الفيزياء

كتاب الطالب

الصف الثاني عشر

قائمة المحتويات

الوَحدة الأولى: الزخَمُ الخطيُّ والتصادُمات Linear Momentum and Collisions

أتأمّل الصورة

إطلاقُ مكّوكٍ فضائيّ

يظهرُ في الصورة إطلاق مكّوكٍ فضائيّ، حيث يندفعُ الوَقود المُحترق من الصاروخ إلى أسفل؛ بينما يندفع المكّوك الفضائي والصاروخ إلى أعلى بتسارع.

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

الفكرة العامة:

لمفهوم الزخَم الخطيّ 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 الخطيُّ والدفع

Linear Momentum and Impulse

الفكرة الرئيسة: ترتبط مفاهيمُ الدفع والقوّة والزخَم الخطيُّ بعلاقاتٍ رياضيّةٍ؛ وللصيغة العامّة للقانون الثاني لنيوتن، والدفع، وحفظ الزخَم الخطيِّ أهميةٌ كبيرة في حياتنا اليومية.

الدرس الثاني: التصادُمات

Collisions

الفكرة الرئيسة: تحدث التصادُمات في بُعدٍ واحد، أو بُعدينِ، أو ثلاثةِ أبعادٍ. وللتصادُمات نوعانِ رئيسانِ؛ تُساعد معرفتُهما في تصميم أجهزةٍ وأدواتٍ عدّةٍ يعتمد مبدأُ عملِها على هذه التصادُمات والحمايةِ منها.

www.shutterstock.com · 576420058

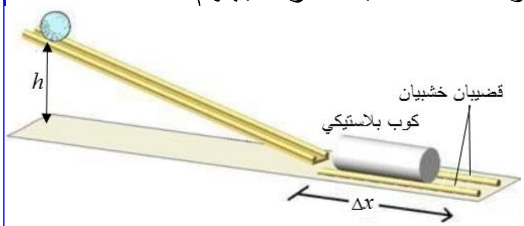
www.shutterstock.com · 1089754823

نختار إحدى الصورتين بحسب الدقة والحجم

تجربةٌ استهلالية: تأثيرُ كتلةِ الجسمِ وسرعتهِ في التصادُمات

الموادّ والأدوات: كرتان زجاجيّتان أو فلزّيتان متماثلتان، كرةُ تنس، سطحان خشبيّان مستوِيان أملَسان في كلٍّ منهما مَجرى، حامّلان فلزّيان، كوبٌ بلاستيكيٌّ، قضيبانِ خشبيّان طولُ كلٍّ منهُما (30 cm) تقريبًا، مَسطرةٌ مِتريّة، شريطٌ لاصق. (تعديل شكل الكوب حتى لا يبدو اسطوانة)

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 أحد السطحين الخشبيين على سطح الطاولة، ثم أرفعُ أحد طرفيه بالحامل الفلزيِّ ليصبح مستوًى مائلٍ، ثم أُثبّت قطعة شريط لاصق عليه عند ارتفاع محدّدٍ. بعدها؛ أُثبّتُ القضيبين الخشبيّين بشكل متوازٍ على بُعدٍ محدّد من نهاية المستوى المائل لتشكّلَ مجرًى للكوب البلاستيكي، وأضع الكوب بينهما، بحيث تكون فوّهتُه مقابلةً للمستوى المائل، كما هو موضح في **الشكل.**
2. **أقيس:** أضعُ الكرةَ الزجاجية على المستوى المائل عند الشريط اللاصق، ثم أُفلِتُها، وأقيس المسافة التي تحرّكها الكوبُ بعد اصطدام الكرة به، وأُدوّنها.
3. أكرّر الخطوةَ السابقة باستخدامِ كرة التنس.
4. **ألاحظُ:** أضعُ الكرتين الزجاجيتين على سطح الطاولةِ، ثم أُدحرجُ إحداهما باتّجاه الأخرى، وأُلاحظ اتّجاه حركةِ كلٍّ منهما بعد تصادمُهما معًا.
5. أضع الكرةَ الزجاجية وكرة التنس على سطح الطاولة، ثم أُدحرجُ الكرة الزجاجية باتّجاه كرة التنس، وأُلاحظ اتّجاه حركة كل منهما بعد تصادُمهما معًا.
6. أُكرّر الخطوةَ السابقة، على أن تبقى الكرةُ الزجاجية ساكنةً، وأُدحرجُ كرة التنس نحوها، وأُلاحظ اتّجاه حركة كل منهما بعد تصادُمهما معًا.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُقارنُ** بين المسافة التي تحرّكها الكوبُ البلاستيكي في الخطوتين (3،2). ماذا أستنتج؟ أُفسّر إجابتي.
2. **أستنتجُ:** استنادًا إلى ملاحظاتي في الخطوات 4–6؛ ما العوامل التي تؤثر في سرعة كل من الكرتين بعد تصادمهما؟
3. **أستنتجُ:** استنادًا إلى ملاحظاتي في الخطوات 4–6، ما العواملُ التي تحدّدُ اتّجاه حركة كلٍّ من الكرتين بعد تصادمهما؟ أُفسّر إجابتي.

Linear Momentum and Impulse

الفكرة الرئيسة:

ترتبط مفاهيمُ الدفع والقوّة والزخَم الخطيّ بعلاقاتٍ رياضيّة، وللصّيغة العامّة للقانونِ الثاني لنيوتن، والدفع، وحفظ الزخَم الخطيّ أهميةٌ كبيرة في حياتنا اليومية.

نتاجات التعلُّم:

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

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الزخَم الخطيّ Linear Momentum

الدفع Impulse

مبرهنة (الزخَم الخطيّ– الدفع)

Impulse – Momentum Theorem

قانون حفظ الزخَم الخطيّ

Law of Conservation of Linear Momentum

الزخَم الخطيّ Linear Momentum

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

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

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

والزخَم الخطيُّ كميةٌ متجهة، له اتّجاه السرعة نفسه. وأُلاحظُ من هذه المعادلةِ أن الزخَم الخطيَّ لجسم يزدادُ بزيادة مقدار سرعته أو كتلته أو كليهما؛ فيزدادُ تبعًا لذلك مقدارُ القوّة اللازم التأثير بها في الجسم لتغيير حالته الحركية. فمثلًا؛ الزخَم الخطيّ للشاحنة الموضّحة في **الشكل (1)** أكبرُ منهُ للسيارة عند حركتهما بمقدار السرعة نفسهِ، لذا؛ فإن مقدار القوّة اللازم لإيقاف الشاحنة أو تغيير حالتها الحركية أكبرُ منه للسيارة. ولاحظتُ في أثناء تنفيذي التجربة الاستهلالية أن تأثيرَ جسم في جسم آخر عند تصادُمهما يعتمد على كتلتيهما وسرعتيهما المتجهة؛ أي يعتمد على الزخَم الخطيّ. إذن؛ الزخَم الخطيّ مقياسٌ لمُمانعة الجسمِ لتغيير حالته الحركية.

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

أتحقّقُ: ما المقصودُ بالزخَم الخطيّ؟

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

يلزمُ قوةً لتغيير مقدار الزخَم الخطيّ أو اتّجاهه أو كليهما. ويُستخدم القانون الثاني لنيوتن في الحركة للربط بين الزخَمِ الخطيّ للجسم والقوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه، علمًا أنّ نيوتن صاغ قانونهُ الثاني بدلالة الزخَم كما يأتي:

أُفكِّرُ

هل يُمكن أن يكون مقدار الزخم الخطي لسيارة مساويًا مقدار الزخم الخطي لشاحنة كبيرة كتلتها أربعة أضعاف كتلة السيارة؟ أناقش أفراد مجموعتي، وأستخدم مصادر المعرفة المُتاحة للتوصل الى اجابة عن السؤال.

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

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 الخطيّ $(\Delta \boldsymbol{p})$ خلال فترة زمنية معينة (Δt)؛ يُمكنُ إعادة كتابة العلاقة السابقة في الصورة الآتية:

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

وينصُّ القانون الثاني لنيوتن في الحركة بحسب هذه الصيغة على أنّ: "المعدل الزمنيَّ لتغيُّر الزخَم الخطيّ لجسم يساوي القوّة المُحصّلة المؤثّرة فيه". ويكون مُتّجه التغيُّر في الزخَم الخطيّ باتّجاه القوّة المُحصّلة دائمًا.

أتحقّق: ما العلاقة بين القوّة المُحصّلة المؤثّرة في جسمٍ ومعدّل تغيُّر زخَمه الخطيّ؟

العلاقة بين الزخَم الخطيّ والدفع Relationship between Linear Momentum and Impulse

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

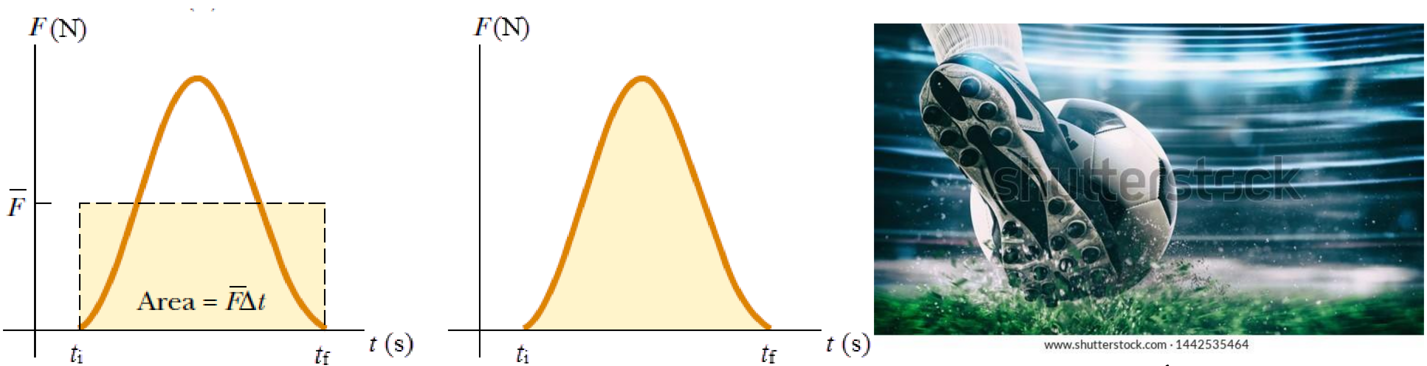
$$\mathbf{I} = \sum \boldsymbol{F}\,\Delta t$$

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

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

تسمّى هذه المعادلة **مبرهنةَ (الزخَم الخطيّ– الدفع) Impulse – momentum theorem**، وتنصُّ أنَّ: "دفعُ

قوة محصّلةٍ مؤثّرةٍ في جسمٍ يساوي التغيُّر في زخَمه الخطيّ".



(ج) (ب) (أ)

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

والدفعُ كميّةٌ متّجهة، يكون باتّجاه تغيُّر الزخَم الخطيّ، وهو اتّجاه القوّة المُحصّلة نفسه. وبما أن الزخَم الخطيَّ والدفع والقوّة كميّاتٌ مُتّجهة فإنّ الإشاراتِ الموجبةَ والسالبة ضروريةٌ لتحديد اتّجاهاتها، لذا؛ يلزمُ اختيارُ نظام إحداثيّاتٍ يُحدّد فيه الاتّجاه المُوجِب.

يبيّنُ **الشكل (2/أ)** قدمَ لاعبٍ يركُل كرةَ قدمٍ؛ فيتغيّرُ زخَمُها الخطيُّ بسبب قوّته المؤثّرة فيها. بينما يُوضّح **الشكل (2/ب)** كيفيّة تغيُّر مقدارِ تلك القوّة مع الزمن أثناء مُلامَسةِ قدم اللاعب للكرة لفترةٍ زمنيّةٍ (Δt). يُحسَبُ مقدارُ الدفعِ المُؤثّر في الكرةِ عن طريق إيجاد المساحة تحت منحنى (القوّة – الزمن) المُوضّح في **الشكل (2/ب)**، أو باستخدام مقدارِ القوّة المُتوسّطةِ مضروبًا في زمن تأثيرها، كما في **الشكل (2/ج)**. والقوّة المتوسّطةُ هي القوّة المُحصّلة الثابتة التي إذا أثرت في الجسم لفترةٍ زمنيّةٍ (Δt) لأحدثت الدفع نفسَهُ الذي تحدثُهُ القوّةُ المُتغيّرة أثناء الفترةِ الزمنيّة نفسِها.

الربط مع التكنولوجيا

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

وأستخدم مُبَرهنة (الزخَم الخطيّ – الدفع) في توضيح نقطتين مهمتين:

1. عند ثبات مقدار القوّة المُحصّلة المؤثّرة، يزدادُ مقدارُ التغيُّر في الزخَم الخطيّ بزيادة زمن تأثير هذه القوّة. فمثلًا؛ عند دفعِ عربةِ تسوّقٍ بقوةٍ ثابتةٍ، يزدادُ زخَمُها الخطيُّ بزيادة زمن تأثير القوّة فيها. أنظر **الشكل (3/أ)**. وعند ركل لاعب كُرة قدمٍ يزدادُ زخَمُها الخطيّ بزيادة زمن تلامُسِها مع قدمه.

(ب) (أ)

الشكل (3): (أ) يزدادُ مقدار التغيُّر في زخَم العربة بزيادة زمن تأثير القوّة فيها. (ب) يَثني المظليُّ رجليهِ لحظة ملامسة قدميه سطحَ الأرض لزيادة زمن التغيُّر في زخَمه.

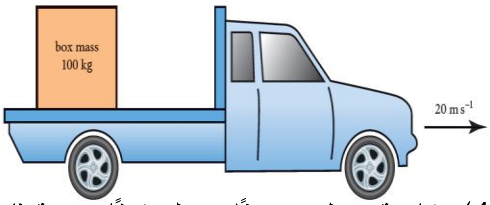
Cart: Item ID: 90589414

2. عند ثبات مقدار التغيُّر في الزخَم الخطيّ، يتناسبُ مقدار القوّة المُحصّلة المؤثّرة عكسيًّا مع زمن تأثيرها. فمثلًا؛ يثني المظليُّ رجليه لحظة ملامسة قدميه سطح الأرض، وهذا يجعلُ تغيّر زخَمه الخطيّ 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.

أتحقق: ما العلاقةُ بين القوّة المُحصّلة المؤثّرة في جسمٍ ومعدّلُ تغيُّر زخَمه الخطيّ؟

المثال 1

وضعُ صندوقٍ كتلتُهُ $(100\ \text{kg})$ في شاحنةٍ تتحرّك شرقًا بسرعة مقدارها $(20\ \text{m/s})$، كما هو مُوضّحٌ في **الشكل (4)**. إذا ضغط السائقُ على دَوّاسةِ المكابح، فتوقّفت الشاحنةُ خلال $(5.0\ \text{s})$ من لحظةِ الضغطِ على المكابح؛ فأحسبُ مقدارَ ما يأتي:



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

أ. الزخَم الخطيّ الابتدائيُّ للصُندوق.

ب. الدفع المُؤثّر في الصُّندوق.

ج. قوّة الاحتكاك المُتوسّطة اللازم تأثيرُها في الصُّندوق لمنعهِ من الانزلاق.

المُعطيات:

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

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

$+x$

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

أ. تتحرّك الشاحنةُ باتّجاه محور $+x$؛ لذا تكون السرعة المُتّجهةُ الابتدائيّة للصُّندوق موجبةً، وأحسبُ زخَمهُ الخطيّ الابتدائيَّ كما يأتي:

$$p_{\text{i}} = mv_{\text{i}} = 100 \times 20$$

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

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

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

ب. أستخدم مُبَرهنة (الزخَم الخطيّ – الدفع) لحسابِ الدفع. ألاحظُ أن الزخَم الخطيَّ النهائيَّ للصُّندوق يساوي صفرًا؛ لأنّ مقدارَ سرعته المُتّجهة النهائيّة يساوي صفرًا.

$$\text{I} = \Delta p = p_{\text{f}} - p_{\text{i}}$$

$$= mv_{\text{f}} - 2 \times 10^{3} = 100 \times 0 - 2 \times 10^{3}$$

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

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

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

ج. أستخدم الصيغة العامّة للقانون الثاني لنيوتن لحساب قوّة الاحتكاك اللازم تأثيرُها في الصُّندوق لمنعه من الانزلاق، وهي نفسُها القوّة المتوسّطة المؤثّرة فيه خلالَ فترة توقُّف الشاحنة.

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

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

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

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

المثال 2:

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

الشكل (5): لاعب يركل كرة قدم.

أ. زخمُ الكرةِ عند لحظةِ ابتعادِها عن قدم اللاعب.

ب. زمنُ تلامُسِ الكرة مع قدم اللاعب.

ج. الدفعُ المُؤثّر في الكرة خلال زمنِ تلامُسها مع قدم اللاعب.

المعطيات:

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

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

$+x$

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

أ. أحسبُ الزخَم الخطيّ للكرة لحظة ابتعادِها عن قدم اللاعب، وهو يساوي زخَمها النهائيَّ، حيثُ زخمُها الابتدائيُّ صفرٌ؛ إذ تكونُ الكرة ساكنةً قبل ركلِها.

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

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

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

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

ب. أستخدمُ الصيغةَ العامّةَ للقانون الثاني لنيوتن لحساب زمنِ تلامُسِ الكرةِ مع قدمِ اللاعب كما يأتي:

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

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

$$= 0.10\ \text{s}$$

ج. أستخدمُ مُبَرهنةَ (الزخَم الخطيّ – الدفع) لحساب الدفع.

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

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

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

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

كما يُمكن حسابُ الدفع باستخدامِ تعريفِ الدفع كما يأتي:

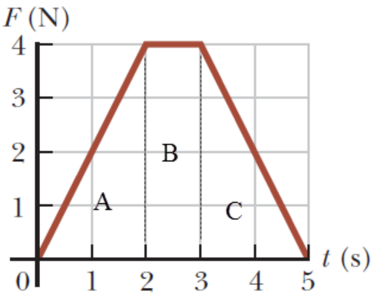
$$\text{I} = \sum F\ \Delta t$$

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

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

المثال 3

تؤثّرُ قوّةٌ محصّلةٌ باتّجاه محور $+x$ في صندوقٍ ساكنٍ كتلتهُ (3 kg) مدّةً زمنيةً مقدارُها (5 s). إذا علمتُ أنّ مقدار القوّة المُحصّلة يتغيّرُ بالنسبة للزمن كما هو مُوضّح في منحنى (القوّة – الزمن) في **الشكل (6)**؛ فأحسبُ مقدارَ ما يأتي:



الشكل (6): منحنى (القوّة – الزمن).

أ. الدفع المؤثّر في الصُّندوق خلالَ الفترة الزمنيّة لتأثير القوّة المُحصّلة، وأُحدّد اتّجاههُ.

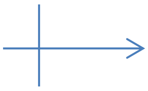
ب. السرعة النهائيّةُ للصُّندوق في نهاية الفترة الزمنيّة لتأثير القوّة المُحصّلة، وأُحدّد اتّجاهها.

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

المعطيات:

$m = 3$ kg, $v_i = 0$ m/s, $\Delta t = t = 5$ s, المنحنى البياني .

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


$+x$

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

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

$$I = A + B + C$$

$$= \frac{1}{2} \times (2 - 0) \times 4 + 4 \times 1 + \frac{1}{2} \times (5 - 3) \times 4$$

$$= 12 \text{ kg.m/s}$$

$$I = 12 \text{ kg.m/s}, +x$$

اتّجاه الدفع باتّجاه القوّة المُحصّلة المؤثّرة في الصُّندوق، أي باتّجاه محور $+x$.

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

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

$$12 = mv_f - 0$$

$$v_f = \frac{12}{3} = 4 \text{ m/s}$$

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

ج. أستخدمُ الصيغة العامّة للقانون الثاني لنيوتن لحساب القوّة المتوسطة المؤثّرة في الصُّندوق، كما يأتي:

$$\sum F = \bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{12}{5}$$

$$= 2.4 \text{ N}$$

يكون اتّجاه القوّة المتوسطة باتّجاه القوّة المُحصّلة نفسه؛ أي باتّجاه المحور $+x$.

الشكل (7): لاعب يقذف كرة تنس.

stock photo ID: 1928161247

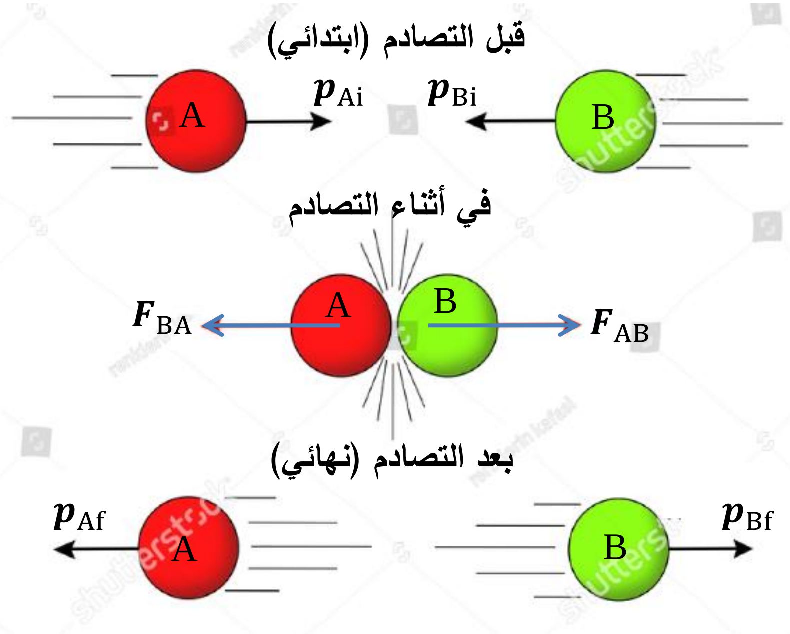
تمرين:

أحسبُ: كرةُ تنسٍ كتلتُها (0.060 kg)؛ يقذِفُها لاعبٌ إلى أعلى، وعند وصولها إلى قمّة مسارِها الرأسيّ يضربُها أُفقيًّا بالمَضرِب فتنطلقُ بسرعةٍ مقدارُها (55 m/s) في اتّجاهِ محور $+x$. أنظر **الشكل (7)**.

إذا علمتُ أنّ زمنَ تلامُس الكرة مع المَضرِب $(4.0 \times 10^{-3} \text{ s})$؛ أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. الدفع الذي يؤثّر به المضربُ في الكرة.

ب. القوّةُ المتوسّطةُ التي أثّر بها المَضرِب في الكرة.



الشكل (8): تصادم كرتين.
stock illustration ID: 1878725386

حفظُ الزّخَم الخطيّ Conservation of Linear Momentum

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

حفظ الزخَم الخطيّ والقانون الثالث لنيوتن في الحركة

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

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

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

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

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

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

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

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

أي أن:

$$p_{\text{Bf}} - p_{\text{Bi}} = -(p_{\text{Af}} - p_{\text{Ai}})$$

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

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

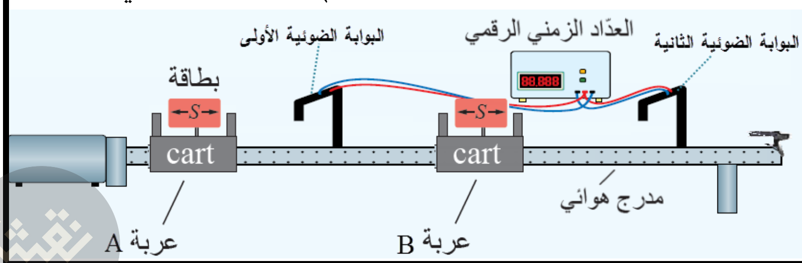
حيث $\boldsymbol{v}_{\text{Ai}}$ و $\boldsymbol{v}_{\text{Af}}$ تمثّلانِ السرعتينِ المُتجهتَين للجسم الأوّل قبل التصادُم وبعدَهُ مباشرةً على الترتيب، و $\boldsymbol{v}_{\text{Bi}}$ و $\boldsymbol{v}_{\text{Bf}}$ تمثّلان السرعتين المُتّجهتينِ للجِسم الثاني قبلَ التصادُم وبعدَهُ مباشرةً على الترتيب. تشيرُ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

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

التجربة 1 حفظُ الزّخَمِ الخطيّ

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.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

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

2. أقيسُ طول كل من البطاقتين الخاصتين بالعربتين (S)، ثم أُثبّتُ كُلًّا منهما على عربة، وأُدوّن طوليهما في الجدول (1)، ثمّ أُثبّتُ لاصقًا على كلّ عربة، وأكتب الرمز A على أحدهما، والرمز B على الأُخرى.

3. أقيسُ كتلةَ كلٍّ من العربتين المُنزَلقتين، 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 التي عند بداية المدرج في اتّجاه العربة الثانية 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 $(t_{\mathrm{Af}}، t_{\mathrm{Bf}})$ في عبور البوابتين الأولى والثانية على الترتيب بعد التصادُم.

6. أُكرّرُ الخطوة السابقة بوضع أثقالٍ على العربة A؛ بحيث تصبح كتلتُها ضعفي كتلة العربة B، وأُدوّن القياسات الجديدة للكتلة والزمن في الجدولين (1 و2) للمحاولة 2.

التحليل والاستنتاج:

1. أحسبُ مقاديرَ السُّرعات الابتدائيّة والنهائيّة للعربتين لكلِّ محاولةٍ باستخدام العلاقة: $v = \frac{S}{\Delta t}$، وأُدوّن السرعات المُتّجهةَ للعربتين في الجدولين (1 و2)، مع افتراض أنّ اتّجاه الحركة إلى اليمين هو الاتّجاه الموجب.

2. أحسبُ الزخَم الخطيَّ الابتدائيّ والزخَم الخطيّ النهائيّ لكلِّ عربةٍ في الجدول (2)، وأُدوّنها فيه.

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

4. أقارن: ما العلاقة بين الزخَم الخطيّ الكُلّي الابتدائي والزخَم الخطيّ الكُلّي النهائي لنظامي العربتين في التصادُمات للمحاولتين 1 و2؟ أُفسّر نتائجي.

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

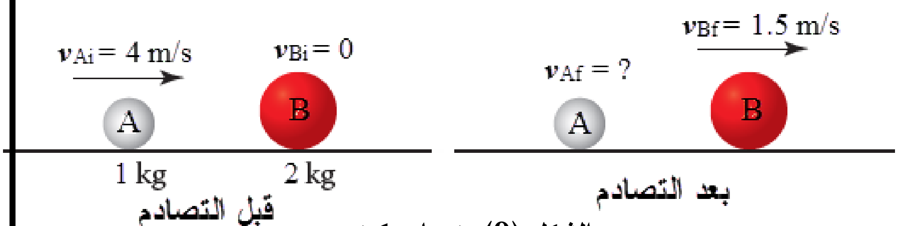
6. أتوقّعُ مصادر الخطأ المُحتمَلة في التجربة.

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

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

المثال 4

يُوضحّ **الشكل (9)** تصادُمَ كُرَتين A و B، حيث تتحرك الكرة A باتّجاه محور $+x$ بسرعةٍ مقدارُها $(4.0\ \mathrm{m/s})$ نحوَ الكرة B الساكنة. بعد التصادُم تحرّكت الكُرة B بسرعةٍ مقدارُها $(1.5\ \mathrm{m/s})$ في الاتّجاه نفسِه لسرعةِ الكُرة A قبلَ التصادُم. إذا علمت أنَّ $(m_A = 1.0\ \mathrm{kg})$ و $(m_B = 2.0\ \mathrm{kg})$،؛ فأحسبُ مقدار سرعة الكُرة A بعد التصادُم وأُحدّد اتّجاهها.



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

$+x$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

أتحقق: أوضّح علام ينص قانون حفظ الزخَم الخطيّ.

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 مقدار ما يأتي:

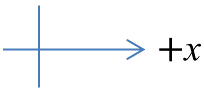
أ. الدفعُ الذي تؤثّر به القذيفة في المدفع، وأُحدّد اتّجاهه.

ب. سرعة ارتداد المدفع.

المعطيات: أفترض رمز المدفع A ورمز القذيفة B.

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

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



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

أ. الدفعُ الذي تؤثّر به القذيفةُ في المدفع $(\mathbf{I}_{BA})$ يُساوي في المقدار الدفع الذي يؤثر به المدفع في القذيفة $(\mathbf{I}_{AB})$، ويُعاكسُه في الاتّجاه. أستخدم مبرهنة (الزخَم الخطيّ – 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. أطبّق قانون حفظ الزخَم الخطيّ على القذيفة والمدفعَ قبل إطلاقِ القذيفة وبعد إطلاقها مباشرةً، مع ملاحظة أن مجموع الزخَم الخطيِّ للقذيفةِ والمدفع يساوي صفرًا قبل إطلاق القذيفة.

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

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

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

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

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

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

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

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصودُ بالزخَم الخطيِّ لجسم؟ وما العلاقة بين الدفع المؤثر في جسم والتغيُّر في زخَمه الخطيّ؟

2. **أُحلّلُ:** بحسب علاقة تعريف الزخَم الخطيّ $(\mathbf{I} = \sum \boldsymbol{F}\, \Delta t)$؛ تكون وحدةُ قياسهِ $(\mathrm{N.s})$، وبحسب مبرهنة (الزخَم الخطيّ – الدفع) تكون وحدةُ قياسهِ $(\mathrm{kg.m/s})$. أُثبت أن هاتين الوحدتين مُتكافئتان.

3. **أوضّحُ** متى يكون الزخَم الخطيّ لنظام محفوظًا؟

4. **أفسّرُ:** ذهبت نرجس إلى مدينة الألعاب، وعند قيادتها سيارةً كهربائيةً واصطدامها بالسيارات الأُخرى وجدت أن تأثير هذه التصادُمات عليها قليلٌ. وعند تركيزِ انتباهها على هذه السيارات؛ لاحظت وجود حزامٍ من مادّة مطاطيّة يحيط بجسم السيارة. أُفسّر سببَ وجود هذا الحزام المطاطيّ.

5. **أتوقّعُ** هل يُمكنُ أن يكونَ مقدارُ الزخَم الخطيّ لرصاصة مساويًا لمقدار الزخَم الخطيّ لشاحنة؟ أُفسّر إجابتي.

6. أُحلّلُ وأستنتج: أُشاهد في أثناء التدريبات العسكرية إسناد الجنود كعوبَ بنادِقهم على أكتافهم بإحكام عند إطلاق الرصاص منها. لماذا يفعلون ذلك؟

7. أُصدرُ حُكمًا: في أثناء جلسة نقاش داخل غرفة الصف عن كيفيّة حركةِ المركبات الفضائيّة في الفضاء، قالت بتول: "تندفع المركبة الفضائية في الغلاف الجويّ للأرض، ويتغيّرُ مقدار سرعتها واتّجاه حركتها عندما تدفعُ الغازات المنطلقة من الصواريخ المثبتة عليها الهواء الجويّ، وأنه لا فائدةَ من وجودِ هذه الصواريخ في المركبة الفضائية في الفضاء؛ إذ لا يُمكنُ لهذه الصواريخ أن تُغيّر مقدارَ سرعةِ هذه المركبةِ في الفضاءِ أو اتّجاه حركتها؛ لأنه لا يوجدُ هواءٌ في الفضاء تدفعه الغازاتُ الخارجةُ منها". أناقشُ صحّةَ قولِ بتول.

الفكرة الرئيسة:

تحدث التصادُمات في بُعدٍ واحدٍ أو بُعدين، أو ثلاثة أبعاد. وللتّصادُمات نوعان رئيسان، وتساعد معرفتُهما في تصميم الأجهزة والأدوات المتعدّدة التي يعتمد مبدأُ عملِها على هذه التصادُمات أو الحماية منها.

نتاجات التعلم:

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

المفاهيم والمصطلحات:

تصادُم مرِن Elastic Collision

تصادُم غير مرِن Inelastic Collision

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

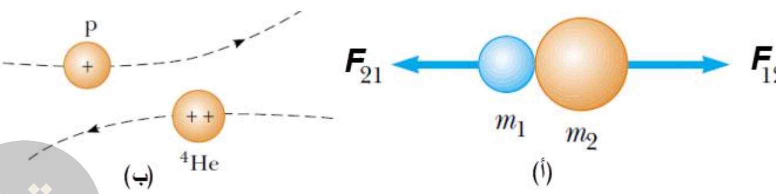
أستخدم مصطلح تصادُمٍ لتمثيل حدثٍ يقترب فيه جسمان أحدهما من الآخر، ويؤثّر كلٌّ منهما في الآخر بقوةٍ. وقد يتضمّنُ التصادُم تلامسًا بين جسمين، كما هو مُوضّحٌ في **الشكل (11/أ)**، أو عدم حدوثِ تلامُسٍ بينهما كما في تصادُم جسيمات مشحونة على المستوى المجهريّ، مثل تصادُم بروتونٍ بجسيم ألفا (نواة ذرة الهيليوم)،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

التصادُمات والطاقة الحركية Collisions and Kinetic Energy

تعرّفتُ في الدرس السابق أن الزخَم الخطيّ محفوظٌ دائمًا عند تصادُم الأجسام أو انفصال بعضها عن بعض في الأنظمة المعزولة. وأسألُ هل تكون الطاقة الحركيّة الخطيّة محفوظةً أيضًا في هذه التصادُمات؟

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

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



الشكل (11): (أ) تصادُم جسمين على المستوى الجاهريّ (يُمكن رؤيتها بالعين المجرّدة). (ب) تصادم جسيمين مشحونين على المستوى المجهري. (الشكل ليس ضمن مقياس رسم)

التصادمُ المَرِن

في التصادُم المَرِن Elastic collision يكونُ مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركية للنظام محفوظةٌ. ومن الأمثلة عليها التصادُمات بين كرات البلياردو، كما في **الشكل (12)**. وهنا نهملُ خسران جزءٍ صغير من الطاقة على شكل طاقةٍ صوتيةٍ مثلًا.

الشكل (12): تصادم كرات البلياردو.

stock photo ID: 1682658

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

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

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

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

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

التصادُمُ غيرُ المَرِن

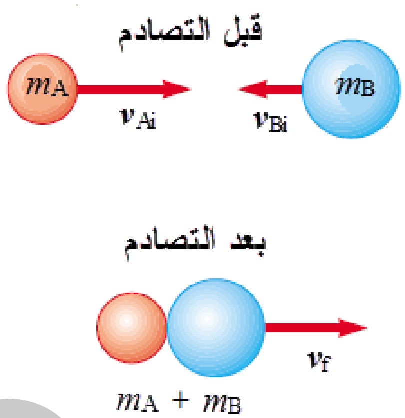
في **التصادُم غيرِ المرِن Inelastic collision** لا يكونُ مجموع الطاقة الحركيّة لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموعَ طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أنّ الطاقة الحركيّة للنظام غيرَ محفوظة. ومن أمثلتها اصطدامُ كرةٍ مطاطيّةٍ بسطحٍ صُلبٍ (مَضرِبٌ مثلًا)، حيث تفقد جزءًا من طاقتها الحركية عندما تتشوّه الكرة في أثناء ملامستها للسطح. أنظر **الشكل (13)**. لكن الزخَم الخطيّ 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 الاجسام المتصادُمة.

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

stock photo Item ID: 117915640

ويوصَفُ التصادُم غيرُ المَرِن 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.

أحسبُ مقدار السرعة النهائية لتصادُمٍ عديم المرونة بين جسمين، كما هو موضّح



الشكل (14): تصادم عديم المرونة بين جسمين.

في **الشكل (14)**، بتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطيّ على النظام المُكوّن منهما كما يأتي:

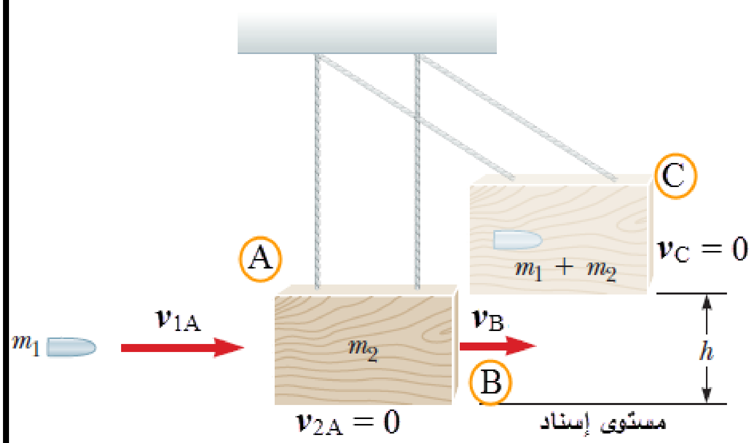
$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = (m_A + m_B)\, v_f$$

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

تطبيق: البندول القذفيّ

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

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



الشكل (16): تحرّك البندول القذفي جانبيًّا بعد اختراق الرصاصة له.

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

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

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

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

$$ME_B = ME_C$$

$$KE_B + PE_B = KE_C + PE_C$$

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

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

$$\frac{1}{2}\,(\frac{m_1 v_{1A}}{m_1 + m_2})^2 = g\,h$$

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

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

أُفكّر

عند تصادم جسمين في بُعد واحد تصادمًا عديم المرونة، ما الشرط الضروري لتُفقد الطاقة الحركية الابتدائية للنظام بعد الاصطدام؟ أناقش أفراد مجموعتي، وأستخدم مصادر المعرفة المُتاحة للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

الشكل (16): تصادم في بُعد واحد.

stock vector ID: 699344749

التصادُم في بُعدٍ واحدٍ One-Dimensional Collision

عندما يتحرّكُ جسمان قبل التصادُم على امتداد الخط المستقيم نفسِه، ويتصادمان رأسًا برأس Head on collision ، بحيثُ تبقى حركتيهما بعد التصادُم على المسار المستقيم نفسه؛ فإن تصادُمَهُما يوصف بأنه تصادمٌ في بُعدٍ واحدٍ. أنظر **الشكل (16)**.

أتحقّقُ: متى يكون التصادُم في بُعدٍ واحد؟

المثال 6

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

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

الشكل (17): تصادم كرتين في بُعد واحد.

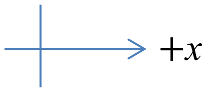
ب. أُحدّد نوع التصادُم.

المعطيات:

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_{Af} = ?$

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



أ. أُطبق قانونَ حفظ الزخَم الخطيّ على نظام الكرتين.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

بما أن التغيُّر في الطاقة الحركية لنظام الكرتين سالبٌ، فهذا يعني حدوثَ نقصٍ في الطاقة الحركيّة، والكرتان لم تلتحما بعد التصادُم؛ إذًا التصادُم غيرُ مرن.

المثال 7

كرتا بلياردو كتلة كلٍّ منهما (0.16 kg). تتحرّك الكرةُ الحمراء (A) باتّجاه محور $+x$ بسرعة (2 m/s) نحو الكرة الزرقاء (B) الساكنة وتتصادمان رأسًا برأس تصادمًا مرنًا، أنظر **الشكل (18)**. أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. سرعة الكرة (B) بعد التصادُم، وأُحدد اتّجاهها.

ب. سرعة الكرة (A) بعد التصادُم، وأُحدد اتّجاهها.

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

المعطيات:

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_{\mathrm{Bf}} = ?, \boldsymbol{v}_{\mathrm{Af}} = ?$

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

$+x$

أ. أُطبّقُ قانون حفظ الزخَم الخطيّ على نظام الكرتين.

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

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

لأنّ $m_{\mathrm{A}} = m_{\mathrm{B}}$؛ فإنها تُختصَر من المعادلة وتصبح كما يأتي:

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

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

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

أجد v_{Af} بدلالة v_{Bf} كما يأتي:

$$v_{\mathrm{Af}} = 2 - v_{\mathrm{Bf}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1$$

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

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

ولأن $m_{\mathrm{A}} = m_{\mathrm{B}}$؛ فإنّها تُختصَر من المعادلة، وأُعوّض $v_{\mathrm{Bi}} = 0$، وتصبح كما يأتي:

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

$${v_{\mathrm{Af}}}^2 + {v_{\mathrm{Bf}}}^2 = 4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2$$

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

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

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

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

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

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

والحلُّ الثاني مستبعدٌ؛ لأنّه يعني أن الكرة الزرقاء بقيت ساكنةً بينما تستمرُّ الكرة الحمراء بالحركة بمقدار السرعة نفسه بالاتّجاه نفسه (حسب قانون حفظ الزخَم الخطيّ)؛ وبتعويض $v_{Bf} = 0$ في المعادلة 1 أجد أن $v_{Af} = 2\ m/s$، أي أنّ الكرة A نفذت من خلال الكرة B واستمرت في الحركة باتّجاه محور $+x$، وهذا غير ممكن، إذًا: $v_{Bf} = 2\ m/s$.

ب. بتعويض مقدار $v_{Bf} = 2\ m/s$ في المعادلة 1؛ أتوصّل إلى مقدار v_{Af}.

$$v_{Af} = 2 - v_{Bf} = 2 - 2 = 0\ m/s$$

أي أنّ الكرةَ الحمراءَ سكنت بعد التصادُم، بينما اكتسبت الكرةُ الزرقاء السرعةَ الابتدائية للكرة الحمراء. وهذا يحدُث إذا كان التصادُم مرنًا، وكان للكرتين الكتلة نفسها.

المثال 8

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

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

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

ج. أحسبُ مقدار السرعة الابتدائية للسهم.

المعطيات: أفترض رمز الكتلة 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: $\boldsymbol{v}_{1i} = ?$

الحلّ:

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

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

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

$$v_{1A} = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1}\right)\sqrt{2gh}$$
$$= \left(\frac{0.03 + 0.72}{0.03}\right)\sqrt{2 \times 10 \times 0.20}$$
$$= 50\ \mathrm{m/s}$$

المثال 9

عربة قطارٍ (A) كتلتُها $(1.80 \times 10^3\ \mathrm{kg})$ تتحرك في مسارٍ أُفقيٍّ مستقيمٍ لسكة حديدٍ بسرعةٍ مقدارُها $(3.00\ \mathrm{m/s})$ باتّجاه محور $+x$، فتصطدم بعربة أُخرى (B) كتلتُها $(2.20 \times 10^3\ \mathrm{kg})$ تقف على المسار نفسه، وتلتحمان معًا وتتحركان على المسار المستقيم لسكة الحديد نفسه، كما هو موضحٌ في **الشكل (19)**. أُجيب عمّا يأتي:

الشكل (19): تصادم عربتي قطار.

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

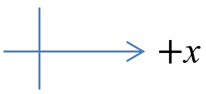
ب. ما نوع التصادُم؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادُمات؟ أُبرّر إجابتي.

المعطيات:

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

المطلوب: $\boldsymbol{v}_f = ?$

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



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

$$\sum \boldsymbol{p}_i = \sum \boldsymbol{p}_f$$
$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = (m_A + m_B) v_f$$
$$1.80 \times 10^3 \times 3.00 + 2.20 \times 10^3 \times 0 = (1.80 \times 10^3 + 2.20 \times 10^3) v_f$$
$$v_f = 1.35\ \mathrm{m/s}$$
$$\boldsymbol{v}_f = 1.35\ \mathrm{m/s},\ +x$$

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.

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

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

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

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

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

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

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

تمرين

أحسبُ: أطلق مُحقّقٌ رصاصةً كتلتُها $(0.030\ \mathrm{kg})$ أُفقيًّا باتّجاه بندول قذفي كتلته $(0.97\ \mathrm{kg})$، فاصطدمت به والتحما معًا، فكان أقصى ارتفاع وصله البندول فوق المستوى الابتدائي له $(45\ \mathrm{cm})$. أحسبُ مقدار السرعة الابتدائية للرصاصة.

التصادُم في بُعدين Two-Dimensional Collision

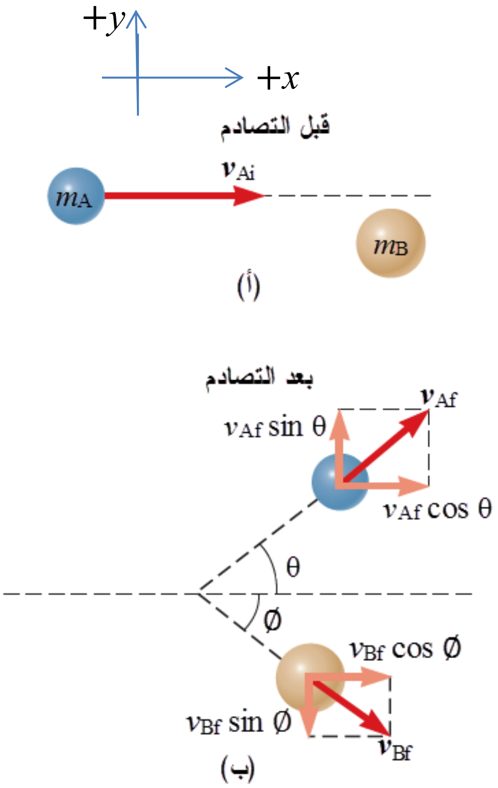
يوضح **الشكل (20)** تصادم جسمين في بُعدين (xy). ويكون الزخَم الخطيّ محفوظًا في كلا الاتّجاهين: x و y. وللحصول على تصادمٍ في بُعدَين يجب أن لا يكون التصادُم بين الكرتين رأسًا برأس.

وبتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطيّ على الجسمين؛ نحصلُ على معادلتين لحفظ مُركّبتي الزخَم الخطيّ؛ في اتّجاه محور x، وفي اتّجاه محور y، كما يأتي:

$$\sum p_{xi} = \sum p_{xf} : m_A v_{Aix} + m_B v_{Bix} = m_A v_{Afx} + m_B v_{Bfx}$$

$$\sum p_{yi} = \sum p_{yf} : m_A v_{Aiy} + m_B v_{Biy} = m_A v_{Afy} + m_B v_{Bfy}$$

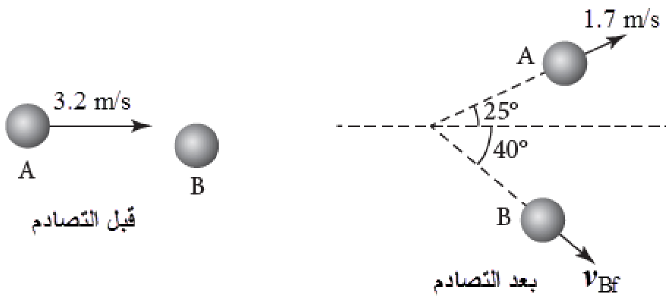
أتحقّقُ: أوضح كيف أحصل على تصادم في بُعدين؟



الشكل (20): تصادم جسمين في بُعدين، (أ) قبل التصادم، (ب) بعد التصادم.

المثال 10

في إحدى الألعاب الرياضية يضرب لاعبٌ الكرةَ (A)؛ فتتحرك بسرعة مقدارها $(3.2\ m/s)$ باتّجاه محور $+x$، وتصطدم بالكرة (B) الساكنة. بعد التصادُم تحركت الكرتان كما هو مُوضّح في **الشكل (21)**. إذا علمتُ أن كتلة كلٍّ من الكرتين $(2.0\ kg)$؛ فأُجيب عمّا يأتي:



الشكل (21): تصادم كرتين في بُعدين.

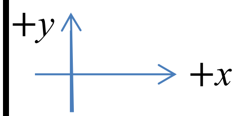
أ. أحسبُ مقدار سرعة الكرة (B) بعد التصادُم.

ب. أُحدّد نوع التصادُم: مرنٌ أم غير مرنٍ.

المعطيات:

$m_A = m_B = 2.0\ kg,\ \boldsymbol{v}_{Ai} = 3.2\ m/s,\ +x,\ v_{Bi} = 0,\ \boldsymbol{v}_{Af} = 1.7\ m/s,\ 25^\circ\ ,\ \emptyset = 40^\circ.$

المطلوب: $v_{Bf} = ?$



الحل:

أ. أختارُ نظام إحداثيات يكون فيه اتّجاهُ الحركة الابتدائي للكرة (A) هو الاتّجاه الموجب (باتّجاه محور $+x$). أُطبّق قانون حفظ الزخَم الخطيّ باتّجاه محور x كما يأتي:

$$\sum \boldsymbol{p}_{xi} = \sum \boldsymbol{p}_{xf}$$

$$m_A v_{Aix} + m_B v_{Bix} = m_A v_{Afx} + m_B v_{Bfx}$$

$$m_A v_{Aix} + m_B v_{Bix} = m_A v_{Af} \cos\theta + m_B v_{Bf} \cos\emptyset$$

$$2.0 \times 3.2 + 0 = 2.0 \times 1.7 \cos 25^\circ + 2.0 \times v_{Bf} \cos 40^\circ$$

$$6.4 = 3.4 \times 0.91 + 2.0 \times v_{Bf} \times 0.77$$

$$v_{Bf} = \frac{6.4 - 3.09}{1.54}$$

$$= 2.15\ m/s$$

ب. لكي أُحدّدَ نوع التصادُم يلزم حساب التغيُّر في الطاقة الحركية للجسمين.

$$\Delta KE = KE_f - KE_i$$

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

$$= \frac{1}{2} \times 2.0 \times (1.7)^2 + \frac{1}{2} \times 2.0 \times (2.15)^2 - [\frac{1}{2} \times 2.0 \times (3.2)^2 + 0]$$

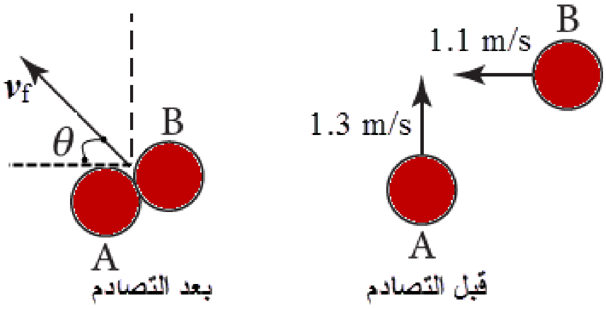
$$= 7.51 - 10.24$$

$= -2.73\ \text{J}$

بما أنّ الطاقةَ الحركية غيرُ محفوظةٍ؛ فإنّ التصادُم غير مرن.

المثال 11

ينزلق قرص هوكي (A) كتلته (2.5 kg) بسرعةٍ مقدارُها (1.3 m/s) باتّجاه محور $+y$، فيصطدم بقرصٍ آخر (B) كتلتُه (2.0 kg)؛ ينزلقُ بسرعةٍ مقدارُها (1.1 m/s) باتّجاه محور $-x$. بعد التصادُم التحم القرصان A و B معًا، وتحرّكا كجسمٍ واحد، كما هو موضّحٌ في **الشكل (22)**. إذا علمتُ أنّ القرصين ينزلقان على سطحٍ أملس؛ أحسبُ مقدار سرعتهما بعد التصادُم، وأُحدّد اتّجاهها.

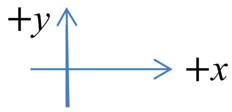


الشكل (22): تصادم في بُعدين.

المعطيات:

$m_A = 2.5\ \text{kg}, m_B = 2.0\ \text{kg}, \boldsymbol{v}_{Ai} = 1.3\ \text{m/s}, +y, \boldsymbol{v}_{Bi} = 1.1\ \text{m/s}, -x.$

المطلوب: $\boldsymbol{v}_f = ?$



الحلّ:

أُطبّق قانون حفظ الزخَم الخطيّ في بُعدين؛ باتّجاه محور x وباتّجاه محور y، مع مراعاة ما يأتي: قبل التصادُم، يمتلك القرص (B) فقط زخمًا في اتّجاه المحور x؛ لذا فإنّ الزخَم الخطيّ الكُلّي الابتدائيّ للنظام (القرصين) في اتّجاه المحور x يساوي مقدار الزخَم الخطيّ للقرص (B). وبالمثل؛ فإن الزخَم الخطيّ الكُلّي الابتدائي للنظام في اتّجاه المحور y يساوي مقدار الزخَم الخطيّ للقرص (A) فقط. بعد التصادُم يتحرك القرصان معًا بزاوية (θ) بالنسبة للمحور $-x$، كما هو موضّح في **الشكل (22)**. أفترضُ الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

أُطبّق قانون حفظ الزخَم الخطيّ باتّجاه محور x.

$$\sum \boldsymbol{p}_{xi} = \sum \boldsymbol{p}_{xf}$$
$$m_A v_{Aix} + m_B v_{Bix} = (m_A + m_B) v_{fx}$$

$$2.5 \times 0 + 2.0 \times (-1.1) = (2.5 + 2.0) \times (-v_f) \cos\theta$$

$$2.2 = 4.5 \times v_f \cos\theta \ ....\ (1)$$

بتطبيق قانون حفظ الزخَم الخطيّ باتّجاه محور y.

$$\sum \boldsymbol{p}_{yi} = \sum \boldsymbol{p}_{yf}$$
$$m_A v_{Aiy} + m_B v_{Biy} = (m_A + m_B) v_{fy}$$

$$2.5 \times 1.3 + 2.0 \times 0 = (2.5 + 2.0) \times v_f \sin\theta$$

$$3.25 = 4.5 \times v_f \sin\theta \text{ .... } (2)$$

لإيجاد مقدار الزاوية (θ)؛ أقسِمُ المعادلة 2 على المعادلة 1.

$$\frac{3.25}{2.2} = \frac{4.5 \times v_f \sin\theta}{4.5 \times v_f \cos\theta}$$

$$\tan\theta = 1.48$$

$$\theta = \tan^{-1}(1.48) = 55.9^\circ \approx 56^\circ$$

والزاوية (θ) تقع في الربع الثاني، ومُقاسةً بالنسبة لمحور $-x$، كما هو موضح في الشكل.

والآن أحسبُ مقدار السرعة النهائية التي سيتحرك بها القرصان باستخدام المعادلة 1 أو المعادلة 2 السابقتين. أستخدم المعادلة 2 كما يأتي:

$$3.25 = 4.5 \times v_f \sin 56^\circ$$

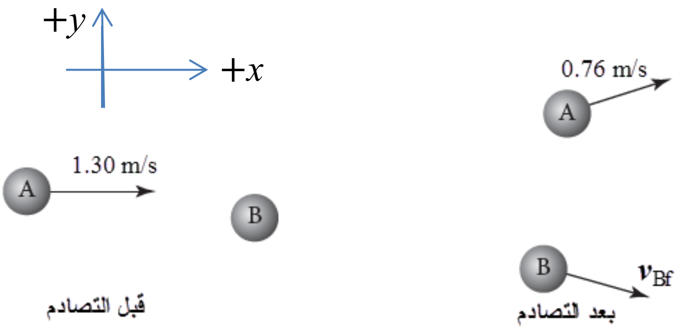
$$v_f = 0.87 \text{ m/s}$$

$$\boldsymbol{v}_f = 0.87 \text{ m/s}, (180^\circ - 56^\circ)$$

$$\boldsymbol{v}_f = 0.87 \text{ m/s}, 124^\circ$$

تمرين

ينزلقُ قرصٌ بلاستيكيٌّ (A) كتلته (165 g) شرقًا على سطحٍ أملسٍ بسرعةٍ مقدارُها (1.30 m/s)؛ فيصطدمُ بقرصٍ آخر مماثلٍ (B) ساكنٍ تصادمًا مرنًا. بعد التصادُم تحرّك القرصان باتّجاهين مختلفين، كما هو موضّحٌ في **الشكل** (23).
أستعين بالشكل والبيانات المثبّتة عليه؛ لأحسبُ مقدار سرعة القرص (B) بعد التصادُم.



الشكل (23): تصادم قرصين في بُعدين.

مراجعة الدرس

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

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

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

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

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

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

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

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

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

الإثراء والتوسع

تصميم السيارة والسلامة Car Design and Safety

تصادم رأس برأس في اختبار تصادم.
stock photo ID: 667288234

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

يوجد في مقدمة السيارة ونهايتها مناطق انهيار (ماصّات صدمات) Crumple zones؛ تنبعج وتتشوّه بطريقةٍ يجري فيها امتصاص الطاقة الحركيّة للسيارة وركّابها تدريجيًّا، كما هو موضّحٌ في الصورة. حيث يتشوّه هيكل السيارة المرن المصنوع من صفائح ليّنة ممّا 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، ممّا يقلّل احتمالية تعرّضهم لإصاباتٍ خطيرة.

أمّا أحزمةُ الأمان Seat belts؛ فتؤثّر في الركّاب بقوةٍ مقدارُها (10000 N) تقريبًا، بعكس اتّجاه حركة السيارة، خلال مسافة مقدارها (0.5 m)، وهي تقريبًا المسافة بين راكب المقعد الأمامي والزجاج الأمامي. ففي أثناء الاصطدام، يُثبّت

حزام الأمان الراكب في المقعد ويزيد زمن تغيُّر سرعته، وبما أن مقدار التغيُّر في الزخَم الخطيّ للراكب ثابت (إذ يتوقف الراكب في النهاية سواءً استخدم حزام الأمان أم لم يستخدمه)؛ فإنّ مقدار القوّة المُؤثِّرة فيه يصبح أقلَّ نتيجةَ زيادة زمن التوقف. وفي حال عدم استخدام حزام الأمان سيرتطم الراكب بعجلة القيادة أو زجاج السيارة الأمامي، ويتوقف خلال فترةٍ زمنيةٍ قصيرةٍ مقارنةً بزمن التوقف عندما يستخدم حزام الأمان، ممّا يعني تأثير قوةٍ كبيرةٍ فيه لإيقافه.

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

أما مساند الرأس Head restraints؛ فتضمن حركة رأس الراكب والسائق إلى الأمام مع الجسم، وعدم حركته للخلف من فوق الجزء العلوي من المقعد، 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 المتغيرات التي تحدث في أثناء القيادة، إضافةً إلى انتباه السائق؛ نظرًا لأن معظم الحوادث ناتجةٌ عن أخطاءٍ يرتكبها السائقون.

مراجعة الوحدة

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

1. وحدة قياس الزخَم الخطيِّ حسب النظام الدولي للوحدات، هي:

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

2. كلّما زاد زمن تأثير قوة $(\boldsymbol{F})$ في جسم كتلته (m):

أ. زاد مقدار الدفع المؤثر فيه، وزاد مقدار التغيُّر في زخَمه الخطيّ.

ب. زاد مقدار الدفع المؤثر فيه، وقل مقدار التغيُّر في زخَمه الخطيّ.

ج. قلَّ مقدار الدفع المؤثر فيه، وزاد مقدار التغيُّر في زخَمه الخطيّ.

د. قلَّ مقدار كلٍّ من: الدفع المؤثر فيه، والتغيُّر في زخَمه الخطيّ.

3. يعتمد الزخَمُ الخطيُّ لجسم على:

أ. كتلته فقط. ب. سرعته المُتّجهة فقط.

جـ. كتلته وسرعته المُتّجهة. د. وزنه وتسارع السقوط الحر.

4. يتحرّك جسم كتلته (10 kg) أُفقيًّا بسرعة ثابتة (5 m/s) شرقًا. إنّ مقدار الزخَم الخطيّ لهذا الجسم واتّجاهه هو:

أ. 0.5 kg.m/s شرقًا. ب. 50 kg.m/s غربًا. جـ. 2 kg.m/s شرقًا. د. 50 kg.m/s شرقًا.

5. تتحرك سيارة شمالًا بسرعةٍ ثابتةٍ؛ بحيث كان زخمُها الخطي يساوي (9×10^4 N.s). إذا تحركت السيارة جنوبًا بالسرعة نفسها فإن زخَمها الخطيّ يساوي:

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

6. تركض لينا غربًا بسرعة مقدارها (3 m/s). إذا ضاعفت لينا مقدارَ سرعتها مرّتان فإنّ مقدار زخَمها الخطيّ:

أ. يتضاعفُ مرّتان. ب. يتضاعف أربع مرات جـ. يقلُّ بمقدار النصف د. يقلُّ بمقدار الربع

7. صندوقان (A وB) يستقران على سطح أفقيٍّ أملسٍ. أثّرت في كل منهما القوّة المُحصّلة نفسُها باتّجاه محور $+x$، للفترة الزمنية (Δt) نفسِها. إذا علمتُ أن كتلة الصُّندوق (m_A) أكبر من كتلة الصُّندوق (m_B)؛ فأيُّ العلاقات الآتية صحيحة في نهاية الفترة الزمنية؟

أ. $p_A < p_B,\ KE_A < KE_B$ ب. $p_A = p_B,\ KE_A > KE_B$

ج. $p_A = p_B,\ KE_A < KE_B$ د. $p_A > p_B,\ KE_A > KE_B$

8. رُميَتْ كرةٌ كتلتُها m أُفقيًّا بسرعة مقدارها v نحو جدار؛ فارتدّت الكرة أُفقيًّا بمقدار السرعة نفسه. إنّ مقدار التغيُّر في الزخَم الخطيّ للكرة يساوي:

أ. mv ب. $-mv$ ج. $2mv$ د. صفرًا

9. كرةُ (A) تتحرك بسرعة (2 m/s) غربًا؛ فتصطدم بكرةٍ أُخرى ساكنةٍ (B) مماثلةٍ لها تصادُمًا مرنًا في بُعدٍ واحد. إذا توقفت الكرة (A) بعد التصادُم، فإنّ مقدارَ سرعة الكرة (B) واتّجاهَها بعد التصادُم يساوي:

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

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

أ. $2.0\ m/s$ شرقًا.　　ب. $5.5\ m/s$ غربًا.　　ج. $2.75\ m/s$ شرقًا.　　د. $2.5\ m/s$ شرقًا.

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

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

ج. $0.5\ m/s$ بعيدًا عن الشاطئ.　　د. $18\ m/s$ بعيدًا عن الشاطئ.

سيارةٌ رياضيةٌ كتلتُها $(1.0\ \times\ 10^3\ kg)$ تتحرّك شرقًا $(+x)$ بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارها $(90.0\ m/s)$، فتصطدم بشاحنةٍ كتلتُها $(3.0\ \times 10^3\ kg)$ تتحرّك في الاتّجاه نفسه. بعد التصادُم التحمتا معًا وتحركتا على المسار المستقيم نفسه قبل التصادُم بسرعةٍ مقدارُها $(25\ m/s)$. أُجيب عن الأسئلة (12-14) بافتراض الاتّجاه الموجب باتّجاه محور $+x$.

12. ما الزخَم الخطيّ الكُلّي للسيارة والشاحنة بعد التصادُم؟

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

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

13. ما الزخَم الخطيّ الكُلّي للسيارة والشاحنة قبل التصادُم؟

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

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

14. ما السرعة المُتّجهة للشاحنة قبل التصادُم مباشرةً؟

أ. $-25\ m/s$　　ب. $25\ m/s$　　ج. $-3.3\ m/s$　　د. $3.3\ m/s$

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

أ. القوّة المُحصّلة　　ب. الزخَم الخطيّ　　ج. الدفع　　د. الطاقة الحركية

2. أُفسّرُ ما يأتي:

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

ب. في ساحات الألعاب، غالبًا ما يُغطّى سطح الأرض بالعشب أو الرمل حيث يوجد خطر سقوط الأطفال.

3. **أُحلّل:** يقف صيّاد على سطح قاربٍ صيدٍ طويلٍ ساكنٍ، ثم يتحرك من نهاية القارب نحو مقدمته بسرعةٍ مقدارُها (3 m/s). إذا علمت أن كتلة الصيّاد (60 kg)؛ فأُجيب عمّا يأتي:

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

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

4. **أُحلّل:** جسمان (A وB) لهما الطاقة الحركية نفسها، هل يكون لهما مقدار الزخَم الخطيّ نفسه؟ أفسّر إجابتي.

5. **التفكير الناقد:** حمل رائدُ فضاءٍ حقيبة معدّاتٍ خاصةٍ لإصلاح خللٍ في الهيكل الخارجي للمركبة الفضائية، وفي أثناء ذلك انقطع الحبل الذي يثبته بها. أقترحُ طريقةً يُمكن أن يعود بها الرائد إلى المركبة الفضائية. أفسّر إجابتي.

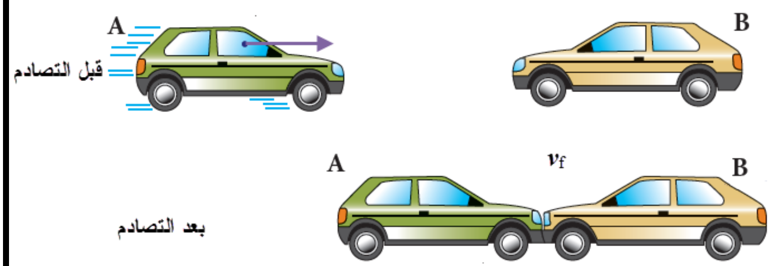
6. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراسة غيثٍ لهذا الدرس، قال: "إنَّ وسائل الحماية في السيارات قديمًا أفضل منها في السيارات الحالية؛ إذ أن هياكل السيارات الحديثة مرنةٌ تتشوّه بسهولة عند تعرّض السيارة لحادث، على عكس هياكل السيارات القديمة الصلبة". أناقشُ صحّةَ قولِ غيث.

7. **أُحلّل وأستنتج:** تتحرّك سيارةٌ كتلتها $(1.35 \times 10^3 \text{ kg})$ بسرعةٍ مقدارُها (15 m/s) شرقًا، فتصطدم بجدارٍ وتتوقف تمامًا بعد التصادُم. إذا علمتُ أنّ زمن التلامس بين السيارة والجدار (0.115 s)، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. التغيُّر في الزخَم الخطيّ للسيارة.

ب. القوّة المتوسطة التي يؤثر به الجدار في السيارة.

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



تصادم سيارتين.

أ. سرعة السيارتين بعد التصادُم، وأُحدّد اتّجاهها.

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

9. **أستخدم الأرقام:** مركبةٌ فضائيةٌ ساكنة تتكون من جزأين، A وB. كتلة الجزء A تساوي $(8.0 \times 10^2 \text{ kg})$،

وكتلة الجزء B تساوي $(1.5 \times 10^3\ kg)$. إذا انفصل الجزء B عن المركبة الفضائية وتحرك مبتعدًا عنها بسرعة $(10.0\ m/s)$ بالنسبة للمركبة، فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. سرعة اندفاع الجزء A من المركبة الفضائية.

ب. الدفع المؤثر في الجزء A من المركبة الفضائية.

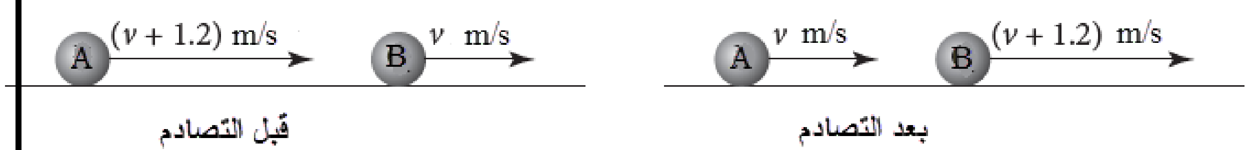
10. **أُصدرُ حُكمًا:** في أثناء دراسة رُوَيْدَا هذه الوحدة، قالت: "إنَّه عندما يقفز شخص من ارتفاعٍ معيّنٍ عن سطح الأرض؛ فإنه يتعيّن عليه أن يُبقي رجليه ممدودتين لحظة ملامسة قدميه سطح الأرض حفاظًا على سلامته". أناقشُ صحة قول رُوَيْدَا بناءً على المفاهيم الفيزيائية التي تعلمتُها في هذه الوحدة.

11. **أحسبُ:** أثّرت قوة محصلة مقدارها $(1 \times 10^3\ N)$ في جسم ساكن كتلته $(10\ kg)$ وحرّكته باتّجاهها فترةً زمنيةً مقدارها $(0.01\ s)$. أحسبُ مقدار ما يأتي:

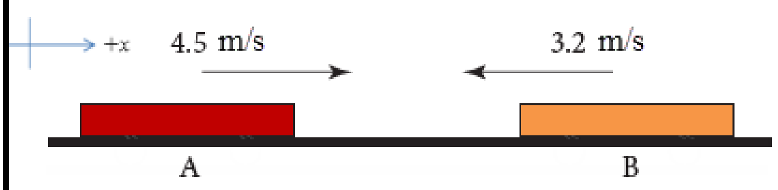
أ. التغيُّر في الزخَم الخطيّ للجسم.

ب. السرعة النهائية للجسم.

12. **أُحلّل وأستنتج:** كرتا بلياردو (A و B) لهما الكتلة نفسها وتتحركان في الاتّجاه نفسه في خط مستقيم، كما هو موضّحٌ في **الشكل**. قبل التصادُم، مقدار سرعة الكرة (A) يزيد بمقدار $(1.2\ m/s)$ عن مقدار سرعة الكرة (B). بعد التصادُم، مقدار سرعة الكرة (A) يساوي مقدار سرعة الكرة (B) قبل التصادُم، ومقدار سرعة الكرة (B) يزيد بمقدار $(1.2\ m/s)$ عن مقدار سرعة الكرة (A). هل التصادُم مرن أم غير مرن؟ أوضّح إجابتي.



13. عربتان (A و B)، تتحركان باتّجاهين متعاكسين على مسار أُفقي مستقيم أملس كما هو موضح في **الشكل**، فتصطدمان رأسًا برأس وترتدان باتّجاهين متعاكسين على المسار المستقيم نفسه. إذا علمت أن 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 مقدار كتلة العربة (B).

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

ج. أوضح هل التصادُم مرنٌ أم غير مرن؟

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

أ. السرعة النهائية لنظام السهم والهدف بعد التصادُم.

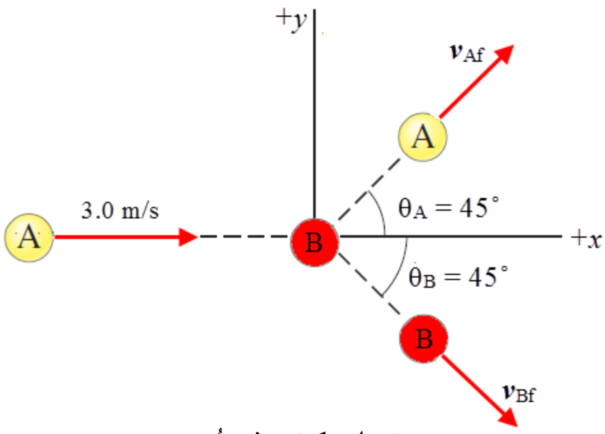
ب. التغيُّر في الطاقة الحركية للنظام.

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

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

ب. أُحدّد نوع التصادُم.

16. كرتا بلياردو كتلة كل منهما $(0.16\ kg)$. تتحرك الكرة الصفراء (A) باتّجاه محور $+x$ بسرعة $(3.0\ m/s)$ نحو الكرة الحمراء (B) الساكنة وتصطدم بها. بعد التصادُم، تحركت الكرة (A) باتّجاه يصنع زاوية $(45°)$ بالنسبة لاتّجاه حركتها الابتدائي، وتحركت الكرة (B) باتّجاه يصنع زاوية $(45°)$ أسفل اتّجاه الحركة الابتدائي للكرة (A)، كما هو موضح في **الشكل المجاور**. أُجيب عمّا يأتي:



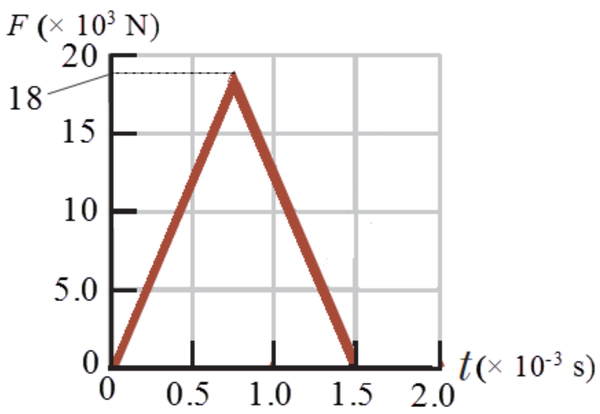
تصادم كرتين في بُعدين.

أ. أحسبُ مقدار سرعة الكرة (A) بعد التصادُم.

ب. أحسبُ مقدار سرعة الكرة (B) بعد التصادُم.

ج. أُحدّد نوع التصادُم مرن أم غير مرن.

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



منحنى (القوّة – الزمن) للقوة المؤثّرة في كرة بيسبول.

أ. ما الذي يُمثّله الرقم (18) على محور القوّة؟

ب. أحسبُ مقدار الدفع المؤثر في الكرة خلال زمن تلامسها مع المضرب.

ج. أحسبُ مقدار السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوّة المُحصّلة فيها باعتبارها ساكنة لحظة تأثير القوّة المُحصّلة.

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

أتأمل الصورة

مدينة الألعاب

يظهر في الصورة ألعاب تتحرك حركة دورانية في مدينة الألعاب. وتتحرك الأجزاء المختلفة للعبة الدوّارة بسرعات وتسارعات مختلفة، وتعمل الألعاب الدوّارة على مسارعة راكبيها بطرائق عدّة، بحيث تحقق لهم الإثارة.

هل تتحقق قوانين نيوتن في الحركة الدورانية؟ وما الكميات الفيزيائية التي أحتاجها لوصف حركة جسم يتحرك حركة دورانية؟

الفكرة العامة:

تتحرك الكثير من الأجسام التي نشاهدها حركة دورانية، ومنها أقراص CD وإطارات السيارات وشفرات المراوح. ولمفهوم العزم أهمية كبيرة في عمل كثير من الأجهزة والأدوات.

الدرس الأول: العزم والاتزان السكوني

Torque and Static Equilibrium

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

الدرس الثاني: ديناميكا الحركة الدورانية

Dynamics of Rotational Motion

الفكرة الرئيسة: يلزمني معرفة كميات فيزيائية عدّة لوصف الحركة الدورانية لجسم، منها: الإزاحة الزاوية، والسرعة الزاوية، والتسارع الزاوي، والعلاقات بينها.

الدرس الثالث: الزخم الزاوي

Angular Momentum

الفكرة الرئيسة: يلزم معرفة الزخم الزاوي وحفظه لتفسير بعض المشاهدات في الحياة اليومية، وأستفيد منه في تطوير مهاراتي في مجالات مختلفة، منها الألعاب الرياضية.

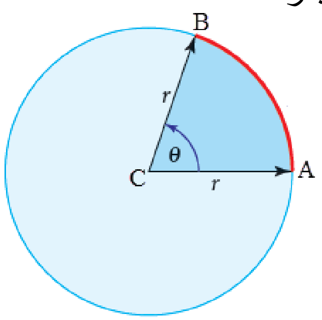
www.shutterstock.com · 1368699761

www.shutterstock.com · 253350835

ملاحظة: نختار إحدى الصورتين بحسب الحجم والوضوح.

تجربة استهلالية: الراديان

المواد والأدوات: ورقة بيضاء، قلم رصاص، شريط لاصق، خيط خفيف، مقصّ، فُرجار، منقلة.



إرشادات السلامة: الحذرُ عند استخدام المقص والفرجار.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1. أضع الورقة على سطح طاولة أُفقي، ثم أُثبتها بالسطح بواسطة الشريط اللاصق.
2. **أقيس:** أُثبت القلم بالفرجار، ثم أرسم دائرة في منتصف الورقة بنصف قطر مناسب، (10 cm) مثلًا، وأُعيّن مركز الدائرة، وأكتب عنده الرمز C.
3. أقص قطعة من الخيط طولها يساوي نصف قطر الدائرة.
4. **ألاحظ:** أُثبت الخيط على قوس الدائرة بالشريط اللاصق كي يُشكل قوسًا كما هو مبين في الشكل، ثم أُحدّد الزاوية المركزية المقابلة له عن طريق رسم خط مستقيم من بداية الخيط إلى مركز الدائرة (الخط AC)، ثم رسم خط مستقيم آخر من نهاية الخيط إلى مركز الدائرة (الخط BC)، كما هو موضح في الشكل.
5. **أقيس** باستخدام المنقلة مقدار الزاوية المركزية المقابلة للقوس الذي شكّله الخيط، وأُدوّنه.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسب:** أقسم طول القوس الذي شكّله الخيط على نصف قطر الدائرة. ما الذي يمثّله الناتج؟ ماذا أستنتج؟
2. **أُقارن** بين قياس الزاوية المركزية بوحدة راد ووحدة درجة. ماذا أستنتج؟ ما العلاقة بين القياسين.
3. **أتواصل:** أُقارن نتائجي بنتائج زملائي في المجموعات الأخرى. هل يوجد بينها أي اختلاف؟
4. **أتوقع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.

الفكرة الرئيسة:

من أجل دراسة الاتزان السكوني للأجسام يلزم معرفة بعض المفاهيم الفيزيائية مثل: العزم ومركز الكتلة، وكيفية حساب كلّ منهما.

نتاجات التعلم:

- أُعرف التأثير الدوراني للقوة على جسم (العزم) بأنه يساوي ناتج الضرب المتجهي لمتجه القوة ($\boldsymbol{F}$) ومتجه موقع نقطة تأثير القوة ($\boldsymbol{r}$) بالنسبة لمحور الدوران.
- أُحدّد مركز الكتلة لجسم منتظم الشكل أو غير منتظم عمليًا
- أُحدّد مركز الكتلة لجسم منتظم الشكل بمعادلة حسابية.
- أُميّز بين الاتزان السكوني والاتزان الحركي.
- أُصمّم تجربة تربط الاتزان بموقع مركز كتلة جسم.

المفاهيم والمصطلحات:

ذراع القوة Lever Arm

العزم Torque

مركز الكتلة Centre of Mass

العزم Torque

ألاحظ في حياتي اليومية أجسامًا تدور حول محور ثابت تحت تأثير قوة أو أكثر، مثل الأبواب، والبراغي، والمفكّات، وغيرها. أنظر إلى **الشكل (1)**. لقد درست سابقًا أنه عند تأثير قوة محصلة في جسم نقطي فإنه يتسارع. وعند تأثير قوة محصلة في جسم غير نقطي (له أبعاد؛ الباب مثلا) يمكن أن يبدأ الجسم بالدوران حول محور ويكتسب تسارعًا زاويًّا.

يُعد **العزم Torque** مقياسًا لمقدرة القوة على إحداث دوران لجسم، وهو كمية متجهة، رمزه ($\boldsymbol{\tau}$)، ويُعرف رياضيًّا بأنه يساوي ناتج الضرب المتجهي لمتجه القوة ($\boldsymbol{F}$) ومتجه موقع نقطة تأثير القوة ($\boldsymbol{r}$) الذي يبدأ من نقطة على محور الدوران وينتهي عند نقطة تأثير القوة. ويُقاس العزم بوحدة N.m حسب النظام الدولي للوحدات، ويُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

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

ويُحسب مقدار العزم كما يأتي:

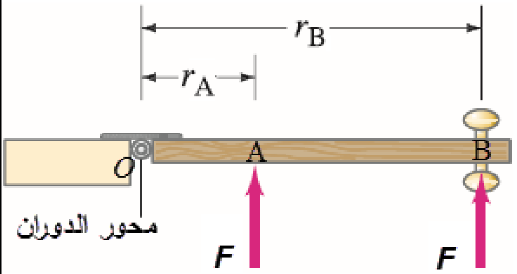
$$\tau = r\, F \sin\theta$$

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

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

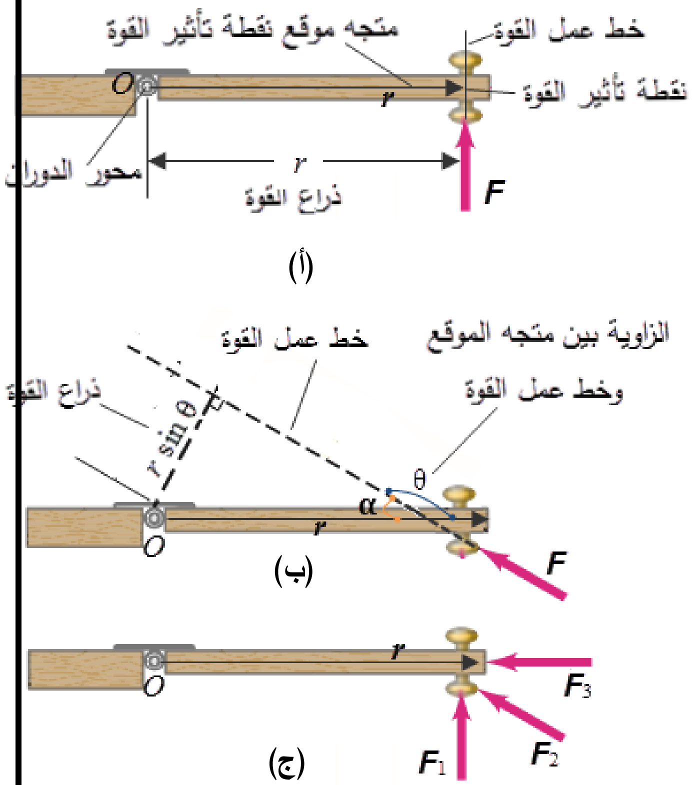
ولاستنتاج العوامل التي يعتمد عليها العزم أنظر إلى **الشكل (2)** الذي يوضح منظر علوي لباب، حيث توجد مفصّلات الباب عند أحد طرفيه، أما مقبضه فمثبّت عند الطرف المقابل للمفصّلات. إن محور الدوران في هذه الحالة هو خطّ وهميّ رأسيّ يمرّ من خلال مُفصّلات الباب. وأحصل على أكبر سرعة زاوية للباب وأكبر عزم عند التأثير بقوة في مقبضه (النقطة B) بدلًا من التأثير بها عند النقطة (A) بالقرب

من محور الدوران، أي بجعل نقطة تأثير القوة أبعد ما يمكن عن محور الدوران، ويزداد مقدار العزم عند التأثير بهذه القوة بزاوية قائمة بالنسبة لمستوى سطح الباب كما هو موضح في **الشكل (2)**، فأنا لا أدفع مقبض الباب أو أسحبه جانبيًّا لفتح الباب بل أدفعه (أو أسحبه) بقوة اتجاهها عمودي على مستوى سطح الباب.



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

يُسمّى امتداد متجه القوة خط عمل القوة، وأحصل عليه برسم خط ينطبق مع متجه القوة. أنظر إلى **الشكل (3)**. أما المسافة العمودية بين خط عمل القوة ومحور الدوران فيُسمّى **ذراع القوة Lever arm**.



الشكل (3): (أ) طول ذراع القوة عند تأثير قوة عموديًّا على مستوى سطح الباب، (ب) وعند تأثيرها بشكل مائل. (ج) تأثير ثلاث قوى متساوية في المقدار في الموقع نفسه.

يوضح **الشكل (3/أ)** قوة $(\boldsymbol{F})$ تؤثر في باب عموديًّا على مستوى سطحه. ورُسم متجه موقع نقطة تأثير القوة بالنسبة لمحور الدوران $(\boldsymbol{r})$ من النقطة (O) الواقعة على محور الدوران نحو نقطة تأثير القوة. وفي هذه الحالة يكون طول ذراع القوة أكبر ما يُمكن، ويكون مساويًا مقدار المتجه $(\boldsymbol{r})$.

ويوضح **الشكل (3/ب)**، كيفية إيجاد ذراع القوة $(\boldsymbol{F})$ عندما لا يكون اتجاه تأثيرها عموديًّا على مستوى سطح الباب، حيث أرسم خط عمل القوة، ثم أرسم خطًّا يبدأ من النقطة (O) الواقعة على محور الدوران يصل إلى خط عمل القوة وعموديًّا عليه، يُمثّل طوله مقدار ذراع القوة. وباستخدام حساب المثلثات أجد أن طول ذراع القوة يساوي $r\sin\theta = r\sin\alpha$، حيث $\sin\alpha = \sin\theta$ كون مجموع الزاويتين يساوي 180°.

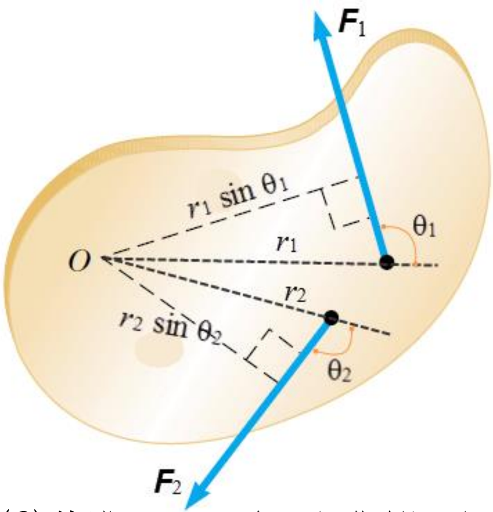
أما **الشكل (3/ج)** فيوضح تأثير ثلاث قوى متساوية في المقدار في الموقع نفسه. يكون العزم الناتج عن القوة $(\boldsymbol{F_1})$ هو الأكبر إذ أن مقدار ذراعها هو الأكبر، يليه العزم الناتج عن القوة $(\boldsymbol{F_2})$، حيث ذراعها يكون أصغر منه للقوة $(\boldsymbol{F_1})$، وينعدم العزم عندما يمر خط عمل القوة بمحور الدوران كما في حالة القوة $(\boldsymbol{F_3})$. كما يزداد العزم بزيادة مقدار القوة مع المحافظة على ثبات اتجاهها.

أستنتج ممّا سبق أن مقدار العزم يتناسب طرديًّا مع كل من مقدار القوة (F) وطول ذراعها $(r\ \sin\theta)$. وبما أن العزم كمية متجهة فإننا نعدّه موجبًا عندما يسبب دوران الجسم في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة، وسالبًا عندما يسبب دوران الجسم في اتجاه حركة عقارب الساعة.

أتحقق ما المقصود بالعزم؟ وعلام يعتمد؟

إيجاد العزم المحصّل Finding Net Torque

كيف أحسب العزم المحصّل المؤثر في جسم عندما تؤثر أكثر من قوة فيه؟ يوضح **الشكل (4)** جسم قابل للدوران حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة يمر بالنقطة (O)، وتؤثر فيه قوتان: $\boldsymbol{F_1}$ تعمل على تدويره بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، و $\boldsymbol{F_2}$ تعمل على تدويره باتجاه حركة عقارب الساعة. في هذه الحالة، أحسب عزم كل قوة حول محور الدوران على حدة، ثم أجد العزم المحصل $(\sum\tau)$ المؤثر في الجسم بجمعها مع مراعاة إشارة كل منها، كما يأتي:



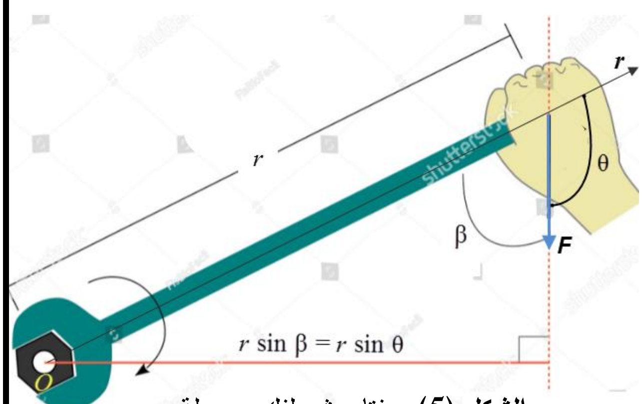
الشكل (4): جسم جاسئ قابل للدوران حول محور يمر بالنقطة (O) عموديًّا على مستوى الصفحة، ويؤثر فيه قوتان $\boldsymbol{F_1}$ و $\boldsymbol{F_2}$.

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

أتحقق كيف أحسب عزم عدّة قوى تؤثر في جسم قابل للدوران حول محور ثابت؟ وكيف أُحدّد اتجاهه؟

المثال 1 ملاحظة: Vector r must end at the intersection of the lines at the middle of the hand.

يستخدم زيد مفتاح شد طوله (25.0 cm) لشد صامولة في دراجة، حيث أثّر بقوة مقدارها $(1.60\ \times 10^2\ \text{N})$ في طرف مفتاح الشد في الاتجاه الموضح في **الشكل (5)**. فإذا علمت أن مقدار الزاوية (β) يساوي (75°)، فأحسب مقدار العزم المؤثر في المفتاح وأُحدّد اتجاهه.



الشكل (5): مفتاح شد لفك صمولة.

stock vector ID: 1972663007

المعطيات:

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

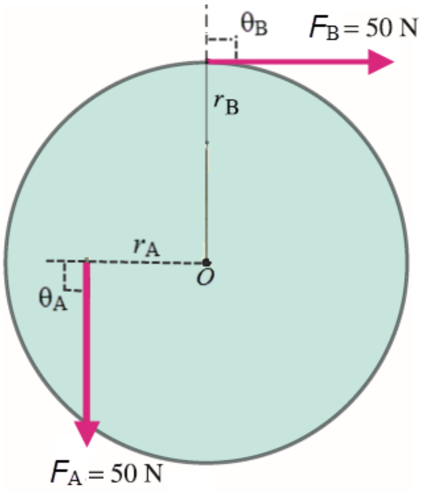
المطلوب: $\tau = ?$

الحلّ:

أستخدم علاقة العزم لحساب عزم قوة زيد حول محور الدوران المار بالنقطة (O)، علمًا بأن: $\beta + \theta = 180^\circ$، فتكون $\theta = 105^\circ$، و $\sin 105^\circ = \sin 75^\circ$. أضع إشارة السالب لأن قوة زيد تعمل على تدوير مفتاح الشد باتجاه حركة عقارب الساعة.

$$\tau = -r\,F\sin\theta$$
$$= -\,0.250\ \times 1.60\ \times 10^2 \sin 105^\circ$$
$$= \ -38.8\ \mathrm{N.m}$$

المثال 2



الشكل (6): بكرة مصمتة.

بكرة مصمتة قُطرها (r_B)، يمرّ في مركزها (O) محور دوران عمودي على مستوى الصفحة، كما هو موضح في **الشكل (6)**. إذا علمت أن القوة ($\boldsymbol{F}_A$) تؤثر في البكرة على بُعد ($r_A = 30.0$ cm) من محور الدوران، وتؤثر القوة ($\boldsymbol{F}_B$) عند حافة البكرة حيث ($r_B = 50.0$ cm)، واعتمادًا على المعلومات المثبتة في الشكل، أحسب مقدار العزم المحصّل المؤثر في البكرة، وأُحدّد اتجاهه.

المعطيات:

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

المطلوب: $\sum\tau = ?$

الحلّ:

تعمل القوة ($\boldsymbol{F}_A$) على تدوير البكرة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانها الذي يمر بالنقطة (O)، لذا يكون عزمها موجبًا، أما القوة ($\boldsymbol{F}_B$) فتعمل على تدويرها باتجاه حركة عقارب الساعة حول محور الدوران نفسه، لذا يكون عزمها سالبًا. يصنع ($\boldsymbol{r}_A$) زاوية مقدارها (90°) مع خط عمل القوة ($\boldsymbol{F}_A$)، ويصنع ($\boldsymbol{r}_B$) زاوية مقدارها (90°) مع خط عمل القوة ($\boldsymbol{F}_B$).

أجد العزم المحصّل حول محور دوران البكرة كما يأتي:

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

بما أن العزم المحصّل سالب فإنه يعمل على تدوير البكرة باتجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانها.

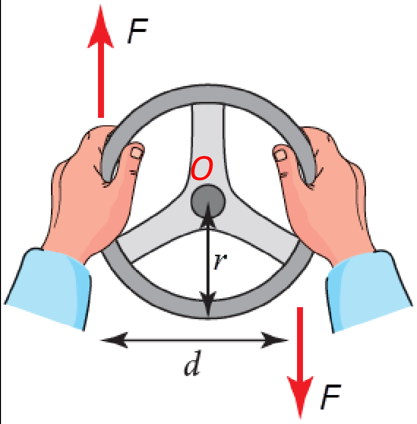
تمرين.

يدفع عامل عربة كما هو موضح في **الشكل (7)**، عن طريق التأثير في مقبضي ذراعيها بقوة مجموعها $(F = 1.80 \times 10^2 \text{ N})$ رأسيًّا إلى أعلى لرفعهما إلى أعلى بزاوية (25°) بالنسبة لمحور $+x$. إذا علمت أن بُعد مقبضي العربة عن محور الدوران يساوي (1.50 m)، فأحسب مقدار عزم القوة $\boldsymbol{F}$ المؤثر في العربة حول محور الدوران، وأُحدّد اتجاهه.

الشكل (7): عامل يدفع عربة.

الازدواج Couples

يوضح **الشكل (8)** منظر علوي لمقود سيارة نصف قُطره (r). تؤثر اليد اليمنى في المقود بقوة مقدارها (F) عموديًّا إلى أسفل، تؤدي إلى دورانه باتجاه حركة عقارب الساعة حول محور دورانه الذي يمر بالنقطة (O)، بينما تؤثر اليد اليسرى في المقود بنفس مقدار القوة (F) لكن عموديًّا إلى أعلى فتُديره باتجاه حركة عقارب الساعة أيضًا. وأحسب العزم المحصل الناتج عن القوتين حول محور الدوران نفسه كما يأتي:



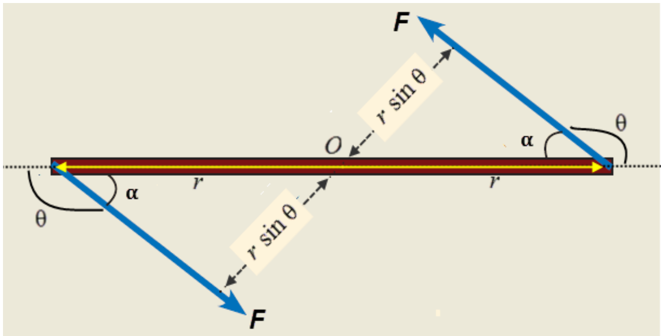
الشكل (8): الازدواج المؤثر في مقود سيارة.

$$\sum\tau = \tau_1 + \tau_2$$
$$= -F\,r - F\,r$$
$$= -F\,(2r)$$
$$= -F\,d = \tau_{\text{couple}}$$

حيث (d) البُعد العمودي بين القوتين. عندما تكون القوتان متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا وخطّا عملهما غير منطبقين، فإنهما تُشكّلان ازدوجًا Couple، يُسمّى العزم الناتج عنه عزم الازدواج $(\boldsymbol{\tau}_{\text{couple}})$، وهو يساوي ناتج ضرب مقدار إحدى القوتين المتساويتين في البُعد العمودي بينهما.

والإشارة السالبة لعزم الازدواج في العلاقة السابقة تعني أن المقود يدور باتجاه حركة عقارب الساعة. وعمومًا، أحسب عزم الازدواج عندما تصنع قوتا الازدواج زاوية غير قائمة مع المتجه $(\boldsymbol{r})$، كما هو موضح في **الشكل (9)**، باستخدام العلاقة الآتية:

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



الشكل (9): تصنع قوتا الازدواج زاوية غير قائمة مع قضيب فلزي قابل للدوران حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة يمر في منتصف القضيب عند النقطة (O).

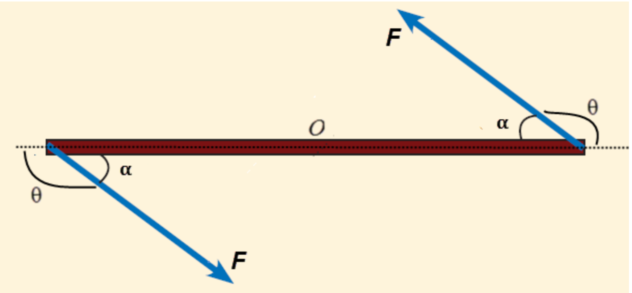
ملاحظة: يرجى وضع نقطة سوداء عند محور الدوران حتى ينطلق المتجهان منها

ويعمل عزم الازدواج في الشكل على تدوير القضيب الفلزي بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة، يمر بالنقطة (O).

أتحقق ما المقصود بعزم الازدواج؟ وعلام يعتمد؟

المثال 3

مسطرة مترية فلزية قابلة للدوران حول محور ثابت يمر في منتصفها عند النقطة O وعمودي على مستوى الصفحة، كما هو موضح في **الشكل (10)**. أثّر فيها قوتان شكّلتا ازدواجًا، فإذا علمت أن مقدار كل من القوتين $(80.0\ N)$، ومقدار الزاوية (θ) يساوي (143°) فأحسب مقدار عزم الازدواج المؤثر في المسطرة، وأُحدّد اتجاهه.



الشكل (10): ازدواج مؤثر في مسطرة مترية.

المعطيات:

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

المطلوب: $\tau_{couple} = ?$

الحلّ:

تشكّل القوتان ازدواجًا يعمل على تدوير المسطرة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول محور ثابت يمر بالنقطة (O).

والزاوية (θ) بين متجه القوة ومتجه موقع نقطة تأثير القوة تساوي (143°)، $\sin 143^\circ = \sin 37^\circ = 0.60$، وأحسب مقدار عزم الازدواج كما يأتي:

$$\begin{aligned}\tau_{couple} &= 2F\, r \sin\theta \\ &= 2 \times 80.0 \times 0.50\ \ \sin 143^\circ \\ &= 48\ N.m\end{aligned}$$

الاتزان Equilibrium

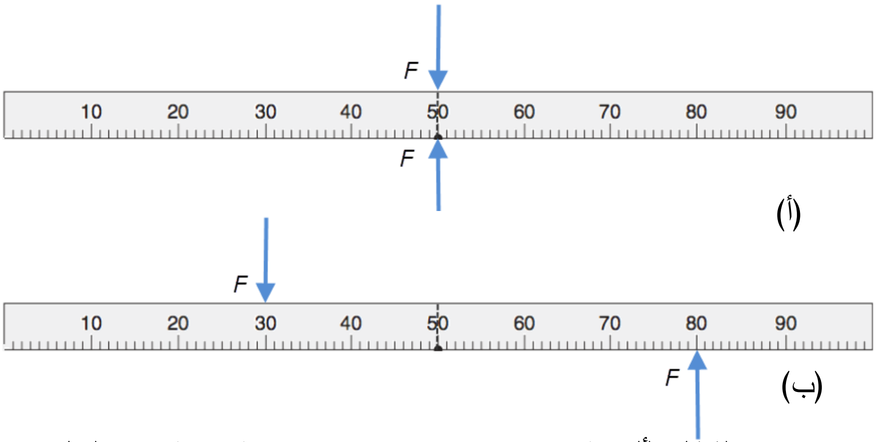
درست في صفوف سابقة أحد شرطي اتزان الأجسام، وهو أن جسم ما يكون في حالة اتزان ميكانيكي عندما تكون القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا؛ $(\sum \boldsymbol{F} = 0)$، حيث يكون الجسم ساكنًا أو متحركًا بسرعة ثابتة مقدارًا واتجاهًا، إذ يكون الجسم في حالة اتزان سكوني Static equilibrium عندما يكون في حالة سكون $(v = 0)$، وفي حالة اتزان انتقالي (ديناميكي) Dynamic equilibrium عندما يتحرك بسرعة ثابتة مقدارًا في خط مستقيم. وهذا الشرط $(\sum \boldsymbol{F} = 0)$ كافٍ لتحقيق الاتزان لجسم فقط عندما تؤثر القوى جميعها في الجسم عند النقطة نفسها.

يوضح **الشكل** (11/أ) مسطرة مترية موضوعة على سطح طاولة وتؤثر فيها قوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا في الموقع نفسه، حيث تكون المسطرة متزنة انتقاليًّا، لأن القوة المحصلة المؤثرة فيها تساوي صفرًا. أما **الشكل** (11/ب) فيوضح المسطرة نفسها عند تأثير القوتين نفسيهما فيها في موقعين مختلفين. تكون المسطرة هنا متزنة انتقاليًّا أيضًا، حيث القوة المحصلة المؤثرة فيها تساوي صفرًا، ولكن ألاحظ أن المسطرة تتحرك حركة دورانية؛ لأن خطي عمل القوتين المؤثرتين فيها غير متطابقين، فيكون العزم المحصل المؤثر فيها لا يساوي صفرًا. إذن لا بُدّ من توفر شرط ثانٍ يحقق الاتزان الدوراني للجسم، وهذا الشرط مرتبط بالعزم. كي يكون الجسم في حالة اتزان ميكانيكي عند تأثير قوى عدّة فيه يجب تحقّق الشرطين الآتيين معًا:

الشرط الأول: أن تكون القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا $(\sum \boldsymbol{F} = 0)$.

الشرط الثاني: العزم المحصل المؤثر في الجسم يساوي صفرا $(\sum \boldsymbol{\tau} = 0)$.

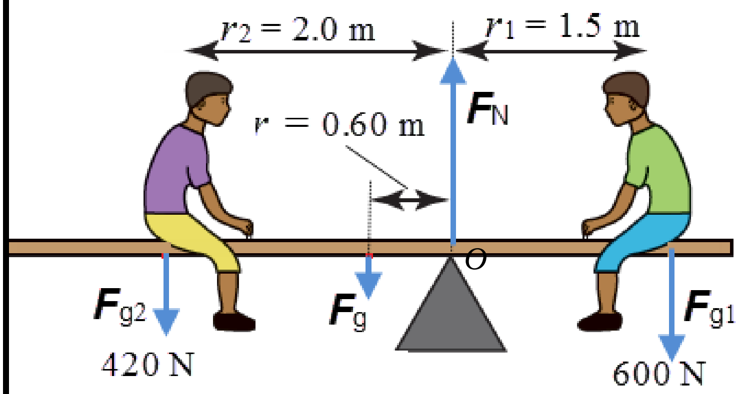
أتحقق ما شرطا اتزان جسم؟



الشكل (11): (أ) خطا عمل القوتين المؤثرتين في المسطرة متطابقان، (ب) خطا عمل القوتين المؤثرتين غير متطابقين.

المثال 4

يجلس فادي (F_{g1}) وصقر (F_{g2}) على جانبي لعبة اتزان (see – saw) تتكون من لوح خشبي منتظم متماثل وزنه (F_g) يؤثر في منتصفه، يرتكز على نقطة تبعد (0.60 m) يمين مركز كتلة اللوح الخشبي، كما هو موضح في **الشكل** (12). إذا كان النظام المكوّن من اللعبة والطفلين في حالة اتزان سكوني واللوح الخشبي في وضع أفقي، ومستعينًا بالبيانات المثبتة على الشكل أحسب مقدار ما يأتي:



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

أ. وزن اللوح الخشبي (F_g).

ب. القوة (F_N) التي تؤثر بها نقطة الارتكاز في اللوح الخشبي.

المعطيات:

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

المطلوب: $F_g = ?, F_N = ?$

الحلّ:

أ. أُلاحظ أن اللوح الخشبي يتأثر بأربع قوى، هي: وزني الطفلين (F_{g1}) و(F_{g2})، ووزن اللوح (F_g) يؤثر في منتصفه، والقوة العمودية (F_N) التي تؤثر بها نقطة الارتكاز في اللوح. وبما أن النظام متزن، ومقداري القوة العمودية ووزن اللوح غير معلومين فإنني أُطبّق الشرط الثاني للاتزان حول محور يمر في إحدى نقطتي تأثير هاتين القوتين؛ إذ أن عزم قوة حول محور يمر في نقطة تأثيرها يساوي صفرًا (لأن طول ذراع القوة في هذه الحالة يساوي صفرًا). أُطبّق الشرط الثاني للاتزان حول محور يمر في نقطة ارتكاز اللوح الخشبي (النقطة O)، مع ملاحظة أن عزم القوة العمودية يساوي صفرًا $(\tau_{F_N(O)} = 0)$، واللوح متزن أُفقيًّا لذا فإن $(\theta = 90°)$.

$$\sum\tau = 0$$

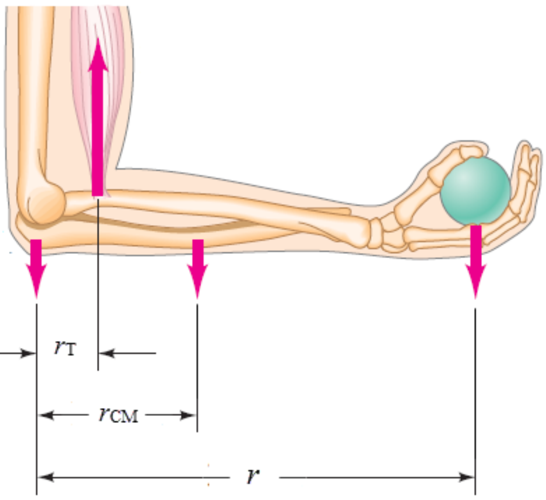
$$F_{g2}\, r_2 + F_g\, r - F_{g1}\, r_1 = 0$$
$$F_{g1}\, r_1 = F_{g2}\, r_2 + F_g\, r$$
$$600.0 \times 1.50 = 420.0 \times 2.00 + F_g \times 0.60$$
$$F_g = \frac{900 - 840}{0.60} = 100 \text{ N}$$

ب. النظام –وبالتالي اللوح الخشبي– في حالة اتزان سكوني، لذا فإن القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا بحسب الشرط الأول من شرطي الاتزان. وأُطبّق القانون الثاني لنيوتن في اتجاه محور y؛ لأنه لا توجد قوى تؤثر في اتجاه محور x.

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

تمرين. **ملاحظة:** تغيير r_{CM} بعد رسم الشكل إلى r_{Fg} وتوضيح القوى على الرسم

أُحلّل وأستنتج: يرفع علي بيده ثقلاً وزنه (40.0 N). إذا علمت أن نقطة التقاء العضلة ثنائية الرأس بالساعد تبعد $(r_T = 5.0 \text{ cm})$ عن المرفق، وطول عظم الساعد (40.0 cm)، ووزن عظم الساعد والأنسجة فيه (30.0 N) ويؤثر على بُعد (15.0 cm) عن المرفق،



الشكل (13): تسحب العضلة ذات الرأسين عظمة الساعد بقوة (F_T) رأسيًّا لأعلى.

وبُعد نقطة تأثير القوة في اليد ($r = 35.0$ cm) عن المرفق، والساعد متزن أفقيًّا في الوضع الموضّح في **الشكل** (13)، فأحسب مقدار ما يأتي:

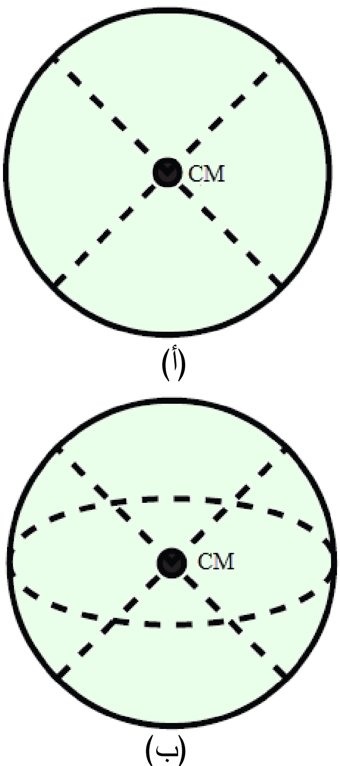
أ. قوة الشد في العضلة (F_T) المؤثرة في الساعد باعتبارها رأسيًّا لأعلى.

ب. القوة التي يؤثر بها المرفق في الساعد (F_J).

مركز الكتلة Centre of Mass

يُعرف **مركز الكتلة Centre of mass (CM)** على أنه النقطة التي يُمكن اعتبار كتلة الجسم كاملة مركّزة فيها. وقد يقع مركز الكتلة داخل الجسم أو خارجه، اعتمادًا على شكل الجسم. والآن كيف أُحدّد موقع مركز الكتلة؟

ينطبق موقع مركز كتلة أي جسم متماثل منتظم توزيع الكتلة (متجانس) على مركزه الهندسي. فمثلًا، يقع مركز كتلة قضيب فلزي منتظم داخله، وفي منتصف المسافة بين نهايتيه. ويقع مركز كتلة مسطرة، أو أسطوانة، أو كرة أو مكعب في المركز الهندسي لكل منها. كما يُمكن أن يكون موقع مركز كتلة جسم عند نقطة مادية في الجسم إذا كان الجسم مصمتًا، مثل قرص مصمت، أو عند نقطة خارج كتلة الجسم إذا كان مجوّفًا، مثل حلقة دائرية أو كرة مجوفة مثلًا. أنظر إلى **الشكل** (14).



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

وعندما يتكون النظام من جسيمين مثلًا يتصلان معًا بقضيب، فإن مركز كتلة هذا النظام يقع على الخط الواصل بين الجسيمين، ويكون أقرب إلى الجسيم الأكبر كتلة. أنظر إلى **الشكل** (15) الذي يوضح رافع أثقال يحمل ثقلين متساويين متصلين معًا بقضيب فلزي منتظم، حيث يقع مركز ثقل النظام في منتصف المسافة بين الثقلين.

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

يوضح **الشكل** (16) نظامًا يتكون من جسيمين كتلتيهما (m_A, m_B)، يتصلان معًا بقضيب خفيف يمكنني إهمال كتلته. ولحساب مركز الكتلة لهذا النظام أختار نظام محاور يقع فيه الجسيمان على محور x عند موقعين (x_A, x_B). لتحديد الإحداثي x لموقع مركز كتلة النظام (x_{CM}) أستخدم العلاقة الآتية:

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

ولنظام يتكون من عدد (n) من الجسيمات موزّعة أُحدّد موقع مركز الكتلة كما يأتي:

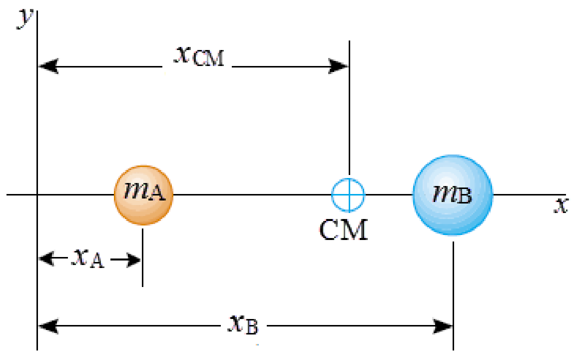
$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C + \cdots + m_n x_n}{m_A + m_B + m_C + \cdots + m_n} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i}$$

$$= \frac{\sum_i m_i x_i}{M}$$

حيث (x_i) الإحداثي x للجسيم (i)، و $(M = \sum_i m_i)$ الكتلة الكلية للنظام.

أُفكّر

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



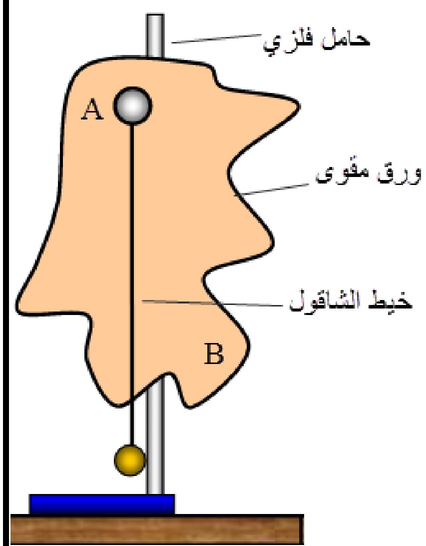
الشكل (16): مركز الكتلة لجسيمين مختلفين في الكتلة يقعان على محور x هو (x_{CM})، يكون أقرب للكتلة الأكبر.

أما الجسم غير منتظم الشكل، فيكون مركز كتلته أقرب إلى المنطقة ذات الكتلة الأكبر. وأُنفّذ التجربة الآتية لأتعرف كيفية تحديد مركز الكتلة لكل من جسم منتظم الشكل وجسم غير منتظم الشكل.

التجربة 1 تحديد مركز الكتلة

الموادّ والأدوات:

مسطرة مترية، خيط خفيف غير قابل للاستطالة، قطعة ورق مقوّى، حامل فلزي، خطّاف، قلم رصاص، مقص، مثقب، خيط الشاقول.



إرشادات السلامة:

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

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

الجزء الأول.

1. أضع الحامل الفلزي على سطح طاولة أفقي، ثم أُثبّت أحد طرفي الخيط بالحامل وطرفه الآخر بالخطّاف.

2. **أُلاحظ:** أُعلّق المسطرة المترية بالخطاف من مواقع مختلفة حتى أصل إلى نقطة التعليق التي تصبح عندها المسطرة مستقرّة بوضع أُفقي (متزنة)، وأضع عندها إشارة باستخدام قلم الرصاص. وأُلاحظ موقع هذه النقطة بالنسبة للمسطرة، آخذًا سماكة المسطرة بالحسبان.

3. **أقيس** بعد النقطة التي اتزنت المسطرة عند تعليقها منها عن كل من نهايتيها. أُدون بُعد هذه النقطة.

الجزء الثاني.

4. أقص قطعة الورق المقوّى لأحصل على شكل غير منتظم، وأثقب عند حافته عدة ثقوب صغيرة متباعدة، ثقبان على الأقل عند النقطتين مثل: A و B .

5. **أُجرّب:** أُعلّق قطعة الورق المقوّى (الشكل غير المنتظم) من أحد الثقبين في الحامل الرأسي، وأُعلق خيط الشاقول بالحامل الرأسي أيضًا، وأنتظر حتى يستقر كل منهما ويتوقف عن التأرجح. ثم أرسم خطًّا رأسيًّا على قطعة الورق المقوّى على امتداد خيط الشاقول، كما هو موضح في الشكل.

6. أُكرّر الخطوة السابقة بتعليق قطعة الورق المقوّى من الثقب الآخر.

التحليل والاستنتاج:

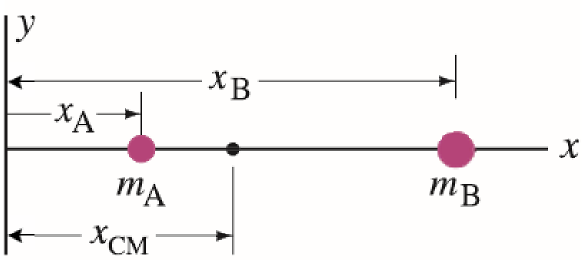
1. **أحلّل وأستنتج:** عند أي المواقع اتزنت المسطرة المترية عند تعليقها؟ ماذا تسمّى هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟
2. **أحلّل وأستنتج:** أُحدّد نقطة تقاطع الخطين على قطعة الورق المقوّى، ما الذي تمثّله هذه النقطة؟ ماذا أستنتج؟
3. **أقارن** بين موقع مركز الكتلة للمسطرة المترية وموقع مركز الكتلة للشكل غير المنتظم من قطعة الورق المقوّى. ماذا أستنتج؟ أُفسّر إجابتي.
4. **أتوقّع** ما يحدث لقطعة الورق المقوّى غير المنتظمة عند تعليقها من نقطة تقاطع الخطين. أُفسر إجابتي.

لاحظت بعد تنفيذ التجربة أن مراكز كتل الأجسام المنتظمة والمتماثلة، مثل المسطرة، تقع في مراكزها الهندسية، أما الأجسام غير المنتظمة وغير المتماثلة فتكون مراكز كتلها أقرب للجزء الأكبر كتلة منها. كما لاحظت أن جسم ما يكون متزنًا عند تعليقه من مركز كتلته حيث العزم المحصل المؤثر فيه يساوي صفرًا.

أتحقق أين يقع مركز كتلة جسم منتظم متماثل؟ وأين يقع مركز كتلة جسم غير منتظم الشكل؟

المثال 5

نظام يتكون من كرتين $(m_A = 1.0\ kg)$ و $(m_B = 3.0\ kg)$، كما هو موضح في **الشكل (17)**. إذا علمت أن $(x_A = 5.0\ cm)$ و $(x_B = 15.0\ cm)$ فأُحدّد موقع مركز كتلة النظام.



الشكل (17): نظام مكوّن من كرتين تقعان 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}):

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

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

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

أُلاحظ أن موقع مركز الكتلة أقرب للكتلة الأكبر.

تمرين

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

مراجعة الدرس

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

2. **أُفسّر:** إذا أردت أن أفتح باب دوّار فأُحدّد موقع نقطة تأثير القوة بحيث أدفع الباب بأقل مقدار من القوة. أُحدّد بأي اتجاه أؤثر بهذه القوة في الباب؟

3. **أوضّح** المقصود بمركز كتلة جسم.

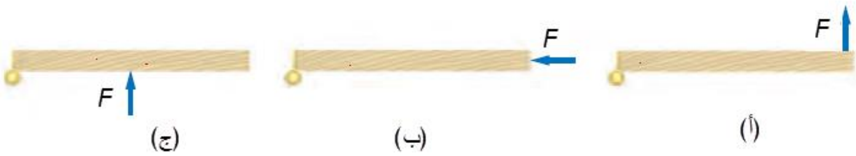
4. أثّرت قوى عدّة في جسم بحيث تمر خطوط عملها في مركز كتلته، وكانت القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا. هل يكون الجسم متزنًا أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

5. **أتوقع:** توضع قطع رصاص على أطراف الأجزاء الفلزية من إطارات السيارات لمنعها من الاهتزاز في أثناء دورانها. أتوقع أين توجد مواقع مراكز كتل هذه الإطارات بعد وضع قطع الرصاص عليها.

6. **أقارن** بين الاتزان السكوني والاتزان الحركي (الانتقالي) من حيث: القوة المحصلة المؤثرة، السرعة الخطية، التسارع الخطي.

7. **أُحلّل وأستنتج:** رأت ذكرى أخاها يحاول فك إطار سيارته المثقوب باستخدام مفتاح شد لفك الصواميل التي تُثبّت الإطار، ولكنه لم يستطع فكها. أذكر طريقتين على الأقل يُمكن أن تقترحهما ذكرى على أخيها لمساعدة على فك الصواميل. أُفسّر إجابتي.

8. **أُقارن:** يوضح الشكل أدناه منظر علوي لقوة محصلة مقدارها (F) تؤثر في الباب نفسه عند مواقع مختلفة. أُرتّب العزم المحصّل المؤثر في الباب تصاعديًّا.



9. **التفكير الناقد:** عند انطلاق سيارة بشكل مفاجئ يرتفع الجزء الأمامي لها إلى أعلى. أُفسّر ذلك.

الفكرة الرئيسة:

يلزمني معرفة كميات فيزيائية عدّة لوصف الحركة الدورانية لجسم، منها: الإزاحة الزاوية، السرعة الزاوية، التسارع الزاوي، وعزم القصور الذاتي والعلاقات بينها.

نتاجات التعلم:

– أوضّح المقصود بكل من: الإزاحة الزاوية، والسرعة الزاوية المتوسطة، والتسارع الزاوي المتوسط.

– أحسب مقدار كل من: السرعة الزاوية، والتسارع الزاوي.

– أستنتج أن عزم القصور الذاتي لجسم هو مقياس لممانعة الجسم لإحداث تغيّر في حركته الدورانية.

– أُعبّر عن عزم القصور الذاتي لجسم بمعادلة.

– أُعبّر عن القانون الثاني لنيوتن لجسم صلب يدور حول محور ثابت.

المفاهيم والمصطلحات:

الإزاحة الزاوية Angular Displacement

السرعة الزاوية المتوسطة Average Angular Velocity

التسارع الزاوي المتوسط Average Angular Acceleration

عزم القصور الذاتي Moment of Inertia

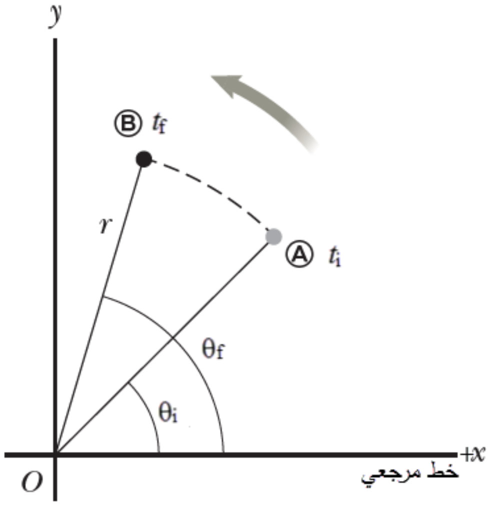
وصف الحركة الدورانية Description of Rotational Motion

عندما أُنعِم النظر في حركة المروحة أجد أنها تدور حول محور ثابت يمر بمركزها، ولا تنتقل من مكان إلى آخر. يُطلق على هذا النوع من الحركة اسم الحركة الدورانية. وأصف حركتها باستخدام المصطلحات الآتية.

الإزاحة الزاوية Angular Displacement عندما يدور جسم بزاوية معيّنة فإن جميع جسيماته تدور بالزاوية نفسها، و**الموقع الزاوي Angular position** لأي جسيم عليه هو الزاوية (θ) التي يصنعها الخط الواصل بين الجسيم ونقطة الأصل مع الخط المرجعي (محور $+x$). فالموقع الزاوي للجسيم عند النقطة A في **الشكل (18)** هو (θ_i) عند اللحظة (t_i)، ويصبح (θ_f) عند اللحظة (t_f) نتيجة دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة. أما **الإزاحة الزاوية ($\Delta\theta$) Angular displacement** فهي التغير في الموقع الزاوي، وتساوي الزاوية التي يمسحها نصف قطر المسار الدائري الذي يدور مع الجسم. ويُعدّ الدوران بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة موجبًا، بينما يُعدّ الدوران باتجاه حركة عقارب الساعة سالبًا. وأحسب الإزاحة الزاوية ($\Delta\theta$) للجسم الموضح في **الشكل (18)** كما يأتي:

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

أتحقق ما المقصود بالإزاحة الزاوية لجسم؟



الشكل (18): تغير الموقع الزاوي لجسيم على جسم يدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

السرعة الزاوية Angular Velocity

تعلمت سابقاً حساب السرعة الخطية المتوسطة لجسم يتحرك حركة انتقالية من موقع الى آخر. بالمثل، عندما يتحرك جسم حركة دورانية يمكن تعريف **السرعة الزاوية المتوسطة** **Average angular velocity** ($\bar{\omega}$) بأنها نسبة الإزاحة الزاوية ($\Delta\theta$) لذلك الجسم إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة، وتعطى بالعلاقة الآتية:

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

أما سرعة الجسم الزاوية عند لحظة زمنية معيّنة فتسمّى السرعة الزاوية اللحظية Instantaneous angular velocity (ω)، ووحدة قياسها هي (rad/s). وفي هذه الوحدة، أينما ورد مصطلح السرعة الزاوية فإنه يعني السرعة الزاوية اللحظية. وعندما تكون السرعة الزاوية ثابتة، فإن السرعة الزاوية المتوسطة تساوي السرعة الزاوية اللحظية.

الربط مع الفلك

الأرض جسم يتحرك حركة دورانية، ويكون لجميع أجزائها الإزاحة الزاوية نفسها، وبالتالي السرعة الزاوية نفسها، في حين يقطع كل جزء منها مسافات مختلفة في كل دورة نتيجة اختلاف بُعد كل منها عن محور الدوران.

عند دوران جسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة تكون إزاحته الزاوية موجبة، لذا فإن سرعته الزاوية موجبة أيضًا. أما عند دورانه باتجاه حركة عقارب الساعة فإن إزاحته الزاوية وسرعته الزاوية سالبتان.

أتحقق ما المقصود بالسرعة الزاوية المتوسطة؟

التسارع الزاوي Angular Acceleration

عند تغيّر مقدار السرعة الزاوية لجسم من (ω_i) إلى (ω_f) خلال فترة زمنية (Δt) يكون له تسارع زاوي، ويُعرف **التسارع الزاوي المتوسط** **Average angular acceleration** بأنه نسبة التغيّر في مقدار السرعة الزاوية إلى الزمن اللازم لحدوث هذا التغيّر، رمزه ($\bar{\alpha}$) ويُقاس بوحدة (rad/s^2):

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

أما التسارع الزاوي لجسم عند لحظة زمنية معيّنة فيسمّى التسارع الزاوي اللحظي Instantaneous angular acceleration (α). وعند دوران جسم بتسارع زاوي ثابت فإن تسارعه الزاوي المتوسط يساوي تسارعه الزاوي اللحظي؛ أي أن $\alpha = \bar{\alpha}$. وسوف أستخدم مصطلح التسارع الزاوي للإشارة إلى التسارع الزاوي اللحظي؛ للاختصار.

وأستفيد من إشارة كل من السرعة الزاوية والتسارع الزاوي في تحديد ما إذا كان الجسم يدور بتسارع أم بتباطؤ؛ فعندما تكون إشارتا السرعة الزاوية والتسارع الزاوي متماثلتين فإن الجسم يدور بتسارع، أما إذا كانت إشارتاهما مختلفتين فإن الجسم يدور بتباطؤ.

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

أتحقق ما المقصود بالتسارع الزاوي المتوسط؟ وما وحدة قياسه؟

المثال 6

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

أ. التسارع الزاوي المتوسط.

ب. السرعة الزاوية اللحظية بعد مرور (20.0 s) من بدء دوران القرص.

المعطيات:

$\omega_i = 0, \omega_f = 3.00 \times 10^3 \text{ rad/s}, t = 30.0 \text{ s}.$

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

الحلّ: $\bar{\alpha} = \alpha$.

أ. أستخدم المعادلة الآتية لحساب التسارع الزاوي المتوسط:

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

$$= \frac{3.00 \times 10^3 - 0}{30.0}$$

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

ب. أستخدم معادلة التسارع الزاوي لحساب السرعة الزاوية:

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

$$\omega_f = \omega_i + \bar{\alpha}\, t$$
$$= 0 + 1.00 \times 10^2 \times 20.0$$
$$= 2.00 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: يدور إطار سيارة بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة بسرعة زاوية ثابتة مقدارها $(2.0\ \mathrm{rad/s})$ مدة زمنية مقدارها $(20.0\ \mathrm{s})$، ثم تسارع بعد ذلك بتسارع زاوي ثابت مقداره $(3.5\ \mathrm{rad/s^2})$ مدة زمنية مقدارها $(10.0\ \mathrm{s})$.

أحسب مقدار ما يأتي:

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

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

عزم القصور الذاتي والقانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية

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

عندما يتحرك جسم حركة دورانية فإن مقدار تسارعه الزاوي يتناسب طرديًّا مع مقدار العزم المحصّل المؤثر فيه، أي أن:

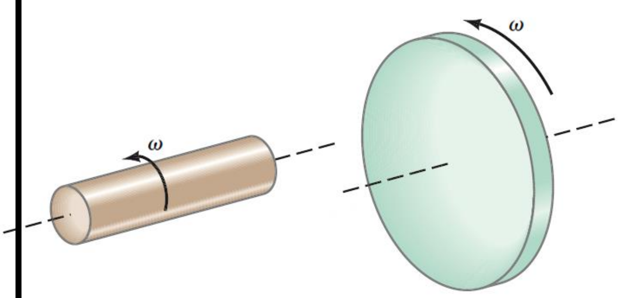
$$\alpha \propto \sum \tau$$

وهذا يُناظر القانون الثاني لنيوتن في الحركة الانتقالية: $a \propto \sum F$، حيث استخدمنا العزم المحصّل مكان القوة المحصّلة، والتسارع الزاوي مكان التسارع الخطي. وتعلمت أن القانون الثاني لنيوتن يُكتب في الصورة الآتية: $a = \frac{\sum F}{m}$، حيث يمثّل قصور الجسم (m) ثابت التناسب.

وأسأل، ما الذي يؤدي دور الكتلة في حالة الحركة الدورانية؟ **عزم القصور الذاتي Moment of inertia** في الحركة الدورانية يقابل الكتلة (m) في الحركة الانتقالية، ومقداره يساوي ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في مربّع بُعده عن محور الدوران (r^2)، رمزه (I)، ويُحسب عزم القصور الذاتي لجسم باستخدام العلاقة الآتية:

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

ويُقاس عزم القصور الذاتي بوحدة $(\mathrm{kg.m^2})$ حسب النظام الدولي للوحدات. ويُعد عزم القصور الذاتي مقياسًا لممانعة الجسيم لتغيير حالته الحركية الدورانية، تمامًا كما الكتلة (m) مقياس لممانعة الجسم لتغيير حالته الحركية الانتقالية. ويلزم عزم محصّل لتغيير الحالة الحركية الدورانية لجسم.



الشكل (19): عزم القصور الذاتي للأسطوانة (أ) أكبر منه للأسطوانة (ب) رغم أن لهما الكتلة نفسها.

يعتمد عزم القصور الذاتي لجسم على كيفية توزيع كتلته حول محور دورانه. فمثلًا، عزم القصور الذاتي للأسطوانة الموضحة في **الشكل (19/أ)** أكبر منه للأسطوانة الموضحة في **الشكل (19/ب)** رغم أن لهما

الكتلة نفسها؛ وذلك لأن قُطر الأسطوانة (أ) أكبر من قُطر الأسطوانة (ب). فتحريك الأسطوانة ذات القُطر الأكبر حركة دورانية أو إيقافها أو تغيير حالتها الحركية الدورانية يكون أصعب منه للأسطوانة الأخرى.

وكلّما تركّزت كتلة الجسم بعيدًا عن محور دورانه فإن عزم القصور الذاتي له يكون أكبر. فمثلًا، عزم القصور الذاتي لحلقة رقيقة نصف قطرها (r) وكتلتها (m) يساوي (mr^2). أما عزم القصور الذاتي لأسطوانة مصمتة كتلتها (m) موزعة بانتظام على حجم الأسطوانة، ونصف قطرها (r) فيساوي $(\frac{1}{2}mr^2)$. ويوضح **الجدول (1)** عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة.

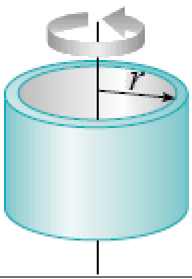
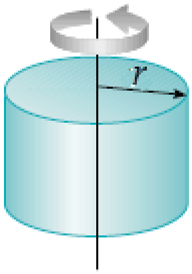
كما يعتمد عزم القصور الذاتي على موقع محور الدوران، كما هو موضح في **الجدول (1)**. فعزم القصور الذاتي لقضيب كتلته (m) وطوله (L) يدور حول محور عمودي على القضيب مارًّا بمنتصفه يساوي $(\frac{1}{12}mL^2)$، أما عندما يكون محور الدوران عمودي على طرف القضيب فإن عزم القصور الذاتي له يساوي $(\frac{1}{3}mL^2)$. وهذا يعني أنني أحتاج إلى عزم أقل لتدوير القضيب حول محور عمودي عليه ويمر في منتصفه مقارنة مع الحالة عندما يكون محور الدوران عموديًّا عليه ويمر في أحد طرفيه.

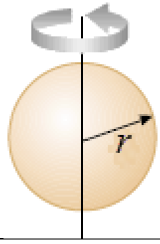
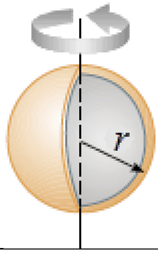
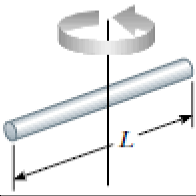
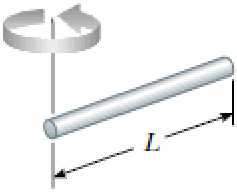
يُعطى **القانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية** Newton’s Second Law for Rotational Motion بالعلاقة الآتية:

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

أتحقق ما المقصود بعزم القصور الذاتي؟

الجدول (3): عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة كتلة كل منها (m).*

الجسم	موضع محور الدوران	الشكل	عزم القصور الذاتي
حلقة رقيقة أو أسطوانة جوفاء	يمرّ بالمركز عموديًّا على مستواها.		$\mathrm{I} = mr^2$
أُسطوانة مصمتة منتظمة أو قرص دائري	يمر بالمركز عموديًّا على مستواها.		$\mathrm{I} = \frac{1}{2}mr^2$

كرة مصمتة منتظمة	يمر بالمركز.		$I = \frac{2}{5}mr^2$
كرة جوفاء	يمر بالمركز.		$I = \frac{2}{3}mr^2$
قضيب منتظم	عمودي على القضيب من منتصفه.		$I = \frac{1}{12}mL^2$
قضيب منتظم	عمودي على طرف القضيب.		$I = \frac{1}{3}mL^2$

*** الجدول ليس للحفظ.**

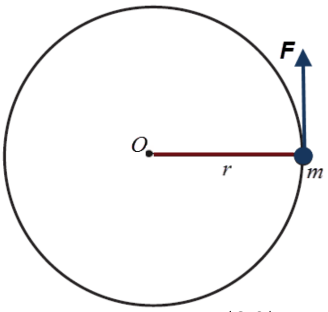
المثال 7

كرة كتلتها $(3.0\ \text{kg})$ مثبتة في نهاية قضيب فلزي خفيف طوله $(0.80\ \text{m})$، وتتحرك حركة دورانية حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة يمر في النهاية الأخرى للقضيب بتأثير قوة مماسية $(\boldsymbol{F})$ ثابتة في المقدار، كما هو موضح في **الشكل (20)**. إذا بدأت الكرة حركتها من السكون بتسارع زاوي ثابت بحيث أصبح مقدار سرعتها الزاوية $(8\pi\ \text{rad/s})$ خلال $(5.0\ \text{s})$، فأحسب مقدار ما يأتي بإهمال كتلة القضيب الفلزي:

أ. التسارع الزاوي للكرة.

ب. العزم المحصّل المؤثر في الكرة.

ج. القوة المماسية $(\boldsymbol{F})$ المؤثرة في الكرة.



الشكل (20): كرة في نهاية قضيب فلزي طوله $(r = 0.8\ \text{m})$ تتحرك حركة دورانية حول محور ثابت.

المعطيات:

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

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

الحلّ:

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

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

$$= \frac{8\pi - 0}{5} = 5.0\ \text{rad/s}^2$$

ب. بداية يلزم حساب عزم القصور الذاتي للكرة حول محور دورانها كما يأتي:

$$I = m\,r^2 = 3.0 \times (0.80)^2$$

$$= 1.9\ \text{kg.m}^2$$

ثم أحسب مقدار العزم المحصّل المؤثر في الكرة.

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

$$= 1.9 \times 5.0 = 9.5\ \text{N.m}$$

ج. أستخدم علاقة العزم لحساب مقدار القوة المماسية المؤثرة.

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

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

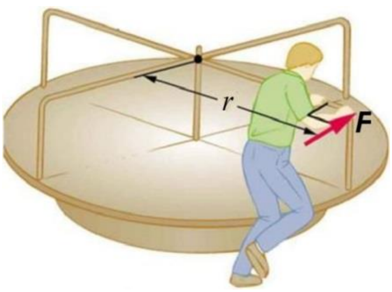
تمرين.

لعبة القرص الدوّار الموضحة في **الشكل (21)** تتكون من قرص مصمت قابل للدوران حول محور ثابت يمر في مركزه باتجاه محور z. أثّر شخص بقوة مماسية ($\boldsymbol{F}$) ثابتة في المقدار عند حافة القرص مقدارها (250 N). إذا علمت أن كتلة القرص الدوّار (50.0 kg) ونصف قطره (2.0 m)، وبإهمال قوى الاحتكاك واعتبار قرص اللعبة منتظم ، واللعبة بدأت الدوران من السكون بتسارع زاوي ثابت بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، فأحسب مقدار ما يأتي:

أ. العزم المحصّل المؤثر في اللعبة.

ب. التسارع الزاوي للعبة.

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



الشكل (21): لعبة القرص الدوّار.

د. التسارع الزاوي للعبة عندما يجلس طفل كتلته (20.0 kg) على بُعد (1.5 m) من محور الدوران، باعتبار الطفل نقطة مادية.

مراجعة الدرس

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

2. **أفسّر:** تدور إطارات سيارة بسرعة زاوية ثابته تساوي $(5.0\ \text{rad/s})$. أجيب عمّا يأتي:

أ. هل التسارع الزاوي للإطارات موجب أم سالب أم صفر ؟ أُفسّر إجابتي.

ب. هل تدور جميع أجزاء الإطار بمقدار السرعة الزاوية نفسه أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

3. **أفسّر:** السرعة الزاوية لجسم عند لحظة زمنية معيّنة تساوي $(-3\ \text{rad/s})$، وتسارعه الزاوي عند اللحظة نفسها $(2\ \text{rad/s}^2)$. أُجيب عمّا يأتي:

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

ب. هل يتزايد مقدار سرعته الزاوية أم يتناقص أم يبقى ثابت؟ أُفسّر إجابتي.

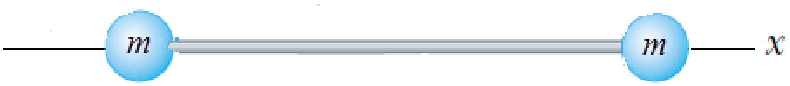
4. **أحلّل وأستنتج:** يدور إطار درّاجة بسرعة زاوية ثابتة حول محور ثابت. كيف يتغير مقدار السرعة الزاوية لأجزاء الإطار بالانتقال من داخله إلى حافته الخارجية؟

5. علامَ يعتمد عزم القصور الذاتي لجسم؟

6. **أحسب:** مثقب كهربائي يدور جزؤه الدوّار من السكون بتسارع زاوي ثابت، ويُصبح مقدار سرعته الزاوية $(2.6 \times 10^3\ \text{rad/s})$ بعد $(4.0\ \text{s})$ من بدء دورانه. أحسب مقدار التسارع الزاوي للجزء الدوّار من المثقب.

7. **أفسّر:** أيُّهما أسهل: تدوير قلمي حول محور عمودي عليه مارًّا بمركز كتلته، أم تدويره حول محوره الهندسي؟ أُفسّر إجابتي.

8. **أقارن:** قضيب فلزي خفيف رفيع طوله (L) مُثبّت عند طرفيه كرتين متماثلتين مهملتي الأبعاد، كتلة كل منهما (m)، كما هو موضح في **الشكل**. في الحالة الأولى، دُوّر النظام المكوّن من القضيب الفلزي والكرتين حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة يمر بمنتصف القضيب الفلزي. وفي الحالة الثانية، دُوّر النظام حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة يمر بأحد طرفي القضيب الفلزي. بإهمال كتلة القضيب الفلزي مقارنة بكتلتي الكرتين، في أي الحالتين السابقتين يلزمني عزم محصّل أكبر لبدء تدوير النظام؟ أُفسّر إجابتي.



نظام الكرتين والقضيب الفلزي.

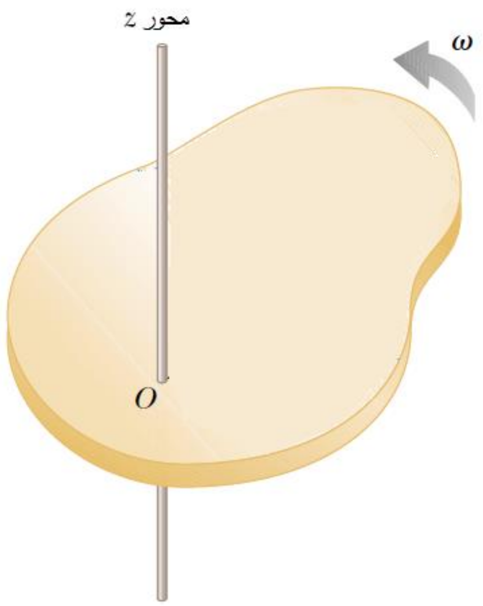
الطاقة الحركية الدورانية Rotational Kinetic Energy

ترتبط الطاقة الحركية الخطية لجسم بحركته الانتقالية. ولكن الجسم الذي يدور حول محور ثابت لا ينتقل من مكان إلى آخر، لذا لا توجد طاقة حركية مرتبطة بحركة انتقالية للجسم، لكنه يمتلك طاقة حركية دورانية. يوضح **الشكل (22)** جسم يتحرك حركة دورانية حول محور ثابت (محور y) بسرعة زاوية ثابتة (ω). تُحسب الطاقة الحركية الدورانية (KE_R) لهذا الجسم بالعلاقة الآتية:

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

حيث (I) عزم القصور الذاتي للجسم، و(ω) سرعته الزاوية. ومثل أشكال الطاقة الأُخرى، تُقاس الطاقة الحركية الدورانية بوحدة (J).

ملاحظة: تغيير اسم المحور بعد الرسم إلى (محور y)



الشكل (22): جسم يتحرك حركة دورانية حول محور y، بسرعة زاوية ثابتة (ω).

الفكرة الرئيسة:

يلزم معرفة الزخم الزاوي وحفظه لتفسير بعض المشاهدات في الحياة اليومية، وأستفيد منه في تطوير مهاراتي في مجالات مختلفة، منها الألعاب الرياضية.

نتاجات التعلم:

- أحسب الطاقة الحركية الدورانية لجسم.
- أُعرّف الزخم الزاوي لجسم.
- أُثبت قانون حفظ الزخم الزاوي لنظام مغلق.
- أُعبّر عن قانون حفظ الزخم الزاوي بمعادلة رياضية.

المفاهيم والمصطلحات:

الزخم الزاوي Angular Momentum

قانون حفظ الزخم الزاوي

Law of Conservation of Angular Momentum

أُلاحظ التشابه بين الطاقة الحركية الخطية $(\frac{1}{2}m\,v^2)$ والطاقة الحركية الدورانية $(\frac{1}{2}\mathrm{I}\omega^2)$، حيث تتشابه الكميتان $(\mathrm{I}$، $\omega)$ في الحركة الدورانية مع الكميتين $(m$، $v)$ في الحركة الخطية على الترتيب.

أتحقق علامَ تعتمد الطاقة الحركية الدورانية لجسم جاسئ؟ وما وحدة قياسها؟

أُفكّر

في **المثال 8**، إذا تغيّر موقع محور الدوران مع بقاء مقدار السرعة الزاوية ثابتًا، فهل يتغير مقدار الطاقة الحركية الدورانية؟ أوضّح إجابتي. أناقش أفراد مجموعتي، وأستخدم مصادر المعرفة المتاحة للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

المثال 8

يتحرك جزيء أُكسجين (O_2) حركة دورانية حول محور ثابت باتجاه محور z، عمودي على منتصف المسافة بين ذرتي الأكسجين المكوّنتين له، بسرعة زاوية ثابتة مقدارها $(4.6 \times 10^{12}\ \mathrm{rad/s})$. إذا علمت أن عزم القصور الذاتي لجزيء الأكسجين حول محور دورانه z يساوي $(1.95 \times 10^{-46}\ \mathrm{kg.m^2})$ عند درجة حرارة الغرفة، فأحسب مقدار الطاقة الحركية الدورانية للجزيء.

المعطيات:

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

المطلوب: $KE_{\mathrm{R}} = ?$

الحلّ:

أحسب الطاقة الحركية الدورانية كما يأتي:

$$KE_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2}\mathrm{I}\omega^2$$
$$= \frac{1}{2} \times 1.95 \times 10^{-46} \times (4.6 \times 10^{12})^2$$
$$= 2.06 \times 10^{-21}\ \mathrm{J}$$

تمرين.

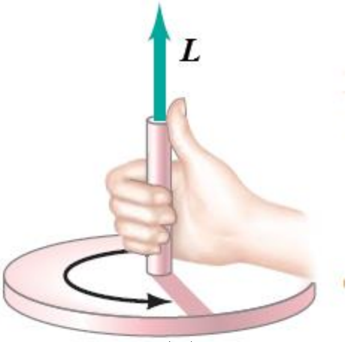
قرص مصمت منتظم متماثل كتلته $(2.0\ \mathrm{kg})$، ونصف قطره $(0.50\ \mathrm{m})$، يتحرك حركة دورانية بسرعة زاوية ثابتة مقدارها $(8.0\ \mathrm{rad/s})$ حول محور ثابت عمودي على مركزه. مستعينًا **بالجدول (1)**، أحسب الطاقة الحركية الدورانية للقرص.

الزخم الزاوي وحفظه Angular Momentum and it’s Conservation

درست في الوحدة الأولى الزخم الخطي لأجسام متحركة حركة انتقالية. وبصورة مماثلة للقوة والكتلة، يوجد للزخم الخطي $(\boldsymbol{p})$ نظير دوراني يُسمّى **الزخم الزاوي** (L) **Angular momentum** يُعرف بأنه يساوي ناتج ضرب عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاوية. وهو كمية متجهة، رمزه (L)، ووحدة قياسه $(\mathrm{kg.\,m^2/s})$ حسب النظام الدولي للوحدات.

(أ)

(ب)



(ج)

الشكل (23): (أ) الزخم الزاوي موجب، (ب) الزخم الزاوي سالب، (ج) استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاه الزخم الزاوي.

يُعطى مقدار الزخم الزاوي لجسم يتحرك حركة دورانية حول محور ثابت بالعلاقة:

$$L = \mathrm{I}\omega$$

ويكون اتجاه الزخم الزاوي باتجاه السرعة الزاوية المتجهة، حيث يكون خارجًا من الصفحة على امتداد محور الدوران عند دوران الجسم بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، وهنا يُعدّ الزخم الزاوي موجبًا، كما هو موضح في **الشكل** (23/أ). أما عند دوران الجسم باتجاه حركة عقارب الساعة فيكون متجه الزخم الزاوي داخلًا إلى الصفحة على امتداد محور الدوران، ويُعدّ الزخم الزاوي سالبًا كما هو موضح في **الشكل** (23/ب).

يوضح **الشكل** (23/ج) استخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى لتحديد اتجاه الزخم الزاوي لجسم يدور حول المحور y، وذلك عن طريق لفّ أصابع اليد اليمنى حول محور الدوران بحيث تُشير إلى اتجاه دوران الجسم، فيُشير الإبهام إلى اتجاه الزخم الزاوي $(\boldsymbol{L})$.

أتحقق ما الزخم الزاوي؟ وعلام يعتمد؟ وما وحدة قياسه؟

الزخم الزاوي والعزم Angular Momentum and Torque

ينص القانون الثاني لنيوتن في الحركة الخطية على أن القوة المحصلة المؤثرة في جسم تساوي المعدل الزمني للتغير في زخمة الخطي $\left(\sum \boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt}\right)$. ويمكن كتابة القانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية بدلالة الزخم الزاوي كما يأتي:

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

أي أن العزم المحصّل المؤثر في جسم يتحرك حركة دورانية حول محور ثابت يساوي المعدل الزمني للتغير في زخمه الزاوي حول المحور نفسه.ألاحظ أن العزم المحصّل $(\sum \boldsymbol{\tau})$ يُسبّب تغير الزخم الزاوي $(d\boldsymbol{L})$، تمامًا كما تُسبّب القوة المحصلة $(\sum \boldsymbol{F})$ تغير الزخم الخطي $(d\boldsymbol{p})$.

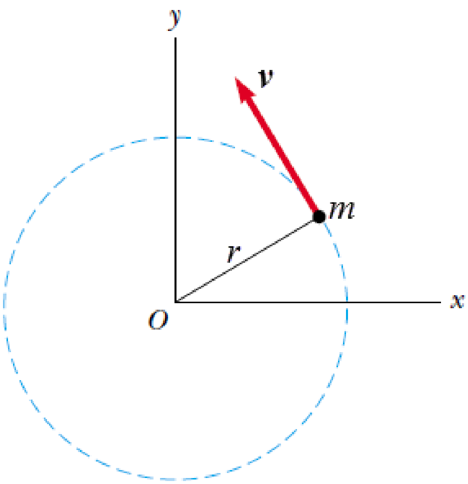
وعند حدوث تغيّر في الزخم الزاوي ($\Delta \boldsymbol{L}$) خلال فترة زمنية (Δt)، فإنه يُمكن كتابة القانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية كما يأتي:

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

أتحقق علامَ ينص القانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية؟

المثال 9

يتحرك جسيم كتلته ($50.0\ \mathrm{g}$) حركة دورانية حول محور ثابت (محور z) عند النقطة (O)، في مسار دائري نصف قطره ($20.0\ \mathrm{cm}$)، بسرعة زاوية ثابتة مقدارها ($5.0\ \mathrm{rad/s}$)، كما هو موضح في **الشكل (24)**. أحسب مقدار الزخم الزاوي للجسيم حول هذا المحور، وأُحدّد اتجاهه.



الشكل (24): جسيم يتحرك في مسار دائري نصف قطره (r) حول محور z.

المعطيات:

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

المطلوب: $\boldsymbol{L} = ?$

الحلّ:

أحسب مقدار الزخم الزاوي للجسيم بالعلاقة:

$$L = \mathrm{I}\omega = mr^2\,\omega$$

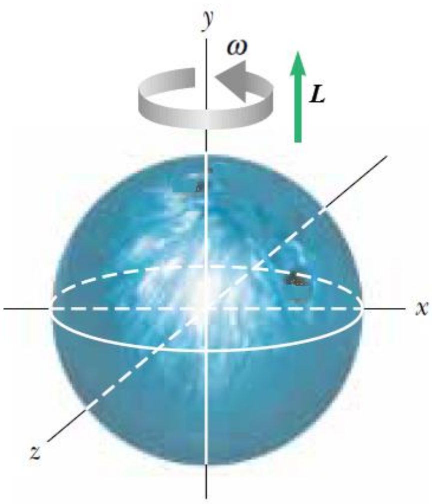
$$= 50.0 \times 10^{-3} \times (20.0 \times 10^{-2})^2 \times 5.0$$

$$= 1.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{kg.m^2/s}$$

باستخدام قاعدة قبضة اليد اليمنى، فإن متجه الزخم الزاوي يكون خارجًا من الصفحة على امتداد محور الدوران.

المثال 10

أستخدم المتغيرات: كرة مصمتة منتظمة متماثلة كتلتها ($5.0\ \mathrm{kg}$) ونصف قطرها ($10.0\ \mathrm{cm}$)، تتحرك حركة دورانية حول محور ثابت (محور y) يمر في مركزها، بسرعة زاوية ثابتة مقدارها ($20\ \mathrm{rad/s}$) بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، كما هو موضح في **الشكل (25)**. أحسب مقدار الزخم الزاوي للكرة حول هذا المحور، وأُحدّد اتجاهه.



الشكل (25): كرة مصمتة متماثلة منتظمة تدور حول محور ثابت يمر في مركزها.

المعطيات:

$m = 5.0\ \text{kg}\ , r = 10.0\ \times\ 10^{-2}\ \text{m}, \omega\ = 20\ \text{rad/s}, \text{I} = \frac{2}{5}mr^2.$

المطلوب: $\boldsymbol{L} = ?$

الحلّ:

أستخدم العلاقة الآتية لحساب مقدار الزخم الخطي لجسم يدور حول محور ثابت، وباستخدام الجدول (1) أجد أن عزم القصور الذاتي لكرة مصمتة منتظمة متماثلة يساوي $(\frac{2}{5}mr^2)$.

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

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

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

الزخم الزاوي للجسيم موجب، إذ يكون اتجاه الزخم باتجاه محور y الموجب عند النظر إليه من أعلى، لأن الجسم يدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة كما يبدو للناظر.

تمرين.

نظام يتكون من جسيمين يتحركان حركة دورانية حول محور ثابت (محور z)، في مسار دائري. إذا علمت أن لهما عزم القصور الذاتي نفسه ويساوي $(2\ \times\ 10^{-3}\ \text{kg.m}^2)$، ويدور الجسيم الأول بسرعة زاوية $(4\ \text{rad/s})$ باتجاه حركة عقارب الساعة، بينما يدور الجسيم الثاني بسرعة زاوية $(8\ \text{rad/s})$ بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة، فأحسب مقدار ما يأتي:

أ. الزخم الزاوي للجسيم الأول حول هذا المحور، وأُحدّد اتجاهه.

ب. الزخم الزاوي للنظام حول هذا المحور، وأُحدّد اتجاهه.

حفظ الزخم الزاوي Conservation of Angular Momentum

درست سابقًا قانون حفظ الزخم الخطي لنظام معزول، حيث تساوي القوة المحصلة المؤثرة في النظام صفرًا. وأتوصل إلى علاقة مماثلة في الحركة الدورانية بالاستعانة بالقانون الثاني لنيوتن في الحركة الدورانية. فعندما يساوي العزم المحصّل المؤثر في جسم أو نظام صفرًا $(\sum\boldsymbol{\tau} = 0)$ فإن الزخم الزاوي يظل ثابتًا مع مرور الزمن، أي أن:

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

وهذا يعني أن الزخم الزاوي $(\boldsymbol{L})$ محفوظ، وأستنتج من العلاقة السابقة أن:

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

تُعبّر هذه العلاقة عن **قانون حفظ الزخم الزاوي Law of conservation of angular momentum**، الذي ينص على أن: "الزخم الزاوي لنظام معزول يظل ثابتًا في المقدار والاتجاه"، إذ يكون العزم المحصّل المؤثر في النظام المعزول صفرًا. أي أن الزخم الزاوي الابتدائي لنظام معزول يساوي زخمه الزاوي النهائي.

أما إذا أُعيد توزيع كتلة النظام المعزول الذي يتحرك حركة دورانية، فإن عزم القصور الذاتي والسرعة الزاوية للنظام يتغيّران بحيث يبقى الزخم الزاوي ثابتًا. وبما أن $(L = \mathrm{I}\omega)$، فإنه عند تغير (I) يجب أن تتغير (ω) للنظام بحيث يبقى الزخم الزاوي ثابتًا. وأُعبّر عن ذلك رياضيًا كما يأتي:

$$\mathrm{I_f}\,\omega_{\mathrm{f}} = \mathrm{I_i}\,\omega_{\mathrm{i}} = constant$$

الشكل (26): يقل عزم القصور الذاتي للمتزلج عندما يضم يديه نحو جسمه ويضم قدميه معًا، فيزداد مقدار سرعته الزاوية بحسب قانون حفظ الزخم الزاوي.

Item ID: 2005132616

يبين **الشكل (26)** متزلجًا على الجليد يدور حول محور عمودي على سطح الأرض ويمر بمركز كتلته. يمكن التعامل مع المتزلج على أنه نظام معزول حيث قوة وزنه والقوة العمودية تؤثران في الاتجاه الرأسي وعزم كل منهما حول محور الدوران يساوي صفرًا، أضف إلى ذلك أن مقدار قوة الاحتكاك بين الزلاجات والجليد صغير ويمكن إهمال العزم الناتج عنه حول محور الدوران. وهذا يعني أن الزخم الزاوي للمتزلج محفوظ $(\mathrm{I}\,\omega = constant)$. وأسأل نفسي، ما أثر قيام المتزلج بضم قدميه وضم ذراعيه نحو جسده على حركته الدورانية؟ بالطبع يقل عزم قصوره الذاتي، لذا يزداد مقدار سرعته الزاوية بحيث يبقى زخمه الزاوي ثابتًا.

أتحقق علامَ ينص قانون حفظ الزخم الزاوي؟

المثال 11

نجم نصف قُطره $(1.0 \times 10^{4}\ \mathrm{km})$ يدور حول محور يمر بمركزه بسرعة زاوية ثابتة مقدارها $(2.4 \times 10^{-6}\ \mathrm{rad/s})$. تعرض النجم لانفجار مستعر أعظم، فانهار لبّه، ليصبح نجمًا نيوترونيًّا نصف قطره $(5.0\ \mathrm{km})$. بافتراض ثبات كل من كتلة النجم وشكله الكروي، وعدم وجود عزم محصّل خارجي مؤثر فيه، وبقاء توزيع كتلته متماثلًا، فأحسب مقدار السرعة الزاوية للنجم النيوتروني.

المعطيات:

$r_i = 1.0 \times 10^4$ km $= 1.0 \times 10^7$ m, $\omega_i = 2.4 \times 10^{-6}$ rad/s, $r_f = 5.0$ km $= 5.0 \times 10^3$ m.

المطلوب: $\omega_f = ?$

الحلّ:

يمكن التعامل مع النظام على أنه معزول حيث لا يوجد قوى خارجية تؤثر فيه، لذا يكون الزخم الزاوي محفوظاً. أُطبّق قانون حفظ الزخم الزاوي.

$$L_i = L_f$$

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

أفترض أن النجم في الحالتين كرة منتظمة متجانسة، بحيث يمكن التعبير عن عزم القصور الذاتي له على أنه يساوي $(\frac{2}{5}mr^2)$. أُعيد كتابة المعادلة السابقة كما يأتي:

$$\frac{2}{5}mr_i^2\,\omega_i = \frac{2}{5}mr_f^2\,\omega_f$$

ومنها أجد مقدار السرعة الزاوية للنجم النيوتروني.

$$\omega_f = \left(\frac{r_i}{r_f}\right)^2\omega_i = \left(\frac{1.0 \times 10^7}{5.0 \times 10^3}\right)^2 \times 2.4 \times 10^{-6}$$

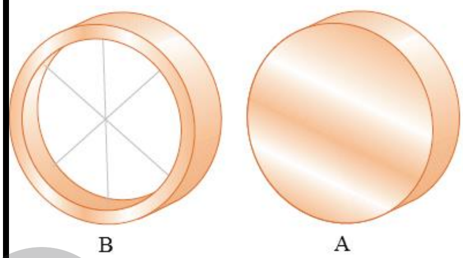
$$= 9.6 \text{ rad/s}$$

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما الزخم الزاوي؟ وعلام ينص قانون حفظ الزخم الزاوي؟ علام تعتمد الطاقة الحركية الدورانية لجسم يدور حول محور ثابت؟

2. **أُفسّر:** أنبوب مجوّف وأسطوانة مصمتة، متماثلين في الكتلة والأبعاد، ويدور كل منهما حول محور تماثله بالسرعة الزاوية نفسها. هل لهما الطاقة الحركية الدورانية نفسها أم لا؟ أوضّح إجابتي.

3. **أُحلّل وأستنتج:** يبين الشكل المجاور أُسطوانتين إحداهما مصمتة والأُخرى مجوّفة، لهما الكتلة نفسها، ونصف القطر نفسه، والسرعة الزاوية نفسها بالاتجاه نفسه، وتدوران حول محور ثابت يمر في المركز الهندسي لكل منهما. مستعيناً بالشكل المجاور، أجيب عن السؤالين الآتيين:



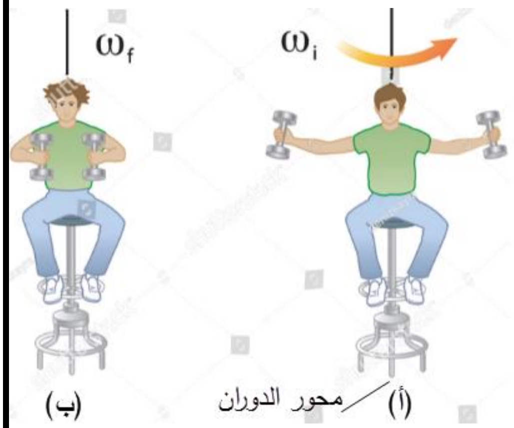
أ. **أُقارن** بين مقداري الزخم الزاوي للأسطوانتين، هل هما متساويان أم لا؟ أُفسّر إجابتي.

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

4. التفكير الناقد: يجلس طالب على كرسي قابل للدوران حول محور رأسي، ويُمسك ثقلًا بكل يد. بداية، يدور الطالب والكرسي بسرعة زاوية (ω_i)، ويديه ممدودتين، كما هو موضح في **الشكل** (أ). إذا طلب المعلم من الطالب ضم ذراعيه، كما في **الشكل (ب)**، فماذا يحدث لكل من:

1. عزم قصوره الذاتي؟

2. سرعته الزاوية النهائية؟



Item ID1669028755

الإثراء والتوسع

اتزان الجسور Equilibrium of Bridges

يتطلب بناء المنشآت التي أراها، من جسور ومباني إلى ناطحات السحاب، من المصمّمين والمهندسين المعماريين تحديد القوى المؤثرة في هياكلها وتراكيبها؛ للمحافظة عليها ثابتة ومتزنة سكونيًّا وعدم انهيارها. ويُعنى الاتزان السكوني بحساب القوى المؤثرة في هذه الهياكل والتراكيب، لتحديد ما إذا كانت قادرة على تحمل هذه القوى دون حدوث تشوّه أو تصدّع أو كسر فيها. وهذا الإجراء الذي يتبعه المصمّمون والمهندسون يُمكّنهم من حساب القوى المؤثرة في مكونات هياكل وتراكيب المباني والجسور والآلات والمركبات وغيرها.

أُلاحظ في حياتي اليومية جسورًا مختلفة التصاميم، يتعرض كل منها لقوى مختلفة تؤثر في مكوناته، تعمل على شدّها أو ضغطها. إذ يؤثر فيها قوى ضغط تجعلها تنكمش وتتقلّص، وقوى شد تجعلها تتمدد ويزداد طولها، كما هو موضح في **الشكل**. لذا يجب أخذ هذه القوى في الحسبان عند تصميم أي جسر؛ كي لا يتعرض إلى التصدّع والالتواء والانكماش، لعدم

Item ID 1015063186

Item ID 81891757

مقدرته على تحمّلها، وإيجاد وسائل وتصاميم مناسبة تعمل على توزيع هذه القوى على مختلف أجزاء الجسر بالشكل الذي يمنع تمركزها في منطقة واحدة.

لرسم أفضل التصاميم، وتنفيذها باستخدام المواد المناسبة، يراعي المصمّمون والمهندسون المعماريون في مختلف مراحل تصميم الجسور وإنشائها تحقيق شرطي الاتزان في مكوناتها جميعًا. ولتكون الجسور أنظمة متزنة، يجب أخذ قياسات دقيقة ومضبوطة لهذه القوى ومواقع دعامات الجسر والمسافات بينها ومقدار أكبر ثقل يُمكن أن يتحمله الجسر دون أن ينهار.

مراجعة الوحدة

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. جسمان متماثلان A و B على سطح الأرض، الجسم A عند خط الاستواء، والجسم B عند قطبها الشمالي. أيّ ممّا يلي يُعبِّر بشكل صحيح عن العلاقة بين سرعتي الجسمين الزاوية؟

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

2. وحدة قياس الزخم الزاوي حسب النظام الدولي للوحدات، هي:

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

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

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

4. عند دوران إطار سيارة حول محور ثابت فإن مقدار سرعته الزاوية:

أ. يكون متساويًا لجميع أجزائه. ب. يزداد بالابتعاد عن محور الدوران.

ج. يقل بالابتعاد عن محور الدوران. د. يساوي صفرًا.

5. عند دوران أُسطوانة مصمتة متماثلة حول محور ثابت مدّة زمنية معيّنة فإن مقدار الإزاحة الزاوية:

أ. يكون متساويًا لجميع أجزائها. د. لا يعتمد على زمن دوران الجسم، فهو يساوي $(2\pi\ rad)$ دائمًا.

ب. يكون أكبر للجزيئات القريبة من محور الدوران. ج. يكون أكبر للجزيئات البعيدة من محور الدوران.

6. تستخدم سلمى مفك براغي لفك برغي من خزانتها ولم تتمكّن من ذلك. يجب على سلمى استخدام مفك براغي يكون مقبضه:

أ. أطول من مقبض المفك المستخدم. ب. أقصر من مقبض المفك المستخدم.

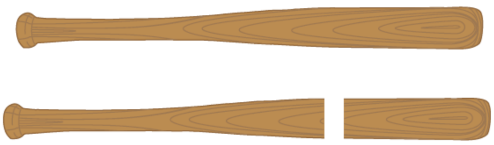
ج. أكثر سُمكًا من سُمك المقبض المستخدم. د. أقل سُمكًا من سُمك المقبض المستخدم.

7. يستخدم خالد مفتاح شد لفك صامولة إطار سيارة ولم يتمكّن من ذلك. يجب على خالد استخدام مفتاح شد يكون مقبضه:

أ. أطول من مقبض مفتاح الشد المستخدم. ب. أقصر من مقبض مفتاح الشد المستخدم.

ج. أكثر سُمكًا من سُمك مفتاح الشد المستخدم. د. أقل سُمكًا من سُمك مفتاح الشد المستخدم.

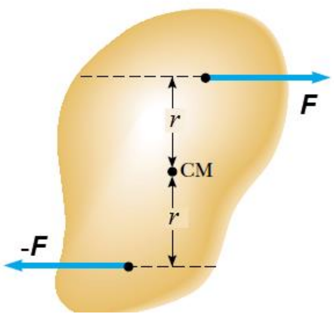
8. كُسر مضرب بيسبول منتظم الكثافة في موقع مركز كتلته إلى جزأين، كما هو موضح في الشكل. إن الجزء ذا الكتلة الأصغر هو:



أ. الجزء الموجود على اليمين. ب. الجزء الموجود على اليسار.

ج. كلا الجزأين له الكتلة نفسها. د. لا يمكن تحديده.

9. الشكل المجاور يبين قوتين متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا تؤثران على بُعدٍ متساوٍ من مركز كتلة جسم موجود على سطح أملس. أي الجمل الآتية تصف بشكل صحيح حالة الجسم الحركية عند اللحظة المبينة؟



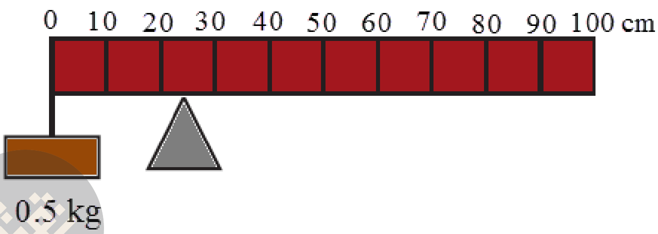
أ. الجسم في حالة اتزان انتقالي سكوني واتزان دوراني.

ب. الجسم في حالة اتزان انتقالي سكوني، وليس في حالة اتزان دوراني.

ج. الجسم في حالة اتزان دوراني، وليس في حالة اتزان انتقالي سكوني.

د. الجسم ليس في حالة اتزان سكوني انتقالي، وليس في حالة اتزان دوراني.

10. مسطرة مترية منتظمة متماثلة ترتكز على نقطة عند التدريج (25 cm). عُلّق ثقل كتلته (0.50 kg)



عند التدريج (0 cm) للمسطرة، فاتزنت أُفقيًّا، كما هو موضح في **الشكل** المجاور. إن مقدار كتلة المسطرة المترية يساوي:

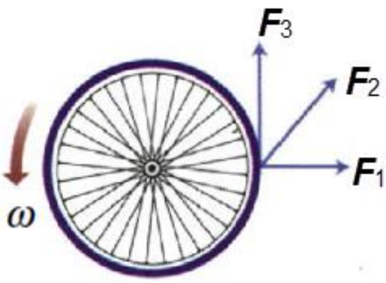
أ. 0.25 kg ب. 0.50 kg ج. 0.10 kg د. 0.20 kg

11. جسيمان نقطيان البعد بينهما (r). إذا علمت أن $(m_1 = 4\,m_2)$ فإن موقع مركز الكتلة يكون:

أ. في منتصف المسافة بين الجسيمين. ب. بين الجسيمين، وأقرب إلى (m_1).

ج. بين الجسيمين، وأقرب إلى (m_2). د. خارج الخط الواصل بين الجسيمين، وأقرب إلى (m_1).

12. تؤثر ثلاث قوى لها المقدار نفسه في دولاب قابل للدوران حول محور ثابت عمودي على مستوى الصفحة مارًّا في مركزه. أي هذه القوى يكون عزمها هو الأكبر؟



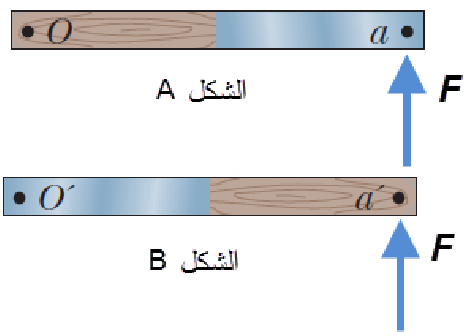
أ. $\boldsymbol{F}_1$ ب. $\boldsymbol{F}_2$

ج. $\boldsymbol{F}_3$ د. جميعها لها مقدار العزم نفسه.

13. كرة مصمتة وكرة مجوّفة، لهما الكتلة نفسها ونصف القطر نفسه، تدوران بمقدار السرعة الزاوية نفسه. أي الكرتين مقدار زخمها الزاوي أكبر؟

أ. الكرة المصمتة. ب. الكرة المجوّفة. ج. لهما مقدار الزخم الزاوي نفسه. د. لا يُمكن معرفة ذلك.

يوضح **الشكل** المجاور مسطرة مترية نصفها خشب ونصفها الآخر فولاذ. بداية، المسطرة قابلة للدوران حول محور عمودي عليها عند نهايتها الخشبية (النقطة O)، أنظر إلى **الشكل (A)**، وأثرت فيها بقوة $(\boldsymbol{F})$ عند نهايتها الفولاذية (النقطة a). بعد ذلك، جعلت المسطرة قابلة للدوران حول محور عمودي عليها عند نهايتها الفولاذية (النقطة O')، أنظر إلى **الشكل (B)**، وأثرت فيها بالقوة $(\boldsymbol{F})$ نفسها عند نهايتها الخشبية (النقطة a'). أُجيب عن السؤالين الآتيين:



14. أي العلاقات الآتية صحيحة حول عزم القصور الذاتي للمسطرتين حول محوري دورانهما؟

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

15. أي العلاقات الآتية صحيحة حول مقداري التسارع الزاوي للمسطرتين حول محوري دورانهما؟

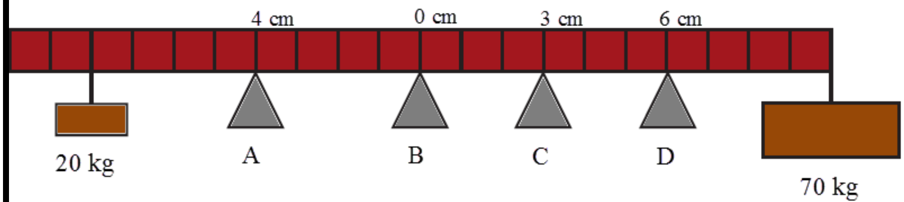
أ. $\alpha_A > \alpha_B$ ب. $\alpha_A < \alpha_B$ ج. $\alpha_A = \alpha_B$ د. $\boldsymbol{\alpha}_A = -\boldsymbol{\alpha}_B$

16. عندما تؤثر قوة في جسم فإن عزمها يكون صفرًا عندما:

أ. يتعامد متجه القوة مع متجه موقع نقطة تأثيرها. ب. يتزايد مقدار سرعة الجسم الزاوية.

ج. يمر خط عمل القوة بمحور الدوران. د. يتناقص مقدار سرعة الجسم الزاوية.

مسطرة فلزية مدرّجة، والمسافة بين كل تدريجين متتاليين (1 cm)، ومُعلّق بها ثقلان كما هو موضح في **الشكل**. أُجيب عن السؤالين الآتيين.



17. عند أي نقاط الارتكاز الموضحة في الشكل تكون المسطرة متزنة دورانيًّا؟

أ. A ب. B ج. C د. D

18. العزم المحصّل المؤثر في المسطرة حول نقطة الارتكاز (A) بوحدة (N.m) يساوي:

أ. 86 ب. 8.6- ج. 54- د. 0

19. يجلس طفلان على طرفي لعبة (see – saw) متزنة أُفقيًّا. عند تحرك أحد الطفلين مقتربًا من نقطة الارتكاز فإن الطرف الذي يجلس عليه:

أ. يرتفع لأعلى. ب. ينخفض لأسفل.

ج. يبقى بوضعه الأُفقي ولا يتغير. د. قد يرتفع أو ينخفض حسب وزن الطفل.

2. أُفسّر ما يأتي:

أ. عند حساب العزم المحصّل المؤثر في جسم فإنني أهمل القوى التي يمر خط عملها في محور الدوران.

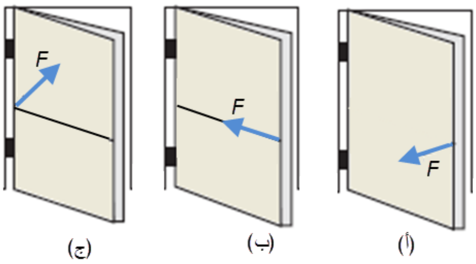
ب. يعتمد عزم القصور الذاتي لجسم على موقع محور دورانه.

ج. تحريك رجلي إلى الأمام وإلى الخلف من مفصل الحوض مع ثني ركبتي أسهل كثيرًا من تحريكها من المفصل نفسه دون ثني ركبتي.

3. أُقارن بين كتلة جسم وعزم القصور الذاتي له.

4. التفكير الناقد: تركب عرين وفرح لعبة الحصان الدوّار في مدينة الألعاب، حيث تجلس عرين على حصان قرب الحافة الخارجية للصفيحة الدائرية المتحركة للعبة، بينما تجلس فرح على حصان في منتصف المسافة بين عرين ومحور الدوران الثابت. عند دوران اللعبة بسرعة زاوية ثابتة، أي الفتاتين: عرين أم فرح مقدار سرعتها الزاوية أكبر؟

5. أُحلّل وأستنتج: يوضح الشكل قوة محصّلة (F) ثابتة المقدار تؤثر في الباب نفسه في مواقع واتجاهات مختلفة لثلاث حالات. أُحدّد الحالة/الحالات التي يفتح فيها الباب، والحالة/الحالات التي لا يفتح فيها، مفسّرًا إجابتي.



6. قطعة بوليسترين على شكل خارطة الأردن. كيف أُحدّد مركز كتلتها عمليًّا؟

7. أُحلّل وأستنتج: يقفز غطّاس عن لوح غطس متجهًا نحو سطح الماء في البركة. وبعد مغادرته لوح الغطس بدأ بالدوران، وضم الغطّاس قدميه وذراعيه نحو جسمه. أُجيب عمّا يأتي:

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

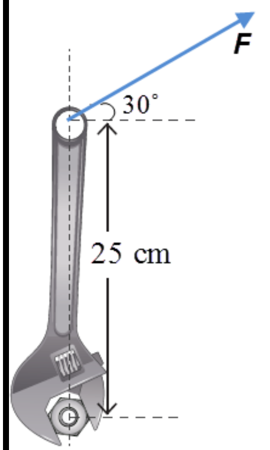
ب. ما الذي يحدث لزخمه الزاوي بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟

ج. ما الذي يحدث لمقدار سرعته الزاوية بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟

د. ما الذي يحدث لمقدار طاقته الحركية الدورانية بعد ضمّ قدميه وذراعيه؟

8. أستخدم الأرقام: تدور عربة دولاب هوائي في مدينة الألعاب بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة إزاحة زاوية مقدارها $(1.5\ \text{rad})$ خلال $(3.0\ \text{s})$. أحسب مقدار السرعة الزاوية المتوسطة للعربة.

9. أستخدم الأرقام: تستخدم فاتن مفتاح شد لشد صامولة كما هو موضح في **الشكل** المجاور. استعن بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي، علمًا بأن مقدار العزم اللازم لفك الصامولة يساوي $(50.0\ \text{N.m})$.

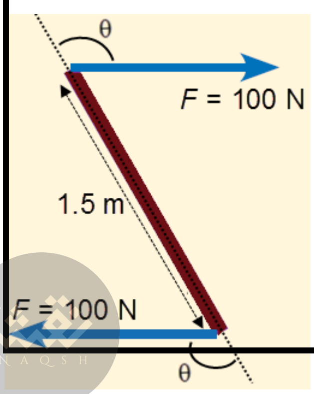


قوة تؤثر في مفتاح شد.

أ. أحسب مقدار القوة اللازم التأثير بها في طرف مفتاح الشد بالاتجاه الموضح في الشكل.

ب. أُحدّد اتجاه دوران مفتاح الشد.

10. قوّتان متوازيتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا، مقدار كل منهما $(100\ \text{N})$، تؤثران عند طرفي قضيب طوله $(1.5\ \text{m})$ قابل للدوران حول محور ثابت عند منتصفه عمودي على مستوى الصفحة، كما هو موضح في **الشكل**. إذا كان العزم الكلي المؤثر في القضيب



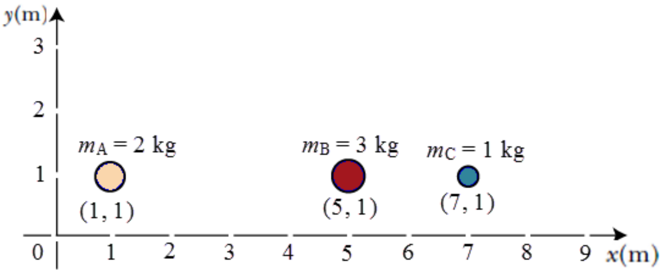
(130 N.m) باتجاه حركة عقارب الساعة، فأحسب مقدار الزاوية (θ) التي يصنعها خط عمل كل قوّة مع متجه موقع نقطة تأثيرها.

11. **أستخدم الأرقام:** تقف هناء على طرف القرص الدوّار للعبة دوّامة الخيل. إذا علمت أن كتلة قرص اللعبة بمحتوياته $(2 \times 10^2\ \text{kg})$ ونصف قطره (4 m)، وسرعته الزاوية (2 rad/s)، وكتلة هناء (50 kg)، وباعتبار كتلة القرص موزّعة بشكل منتظم، والنظام المكوّن من اللعبة وهناء معزول، أحسب مقدار ما يأتي:

أ. الزخم الزاوي الابتدائي للنظام.

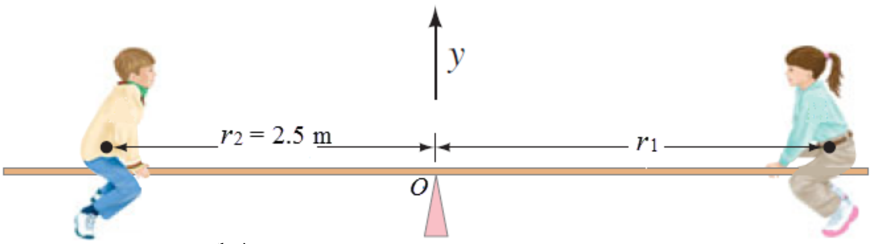
ب. السرعة الزاوية للعبة عندما تقف هناء على بُعد (2 m) من محور دوران اللعبة.

12. نظام يتكون من ثلاثة جسيمات كما هو موضح في **الشكل** المجاور. استعن بالشكل والبيانات المثبتة عليه لأُحدّد موقع مركز كتلة النظام.



نظام مكوّن من ثلاثة جسيمات على خط واحد.

13. **أُحلّل وأستنتج:** لعبة اتزان (see – saw) تتكون من لوح خشبي منتظم متماثل وزنه (150 N) يرتكز من منتصفه عند النقطة (O). تجلس نهر $(\boldsymbol{F}_{g1})$ على أحد طرفي اللوح الخشبي على بُعد (r_1) من نقطة الارتكاز، بينما يجلس شقيقها ماهر $(\boldsymbol{F}_{g2})$ على الجهة المقابلة على بُعد (2.5 m) من نقطة الارتكاز. إذا علمت أن وزن نهر (250 N)، ووزن ماهر (300 N)، والنظام في حالة اتزان سكوني، واللوح الخشبي في وضع أُفقي كما هو موضح في **الشكل المجاور**، فأحسب مقدار ما يأتي:

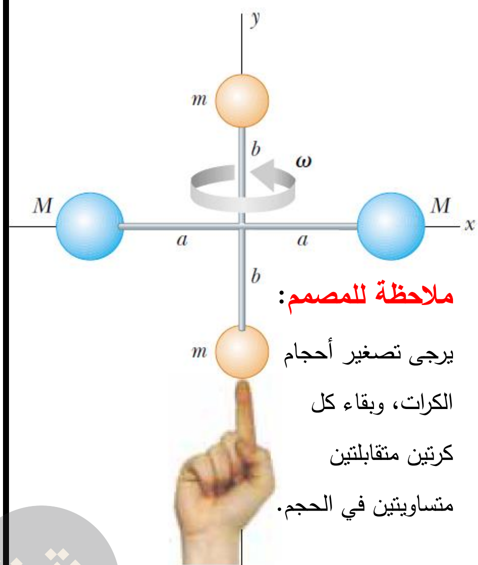


طفلان يجلسان على لعبة See – saw متزنة أفقيًا.

أ. القوة $(\boldsymbol{F}_N)$ التي تؤثر بها نقطة الارتكاز في اللوح الخشبي، وأُحدّد اتجاهها.

ب. بُعد نهر عن نقطة الارتكاز كي يكون النظام في حالة اتزان سكوني.

14. **أُحلّل وأستنتج:** نظام يتكون من أربع كرات صغيرة مثبتة عند نهايات قضيبين في مستوى xy، يدور حول محور y كما هو موضح في **الشكل** المجاور بسرعة زاوية مقدارها (2 rad/s). إذا علمت أن $(a = b = 20\ \text{cm})$، و$(m = 50\ \text{g})$، و$(M = 100\ \text{g})$، وأنصاف أقطار الكرات مهملة مقارنة بطولي القضيبين بحيث يُمكن اعتبارها جسيمات نقطية، والقضيبين مهملي الكتلة، فأحسب مقدار ما يأتي:



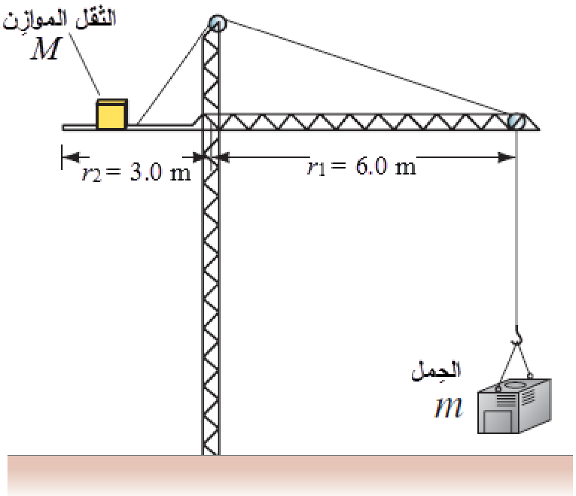
ملاحظة للمصمم: يرجى تصغير أحجام الكرات، وبقاء كل كرتين متقابلتين متساويتين في الحجم.

يدور النظام حول محور y.

أ. عزم القصور الذاتي للنظام.

ب. الطاقة الحركية الدورانية للنظام.

15. تُستخدم بعض أنواع الروافع لرفع الأثقال الكبيرة (الأحمال) إلى أعالي الأبراج والبنايات العالية. ويجب أن يكون العزم المحصّل المؤثر في هذه الرافعة صفرًا؛ كي لا يوجد عزم محصّل يعمل على إمالتها وسقوطها، لذا يوجد ثقل موازِن على الرافعة لتحقيق اتزانها، حيث يُحرّك عادة هذا الثقل تلقائيًّا (بشكل أوتوماتيكي) عبر أجهزة استشعار ومحركات لموازنة الحِمل بدقة. يبين **الشكل** المجاور رافعة في موقع بناء ترفع حِملًا مقداره $(3.0 \times 10^3\ kg)$، ومقدار الثقل الموازِن $(1.0 \times 10^4\ kg)$. أستعين بالشكل والبيانات المثبتة فيه للإجابة عمّا يأتي بإهمال كتلة الرافعة، علمًا بأن الرافعة متزنة أُفقيًّا.



رافعة ترفع حِملًا.

أ. أُحدّد موقع الثقل الموازِن عندما يكون الحِمل مرفوعا عن الأرض وفي حالة اتزان سكوني.

ب. أُحدّد مقدار أكبر كتلة يُمكن أن تحملها الرافعه عندما يكون موقع الثقل الموازِن عند طرف الرافعة.

الوحدة 3/ التيار الكهربائي المستمر

أتأمّل الصورة:

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

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

......

الفكرة العامة:

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

الدرس الأول: 11 صفحة

المقاومة والقوة الدافعة الكهربائية

Resistance and Electromotive Force

الفكرة الرئيسة: تُصنّفُ الموادّ بحسب مقاوميّتها إلى موصلةٍ وعازلةٍ وشبه موصلةٍ، والمقاومات الكهربائية أحد أهمّ عناصر الدارات الكهربائية، وتختلف في أنواعها وقِيَمها باختلاف الغرض من استخدامها.

الدرس الثاني:

القدرة الكهربائية والدارة البسيطة

Electric Power and Simple Electric Circuit

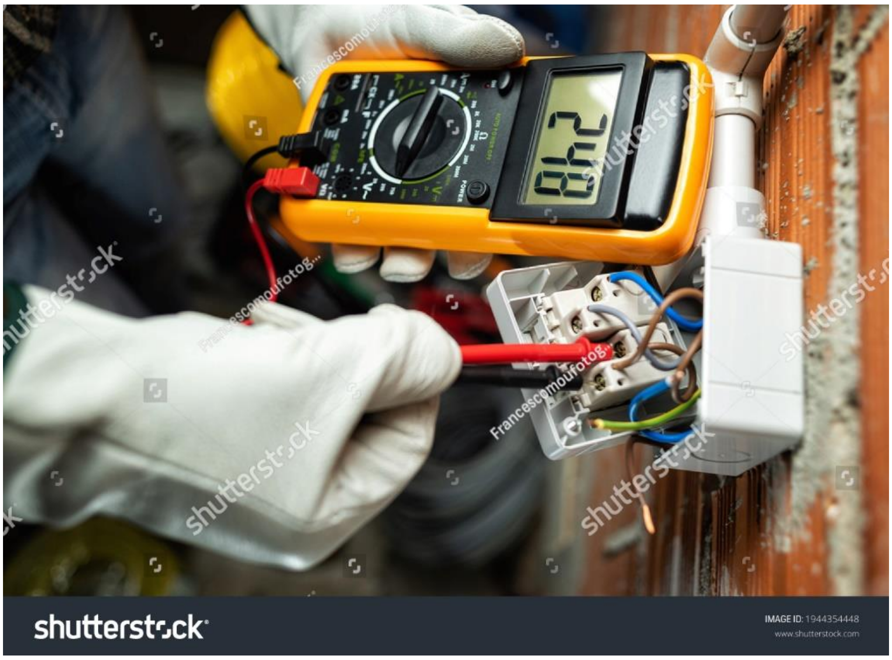
الفكرة الرئيسة: تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً وداراتٍ كهربائيةً؛ تتفاوت من البسيطة، مثل دارة مصباح المكتب إلى المعقّدة، مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكلّ جهازٍ كهربائيٍّ قدرةٌ كهربائيةٌ تعتمد على الهدف من استخدامه.

الدرس الثالث:

توصيل المقاومات وقاعدتا كيرشوف

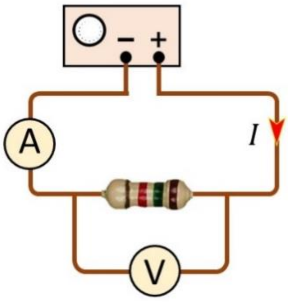
Combining Resistors and Kirchhoff's Rules

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



....

تجربةٌ استهلاليةٌ: استقصاء العلاقة بين الجُهد والتيار بين طرفي موصل.



المواد والأدوات: مصدر طاقةٍ مُنخَفض الجُهد(DC)، مقاومة، جهاز أميتر وجهاز فولتميتر، أسلاك توصيل.

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

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

1. أصلُ الدارة الكهربائية كما في الشكل، بحيث يتّصلُ طرفا المقاومة مع طرفي مصدر فرق الجُهد، ويقيسُ الأميتر (A) التيارَ المارَّ في المقاومة، بينما يقيس الفولتميتر (V) فرقَ الجُهد بين طرفيها.
2. **أضبطُ المتغيرات:** أضبط جهد المصدر عند قيمةٍ مُنخَفضة (1 V)، وأشغّلهُ ثم أسجّلُ قراءتي الأميتر والفولتميتر، وأدوّنهما في جدولٍ مُخصّصٍ في كتاب الأنشطة.
3. **أقيسُ:** أرفع جهد المصدر قليلاً، ثم أُسجّل قراءتي الأميتر والفولتميتر في الجدول، وأكرّر ذلك ثلاث مرّاتٍ، وفي كل مرّةٍ أرفع الجُهد، أحرِصُ على عدم زيادة قيمة الجُهد عن قياس (6 V).
4. أكرّرُ الخطوات الثلاث السابقة مرتين إضافيّتين مع تبديل المقاومة في كل مرة، وأدوّنُ القياسات.

التحليل والاستنتاج:

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

المقاومة والقوة الدافعة الكهربائية
Resistance and Electromotive Force

الفكرة الرئيسة: تُصنّفُ الموادّ بحسب مقاوميّتها إلى موصلةٍ وعازلةٍ وشبه موصلةٍ، والمقاومات الكهربائية أحد أهمّ عناصر الدارات الكهربائية، وتختلف في أنواعها وقيَمِها باختلاف الغرض من استخدامها.

نتاجات التعلم:

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

المفاهيم والمصطلحات

مقاومة Resistance

مقاوميّة Resistivity

قوة دافعة كهربائية Electromotive Force

مقاومة داخلية Internal Resistance

الشكل (1): محمصة الخبز .

التيار الكهربائي Electric Current

من دراستي للكهرباء في سنوات سابقة؛ أتذكّر أنّ التيار الكهربائي في الفلزّات ينتُج عن حركة الإلكترونات الحرّة فيها، ومقداره يعتمد على كمية الشحنة التي تعبُر مقطعًا عرضيًّا في الموصل في وَحدة الزمن.

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

حيث (ΔQ) كمية الشحنة، (Δt) زمن عبورها، كما أتذكّر أنّ اتّجاه "التيار الاصطلاحي" يكونُ بعكس اتّجاه حركة هذه الإلكترونات. يقاس التيار الكهربائي بوحدة **أمبير** (A)، والأمبير هو مقدار التيار الكهربائي الذي يسري في موصلٍ عندما تعبُر مَقطَع هذا الموصل شحنةٌ مقدارُها (1 C) في ثانيةٍ واحدة.

المقاومةُ الكهربائيةُ Electric Resistance

عند تسخين قطعة خبزٍ في مُحمّصةٍ كهربائية، كما في الشكل(1)؛ أشغّل المُحمّصة، وأنتظر قليلًا فألاحظ احمرار سلك التسخين وأشعرُ بسخونته نتيجةَ سريان التيار الكهربائي فيه، بينما السلك الذي يصل المُحمّصة بمَقبس الجدار لا يزال باردًا. كيف أفسّر ذلك؟

سلكُ التسخين مصنوعٌ من مادّةٍ تختلف في خصائصها عن فلزّ النحاس الذي تُصنع منه أسلاك توصيل الكهرباء؛ حيثُ تنتقلُ الإلكترونات بسهولةٍ في الأسلاك النحاسية، بينما تواجه مُمَانعةً كبيرةً لحركتها عند مرورها في سلك التسخين، وتفقدُ الكثير من طاقتها الكهربائية التي تتحوّل إلى طاقةٍ حراريةٍ ترفعُ درجة حرارة السلك.

تُسمّى الخاصية التي تُسبّب هذه الممانعة **المقاومة الكهربائية** (R) **Electric resistance**، وتُعرّف مقاومة أي جزء في دارة كهربائية بأنّها نسبةُ فرق الجُهد بين طرفي هذا الجزء إلى التيار المارّ فيه. تقاسُ المقاومةُ الكهربائية بوحدة أوم (Ohm)، ويُستخدَم لتمثيلها الرمز (omega: Ω).

أتحقّقُ: ما نوع التحوّل في الطاقة في سلك التسخين في مُحمّصة الخبز الكهربائية؟

......

قانون أوم Ohm's Law

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

$$\Delta V = IR$$

يُقاسُ فرق الجُهد بوحدة **فولت** (V)، ويُعرّف الفولت أنّه فرقُ الجُهد بين طرفي موصلٍ مقاومتُه $(1\ \Omega)$ يسري فيه تيارٌ كهربائيٌّ $(1\ \mathrm{A})$.

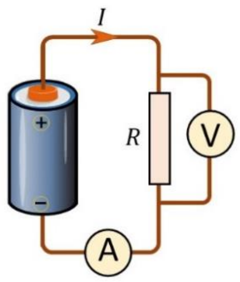
الموصلات الأوميّة Ohmic Conductors

في التجربة الاستهلالية؛ نُفِّذ استقصاءٌ عمليٌّ لمقاوماتٍ كهربائيةٍ مختلفة، وجرى توصيلُ الدارة الكهربائية كما في الشكل (2)، واستُخدمَ جهاز أميتر(A) لقياس التيار في المقاومة، وجهاز فولتميتر (V) لقياس فرق الجُهد بين طرفيها، ثم مُثّلت النتائجُ بعلاقةٍ بيانيّةٍ بين المُتغيّرين، عند ثبات درجة الحرارة؛ فكانت خطًّا مُستقيمًا، كما في الشكل (3/أ)، ومثل هذه المُوصِلات التي تكون العلاقة البيانية الخاصة بها خطًّا مستقيمًا، تُوصَف بأنها تخضع لقانون أوم؛ لذلك تُسمّى موصلاتٍ أوميّةً **Ohmic conductors**.

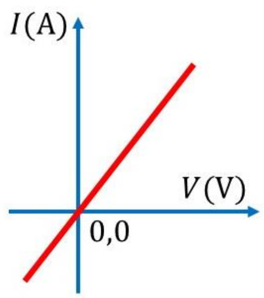
عندما ترتفع درجة حرارة الموصل الأوميّ، فإنّ مقاومتهُ تزداد، مع بقاء العلاقة بين الجُهد والتيار خطيّةً بثبات درجة الحرارة عند قيمةٍ جديدة؛ أي أنّه يبقى موصّلًا أوميًّا. فَتيلُ المصباح المُتوهّج هو سلكٌ فلزيٌّ رفيعٌ مصنوعٌ من التنغستن؛ عند ارتفاع درجة حرارته يزداد ميلُ الخطِّ المستقيم، أي تزدادُ مقاومته.

كيف أُفسّر زيادة مقاومة الموصل بارتفاع درجة حرارته؟

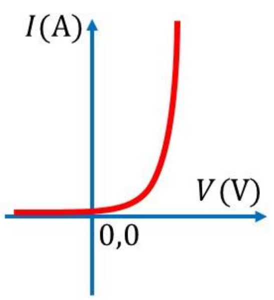
عند سريان التيار في موصلٍ فإنَّ الإلكترونات الحُرّة تتصادمُ في ما بينها، كما تتصادم مع ذرات الموصل؛ فتنقلُ جزءًا من طاقتها الحركية إلى ذرّات الموصل، فتزدادُ سَعة اهتزازها، ممّا يزيدُ من فرصةِ حدوث تصادماتٍ إضافيّة، فترتفعُ درجة حرارة الموصل وتزداد مقاومته.



الشكل (2): قياس فرق الجُهد بين طرفي مقاومة كهربائية.



(أ): منحنى $(I - V)$ لموصل أومي



(ب): منحنى $(I - V)$ لوصلة الثنائي.

الشكل (3): منحنيات الجُهد- التيار $(I - V)$ لمواد أومية ومواد لا أومية.

......

المواد اللا أوميّة Nonohmic Conductors

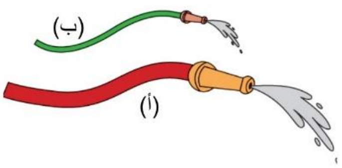
بعض المواد تكون العلاقة بين التيار الكهربائي الذي يسري فيها وفرق الجُهد بين طرفيها غيرَ خطيّة، حتى عند ثبوت درجة حرارتها أنظرُ الشكل (3/ب). وهذا يعني أنّ مقاومَتها تتغيّر مع تغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها. مثلُ هذه المواد تُسمّى **موادَّ لا أوميّةً Non–ohmic materials**؛ ومن الأمثلة عليها الوصلات الإلكترونية، الثنائي (diod)، والثنائي الباعث للضوء (LED)، والترانزستور (transistor)، وتعدُّ من المُكوّنات الأساسية للدارات الإلكترونية وهي مصنوعةٌ من أشباهِ المُوصِلات، مثل الجرمانيوم والسيليكون. يمثّلُ الشكل (3/ب) العلاقةَ بين التيار والجُهد لوصلة الثنائي.

المقاومة والمقاوميّة Resistivity and Resistance

عودةً إلى مثال مُحمِّصة الخبز التي ترتفع درجة الحرارة فيها بسبب مقاومة سلك التسخين؛ لأنّه مصنوعٌ من سبيكة النيكروم Nichrome (نيكل وكروم)، في حين أنّ أسلاكَ التوصيل النحاسيّةَ فيها لا تُسخُّن؛ إذ لا تسمح الفلزّاتُ جميعُها للإلكترونات بالانتقال خلالَها بالسهولة نفسِها، فنوعُ المادّة وأبعادُها الهندسية تؤثر جميعُها في مقاومتها الكهربائية.

يمكن تشبيه مرور التيار الكهربائي في الموصلات بتدفق الماء في الخُرطوم، فكلّما زادت مساحة مَقطع الخُرطوم زادت كمية الماء التي تتدفّق خلاله في الثانية الواحدة، وكذلكَ التيار الكهربائيُّ. يبيّنُ الشكل (4) أنّ خُرطوم الإطفاء (أ) ينقلُ الماءَ بمعدّلٍ زمنيٍّ أكبرَ من خُرطوم ريِّ حديقة المنزل (ب).

للوقوف على العوامل المؤثرة في المقاومة الكهربائية لموصلٍ فلزّيٍّ، واستقصائها بطريقة عملية؛ أنفّذُ التجربة الآتية.

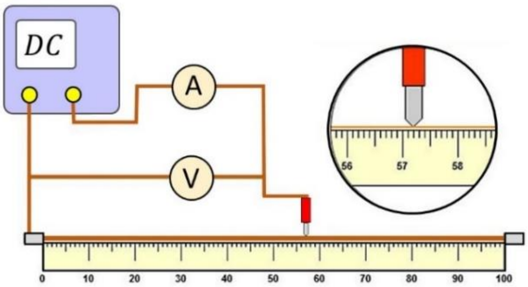


الشكل (4): خرطوم الإطفاء وخرطوم ري الحديقة.

......

التجربة 1: استنتاجُ العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية لموصل

الموادُّ والأدوات: ميكروميتر، مَسطرةٌ متريّةٌ خشبية، جهازَي أميتر وفولتميتر، أسلاكُ توصيل، ومصدر جهد منخفض مُتغيّر، سلك نيكروم رفيعٍ طولُه (1 m)، ثلاثةُ أسلاك: نيكروم، وحديد، وتنغستون، طول كلٍّ منها (40 cm) وأقطارُها متساوية.



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

خطوات العمل: (الجزء 1)

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُثبّتُ سلك النيكروم من طرفيه على المسطرة المتريّة الخشبيّة، بشكل مستقيمٍ ومشدودٍ بدءًا من الصفر.
2. أصلُ أحدَ قطبي مصدر فرق الجُهد مع نقطة الصفر، والقطبَ الآخر مع الأميتر، وأضعُ في نهاية السلك المُتّصل بالأميتر ملقط فكِّ تمساحٍ. وأصلُ الفولتميتر على التوازي مع سلك النيكروم، كما في الشكل.
3. أشغّلُ المصدر وأضبطُه على (1 V)؛ حتى لا ترتفع درجةُ حرارة سلك النيكروم وتؤثّرَ في القراءات.
4. ألامسُ ملقطَ فكّ التمساح (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 ملقط فك التمساح إلى المسافات (40, 60, 80 cm)، ثم أدوّن قِيَمَ الجُهد والتيار.

خطوات العمل: (الجزء 2)

1. أقيسُ أقطارَ الأسلاك جميعها وأدوّنُها، ثم أضعُ سلك النيكروم الثاني (40 cm) بدل الأوّل.
2. ألامسُ ملقط فكّ التمساح إلى نهاية السلك، وأضبطُ فرقَ الجُهد على (1 V) وأدوّن قيمتي الجُهد والتيار.

خطوات العمل: (الجزء 3)

1. **ضبطُ المتغيّرات:** أستخدم سلك الحديد (المُماثل بالقياسات) مكان سلك النيكروم، ثم أكرّرُ خطوات الجزء 2.
2. أكرّرُ الخطوةَ السابقة باستخدام سلك التنغستون (المماثل بالقياسات)، وأدوّن النتائج.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتجُ** معتمدًا على بيانات الجدول الأول والرسم البياني؛ أستنتجُ علاقةً بين طول الموصل ومقاومته.
2. **أستنتجُ** معتمدًا على بيانات الجدول الثاني؛ نوعَ 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 التيار الكهربائيّ في أيٍّ من المراحل في تسخين الموصل؛ كيف سيؤثر ذلك على النتائج؟

العوامل المؤثرة في المقاومة Factors Affecting the Resistance

استنتجتُ من التجربة السابقة ثلاثةَ عوامل تعتمد عليها المقاومة الكهربائية للموصل، وبيّنت النتائجُ العمليّة كيف يؤثّر كلُّ عاملٍ منها في قيمة هذه المقاومة. فالأبعادُ الهندسيّةُ للموصل ونوعُ مادّته تحدّدان مقاومتَه، كما أنّ درجةَ حرارة الموصل تؤثّر في مقدار هذه المقاومة؛ إلا أنّ عاملَ درجة الحرارة تم ضبطُه في مراحل التجربة السابقة جميعِها بالحفاظ على درجة حرارةٍ متدنّيةٍ وثابتة، أي أنّه جرى استبعادُ أثر الحرارة في المقاومة.

طول الموصل: ألاحظُ في الجزءِ 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، ويُولّد المزيد من الحرارة أكثر ممّا يحدث لها إذا كان المُوصِلُ قصيرًا.

المقطعُ العرضيّ للموصل: ألاحظُ في الجزءِ الثاني من التجربة أنّ مقاومة الموصل تقلُّ بزيادة مساحة مَقطعِه العرضيّ، ويمكن تفسيرُ ذلك بأنّ زيادة مساحة المقطع تزيدُ من عدد الإلكترونات الناقلة للتيار.

نوع مادة الموصل: ألاحظ أنّ الموادّ تختلف عن بعضها في مقاومتها لمرور التيار الكهربائي؛ إذ تعدُّ بعض الفلزات؛ مثل النحاس، والفَضّة، والألمنيوم موصلاتٍ جيّدةً للكهرباء، في حين تُوجَد فلزّاتٌ أُخرى مثل التنغستون والنيكروم ذات مقاومةٍ كبيرةٍ لسريان التيار الكهربائي فيها، في حين تكون للمواد العازلة قيمُ مقاومةٍ عاليةٍ جدًا.

المقاومة الكهربائية للموصل تتناسب طرديًّا مع طول (L) الموصل وعكسيًّا مع مساحة مَقطَعِه (A)، ويمكن كتابة علاقة التناسب هذه على الصورة:

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

بإدخال ثابت التناسب في العلاقة، نحصل على معادلةٍ خاصّةٍ بمقاومة أي موصلٍ منتظم الشكل مهما كانت أبعادُه، علمًا أن ثابت التناسُب يختلف باختلاف نوع المادة، ويُسمّى الثابتُ **مُقاوميّة المادة**؛ وسوف نرمز له بـ (ρ):

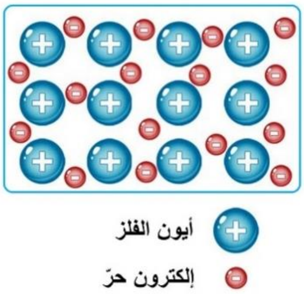
$$R = \frac{\rho L}{A}$$

بإعادة ترتيب حدود العلاقة تُصبح على الصورة:

.....

الربط مع الكيمياء:

تحتوي الفلزّات على عددٍ كبيرٍ من الإلكترونات الحرة التي تتحرك باستمرار بين نوى الفلزّ لتُشكّل رابطةً فلزية، وتعتمد طاقتها الحركية على درجة حرارة الفلزّ، وتعود خصيصة التوصيل الكهربائي إلى حركة هذه الإلكترونات، في حين تبقى الأيوناتُ الموجبة في الفلزِ في أماكنها.



ملاحظة: الرسمُ توضيحيٌ ولا يعبّر عن نسبٍ حقيقيّةٍ للحجوم والمسافات.

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

وبذلك أُعرّف **مُقاوميّة المادة Resistivity**؛ بأنّها مقاومةُ عيّنةٍ من المادة مساحة مقطَعِها $(1\ \text{m}^2)$، وطولها $(1\ \text{m})$ عند درجة حرارة معينة. كما أنّ وحدة قياس المقاومية هي (Ωm).

مثال (1):

مصباحٌ كهربائيٌّ يمر فيه تيار $(500\ \text{mA})$، عندما يتّصل مع فرق جهد $(3\ \text{V})$. ما مقاومة المصباح؟

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

المطلوب: $R\ = ?$

الحل:

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

مثال (2):

يُستخدم في سخانٍ كهربائيٍّ مقاومة تسخينٍ من سلك نيكروم طوله $(100\ \text{cm})$ ومساحة مقطعه العرضي $(0.5\ \text{mm}^2)$. إذا علمتُ أن مقاومية النيكروم تساوي $(1.5 \times 10^{-6}\ \Omega\text{m})$؛ أحسبُ مقاومة سلك التسخين.

المعطيات: $L = 1.0\ \text{m}, A = 0.5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2,$
$\rho = 1.5 \times 10^{-6}\ \Omega\text{m}$

المطلوب: $R\ = ?$

الحل:

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{1.5 \times 10^{-6} \times 1.0}{0.5 \times 10^{-6}} = 3\ \Omega$$

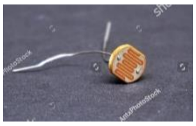
مثال (3):

فتيلُ مصباحٍ مُتوهّجٍ مصنوعٍ من سلكٍ رفيعٍ من التنغستون؛ نصف قطره $10\ \mu\text{m}$ على شكل ملف لولبي، كما في الشكل(5)، مقاومتهُ $560\ \Omega$. عند شدِّهِ جيدًا تبيّن أنّ طولَ السلك $(3.14\ \text{m})$. أحسبُ مقاوميّة التنغستون.

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

.....

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



الربط مع الحياة:

إضاءة مصابيح الشوارع

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

الشكل (5): فتيل التنغستون في مصباحٍ متوهّجٍ.

جدول (1): مقاوميّة بعض المواد عند درجة حرارة (20 ° C).	
المادة	المقاومية (Ωm)
فضة	1.59×10^{-8}
نحاس	1.7×10^{-8}
ذهب	2.44×10^{-8}
ألمنيوم	2.82×10^{-8}
تنغستون	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}

المطلوب: $\rho\ =?$

الحلّ:

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

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

$$\rho = 5.65.6 \times 10^{-8}\ \Omega\mathrm{m}$$

الجدول (1) يبيّنُ مقاوميّة بعض المواد، وبمعاينة الجدول؛ أجدُ أنّ مقاوميّة الموادّ تتراوح من قيمٍ صغيرةٍ جدًّا بالنسبة للمواد المُوصلة، مثل الفضّة والنحاس، إلى قيمٍ كبيرةٍ جدًا للموادّ العازلة مثل الزجاج والمطّاط، مرورًا بمواد تُسمّى أشباه مُوصلات. فالمادة المُوصلة المثالية (فائقة التوصيل) تقاربُ قيمةَ مُقاوميّتها الصفر، والمادة العازلة المثالية مقاوميّتها لا نهائيّة.

أتحقّقُ:

أوضّح الفرق بين مفهومي المقاومة والمُقاوميّة.

القوّة الدافعة الكهربائية emf Electromotive Force

تنتجُ البطاريةُ الطاقة عن طريقِ تفاعُلات كيميائيّة تجري داخلها، وتعمل على توليد فرق جُهدٍ كهربائيّ بين طرفيها أُطلِق عليه اسمُ القوّة الدافعة الكهربائية Electromotive force، وهذه تسميةٌ اصطلاحيّةٌ قديمة، فالقوّة الدافعة الكهربائيّة ليست قوةً ميكانيكيّة، بل هي فرق جهدٍ كهربائيّ تولّدهُ البطارية بين قُطبيها يقاس بوحدة فولت. وتعرّف **القوة الدافعة الكهربائية** (ε) بأنها؛ الشغل الذي تبذله البطارية في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب. ومقدارُها يساوي أكبر فرق جُهدٍ يُمكن أن تولّدهُ البطارية بين قطبيها، وتُقاس بوحدة فولت (V).

أتخيّل أنّ القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية تشبه مضخةً للشحنات؛ فتعمل على تحريك الشحنات الموجبة (الافتراضية) داخل البطارية من القطب السالب الأقل جُهدًا إلى القطب الموجب الأعلى جُهدًا، وبذلك تكتسبُ تلك الشحنات طاقةً في أثناء حركتها داخل البطارية. وعندما تكمل حركتها خلال الدارة، فإنها تفقد هذه الطاقة عند عبورها المقاومة.

أفكر:

الأيونات الموجبة في المواد الكيميائية داخل البطارية ليست ناقلةً للتيار الكهربائي، إنّما الإلكترونات هي التي تتحرك. أصفُ اتّجاه حركتها والشغل المبذول عليها، وأذكر تحولات الطاقة.

.....

الشكل (6) يُبيّن مقاومةً يتّصلُ طرفاها مع قطبي بطارية، حيث يكونُ القطب الموجب للبطاريّة أعلى جهدًا من قطبها السالب. أفترض أن أسلاك التوصيل مثاليةٌ؛ لا مقاومة لها. في حين أنّ للبطارية **مقاومةً داخليةً Internal resistance** (r) تُعيق حركةَ الشحنات داخلها، وتؤثّر في فرق الجُهد بين طرفيها.

أتحقّقُ:

ما أهميّة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية بالنسبة لحركة الشحنات عبر الدارة الكهربائية؟

التمثيلُ البياني لتغيرات الجُهد الكهربائي

Graphical Representation of Electric Potential Changes

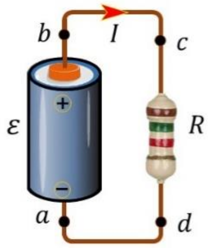
لمعرفة تغيُّرات الجُهد عبر مُكوّنات أيّ دارة كهربائية، مثل المُبيّنة في الشكل (7/ أ)؛ فإنّني أعبُر الدارة باتّجاه مُحدّدٍ، وأواجه تغيُّراتٍ في الجُهد الكهربائي عند الانتقال من نقطةٍ إلى أُخرى في الدارة، سوف أتحرّكُ باتّجاه دوران عقارب الساعة مُبتدئًا من النقطة (a) التي تمثل قطب البطارية السالب، حتى أكمل العروة كاملةً بالعودة إلى نقطة البداية (a). يُمكنُني تمثيلُ التغيُّرات في الجُهد الكهربائي التي سأواجهها بيانيًّا كما في الشكل (7/ ب).

عند عبور البطارية من النقطة (a) إلى النقطة (b) يزدادُ فرق الجُهد بمقدار القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية (ε)، لكنّه ينقُصُ نتيجة تأثير المقاومة الداخلية للبطارية بمقدار (Ir)؛ لذلك فإنّ التغيُّر في الجُهد (ΔV) بين قطبي البطارية يساوي مجموع التغيُّرات في الجهود بين النقطتين (a) و (b)، ويُعطَى بالعلاقة الآتية:

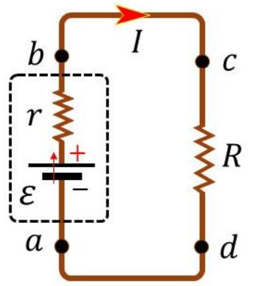
$$\Delta V_\varepsilon = V_b - V_a = \varepsilon - Ir$$

أستنتج أن فرق الجُهد بين طرفي البطارية يساوي القوة الدافعة الكهربائية عندما يكون التيّار المارُّ في البطارية يساوي صفرًا، أو عندما تكون قيمة المقاومة الداخلية للبطارية تساوي صفرًا، وفي هذه الحالة تُسمّى بطاريةً مثاليةً. بالعودة الى تتبُّع المسار في الدارة؛ فعند الحركة من النقطة (b) إلى النقطة (c) يبقى الجُهد ثابتا لأنّ السلك مُهمَل المُقاومة.

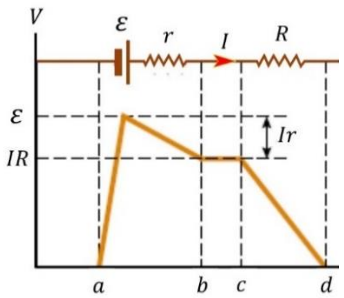
......



الشكل (6): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية.



الشكل (7/ أ): مقاومةٌ موصولةٌ بقطبي بطارية، ممثلةٌ بالرموز.



الشكل (7/ ب): التمثيل البياني لتغيُّرات الجُهد في الدارة البسيطة.

أصمّم باستعمال برنامج السكراتش Scratch عرضًا يُوضّح المُنحنى البيانيّ لتغيُّرات الجُهد في دارةٍ كهربائيةٍ أو جزءٍ منها، عن طريق اختيار مكوّناتٍ مُعيّنةٍ للدارة، ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.

أمّا عند عبور المقاومة بالحركة من النقطة (c) الى النقطة (d)؛ فينخفض الجُهد، وبذلك فإنّ التغيُّر في الجُهد يُساوي:

$$\Delta V_R = V_d - V_c = -IR$$

أي أنّ جهد النقطة (d) أقلُّ من جهد النقطة (c). بالاستمرار في الحركة من النقطة (d) باتّجاه دوران عقارب الساعة يبقى الجُهد ثابتًا، ونعود الى نقطة البداية نفسها. بإهمال مقاومة الأسلاك، فإنّ: $V_c =$ $V_d = V_a$ و V_b

إنّ التغيُّر في الجُهد بين طرفي البطارية يُساوي سالبَ التغيُّر في الجُهد بين طرفي المقاومة الخارجية، ويُمكنُني التعبير عن ذلك رياضيًّا بالعلاقة:

$$\Delta V_\varepsilon = -\Delta V_R \rightarrow \varepsilon - Ir = -(-I\ R)$$

$$\varepsilon = IR + Ir$$

مثال (4):

بطاريّةٌ قُوّتها الدافعة الكهربائية $(12.0\ \text{V})$ ومقاومتها الداخلية $(0.5\ \Omega)$، وُصِل قطباها مع مصباح في دارة كهربائية، كما في الشكل (8)، فكان التيار المارُّ فيها $(2.4\ \text{A})$. أحسبُ فرق الجُهد بين قطبي البطارية. $\Delta V_\varepsilon = V_b - V_a$

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

المطلوب: $\Delta V_\varepsilon\ = ?$

الحل:

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

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

تمرين:

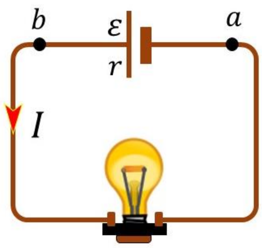
في المثال (4)؛ إذا كان التيّار المارُّ في البطارية $(4.0\ \text{A})$؛ أحسبُ فرقَ الجُهد بين قطبيها (ΔV_ε).

أفكر:

ما تحوّلات الطاقة التي تحدث داخل البطارية في الحالتين:

أ) توليد القوة الدافعة الكهربائية وبذل شُغلٍ لتحريك الشحنات خلال الدارة.

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



الشكل (8): دارةٌ كهربائيةٌ تحتوي بطاريةً ومصباحًا كهربائيًّا.

.....

مثال (5):

مُثِّلتْ تغيُّرات الجُهد في دارة كهربائية بيانيًّا، كما في الشكل (9).

مُعتمدًا على بيانات الشكل أجدُ كلًّا من:

أ) التيار الكهربائي في الدارة.

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

ج) العنصر الموصول بين النقطتين (d) و (e)، وقياساته.

المعطيات: بيانات الشكل.

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

الحل:

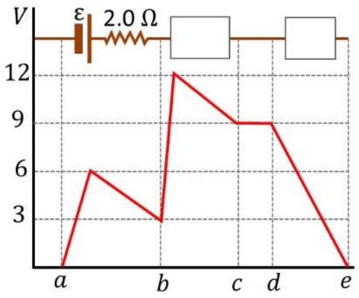
أ) المنحنى البياني بين النقطتين (a) و (b) يُبيّن ارتفاع الجُهد $(6.0\ \text{V})$ ثم انخفاضه $(3.0\ \text{V})$، وهذا يُفيد بأن القوة الدافعة الكهربائية للبطارية $(\varepsilon = 6.0\ \text{V})$، وهبوط الجُهد فيها يساوي $(Ir = 3.0\ \text{V})$.

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

ب) العنصرُ الموصول بين النقطتين (b) و (c) يرفع الجُهد ثم يَخفِضُه، فهو بطاريّةٌ قوّتها الدافعة الكهربائية $(\varepsilon = 9\ \text{V})$، وهبوط الجُهد فيها $(Ir = 3.0\ \text{V})$، أي أنّ $(r = 2.0\ \Omega)$.

ج) العنصرُ الموصول بين النقطتين (d) و (e) يَخفض الجُهد بمقدار $(9\ \text{V})$، فهو مقاومة $(IR = 9\ \text{V})$، أي أنّ:

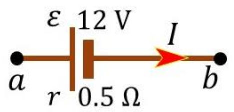
$$R = \frac{9.0}{1.5} = 6.0\ \Omega$$



الشكل (9): التمثيل البياني لدارة بسيطة تحتوي مكونات مجهولة.

أفكر:

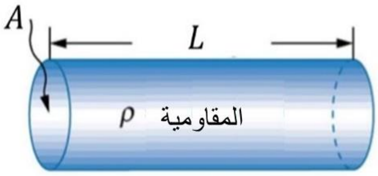
عندما يسري تيّارٌ كهربائيٌّ $(3\ \text{A})$ خلال البطارية (ε) من النقطة (a) إلى النقطة (b). أجدُ فرق الجُهد بين النقطتين: $(\Delta V = V_b - V_a)$.



......

مراجعة الدرس:

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



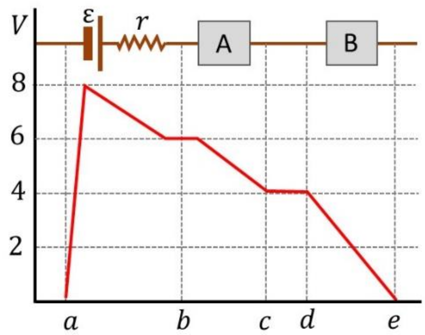
2. يبيّنُ الشكلُ المجاور موصلًا فلزيًّا طولُه (L) ومساحة مَقطعِه (A). أوضّح متى تتساوى مقاومة هذا الموصل مع مقاوميّة المادة المصنوع منها.

3. **أحسبُ** المقاومة الكهربائية في كلٍّ من الأجهزة الآتية:

أ) جهاز حاسوب يسري فيه تيّارٌ كهربائيٌّ (800 mA) عند فرق جهد (220 V).

ب) محرّكٌ كهربائيٌّ يسري فيه تيّارٌ كهربائيٌّ (16 A) ويعمل على جهد (12 V).

4. تتكوّن دارةٌ كهربائيةٌ من بطاريّةٍ لها مقاومةٌ داخليةٌ ومكوّناتٌ أُخرى، يمرُّ فيها تيارٌ كهربائيٌّ (1.6 A) بالاتّجاه من (a) إلى (e). مُثّلَت تغيُّرات الجُهد فيها بيانيًّا، كما في الشكل المجاور. أجدُ ما يأتي:



أ) القوّة الدافعة الكهربائية للبطارية.

ب) المقاومة الداخلية للبطارية.

ج) أُحدّد ماهيّة العنصر (A)، وأجد قياساته.

د) أُحدّد نوع العنصر (B)، وأجد قياساته.

5. **أفسّر** لماذا يتغيّرُ فرق الجُهد بين قطبي البطارية عندما يتغيّر مقدارُ التيار الكهربائي المارِّ فيها؟

6. أوضّح العلاقة بين حركة كلٍّ من الإلكترونات والشحنات المُوجبة (الافتراضيّة) داخلَ البطارية مع اتّجاه التيار الكهربائيِّ فيها.

7. سخّانٌ كهربائيٌّ صغيرٌ يعمل على جهد (220 V). إذا كان عنصر التسخين فيه مصنوعٌ من سلك نيكروم طولهُ (83 m)، ونصفُ قُطرِهِ (0.3 mm). فما مقدارُ التيار الكهربائي المارّ في السخان؟

القدرة الكهربائية والدارة البسيطة
Electric Power and Simple Electric Circuit

الفكرةُ الرئيسة: تتضمّن تطبيقاتُ الكهرباء أجهزةً وداراتٍ كهربائيةً؛ تتفاوت من البسيطة، مثل دارة مصباح المكتب إلى المعقّدة، مثل تلك التي تُستخدم في تشغيل بعض أجهزة الطائرة. ولكلّ جهازٍ كهربائيٍّ قدرةٌ كهربائيةٌ تعتمد على الهدف من استخدامه.

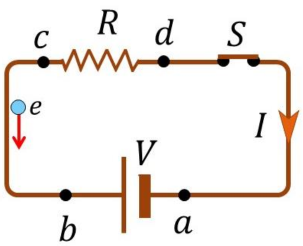
نتاجات التعلم:

- أعرّفُ القدرةَ والطاقةَ الكهربائية بمعادلات.
- أحلّل داراتٍ كهربائيةً بسيطةً، وأحسبُ فرقَ الجُهد والتيار المارّ في كلّ مُقاومةٍ
- أحسبُ الطاقة الكهربائية التي تستهلكها الأجهزة في المنازل. وتكاليف استهلاكها.
- أحدّدُ طرائق لتقليل استهلاك الطاقة الكهربائية في المنازل والمصانع.
- أشتقُّ وحدة قياس القدرة الكهربائية، والطاقة الكهربائية، مستخدمًا الصيغ الرياضية لها.

المفاهيم والمصطلحات:

القدرة الكهربائية Electric Power

الطاقة الكهربائية Electric Energy



الشكل (10): حركة الإلكترونات في دارةٍ كهربائيّةٍ مُغلقةٍ بعكس اتّجاه التيار الاصطلاحي I.

القدرة الكهربائية Electrical Power

تعرفتُ في الدرس السابق كُلًّا من المقاومة الكهربائية والعوامل التي تعتمد عليها، وأهمية البطارية في الدارة الكهربائية، والقوة الدافعة الكهربائية. لكن ماذا عن القدرة الكهربائية للبطارية أو القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة؟

الإلكترونات هي الشحنات التي تتحرّك فعليًّا في الدارة الكهربائية، وتكون حركتُها بعكس اتجاه التيار الاصطلاحي (I) الذي يُعبّر عن حركة شحناتٍ افتراضيّةٍ موجبةٍ. عند حركة الإلكترونات خلال الدارة الكهربائية المُبيّنة في الشكل (10) من النقطة (b) إلى النقطة (a) عبر البطارية، فإنّ البطارية تُكسبها طاقة، عندما تبذلُ عليها شغلًا مصدرهُ الطاقة الكيميائيّة داخلها، إلّا أنّ هذه الإلكترونات تفقدُ جزءًا ضئيلًا من طاقتها داخل البطارية نفسِها بسبب المُقاومة الداخلية لها (r). وكذلك داخل المقاومة (R)، فإنّ الإلكترونات تخسرُ معظم الطاقة التي اكتسبتها من البطارية، هذه الخسارةُ نتيجةَ تصادُمها مع بعضها بعضًا ومع ذرات المادة المصنوعة منها المقاومة، وتتحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقةٍ حركيّةٍ للذرّات تسبّبُ ارتفاع درجة حرارة المقاومة. تُكمل الإلكترونات حركتها من النقطة (c) مُنجذبةً إلى القطب الموجب للبطارية (b)، وهي نقطة البداية مُكملةً دورَتها في الدارة الكهربائية.

إن تعريف القوة الدافعة الكهربائية للبطارية، بأنّها الشغلُ المبذول على وحدة الشحنات؛ وإنّها ناتجُ قسمة الشغل الكُلّي (W) على الشحنة المنقولة (Q) خلال البطارية، يُمكّنُني من التعبير عنها رياضيًّا بالعلاقة:

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

وحيثُ تُعرّف **القدرة** بأنّها المعدلُ الزمنيّ للشُّغل المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt). فإنّ **القدرة الكهربائية Electrical power** للبطارية تُعرّف بأنها المُعدّل الزمنيّ للشُّغل الذي تبذلهُ، وتُعطى بالعلاقة:

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

أي أنّ قُدرة البطاريّة تُساوي حاصل ضرب قُوّتها الدافعة الكهربائية في التيار المارّ فيها. باستخدام العلاقة السابقة $\Delta V = \varepsilon - Ir = IR$ يمكنُنِي التعبير عن قدرة البطارية كما يأتي:

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

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

$$P = I^2R = IV = V^2/R$$

يمكن تعريفُ وحدة **الواط** بأنها؛ قدرةُ جهازٍ كهربائيٍّ يستهلكُ طاقةً كهربائيةً بمقدار $(1\ \text{J})$ كُلَّ ثانية. أو هي قدرة جهازٍ يمرُّ فيه تيارٌ كهربائيّ $(1\ \text{A})$ عندما يكون فرق الجُهد بين طرفية $(1\ \text{V})$.

مثال (6):

زُوّدت كرةُ مولّدِ فان دي جراف بشحنةٍ مقدارُها $(3\ \mu\text{C})$. ثم فُرّغت على شكل شرارةٍ طاقتُها $(600\ \text{mJ})$. الشكل (11). أجدُ مقدار الجُهد الذي وصلت إليه الكرة.

المعطيات: $Q = 3 \times 10^{-6}\ \text{C},\ W = 0.6\ \text{J}$

المطلوب: $V\ =?$

الحل:

$$V = \frac{W}{Q} = \frac{0.6}{3 \times 10^{-6}} = 2 \times 10^{5}\ \text{V}$$

أتحقّقُ:

في الدارة الكهربائية البسيطة المُبيّنة في الشكل (10)؛ كيف تنتقل الشحنة الموجبة الافتراضية داخل البطارية؟ ومن أين تحصل على الطاقة؟

.....

أفكر:

أجد مقدار الشغل الذي تبذلهُ بطاريّةٌ لنقل شحنةٍ افتراضيةٍ موجبةٍ مقدارُها $(2\ \text{C})$ عبرَ البطاريّة من القطب السالب إلى القطب الموجب، عندما يكون فرق الجُهد بين قطبي البطارية $(12\ \text{V})$.

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 الكهربائية وتتولد حرارةٌ كافيةٌ لتسخين الأسلاك. عند حدوث دارة قصر في تمديدات الكهرباء المنزلية، تنصهر الأسلاك وتتولّد حرارةٌ كبيرةٌ قد تؤدي لاحتراق المنزل.

الشكل (11): كرة مولد فان دي غراف.

استهلاك الطاقة الكهربائية

تستهلكُ الأجهزة الكهربائية الطاقة الكهربائية بكميّةٍ تعتمد على قدرة الجهاز وزمن تشغيله؛ فمصباحٌ كهربائيٌّ مكتوبٌ علية $(15\ \mathrm{W})$؛ يعني أنّه يستهلك طاقةً كهربائيّةً مقدارُها $(15\ \mathrm{J})$ كلَّ ثانية تشغيل، وإذا شُغّل مدةَ نصف ساعةٍ فإنّه يستهلك كميّةً من الطاقة (E) تساوي:

$$E = P\Delta t = 15 \times 30\ \mathrm{min}\,\frac{60\ \mathrm{s}}{1\ \mathrm{min}} = 27000\ \mathrm{J}$$

إضافةً إلى وحدة الجول؛ تُستخدم لقياس الطاقة الكهربائية –أيضًا– وحدة كيلو واط ساعة (kWh)، وهذه كميةٌ من الطاقة يمكنُها تشغيل جهازٍ كهربائيٍّ قدرتُه $(1\ \mathrm{kW})$ مدّةَ ساعةٍ واحدة.

تُحسب تكلفة استهلاك الطاقة الكهربائية في المنازل والمصانع وغيرها بشكل دوري، بضرب سعر $(Price)$ وحدة الطاقة $(1\ \mathrm{kWh})$ في كمية الاستهلاك. ولتشجيع المستهلك على خفض استهلاك الكهرباء، تُخصّص عادةً أسعارٌ أقلُّ لشرائح الاستهلاك الدنيا.

مثال (7):

أحسب تكلفة تشغيل مُكيّفٍ قدرتُه $(4000\ \mathrm{W})$ مدة $(8\ \mathrm{h})$؛ إذا كان سعر وحدة الطاقة الكهربائية $(0.12\ \mathrm{JD/kWh})$.

المعطيات:

$$P = 3200\ \mathrm{W}\,,\ \ \Delta t = 8\ \mathrm{h}, price = 0.12\ \mathrm{JD/kWh}$$

المطلوب: التكلفة $cost = ?$

الحلّ:

$$cost = P\Delta t\, price = 4 \times 8 \times 0.12 = 3.84\ \mathrm{JD}$$

تطبيقٌ تكنولوجي: شحن السيارات الكهربائية

تُزوّد السيارة الكهربائية بالطاقة بواسطة شاحنٍ منزليّ، كما تتوافر أجهزة شحنٍ في الأماكن العامة، كما في الشكل (12)، وحيث أن القدرة الكهربائية لبطاريّة السيارة كبيرة، فهي تحتاج كميةً كبيرةً من الطاقة الكهربائية، ولتحقيق ذلك؛ لا بُدّ من وصل السيارة مع الشاحن مدّةً زمنيّةً طويلة. لتقليل هذه المُدّة ينبغي زيادة قدرة الشاحن والتيار الكهربائي الذي يسري عبر الأسلاك إلى بطارية السيارة. لكن هناك حدود أمان لا يمكن تخطيها، فعند ....

الربط مع التكنولوجيا

عند شراء بطارية هاتف، نبحث عن الأفضل، فالرقم الظاهر في الصورة $(2800\ \mathrm{mAh})$ يعني أن البطارية تُخزّن كميةً من الطاقة، تُمكّنها من إنشاء تيار $(2800\ \mathrm{mA})$ مدة ساعةٍ كاملة، أو تيار $(280\ \mathrm{mA})$ مدة عشر ساعات، أو ...

وكذلك بالنسبة لبطارية السيارة، نجد أنّ البطارية $(70\ \mathrm{Ah})$ أفضل من تلك التي تحمل الرقم $(50\ \mathrm{Ah})$.

معتمدًا على كمية الطاقة التي يمكن للبطارية تخزينها وقوتها الدافعة الكهربائية؛ يمكنُني أن أحسبُ الطاقة الكهربائية القصوى التي يمكن لهذه البطارية تخزينها.

الشكل (12): عملية شحن السيارة الكهربائية من جهاز شحن عام.

الشحن في المنزل لا يُنصح بزيادة التيار عن (13 A)؛ لمنع ارتفاع درجة حرارة الأسلاك، وهذا يتطلّبُ مدّة شحن قد تصل إلى (8) ساعات.

مثال (8):

يتّصلُ مصباح الضوء الأماميّ في السيارة مع مصدر جُهدٍ (12 V)؛ فيسري فيه تيارٌ كهربائيٌّ مقدارهُ (10 A). ما القدرة المستهلكة في هذا المصباح؟ وما مقاومته الكهربائية؟

المعطيات: $I = 10\ \text{A}\ ,\ V = 12\ \text{V}$

المطلوب: $R\ = ?\ , P\ = ?$

الحل:

$$P = IV = 10 \times 12 = 120\ \text{W}$$
$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{10} = 1.2\ \Omega$$

مثال (8):

سيارةٌ كهربائيّةٌ تُخزّن بطاريّتها طاقةً مقدارها (24 kWh)، وُصلت بجهاز شحن يزودها بتيار (16 A) عند جهد (220 V). أجد:

أ) القدرةَ الكهربائية للشاحن.

ب) المُدّة الزمنية لشحن البطارية بشكلٍ كامل.

ج) تكلفةَ 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: $t\ = ?,\ \ P\ = ?$

الحل:

أ) القدرة الكهربائية للشاحن:

$$P_{charger} = IV = 16 \times 220 = 3520\ \text{W} = 3.52\ kW$$

ب) زمن الشحن بالساعات:

$$t = \frac{E}{P_{charger}} = \frac{24}{3.52} = 6.8\ \text{h}$$

ج) تكلفة الشحن بشكل كامل.

$$cost = E \times Price = 24\ \text{kWh} \times 0.12\ \text{JD/kWh}$$
$$cost = 24 \times 0.12 = 2.88\ \text{JD}$$

الربط مع التكنولوجيا

نظرًا لارتفاع تكلفة فاتورة الطاقة، أصبح من الضروري التوجه إلى مصادر الطاقة المتجدّدة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية. تستخدم ألواحٌ تحتوي على عدد كبير من الخلايا الشمسية التي تحول طاقة ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية يجري استهلاكها في المنزل أو المصنع، ويُنقل الفائض منها إلى الشبكة الوطنية للكهرباء، بدلاً من استخدام البطاريات مرتفعة الثمن لتخزينه.

تمرين:

أحسب القدرة التي يستهلكها موقدٌ كهربائيٌّ مقاومة سلك التسخين فيه (19.2 Ω)، ويعمل على جهد (240 V).

.....

الدارة البسيطة Simple Electric Circuit

مكوّناتُ الدارة الكهربائيّة البسيطة Simple Circuit Components

تتكوّن الدارةُ الكهربائيةُ في أبسط أشكالها من مسارٍ مُغلقٍ (عروة) يسري فيه التيار الكهربائي، وعادةً تحتوي بطاريةً، ومقاومةً، ومفتاحًا، وأسلاك توصيل، وإذا فُتح المفتاح في الدائرة يتوقف سرَيان التيار الكهربائي فيها. تُستعمل مجموعة من الرموز – تعرفت بعضها– لتمثل مكونات الدارة الكهربائية، يبينها الشكل (13). وقد تستخدم ضمن مكونات الدارة الكهربائية البسيطة أجهزة قياس؛ مثل الأميتر والفولتميتر إذا اقتضت الحاجة لذلك.

معادلة الدارة البسيطة Simple Circuit Equation

تتكون دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ من بطاريّةٍ قوتُها الدافعة الكهربائية (ε)، ومقاومة (R)، ومفتاح (S). تتّصلُ جميعُها على التوالي ضمن مسارٍ واحد، كما يبيّن الشكل (14). بتطبيق قانون حفظ الطاقة؛ أجد أنّ مجموعُ القدرة المُنتجة في البطارية والقدرة المستهلكة في المقاومتين؛ الخارجية (R) والداخلية للبطارية (r) يساوي صفرًا، أي أنّ:

$$\Sigma P = 0 \quad \rightarrow \quad I\varepsilon - (I^2R + I^2r) = 0$$

بقسمة المعادلة على (I)، نحصل على معادلة الدارة الكهربائية البسيطة:

$$\varepsilon - (IR + Ir) = 0$$

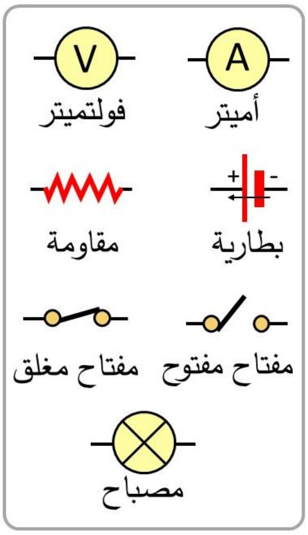
سأدرسُ لاحقًا مجموعةً من داراتٍ بسيطةٍ، وأخرى تحتوي على مقاوماتٍ عدّة، أو مقاومات وبطاريات.

مثال (9):

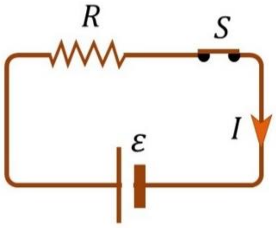
تتكوّن دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ من بطاريّةٍ ومقاومةٍ خارجية، مُبيّنةٌ قيمُها على الشكل (15). إذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية تساوي $(1\ \Omega)$. أحسبُ قيمة التيار في الدارة، وأُحدّد اتّجاهه.

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

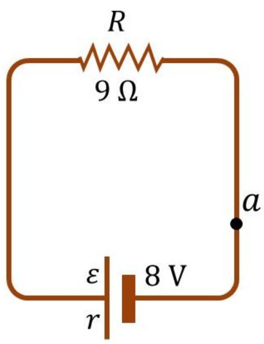
المطلوب: $I = ?$



الشكل (13): بعض رموز عناصر الدائرة الكهربائية البسيطة.



الشكل (14): دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ تحتوي بطاريّةً، ومقاومةً، ومُفتاحًا.



الشكل (15): دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تحتوي بطاريتين و3 مقاومات.

الحل: أختارُ نقطة مثل (a)؛ وأبدأ بالحركة منها لأكمل الدورة، وأفترض اتّجاهًا للتيار في الدارة، وليكن اتّجاه التيار المُفترض واتّجاه الحركة مع اتّجاه عقارب الساعة، ثم أطبّق معادلة الدارة البسيطة: $\Sigma\varepsilon - (\Sigma IR + \Sigma Ir) = 0$ $14 - I(9) - I(1) = 0$ $14 = 10\,I$ $I = \frac{14}{10} = 1.4\ \text{A}$ الإشارة الموجبة للتيار تعني أنّه بالاتّجاه المُفترض؛ أي مع اتّجاه عقارب الساعة. **أتحقّقُ:** أفسّرُ معادلة الدارة الكهربائية البسيطة اعتمادًا على مبدأ حفظ الطاقة.	

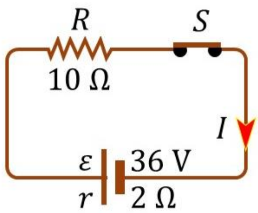
....

مراجعة الدرس:

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصودَ بالقُدرة الكهربائيّة، ووحدةَ قياسِها.

2. موصلان (A) و (B) متساويان في الطول ومساحة المقطع، وُصِل كلٌّ منهما مع مصدر الجُهد الكهربائي نفسه، إذا كانت مقاوميّة مادة الموصل (A) مثلَيْ مقاوميّة مادة الموصل (B)؛ فما نسبة القدرة التي يستهلكها أحدهما إلى قدرة الآخر؟

3. **أستخدم المُتغيّرات:** في الدارة الكهربائية المُبيّنة في الشكل المجاور؛ عند إغلاق المفتاح (s) مدة ($5\ \text{min}$). إذا كان التيار ($3\ \text{A}$)؛ أحسب ما يأتي:



أ) الطاقة التي تنتجُها البطارية (الشغل الذي تبذله).

ب) الطاقة التي تستهلكها كلُّ مقاومة.

ج) نوع تحوّلات الطاقة في البطارية وفي المقاومات.

4. يتسبّبُ فرق في الجُهد بين غيمةٍ وسطح الأرض مقداره ($1.5 \times 10^{10}\ \text{V}$) في حدوث البرق؛ فينشأ تيّارٌ كهربائيٌّ مقدارهُ ($30\ \text{kA}$)، يستمر مدّة ($30\ \mu\text{s}$) لتفريغ الشحنة في الأرض. ما مقدار الطاقة الكهربائية المنقولة خلال هذا التفريغ؟

5. **أستخدم المتغيرات:** وُصلت سيارة أطفال كهربائيّة مع شاحن كهربائي جهدهُ ($12\ \text{V}$)، وقدرته ($120\ \text{W}$) حتى اكتملت عملية الشحن. إذا علمت أن مقدار الطاقة الكهربائية التي انتقلت إلى البطارية ($2.4\ \text{kWh}$)؛ أحسبُ:

أ) المدّةَ الزمنيّة لاكتمال عملية الشحن.

ب) التيار المارَّ بين الشاحن وبطارية السيارة.

ج) هل يمكن شحن السيارة باستخدام محوّلٍ جُهدهُ ($12\ \text{V}$)، والتيار الذي يُنتِجه ($1\ \text{A}$)؟

الدرس 3

توصيلُ المقاوماتِ وقاعدتا كيرشوف
Combining Resistors and Kirchhoff's Rules

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

نتاجات التعلم:

- ينفِّذ استقصاءً عمليًا ليتعرف خصائص توصيل المقاومات على التوالي وعلى التوازي، من حيث التيار المارّ في كل منها وفرق الجُهد بين طرفيها.
- يُحلّل داراتٍ كهربائية معقدةً موظفًا قانوني كيرشوف

المفاهيم والمصطلحات

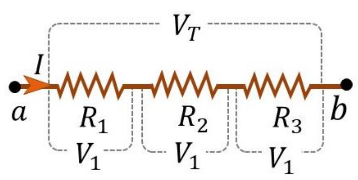
توصيل المقاومات Combining Resistors

توالي Series

توازي Parallel

قاعدتا كيرشوف Kirchhoff's Rules

المقاومة المكافئة Equivalent Resistance



الشكل (16): توصيل المقاومات على التوالي.

توصيل المقاومات Combining Resistors

تُستخدمُ المقاوماتُ الكهربائيةُ بقيمٍ مُختلفة، وطرائق توصيلٍ مختلفةٍ في دارات الأجهزة الكهربائية، 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 التيار الكهربائي (I) نفسُه، وبذلك يكون فرق الجُهد بين طرفي كلِّ مقاومةٍ مساويًا لحاصل ضرب المقاومة في التيار.

$$V_1 = IR_1, \quad V_2 = IR_2, \; V_3 = IR_3$$

فرق الجُهد الكُلّي بين النقطتين (a, b) يساوي مجموع الجهود الفرعية.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_T = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

عند مقارنة هذه المقاومات مع مقاومةٍ وحيدةٍ بينَ طرفيها فرق الجُهد نفسه (V_T)، ويمر فيها التيار نفسه (I)، وتحقق العلاقة: ($V_T = IR_{eq}$)، نجدُ أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

يُستخدمُ التوصيلُ بهذه الطريقة للحصول على مقاومةٍ كبيرةٍ من عددٍ من المقاومات الصغيرة؛ فالمقاومة المكافئة تكون أكبر من أيٍّ منها، ومن خصائص هذا التوصيل تجزئةُ الجُهد بين المقاومات، لكن عيبها أنّه عند حدوثِ قَطْعٍ في مقاومةٍ يتوقّفُ التيار في المقاومات جميعها.

أتحقّقُ: أذكر خصائص توصيل المقاومات على التوالي، وأذكرُ عيبَ هذه الطريقة في التوصيل.

......

المقاومات على التوازي Resistors in Parallel

يبيّن الشكلُ (17) جزءًا من دارةٍ كهربائيةٍ تتّصل فيه ثلاثُ مقاوماتٍ على التوازي، بعد مرور التيار الكهربائي (I) بالنقطة (a)، فإنّ الشحنة تتوزّع على المقاومات الثلاث؛ فيمرُّ تيارٌ جزئيٌّ في كلّ مقاومةٍ لتلتقي مرّةً أخرى وتُشكّل التيار الكُلّي (I) الذي يمر بالنقطة (b). لتحقيق مبدأ حفظ الشحنة يجب أن تتحقّق العلاقة الآتية:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

أمّا فرقُ الجُهد بين النقطتين (a, b)؛ فإنّه يساوي مقدارًا واحدًا مهما كان المسار الذي تتّبعهُ الشحنات بينهما. أي أنّ:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_2$$

بتعويض التيار بدلالة 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 أصغرُ من أيّ مقاومةٍ في المجموعة، ومن خصائص هذه الطريقة حصولنا على جهدٍ كُليّ في فروع التوصيل جميعها وتجزئة التيار، وعند حدوث قطعٍ في أي فرع؛ فإنّ الفروع الأخرى لن تتأثر، لذلك؛ فإن توصيل الأجهزة المنزلية والمصابيح في المنزل وفي الطرقات يكون على التوازي.

مثال (10):

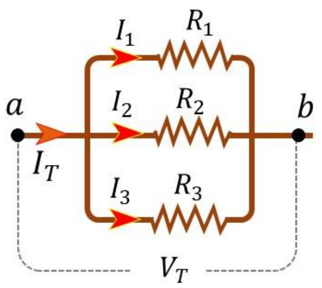
دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (18)، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، أحسب كل من:

أ. المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب. التيار الكُلّي الذي يسري في الدارة.

المعطيات:

$$R_1 = 3\ \Omega, R_2 = 3\ \Omega,\ R_3 = 6\ \Omega, \varepsilon = 6\ \text{V}$$

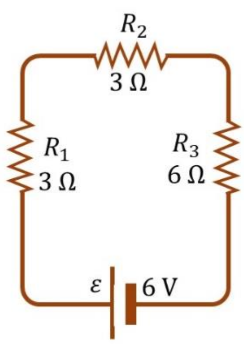


الشكل (17): توصيل مقاومات على التوازي.

أفكر:

عندما يكون لديّ دارة كهربائية بسيطة تحتوي على مقاومتين موصولتين على التوازي R_1, R_2. كيف يمكنني التوصل إلى العلاقة الآتية:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



الشكل (18): دارة بسيطة تحتوي مقاومات موصولة على التوالي.

.....

المطلوب: $I = ?, R_{eq} = ?$

الحل:

أ. المقاوماتُ موصولةٌ على التوالي، لذلك أستخدم العلاقة الآتية:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 + 3 + 6 = 12\ \Omega$$

ب. التيار في الدارة:

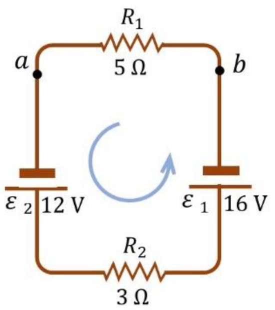
$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{12} = 0.5\ \text{A}$$

مثال (11):

معتمدًا على البيانات المُثبّتة على الشكل (19)، وبإهمال المقاومة الداخلية لكلتا البطاريتين؛ أجد كُلًّا من:

أ) قيمة تيار الدارة وأُحدّد اتّجاهه.

ب) فرق الجُهد بين النقطتين (a) و (b)، أي $(V_b - V_a)$.



الشكل (19): دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تحتوي 3 بطاريات ومقاومتين.

المعطيات:

$$R_1 = 5\ \Omega, R_2 = 3\ \Omega, \varepsilon_1 = 16\ \text{V}, \varepsilon_2 = 12\ \text{V}$$

المطلوب: $I = ?,\ V_b - V_a = ?$

الحل:

أ) أختارُ نقطةً مثل (a)، وأبدأ الحركة منها لأكمل الدورة، وأفترض اتّجاهًا للتيار في الدارة، وليكُن اتّجاه التيار المُفترض واتّجاه الحركة بعكس اتجاه عقارب الساعة، ثم أُطبّق معادلة الدارة:

$$\Sigma\varepsilon - \Sigma IR - \Sigma Ir = 0$$

$$(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) - IR_1 - IR_2 = 0$$

$$12 - 16 - I(5) - I(3) = 0$$

$$-4 - I(8) = 0 \ \rightarrow \ I = \frac{-4}{8} = -0.5\ \text{A}$$

الإشارة السالبة للتيار تعني أنه عكسُ الاتّجاه المفترض؛ أي مع اتجاه عقارب الساعة.

ب) لحساب فرق الجُهد $(V_b - V_a)$؛ أنتقل باتّجاه التيار الحقيقي وليس بالاتّجاه الذي جرى افتراضه بداية الحل:

$$V_a + \Delta V = V_b$$

$$V_b - V_a = -IR_1$$

$$V_b - V_a = -0.5 \times 5 = -2.5\ \text{V}$$

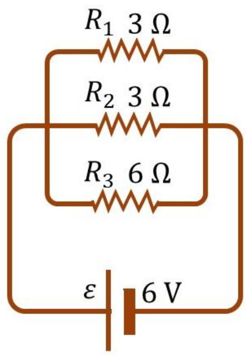
.....

مثال (12):

دارةٌ كهربائيةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (20)، المقاومة الداخلية للبطارية مُهملةٌ، أحسب كلاً من:

أ. المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب. التيار الْكّلي المارّ في الدارة.



الشكل (20): دارة بسيطة تحتوي مقاومات موصولة على التوازي.

المعطيات:

$$R_1 = 3\ \Omega, R_2 = 3\ \Omega\ ,\ R_3 = 6\ \Omega, \varepsilon = 6\ \text{V}$$

المطلوب: $I = ?\ , R_{eq} = ?$

الحل:

أ. المقاوماتُ موصولةٌ على التوالي؛ لذلك أستخدم العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3+3+2}{6}$$

$$R_{eq} = 1.2\ \Omega$$

ألاحظ أنّ مقدارَ المقاومة المُكافئة أقلُّ من أصغر المقاومات المُتّصلة.

ب. التيار في الدارة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{1.2} = 5\ \text{A}$$

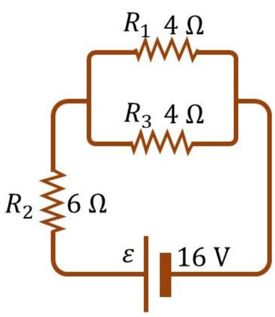
عند المقارنة بين نتيجة الحلّ في المثالين؛ ألاحظُ الاختلافَ في قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث باختلاف طريقة توصيلها. وكذلك الاختلافَ في قيمة التيار الْكّلي المارّ في كلٍّ من الدارتين.

مثال (13):

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ يبيّنُها الشكل (21/أ)، المقاومةُ الداخلية للبطارية مُهمَلة، أحسب كلًّا من:

أ. المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث.

ب. التيار الْكّلي المارُّ في الدارة.



(أ)

المُعطيات:

$$R_1 = 4\ \Omega, R_2 = 6\ \Omega\ ,\ R_3 = 4\ \Omega, \varepsilon = 16\ \text{V}$$

......

المطلوب: $I = ?\,, R_{eq} = ?$

الحل: ألاحظ أن المقاومتين (R_1, R_3) موصولتان على التوازي.

أ. إيجاد المقاومة المكافئة لهما، والتي سأرمز لها بالرمز (R_{13}).

$$\frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{4}$$

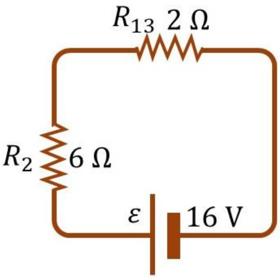
$$R_{13} = \frac{4}{2} = 2\ \Omega$$

يمكن إعادة رسم الدارة مرّةً ثانيةً كما في الشكل (21/ب) الذي ألاحظُ فيه أنَّ المقاومتين (R_2, R_{13}) موصولتان على التوالي.

$$R_{eq} = R_2 + R_{13} = 6 + 2 = 8\ \Omega$$

ب) التيار الكُلّي في الدارة.

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{16}{8} = 2\ \text{A}$$

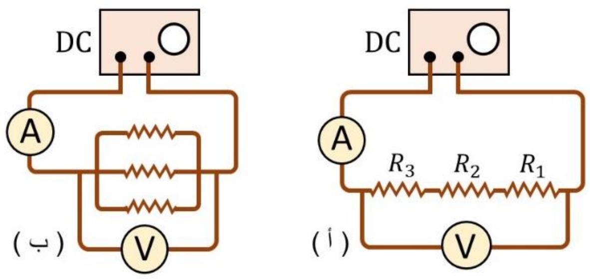


(ب)

الشكل (21): دارةٌ بسيطةٌ تحتوي مقاوماتٍ موصولةً على التوازي.

تجربة 2: استقصاءُ قاعدتي توصيل المقاومات / توالي، توازي

الموادُّ والأدوات: مصدرُ جهدٍ منخفض (DC)، مفتاحٌ كهربائي، مجموعة مقاومات $(4, 6, 10, 20, \ldots\ \Omega)$، جهاز أميتر وجهاز فولتميتر، أسلاك توصيل.



إرشادات السلامة: الحذرُ من لمس الوصلات الكهربائية 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 الجُهد المنخفض، والمفتاح، وجهاز الأميتر، ثمّ أصلُ جهاز الفولتميتر على التوازي مع المقاومات الثلاث، كما في الشكل (أ).
3. أغلقُ المفتاح مدّةً قصيرة، بحيث أتمكّنُ من قراءة التيار والجُهد في جهازي الأميتر والفولتميتر، وأدوّن القراءات في الجدول.
4. استخرجُ 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)، ثمّ أكرّر الخطوتين (4 ,3)، 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 الكُلّي (جهد المصدر) والجُهد الفرعي لكلّ مقاومةٍ في طريقتي التوصيل؟
4. ما العلاقة بين التيار الكُلّي والتيار الفرعي لكلّ مقاومةٍ في طريقتي التوصيل؟

قاعدتا كيرشوف Kirchhoff’s Rules

درستُ العلاقةَ بين الجُهد والتيار في دارةٍ كهربائيّةٍ بسيطة، واستخدمتُ قواعد حساب المقاومة المكافئة لتحويل الدارة التي تحتوي على تفرُّعات إلى عُروةٍ واحدة. لكن سوف أواجه في هذا الدرس داراتٍ كهربائيّةً 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؛ فكميّة الشحنة الداخلة باتّجاه نقطةٍ في دارةٍ كهربائيّة، تُساوي كميّة الشحنة المغادرة لها، 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 التيار الداخل باتّجاهٍ (a) يُساوي مجموع التيارين الخارجين منها. وتنصُّ قاعدة كيرشوف الأولى أن "**المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا**".

$$\Sigma I = 0 \quad \rightarrow \quad \Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

يمكنُ تشبيهُ تفرُّع التيار الكهربائي بماء النهر في المنطقة (A) الذي يتفرع إلى فرعين (B, C) حول الجزيرة، كما في الشكل (22/ب). حيث تُساوي كميّة الماء المتدفّق عبر النهر مجموعَ ما يتدفّقُ من الماء على جانبي الجزيرة.

أتحقّقُ:

أوضح العلاقة بين قاعدة كيرشوف الأولى ومبدأ حفظ الشحنة.

مثال (14):

بالرجوع إلى الشكل (22/أ)، إذا كان التيار الأول (6.0 A) والتيار الثاني (3.5 A). أجدُ مقدار التيار المارّ في المقاومة (R_3).

المعطيات: $I_1 = 6.0\ \text{A}, I_2 = 3.5\ \text{A}$

المطلوب: $I_3 = ?$

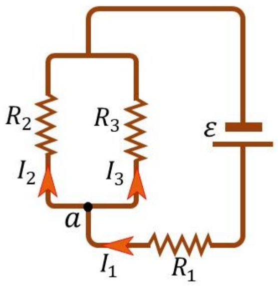
الحل:

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على نقطة التفرع (a):

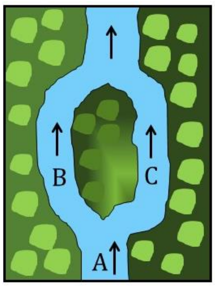
$$I_1 = I_2 + I_3 \rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 6.0 - 3.5 = 2.5\ \text{A}$$

الدارة البسيطة والمركبة:

تتكون الدارة الكهربائية البسيطة من عروةٍ واحدة، وقد تحتوي على تفرُّعات للمقاومات فقط؛ أما إذا وُجدت في التفرُّعات بطارياتٌ، فإنّ الدارة تصبحُ مركبّة.



(أ): تفرّع التيار الكهربائي.



(ب): تيار الماء عند تفرع النهر.

الشكل (22): قاعدة كيرشوف الأولى، ومقارنتُها بتفرُّع النهر.

....

قاعدة كيرشوف الثانية Kirchhoff’s Second Rule

تُسمّى هذه القاعدة بقاعدة العُروة، وهي تحقّقُ قانون حفظ الطاقة. وتنصُّ قاعدة كيرشوف الثانية أنّ: "**المجموع الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا**. تقلُّ طاقة الوضع الكهربائية للشحنة الافتراضية الموجبة عند انتقالها من جهدٍ مُرتفعٍ إلى جُهدٍ منخفضٍ خلال المقاومات، بينما تزداد طاقة الوضع للشحنة الموجبة عند عبورها البطارية من قطبها السالب الى قطبها الموجب، أي باتّجاه القوة الدافعة الكهربائية.

وبما أن التغيُّر في الطاقة محفوظٌ ويُعطى بالعلاقة:

$$\Delta U = q\Delta V$$

فإنَّ المجموع الجبريّ للتغيُّرات في الجُهد –أيضا– يساوي صفرًا.

$$\Sigma\, \Delta V = 0$$

لتطبيق القاعدة الثانية لكيرشوف؛ عليَّ أن أُحدّد تغيُّرات الجُهد خلال العروة.

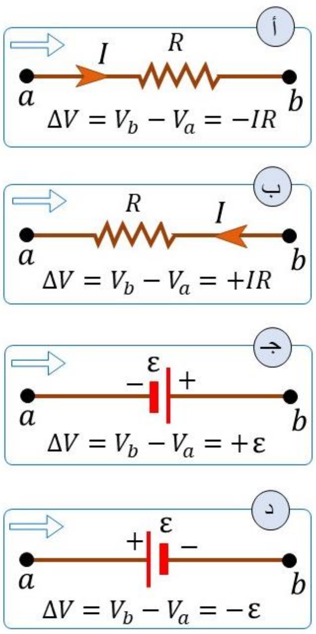
أتخيّلُ أنّني أنتقل خلال العروة لتتبع التغيُّرات في جهود مكوناتها باتّجاه حركةٍ مُحدّدٍ مسبقًا، مع مراعاتي نظامَ إشاراتٍ موجبةٍ وسالبة، كما يأتي:

أ) عند عبور المقاومة (R) من النقطة (a) إلى النقطة (b) باتّجاه التيار ، 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).

ج) عند عبور بطاريّة من قُطبها السالب إلى قُطبها الموجب (مع اتّجاه قوّتها الدافعة الكهربائيّة)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ منخفض إلى جُهدٍ مرتفع، لذلك يزداد الجُهد $(\Delta V = \varepsilon)$. كما في الشكل (23/ جـ).

د) عند عبور بطاريّة من قُطبها الموجب إلى قُطبها السالب (عكس اتجاه قوتها الدافعة الكهربائية)؛ فهذا يعني الانتقال من جُهدٍ مُرتفعٍ إلى جُهد منخفض، لذلك يقلُّ الجُهد $(\Delta V = -\varepsilon)$. كما في الشكل (23/ د).



الشكل (23): تحديد زيادة الجُهد أو نقصانه عند عبور مقاومةٍ أو بطاريةٍ من اليسار إلى اليمين.

تم التعامل مع البطاريات في القواعد السابقة على أنها عديمة المقاومة الداخلية، لكن عند تحديد تغيُّرات الجُهد في العروة، فإنَّ المقاومة الداخلية لكلِّ بطاريّةٍ تُعامَل معاملة المقاومات الخارجية.

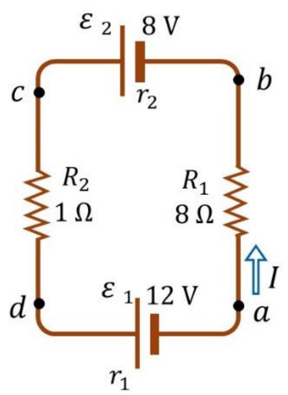
.....

أتحقّق:

كيف يمكنُ تفسيرُ قاعدة كيرشوف الثانية عن طريق مبدأ حفظ الطاقة؟

مثال (15):

دارةٌ كهربائيّةٌ بسيطةٌ تتكوّن من بطاريتين ومقاومتين، كما في الشكل (24)، إذا كانت كلتا المقاومتين الداخليتين تساوي $(0.5\ \Omega)$، مُستخدمًا القاعدة الثانية لكيرشوف؛ أجدُ قيمة التيار وأحدّد اتّجاهه.



الشكل (24): تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على عروةٍ واحدةٍ مقفلة.

المعطيات: بيانات الشكل، $r_1 = 0.5\ \Omega\,,\ r_2 = 0.5\ \Omega$

المطلوب: $I = ?$

الحل:

أفترض اتّجاه التيار في الدارة (العروة) بعكس اتّجاه عقارب الساعة، وأفترضُ كذلك اتّجاه عبور مكوّنات الدارة، بعكس اتّجاه عقارب الساعة أيضًا، مُبتدئًا العبور من النقطة (a) عبر المسار: $a \to b \to c \to d \to a$

$$V_a + \Sigma\, \Delta V = V_a$$

$$\Sigma\, \Delta V = V_a - V_a = 0$$

$$-IR_1 + \varepsilon_2 - Ir_2 - IR_2 - \varepsilon_1 - Ir_1 = 0$$

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - I(R_1 + r_2 + R_2 + r_1) = 0$$

$$8 - 12 - I(8 + 0.5 + 1 + 0.5) = 0$$

$$-4 - I(10) = 0 \ \rightarrow\ \ I = \frac{-4}{10} = -0.4\ \text{A}$$

أستنتجُ من الإشارة السالبة أن اتّجاه التيار بعكس الاتجاه المفترض؛ أي إن التيار يسري في الدارة مع اتّجاه عقارب الساعة.

تمرين:

أعيدُ حلّ المثال السابق بافتراض اتّجاه التيار مع اتّجاهِ عقارب الساعة، واختيار اتّجاه العبور بعكس اتّجاه عقارب الساعة. ثم أستنتج أثر ذلك في نتيجة الحلّ.

مثال (16):

جزءٌ من دارةٍ كهربائيّةٍ مُركّبة، كما في الشكل (25)، فيه $(I_1 = 3.0\ \text{A})$، $(I_3 = 4.5\ \text{A})$. إذا علمتُ أنّ $(V_c = 9.0\ \text{V})$، أحسبُ جهد النقطة (a).

المعطيات: $I_1 = 3.0\ \text{A}\text{،}\ I_3 = 4.5\ \text{A}, V_c = 9.0\ \text{V}$

.....

العروة $(abcda)$، سأعبُرها بعكس اتجاه عقارب الساعة بدءًا من النقطة (a)، للحصول على **المعادلة الثانية:** $(V_a + \Sigma\, \Delta V = V_a)$

$$-\varepsilon_3 + I_3 r_3 - I_2 R_2 - \varepsilon_2 - I_2 r_2 = 0$$

$$-25 + (1)I_3 - (7)I_2 - 4 - (1)I_2 = 0$$

$$-29 + I_3 - (8)I_2 = 0 \quad ....(2)$$

أُطبقُ القاعدةَ الثانية على العروة الثانية $(cfedc)$، سأعبُرها بعكس اتّجاه عقارب الساعة، بدءًا من النقطة (c) للحصول على **المعادلة الثالثة:**

$$+\varepsilon_1 + I_1 r_1 + I_1 R_1 + \varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_2 = 0$$

$$14 + (0.6)I_1 + (2.4)I_1 + 4 + (1)I_2 + (7)I_2 = 0$$

$$18 + (3)I_1 + (8)I_2 = 0 \quad ....(3)$$

من المعادلة الأولى أجدُ: $(I_3 = I_1 - I_2)$ ثم أُعوّضها في المعادلة الثانية:

$$-29 + I_1 - I_2 - (8)I_2 = 0$$

$$-29 + I_1 - (9)I_2 = 0$$

بالضرب في الرقم (-3) أحصلُ على المعادلة (4) الآتية:

$$+87 - (3)I_1 + (27)I_2 = 0 \quad ....(4)$$

بجمع المعادلتين: (4) و (3)، أحصل على:

$$105 + (35)I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{-105}{35} = -3\ \text{A}$$

أجدُ مقدار التيار (I_1) من المعادلة (3):

$$18 + (3)I_1 + 8 \times (-3) = 0 \rightarrow \ I_1 = 2\ \text{A}$$

أجدُ مقدار التيار (I_3) من المعادلة (1):

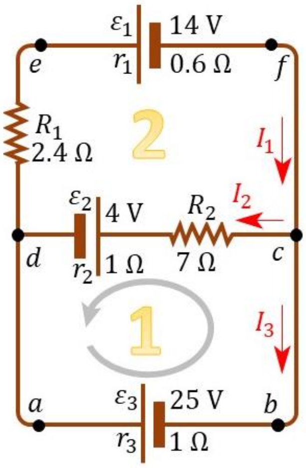
$$I_3 = I_1 - I_2 = 2 - (-3) = 5\ \text{A}$$

إشارة التيارين (I_1) و (I_3) موجبةٌ، ممّا يعني أنهما بالاتّجاه المُفترض، وإشارة التيار (I_2) سالبة؛ أي أنّه بعكس الاتّجاه المفترض.

تمرين:

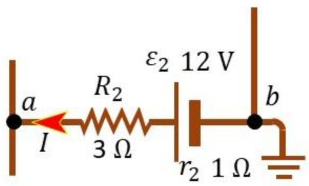
معتمدًا على بيانات الشكل (28)، حيث $(I = 2\ \text{A})$ وجهد النقطة (b) يساوي صفرًا، بسبب اتّصالها بالأرض. أجدُ جُهدَ النقطة (a).

....



الشكل (27): الاتجاه المفترض للتيارات، ولاتجاه العبور خلال مكونات العروة (1).

أصمم باستعمال برنامج السكراتش Scratch عرضًا يوضح قاعدتي كيرشوف، مبيّنًا تغيُّرات الجُهد والتيار في مكوّنات الدارة عند اختيار مقادير المقاومات والبطاريات. ثم أشاركهُ مع معلمي وزملائي في الصف.



الشكل (28): فرق الجُهد بين نقطتين.

ملاحظة: تُعدُّ مخزنًا للشحنات السالبة ويمكنها تفريغُ شحنة الأجسام المُتصلة بها؛ لذلك فإنّ أيّ جسمٍ يُوصَل بالأرض يصبح جهدهُ صفرًا.

مراجعة الدرس:

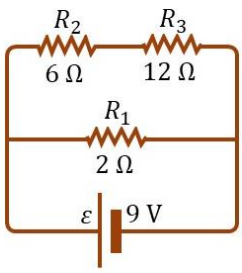
1. **الفكرة الرئيسة:**

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 البطارية، إن كانت تواليًا أو توازيًا، مُفسّرًا أهميّة هذه الطريقة.

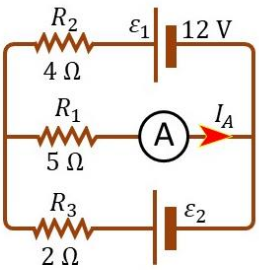
3. **أستخدمُ المتغيرات:** يُبيّن الشكل المجاور دارةً كهربائية تحتوي بطاريّةً ومقاومات، معتمدًا على بيانات الشكل بإهمال المقاومة الداخلية؛ أحسبُ المقاومة المكافئة للدّارة، ثمّ مقدار التيار فيها.



4. إذا كانت قراءة الأميتر في الدارة المجاورة $(2\ A)$، وبإهمال المقاومات الداخلية للبطاريات، أجدُ كُلًّا من:

أ) مقدار واتجاه التيارين (I_1) يمرُّ في (ε_1)، و (I_2) يمر في (ε_2).

ب) مقدار القوة الدافعة الكهربائية (ε_2).



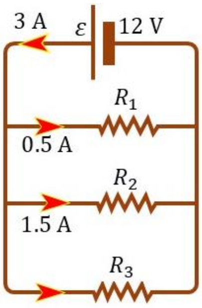
5. **أفسّرُ** لماذا يُعدّ فرق الجُهد بين طرفي المقاومة سالبًا عند عبورها باتّجاه التيار المارِّ فيها.

6. معتمدًا على بيانات الدارة المبينة في الشكل؛ أجد ما يأتي:

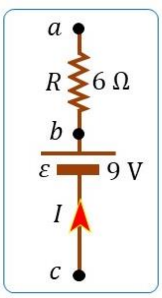
أ) التيار المارّ في المقاومة (R_3).

ب) قيم المقاومات الثلاث.

ج) المقاومة المكافئة.



7. يبيّن الشكل المجاور جزءًا من دارةٍ كهربائية، معتمدًا على بيانات الشكل، حيث أن: $(V_{ac} = 7\ V)$ و $(V_{ab} = 15\ V)$؛ أجد مقدار المقاومة الداخلية للبطارية.



.....

التوسع والإثراء : توصيل المقاومات

لاحظ سعيدٌ ارتفاعَ قيمة فاتورة الكهرباء في أحد شهور فصل الشتاء، فأجرى عمليّاتٍ حسابيّةً لأجهزة منزله، واستنتج أنّ هذا الارتفاع يعود إلى استخدام مدفأة كهربائيّة مُددًا طويلةً، فاطّلع على لوحة بيانات المدفأة فوجد أنّ قُدرتها (3.6 kW)؛ وهي تتكوّن من ثلاث مُقاوماتٍ موصولةٍ معًا، وتعمل عن طريق مفتاحٍ واحدٍ باستخدام فرق جهدٍ (220 V).

قرّر إجراء تعديل على المدفأة؛ فأعاد توصيل المقاومات الثلاث بطريقةٍ مختلفة، مع بقائها تعمل عن طريق مفتاحٍ واحد، فانخفضت قيمة الفاتورة مع أنّ ساعات التشغيل بقيت كما هي. لكنّه واجه مشكلةً بأنّ الطاقة الحرارية التي تولّدها المدفأةُ أصبحت أقلّ بكثيرٍ من أدائها السابق.

قرّر التأكد حسابيًّا من التعديل الذي أجراه على المدفأة والنتائج التي حصل عليها؛ فحصل على ما يأتي:

وضع المدفأة الابتدائي:

تتكوّن المدفأة من ثلاث مُقاوماتٍ متماثلةٍ (R) موصولةٍ معًا على التوازي، تسري فيها تيّاراتٌ مُتماثلة (I)؛ بحيث تستهلك كلٌّ منها ثلث القدرة الكُلّية للمدفأة $(P = 0.33 \times 3.6 = 1.2 \text{ kW} = 1200 \text{ W})$،

مقدار التيار الذي يسري في كلّ مقاومةٍ ومقدار المقاومة يمكن حسابهما بمعرفة القدرة وفرق الجُهد:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1200}{220} = 5.5 \text{ A}, \qquad R = \frac{V}{I} = \frac{220}{5.5} = 40\ \Omega$$

وضع المدفأة بعد التعديل

بعد إعادة توصيل المقاومات الثلاث على التوالي في المدفأة تُصبح المقاومة المكافئة لها:

$$R = 40 + 40 + 40 = 120\ \Omega$$

وبذلك يصبح التيار المارُّ في المقاومات الثلاث جميعها (I)، كما يأتي:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{120} = 1.83\ A$$

وتصبح القدرة الكُليّة للمدفأة:

$$P = IV = 1.83 \times 220 = 402.6 \approx 400 \text{ W}$$

أستنتج أن قدرة المدفأة الكُلّية قد انخفضت إلى الثلث؛ أي إنها لن تنتج سوى ثلث الطاقة الحرارية التي كانت تنتجها سابقًا، ولهذا السبب فإنّ كُلفة تشغيلها تنخفض إلى الثلث أيضًا.

أبحث

لديّ جهازٌ كهربائيٌّ قدرته 200 يعمل على جهد 110، ما الذي أتوقع حدوثه في حال تم توصيله بمصدر فرق جهد 220. أفسّر إجابتي.

مراجعة الوحدة:

1. ضع دائرة

1. المقاومية خصيصة فيزيائية للمادة، ومقاوميّة موصل تتّصف بإحدى الصفات الآتية:

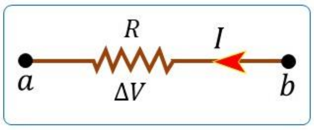
أ) تزدادُ بزيادة طول الموصل وبزيادة مساحة مَقطعِه.

ب) تقلُّ بزيادة طول الموصل وبزيادة مساحة مَقطعِه.

ج) تزدادُ بزيادة طول الموصل وبنقصان مساحة مقطعه.

د) تعتمدُ على نوع المادة وليس على أبعاد الموصل الهندسية.

2. يسري تيارٌ في مقاومة باتّجاه اليسار، كما في الشكل، إذا كان (V_a) ثابتًا؛ فإنّه يمكنُ وصف الجُهد (V_b) بأنه:



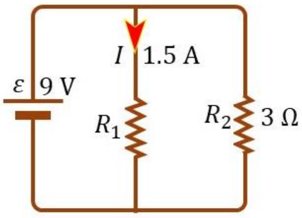
أ) (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يزداد التيار (I).

ب) (V_b) أعلى من (V_a)، وبزيادته يقلُّ (I).

ج) (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يزداد التيار (I).

د) (V_b) أقل من (V_a)، وبزيادته يقلُّ التيار (I).

3. تكون المقاومة المكافئة للمقاومتين في الدارة المجاورة:



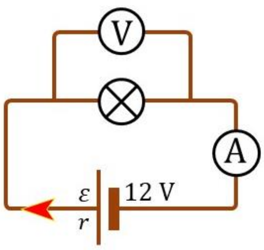
أ) 1 Ω

ب) 2 Ω

ج) 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:



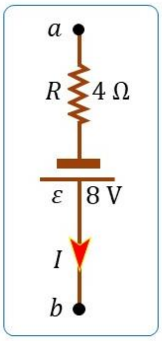
أ) 1.0 Ω

ب) 1.5 Ω

ج) 2.0 Ω

د) 2.5 Ω

5. إذا كان التيار الكهربائي في الشكل يساوي (1.2 A)، فإنّ فرق الجُهد $(\Delta V = V_b - V_a)$ يساوي:



أ) 3.2 V ب) 4.0 V ج) 4.2 V د) 4.8 V

....

مراجعة الوحدة:

2. مصفّف شعرٍ يعملُ على جهد (220 V)، ويمرُّ فيه تيارٌ مقداره (4 A). إذا كان عنصر التسخين فيه مصنوعًا من سلك نيكروم نصف قطره (0.8 mm). فما مقاومة هذا السلك وما طوله؟

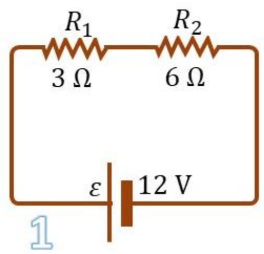
3. يتّصل مصباحٌ كهربائيٌّ مع مصدر جهد (12 V)؛ فيسري فيه تيّارٌ كهربائيٌّ مقدارُه (1.8 A). أحسب القدرة المستهلكة في هذا المصباح؟

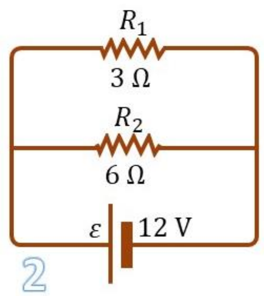
4. أحسبُ التيار الكهربائي في كل من الأجهزة الآتية:

أ) منشارٌ كهربائيٌّ قدرته (1.5 kW) يعمل على جُهد (220 V).

ب) سخانٌ كهربائيٌّ قدرته (7.2 kW) يعمل على جُهد (240 V).

5. يبيّن الشكل المجاور مقاومتين موصولتين على التوالي (الدارة الأولى)، ثم موصولتين على التوازي (الدارة الثانية). أجد المقاومة المكافئة وتيار البطارية في كل دارة.





6. فرنٌ كهربائيٌّ يعمل على جهد (240 V)؛ مقاومة عنصر التسخين فيه (30 Ω). إذا عمل مدّة (48 min) لطهي الطعام. أحسب ما يأتي:

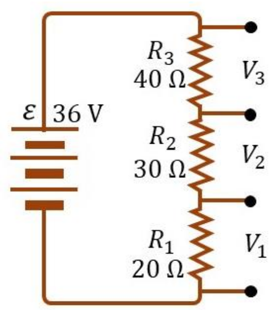
أ) التيار الكهربائي الذي يسري في عنصر التسخين.

ب) القدرة الكهربائية للفرن.

ج) مقدار الطاقة الكهربائية المتحوّلة إلى حرارةٍ خلال مدة الطهي.

د) كيف تتغيّر النتائج السابقة جميعها في حال وُصل الفرن مع مصدر جهد (120 V)؟

7. للحصول على فرق جهد مناسب من بطاريّةٍ كبيرة، تُوصَلُ معها مجموعة مقاوماتٍ كما في الشكل المجاور، ما مقدار فرق الجُهد بين طرفي كل مقاومة من المقاومات الثلاث؟



8. سيارةٌ كهربائيّةٌ موصولةٌ مع شاحنٍ قدرته (62.5 kW) بسلك طوله (6 m) ومساحةُ مقطعه ($25\ mm^2$) يحمل تيارًا كهربائيًا (125 A). إذا استغرقت عملية الشحن مدّة (30 min). أحسب ما يأتي:

أ) كمية الشحنة التي انتقلت عبر السلك خلال هذه المدّة.

ب) فرق الجُهد بين طرفي الشاحن؟

ج) الشغل الكهربائي الذي بذله الشاحن على بطارية السيارة.

د): تكلفة الشحن، إذا كان سعر (1 kWh) هو (0.12 JD).

......

مراجعة الوحدة:

9. أرغب بتصميم مدفأةٍ كهربائيةٍ بسيطة قدرتُها (1000 W) تعمل على جهد (240 V)، وعنصر التسخين فيها سلكٌ من مادة النيكروم. ما المواصفات الهندسية للسلك؟

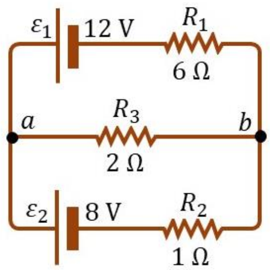
10. عند توصيل ثلاثة مصابيح متماثلةٍ، مقاومة كلٍّ منها (R) مع بطاريّةٍ قوّتُها الدافعةُ الكهربائية (12 V) مقاومتها الداخلية مُهملةٌ. ما نسبة القدرة المنتجة في البطارية في الحالتين؛ المصابيح موصولة على التوالي/ التوازي؟

11. سلكٌ من فلزّ التنغستون طولُه (1.5 m) ومساحة مَقطَعِه $(4\ mm^2)$. ما مقدار التيار المارِّ فيه عند توصيل طرفيه مع مصدر جهد (1.5 V)؟

12. في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل المجاور؛ أحسب ما يأتي:

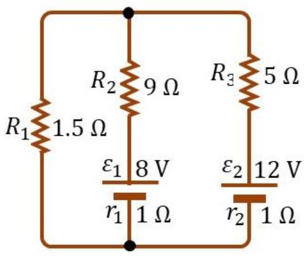
أ) التيار المار في المقاومة (R_3).

ب) فرق الجُهد بين النقطتين (a) و (b)، وأيهما أعلى جهدًا.



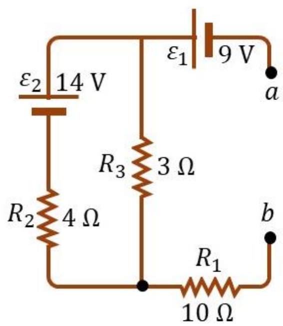
13. بطاريةٌ قوّتها الدافعة الكهربائية (9 V)، ومقاومتُها الداخلية $(2.5\ \Omega)$. ما مقدار المقاومة التي توصل مع البطارية حتى تكون القدرة المستهلكة في البطارية (2.7 W)؟

14. يبيّنُ الشكل المجاور دارةً كهربائيّةً مُركّبة، معتمدًا على بيانات الشكل؛ أحسبُ التيارات الفرعية في الدارة.



15. مصباحان يتصلان مع مصدري جهدٍ متماثلين، قدرة المصباح الأول تساوي ثلاثة أمثال قدرة المصباح الثاني. أجد نسبة تيار الأول إلى تيار الثاني، ونسبة مقاومة الأول إلى مقاومة الثاني.

16. معتمدًا على بيانات الشكل المجاور، أحسبُ فرق الجُهد بين النقطتين (a) و (b)، عندما ينعدم التيار في (R_3)، ثمّ أُحدّد أيَّ النقطتين أعلى جهدًا.



17. أحسبُ تكلفة تشغيل مدفأةٍ قدرتُها (2800 W) مُدّة (90) ساعة، إذا كان سعر وحدة الطاقة (0.15) دينار.

......

الوحدة 4/ المجال المغناطيسي

Magnetic Field

أتأمل الصورة:

سريوس Sirius، الاسم الذي أطلق على مسارع السينكروترون البرازيلي. يمتاز بنفق لتسريع الجسيمات المشحونة، يبلغ طول محيطه 518 m. يحتوي النفق بداخله أجهزة وآلات ضخمة (تظهر في الصورة) لإنتاج حزم من الجسيمات المشحونة، وتزويدها بطاقة حركية قد تصل إلى 3 GeV حتى تقترب سرعتها من سرعة الضوء، ثم يتم التحكم في مسارها باستخدام مجالات مغناطيسية. يصاحب ذلك انبعاث ضوء شديد السطوع، وانبعاث موجات غير مرئية، هي؛ تحت حمراء وفوق بنفسجية وأشعة سينية. تستخدم جميعها في دراسة التركيب الذري للمادة على مستوى قياسات (nm)، مما يفيد في تطبيقات واسعة في مجالات الطب والصناعة والزراعة والبيئة.

كيف يتم تسريع الجسيمات المشحونة وإكسابها طاقة حركية كبيرة؟ وكيف يتم التحكم في مسارها؟

......

الفكرة العامة:

للمجال المغناطيسي تطبيقات حياتية وعلمية مهمة. ينشأ المجال المغناطيسي مهما كانت مصادره نتيجةً لحركة الشحنات الكهربائية؛ على شكل تيار كهربائي، أو حركة إلكترون حول النواة.

الدرس الأول: القوة المغناطيسية

Magnetic Force

الفكرة الرئيسة: المغناطيس يولد حوله مجالاً مغناطيسيًا يؤثر بقوة في المواد المغناطيسية وفي الشحنات الكهربائية المتحركة فيه. من أهم تطبيقات هذه القوة، المحرك الكهربائي، الذي يستخدم في السيارات الكهربائية، التي أصبحت تغزو الأسواق بفعل كفاءتها العالية في تحويل الطاقة، وحفاظها على البيئة.

الدرس الثاني: المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي

Magnetic Field of an Electric Current

الفكرة الرئيسة: تحققت فائدة كبيرة من استخدام المغناطيس الكهربائي في التطبيقات التكنولوجية الحديثة، فالمجال المغناطيسي الناتج عنه يفوق مجالات المغانط الطبيعية بآلاف المرات، واستخدامات المجال المغناطيسي أحدثت تقدمًا كبيرًا في مجالات إنتاج الطاقة والطب والنقل وغيرها.

......

تجربة استهلالية: استقصاء تأثير المجال المغناطيسي في شحنة كهربائية متحركة فيه.

المواد والأدوات: أنبوب أشعة مهبطية، مصدر طاقة عالي الجهد (DC)، أسلاك توصيل، مغناطيس قوي. قاعدة عازلة.

إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة عالي الجهد.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

1. أثبت أنبوب الأشعة المهبطية على القاعدة العازلة وأصل قطبيها مع مصدر الطاقة.
2. **ألاحظ:** أختار جهد (500 V) تقريبا، وأشغل مصدر الطاقة، ثم أرفع الجهد حتى يبدأ الوميض بالظهور في الأنبوب.
3. **ألاحظ:** شكل مسار الأشعة المهبطية في الأنبوب وأدون ملاحظاتي.
4. **أجرب:** أقرب المغناطيس بالتدريج من مسار الأشعة المهبطية في الأنبوب، مع الحذر من الاقتراب من قطبي الأنبوب، ثم ألاحظ ما يحدث لمسار الأشعة وأدون ملاحظاتي.
5. أعكس قطبي المغناطيس وأكرر الخطوة (4)، وألاحظ ما يحدث لمسار الأشعة، وأدون ملاحظاتي.

التحليل والاستنتاج:

1. أصف مسار الأشعة المهبطية في المرحلة الأولى من التجربة، وأوضح سبب ظهوره.
2. **أفسر** أهمية ضغط الهواء المنخفض داخل أنبوب الأشعة المهبطية.
3. **أحلل البيانات وأفسرها:** أبين ما حدث لمسار الأشعة المهبطية عند تقريب المغناطيس منها، وأفسر سبب ذلك، ثم أقارن النتيجة بما يحدث عند تغيير قطب المغناطيس.
4. **أستنتج:** اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الشحنات المتحركة داخل مجال مغناطيسي، واتجاه المجال المغناطيسي، معتمدًا على الملاحظات.

الدرس 1

القوة المغناطيسية
Magnetic Force

الفكرة الرئيسة:

الفكرة الرئيسة: المغانط يولد حوله مجالاً مغناطيسيًا يؤثر بقوة في المواد المغناطيسية وفي الشحنات الكهربائية المتحركة فيه. من أهم تطبيقات هذه القوة، المحرك الكهربائي، الذي يستخدم في السيارات الكهربائية، التي أصبحت تغزو الأسواق بفعل كفاءتها العالية في تحويل الطاقة، وحفاظها على البيئة.

نتاجات التعلّم:

- أستنتج من التجربة أن المجال المغناطيسي يؤثر في الشحنة المتحركة فيه بقوة. وأصف هذه القوة.
- أشرح طريقة عمل مطياف الكتلة والسينكروترون معتمدًا على خصائص القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة كهربائية.
- أستنتج من التجربة أن موصلا يحمل تيارا كهربائيا وموجودا في منطقة مجال مغناطيسي يتأثر بقوة مغناطيسية. وأصف هذه القوة.
- أصمّم غلفانوميتر معتمدًا على خصائص القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.
- أصمّم محركًا كهربائيًّا، وأحدّد العوامل التي تزيد من سرعة دورانه.

المفاهيم والمصطلحات:

مجال مغناطيسي Magnetic Field

تسلا Tesla

مطياف الكتلة Mass Spectrometer

سينكروترون Synchrotron

التدفق المغناطيسي Magnetic Flux

عزم Torque

.....

المجال المغناطيسي Magnetic Field

تعرف الإنسان على المغناطيسية في الطبيعة، فمعدن المغنتيت Magnetite مادة ممغنطة طبيعية، عندما عُلقت قطعة منها تعليقًا حرًا في الهواء، أخذت تدور حتى استقرت باتجاه شمال–جنوب، لذلك صنع منها الصينيون القدامى وشعوب الفايكنغ البوصلة واستخدموها في الملاحة.

المغانط الدائم Permanent Magnet

تُصنع المغانط الدائمة من مواد قابلة للتمغنط مثل؛ الحديد والنيكل والكوبالت والنيوديميوم، والتي تسمى موادًا مغناطيسية. لكل مغناطيس قطبان؛ **قطب شمالي** (N) **North Pole**، **وقطب جنوبي** (S) **South Pole**. عند تعليق مغناطيس مستقيم بحيث يكون حر الدوران، فإن قطبه الشمالي يشير نحو الشمال، بينما يشير قطبه الجنوبي نحو الجنوب. تجدر الإشارة إلى أن القطب المغناطيسي الشمالي للأرض يقع بالقرب من قطبها الجغرافي الجنوبي، والعكس صحيح. توجد أقطاب المغانط دائمًا على شكل أزواج؛ شمالي وجنوبي، ولا يوجد قطب مغناطيسي منفرد، على خلاف الشحنات الكهربائية، حيث يمكن أن توجد شحنة مفردة؛ موجبة أو سالبة.

يؤثر المغناطيس بقوة عن بُعد في أي قطعة من مادة مغناطيسية قريبة منه، وبذلك فإن القوة المغناطيسية قوة تأثير عن بعد (مثل قوة الجذب الكتلي، والقوة الكهربائية)، ناتجة عن وجود مجال مغناطيسي يحيط بالمغانطيس.

أتحقق:

هل القوة المغناطيسية قوة تلامس أم قوة تأثير عن بعد؟

مفهوم المجال المغناطيسي Magnetic Field Concept

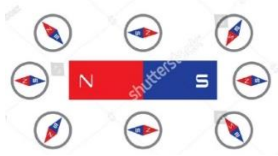
المجال المغناطيسي خاصية للحيز المحيط بالمغناطيس، ويظهر في هذا الحيّز تأثير المجال المغناطيسي على شكل قوى مغناطيسية تؤثر في المغانط الأخرى والمواد المغناطيسية. والمجال المغناطيسي كمية متجهة، يمكن تحديد اتجاهه عند نقطة معينة بوضع بوصلة صغيرة عند تلك النقطة فتشير إبرتها الى اتجاه المجال كما في الشكل (1/ أ).

خطوط المجال المغناطيسي Magnetic Field Lines

تستخدم برادة الحديد لترسيم خطوط المجال المغناطيسي، كما يبين الشكل (1/ ب)، حيث يُمثّل المجال المغناطيسي بخطوط تعبّر عن مقداره واتجاهه، كما سبق تمثيل المجال الكهربائي. يبين الشكل (2) رسمًا لخطوط المجال المغناطيسي حول مغناطيس مستقيم. وعند تقريب مغناطيسين من بعضهما، بحيث يتقابل منهما قطبان متشابهان، أو مختلفان، فإن الأقطاب المتشابهة تتنافر ، والمختلفة تتجاذب، وينشأ مجال مغناطيسي محصل عند كل نقطة في منطقة المجال، كما يبين الشكل (3). يمكن استخلاص الخصائص الآتية لخطوط المجال المغناطيسي:

- خطوط وهمية مقفلة تخرج من القطب الشمالي وتدخل القطب الجنوبي، تكمل مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى الشمالي.
- اتجاه المجال المغناطيسي عند أي نقطة على خط المجال يكون على امتداد المماس للخط عند تلك النقطة.
- لا تتقاطع لأن للمجال المغناطيسي اتجاه واحد عند كل نقطة، يُحدّد باتجاه المماس لخط المجال.
- يُعبّر عن مقدار المجال المغناطيسي بعدد الخطوط التي تعبر وحدة المساحة عموديا عليها.

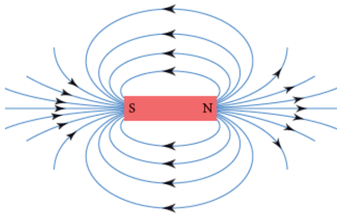
أتحقق: أذكر صفات خطوط المجال المغناطيسي.



(أ)

(ب)

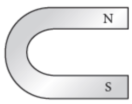
الشكل (1): المجال المغناطيسي؛ (أ): برادة الحديد لترسيم خطوط المجال المغناطيسي. (ب): البوصلة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة فيه.

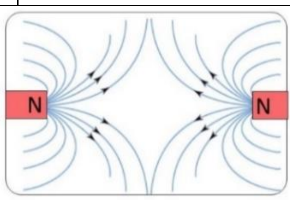


الشكل (2): خطوط المجال المغناطيسي لمغناطيس مستقيم.

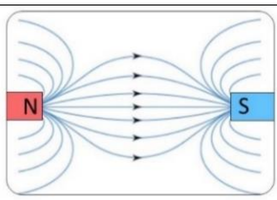
الشكل (3): خطوط المجال المغناطيسي لقطبين مغناطيسين متجاورين. (أ): متشابهين. (ب): مختلفين.

تمرين: أرسم خطوط المجال المغناطيس لمغناطيس على شكل حرف (U). المبين بالرسم.





(أ)

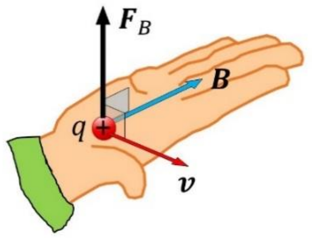


(ب)

القوة المؤثر في شحنة متحركة في مجال مغناطيسي **Force on a Charge Moving in a Magnetic Field** لاحظت في التجربة الاستهلالية تأثير المجال المغناطيسي في مسار الأشعة المهبطية داخل أنبوب مفرغ من الهواء (ضغط منخفض، يسمح بحركة الإلكترونات دون إعاقة)، وكيف أدى ذلك إلى انحناء المسار. وقد دلت التجارب العملية الى الخصائص الاتية للقوة المغناطيسية التي تؤثر في جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي: (هل يوجد داعي للعنوان الأحمر؟) **خصائص القوة المغناطيسية** • يتناسب مقدار القوة المغناطيسية طرديًا مع كل من؛ شحنة الجسيم (q)، ومقدار سرعته (v) ومقدار المجال المغناطيسي (B). • يعتمد اتجاه القوة المغناطيسية على اتجاه سرعة الجسيم واتجاه المجال المغناطيسي، وعلى نوع شحنة الجسيم. يمكن تمثيل النتائج التجريبية السابقة في العلاقة الرياضية الآتية: $\boldsymbol{F}_B = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ حيث يشير الرمز $(\boldsymbol{F}_B)$ إلى متجه القوة المغناطيسية، ويشير الرمز $(\boldsymbol{B})$ إلى متجه المجال المغناطيسي ويشير $(\boldsymbol{v})$ إلى متجه السرعة. ويعطى مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الشحنة المتحركة بالعلاقة الآتية: $F_B = qvB\sin\theta$ أستنتج من العلاقة السابقة أن القوة المغناطيسية تكون قيمة عظمى عند $(\theta = 90°)$ وتنعدم عند $(\theta = 0°)$، أو $(\theta = 180°)$؛ أي أن المجال المغناطيسي لا يؤثر بقوة في جسيم مشحون إذا كان ساكنا أو كان متحركا بسرعة موازية للمجال المغناطيسي. ألاحظ هنا اختلافًا بين تأثير المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فالقوة المغناطيسية تكون عمودية على اتجاه كل من المجال المغناطيسي ومتجه سرعة الجسيم المشحون، في حين تكون القوة الكهربائية دائما موازية لاتجاه المجال الكهربائي، كما أن القوة الكهربائية تؤثر في كل من الشحنات الساكنة والمتحركة.	**أفكر:** جسيم مشحون بشحنة موجبة، يتحرك في مستوى أفقي باتجاه الشرق $(+x)$، داخل المجال المغناطيسي الأرضي الذي يتجه من الجنوب إلى الشمال $(+y)$. أستخدم قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي الأرضي في الجسيم، هل باتجاه $(+z)$، أم باتجاه $(-z)$؟

....

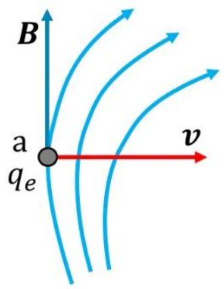
يمكن تعريف **المجال المغناطيسي Magnetic Field** عند نقطة بأنه: القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة المتحركة بسرعة $(1\ \mathrm{m/s})$ باتجاه عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي، لحظة مرورها في تلك النقطة، ويقاس بوحدة **تسلا** **tesla**(T) ، وفق النظام الدولي للوحدات. تُستخدم **قاعدة اليد اليمنى** لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة كهربائية موجبة عندما تتحرك داخل مجال مغناطيسي، حيث تُبسط اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، كما في الشكل (4)، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يُحدّد اتجاه القوة بسهم يخرج من باطن الكف وعمودي عليه. في حين يكون اتجاه القوة داخلا في الكف، عندما تكون الشحنة سالبة.



الشكل (4): تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة، باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

مثال (1):

يتحرك إلكترون بسرعة $(5\times10^{6}\ \mathrm{m/s})$ باتجاه محور $(+x)$، أحسب مقدار القوة المغناطيسية التي تؤثر فيه لحظة مروره بالنقطة (a) وأحدد اتجاهها، علمًا أن المجال المغناطيسي عندها $(2\times10^{-4}\ \mathrm{T})$ باتجاه محور $(+y)$. كما في الشكل (5). ثم أحدد اتجاه القوة المغناطيسية.



الشكل (5): حركة إلكترون في مجال مغناطيسي غير منتظم.

المعطيات: الشكل، $v=5\times10^{6}\ \mathrm{m/s},\ B=2\times10^{-4}\ \mathrm{T}$

$\theta=90\,°,\qquad q_e=-1.6\times10^{-19}\ \mathrm{C}$

المطلوب: $\boldsymbol{F_B}=?$

الحل:

حسب الشكل (5) ألاحظ أن خطوط المجال المغناطيسي ليست مستقيمة، لكن عند النقطة (a) يكون اتجاه المجال على امتداد المماس وللأعلى وباتجاه $(+y)$.

$$F_B=qvB\sin\theta$$

$$F_B=1.6\times10^{-19}\times5\times10^{6}\times2\times10^{-4}\times1$$

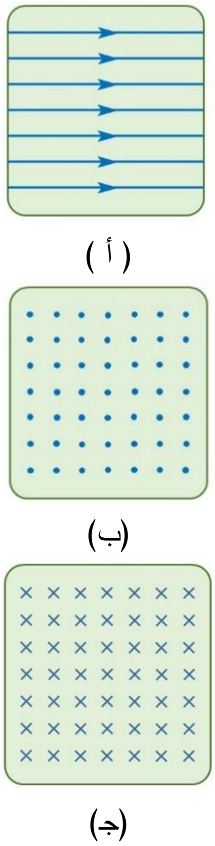
$$F_B=1.6\times10^{-16}\ \mathrm{N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى أجد أن اتجاه القوة التي تؤثر في الإلكترون تكون داخلة في الورقة، باتجاه $(-z)$ بعيدًا عن الناظر (لأن الشحنة سالبة). تكون القوة بهذا المقدار والاتجاه عند النقطة (a) فقط، لأن المجال متغيرًا في مقداره واتجاهه عند النقاط الأخرى.

حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم

Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

في التطبيقات العلمية والتكنولوجية المختلفة، تُستخدم عادة مجالات مغناطيسية منتظمة، تُقذف خلالها الجسيمات المشحونة بسرعات عالية، باتجاه يتعامد مع اتجاه المجال المغناطيسي. يكون **المجال المغناطيسي المنتظم Uniform magnetic field** ثابتا في المقدار والاتجاه عند النقاط جميعها في منطقة المجال. ويمثل بخطوط مستقيمة متوازية والمسافات بينها متساوية، كما يبين الشكل (6/ أ)، ونقاط (رؤوس أسهم متجه نحو الناظر) مرتبة بانتظام لتمثيل مجال المغناطيسي عموديا على الصفحة وكأنه خارجا منها نحو الناظر، كما في الشكل (6/ ب)، ومجموعة إشارات ضرب (ذيل سهم يتجه بعيدًا عن الناظر) مرتبة بانتظام لتمثيل مجال مغناطيسي عموديا على الصفحة مبتعدًا عن الناظر، وكأنه داخل في الصفحة، كما يبين الشكل (6/ جـ).



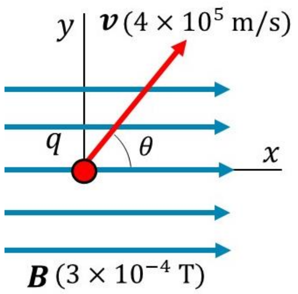
الشكل (6): تمثيل المجال المغناطيسي المنتظم. (أ) نحو اليمين، (ب) نحو الناظر، (جـ) بعيدًا عن الناظر.

أتحقق:

جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم $(\boldsymbol{B})$ باتجاه يوازي خطوط المجال. هل يتأثر الجسيم بقوة مغناطيسية؟

مثال (2):

يتحرك جسيم شحنته $(5 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})$ في المستوى (x, y) داخل مجال مغناطيسي منتظم، بسرعة (v) باتجاه يصنع زاوية $(\theta = 53\ °)$ مع محور $(+x)$، كما في الشكل (7). معتمدًا على بيانات الشكل، أحسب مقدار القوة المغناطيسية التي تؤثر في الجسيم، وأحدد اتجاهها.



الشكل (7): حركة جسيم في مجال مغناطيسي.

المعطيات: $v = 4 \times 10^{5}\ \mathrm{m/s},\ B = 3 \times 10^{-4}\ \mathrm{T}$

$\theta = 53\ °, \qquad q = 5 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}$

المطلوب: $\boldsymbol{F}_B = ?$

.....

الحل:

$$F_B = qvB\sin\theta$$
$$F_B = 5\times10^{-6}\times4\times10^{5}\times3\times10^{-4}\times\sin 53$$
$$F_B = 5\times10^{-6}\times4\times10^{5}\times3\times10^{-4}\times0.8$$
$$F_B = 4.8\times10^{-4}\ \text{N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، بوضع الإبهام باتجاه السرعة (v)، وباقي الأصابع باتجاه المجال $(+x)$. أجد أن اتجاه القوة التي تؤثر في الشحنة تكون داخلة في الورقة، باتجاه $(-z)$ بعيدًا عن الناظر (لأن الشحنة موجبة).

الحركة الدائرية لجسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم

يظهر في الشكل (8) حزمة جسيمات موجبة الشحنة تتحرك داخل أنبوب مفرغ من الهواء بسرعة ابتدائية (v)، باتجاه محور $(+x)$، فتدخل مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا، بشكل عمودي عليه، إذ يتجه المجال المغناطيسي داخل الورقة $(-z)$. يتأثر كل جسيم في هذه الحزمة لحظة دخوله المجال المغناطيسي بقوة مغناطيسية يكون اتجاهها عمودي على كل من اتجاه المجال المغناطيسي واتجاه السرعة، أي باتجاه $(+y)$، فتعمل القوة على انحراف حزمة الجسيمات باتجاهها، فيتغير اتجاه سرعة الجسيمات، ويتغير نتيجة لذلك اتجاه القوة، وتبقى القوة باتجاه عمودي على اتجاه السرعة، ومقدارها يعطى بالعلاقة

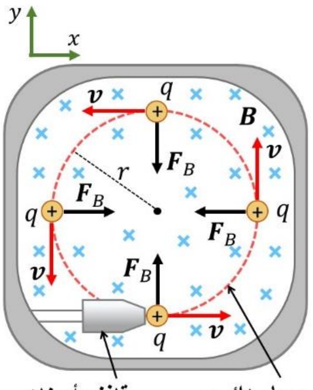
$$F_B = qvB\sin\theta = qvB$$

وتتحرك الجسيمات بسرعة ثابتة مقدارا في مسار دائري يقع في مستوى متعامد مع اتجاه المجال. تعمل القوة المغناطيسية في هذه الحالة عمل القوة المركزية، ويمكن التعبير عن مقدارها باستخدام القانون الثاني لنيوتن بالعلاقة:

$$F_B = \frac{mv^2}{r}$$

حيث m كتلة الجسيم و r نصف قطر المسار الدائري. أستنتج من العلاقتين السابقتين أن

.....



الشكل (8): الحركة الدائرية لجسيم موجب الشحنة في مجال مغناطيسي منتظم.

أفكر:

أفسر لماذا لا تبذل القوة المغناطيسية شغلا على جسيم مشحون يتحرك داخل مجال مغناطيسي منتظم. وهي تختلف بذلك عن القوة الكهربائية التي تبذل شغلاً على جسم مشحون يتحرك داخل مجال كهربائي.

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow qB = \frac{mv}{r} \rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{Br}$$

يُسمى المقدار $(\frac{q}{m})$ الشحنة النوعية للجسيم، وهي ناتج قسمة شحنة الجسيم على كتلته. وتُعدّ صفة فيزيائية للمادة، يستخدمها العلماء للتعرف على الجسيمات المجهولة. حيث صُمّم العديد من الأجهزة التي تستخدم القوة المغناطيسية في توجيه الجسيمات المشحونة، منها؛ مطياف الكتلة ومسارع السينكروترون.

أتحقق:

لماذا تختلف الشحنة النوعية للإلكترون عنها للبروتون.

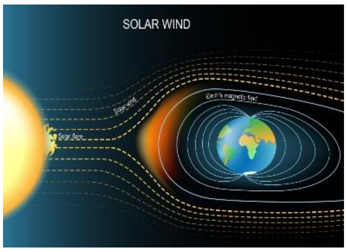
تطبيقات تكنولوجية:

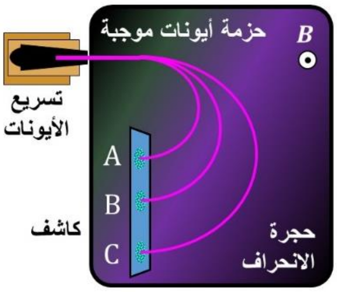
1- **مطياف الكتلة Mass Spectrometer**: جهاز يستخدم لقياس كتل الجسيمات الذرية لتحديد مكونات عينة مجهولة، حيث تُحوّل العينة إلى الحالة الغازية، ثم تؤين جسيماتها بحيث يفقد كل منها عددًا متساويًا من الإلكترونات، فتصبح جميعها متساوية الشحنة رغم اختلاف كتلها. ثم تدخل هذه الأيونات بالسرعة نفسها مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا عموديا على اتجاه السرعة، فيتحرك كل أيون في مسار دائري نتيجة للقوة المغناطيسية المركزية المؤثرة فيه والتي تعطى بالعلاقة:

$$F_B = \frac{mv^2}{r} \Longrightarrow r = \frac{mv^2}{F_c} = \frac{mv}{qB}$$

وبسبب اختلاف كتل الأيونات يختلف نصف قطر المسار الدائري لكل منها (r)، كما في الشكل (10). وحيث أن مقادير كل من السرعة والمجال والشحنة ثابتة، فإن نصف قطر المسار يتناسب طرديا مع الكتلة (m). وبمعرفة قيمة (r)، يتم حساب الشحنة النوعية لكل أيون، ثم التعرف على هوية مكونات العينة. علمًا أن الأيونات السالبة الشحنة تنحرف باتجاه معاكس لاتجاه انحراف الأيونات الموجبة.

أبحث: في مصادر المعرفة المتاحة عن أهمية المجال المغناطيسي الأرضي في حماية الحياة على الأرض من الرياح الشمسية والإشعاعات الكونية، وكيفية تأثير المجال المغناطيسي فيها، وما علاقة ذلك بالشفق القطبي.





الشكل (10): تحليل عينة مجهولة باستخدام جهاز مطياف الكتلة.

كيف سيكون مسار أيون سالب عند دخوله هذا المجال بسرعة باتجاه اليمين؟

.....

2- **مسارع السينكروترون Synchrotron:** يستخدم لتسريع الجسيمات المشحونة مثل الإلكترون والبروتون، والأيونات إلى سرعات عالية، لاستخدامها في الأبحاث العلمية. ويستخدم لذلك مجال كهربائي، ومجال مغناطيسي.

وظيفة المجال الكهربائي: تزويد الجسيمات المشحونة بالطاقة الحركية نتيجة مسارعتها في فرق جهد كهربائي.

وظيفة المجال المغناطيسي: هناك وظيفتين رئيستين للمجال المغناطيسي في السينكروترون؛ **الأولى** أنه يعمل على تغيير مسار الجسيمات لإبقائها في مسار حلقي (قد يكون دائريًا) ويتم زيادة المجال المغناطيسي، كلما زاد الزخم الخطي للجسيمات، لتوفير القوة المغناطيسية الكافية للحفاظ على المسار الدائري. **والثانية**؛ تسريع الالكترونات عن طريق تغيير اتجاه سرعتها الأمر الذي يؤدي الى انتاج موجات كهرومغناطيسية مختلفة الطول الموجي.

أتحقق:

ما استخدامات كل من جهازي مطياف الكتلة والسينكروترون؟ وما وظيفة المجال المغناطيسي في كل منهما؟

مثال (3):

قُذف بروتون بسرعة ابتدائية $(4.7 \times 10^6\ m/s)$ داخل مجال مغناطيسي منتظم $(0.35\ T)$، بحيث تتعامد سرعة البروتون مع المجال، فاتخذ مسارًا دائريًا. إذا علمت أن شحنة البروتون $(1.6 \times 10^{-19}\ C)$ وكتلته تساوي $(1.67 \times 10^{-27}\ kg)$. أحسب نصف قطر المسار الدائري للبروتون.

المعطيات: $v = 4.7 \times 10^{6}\ m/s\,,\quad B = 0.35\ T\,,\quad \theta = 90\,°$

$m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ kg,\quad q_p = 1.6 \times 10^{-19}\ C$

المطلوب: $r = ?$

.....

الشكل (11): صورة المبنى الخارجي للسينكروترون البرازيلي سيريوس (Sirius)، الذي يعادل في مساحته ملعب كرة قدم.

أبحث

أبحث في مصادر المعرفة المختلفة عن أنواع مسارعات الجسيمات. وأعد مقارنة بين مسارعي السينكروترون والسيكلترون، من حيث المكونات ومبدأ العمل. وأيهما يعدّ نسخة مطورة عن الآخر.

الربط مع الكيمياء:

الموجات الكهرمغناطيسية الصادرة عن السينكروترون، يمكن التحكم فيها لإعطاء حزم تتراوح أطوالها الموجية من تحت الحمراء إلى الأشعة السينية، التي تفوق ضوء الشمس في سطوعها. بحيث يستخدم الطول الموجي المناسب في الأبحاث العلمية في مجالات الفيزياء والكيمياء، مثل اكتشاف الخصائص الذرية والجزيئية وطول الروابط بين الذرات داخل الجزيء الواحد، على مستوى (nm).

	الحل: $$\frac{q}{m}=\frac{v}{Br} \quad \Rightarrow \quad r=\frac{m_p v}{qB}$$ $$r=\frac{1.67\times 10^{-27}\times 4.7\times 10^{6}}{1.6\times 10^{-19}\times 0.32}=1.4\times 10^{-1}\ \mathrm{m}$$ **مثال (4):** استخدم مطياف الكتلة لفصل خام اليورانيوم، إلى ذرات اليورانيوم (235) واليورانيوم (238)، تم تأيين الذرات فأصبحت شحنة كل أيون منها $(1.6\times 10^{-19}\ \mathrm{C})$، ثم قذفت جميعها داخل مجال مغناطيسي منتظم $(1.2\ \mathrm{T})$ بسرعة $(4.7\times 10^{6}\ \mathrm{m/s})$، عمودية عليه $(\theta=90^\circ)$. إذا كان نصف قطر مسار أحدهما $(8.177\ \mathrm{cm})$، والثاني $(8.281\ \mathrm{cm})$. أحسب كلاً من: أ) الشحنة النوعية لأيون كل نظير. ب) كتلة كل أيون. **المعطيات:** $v=4\times 10^{4}\ \mathrm{m/s}\,,\quad B=1.2\ \mathrm{T}\,,\quad \theta=90^\circ$ $r_1=8.177\ \mathrm{cm}\,, r_2=8.281\ \mathrm{cm}\,,\quad q=1.6\times 10^{-19}\ \mathrm{C}$ **المطلوب:** $m_1=?\quad,\quad m_2=?$ **الحل:** أ) الشحنة النوعية لكلا الأيونين: $$\frac{q}{m_1}=\frac{v}{Br_1}=\frac{4\times 10^{4}}{1.2\times 8.177\times 10^{-2}}=4076\ \mathrm{C/kg}$$ $$\frac{q}{m_2}=\frac{v}{Br_2}=\frac{4\times 10^{4}}{1.2\times 8.281\times 10^{-2}}=4025\ \mathrm{C/kg}$$ ب) لحساب شحنة كل أيون، نستخدم العلاقة: $$\frac{q}{m_1}=4076\ \mathrm{C/kg}$$ $$\frac{1.6\times 10^{-19}}{m_1}=4076 \quad \Rightarrow \quad m_1=3.925\times 10^{-23}\ \mathrm{kg}$$ $$\frac{q}{m_2}=4025\ \mathrm{C/kg}$$ $$\frac{1.6\times 10^{-19}}{m_2}=4025 \quad \Rightarrow \quad m_2=3.975\times 10^{-23}\ \mathrm{kg}$$	أصمم باستعمال برنامج السكراتش Scratch عرضًا يوضح طريقة عمل مطياف الكتلة وكيفية تأثيره في الأيونات عند تغيير الشحنة أو الكتلة، وملاحظة اختلاف نصف قطر المسار نتيجة لذلك. ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.

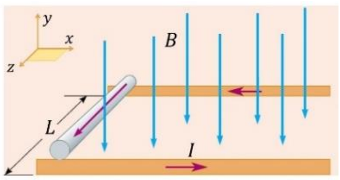
.....

ألاحظ أن الأيون الذي يسلك مسارًا نصف قطره أكبر يمتلك الكتلة الأكبر، وهو النظير (238)، في حين يسلك النظير (235) المسار الآخر الذي نصف قطره أصغر.

القوة المؤثرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسي

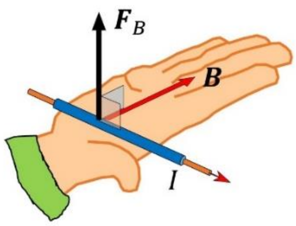
Force on a Current-Carrying Conductor in a Magnetic Field

أعلم أن المجال المغناطيسي يؤثر في المواد المغناطيسية (القابلة للتمغنط مثل الحديد) بقوة مغناطيسية. لكنه يؤثر أيضًا في الموصلات الفلزي غير المغناطيسية (مثل النحاس) عندما يسري فيه تيار كهربائي. فالتيار الكهربائي يتكون من شحنات متحركة، وكل شحنة ستتأثر بقوة مغناطيسية. والقوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل تساوي محصلة القوى المغناطيسية المؤثر في الشحنات التي تنقل التيار الكهربائي. يبين الشكل (12) سلكًا نحاسيًا قابلًا للحركة بسهولة فوق قضيبين متوازيين ثابتين داخل مجال مغناطيسي باتجاه رأسي نحو الأسفل $(-y)$، يسري فيه تيار كهربائي باتجاه $(+z)$.



الشكل (12): موصل يسري فيه تيار كهربائي في مجال مغناطيسي يتأثر بقوة مغناطيسية.

لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل أستخدم قاعدة اليد اليمنى؛ حيث يشير الإبهام إلى اتجاه حركة الشحنات الموجبة داخل الموصل، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يُحدّد اتجاه القوة المؤثرة في الموصل بسهم يخرج من باطن الكف وعمودي عليه، كما في الشكل (13). بتطبيق القاعدة على السلك النحاسي في الشكل (12)، أجد إن القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك تكون في اتجاه المحور السيني الموجب $(+x)$.



الشكل (13): تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يسري فيه تيار كهربائي باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

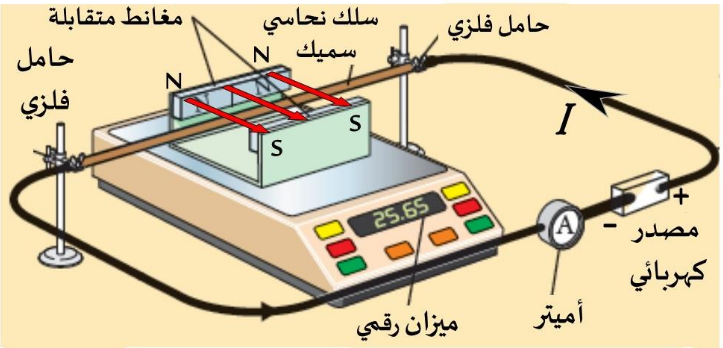
أتحقق:

متى يمكن لشريط من الالمنيوم أن يتأثر بقوة مغناطيسية، عند وضعه في مجال مغناطيسي؟

للتحقق عمليًا من تأثير المجال المغناطيسي في موصل يسري فيه تيار كهربائي، وتحديد اتجاه القوة بطريقة عملية، أنفذ التجربة التالية:

.....

تجربة 2: استقصاء القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.



المواد والأدوات: مغانط لوحية صغيرة عدد (4)، حمالة فلزية للمغانط، سلك نحاسي سميك قطره (3 mm) وطوله (35 cm) تقريبًا، حاملان معدنيان، أميتر، مصدر طاقة منخفض الجهد، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائي.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

1. أثبت مغناطيسين على الطرف الأيمن للحمالة الفولاذية من الداخل، ومغناطيسين على الطرف الأيسر من الداخل، بحيث تولد المغانط الأربعة مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا (تقريبا) باتجاه أفقي، كما يبين الشكل.
2. أضبط الميزان الرقمي بوضع أفقي، ثم أضع فوقه الحمالة الفولاذية والمغانط، وأضبط قراءته على الصفر.
3. أثبت السلك النحاسي السميك على الحاملين الفلزيين جيدًا، لمنع أي حركة له، وأجعله يمتد فوق الميزان داخل المجال المغناطيسي باتجاه عمودي عليه، دون أن يلامس الميزان.
4. **ألاحظ:** أصل الدائرة الكهربائية، كما في الشكل، ثم أرفع جهد المصدر وأراقب السلك النحاسي.
5. **أضبط المتغيرات:** المجال المغناطيسي، وطول السلك السميك الواقع داخل المجال المغناطيسي، والزاوية بين المجال والسلك، جميعها متغيرات تم ضبطها، وأغير في التيار الكهربائي عن طريق تغيير الجهد.
6. **أقيس:** التيار الكهربائي عند قيمة محددة، عندما يظهر تغير على قراءة الميزان الرقمي.
7. **ألاحظ:** أكرر الخطوة (6) برفع الجهد ثلاث مرات أخرى، وألاحظ قراءة الأميتر والميزان في كل مرة. ثم أدون القراءات في جدول مناسب.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج** اتجاه القوة المغناطيسية التي أثر بها المجال في السلك النحاسي، واتجاه قوة رد الفعل التي أثر بها السلك في المغانط والقاعدة الفولاذية، معتمدًا على التغير في قراءة الميزان.
2. **أقارن:** اتجاه القوة الذي استنتجته مع الاتجاه الذي يمكن التوصل إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمنى.
3. **أحلل البيانات وأفسرها:** أمثل البيانات المدونة في الجدول بعلاقة بيانية بين التيار والقوة المغناطيسية.
4. **أستنتج** العلاقة بين التيار والقوة، ثم أجد ميل المنحنى، وأحدد القيم التي يمثلها في العلاقة الرياضية:

$$F_{\boldsymbol{B}} = IBL$$

لاحظت في التجربة أن المجال المغناطيسي والقوة المغناطيسية الناتجة ومتجه **طول الموصل** جميعها متجهات متعامدة، (علمًا أن متجه طول الموصل هو متجه مقداره يساوي طول الموصل واتجاهه باتجاه التيار الكهربائي في الموصل). واستنتجت العلاقة الطردية بين التيار والقوة المغناطيسية، في حين تم تثبيت متغيرات أخرى هي المجال المغناطيسي وطول الموصل والزاوية بين الموصل والمجال المغناطيسي.

أثبتت تجارب عملية أن القوة المغناطيسية تتناسب طرديًا مع كل من: مقدار المجال المغناطيسي وطول الموصل المغمور فيه والتيار الكهربائي، إضافة إلى جيب الزاوية بين متجه طول الموصل والمجال المغناطيسي. وتمثل هذه العوامل في العلاقة الرياضية الآتية:

$$F_B = IBL \sin\theta$$

وإذا نقصت الزاوية بين اتجاه المجال ومتجه طول الموصل (التيار) عن ($90°$) أو زادت عنها، فإن مقدار القوة المغناطيسية يقل، حتى يصبح صفرًا عندما تصبح الزاوية (θ) صفرًا أو ($180°$).

أتحقق:

أوضح المقصود بمتجه طول الموصل، وأبين كيف أحدّد اتجاهه.

مثال (5):

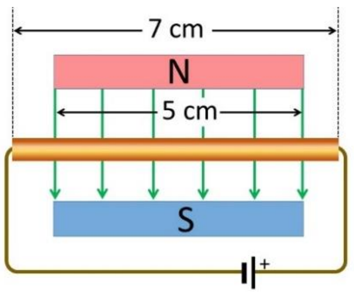
أحسب مقدار مجال مغناطيسي يؤثر بقوة ($75\ \text{mN}$) في سلك طوله ($5\ \text{cm}$) يحمل تيارًا كهربائيًا ($3\ \text{A}$) ويصنع زاوية ($90°$) مع المجال المغناطيسي.

المعطيات:

$$B = \frac{F_B}{IL\sin\theta} = \frac{75\times10^{-3}}{3\times5\times10^{-2}\times1} = 0.5\ \text{T}$$

مثال (6):

يبين الشكل (14) سلك ألمنيوم طوله ($7\ \text{cm}$) يحمل تيارًا ($5.2\ \text{A}$) جزء منه داخل مجال مغناطيسي ($250\ \text{mT}$)، وعموديًا عليه. معتمدًا على بيانات الشكل، أجد:



الشكل (14): سلك ألمنيوم يسري فيه تيار كهربائي، مغمور في مجال مغناطيسي منتظم.

....

أ) اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك.

ب) مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك.

المعطيات:

$$L = 5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}\ , B = 0.25\ \mathrm{T}\ , I = 5.2\ \mathrm{A}\ , \theta = 90^\circ$$

المطلوب: $F_B = ?$

الحل:

أ) باستخدام قاعدة اليد اليمنى: متجه طول الموصل نحو اليسار $(-x)$، واتجاه المجال المغناطيسي نحو الأسفل $(-y)$، بذلك يكون اتجاه القوة المغناطيسية خارجًا من الصفحة وعموديا عليها نحو الناظر $(+z)$.

ب) أستخدم طول الجزء المغمور داخل المجال المغناطيسي فقط من السلك.

$$F_B = IBL \sin\theta$$

$$F_B = 5.2 \times 0.25 \times 5 \times 10^{-2} \times 1 = 6.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{N}$$

عزم الدوران المؤثر في حلقة تحمل تيار في مجال مغناطيسي منتظم

Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

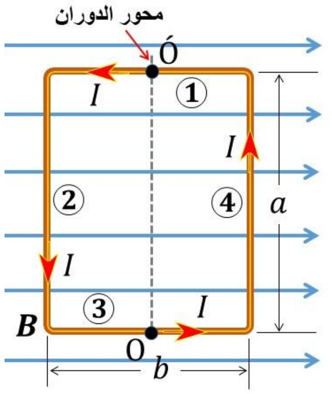
درست الحركة الدورانية بداية الكتاب، وعرفت أن عزم الدوران يعطى بالعلاقة:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F} = Fr \sin\theta$$

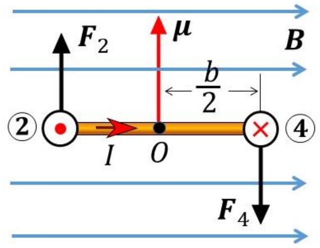
يوضح الشكل (15/ أ) منظر علوي لحلقة موصلة مستطيلة طولها a وعرضها b تحمل تيارًا كهربائيًا (I)، موضوعة أفقيًا في مجال مغناطيسي منتظم، خطوطه توازي مستوى الحلقة. ألاحظ أن الضلعين 1 و3 لا يتأثران بقوى مغناطيسية لأن متجه طول الموصل يوازي خطوط المجال، بينما يتأثر الضلعان 2 و 4 بقوتين مغناطيسيتين $(\boldsymbol{F_2}, \boldsymbol{F_4})$، لأن متجه طول الموصل يتعامد مع خطوط المجال $(\theta = 90^\circ)$، والشكل (15/ب) يبين منظر جانبي للحلقة يظهر فيه اتجاه هاتين القوتين، كما ألاحظ أنهما تؤثران باتجاهين متعاكسين وخطا عملهما غير منطبقين. وحيث أن مقداريهما متساويان، حسب العلاقة:

$$F_2 = F_4 = IaB$$

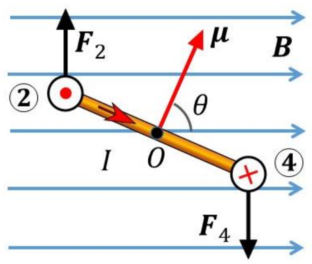
فهما تشكلان ازدواج يعمل على تدوير الحلقة مع اتجاه دوران عقارب



(أ): منظر علوي للحلقة، يبين أضلاعها الأربعة وخطوط المجال.



(ب): منظر جانبي للحلقة يبين الضلع (3) والقوى المغناطيسية.



(ج): منظر جانبي للحلقة يبين الزاوية (θ) بين متجهي المجال والعزم المغناطيسي.

الشكل (15): حلقة مستطيلة تحمل تيارًا كهربائيًا، قابلة للدوران في مجال مغناطيسي منتظم.

.....

الساعة، حول محور ثابت (OO') يقع في مستوى الحلقة وعمودي على مستوى الصفحة.

وحيث أن متجه القوة يتعامد مع طول ذراعها، فإنه يكون لعزم الدوران قيمة عظمى $(\tau_{\max})$، أتوصل إليها كما يأتي:

$$\tau_{\max} = F_2\frac{b}{2} + F_4\frac{b}{2} = (IaB)\frac{b}{2} + (IaB)\frac{b}{2} = IabB$$

وبمعرفة أن مساحة الحلقة $(A = ab)$، فإن:

$$\tau_{\max} = IAB$$

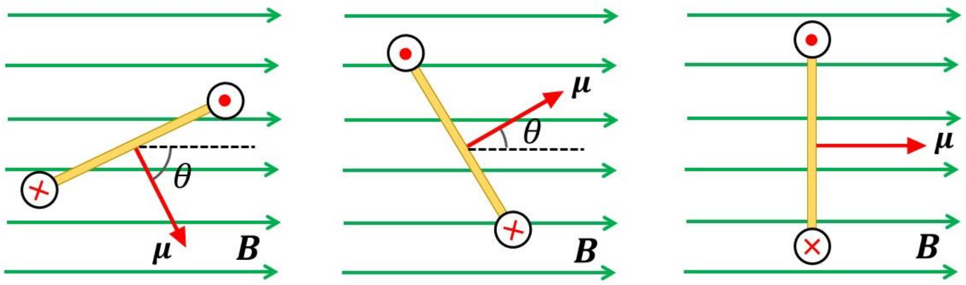
يسمى المقدار (IA) بعزم الثاقطبي المغناطيسي ويرمز له بالرمز $(\boldsymbol{\mu})$، وهو كمية متجهة يحدد اتجاهها باستخدام قاعدة اليد اليمنى بحيث تشير الأصابع الأربعة إلى اتجاه التيار في الحلقة، ويشير الإبهام إلى اتجاه العزم المغناطيسي، الذي يكون باتجاه متجه المساحة للحلقة. وبذلك أكتب العلاقة كما يأتي:

$$\tau_{\max} = \mu B$$

لكن مقدار عزم الدوران يتناقص عن قيمته العظمى في أثناء دوران الحلقة نتيجة تغير الزاوية (θ) بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة للحلقة، ويُعطى بالعلاقة:

$$\tau = \mu B \sin\theta$$

حيث تقع الزاوية (θ) بين المجال ومتجه مساحة الحلقة والذي يكون بنفس اتجاه عزم الثاقطبي المغناطيسي $(\boldsymbol{\mu})$.



الشكل (16): ثلاثة مشاهد جانبية لحلقة يسري فيها تيار كهربائي، داخل مجال مغناطيسي منتظم.

أتحقق:

يبين الشكل (16) ثلاثة مشاهد لمقطع جانبي تظهر فيه الحافة القريبة من الناظر لحلقة تحمل تيارًا كهربائيًا موضوعة في مجال مغناطيسي أفقي. أقارن بين عزم الدوران الذي تتأثر فيه كل حلقة، واتجاه دورانها.

....

مثال (7):

حلقة مستطيلة الشكل مساحتها $(3\ \text{cm} \times 8\ \text{cm})$ يسري فيها تيار $(12\ \text{A})$ ملقاة داخل مجال مغناطيسي منتظم $(600\ \text{mT})$، والزاوية بين المجال ومتجه المساحة $(\theta = 30°)$، كما يبين الشكل (17). أحسب عزم الدوران الذي يؤثر به المجال المغناطيسي في الحلقة، وأحدد اتجاه الدوران.

المعطيات: $a = 8 \times 10^{-2}\ \text{m}\,, \text{b} = 3 \times 10^{-2}\ \text{m}\,, I = 12\ \text{A}$

$\theta = 30°, B = 0.6\ \text{T}$

المطلوب: $\boldsymbol{\tau} = ?$

الحل:

$$A = a \times b = 8 \times 10^{-2} \times 3 \times 10^{-2}$$

$$A = 2.4 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

$$\tau = IAB \sin\theta$$

$$\tau = 12 \times 2.4 \times 10^{-3} \times 0.6 \times \sin 30$$

$$\tau = 8.64 \times 10^{-3}\ \text{N.m}$$

باستخدام قاعدة اليد اليمنى، أحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الضلع 1، حيث أن المجال باتجاه $(+x)$، والتيار باتجاه $(+z)$، فتكون القوة باتجاه $(+y)$، وتكون القوة المؤثرة في الضلع 2 باتجاه $(-y)$، وبذلك يكون دوران الحلقة مع اتجاه دوران عقارب الساعة.

تطبيقات تكنولوجية:

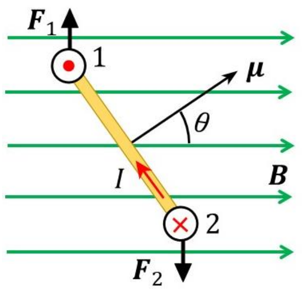
1- **الغلفانوميتر Galvanometer**

الغلفانوميتر أداة تستخدم للكشف عن التيار الكهربائي وقياسه، صنع قبل 200 سنة تقريبا، ثم تطورت صناعته. النوع المستخدم منه الآن يسمى الغلفانومتر ذو الملف المتحرك، الذي يمكنه قياس تيارات صغيرة جدًا (μA). يعتمد في عمله على عزم الدوران الذي يؤثر به المجال المغناطيسي المنتظم في ملف قابل للدوران عند مرور تيار كهربائي فيه.

أجزاء الغلفانوميتر ووظائفها:

1-قطبا مغناطيس متقابلان بينهما مجال مغناطيسي. يؤثر بقوة مغناطيسية في الملف عند سريان تيار كهربائي فيه، كما في الشكل (18).

.....



الشكل (17): حلقة تحمل تيارًا كهربائيًا في مجال مغناطيسي منتظم.

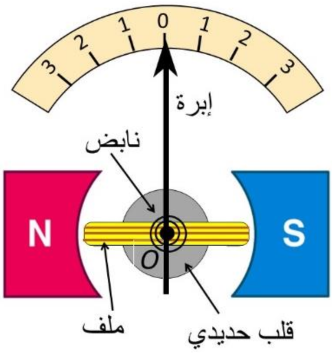
الربط مع الفضاء:

تحتاج الأقمار الصناعية لضبط توجيهها من حين لآخر، لذلك تزود بملفات، يتم إيصالها بالتيار عند الحاجة، فيؤثر المجال المغناطيسي الأرضي فيها بعزم دوران يعمل على تدوير القمر الصناعي، لضبط اتجاهه. علمًا أن مصدر التيار هو الخلايا الشمسية.

2–ملف مستطيل من سلك نحاسي رفيع ومعزول، مغمور في المجال المغناطيسي. عند مرور تيار كهربائي في الملف يتأثر بعزم ازدواج فيدور حول محور يمر بالنقطة (O) وعمودي على الصفحة، ويدور معه إبرة تشير إلى تدريج معين يتناسب مع قيمة التيار.

3–قلب حديدي داخل الملف وظيفته تركيز المجال المغناطيسي في الملف.

4–نابض حلزوني مثبت في أحد طرفي المحور. وظيفته إرجاع الملف إلى وضع الصفر بعد توقف مرور التيار الكهربائي فيه.

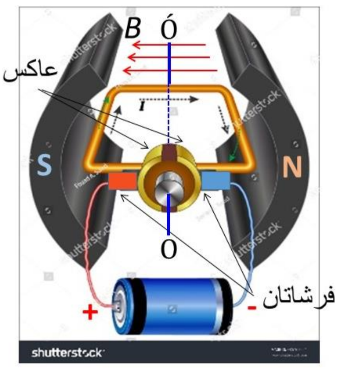


الشكل (18): الغلفانوميتر ذو الملف المتحرك.

2– المحرك الكهربائي Electric Motor

جهاز يحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية، يستخدم في كثير من التطبيقات، مثل السيارة الكهربائية. يتكون المحرك الكهربائي، كما يبين الشكل (19) من الأجزاء الرئيسة الآتية:

1. قطبا مغناطيس متقابلان يولدان مجالًا مغناطيسيًا.
2. ملف من سلك نحاسي معزول ومغمور في مجال مغناطيسي يؤدي إلى دورانه حول محور (OO') نتيجة تأثره بعزم دوران عند مرور تيار كهربائي فيه نتيجة للقوة المغناطيسية المؤثرة فيه.
3. العاكس، وهو نصفا أسطوانة موصلة، يتصل كل نصف بأحد طرفي الملف، وظيفته توصيل التيار الكهربائي إلى الملف وعكس اتجاهه كل نصف دورة.
4. فرشاتان من الكربون تلامسا العاكس وتتصلان بمصدر التيار، فتنقلانه إلى العاكس، وعند دوران الملف يحدث تبديل في تلامس إحدى الفرشاتين مع أحد نصفي العاكس كل نصف دورة، فينعكس اتجاه التيار وتنعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في الملف ويستمر في دورانه.



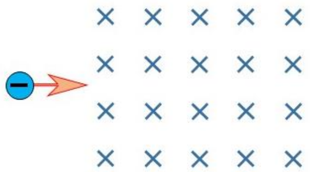
الشكل (19): أجزاء المحرك الكهربائي الرئيسة.

تعتمد سرعة دوران المحرك الكهربائي على عزم الدوران الذي تولده القوة المغناطيسية على الملف.

.....

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أعرّف المجال المغناطيسي عند نقطة، وأذكر وحدة قياسه في النظام الدولي للوحدات. ثم أعدد خصائص خطوط المجال المغناطيسي.
2. **أستنتج وأفسر:** يتحرك إلكترون باتجاه محور $(+x)$، فدخل مجالاً مغناطيسية منتظمًا اتجاهه مع محور $(-z)$، كما في الشكل. أستنتج اتجاه القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال في الإلكترون لحظة دخوله منطقة المجال، ثم أبين إن كانت هذه القوة ستحافظ على اتجاهها بعد أن يغير الإلكترون موقعه، أم لا. وأفسر إجابتي.



3. **أحلل:** معتمدًا على العلاقة الرياضية التي أستخدمها في حساب مقدار القوة المغناطيسية التي يؤثر بها مجال مغناطيسي في شحنة متحركة فيه، أستنتج العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة وأبين نوع العلاقة.
4. **أتوقع:** ثلاث جسيمات مشحونة: إلكترون، بروتون، أيون صوديوم (Na^+)، دخلت منطقة مجال مغناطيسي منتظم في جهاز مطياف الكتلة بالسرعة نفسها. كيف أميز كل جسيم منها عن طريق اتجاه الانحراف ونصف قطر المسار؟ موضحًا إجابتي بالرسم.
5. أجيب عن السؤالين الآتيين وأفسر إجابتي:
   - هل يمكن لمجال مغناطيسي أن يجعل إلكترونًا يبدأ حركته من السكون؟
   - هل ينحرف النيوترون عندما يتحرك داخل مجالاً مغناطيسيًا عمودي عليه؟
6. **أحسب:** يتحرك بروتون بسرعة $(4 \times 10^6\ m/s)$ في مجال مغناطيسي منتظم مقداره $(1.7\ T)$، فيتأثر بقوة مغناطيسية $(8.2 \times 10^{-13}\ N)$. أجد قياس الزاوية بين متجهي سرعة البروتون وخطوط المجال المغناطيسي.
7. **تفكير ناقد:** معتمدًا على العلاقة الرياضية لعزم الدوران المؤثر في ملف داخل مجال مغناطيسي، أستنتج العوامل التي تعتمد عليها سرعة دوران المحرك الكهربائي.

.....

الدرس 2

المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي
Magnetic Field of an Electric Current

الفكرة الرئيسة:

تحققت فائدة كبيرة من استخدام المغانطيس الكهربائي في التطبيقات التكنولوجية الحديثة، فالمجال المغناطيسي الناتج عنه يفوق مجالات المغانط الطبيعية بآلاف المرات، واستخدامات المجال المغناطيسي أحدثت تقدمًا كبيرًا في مجالات إنتاج الطاقة والطب والنقل وغيرها.

- أحلل بيانات تجريبية وأدرس وصفيا وكمًّيا المجال المغناطيسي الناشئ عن سريان تيار كهربائي مستمر في كل من: موصل مستقيم وطويل، ملف دائري، ملف لولبي.
- أطور رسوم تخطيطية وتعبيرات لفظية، لأصف شكل خطوط المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في كل من: موصل مستقيم وطويل، ملف دائري، ملف لولبي.
- أكتب معتمدًا على قانون بيو وسافار معادلات رياضية وأحسب المجال المغناطيسي عند نقطة في المجال الناتج عن موصل مستقيم وعند مركز ملف دائري وعند مركز ملف لولبي.
- أنفذ استقصاء عمليًا لتعرف خصائص القوة المغناطيسية التي يؤثر بها موصل مستقيم يحمل تيارًا في موصل آخر موازٍ له.

المفاهيم والمصطلحات:

مجال مغناطيسي Magnetic Field

حلقة دائرة Circular Loop

ملف لولبي Solenoids

مناطق مغناطيسية Magnetic Domains

....

المغناطيس الكهربائي Electric Magnet

لاحظت في الدرس السابق أن المجال المغناطيسي ينشأ حول مغناطيس دائم، لكن الاستخدام العملي والتطبيقات التكنولوجية في الغالب تعتمد على المغناطيس الكهربائي، إذ يمكن توليد مجال مغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في موصل.

المجال المغناطيسي الناشئ عن موصل يحمل تيارًا كهربائيًا
Magnetic Field of a Current Carrying Conductor

أعلم أن الشحنة الكهربائية تولد حولها مجالاً كهربائيًا، سواء كانت ساكنة أو متحركة. إضافة إلى ذلك فإن شحنة كهربائية متحركة تولد حولها مجالاً مغناطيسيًا. هذا ما لاحظه العالم الدنماركي أورستد، عندما وضع بوصلة بالقرب من سلك يمر فيه تيارًا كهربائيًا، فانحرفت إبرة البوصلة.

جان بيو J.Biot وفيليكس سافار F.Savart، عالمان فرنسيان تابعا أبحاثهما في الموضوع نفسه، إلى أن توصلا تجريبيًا إلى علاقة رياضية لحساب المجال المغناطيسي الذي يولده موصل يحمل تيارًا كهربائيًا، عُرفت العلاقة بقانون بيو–سافار، وهو:

$$dB = \frac{\mu_\circ}{4\pi}\,\frac{IdL\sin\theta}{r^2}$$

حيث (dB) مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة (P) الناشئ عن مقطع صغير (dL) من موصل يسري فيه تيار كهربائي (I). والمسافة (r) هي مقدار المتجه الذي يمتد من المقطع (dL) إلى النقطة (P) ويصنع زاوية (θ) مع متجه طول المقطع (dL)، كما في الشكل (20).

يرمز $(\mu_\circ)$ إلى ثابت النفاذية المغناطيسية للفراغ (أو الهواء)، وقيمته $(4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T.m/A})$، ويعبّر مقدار النفاذية المغناطيسية لوسط ما عن مدى إمكانية تدفق خطوط المجال المغناطيسي خلال هذا الوسط، حيث تكون أقل نفاذية للفراغ وأكبرها للحديد والمواد المغناطيسية الأخرى.

لحساب مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة بالقرب من موصل مستقيم لا نهائي الطول يسري فيه تيار كهربائي (I)، وعلى مسافة (r) منه، نستخدم حساب التكامل في الرياضيات، فنجمع المجالات المغناطيسية الجزئية $(d\boldsymbol{B})$ الناتجة عن جميع مقاطع الموصل، ونحصل على العلاقة الرياضية الآتية:

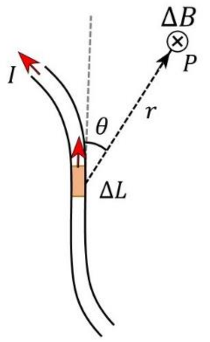
$$B = \frac{\mu_\circ I}{2\pi r}$$

تعطي هذه العلاقة مقدار المجال المغناطيسي عند جميع النقاط الواقعة على محيط دائرة نصف قطرها (r)، يمر الموصل في مركزها ويكون عموديا على مستواها، كما في الشكل (21/أ). وألاحظ أن مقدار المجال المغناطيسي ثابت عند كل نقطة على محيط الدائرة. كما أستنتج من العلاقة السابقة أن مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة معينة يتناسب طرديًا مع التيار وعكسيًا مع بعد النقطة عن الموصل، الشكل (21/ب) يبين خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن سلك لا نهائي الطول، حيث تشكل حلقات مغلقة متحدة المركز مع الموصل، تتباعد عن بعضها كلما زادت المسافة r ، وهذا يعني نقصان في قيمة المجال المغناطيسي.

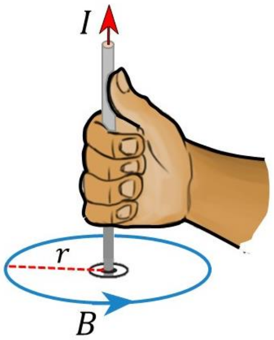
لتحديد اتجاه المجال عند أي نقطة بالقرب من الموصل، أستخدم قاعدة اليد اليمنى، بحيث أمسك الموصل بيدي اليمنى واضعًا الإبهام باتجاه التيار ، فيشير اتجاه دوران بقية أصابعي إلى اتجاه المجال المغناطيسي حول الموصل، كما في الشكل (21/أ). تجدر الإشارة إلى أن المجال المغناطيسي عند أي نقطة تقع على امتداد موصل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًا يساوي صفرًا، حيث تكون الزاوية (θ) بين متجه موقع النقطة ومتجه طول الموصل (الواردة في قانون بيو–وسافار)، تساوي صفر أو (180°)، ويكون $(\sin\theta = 0)$.

أتحقق:

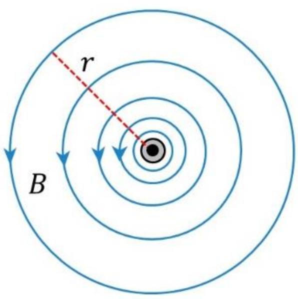
أصف شكل خطوط المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًا، وأبين كيف أحدد اتجاهه عند نقطة.



الشكل (20): المجال المغناطيسي الجزئي الناتج عن عنصر صغير من موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.



(أ): تحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لا نهائي الطول باستخدام قاعدة اليد اليمنى.



(ب): مقطع عرضي في الموصل.

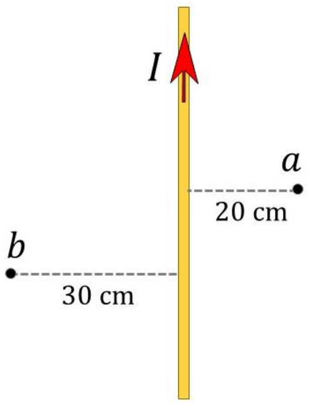
الشكل (21): المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًا.

مثال (8):

سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًا مقداره (3 A)، معتمدًا على الشكل (22)، أجد:

أ) مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة (a)، وأحدد اتجاهه.

ب) مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة (b)، وأحدد اتجاهه.



الشكل (22): جزء من سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًا.

المعطيات:

$$I = 3\ \text{A}\,, r_a = 0.2\ \text{m}\,, r_b = 0.3\ \text{m}$$

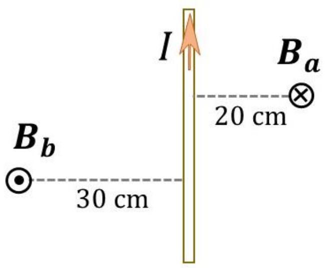
المطلوب: $\boldsymbol{B}_a = ?\,, \boldsymbol{B}_b = ?$

الحل:

أ) مقدار المجال عند النقطة (a)

$$B_a = \frac{\mu_\circ I}{2\pi r_a} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.2} = 3 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (a) يكون داخلاً في الصفحة وعموديا عليها. كما في الشكل (23).



الشكل (23): اتجاه المجال المغناطيسي على جانبي سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًا.

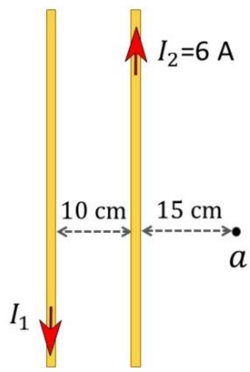
ب) مقدار المجال عند النقطة (b)

$$B_b = \frac{\mu_\circ I}{2\pi r_b} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.3} = 2 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (b) يكون خارجًا من الصفحة وعموديا عليها. كما يبين الشكل (23).

مثال (9):

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان، يحملان تيارين كهربائيين متعاكسين كما في الشكل (24). أجد مقدار التيار (I_1) الذي يجعل محصلة المجال المغناطيسي عند النقطة (a) يساوي صفرًا.



الشكل (24): نقطة في مجال سلكين موصلين متوازيين لا نهائيا الطول يحملان تيارات كهربائية متعاكسة.

المعطيات:

$$I_2 = 6\ \text{A}\,, r_2 = 0.15\ \text{m}\,, r_1 = 0.25\ \text{m}$$

المطلوب: $I_1 = ?$

......

الحل:

$$B_2 = \frac{\mu_\circ I_2}{2\pi r_2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6}{2\pi \times 0.15} = 8 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

عند النقطة (a) اتجاه المجال $(\boldsymbol{B_2})$ داخل في الصفحة وعموديا عليها، واتجاه $(\boldsymbol{B_1})$ خارج من الصفحة وعموديا عليها، فهما متعاكسان ومحصلتهما تساوي صفرًا، أي إنهما متساويان مقدارًا:

$$B_1 = \frac{\mu_\circ I_1}{2\pi r_1} = B_2 = 8 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

$$I_1 = \frac{2\pi \times 0.25 \times 8 \times 10^{-6}}{4\pi \times 10^{-7}} = 10\ \mathrm{A}$$

تمرين:

معتمدًا على الشكل (25)، إذا كان $(I_1 = I_2 = 6\ \mathrm{A})$، أجد مقدار المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (a)، وأحدد اتجاهه.

المجال المغناطيسي الناشئ عن حلقة دائرية

Magnetic Field of a Circular Current Loop

بإجراء التكامل على قانون بيو–سافار لحساب المجال المغناطيسي في مركز حلقة دائرية نصف قطرها (R) مصنوعة من موصل يحمل تيارًا كهربائيًا، فإن:

$$B = \frac{\mu_\circ I}{2R}$$

وفي حال تم تشكيل الموصل على صورة ملف دائري نصف قطره (R) يتكون من عدد (N) لفة، فإن مقدار المجال في مركزه يُعطى بالعلاقة:

$$B = \frac{\mu_\circ IN}{2R}$$

لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي في مركز ملف دائري أستخدم قاعدة اليد اليمنى، فعندما تشير أصابع اليد الأربعة إلى اتجاه التيار في الملف، كما في الشكل (26)، فإن الإبهام يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي عند مركز الملف.

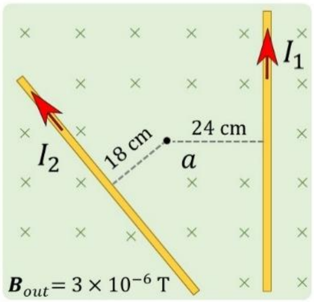
مثال (10):

يتكون سلك من جزء يشكل ربع دائرة نصف قطرها $R = 0.5\ \mathrm{m}$، وجزءان مستقيمان لا نهائيا الطول، كما في الشكل (27). أحسب مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة (P) وأحدد اتجاهه.

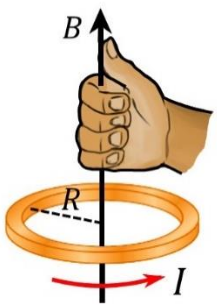
ملاحظة: يمكن حساب التيار (I_1) بطريقة مختصرة وذلك بمساواة مقداري المجالين لنحصل على:

$$\frac{I_1}{r_1} = \frac{I_2}{r_2} \Rightarrow I_1 = \frac{r_1 I_2}{r_2}$$

$$I_1 = \frac{0.25 \times 6}{0.15} = 10\ \mathrm{A}$$



الشكل (25): نقطة تقع في منطقة المجال المغناطيسي لموصلين مستقيمين لا نهائيا الطول.



الشكل (26): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي في مركز ملف دائري.

....

المعطيات:

$$I = 12\ \text{A}\,, R = 0.5\ \text{m}\,, N = 0.25$$

المطلوب: $B = ?$

الحل:

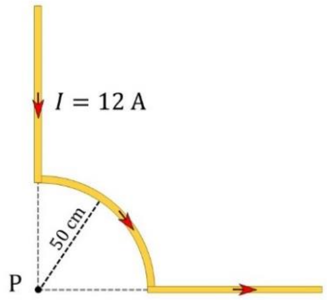
بالنسبة للجزء الذي يشكل ربع دائرة، يمكنني اعتبار أن عدد اللفات:

$N = 0.25$

$$B = \frac{\mu_{\circ} I N}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 0.25}{2 \times 0.5}$$

$$B = 3.8 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

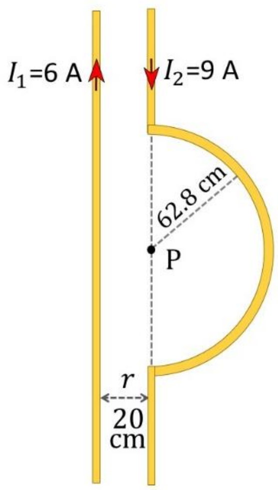
بالنسبة للجزأين المستقيمين، فإن النقطة (P) تقع على امتدادهما، لذلك يكون المجال المغناطيسي الناتج عنهما يساوي صفرًا. ألاحظ أن قياس الزاوية (θ) يساوي صفر بالنسبة للجزء العلوي، ويساوي (180°) بالنسبة للجزء الأيمن.



الشكل (27): المجال المغناطيسي لسلك يتكون من ثلاثة أجزاء إحداها يشكل ربع حلقة دائرية تقع النقطة P في مركزها.

مثال (11):

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول، يحتوي أحدهما على نصف حلقة مركزها (P)، كما في الشكل (28). أجد المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (P) وأحدد اتجاهه.



الشكل (28): المجال المغناطيسي لسلك يتكون من ثلاثة

المعطيات:

$$N = 0.5, r = 0.2\ \text{m}$$

$$I_1 = 6\ \text{A}\,, I_2 = 9\ \text{A}\,, R = 0.628\ \text{m},$$

المطلوب: $B = ?$

الحل:

المجال الناتج عن السلك المستقيم لا نهائي الطول:

$$B_1 = \frac{\mu_{\circ} I_1}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6}{2\pi \times 0.2} = 6 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

المجال الناتج عن الملف الدائري:

$$B_2 = \frac{\mu_{\circ} I_2 N}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 0.5}{2 \times 0.628} = 4.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

باستخدام قاعدة اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار في كل من السلكين فإن بقية الأصابع تشير إلى المجال، أجد أن اتجاه المجالين نحو داخل الصفحة وعمودي عليها، ومقداره:

$$B = B_1 + B_2 = 10.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

.....

المجال الناشئ عن ملف لولبي يحمل تيارًا كهربائيًا

Magnetic Field of a Solenoid Carrying a Current

الملف اللولبي **Solenoid** سلك موصل ملفوف في حلقات دائرية متراصة معزولة عن بعضها، ويأخذ الملف شكلاً اسطوانيًا، كما في الشكل (29/أ). عندما يسري فيه تيار كهربائي فإنه يولد مجالاً مغناطيسيًا، يمكن حساب مقداره على امتداد المحور داخل الملف وبعيدًا عن طرفيه، وذلك بإجراء تكامل باستخدام قانون بيو–سافار، إذ نحصل على العلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_{\circ} I N}{l}$$

وبقسمة عدد اللفات الكلي (N) على طول الملف (l) نحصل على عدد اللفات في وحدة الطول (n):

$$\frac{N}{l} = n$$

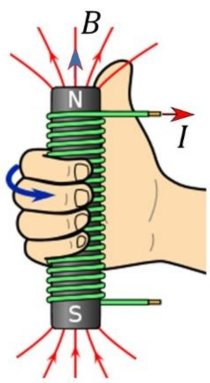
وعندها يمكن كتابة العلاقة السابقة على الصورة الآتية:

$$B = \mu_{\circ} I n$$

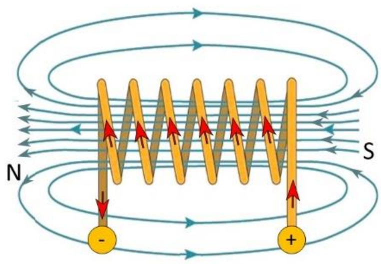
باستخدام قاعدة اليد اليمنى، يمكنني تحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي، فعندما تشير الأصابع الأربعة إلى اتجاه التيار في حلقات الملف، يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخله، كما في الشكل (29/أ). ويحدد اتجاه خطوط المجال المغناطيسي القطب الشمالي للملف؛ فيكون شماليًا في جهة خروج خطوط المجال، وجنوبيًا في جهة دخولها. وعندما تكون حلقات الملف اللولبي متراصة، وطوله أكبر بكثير من قطره، فإن المجال المغناطيسي داخله وبعيدًا عن طرفيه يكون منتظمًا، كما في الشكل (29/ب).

أتحقق:

ما صفات الملف اللولبي التي تجعل المجال المغناطيسي داخله منتظمًا؟



(أ)



(ب)

الشكل (29): (أ): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي على امتداد محوره.
(ب): المجال المغناطيسي المنتظم داخل الملف اللولبي بعيدا عن جانبيه.

.....

مثال (12):

ملف لولبي طوله $(0.5\ m)$ يحتوي على (500) لفة، أحسب مقدار المجال المغناطيسي داخله، إذا كان يحمل تيارًا كهربائيًا $(11\ A)$.

المعطيات:

$$l = 0.5\ \text{m}\ , I = 11\ \text{A}\ , N = 500$$

المطلوب: $B = ?$

الحل:

$$B = \frac{\mu_{\circ} I N}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 11 \times 500}{0.5}$$
$$B = 1.38 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

مثال (13):

ملف لولبي يتكون من عدد لفات بمعدل (1400) في كل متر من طوله. إذا نشأ داخله مجال مغناطيسي مقداره $(1.5 \times 10^{-2}\ \text{T})$ فما مقدار التيار الكهربائي المار فيه؟

المعطيات:

$$B = 1.5 \times 10^{-2}\ \text{T}\ , n = 1400\ \text{m}^{-1}$$

المطلوب: $I = ?$

الحل:

$$B = \mu_{\circ} I n$$

$$I = \frac{B}{\mu_{\circ} n} = \frac{1.5 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1400} = 8.53\ \text{A}$$

تمرين:

أحسب عدد اللفات في ملف لولبي طوله $(8\ \text{cm})$ يولّد بداخله مجالاً مغناطيسيًا مقداره $(2 \times 10^{-3}\ \text{T})$ عند مرور تيار $(1.5\ \text{A})$ فيه.

أفكر:

معتمدًا على العلاقة الرياضية الخاصة بالمجال المغناطيسي داخل ملف لولبي، أبين أثر كل مما يأتي في مقدار المجال المغناطيسي داخله:

- مضاعفة عدد اللفات فقط.
- مضاعفة طول الملف فقط.
- مضاعفة عدد اللفات وطول الملف معًا.

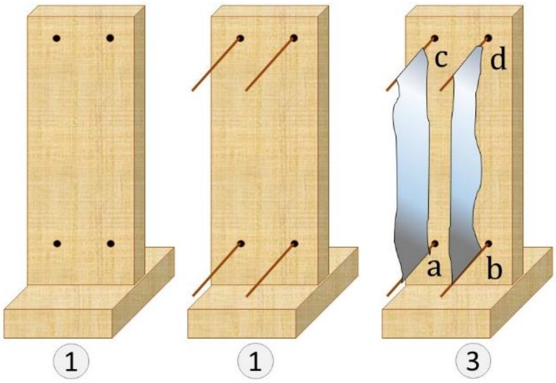
الربط مع التكنولوجيا

يتطلب حدوث تفاعل الاندماج النووي رفع درجة الوقود النووي إلى أكثر من مليون درجة سليسيوس، وتحويله إلى بلازما عالية الكثافة. لتحقيق ذلك في مفاعلات الاندماج واجه العلماء صعوبة احتواء البلازما في إناء خاص، فجاء الحل من علماء روس باحتواء البلازما في مجال مغناطيسي قوي، كما في الشكل، لمنعها من التسرب ولرفع الضغط ودرجة الحرارة، بما يكفي لحدوث الاندماج.

......

تجربة 3: استقصاء القوة المغناطيسية التي يؤثر بها موصل مستقيم يحمل تيارًا في موصل آخر موازٍ له ويحمل تيارًا كهربائيًا.

المواد والأدوات: مصدر طاقة كهربائية (DC) منخفض القدرة، أسلاك توصيل، مقاومة متغيرة، ورق ألمنيوم، قطعتا خشب أبعادهما ($8 \times 7 \times 2\ cm^3$)، ($18 \times 7 \times 2\ cm^3$)، جهاز أميتر.



إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائية والتوصيلات.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفذ الخطوات الآتية:

1. أثبت قطعتي الخشب معًا، كما في الشكل (1)، وأثقب القطعة الكبيرة أربعة ثقوب رفيعة.
2. أثبت أربعة أسلاك نحاسية سميكة في الثقوب الأربعة كما في الشكل (2)، ثم أقص شريطين من ورق الألمنيوم بطول (18 cm) وعرض (4 cm)، وأثبت طرفيهما على الأسلاك النحاسية بثنيها حول السلك.
3. أصل النقطتين a, b معًا مع القطب الموجب للمصدر عن طريق المقاومة المتغيرة، وأصل النقطتين c, d معًا مع القطب السالب للمصدر.
4. **ألاحظ:** أشغل مصدر الطاقة على تيار منخفض لمدة زمنية قصيرة، وأراقب ما يحدث لشريطي الألمنيوم.
5. **أضبط المتغيرات:** أكرر الخطوة (4) مرتين إضافيتين، بخفض قيمة المقاومة المتغيرة، لزيادة التيار في كل مرة، ومراقبة ما يحدث للشريطين. ثم أدون ملاحظاتي.
6. أعيد توصيل شريطي الألمنيوم، فأصل النقطة a مع القطب الموجب للمصدر عن طريق المقاومة المتغيرة، وأصل النقطة b مع القطب السالب للمصدر، وأصل النقطتين c و d معًا، ثم أكرر الخطوتين (4,5).

التحليل والاستنتاج:

1. أحدد اتجاه التيار في كل شريط ألمنيوم بناءً على طريقة التوصيل.
2. **أستنتج** اتجاه القوة المغناطيسية التي أثر بها كل من الشريطين في الشريط الآخر.
3. **أقارن:** اتجاه القوة الذي استنتجته من التجربة مع الاتجاه الذي أتوصل إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمنى.
4. **أحلل البيانات وأفسرها:** أمثل البيانات المدونة في الجدول بعلاقة بيانية بين التيار والقوة المغناطيسية.
5. **أستنتج** علاقة بين اتجاه التيار في كل من الشريطين ونوع القوة المتبادلة بينهما؛ تجاذب أم تنافر. ثم أبين مقدار التيار ومقدار القوة بين الشريطين.

القوة المغناطيسية بين موصلين متوازيين

Magnetic Force Between Two Parallel Conductors

درست سابقًا أن الموصل الذي يحمل تيارًا كهربائيًا يولد حوله مجالاً مغناطيسيًا، ودرست أن المجال المغناطيسي يؤثر بقوة في موصل موضوع فيه ويحمل تيارًا كهربائيًا. أستنتج من ذلك أن قوة مغناطيسية تنشأ بين موصلين متجاورين لا نهائيا الطول يحملان تيارين كهربائيين.

حيث ينشأ مجال مغناطيسي (B_1) حول الموصل الأيمن الذي يسري فيه تيار (I_1)، في الشكل (30/أ)، يُعطى مقداره على مسافة (r) بالعلاقة:

$$B_1 = \frac{\mu_\circ I_1}{2\pi r}$$

وحيث أن الموصل الأيسر يقع في هذا المجال ويتعامد معه، ويمر فيه تيار كهربائي (I_2)، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية مقدارها:

$$F_{12} = B_1 I_2 L$$

بتعويض قيمة (B_1) أحصل على القوة لكل وحدة أطوال:

$$F_{12} = \frac{\mu_\circ I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F_{12}}{L} = \frac{\mu_\circ I_1 I_2}{2\pi r}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى على الموصل الأيسر، حيث اتجاه (B_1) عنده يكون نحو $(+z)$، أجد أن اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة فيه يكون نحو اليمين $(+x)$.

في الشكل (30/ب) ينشأ مجال مغناطيسي (B_2) حول الموصل الأيسر الذي يسري فيه تيار (I_2)، يُعطى مقداره على مسافة (r) بالعلاقة:

$$B_2 = \frac{\mu_\circ I_2}{2\pi r}$$

ونتيجة لوجود الموصل الأيمن الذي يحمل تيارًا كهربائيًا (I_1) في هذا المجال وتعامده معه، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية تُعطى بالعلاقة الآتية:

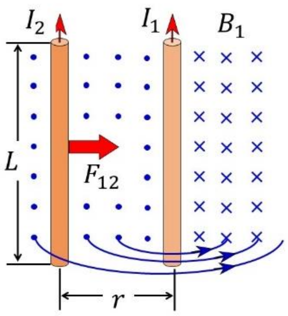
$$F_{21} = B_2 I_1 L$$

بتعويض قيمة (B_2) أحصل على القوة لكل وحدة أطوال:

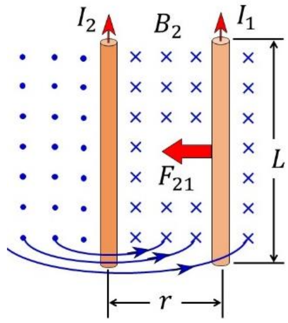
$$F_{21} = \frac{\mu_\circ I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F_{21}}{L} = \frac{\mu_\circ I_1 I_2}{2\pi r}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى على الموصل الأيمن، حيث يكون (B_2) عنده باتجاه $(-z)$، أجد أن اتجاه القوة المؤثرة فيه يكون نحو اليسار $(-x)$.

أي إنّ القوتين المتبادلتين بين موصلين يحملان تيارين كهربائيين بالاتجاه نفسه تكون قوة تجاذب.



(أ): المجال المغناطيسي (B_1) الناشئ عن (I_1) في الموصل الأيمن لانهائي الطول.

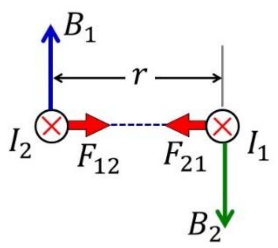


(ب): المجال المغناطيسي (B_2) الناشئ عن (I_2) في الموصل الأيسر لانهائي الطول.

الشكل (30): سلكان مستقيمان متوازيان لانهائيا الطول، يحمل كل منهما تيارًا كهربائيًا.

.....

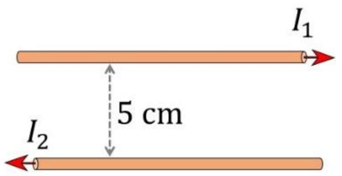
أستنتج مما سبق أن القوتين بين الموصلين متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا. وحسب القانون الثالث لنيوتن فإنهما تشكلان زوجي فعل ورد فعل. كما يبين الشكل (31) الذي يمثل مقطعًا عرضيًا في كلا السلكين. ويتناسب مقدار القوتين طرديًا مع كل من التيارين والطول المشترك للسلكين، وعكسيًا مع البعد بينهما (r).



الشكل (31): مقطع عرضي في السلكين يبين اتجاه قوة التجاذب المغناطيسية بينهما.

مثال (15):

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان تفصلهما مسافة (5 cm) يحمل السلك العلوي تيارًا كهربائيًا (8.0 A) والسفلي (2.0 A)، كما في الشكل (32). أحسب مقدار القوة المغناطيسية المتبادلة بين وحدة الاطوال من السلكين، وأحدد نوعها.



الشكل (32): سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان، يحمل كل منهما تيارًا كهربائيًا.

المعطيات:

$$l = 1\ \text{m}\ , I_1 = 8.0\ \text{A}\ , I_2 = 2.0\ \text{A}\ , r = 0.05\ \text{m}$$

المطلوب: $F = ?$

الحل:

$$F = \frac{\mu_\circ I_1 I_2 L}{2\pi r} \rightarrow \frac{F}{L} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8 \times 2}{2\pi \times 0.05}$$

$$= 6.4 \times 10^{-6}\ \text{N/m}$$

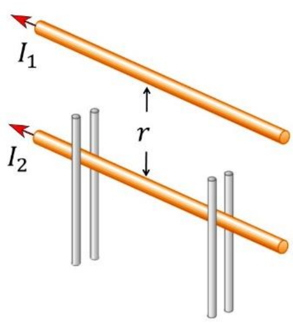
بتطبيق قاعدة اليد اليمنى أجد أن القوة بين السلكين هي تنافر.

أفكر:

أستنتج متى تكون القوة المتبادلة بين السلكين تجاذبًا، ومتى تكون تنافرًا؟

مثال (16):

موصلان متوازيان لا نهائيا الطول يحمل كل منهما تيارًا كهربائيًا (200 A)، العلوي مثبت، والسفلي قابل للحركة رأسيًا، كما في الشكل (33). إذا علمت أن كتلة وحدة الأطوال من الموصل السفلي (0.2 g/cm)، أجد المسافة (r) التي تجعله متزنًا.



الشكل (33): سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان.

المعطيات: $I_1 = 200\ \text{A}\ , I_2 = 200\ \text{A}\ ,\ F_W = 0.2\ \text{N}$

المطلوب: $d = ?$

الحل:

عندما يتزن الموصل السفلي، فإن مقدار وزن وحدة الاطوال منه يساوي مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة لكل وحدة طول.

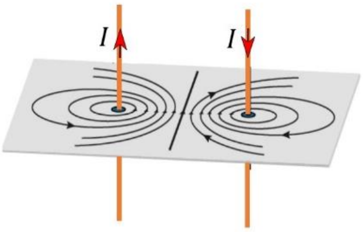
......

$$F = F_W = 0.2\ \mathrm{N/m}$$

$$F = \frac{\mu_\circ I_1 I_2 L}{2\pi r} \Rightarrow r = \frac{\mu_\circ I_1 I_2 L}{2\pi F}$$

$$r = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 200 \times 1}{2\pi \times 0.2} = 4 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}$$

إذا وضعت موصلين متوازيين يحمل كل منهما تيارًا كهربائيًا (I) باتجاهين متعاكسين، ورسمت خطوط المجال المغناطيسي، كما في الشكل (34). تكون خطوط المجال في المنطقة بين الموصلين متقاربة، بينما تكون متباعدة في المناطق الخارجية، أستنتج من الشكل أن اتجاه القوة المغناطيسية يؤثر في كل من السلكين لنقله من منطقة المجال المغناطيسي القوي إلى منطقة المجال المغناطيسي الضعيف. أي إن الموصلين يتباعدان، وهذا يتفق مع قاعدة اليد اليمنى.



الشكل (34): خطوط المجال المغناطيسي بين موصلين متوازيين يحملان تيارين كهربائيين متساويا المقدار باتجاهين متعاكسين.

منشأ المجال المغناطيسي:

لاحظت في ما سبق أن جميع المجالات المغناطيسية ناتجة عن حركة الشحنات الكهربائية، لكن، كيف يحدث ذلك في حالة المغناطيس الدائم؟ في المغناطيس الدائم توجد شحنات متحركة أيضًا، وهي الإلكترونات التي تدور حول نواة الذرة. ويمكن تصور حركة الالكترون حول نواة الذرة بأنها تشكل حلقة صغيرة جدا يسري فيها تيار كهربائي وينتج عنها مجال مغناطيسي. في بعض المواد تكون المجالات المغناطيسية في اتجاهات مختلفة وبشكل عشوائي بحيث تكون محصلة المجال المغناطيسي صفرا. أما في المواد المغناطيسية الدائمة، فإن المجالات المغناطيسية الناشئة عن الالكترونات المتحركة تؤدي الى حقول (مناطق) مغناطيسية Magnetic domains ينتج عنها مجال مغناطيسي محصل لا يساوي صفر، ولذلك ينشأ مجال مغناطيسي للمغناطيس الدائم.

أفكر:

أرسم شكلا مشابهًا للشكل (34)، عندما يكون التياران في السلكين بالاتجاه نفسه، وأبين عليه مناطق المجال القوي والضعيف، وأحدد اتجاه حركة كل من السلكين تحت تأثير القوة المغناطيسية.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أذكر العوامل التي يعتمد عليها مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة بالقرب من موصل يحمل تيارًا كهربائيًا، والذي ينتج عن مقطع صغير من هذا الموصل.
2. **أستنتج:** يتحرك إلكترون في الفضاء في خط مستقيم، ما المجالات الناشئة عن الإلكترون؟
3. موصلان مستقيمان متوازيان لانهائيا الطول، المسافة بينهما (30 cm)، يحمل أحدهما تيارًا كهربائيًا يساوي ثلاثة أمثال التيار الذي يحمله الموصل الثاني. أحدد على الخط العمودي الواصل بينهما نقطة ينعدم عندها المجال المغناطيسي، عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه.
4. **أقارن:** أبين العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي في مركز ملف دائري والعوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي.
5. **أحسب:** ملف دائري من سلك نحاسي عدد لفاته (100)، نصف قطر كل منها (8.0 cm)، ويحمل تيارًا كهربائيًا (0.4 A). أحسب مقدار المجال المغناطيسي في مركز الملف.
6. **أحسب:** موصل مستقيم لا نهائي الطول موضوع على سطح أفقي يحمل تيارًا كهربائيًا (50 A) يتجه من الشمال إلى الجنوب. أحسب مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة على السطح تبعد (2.5 m) إلى الشرق من السلك، وأحدد اتجاهه.

الإثراء والتوسّع التصوير باستخدام تقنية الرنين المغناطيسي (MRI)

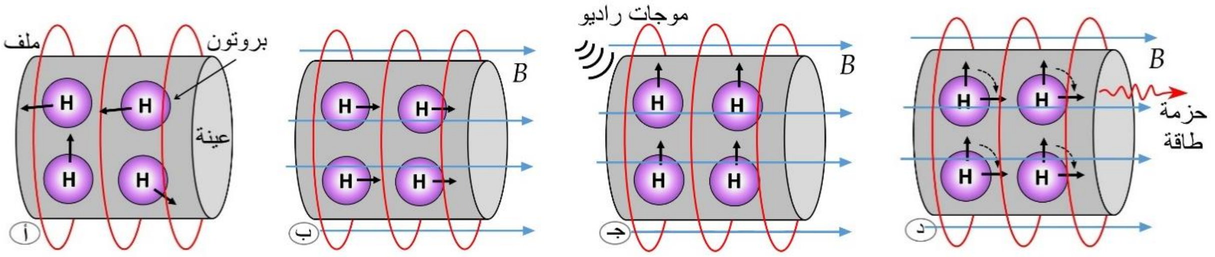
التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) Magnetic resonance imaging تقنية غير جراحية تنتج صورًا تشريحية واضحة ثلاثية الأبعاد لجسم الإنسان، تساعد في الكشف عن الأمراض وتشخيصها. يتكون جهاز الرنين المغناطيسي من ثلاثة أجزاء رئيسة هي؛ ملفات مغناطيسية، ومصدر موجات راديو، وجهاز حاسوب.

تحتوي خلايا جسم الإنسان على نسبة كبيرة من الماء، الذي يتكون من الأكسجين والهيدروجين، ولكل ذرة هيدروجين عزمٌ ثناقطبي مغناطيسي. وفي غياب مجال مغناطيسي خارجي تكون اتجاهات العزوم المغناطيسية في الجسم موزعة في جميع الاتجاهات بشكل عشوائي، كما في الشكل (أ).

خطوات عمل الجهاز:

- تولد الملفات مجالاً مغناطيسيًا خارجيا يخترق الجسم، يؤدي الى اصطفاف العزوم المغناطيسية لذرات الهيدروجين في اتجاه المجال المغناطيسي نفسه وتصبح في وضع اتزان، الشكل (ب).
- يُطلق مصدر موجات الراديو نبضة من الموجات تخترق الجسم فتؤدي إلى انحراف العزوم المغناطيسية لذرات الهيدروجين بزاوية (90°) عن اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، الشكل (جـ).
- عند توقف نبضة موجات الراديو تبدأ العزوم بالعودة للاصطفاف باتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وينتج عن ذلك انبعاث حزمة من الموجات الكهرمغناطيسية تلتقطها مستشعرات التصوير وتحولها عن طريق برمجيات محوسبة الى صور تشريحية، الشكل (د).

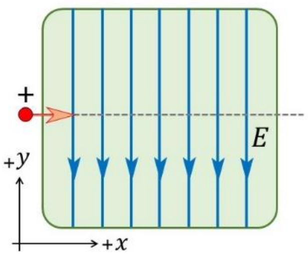
تختلف العزوم المغناطيسية في زمن عودتها إلى حالة الاتزان (الاصطفاف باتجاه المجال المغناطيسي الخارجي)، وفي مقدار طاقة الموجات الكهرمغناطيسية التي تبعثها، وذلك حسب تركيب النسيج والطبيعة الكيميائية للجزيئات فيه، وبذلك يتمكن الأطباء من التفريق بين الأنسجة المختلفة (السليمة والمصابة بمرض معين مثلا) بناءً على هذه الخصائص المغناطيسية.



العينة قبل تأثير المجال ⇐ عمل المجال المغناطيسي ⇐ نبضة موجات الراديو ⇐ التقاط الموجة

تقنية الرنين المغناطيسي (MRI) لا تُستخدم فيها الأشعة السينية المؤيّنة، التي قد تؤدي الى تلف بعض الخلايا الحية عند التعرض لها بكميات كبيرة.

أبحث في وسائل المعرفة المتاحة ومنها شبكة الإنترنت عن سبب دوران ذرات الهيدروجين في أنسجة الجسم عند تأثرها بمجال مغناطيسي قوي.

مراجعة الوحدة	
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في ما يأتي: 1. من العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة المغناطيسية التي تؤثر في جسيم مشحون متحرك؛ مقدار الشحنة وسرعة الجسيم، حيث تزداد القوة: أ) بزيادة السرعة ونقصان الشحنة. ب) بزيادة السرعة وزيادة الشحنة. ج) بنقصان السرعة وزيادة الشحنة. د) بنقصان السرعة ونقصان الشحنة. 2. عند تمثيل المجال المغناطيسي المنتظم بخطوط مجال، فإنها تتصف بواحدة مما يأتي: أ) خطوط متوازية والمسافات بينها متساوية. ب) خطوط متوازية والمسافات بينها غير متساوية. ج) خطوط منحنية تشكل حلقات مقفلة. د) خطوط منحنية تشكل حلقات غير مقفلة. 3. يتحرك أيون موجب باتجاه محور $(+x)$، داخل غرفة مفرغة فيها مجال كهربائي باتجاه $(-y)$، في أي اتجاه يجب توليد مجال مغناطيسي بحيث يمكن أن يؤثر في الجسيم بقوة تجعله لا ينحرف عن مساره؟ أ) باتجاه محور $(+y)$، للأعلى. ب) باتجاه محور $(-y)$، للأسفل. ج) باتجاه محور $(+z)$، نحو الناظر. د) باتجاه محور $(-z)$، داخل الصفحة. 4. يستخدم المجال المغناطيسي لحساب الشحنة النوعية للجسيمات، ماذا يُقصد بالشحنة النوعية؟ أ) نسبة كتلة الجسيم إلى مربع شحنته. ب) نسبة شحنة الجسيم إلى مربع كتلته. ج) نسبة كتلة الجسيم إلى شحنته. د) نسبة شحنة الجسيم إلى كتلته.	

......

5. عندما يتحرك جسيم مشحون حركة دائرية في مجال مغناطيسي منتظم، متى يزداد نصف قطر المسار الدائري للجسيم؟

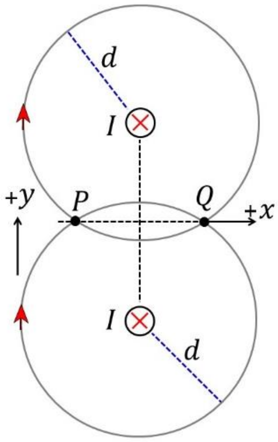
أ) بزيادة المجال وزيادة الشحنة.

ب) بزيادة الكتلة ونقصان المجال.

ج) بنقصان الكتلة ونقصان السرعة.

د) بنقصان الكتلة وزيادة المجال.

6. سلكان مستقيمان متوازيان لانهائيا الطول، يحملان تيارين متساويين وباتجاه $(-z)$ داخل الصفحة، النقطتان (P, Q) تبعدان عن السلكين مسافات متساوية، كما في الشكل. كيف يكون اتجاه المجال المغناطيسي المحصل عند النقطتين (P, Q)؟



أ) عند (P) باتجاه $(+x)$، وعند (Q) باتجاه $(+y)$.

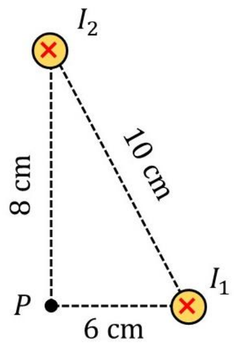
ب) عند (P) باتجاه $(-x)$، وعند (Q) باتجاه $(-y)$.

ج) عند (P) باتجاه $(+x)$، وعند (Q) باتجاه $(-x)$.

د) عند (P) باتجاه $(+y)$، وعند (Q) باتجاه $(-y)$.

2. أفسر: مجال مغناطيسي منتظم باتجاه $(+x)$، دخل جسيمان مشحونان منطقة المجال بسرعة (v) باتجاه داخل الصفحة، فانحرف أحدهما باتجاه محور $(+y)$، والثاني باتجاه محور $(-y)$. أفسّر انحرافهما.

3. أحسب: موصلان مستقيمان متوازيان، يحمل كل منهما تيارًا كهربائيًا باتجاه داخل الصفحة، كما في الشكل. إذا كان تيار الأول $(12\ \text{A})$، وتيار الثاني $(40\ \text{A})$. أحسب كل من:



أ) القوة التي يؤثر بها الموصل الثاني في وحدة الأطوال من الموصل الأول مقدارًا واتجاهًا.

ب) المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (P) مقدارًا واتجاهًا.

4. أحسب: خط علوي أفقي ناقل للكهرباء يرتفع عن سطح الأرض $(10\ \text{m})$، ويحمل تيارًا كهربائيًا $(90\ \text{A})$ باتجاه الشرق. أحسب مقدار المجال المغناطيسي وأحدد اتجاهه في نقطتين تحت الخط الناقل:

أ) النقطة الأولى على بعد $(1.5\ \text{m})$ منه.

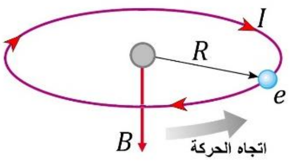
ب) النقطة الثانية على سطح الأرض.

....

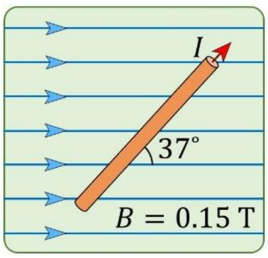
5. أحسب: ملف لولبي طوله $(0.6\ \text{m})$. يحتوي على (400) لفة متراصة جيدًا. إذا مرّ فيه تيار كهربائي $(8\ \text{A})$، أجد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف وعند نقطة تقع على محوره.

6. تفكير ناقد: أيون موجب شحنته $(+e)$ يكمل 5 دورات في مجال مغناطيسي منتظم $(5.0 \times 10^{-2}\ \text{T})$ خلال مدة زمنية $(1.5\ \text{ms})$. أحسب كتلة الأيون بوحدة (kg).

7. أقارن: كيف أستخدم جسيمًا مشحونًا، لتمييز منطقة محددة، إن كانت منطقة مجال مغناطيسي أم مجال كهربائي؟ ثم أستخدم مثالاً كدليل على إجابتي.



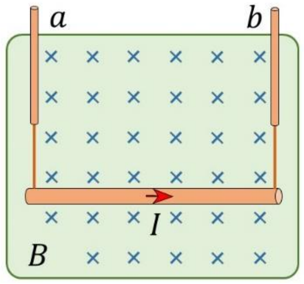
8. تفكير ناقد: أفترض أن إلكترون ذرة الهيدروجين يدور حول النواة (البروتون) في مسار دائري نصف قطره $(5.3 \times 10^{-11}\ \text{m})$ تحت تأثير القوة الكهربائية بينهما. تشكل حركة الإلكترون تيارًا كهربائيًا (اصطلاحيا) في حلقة دائرية بعكس اتجاه حركته، كما في الشكل. أحسب مقدار المجال المغناطيسي (B) الناتج عن هذه الحركة، علمًا أن الزمن الدوري لحركة الإلكترون $(1.5 \times 10^{-16}\ \text{s})$.



9. موصل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًا $(8\ \text{A})$ ومغمور في مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل المجاور. أحسب مقدار القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في وحدة الأطوال من الموصل، وأحدد اتجاهها.

10. ملف دائري نصف قطره $(6\ \text{cm})$ يتكون من (20) لفة ويحمل تيارًا كهربائيًا $(12\ \text{A})$. معلق رأسيًا في مجال مغناطيسي أفقي منتظم، مقداره $(0.4\ \text{T})$ تصنع خطوطه زاوية (30°) مع العمودي على مستوى الملف. أجد مقدار عزم الازدواج الذي يؤثر به المجال المغناطيسي المنتظم في الملف.

....

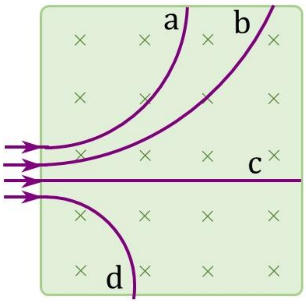


11. موصل للكهرباء مستقيم الشكل طوله $(0.45\ \mathrm{m})$ وكتلته $(60\ \mathrm{g})$، في وضع أفقي معلق بواسطة سلكين رأسيين (a, b) ينقلان له تيارًا كهربائيًا مقداره $(5\ \mathrm{A})$. حيث $(g = 9.8\ \mathrm{m/s^2})$.

أ) أحسب مقدار المجال المغناطيسي الذي يتعامد مع الموصل والذي يجعل الشد في السلكين صفرًا.

ب) أحسب مجموع الشد الكلي في السلكين المذكورين، عندما ينعكس اتجاه التيار الكهربائي في الموصل.

12. يصل سلكان نحاسيان في السيارة بين البطارية وبادئ الحركة (السلف)، عند التشغيل يمر في السلكين تيار $(300\ \mathrm{A})$ " لفترة قصيرة". ما مقدار القوة المتبادلة بين وحدة الأطوال من السلكين، بافتراض أنهما متوازيان والمسافة الفاصلة بينهما $(4\ \mathrm{cm})$؟ وهل تكون هذه القوة تجاذب أم تنافر؟



13. دخلت أربعة جسيمات (a, b, c, d) منطقة مجال مغناطيسي منتظم بسرعات متساوية وباتجاه عمودي على خطوطه كما في الشكل. أحدد أي من هذه الجسيمات يحمل شحنة موجبة وأيها يحمل شحنة سالبة، ثم رتب الجسيمات a, b, d تصاعديا حسب كتلتها.

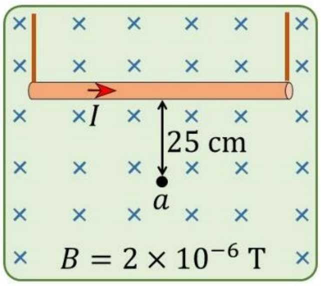
14. ملف دائري من سلك نحاسي عدد لفاته (80)، نصف قطر كل منها $(10\ \mathrm{cm})$، ويحمل تيارًا كهربائيًا $(5\ \mathrm{A})$. أحسب مقدار المجال المغناطيسي في مركز الملف.

15. ملف يتكون من (100) لفة من سلك نحاسي يسري فيها تيار كهربائي $(20\ \mathrm{A})$، وضع في مجال مغناطيسي منتظم $(0.3\ \mathrm{T})$، بحيث كانت الزاوية بين متجه مساحة الملف وخطوط المجال المغناطيسي $(45°)$، فتأثر بعزم دوران مقداره $(21.3\ \mathrm{Nm})$. أجد مساحة الحلقة.

....

16. يتحرك بروتون في مسار دائري نصف قطره (12 cm) داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.7 T)، يتعامد اتجاه خطوطه مع مستوى المسار الدائري. أحسب السرعة الخطية التي دخل فيها البروتون المجال.

17. موصل مستقيم طوله (60 cm) يحمل تيارًا كهربائيًا (4 A) معلق أفقيًا داخل مجال مغناطيسي، كما في الشكل. اعتمادًا على بيانات الشكل، أحسب ما يأتي:



أ) المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (a).

ب) القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل المستقيم.

18. مقدار ملف يتكون من (100) لفة من سلك نحاسي يسري فيها تيار كهربائي (20 A)، وضع في مجال مغناطيسي منتظم (0.3 T)، بحيث كانت الزاوية بين متجه مساحة الملف وخطوط المجال المغناطيسي (45 °)، فتأثر بعزم دوران مقداره (21.3 Nm). أجد مساحة الحلقة.

ج) القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في جسيم شحنته موجبة مقدارها $(2 \times 10^{-6}\ \text{C})$ لحظة مروره بالنقطة (a) بسرعة $(6 \times 10^{4}\ \text{m/s})$ باتجاه محور $(-y)$.

مسرد المصطلحات

إزاحة زاوية Angular Displacement هي التغير في الموقع الزاوي، وتساوي الزاوية التي يمسحها نصف قطر المسار الدائري والذي يدور مع الجسم الجاسئ.

أمبير (A) Ampere: مقدار التيار الكهربائي الذي يسري في موصلٍ عندما تعبُر مَقطَع هذا الموصل شحنةٌ مقدارُها (1 C) في ثانيةٍ واحدة.

تسارع زاوي متوسط Average Angular Acceleration هو نسبة التغيّر في مقدار السرعة الزاوية اللحظية إلى الزمن اللازم لحدوث هذا التغيّر، رمزه $(\bar{\alpha})$ ويُقاس بوحدة $(\mathrm{rad/s^2})$ أو $(\mathrm{s^{-2}})$ حسب النظام الدولي للوحدات.

تصادم غير مرنٍ Inelastic Collision تصادُمٌ لا يكون فيه مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموع طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أن الطاقة الحركية للنظام غير محفوظة، إذ يحدث نقص فيها.

تصادم مرن Elastic Collision تصادم يكون فيه مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادُم مساويًا مجموع طاقتها الحركية بعد التصادُم؛ أي أن الطاقة الحركية للنظام محفوظةٌ.

دفع Impulse هو ناتج ضرب القوّة المُحصّلة المؤثّرة في جسم في زمن تأثيرها، ويقاس بوحدة $(\mathrm{N.s})$ حسب النظام الدولي للوحدات، وهو كمية متجهة يكون باتّجاه تغير الزخَم الخطيّ، أي باتّجاه القوّة المُحصّلة.

ذراع القوة Lever Arm هو البعُد العمودي بين خط عمل القوة ومحور الدوران.

زخَم خطيّ Linear Momentum هو ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته المتجهة $(\boldsymbol{v})$، رمزه $\boldsymbol{p}$، ويُقاس بوحدة $\mathrm{kg.m/s}$ حسب النظام الدولي للوحدات، ويُعبّر عنه بالمعادلة الآتية: $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$.

زخم زاوي Angular Momentum يساوي ناتج ضرب عزم القصور الذاتي للجسم أو النظام في سرعته الزاوية المتجهة، وهو كمية متجهة، رمزه $(\boldsymbol{L})$، ووحدة قياسة $(\mathrm{kg.m^2/s})$ حسب النظام الدولي للوحدات.

سرعة زاوية متوسطة Average Angular Velocity هي نسبة الإزاحة الزاوية $(\Delta\theta)$ لذلك الجسم إلى الفترة الزمنية (Δt) التي حدثت خلالها هذه الإزاحة، رمزها $(\overline{\omega})$، ووحدة قياسها $(\mathrm{rad/s})$ حسب النظام الدولي للوحدات.

عزم Torque هو مقياس لمقدرة القوة على إحداث الدوران لجسم، وهو كمية متجهة، رمزه $(\boldsymbol{\tau})$، ويُعرف رياضيًّا بأنه يساوي ناتج الضرب المتجهي لمتجه القوة $(\boldsymbol{F})$ ومتجه موقع نقطة تأثير القوة $(\boldsymbol{r})$ بالنسبة لمحور الدوران. ويُقاس العزم بوحدة N.m حسب النظام الدولي للوحدات.

عزم الثناقطبي المغناطيسي (μ) Magnetic dipole moment. كمية متجهة تساوي حاصل ضرب التيار الكهربائي (I) الذي يسري في حلقة، في متجه مساحة الحلقة $(\boldsymbol{A})$.

عزم القصور الذاتي Moment of Inertia مقياس لممانعة الجسيم لتغيير حالته الحركية الدورانية، ويساوي ناتج ضرب كتلة الجسيم النقطي في مربّع بُعده عن محور الدوران، رمزه (I) ويُقاس بوحدة $(\mathrm{kg.\,m^2})$ حسب النظام الدولي للوحدات.

غلفانوميتر Galvanometer: أداة تستخدم للكشف عن التيار الكهربائي وقياسه.

فولت (V) Volt: فرقُ الجُهد بين طرفي موصلٍ مقاومتُه $(1\ \Omega)$ يسري فيه تيارٌ كهربائيٌّ $(1\ \mathrm{A})$.

قاعدة اليد اليمنى: تُبسط اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يُحدّد اتجاه القوة بسهم يخرج من باطن الكف وعمودي عليه.

قاعدة كيرشوف الأولى Kirchhoff's First Rule: "المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا".

قاعدة كيرشوف الثانية Kirchhoff's Second Rule: المجموع الجبري لتغيرات الجُهد عبر مكونات مسارٍ مُغلقٍ في دارةٍ كهربائيّةٍ يُساوي صفرًا.

قانون أوم Ohm's law: ينص "أنّ الموصل عند درجة الحرارة الثابتة ينشأُ فيه تيارٌ كهربائي (I) يتناسب طرديًّا مع فرق الجُهد بين طرفيه (ΔV).

قانون حفظ الزخَم الخطيّ Law of Conservation of Linear Momentum ينص على أنه: "عندما يتفاعل جسمان أو أكثر في نظام معزول، يظل الزخَم الخطيّ الكلي للنظام ثابتًا". كما يُمكن التعبير

عنه بأن: الزخَم الخطيّ الكلي لنظام معزول قبل التصادُم مباشرةً يساوي الزخَم الخطيّ الكلي للنظام بعد التصادُم مباشرةً.

قانون حفظ الزخم الزاوي Law of Conservation of Angular Momentum ينص على أن: "الزخم الزاوي لنظام معزول يظل ثابتًا في المقدار والاتجاه"، إذ يكون العزم المحصّل المؤثر في النظام المعزول صفرًا. أي أن الزخم الزاوي الابتدائي لنظام معزول يساوي زخمه الزاوي النهائي.

قدرة كهربائية (P) Electrical power: المعدلُ الزمنيّ للشُّغل المبذول، وتقاس بوحدة واط (watt).

قوة دافعة كهربائية Electromotive force: الشغل الذي تبذله البطارية في نقل وحدة الشحنات الموجبة داخل البطارية من قطبها السالب إلى قطبها الموجب.

مبرهنة (الزخَم الخطيّ– الدفع) Impulse – Momentum Theorem، تنص على أن: "دفع قوة محصلة مؤثرة في جسم يساوي التغيُّر في زخَمه الخطيّ".

متجه طول الموصل: متجه مقداره يساوي طول الموصل واتجاهه باتجاه التيار الكهربائي المار في الموصل.

مجال مغناطيسي Magnetic Field عند نقطة: القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة المتحركة بسرعة ($1\ m/s$) باتجاه عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي، لحظة مرورها في تلك النقطة.

مجال مغناطيسي منتظم Uniform magnetic field: مجال مغناطيسي ثابت المقدار والاتجاه عند نقاطه جميعها. ويمكن تمثيله بخطوط متوازية والمسافات بينها متساوية.

محرك كهربائي Electric Motor: أداة لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية، ويعمل على مبدأ عزم الدوران الناتج عن تأثير مجال مغناطيسي في ملف يسري فيه تيار كهربائي.

مركز الكتلة Centre of Mass نقطة في الجسم الجاسئ أو النظام تتحرك كما لو أن كتلة النظام كاملة مركزة فيها، وأن القوة المحصلة المؤثرة في النظام تؤثر في تلك النقطة، وقد يقع مركز الكتلة داخل الجسم أو خارجه، اعتمادًا على شكل الجسم.

مسارع السينكروترون Synchrotron: جهاز يستخدم لتسريع الجسيمات الذرية المشحونة مثل الإلكترون والبروتون، والأيونات إلى سرعات عالية.

مطياف الكتلة Mass Spectrometer: جهاز يستخدم لمعرفة المكونات الكيميائية لعينة مجهولة.

مفهوم المجال المغناطيسي (B) Magnetic Field Concept: خاصية للحيز المحيط بالمغناطيس، ويظهر في هذا الحيّز تأثير المجال على شكل قوى مغناطيسية تؤثر في المغانط الأخرى والمواد المغناطيسية.

مقاومة كهربائية (R) Electric resistance: نسبةُ فرق الجُهد بين طرفي أي جزء في الدارة الكهربائية إلى التيار المارّ فيه.

مقاومة مكافئة (R) Equivalent resistance: المقاومة الكلية التي تكافئ في مقدارها مجموعة مقاومات موصولة معًا على التوالي أو التوازي.

مقاومية المادة (ρ) Resistivity: مقاومةُ عيّنةٍ من المادة مساحة مقطَعِها ($1\ \mathrm{m}^2$)، وطولها ($1\ \mathrm{m}$) عند درجة حرارة معينة.

مواد لا أومية Non−ohmic materials: مواد تتغيّر مقاومَتها مع تغيُّر فرق الجُهد بين طرفيها، حتى عند ثبات درجة الحرارة.

موصل أوميّ Ohmic conductors: تكون العلاقة البيانية الخاصة به خطًّا مستقيمًا، وتُوصَف بأنها تخضع لقانون أوم.

واط (W) Watt: قدرةُ جهازٍ كهربائيٍّ يستهلكُ طاقةً كهربائيةً بمقدار ($1\ \mathrm{J}$) كُلَّ ثانية.