوميّة الموادّ تتراوح من قيمٍ صغيرةٍ جدًّا للمواد المُوصلة، مثل الفَضّة والنحاس، إلى قيمٍ كبيرةٍ جدًا للموادّ العازلة مثل الزجاج والمطّاط، مرورًا بمواد 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 مغناطيسيّ قويّ في أجهزة، مثل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

✓ **أتحقّق:** أوضّح الفرق بين مفهومي المقاومة والمُقاوميّة.

المثال 2

فتيلُ مصباحٍ مُتوهّجٍ مصنوعٍ من سلكٍ رفيعٍ من التنغستن؛ نصف قطره ($10\ \mu m$) على شكل ملف لولبي، كما في الشكل (6)، مقاومتهُ ($560\ \Omega$). عند شدِّهِ جيدًا تبيّن أنّ طولَ السلك ($3.14\ m$). أحسبُ مقاوميّة التنغستن عند درجة حرارة $20\ ^\circ C$.

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

المطلوب: $\rho = ?$

الحلّ:

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

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

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

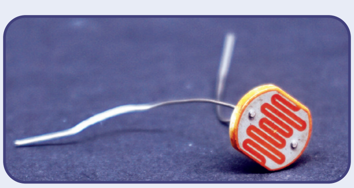
جدول (1): مقاوميّة بعض المواد عند درجة حرارة ($20^\circ\ C$).

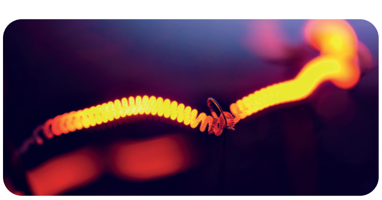
المادة	المقاومية ($\Omega.m$)
فضة	1.59×10^{-8}
نحاس	1.7×10^{-8}
ذهب	2.44×10^{-8}
ألمنيوم	2.82×10^{-8}
تنغستن	5.6×10^{-8}
حديد	10×10^{-8}
نيكروم	1.5×10^{-6}
كربون	3.5×10^{-5}
سيليكون	640
زجاج	$10^{10} - 10^{14}$
مطاط	10^{13}

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.

القوّة الدافعة الكهربائيّة (Electromotive Force (emf

تُعدّ البطّارية مصدرًا للطاقة؛ فهي تنتجها عن طريقِ تفاعُلات كيميائيّة تجري داخلها، وتعمل على توليد القوة الدافعة الكهربائية، وهذه تسميةٌ اصطلاحيّةٌ قديمة، فالقوّة الدافعة الكهربائيّة ليست قوّة ميكانيكيّة، بل هي فرق جُهد كهربائيٍّ تولّدهُ 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) Electromotive force** 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:

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

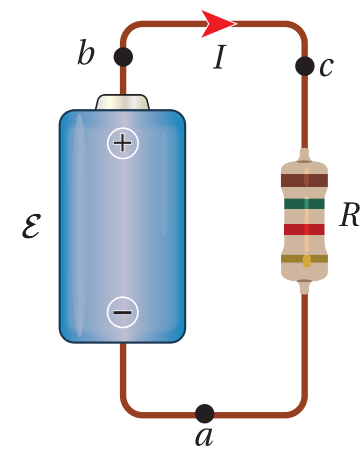
حيث (W) الشغل المبذول على الشحنة المنقولة (ΔQ).

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 الكهربائية جزءًا صغيرًا من طاقتها في أثناء حركتها داخل البطّارية؛ لأنّ للبطارية مقاومة داخلية (r) تُعيق حركة الشحنات، أمّا الطاقة المتبقية 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؟

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



الشكل (7): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية.

أفكّر: ما تحـوّلات الطاقـة التي تحدث داخل البطّارية في الحالتين الآتيتين:

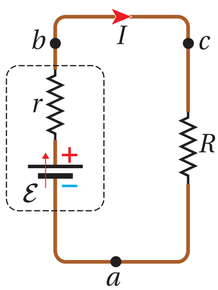
أ. توليد القوّة الدافعة الكهربائيّة بين قطبي البطارية.

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:

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

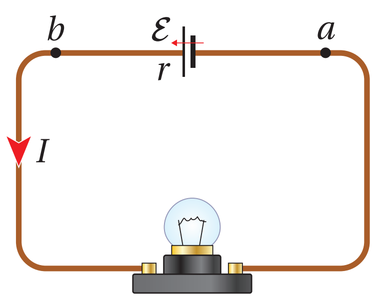
أستنتجُ من هذه العلاقة أن أكبر فرق جهد ممكن بين طرفي البطّارية يساوي القوّة الدافعة الكهربائيّة في حالتين؛ عندما يكون التيّار المارّ في البطّارية يساوي صفرًا، أو عندما تكون قيمة المقاومة الداخلية للبطّارية تساوي صفرًا، وفي هذه الحالة تُسمّى بطّارية مثالية.



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

المثال 3

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



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

المعطيات:

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

المطلوب:

$$\Delta V_\varepsilon = ?$$

الحل:

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

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

تمرين

في المثال (3)، بافتراض أنّ البطّارية مثالية $(r = 0)$. ما 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. **أستنتج**: عند توصيل بطارية مع مقاومة وسريان تيار كهربائي في الدارة، أو عند شحن البطارية القابلة لإعادة الشحن نلاحظ ارتفاع درجة حرارة البطارية نفسها. أفسر سبب ذلك.

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

4. **أستنتج**: موصل أوميّ يتصل طرفاه بمصدر فرق جهد ثابت (V)، ويسري فيه تيّار كهربائي (I) عند درجة حرارة (20 ˚C)، ماذا يحدث لكلٍّ من فرق الجُهد والتيار والمقاومة إذا ارتفعت درجة حرارة الموصل إلى (50 ˚C)؟ أُفسّرُ إجابتي.

5. **أفسّر** زيادة مقاومة الموصل بزيادة طوله.

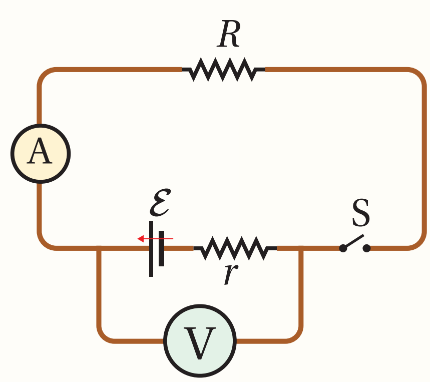
6. **أستخدم الأرقام**: سخّانٌ كهربائيٌّ صغيرٌ يعمل على جُهد (220 V). إذا كان سلك التسخين فيه المصنوعُ من سبيكة النيكروم طولهُ (83 m)، ونصفُ قُطرِهِ (0.3 mm). فما مقدارُ التيّار الكهربائيّ المارّ في السخان؟

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

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

أ . قراءة الأميتر والمفتاح مغلق.

ب. مقدار المقاومة (R).



8. **أضع دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

1. عندما يسري تيار (10 mA) في موصل مدّة نصف ساعة؛ فإنّ مقدار الشحنة الكهربائية بوحدة كولوم (C) التي تعبر مقطعًا عرضيًا في هذا الموصل خلال هذه المدّة تساوي:

أ . 0.3   ب. 5.0   جـ. 18   د. 300

2. الثنائي الباعث للضوء (LED)، يمتاز بأن العلاقة بين التيار الذي يسري فيه وفرق الجهد بين طرفيه:

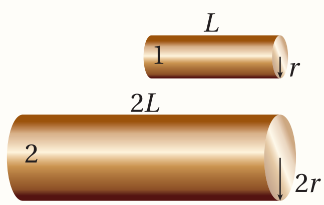
أ . خطية، عند ثبات درجة الحرارة.

ب. خطية، حتى عند تغير درجة الحرارة.

جـ. غير خطية عند ثبات درجة الحرارة، وكذلك عند تغيرها.

د . خطية عند ثبات درجة الحرارة، وغير خطية عند تغيرها.

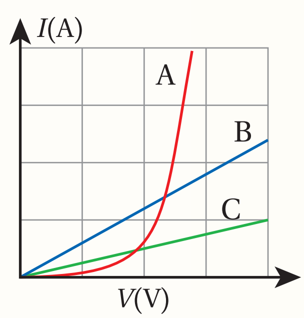
3. في الشكل المجاور موصلان (1) و (2) من النحاس؛ طول الأول (L) ونصف قطر مقطعه (r)، وطول الثاني ($2L$) ونصف قطر مقطعه ($2r$). العلاقة بين مقاومتي الموصلين (R_1) و (R_2) تكون على إحدى الصور الآتية:



أ . $R_1 = R_2$ ب. $R_1 = 2R_2$

جـ. $R_2 = 2R_1$ د . $R_2 = 4R_1$

4. يبين الشكل المجاور العلاقة البيانية بين فرق الجهد والتيار لثلاثة مواد (A, B, C) عند درجة حرارة ثابتة، معتمدًا على الشكل؛ أحدد العبارة الصحيحة في ما يأتي:



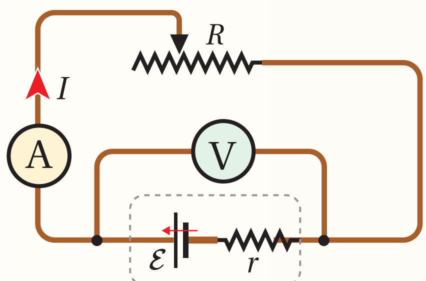
أ . المواد جميعها موصلات أوميّة، والموصل (A) أكبرها مقاومة.

ب. المواد جميعها موصلات أوميّة، والموصل (A) أقلها مقاومة.

جـ. المادتان (B) و (C) موصلات أوميّة، والمادة (A) لا أوميّة.

د . المادة (A) موصل أوميّ، والمادتان (B) و (C) لا أوميّة.

5. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (ε) ومقاومتها الداخلية (r) وصلت مع مقاومة متغيرة (R)، كما يبين الشكل المجاور. بزيادة مقدار المقاومة المتغيرة (R)؛ فإن ما يحدث لفرق الجهد بين قطبي البطارية (V) والتيار (I) في الدارة، هو:



أ . يزداد (V) ويزداد (I).

ب. يزداد (V) وينقص (I).

جـ. ينقص (V) ويزداد (I).

د . ينقص (V) وينقص (I).

◄ **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 كهربائيةٌ تناسب الهدف من استخدامه.

◄ **نتاجات التعلّم:**

- أحلّل داراتٍ كهربائيةً بسيطةً، وأحسبُ فرقَ الجُهد والتيار المارّ في كلّ مُقاومةٍ
- أُمثّل رسومات بيانية لتغيرات الجهد في دارة كهربائية بسيطة وأحلّلُها.
- أحسبُ الطاقة الكهربائيّة التي تستهلكها الأجهزة في المنازل. وتكاليف استهلاكها.
- أحدّدُ طرائق لتقليل استهلاك الطاقة الكهربائيّة في المنازل والمصانع.

◄ **المفاهيم والمصطلحات:**

القدرة الكهربائيّة	Electric Power
واط	watt

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.

التمثيل البياني لتغيرات الجهد الكهربائي
Graphical Representation of Electric Potential Changes

لمعرفة تغيّرات الجهد عبر مُكوّنات دارة بسيطة مثل المُبيّنة في الشكل (10/أ) يمكنني اختيار الحركة باتجاه دوران عقارب الساعة بدءًا من النقطة (a) والعودة إليها، وتمثيل التغيُّرات في الجهد الكهربائيّ 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 من النقطة (c) للعودة الى نقطة البداية (a)؛ فينخفض الجهد بمقدار (IR)، أي أنّ جهد النقطة (a) أقل من جهد النقطة (c). ومن الشكل أستنتجُ أنّ هذه التغيرات في الجهد يمكن التعبير عنها رياضيًّا بالعلاقة:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

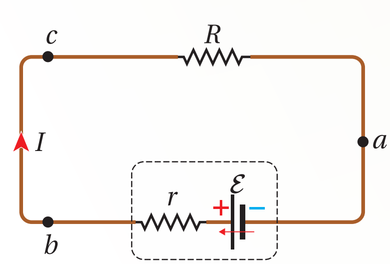
معادلة الدارة الكهربائية البسيطة Simple Circuit Equation

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

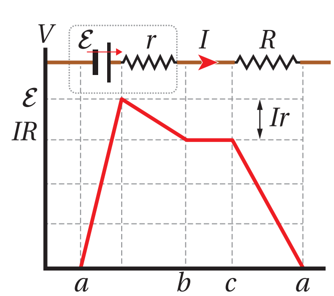
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

تُعبّر هذه العلاقة عن معادلة الدارة البسيطة بأبسط أشكالها، ويمكن أن يحتوي المسار المغلق للدارة البسيطة على مقاومات وبطاريات عدّة، في هذه الحالة فإنه يمكن التعبير عن معادلة الدارة البسيطة بالصورة الآتية:

$$I = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma(R + r)}$$



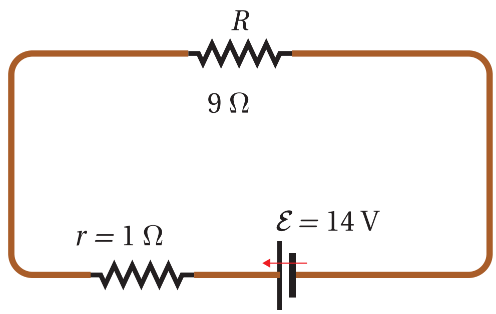
الشكل (10/ أ): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية، ممثلةٌ بالرموز.



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.

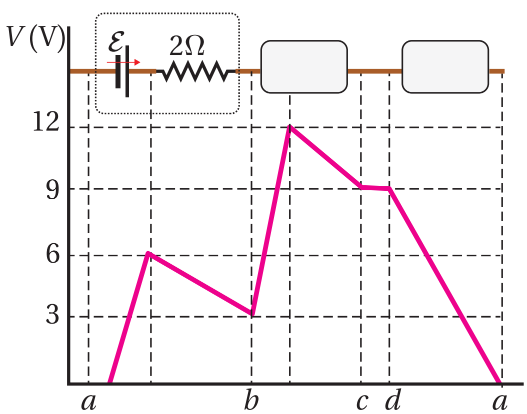
المثال 5

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

الحل:

أ) المنحنى البياني بين النقطتين (a) و (b) يُبيّن ارتفاع الجهد ($6.0\ \text{V}$) ثم انخفاضه ($3.0\ \text{V}$)، وهذا يفيد أنّ 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

تعلمت أن البطارية تبذل شغلا على الشحنات الكهربائية فتُكسبها طاقة، إلا أن هذه الشحنات تفقدُ جزءًا من طاقتها عند مرورها في المقاومة الداخلية للبطارية، وتفقد بقية طاقتها أثناء عبورها في المقاومة الخارجية (الأجهزة الكهربائية). وقد تتحول الطاقة الكهربائيّة في الأجهزة الكهربائيـة المختلفـة إلى أشكال أخرى من الطاقـة؛ مثل الحركيّة أو الضوئيّة. أتأمل الشكل (13).

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

$$W = \varepsilon \Delta Q$$

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

تُعرّف القدرةُ أنّها المعدّلُ 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:

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

حيث إنّ $I^2 r$ هي القدرة المُستهلكة في المقاومة الداخلية، بينما $I^2 R$ القدرة

الشكل (13): تتحول الطاقة الكهربائية في المدفأة إلى طاقة حرارية وضوئية.

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 الدارة 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: كيف تتفق المعادلة الآتية مع مبدأ حفظ الطاقة؟

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

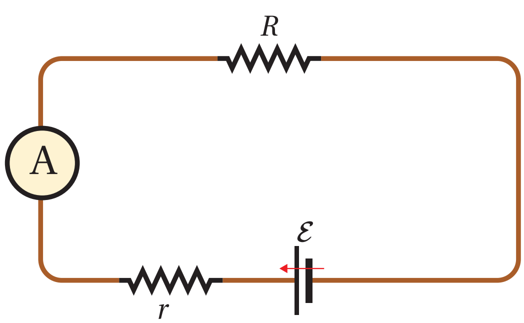
المثال 6

في الدارة البسيطة 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 كهربائية 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.

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.

وكذلك بالنسبة إلى بطّارية السيارة، نجد أنّ البطّارية (70 Ah) أفضل من تلك التي تحمل الرقم (50 Ah).

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:

$$E = P\Delta t = 15\,\frac{\text{J}}{\text{s}} \times 30\text{ min} \times \frac{60\text{ s}}{1\text{ min}} = 27000\text{ J}$$

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

تزود شركة توليد الكهرباء أحد المستهلكين بقدرة كهربائية (4.4 kW) مدة أربع ساعات يوميًا باستخدام أسلاك توصيل مقاومتها (6 Ω)، وفرق جهد كهربائي (220 V).

أ . ما التكلفة اليومية لهذه الكمية من الطاقة، إذا كان سعر الطاقة (0.12 JD/kWh)؟

ب. ما مقدار الطاقة الكهربائية المفقودة (المتحولة إلى حرارة) في الأسلاك يوميًا؟ وما تكلفة هذه الطاقة المفقودة؟

جـ. كم يصبح مقدار الطاقة المفقودة يوميًا إذا استخدم لنقلها فرق جهد (2200 V)؟ وكم تصبح تكلفة الطاقة المفقودة؟

المعطيات: $P = 4.4\text{ kW}, R = 6\ \Omega, V = 220\ \Omega, V = 2200\text{ V}, Price = 0.12\text{ JD/kWh}$

المطلوب: $P = ?, cost = ?$

الحل:

أ . تكلفة الطاقة المنقولة: $cost = P \times \Delta t \times price = 4.4 \times 4 \times 0.12 = 2.11\text{ JD}$

ب. مقدار الطاقة المفقودة، نحسب أولا التيار الكهربائي المنقول خلال الأسلاك، ثم نحسب القدرة الضائعة:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{4400}{220} = 20\text{ A}$$

$$P = I^2 R = 400 \times 6 = 2400\text{ W}$$

$$cost = P \times \Delta t \times price = 2.4 \times 4 \times 0.12 = 1.15\text{ JD}$$

جـ. مقدار الطاقة المفقودة عند رفع فرق الجهد إلى (2200 V) ، نحسب أولًا؛ التيار الكهربائي المنقول خلال الأسلاك، ثم نحسب القدرة الضائعة:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{4400}{2200} = 2\text{ A}$$

$$P = I^2 R = 4 \times 6 = 24\text{ W}$$

$$cost = P \times \Delta t \times price = 0.024 \times 4 \times 0.12 = 0.01\text{ JD}$$

تطبيقٌ تكنولوجي: شحن السيارات الكهربائيّة

تُزوّد السيارة الكهربائيّة بالطاقة بواسطة شاحنٍ منزليّ، كما تتوافر أجهزة شحنٍ في الأماكن العامة، كما في الشكل (15)، وحيث أنّ 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، مع مراعاة أن تكون قيمة التيار الكهربائي مناسبة بحيث لا تؤدي الى زيادة كبيرة في درجة حرارة الأسلاك.

الشكل (15): شحن السيارة الكهربائيّة من جهاز شحن عام.

المثال 8

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. المُدّةَ 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 كاملةً.

$$cost = E \times price = 24\ \text{kWh} \times 0.12\ \text{JD/kWh} = 2.88\ \text{JD}$$

الربط مع التكنولوجيا

نظرًا لارتفاع تكلفة فاتورة الطاقة، أصبح من الضروري التوجه إلى مصادر الطاقة المتجدّدة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية.

تُستخدم 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.

تمرين

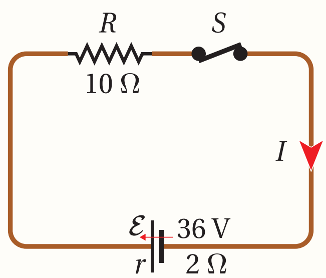
أستخدم الأرقام: تُستخدم بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (20 V) ومقاومتها الداخلية (1.5 Ω) لتشغيل مقاومة سخان كهربائي لتدفئة حوض أسماك صغير. إذا كان التيار في مقاومة السخان (2 A) فما مقدار القدرة الكهربائية التي تتحول إلى حرارة تنتقل إلى الماء في الحوض؟

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصودَ بالقُدرة الكهربائيّة، ووحدةَ قياسِها.

2. **أستخدم الأرقام:** 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 الموصل (A) إلى القدرة التي يستهلكها الموصل (B)؟

3. **أستخدم الأرقام:** في الدارة الكهربائيّة المُبيّنة في الشكل المجاور؛ أُغلقَ المفتاح (S) مدّة (5 min). أحسب ما يأتي:



أ . الطاقة الكهربائيّة التي انتجتها البطّارية (الشغل الذي بذلته).

ب. الطاقة الكهربائيّة التي استهلكتها كلُّ مقاومة.

جـ. نوع تحوّلات الطاقة في البطّارية وفي المقاومات.

4. **أستخدم الأرقام:** 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 جُهدهِ (12 V)، والتيار الذي يُنتِجه (1 A)؟ أفسر إجابتي.

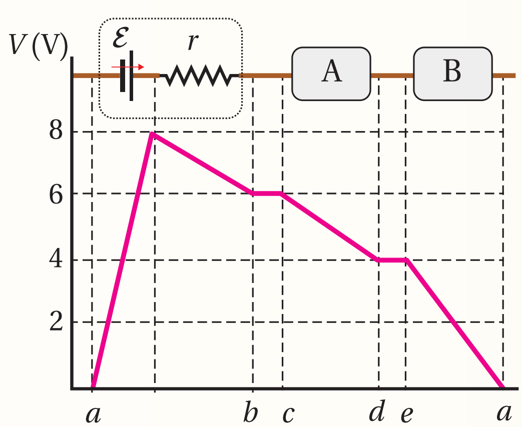
5. **أستنتج:** تتكوّن دارةٌ كهربائيةٌ من بطاريّةٍ لها مقاومةٌ داخليةٌ ومقاومتين خارجيتين، يمرُّ فيها تيّار كهربائيٌّ (1.6 A) بالاتّجاه من (a) إلى (b). مُثّلَت تغيُّرات الجُهد فيها بيانيًّا، كما في الشكل المجاور. أجدُ ما يأتي:

أ . القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية.

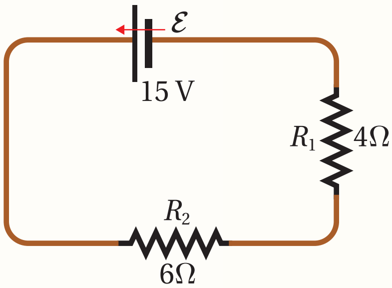
ب. المقاومة الداخلية للبطارية.

جـ. المقاومة الخارجية (A).

د . المقاومة الخارجية (B).



6. **أضع دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

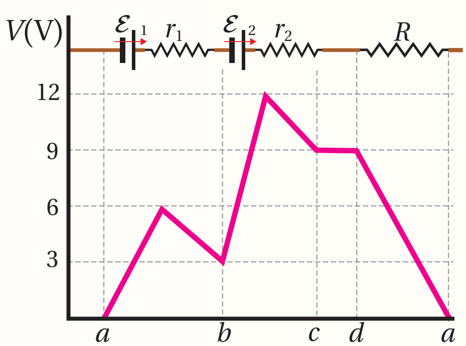


1 . معتمدًا على بيانات الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل المجاور؛ فإن فرق الجهد بين طرفي المقاومة (R_1) بوحدة فولت (V) يساوي:

أ . 1.50 ب. 3.75

جـ. 6.0 د . 9.0

2 . دارة كهربائية بسيطة تتكون من بطاريتين ومقاومة خارجية، التيار المار في الدارة (1.5 A). معتمدا على التمثيل البياني لتغيرات الجهد في الدارة، فإن القدرة الكلية المستهلكة في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية بوحدة الواط (W):



أ . 22.5 ب. 15

جـ. 13.5 د . 9

3 . يُعرّف المعدل الزمني للشغل الذي تبذله البطارية لنقل كمية من الشحنة بين قطبيها بأنّه:

أ . فرق الجهد بين قطبي البطارية. ب. القوة الدافعة الكهربائية للبطارية.

جـ. القدرة الكهربائية للبطارية. د . المقاومة الداخلية للبطارية.

4 . وُصِل مصباح كهربائي مع مصدر فرق جهد (240 V)؛ فسرى فيه تيار كهربائي (5 A)، إذا كان سعر الطاقة الكهربائية (0.2 JD/kWh)؛ فإن تكلفة تشغيل المصباح مدة عشرين ساعة تساوي:

أ . (4.8 JD). ب. (2.4 JD).

جـ. (0.48 JD). د . (0.24 JD).

5 . هاتف نقّال يعمل على بطارية تخزن طاقة كهربائية مقدارها (0.054 kWh)، وُصل بشاحن يزوّد بتيار (2 A) وفرق جهد (3.6 V). إذا كانت البطارية مفرغة تمامًا؛ فإنّ الزمن اللازم لشحنها كاملةً هو:

أ . (7.5 s). ب. (450 s).

جـ. (4.5 h). د . (7.5 h).

توصيلُ المقاوماتِ 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:

- أستكشف عمليًا 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.
- أحسب فرق الجهد والتيار المار في كل مقاومة في دارة كهربائية مركبة.

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 متعددة 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:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

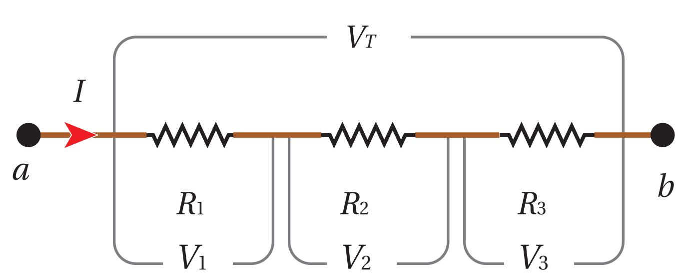
$$V_T = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

عند مقارنة هذه المقاومات مع مقاومةٍ وحيدةٍ مكافئةٍ لها جميعًا (R_{eq}) بينَ طرفيها فرق الجُهد نفسه (V_T)، ويمر فيها التيّار نفسه (I)، وتحقق العلاقة: ($V_T = IR_{eq}$)؛ نجدُ أنّ:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

يُستخدمُ التوصيلُ بهذه الطريقة للحصول على مقاومة مكافئةٍ 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 قَطْعٍ 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). ولتحقيق 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 تتبعهُ الشحنات بينهما. أي أنّ:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3$$

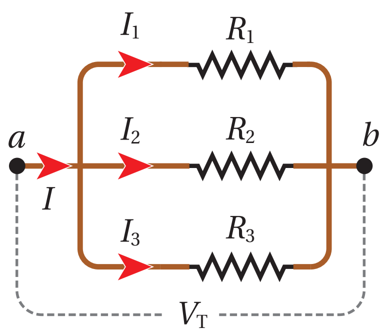
عند استخدام مقاومة واحدة بين النقطتين (a,b) يسري فيها التيّار الكلي (I)، وفرق الجُهد بين طرفيها (V_T)؛ فإنها تكافئ المقاومات الثلاث. **والمقاومة المكافئة Equivalent resistance** هي مقاومة واحدة تكافئ في عملها مجموعة من المقاومات الموصولة معًا على التوالي أو على التوازي.

بتعويض التيّار بدلالة فرق الجُهد؛ أحصل على العلاقة:

$$\frac{V_T}{R_{eq}} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = \frac{V_T}{R_1} + \frac{V_T}{R_2} + \frac{V_T}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

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 المقاومات على التوازي.

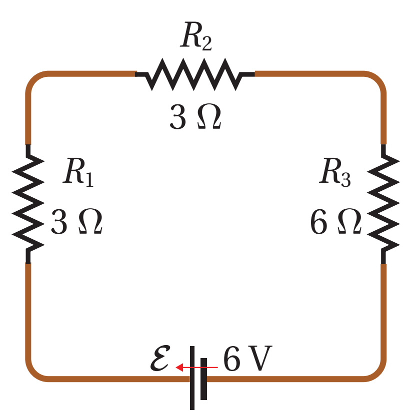
أُفكّر: عندما يكون لديّ مصباحان كهربائيّان متماثلان موصولان على التوازي مع بطارية مثالية. إذا فصلتُ أحـد المصباحين عـن البطّاريـة؛ أُوضّحُ ما يحدث لإضاءة المصباح الثاني، وأُبيّن السبب.

المثال 9

دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (18)، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، أحسب كُلًّا من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الذي يسري في الدارة.



الشكل (18): دارة كهربائية بسيطة تحتوي مقاومات موصولة على التوالي.

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 التوالي؛ لذا أستخدم العلاقة الآتية:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 + 3 + 6 = 12\ \Omega$$

ب) التيّار المار في الدارة:

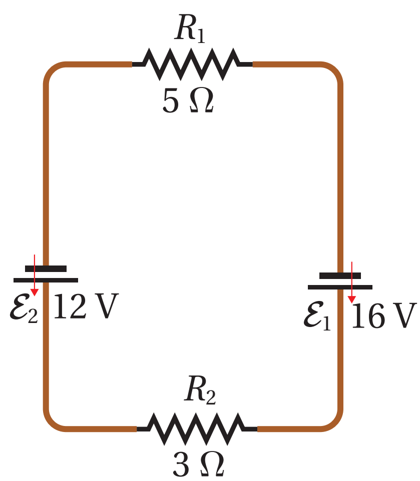
$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{12} = 0.5\ \text{A}$$

المثال 10

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.



الشكل (19): دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تحوي بطاريتين ومقاومتين.

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 دارةً كهربائيةً بسيطةً تتكون من عروة واحدة تحتوي على مقاومات وبطاريات عدة. أحدد اتجاه التيار (I) باتجاه القوة الدافعة الكهربائية للبطارية ذات القوة الدافعة الأكبر؛ 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:

$$V_1 = IR_1 = \frac{1}{2} \times 5 = 2.5\ \text{V}$$

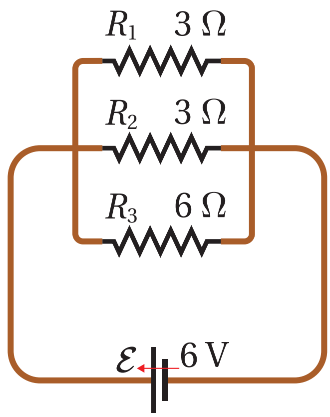
$$V_2 = IR_2 = \frac{1}{2} \times 3 = 1.5\ \text{V}$$

المثال 11

دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (20)، المقاومة الداخلية للبطارية مُهملةٌ، أحسب كلاً من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الكلي المارّ في الدارة.



الشكل (20): دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوازي.

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 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:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{1.2} = 5\ A$$

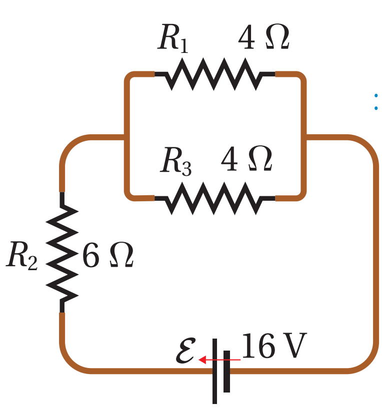
عند المقارنة بين نتيجة الحلّ في المثالين (9 و 10)؛ ألاحظُ الاختلافَ في قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث باختلاف طريقة توصيلها. وكذلك الاختلافَ في قيمة التيّار الكلي المارّ في كلٍّ من الدارتين.

المثال 12

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (21/ أ)، المقاومةُ الداخلية للبطارية مُهمَلة، أحسب كلّاً من:

أ) المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب) التيّار الكلي المارُّ في الدارة.



الشكل (21/أ): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوازي والتوالي.

المُعطيات: $R_1 = 4\ \Omega,\ R_2 = 6\ \Omega,\ R_3 = 4\ \Omega,\ \varepsilon = 16\ V$

المطلوب: $I = ?,\ R_{eq} = ?$

الحل:

أ) ألاحظ أن المقاومتين (R_1, R_3) موصولتان على التوازي.

أجدُ المقاومة المكافئة لهما، حيثُ سأرمز لها بالرمز (R_{13}).

$$\frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{4}$$

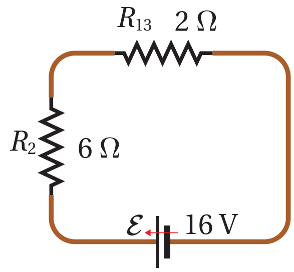
$$R_{13} = \frac{4}{2} = 2\ \Omega$$

يمكن إعادة رسم الدارة 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.

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{16}{8} = 2\ \text{A}$$

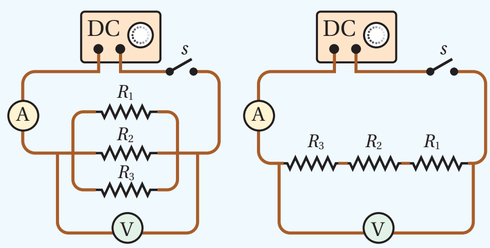


الشكل (21/ب): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوالي.

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 طويلةً 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 تمثّلُ إحدى صور مبدأ حفظ الشحنة؛ فكمّية الشحنة الداخلة باتّجاه نقطةٍ في دارةٍ كهربائيّة في مدة زمنية، تُساوي كمّية الشحنة المغادرة لها في المدة نفسها، ولا يمكن أن تتراكم 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».

$$\Sigma I = 0 \quad \rightarrow \quad \Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

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 13

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:

$$I_3 = ?$$

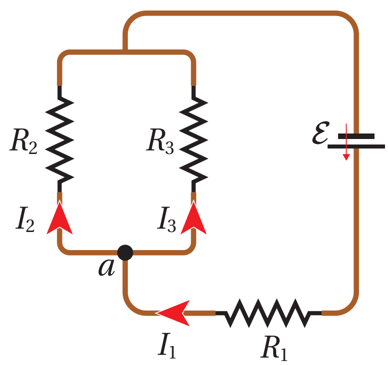
الحلّ:

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على نقطة التفرع (a):

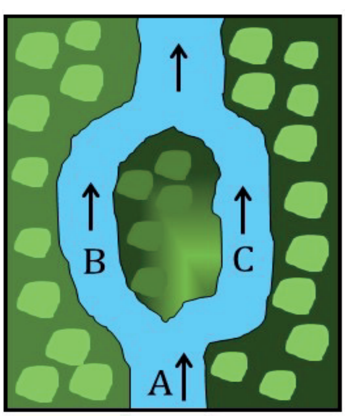
$$I_1 = I_2 + I_3 \rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 6.0 - 3.5 = 2.5\text{ A}$$

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، وتنصُّ **قاعدة كيرشوف الثانية** أنّ: «المجموع الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا».

$$V_a + \Sigma\Delta V = V_a$$

تحقق قاعدة كيرتشوف الثانية قانون حفظ الطاقة، حيث تقل طاقة الوضع الكهربائية للشحنة الافتراضية الموجبة عند انتقالها من جهد مرتفع إلى جهد منخفض عبر المقاومات، بينما تزداد طاقة الوضع لهذه الشحنة عند عبورها البطارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب، وعند حركة الشحنة من نقطة محددة والعودة إليها،يكون التغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة صفرا .

عند العودة الى نقطة البداية نفسها لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف؛ عليَّ أن أُحدّد تغيُّرات الجُهد خلال العروة. أتخيّلُ أنّني أنتقل خلال العروة لتتبع التغيُّرات في جهود مكوناتها باتّجاه حركةٍ مُحدّدٍ مسبقًا، مع مراعاة نظامَ إشاراتٍ موجبةٍ وسالبة، كما يأتي:

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).

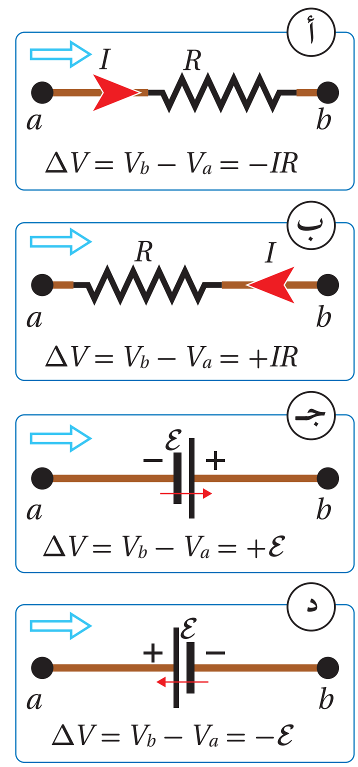
د). عند عبور بطاريّة من قُطبها الموجب إلى قُطبها السالب (عكس اتجاه قوتها الدافعة الكهربائيّة)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مُرتفعٍ إلى جُهد منخفض؛ لذا يقلُّ الجُهد $(\Delta V = -\varepsilon)$.كما في الشكل (23/ د).

يجري 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؟

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 (23): تحديد زيادة الجُهد أو نقصانه عند عبور مقاومةٍ أو بطاريّةٍ من اليسار إلى اليمين.

المثال 14

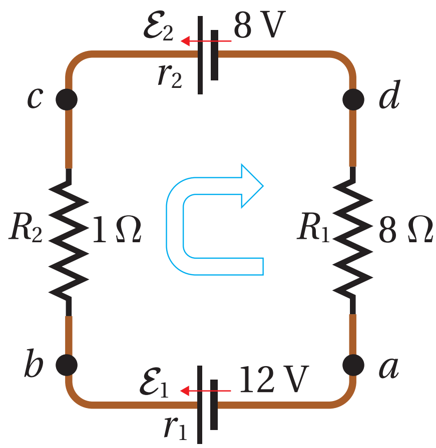
دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تتكوّن من بطاريتين ومقاومتين، كما في الشكل (24)، إذا كانت كلتا المقاومتين الداخليتين تساوي ($0.5\ \Omega$)، باستخدام القاعدة الثانية لكيرشوف؛ أجدُ قيمة التيّار وأحدّد اتّجاهه.

المعطيات:

بيانات الشكل ، $r_1 = 0.5\ \Omega,\ r_2 = 0.5\ \Omega$

المطلوب:

$I = ?$



الشكل (24): تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على عروةٍ واحدةٍ مقفلة.

الحلّ:

أفترض اتجاه التيّار في الدارة مع اتجاه عقارب الساعة (باتجاه القوة الدافعة الأكبر)، وافترض كذلك اتجاه عبور مكونات الدارة مع الاتجاه نفسه، وأبدأ العبور من النقطة (a) عبر المسار: $a \to b \to c \to d \to a$

$$V_a + \Sigma \Delta V = V_a$$

$$\Sigma \Delta V = V_a - V_a = 0$$

$$\varepsilon_1 - Ir_1 - IR_2 - \varepsilon_2 - Ir_2 - IR_1 = 0$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - I(r_1 + R_2 + r_2 + R_1) = 0$$

$$12 - 8 - I(0.5 + 1 + 0.5 + 8) = 0$$

$$I = \frac{4}{10} = 0.4\ \text{A}$$

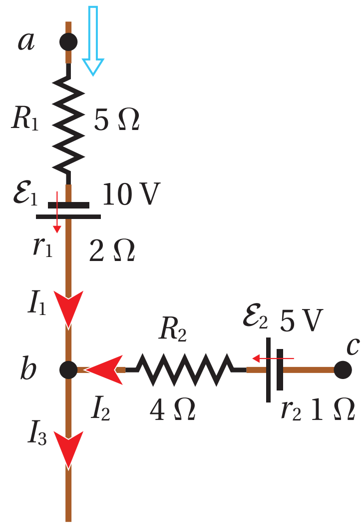
نلاحظ أن إشارة التيار موجبة، وهذا يعني أنه بالاتجاه المفروض؛ أي باتجاه عقارب الساعة.

تمرين

أعيدُ حلّ المثال (14) بافتراض أن اتجاه التيار بعكس اتجاه عقارب الساعة، واتجاه العبور مع عقارب الساعة؛ أي حسب المسار: $a \to b \to c \to d \to a$

المثال 15

جزءٌ من دارةٍ كهربائيّةٍ مُركّبة، كما في الشكل (25)، فيه ($I_1 = 3.0$ A)، ($I_3 = 4.5$ A). إذا علمتُ أنّ ($V_c = 9.0$ V)؛ أحسبُ جُهد النقطة (a).



الشكل (25): جزء من دارة كهربائيّة مركّبة.

المعطيات: بيانات الشكل، $I_3 = 4.5$ A, $V_c = 9.0$ V, $I_1 = 3.0$ A

المطلوب: $V_a = ?$

الحلّ:

أُطبّق القاعدة الأولى لكيرشوف لحساب التيّار (I_2).

$\Sigma I = 0 \rightarrow I_1 + I_2 = I_3$

$I_2 = I_3 - I_1 = 4.5 - 3.0 = 1.5$ A

أطبّق القاعدة الثانية لكيرشوف عند العبور من (a) إلى (c)، كما يأتي:

$V_a + \Sigma\, \Delta V = V_c$

$V_a - I_1R_1 + \varepsilon_1 - I_1r_1 + I_2R_2 - \varepsilon_2 + I_2r_2 = V_c$

$V_a - 3.0(5) + 10 - 3.0(2) + 1.5(4) - 5 + 1.5(1) = 9.0$

$V_a - 8.5 = 9.0$

$V_a = 17.5$ V

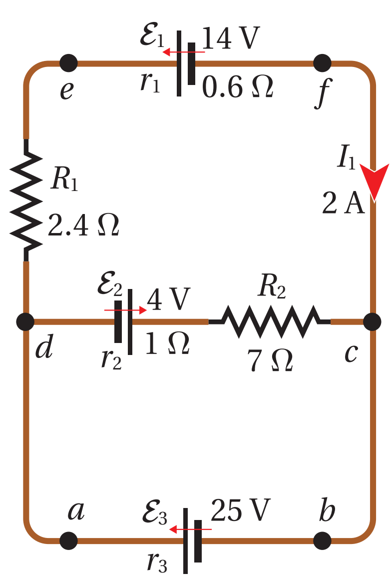
أستنتج أنّ جُهد النقطة (a) يزيد على جُهد النقطة (c) بمقدار (8.5 V).

المثال 16

تتكوّن دارة كهربائيّة مركّبة من مجموعة من البطاريات والمقاومات، كما في الشكل (26)، بالاعتماد على بيانات الشكل، أحسبُ:

أ) قِيَم باقي تيارات الدارة وأحدّد اتجاه كل تيّار.

ب) مقدار المقاومة الداخلية (r_3).



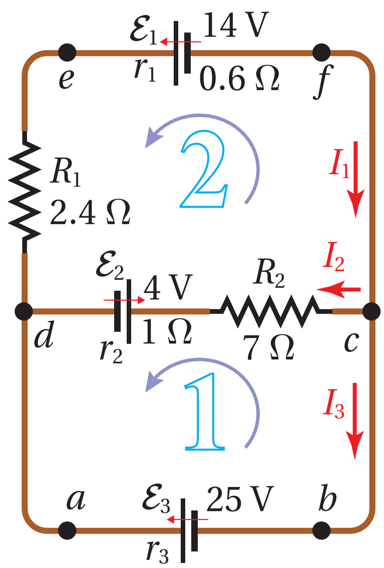
الشكل (26): دارة كهربائيّة مركّبة.

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:



الشكل (27): الاتجاه المفترض للتيارات، ولاتجاه العبور خلال مكوّنات العروتين 1 و 2.

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$2 = I_2 + I_3$$

توجد في الدارة ثلاث عُرًى، 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:

$$V_c + \Sigma\, \Delta V = V_c$$

$$+\varepsilon_1 + I_1 r_1 + I_1 R_1 + \varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_2 = 0$$

$$14 + (0.6)I_1 + (2.4)I_1 + 4 + (1)I_2 + (7)I_2 = 0$$

$$14 + (0.6 + 2.4) \times 2 + 4 + (8)I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{-24}{8} = -3\ \text{A}$$

من المعادلة الأولى أجدُ أنّ:

$$I_3 = I_1 - I_2 = 2 - (-3) = 5\ \text{A}$$

إشارة التيّار (I_3) موجبةٌ، ممّا يعني أنّه بالاتّجاه المُفترض، وإشـارة التيّار (I_2) سالبـة؛ أي أنّه بعكس الاتّجاه المفترض. مع ذلك؛ سأكمل الحل باستخدام القيمة السالبة المفترضة.

ب) لحساب المقاومة الداخلية (r_3)؛ أطبق القاعدة الثانية لكيرشوف على العروة الأولى $(abcda)$، سأعبرُها بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بدءًا من النقطة (a)، للحصول على:

$$V_a + \Sigma\, \Delta V = V_a$$

$$-\varepsilon_3 + I_3 r_3 - I_2 R_2 - \varepsilon_2 - I_2 r_2 = 0$$

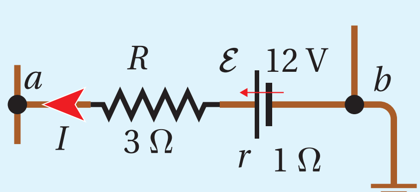
$$-25 + 5r_3 - (-3 \times 7) - 4 - (-3 \times 1) = 0$$

$$5\,(r_3) = +29 - 24 \rightarrow r_3 = 1\ \Omega$$

تمرين

أستخدم الأرقام: بالاعتماد على بيانات الشكل (28)، حيث $(I = 2\ \text{A})$ وجُهد النقطة (b) يساوي صفرًا، بسبب اتّصالها بالأرض. أجدُ جُهدَ النقطة (a).

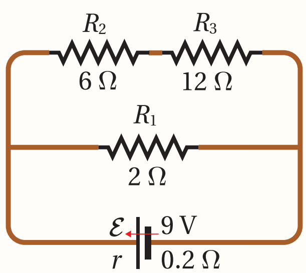
ملاحظة: تُعدُّ الأرض موصلًا ضخمًا يمكنه تفريغُ شحنة الأجسام المُتّصلة به؛ لذلك فإنّ أيّ جسمٍ يُوصَل بالأرض يصبح جُهده صفرًا.



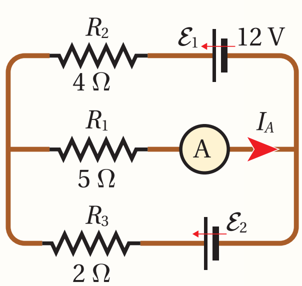
الشكل (28): فرق الجُهد بين نقطتين.

مراجعة الدرس

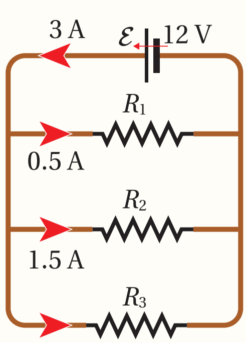
1. الفكرة الرئيسة:
   أ . أذكرُ نصّ قاعدتي كيرشوف، وما مبدأ الحفظ الذي تحقّقُه كلٌّ منهما؟
   ب. أقارنُ بين طريقتي توصيل المقاومات على التوالي وعلى التوازي من حيث؛ فرق الجُهد والتيار والمقاومة المكافئة.
2. أُبيّن طريقةَ توصيل المصباحين الأماميّين في السيارة مع البطّارية، إن كانت تواليًا أو توازيًا، مُفسّرًا أهمّية هذه الطريقة.
3. **أفسّرُ** لماذا يُعدّ فرق الجُهد بين طرفي المقاومة سالبًا عند عبورها باتّجاه التيّار المارِّ فيها.
4. **أستخدم الأرقام:** يُبيّن الشكل المجاور دارةً كهربائيّة تحتوي بطاريّةً ومقاومات، بالاعتماد على بيانات الشكل أحسبُ المقاومة المكافئة للدّارة، ثمّ مقدار التيّار فيها.



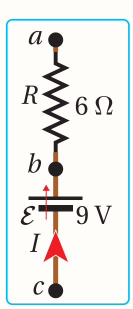
5. **أستخدم الأرقام:** إذا كانت قراءة الأميتر في الدارة المجاورة (2 A)، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات، أجدُ كُلًّا من:
   أ . مقدار واتجاه التيارين: (I_1) يمرُّ في (ε_1)، و (I_2) يمر في (ε_2).
   ب. مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة (ε_2).



6. **أستخدم الأرقام:** 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: ($V_c - V_a = 7\ \text{V}$) و ($V_b - V_a = 15\ \text{V}$)؛ أجد مقدار المقاومة الداخلية للبطارية.



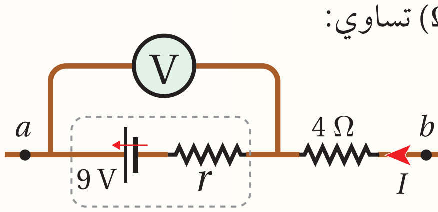
8. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

1. مجموعة من المقاومات عددها (n) ومقدار كل منها (R) وصلت جميعها على التوالي مع مصدر فرق جهد، ثم أعيد توصيلها على التوازي مع المصدر نفسه؛ فإن نسبة مقدار التيار الكُلّي في حالة التوازي (I_P) إليه في حالة التوالي (I_S) تكون كما يأتي:

أ . ($\frac{I_P}{I_S} = n^2$).   ب. ($\frac{I_P}{I_S} = n$).

جـ. ($\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{n}$)   د . ($\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{n^2}$).

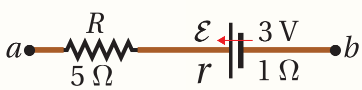
2. يبين الشكل المجاور جزءًا من دارة كهربائية، إذا كانت قراءة الفولتميتر (V) تساوي (7 V) وفرق الجهد ($V_b - V_a = 1\ V$)؛ فإن المقاومة الداخلية للبطارية بوحدة أوم (Ω) تساوي:



أ . (2.5)   ب. (2.0)

جـ. (1.5)   د . (1.0)

3. يبين الشكل جزءًا من دارة كهربائية، فيه ($V_a = 17\ V$) و ($V_b = 2\ V$). اعتمادًا على بيانات الشكل يكون التيار في البطارية:

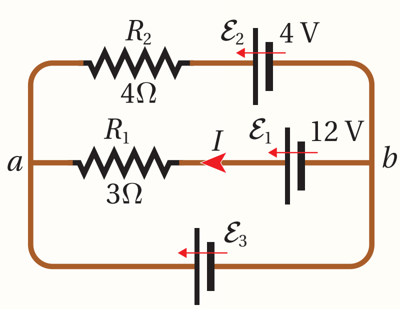


أ . من (b) إلى (a)، ويساوي (2 A)

ب . من (b) إلى (a)، ويساوي (3 A)

جـ. من (a) إلى (b)، ويساوي (2 A)

د . من (a) إلى (b)، ويساوي (3 A)



* إذا كان التيار الذي يسري في المقاومة (R_1) في الدارة المبيّنة في الشكل المجاور ($I = 2\ A$)، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات؛ أجيب عن الفقرتين الآتيتين:

4. مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ε_3) بوحدة فولت (V) يساوي:

أ . 6   ب. 8   جـ. 12   د. 18

5. مقدار التيار المار في المقاومة (R_2) بوحدة أمبير (A) واتجاهه:

أ . 0.5 ، من (b) إلى (a).   ب. 0.5 ، من (a) إلى (b).

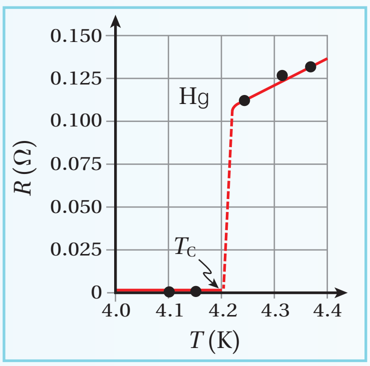
جـ. 2.5 ، من (1.5) إلى (a).   د . 2.5 ، من (a) إلى (b).

الإثراء والتوسّع

المواد فائقة التوصيل Superconductors

أغلب الفلزات تزداد مقاومتها بارتفاع درجة الحرارة، وتقل بانخفاضها، لكن هناك بعض الفلزات والمركبات التي تقل مقاومتها بشكل كبير بانخفاض درجة حرارتها، وعند درجات حرارة أقل من الدرجة الحرجة (T_c) Critical temperature؛ تصبح مقاومة المادة صفرًا وتوصف المادة بأنها فائقة التوصيل. تُعرّف درجة الحرارة الحرجة بأنها أعلى درجة حرارة تنتقل عندها المادة من حالتها الطبيعية إلى الحالة الفائقة التوصيل، وهي خصيصة مميزة للموصلات الفائقة.

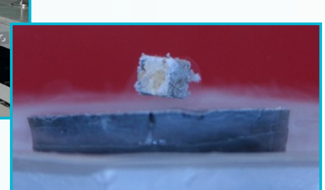
عند درجات حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة يمكن للتيار الكهربائي الذي يُولَد في هذه المواد أن يسري فيها لسنوات عدّة دون الحاجة إلى مصدر فرق جهد كهربائي؛ لأن مقاومتها للتيار تساوي صفرًا؛ حيث لا تضيع الطاقة الكهربائية على شكل طاقة حرارية. لكن فوق الدرجة الحرجة تزداد مقاومة هذه المواد بارتفاع درجة الحرارة، كما في الموصلات الفلزية الأخرى، كما هو موضح في الشكل المجاور؛ إذ يصبح فلزّ الزئبق (Hg) فائق التوصيل تحت الدرجة الحرجة، وهي ($T_c = 4.2$ K)، أما فوق هذه الدرجة، فيبين منحنى العلاقة بين مقاومة عيّنةٍ من الزئبق ودرجة الحرارة المطلقة زيادة المقاومة بارتفاع درجة الحرارة. وتوجد مواد أخرى، مثل الألمنيوم والقصدير والرصاص والإنديوم تتحول عند تبريدها إلى فائقة التوصيل، في حين أن موصلاتٍ جيّدةً للكهرباء مثل النحاس والذهب لا تتحول إلى مواد فائقة التوصيل عند تبريدها.



حاز العالمان السويسريان جورج بدرون وألِكس ميلر على جائزة نوبل في الفيزياء عام (1987)؛ لاكتشافهما مواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة أعلى مما كان معروفًا، ثم توالت الأبحاث للحصول درجات حرجة أعلى من ذلك، فالمُركب الذي يتكون من أكسيد الباريوم واللانثينيوم والنحاس يصبح فائق التوصيل دون الدرجة ($T_c = 92$ K)، وتوجد مركبات أخرى فائقة التوصيل عند الدرجة ($T_c = 134$ K). ويأمل الباحثون التوصل إلى مواد تكون فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة.

تستخدم المواد فائقة التوصيل في تطبيقات تكنولوجية عدّة، يرتكز أهمها على توليد مجالات مغناطيسية قوية جدًا، تفوق تلك التي تولدها المغانط الكهربائية العادية بعشر مرات، مثل تلك المستخدمة في أجهزة الرنين المغناطيسي وفي مسارعات الجسيمات. كما يظهر في الشكل مغناطيس صغير يرتفع فوق قرص من مادة فائقة التوصيل مُبرّدٍ إلى ما دون الدرجة الحرجة باستخدام النيتروجين السائل، عند وضع المغناطيس فوق القرص؛ يتولد في القرص تيار حثي (ستتعرفه في الوحدة الدراسية القادمة)؛ فينشأ عنه مجال مغناطيسي معاكس لمجال المغناطيس ومساوٍ له في المقدار يعمل على رفع المغناطيس في الهواء.

اعتمادًا على هذه الظاهرة؛ طوّرت قطارات عالية السرعة (600 km/h) تطفو على سكة تحتوي مغانط من مواد قوية فائقة التوصيل؛ للتغلب على قوى الاحتكاك التي تنشأ عادةً بين القطار وسكة الحديد.



كما أن هناك أملٌ لدى العلماء بصناعة خطوط نقل الكهرباء من مواد فائقة التوصيل (حال التوصل إليها عند درجات الحرارة العادية) لنقل الكهرباء بصورة مثالية دون أي ضياع للطاقة.

مراجعة الوحدة

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

1. تتصف المقاومية بإحدى الصفات الآتية:

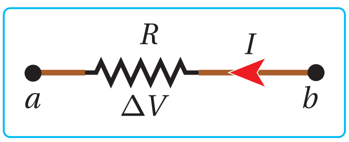
أ . تزدادُ بزيادة طول الموصل وبزيادة مساحة مَقطعِه.

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:



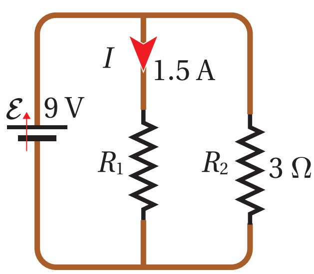
أ . (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يزداد التيّار (I).

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:



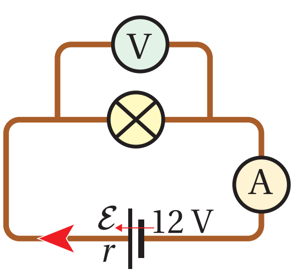
أ. 1 Ω

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:



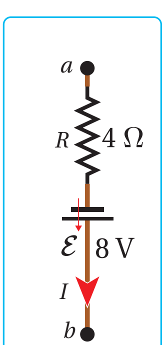
أ. 1.0 Ω

ب. 1.5 Ω

جـ. 2.0 Ω

د . 2.5 Ω

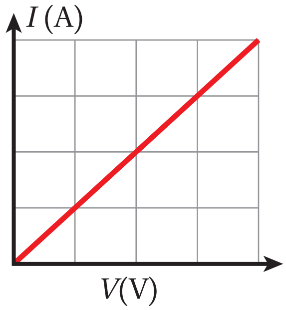
5. إذا كان التيّار الكهربائيّ في الشكل يساوي (1.2 A)، فإنّ فرق الجُهد ($\Delta V = V_b - V_a$) يساوي:



أ. 3.2 V ب. 4.0 V

جـ. 4.2 V د . 4.8 V

6. يمثل الشكل المجاور العلاقة بين فرق الجهد بين طرفي سلك نحاسي طوله (l)، ومساحة مقطعه (A)، وبين التيار الذي يسري فيه عند درجة حرارة ثابتة. يزداد ميل الخط المستقيم بزيادة إحدى الكميات الآتية:



أ. طول السلك   ب. درجة حرارة السلك

جـ. مساحة مقطع السلك   د. فرق الجهد بين طرفي السلك

7. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (1.5 V)؛ الشغل الذي تبذله بوحدة جول (J) لنقل شحنة (1.6×10^{-19} C) من القطب السالب إلى القطب الموجب داخل البطارية يساوي:

أ. 1.6×10^{-19} ب. 2.4×10^{-19}

جـ. 1.6×10^{19} د. 2.4×10^{19}

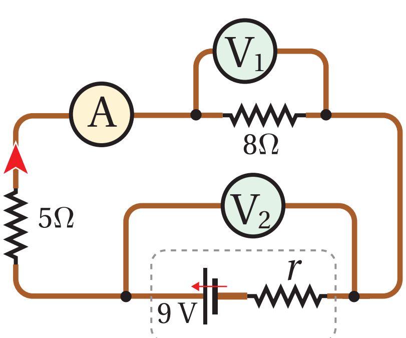
8. سلكان رفيعان متساويان في مساحة المقطع؛ الأول من النيكروم والثاني من التنغستن، إذا تساوت مقاومة السلكين عند درجة الحرارة (20° C)؛ فما نسبة طول سلك التنغستن (L_T) إلى طول سلك النيكروم (L_N)؟

أ. 150   ب. 37.3   جـ. 26.8   د. 5.6

9. وصلت بطارية مع مصباح مقاومته (2 Ω) فسرى فيه تيار كهربائي (0.4 A)، وعند توصيل البطارية نفسها مع مصباح مقاومته (5 Ω) سرى فيه تيار (0.2 A)؛ فإن المقاومة الداخلية للبطارية بوحدة أوم (Ω) تساوي:

أ. (2.0)   ب. (1.0)   جـ. (0.5)   د. (0.2)

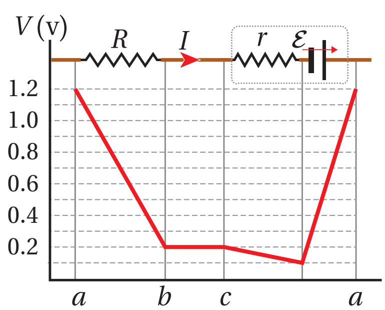
10. يبين الشكل المجاور دارةً كهربائيةً بسيطةً، معتمدًا على بيانات الشكل المجاور، وإذا كانت قراءة الأميتر (A) تساوي (0.6 A)؛ فإن قراءتي جهازي الفولتميتر (V_1) و(V_2) تكونان كما يأتي:



أ. ($V_1 = 4.8$)، ($V_2 = 7.8$)   ب. ($V_1 = 7.8$)، ($V_2 = 4.8$)

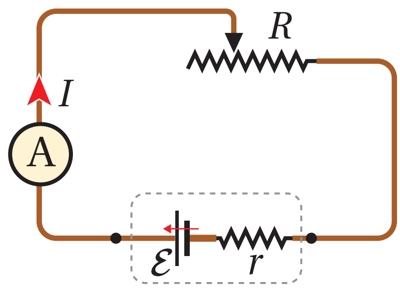
جـ. ($V_1 = 4.2$)، ($V_2 = 1.2$)   د. ($V_1 = 1.2$)، ($V_2 = 4.2$)

11. مُثّلت تغيرات الجهد في دارة كهربائية بيانيًا، كما في الشكل المجاور. بالاعتماد على البيانات، وإذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية (0.4 Ω)، فإن المقاومة (R) والتيار الذي يسري فيها (I) يساويان:



أ. (250 mA, 3 Ω)   ب. (500 mA, 300 mΩ)

جـ. (250 mA, 4 Ω)   د. (500 mA, 400 mΩ)



12. بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (ε) ومقاومتها الداخلية (r) وُصلت مع مقاومة متغيّرة (R)، كما في الشكل المجاور. عندما كانت المقاومة المتغيرة ($R = r$) كانت القدرة المستهلكة فيها (12 W). كم تصبح القدرة المستهلكة في (R) عندما تصبح قيمتها ($R = 3r$)؟

أ. 3 W   ب. 4 W   جـ. 9 W   د. 16 W

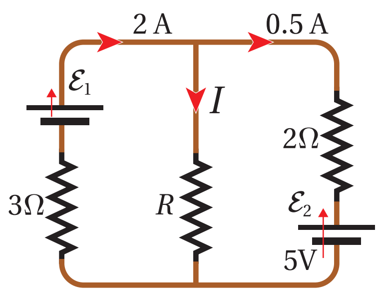
13. درجة الحرارة الحرجة خصيصة مميزة للموصلات الفائقة، حيث تتميّز هذه الدرجة بأن المادة:

أ. عند هذه الدرجة وفوقها تصبح فائقة التوصيل.

ب. عند هذه الدرجة وفوقها تصبح مادة عازلة للكهرباء.

جـ. عند هذه الدرجة وتحتها تصبح فائقة التوصيل.

د. تحت هذه الدرجة تزداد مقاومة المادة للتيار الكهربائي.



* يبين الشكل المجاور دارة كهربائية مركبة. اعتمادًا على بيانات الشكل، وبإهمال المقاومتين الداخليتين للبطاريتين؛ أجيب عن الفقرتين الآتيتين:

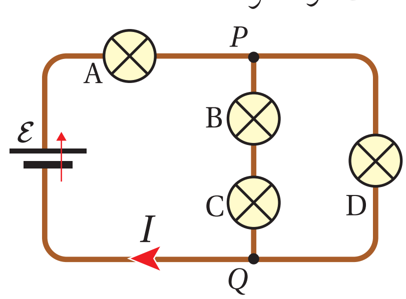
14. مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ε_1) بوحدة فولت (V) يساوي:

أ. 4   ب. 8   جـ. 12   د. 18

15. المقاومة (R) بوحدة أوم (Ω) تساوي:

أ. 1   ب. 2   جـ. 3   د. 4

2. أستخدم الأرقام: 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. أستخدم الأرقام: في الدارة المبينة في الشكل المجاور تتصل أربعة مصابيح متماثلة مع بطارية فرق الجهد بين قطبيها (12 V)، إذا علمت أن فرق الجهد بين طرفي المصباح (A) يساوي (4.8 V)، أحسب فرق الجهد بين طرفي كل مصباح من المصابيح الأخرى (B, C, D).

4. مصدر فرق جهد كهربائي قدرته (500 W) وفرق الجهد بين طرفيه (200 V)، وُصّل معه جهاز كهربائي مقاومته ($76\ \Omega$)، واستخدمت في التوصيل أسلاك من النحاس طولها (400 m). إذا كانت درجة حرارة الأسلاك ($20°\ C$)؛ فما مقدار أقل مساحة مقطع لهذه الأسلاك، بحيث تصل إلى الجهاز قدرة كهربائية تساوي (95%) من قدرة المصدر؟

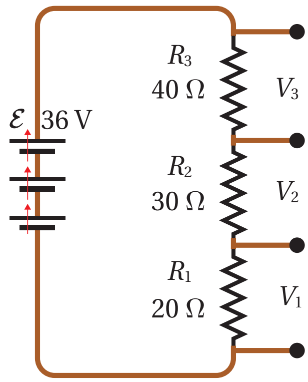
5. أستخدم الأرقام: فرنٌ كهربائيٌّ يعمل على جُهد (240 V)؛ مقاومة عنصر التسخين فيه (30 Ω). إذا عمل مدّة (48 min) لطهي الطعام؛ أحسب ما يأتي:

أ . التيّار الكهربائيّ الذي يسري في عنصر التسخين.

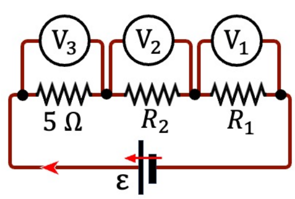
ب. القدرة الكهربائيّة للفرن.

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)؟



6. أستخدم الأرقام: للحصول على فرق جُهد مناسب من بطاريّةٍ ذات فرق جُهدٍ كبيرٍ، تُستخدم دارة مُجزّء الجهد؛ إذ توصل مع البطارية مجموعة مقاوماتٍ كما في الشكل المجاور، ما مقدار فرق الجُهد بين طرفي كل مقاومة من المقاومات الثلاث؟



7. أستخدم الأرقام: يبين الشكل المجاور دارة كهربائية لتجزئة الجهد، تحتوي بطاريةً مثاليةً قوتها الدافعة الكهربائية (10 V). إذا علمتُ أن قراءة جهازي الفولتميتر $(V_1 = 2.4\text{ V})$ و $(V_2 = 3.6\text{ V})$، أجيب عن السؤالين الآتيين:

أ. ما مقدار كل من المقاومتين (R_1) و (R_2)؟

ب. إذا كانت البطارية غير مثالية ومقاومتها الداخلية (1.78 Ω)، فكم تصبح قراءة أجهزة الفولتميتر الثلاثة؟

8. أستخدم الأرقام: سيارةٌ كهربائيّةٌ موصولةٌ مع شاحنٍ قدرته (62.5 kW) بسلك 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. أستنتج: أرغب بتصميم مدفأةٍ كهربائيةٍ بسيطة قدرتُها (1000 W) تعمل على جُهد (240 V)، وعنصر التسخين فيها سلكٌ من مادة النيكروم. ما المواصفات الهندسية للسلك؟

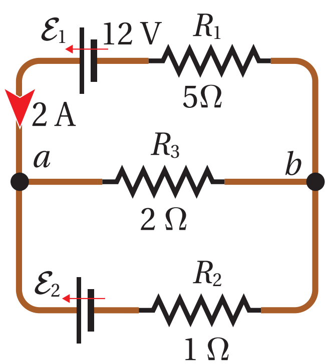
10. أقارن: عند توصيل ثلاثة مصابيح متماثلةٍ، مقاومة كلٍّ منها (R) مع بطاريّةٍ قوّتُها الدافعةُ الكهربائيّة (12 V) ومقاومتها الداخلية مُهملةٌ؛ ما نسبة القدرة المنتجة في البطّارية في الحالتين؛ المصابيح موصولة على التوالي/ التوازي؟

11. أستخدم الأرقام: سلكٌ من فلزّ التنغستون طولُه (5.0 m) ومساحة مَقطَعِه ($0.7\ mm^2$). ما مقدار التيّار المارّ فيه عند توصيل طرفيه مع مصدر جُهد (1.5 V)؟

12. أستخدم الأرقام: أحسب تكلفة تشغيل مدفأةٍ قدرتُها (2800 W) مُدّة (90) ساعة، إذا كان سعر وحدة الطاقة (0.15 JD/kWh).

13. أقارن: مصباحان يتصلان بمصدري جُهد متماثلين؛ قدرة المصباح الأول تساوي ثلاثة أمثال قدرة المصباح الثاني. أجد نسبة تيّار الأول إلى تيّار الثاني، ونسبة مقاومة الأول إلى مقاومة الثاني.

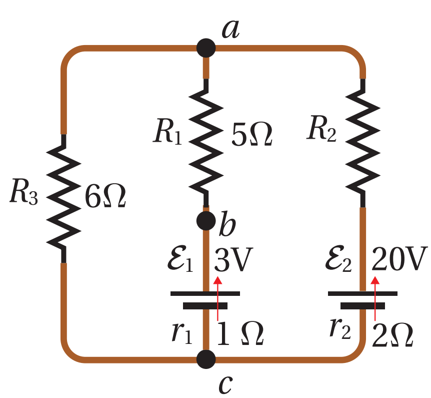
14. بطاريةٌ قوّتها الدافعة الكهربائيّة (9 V)، ومقاومتُها الداخلية (0.3 Ω). ما مقدار المقاومة التي توصل مع البطّارية حتى تكون القدرة المستهلكة في البطّارية (2.7 W)؟



15. أستخدم الأرقام: في الدارة الكهربائيّة المبينة في الشكل المجاور؛ أحسب ما يأتي:

أ . التيّار المار في المقاومة (R_3).

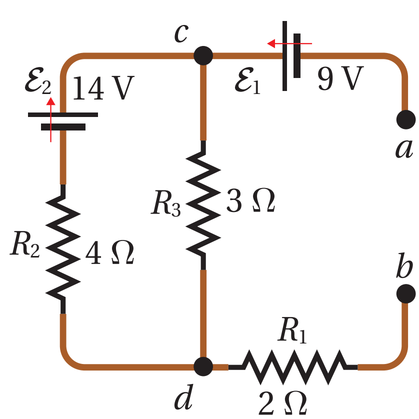
ب. مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة للبطارية (ε_2).



16. أستخدم الأرقام: يبيّنُ الشكل دارةً كهربائيّةً مُركّبة، إذا علمت أنّ ($V_b - V_c = 4\ V$)؛ أحسبُ كلًا من:

أ . التيّارات الفرعية في الدارة.

ب. المقاومة المجهولة (R_2).



17. تفكير ناقد: بالاعتماد على بيانات الشكل المجاور؛ أحسبُ فرق الجُهد $V_b - V_a$، عندما ينعدم التيّار في (R_3)، ثمّ أُحدّد أيَّ النقطتين أعلى جُهدًا.

مسرد المصطلحات

- **إزاحة زاويّة Angular Displacement:** 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.
- **تدفّق كهربائيّ Electric Flux:** خطوط المجال الكهربائيّ التي تعبر مساحة محدّدة، ويحسب بإيجاد ناتج الضرب النقطي لمتجه المجال في متجه المساحة
- **تسارع زاويّ متوسّط Average Angular Acceleration:** 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.
- **دفع Impulse:** كمية متجهة تساوي ناتجُ ضربِ القوّة المُحصّلة المؤثّرة في الجسم في زمن تأثيرِها، ويُقاس بوحدة (N.s) حسب النظام الدولي للوحدات، ويكون اتّجاهه باتّجاه تغير الزخَم الخطّي، أي باتّجاه القوّة المُحصّلة.
- **ذراع القوة Lever Arm:** البُعد العموديُّ بين خطّ عمل القوة ومحور الدوران.
- **زخَم خطّي Linear Momentum:** كميّةٌ متجهةٌ تساوي ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته المتجهة ($\boldsymbol{v}$).
- **زخَم زاويّ Angular Momentum:** كمية متجهة تساوي ناتج ضربِ عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاويّة. ويكون اتّجاهه عموديًا على مستوى الدوران.
- **سرعة زاويّة متوسّطة Average Angular Velocity:** نسبة الإزاحة الزاويّة ($\Delta\theta$) إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة.

- **سطح تساوي الجهد Equipotential Surface:** السطح الذي يكون الجهد الكهربائيّ عند نقاطه جميعها متساويًا.

- **عزم Torque:** مقياس لمقدرة القوّة على إحداث دورانٍ لجسم، وهو كمّية مُتّجهة، رمزه (τ)، ويساوي ناتج الضرب المُتّجهيّ لمُتّجه القوة (F) ومُتّجه موقع نقطة تأثير القوة (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.

- **فاراد Farad:** مواسعة مواسع يختزن شحنة كهربائيّة (1C) عند تطبيق فرق جهد (1V) بين صفيحتيه.

- **قاعدة كيرشوف الأولى Kirchhoff's First Rule:** "المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا".

- **قاعدة كيرشوف الثانية Kirchhoff's Second Rule:** المجموع الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا.

- **قانون أوم Ohm's Law:** 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:** "عندما يتفاعلُ جسمانِ أو أكثر في نظامٍ معزولٍ، يبقى الزخَم الخطّي الكليُّ للنظام ثابتًا". يشمل هذا التفاعل تصادم جسمين أو انقسام جسم إلى أجزاء.

- **قانون حفظ الزخَم الزاويّ Law of Conservation of Angular Momentum:** "الزخَم الزاويّ لنظامٍ معزولٍ يبقى ثابتًا في المقدار والاتّجاه"، إذ يكونُ العزم المحصّل المؤثّر في النظام المعزول صفرًا.

- **قانون غاوس Gauss's Law:** التدفّق الكهربائيّ الكلّي عبر سطح مغلق، يساوي مجموع الشحنات الكلّية داخل السطح مقسومًا على سماحية الفراغ.

- **قدرة كهربائية Electrical Power:** 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.

- **كثافة سطحية للشحنة Surface Charge Density:** ناتج قسمة الشحنة الكلّية للجسم على مساحة سطحه.
- **مبرهنة (الزخَم الخطّي- الدفع) Impulse – Momentum Theorem:** "دفعُ قوة محصّلةٍ مُؤثّرةٍ في جسمٍ يساوي التغيُّر في زخَمه الخطّي".
- **مجال كهربائيّ منتظم Uniform Electric Field:** مجال ثابت في مقداره واتّجاهه عند نقاطه جميعها.
- **مركز الكتلة Centre of Mass:** النقطة التي يُمكن افتراض كتلة الجسم كاملةً مُركّزةً فيها.
- **مقاومة كهربائية Electric Resistance:** نسبةُ فرق الجُهد بين طرفي أي جزء في الدارة الكهربائية إلى التيّار المارّ فيه.
- **مقاومة مكافئة Equivalent Resistance:** المقاومة الكلية التي تكافئ في مقدارها مجموعة مقاومات موصولة معًا على التوالي أو التوازي.
- **مقاومية المادة Resistivity:** مقاومةُ عيّنةٍ من المادة مساحة مقطَعِها ($1\ m^2$)، وطولها ($1\ m$) عند درجة حرارة معينة.
- **مواد لا أوميّة Non-ohmic Materials:** مواد تتغيّر مقاومَتها مع تغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها، حتى عند ثبات درجة الحرارة.
- **مواسع Capacitor:** جهاز يُستعمل لتخزين الطاقة الكهربائيّة.
- **مواسع ذو صفيحتين متوازيتين Parallel Plate Capacitor:** مواسع يتكوّن من صفيحتين موصلتين متوازيتين متقابلتين ومتساويتين في المساحة، تفصلهما مادّة عازلة.
- **مواسعة Capacitance :** الشحنة الكهربائيّة المختزنة لوحدة فرق الجهد الكهربائيّ.
- **مواسعة مكافئة Equivalent Capacitance :** المواسعة الكلّية لمجموعة مواسعات تتّصل معًا في دارة كهربائيّة
- **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.

Collins