نتقدم بثقة
Moving Forward with Confidence

رؤية عُمان 2040

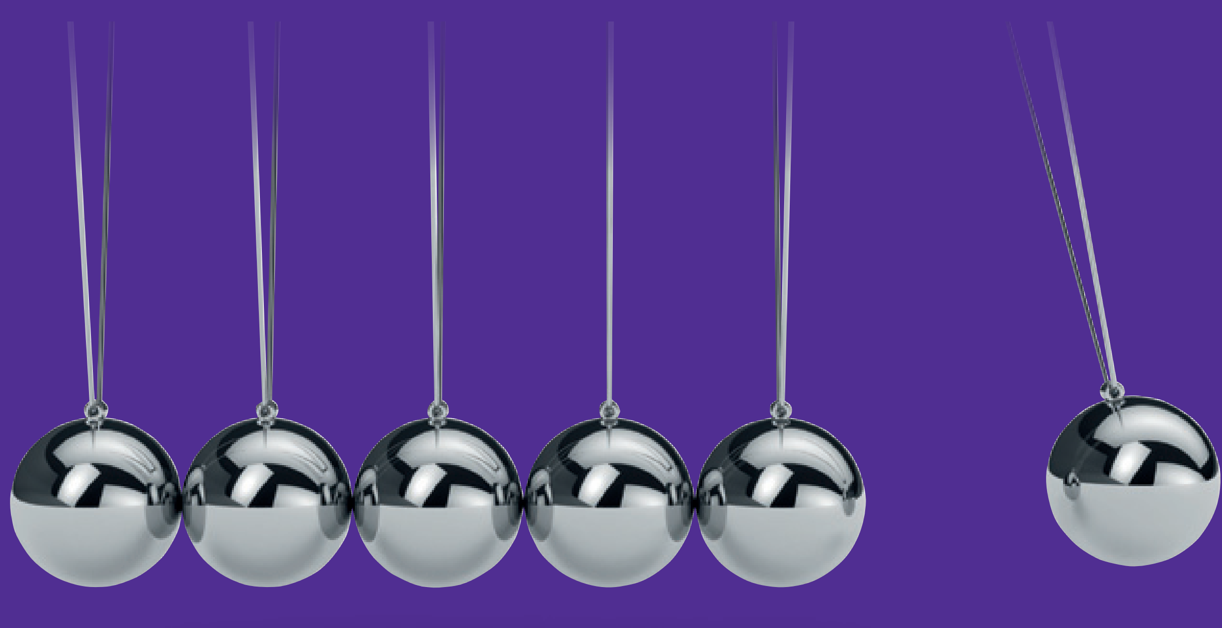
سلطنة عُمان
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الحادي عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني



CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية
1445هـ -2023م

سلطنة عُمان
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الحادي عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية 1445 هـ - 2023 م

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

مطبعة جامعة كامبريدج، الرمز البريدي CB2 8BS، المملكة المتحدة.

تشكل مطبعة جامعة كامبريدج جزءًا من الجامعة.
وللمطبعة دور في تعزيز رسالة الجامعة من خلال نشر المعرفة، سعيًا وراء
تحقيق التعليم والتعلم وتوفير أدوات البحث على أعلى مستويات التميز العالمية.

الطبعة التجريبية ٢٠٢٣ م، طُبعت في سلطنة عُمان

هذه نسخة تمَّت مواءمتها من كتاب الطالب - الفيزياء للصف الحادي عشر - من سلسلة كامبريدج للفيزياء لمستوى الدبلوم العام والمستوى المتقدم AS & A Level للمؤلفين دايفيد سانغ، وغراهام جونز، وغوريندر تشادا، وريتشارد وودسيد.

تمت مواءمة هذا الكتاب بناءً على العقد الموقع بين وزارة التربية والتعليم ومطبعة
جامعة كامبريدج.

تمت مواءمة الكتاب

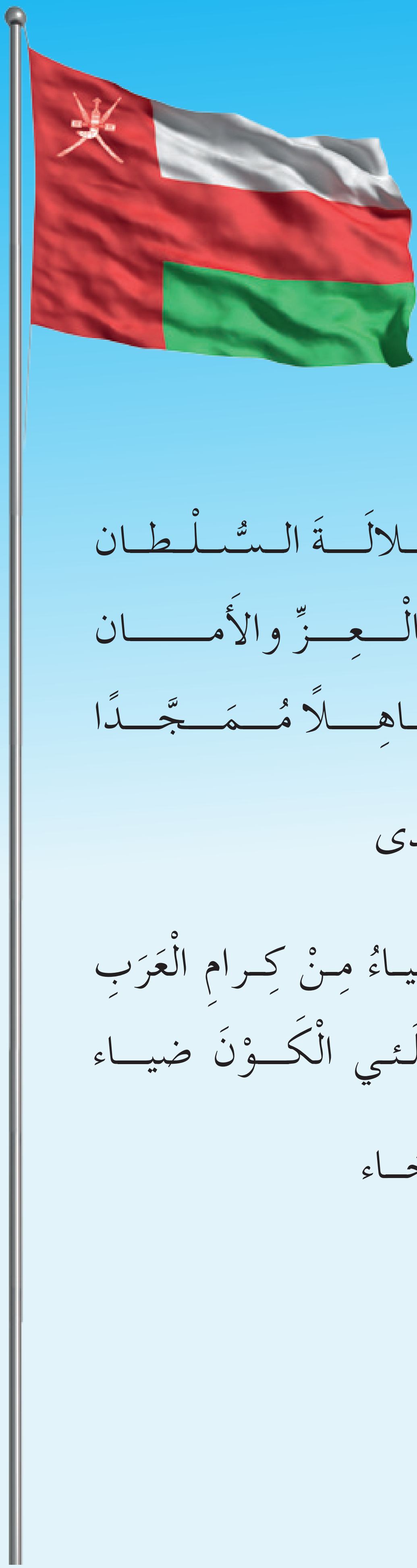
بموجب القرار الوزاري رقم ٢٠٢٢/١٢١ واللجان المنبثقة عنه

المغفور له
السلطان قابوس بن سعيد
-طيّب اللّه ثراه-

حضرة صاحب الجلالة
السلطان هيثم بن طارق المعظم
-حفظه اللّه ورعاه-

سلطنة عُمان

(المحافظات والولايات)



النَّشيدُ الْوَطَنِيُّ

يا رَبَّنا احْفَظْ لنا   جَلالَةَ السُّلْطان
وَالشَّعْبَ في الأَوْطان   بِالْعِزِّ والأَمان
وَلْيَدُمْ مُؤَيَّدًا   عاهِلًا مُمَجَّدًا
بِالنُّفوسِ يُفْتَدى

يا عُمانُ نَحْنُ مِنْ عَهْدِ النَّبي   أَوْفِياءُ مِنْ كِرامِ الْعَرَبِ
فارْتَقي هامَ السَّماء   وَامْلَئي الْكَوْنَ ضياء
وَاسْعَدي وَانْعَمي بِالرَّخاء

تقديم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على خير المرسلين، سيّدنا مُحمَّد، وعلى آله وصحبه أجمعين. وبعد:

فقد حرصت وزارة التربية والتعليم على تطوير المنظومة التعليمية في جوانبها ومجالاتها المختلفة كافة؛ لتُلبّي مُتطلّبات المجتمع الحالية، وتطلُّعاته المستقبلية، ولتتواكب مع المُستجدّات العالمية في اقتصاد المعرفة، والعلوم الحياتية المختلفة؛ بما يؤدّي إلى تمكين المخرجات التعليمية من المشاركة في مجالات التنمية الشاملة للسلطنة.

وقد حظيت المناهج الدراسية، باعتبارها مكوِّنًا أساسيًا من مكوِّنات المنظومة التعليمية، بمراجعة مستمرة وتطوير شامل في نواحيها المختلفة؛ بدءًا من المقرّرات الدراسية، وطرائق التدريس، وأساليب التقويم وغيرها؛ وذلك لتتناسب مع الرؤية المستقبلية للتعليم في السلطنة، ولتتوافق مع فلسفته وأهدافه.

وقد أولت الوزارة مجال تدريس العلوم والرياضيات اهتمامًا كبيرًا يتلاءم مع مستجدات التطور العلمي والتكنولوجي والمعرفي. ومن هذا المنطلق اتَّجهت إلى الاستفادة من الخبرات الدولية؛ اتساقًا مع التطوُّر المتسارع في هذا المجال، من خلال تبنّي مشروع السلاسل العالمية في تدريس هاتَين المادّتَين وفق المعايير الدولية؛ من أجل تنمية مهارات البحث والتقصّي والاستنتاج لدى الطلبة، وتعميق فهمهم للظواهر العلمية المختلفة، وتطوير قدراتهم التنافُسية في المسابقات العلمية والمعرفية، وتحقيق نتائج أفضل في الدراسات الدولية.

إن هذا الكتاب، بما يحويه من معارف ومهارات وقيَم واتجاهات، جاء مُحقِّقًا لأهداف التعليم في السلطنة، وموائمًا للبيئة العمانية، والخصوصية الثقافية للبلد، بما يتضمَّنه من أنشطة وصور ورسوم. وهو أحد مصادر المعرفة الداعمة لتعلُّم الطالب، بالإضافة إلى غيره من المصادر المختلفة.

نتمنّى لأبنائنا الطلبة النجاح، ولزملائنا المعلّمين التوفيق فيما يبذلونه من جهود مُخلِصة، لتحقيق أهداف الرسالة التربوية السامية؛ خدمة لهذا الوطن العزيز، تحت ظل القيادة الحكيمة لمولانا حضرة صاحب الجلالة السلطان هيثم بن طارق المعظّم، حفظه الله ورعاه.

والله ولي التوفيق

د. مديحة بنت أحمد الشيبانية

وزيرة التربية والتعليم

المحتويات

المقدمة

يغطي هذا الكتاب منهج الفيزياء للفصل الدراسي الثاني للصف الحادي عشر بما يلبّي السياسة التعليمية وغاياتها في سلطنة عُمان.

يطرح هذا الكتاب المفاهيم الفيزيائية المختلفة ويشرحها ويعمق فهمك حولها، كما يزوّدك بالأمثلة والأسئلة التي ستساعدك على اختبار فهمك، وعلى تطوير المهارات الأساسية اللازمة للنجاح في هذه المادة. كما توضح صفحات «كيف تستخدم هذا الكتاب» مكوّنات وميزات هذا الكتاب.

خلال دراستك لمادة الفيزياء، ستجد أن بعض المفاهيم الأساسية قد تتكرر؛ وذلك لأن موضوعات الفيزياء مترابطة في المجالات المختلفة، وسوف تمضي قدمًا في دراستها بتعمق أكثر في الصفَّين الحادي عشر والثاني عشر، بذلك ستكتسب المزيد من الثقة في فهم مادة الفيزياء إذا تعمّقت في هذه الموضوعات. ويشمل هذا الكتاب المفاهيم الأساسية الآتية:

- نماذج الأنظمة الفيزيائية كالنموذج الرياضي للجاذبية الأرضية.
- اختبار التنبؤات مقابل الأدلة.
- الرياضيات كلغة وأداة لحل المسائل الفيزيائية.
- المادة والطاقة
- القوى والمجالات

تُعدّ دراسة الفيزياء تجربة مثيرة وممتعة وجديرة بالاهتمام؛ فالفيزياء مادة أساسية للعديد من المجالات والتخصصات العلمية المختلفة كالطب والهندسة وغيرهما، ومتكاملة مع مواد العلوم المختلفة كالجيولوجيا والكيمياء والأحياء. وتُعدّ تدريبًا مفيدًا لاكتشاف كيف أسهَم مختلف العلماء في تطوير معرفتنا ورفاهيتنا، وذلك من خلال أبحاثهم التي أجروها في مفاهيم الفيزياء وتطبيقها. نأمل ألّا يساعدك هذا الكتاب على النجاح في دراساتك ومهنتك المستقبلية فحسب، بل أن يحفّز فضولك وخيالك العلمي أيضًا؛ فقد يصبح طلبة اليوم من العلماء والمهندسين المبدعين غدًا، كما نأمل أن تكون التجارب التي أجراها الفيزيائيون في الماضي درجة من درجات سلّم التطوّر، فنمضي بالفيزياء قُدمًا نحو مستويات أعلى وأرقى.

كيف تستخدم هذه السلسلة

تقدّم هذه المكوّنات (أو المصادر) الدعم للطلبة في الصف الحادي عشر في سلطنة عمان لتعلم مادة الفيزياء واستيعابها، حيث تعمل كتب هذه السلسلة جميعها معًا لمساعدة الطلبة على تطوير المعرفة والمهارات العلمية اللازمة لهذه المادة. كما تقدّم الدعم للمعلمين لإيصال هذه المعارف للطلبة وتمكينهم من مهارات الاستقصاء العلمي.

يقدّم «كتاب الطالب» دعمًا شاملًا لمنهج الفيزياء للصف الحادي عشر في سلطنة عمان، ويقدّم شرحًا للحقائق والمفاهيم والتقنيات العلمية بوضوح، كما يستخدم أمثلة من العالم الواقعي للمبادئ العلمية. والأسئلة التي تتضمنها كل وحدة تساعد على تطوير فهم الطلبة للمحتوى، في حين أن الأسئلة الموجودة في نهاية كل وحدة تحقق لهم مزيدًا من التطبيقات العلمية الأساسية.

يحتوي «كتاب التجارب العملية والأنشطة» على أنشطة وأسئلة نهاية الوحدة، والتي تمّ اختيارها بعناية، بهدف مساعدة الطلبة على تطوير المهارات المختلفة التي يحتاجون إليها أثناء تقدمهم في دراسة كتاب الفيزياء. كما تساعد هذه الأسئلة الطلبة على تطوير فهمهم لمعنى الأفعال الإجرائية المستخدمة في الأسئلة، إضافة إلى دعمهم في الإجابة عن الأسئلة بشكل مناسب.

كما يحقّق هذا الكتاب للطلبة الدعم الكامل الذي سوف يساعدهم على تطوير مهارات الاستقصاء العملية الأساسية جميعها. وتشمل هذا المهارات تخطيط الاستقصاءات، واختيار الجهاز وكيفية التعامل معه، وطرح الفرضيات، وتدوين النتائج وعرضها، وتحليل البيانات وتقييمها.

يدعم دليل المعلم «كتاب الطالب» و «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، ويعزز الأسئلة والمهارات العملية الموجودة فيهما. ويتضمّن هذا الدليل أفكارًا تفصيلية للتدريس وإجابات عن كل سؤال ونشاط وارد في «كتاب الطالب» وفي «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، فضلًا عن الإرشادات التعليمية لكل موضوع، بما في ذلك خطة التدريس المقترحة، وأفكار للتعلم النشط والتقويم التكويني، والمصادر المرتبطة بالموضوع، والأنشطة التمهيدية، والتعليم المتمايز (تفريد التعليم) والمفاهيم الخاطئة وسوء الفهم. كما يتضمن أيضًا دعمًا مفصلًا لإجراء الاستقصاءات العملية وتنفيذها في «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، بما في ذلك فقرات «مهم» لجعل الأمور تسير بشكل جيد، إضافة إلى مجموعة من عينات النتائج التي يمكن استخدامها إذا لم يتمكن الطلبة من إجراء التجربة، أو أخفقوا في جمع النتائج النموذجية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

خلال دراستك هذا الكتاب، ستلاحظ الكثير من الميزات المختلفة التي ستساعدك في التعلم. هذه الميزات موضحة على النحو الآتي:

أهداف التعلّم

تُمثّل هذه الأهداف مضمون كل وحدة دراسية، وتساعد على إرشاد الطلبة خلال دراسة «كتاب الطالب»، كما تشير إلى المفاهيم المهمة المطروحة في كل موضوع، ويتم التركيز عليها عند تقويم الطالب.

قبل أن تبدأ بدراسة الوَحدة

تحتوي هذه الميزة على أسئلة وأنشطة تتمحور حول المعرفة القبلية للموضوعات التي ستحتاج إليها قبل البدء بدراسة الوحدة.

العلوم ضمن سياقها

تُقدّم هذه الميزة أمثلة وتطبيقات واقعية للمحتوى الموجود في كل وحدة دراسية، ما يعني أنها تشجع الطلبة على إجراء المزيد من البحث في الموضوعات المختلفة.

مهارة عملية

لا يحتوي هذا الجزء من الكتاب على تعليمات مفصلة لإجراء تجارب معيّنة، لكنك ستجد، في مربّعات النص هذه، توجيهات أساسية حول النشاط العملي الذي تحتاج إلى تطبيقه.

مصطلحات علمية

يتم تمييز المصطلحات الأساسية في النص عند تقديمها لأول مرة. ثم يتم تقديم تعريفات لها في الهامش تشرح معاني هذه المصطلحات.

سوف تجد أيضًا تعريفات لهذه المصطلحات في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

أفعال إجرائية

لقد تمّ إبراز الأفعال الإجرائية الواردة في المنهج الدراسي بلون غامق في أسئلة نهاية الوحدة، ويمكن استخدامها في الاختبارات، خصوصًا عندما يتم تقديمها للمرة الأولى. وستجد في الهامش تعريفًا لها.

سوف تجد أيضًا التعريفات نفسها في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

ترد التعريفات للمفاهيم العلمية والمبادئ والقوانين والنظريات العلمية المهمة في الهامش، ويتم إبرازها في النص بلون غامق عند تقديمه لأول مرة. وستجد هذه التعريفات أيضًا في قائمة المصطلحات الموجودة في نهاية هذا الكتاب.

المعادلة: يتم تمييز المعادلات الأساسية في النص عند تقديم المعادلة لأول مرة. تعريف للمعادلة ومزيد من المعلومات ترد في الهامش.

مهمّ

يتم في مربّعات النص هذه إدراج حقائق وإرشادات مهمّة للطلبة.

أسئلة

يتخلّل النص أسئلة تمنحك فرصة للتحقق من أنك قد فهمت الموضوع الذي قرأت عنه.

أمثلة

تحتوي على أمثلة محلولة توضّح كيفية استخدام صيغة رياضية معيّنة لإجراء عملية حسابية.

ملخّص

تحتوي مربّعات النص هذه على ملخّص للنقاط الرئيسية في نهاية كل وحدة.

أسئلة نهاية الوحدة

تقيس هذه الأسئلة مدى تحقّق الأهداف التعليمية في الوحدة، وقد يتطلب بعضها استخدام معارف علمية من وحدات سابقة. تتوافر إجابات هذه الأسئلة في دليل المعلم.

قائمة تقييم ذاتي

تلي الملخّص عبارات تتضمّن عناوين منها: «أستطيع أن» التي تتطابق مع أهداف التعلم الموجودة في بداية الوحدة؛ و «أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد»، أو «متمكّن إلى حدٍّ ما» اللتَين تشيران إلى وجوب مراجعة ما تراه ضروريًا في هذا المجال. وقد تجد أنه من المفيد تقييم مدى ثقتك بكل من هذه العبارات أثناء عملية المراجعة.

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا

الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

- العمل بأمان في مختبر الفيزياء جانب أساسي من جوانب التعلّم الذي يتميّز به العمل التجريبي.
- كن دائمًا مستمعًا جيدًا للتعليمات، وملتزمًا التوجيهات وقواعد السلوك بعناية.
- إذا لم تكن متأكّدًا من أي جانب من جوانب عملك التجريبي، فلا تتوانَ في سؤال معلّمك، وإذا كنت تودّ تصميم استقصاءٍ خاصّ بك، فاطلب إلى معلّمك أن يتحقّق من خطّتك قبل تنفيذها.
- العديد من احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء تُعنى بمنع حدوث ضرر يلحق بالطالب أو بالأجهزة والأدوات.

استخدام السوائل في العمل	ضع كل الأدوات في حوض بحيث إذا انسكب شيء منها لا يؤثّر على أوراق العمل. فإذا كنت تستخدم الماء الساخن أو المغلي؛ فاستخدم ماسكًا لحمل الأوعية مثل الكؤوس.
استخدام ميزان الحرارة الزجاجيّ المُعبأ بسائل	ضع ميزان الحرارة بشكل آمن على الطاولة فور الانتهاء من استخدامه، وتأكّد من موقعه بحيث لا يتدحرج، وإذا تعرّض للكسر؛ فأبلغ معلّمك فورًا، ولا تلمس الزجاج المكسور أو السائل المتسرّب منه.
تعليق موادّ على أسلاك رفيعة	ارتد نظّارات واقية تحسّبًا لحدوث انقطاع في السلك، واحذر من سقوط أثقال في حالَ انقطاع السلك؛ وضَع وسادة أو ما شابه على الأرض.
توصيل مكوّنات كهربائية	لا تتجاوز فرق الجهد الكهربائي الموصى به للمكوِّن الكهربائي، على سبيل المثال: فرق الجهد الكهربائي لمصباح ما هو (6 V).
استخدام الحوامل المعرّضة للانقلاب	إذا كان الحامل متحرّكًا أو معرّضًا لخطر الانقلاب، فثبّته على الطاولة بإحكام.
استخدام الأجسام القابلة للتدحرُج كالأسطوانات	ضع شيئًا مناسبًا مثل صندوق لجمع الأجسام القابلة للتدحرُج، بحيث لا تسقط على الأرضية أو تؤثّر على تجربة شخص آخر.
الخلايا الجافة 1.5 V	لا توصل قطبَي الخلية أو البطارية أحدهما بالآخر بسلك كهربائي.

الجدول ١ احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

الوحدة الخامسة

كمّية التحرك Momentum

أهداف التعلّم

٥-١ يعرّف كمّية التحرك الخطية كحاصل ضرب الكتلة في السرعة المتجهة، ويستخدمها.

٥-٢ يذكر مبدأ حفظ كمّية التحرك الخطية.

٥-٣ يطبّق مبدأ حفظ الطاقة.

٥-٤ يطبّق مبدأ حفظ كمّية التحرك الخطية لحل بعض المسائل، بما في ذلك التصادمات المرنة وغير المرنة والانفجارات والتباعدات بين الأجسام في بعدٍ واحد وبعدَين.

٥-٥ يتذكر أنه في حالة حدوث تصادم مرن كليًّا، فإن السرعة النسبية للاقتراب تساوي السرعة النسبية للابتعاد.

٥-٦ يذكر أنه بالرغم من أن كمّية التحرك الخطية لنظام ما محفوظة دائمًا عند التفاعلات بين الأجسام، قد يحدث تغيّر في طاقة الحركة.

٥-٧ يعرّف محصلة القوى المؤثرة في جسم على أنها معدل التغير في كمية التحرك مستخدمًا العلاقة $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$، ويذكر أنها صيغة أخرى لقانون نيوتن الثاني.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- ماذا تفهم من قوانين نيوتن؟ اكتب القوانين الثلاثة بكلماتك الخاصة. حدّد الكميات التي ذُكرت في هذه القوانين.
- إذا قمت بنفخ بالون ثم أفلته من يدك دون ربط نهايته، فلماذا ينطلق البالون محلقًا في الهواء؟

العلوم ضمن سياقها

فهم التصادمات

لتحسين احتياطات الأمان في السيارات، ولتقليل القوى المؤثرة على السائق والركاب، يجب فهم حركة السيارة أثناء التصادم (الصورة ٥-١). وبناء على هذا الفهم طوّرت العديد من السيارات لتصبح أكثر أمانًا، الأمر الذي أدى إلى إنقاذ الكثير من أرواح البشر. تعرّف إلى أكبر عدد ممكن من ميزات الأمان في السيارات وناقشها مع زميل لك. كيف تعمل هذه الميزات على تحسين الأمان في حالة وقوع حادث سير؟

سنستكشف في هذه الوحدة كيف يمكن لفكرة كمّية التحرك أن تسمح بالتنبؤ بكيفية تحرُّك الأجسام بعد تصادمها (أو تفاعلها)، وسنرى كذلك كيف يمكن التعبير عن قوانين نيوتن للحركة باستخدام كمّية التحرك.

الصورة ٥-١ تصوير فوتوغرافي عالي السرعة لاختبار تصادم سيارتَين، حيث جرى اختبار تصادم السيارتَين أماميًا (وجهًا لوجه) بسرعة ($15\ m\ s^{-1}$)، مع تمثيل السائق في كل سيارة بدمية.

٥-١ التصادمات وكمية التحرك

يمكن للاعبي السنوكر أداء بعض الضربات المدهشة للكرة على طاولة اللعب حتى دون أن يعرف هؤلاء اللاعبون قوانين نيوتن للحركة (انظر الصورة ٥-٢).

الصورة ٥-٢ إذا كنت تلعب السنوكر كثيرًا، فستتمكن من التنبّؤ بكيفية تحرك الكرات على الطاولة. ويمكنك بدلًا من ذلك، استخدام قوانين الفيزياء للتنبّؤ بكيفية تحركها.

يمكن أن تساعدنا قوانين الفيزياء على فهم ما يحدث عندما تتصادم كرتا سنوكر وعندما ترتد إحداهما عن الوسادة الجانبية للطاولة.

فيما يلي بعض الأمثلة على حالات تتضمّن تصادمات:

- تصادم سيارتَين أماميًا.
- تصادم سيارة سريعة الحركة بسيارة أبطأ منها تسير أمامها.
- تصادم لاعب كرة قدم بلاعب آخر.
- ضرب عصا الهوكي لكرة الهوكي.
- تصادم مذنّب أو كويكب بكوكب أثناء دورانه حول الشمس.
- تصادم جزيئات الهواء بعضها ببعض باستمرار، وكذلك مع جدران الوعاء الذي يحتويها.
- تصادم الإلكترونات التي تشكل تيارًا كهربائيًا بالذرات المهتزة المكونة للسلك الفلزّي.
- تصادم مجرتَين بعيدتَين منذ ملايين السنيين.

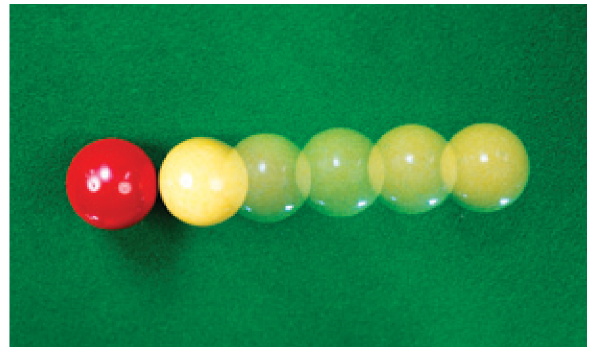
يمكننا من خلال هذه الأمثلة أن نرى أن التصادمات تحدث في كل مكان حولنا فهي تحدث طوال الوقت على المستوى المايكروسكوبي (المجهري) للذرّات والإلكترونات، وتحدث كذلك في عالمنا اليومي، كما تحدث على مستوى الكون أيضًا.

التصادمات الزنبركية

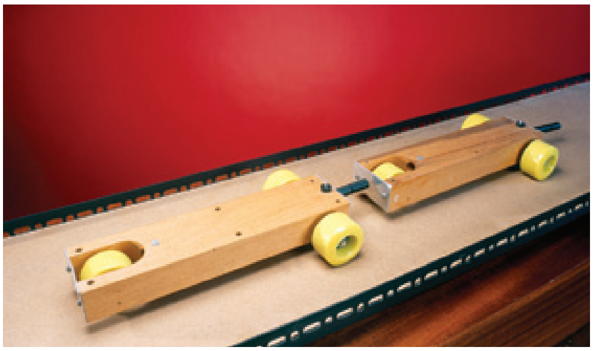
تبيّن الصورة الستروبسكوبية ٥-٣ (أ) ما يحدث عندما تصطدم كرة سنوكر مباشرة بكرة سنوكر أخرى ساكنة. قد تبدو النتيجة مدهشة؛ فالكرة المتحركة تتوقف عن الحركة تمامًا، في حين تتحرك الكرة التي كانت ساكنة بالسرعة نفسها التي كانت تتحرك بها الكرة المتحركة سابقًا، ولتحقيق ذلك يجب على لاعب السنوكر أن يأخذ في الحسبان توفّر شرطَين:

- يجب أن يكون التصادم مباشرًا (تصادم مركزي للكُرتَين). أمّا إذا ضربت إحدى الكرات جانب الكرة الأخرى ضربة خاطفة، فإنهما ستتحركان بزاويتَين مختلفتَين.
- يجب عدم إعطاء الكرة المتحركة أيّ فرصة للدوران حول نفسها أثناء حركتها (فدوران الكرة حول نفسها يمثل حركة أكثر تعقيدًا سنتجاهله في دراستنا الحالية، على الرغم من أنه يؤدّي دورًا حيويًا في ألعاب البلياردو والسنوكر).

يمكنك محاكاة تصادم كُرتَي سنوكر في المختبر باستخدام عربتَين متماثلتَين كما هو مبيّن في الصورة ٥-٣ (ب). تتميز العربة المتحركة ذات الدفع الزنبركي بأن تصادمها يكون زنبركيًا؛ فعندما تتصادم إحدى العربتَين بالأخرى فإن الزنبرك في العربة ينضغط في البداية ثم يتمدد بعد ذلك من جديد لجعل العربة الأخرى تندفع، عندئذٍ تتوقف العربة الأولى تمامًا حيث تنتقل «حركة» العربة الأولى إلى العربة الأخرى.



(أ)



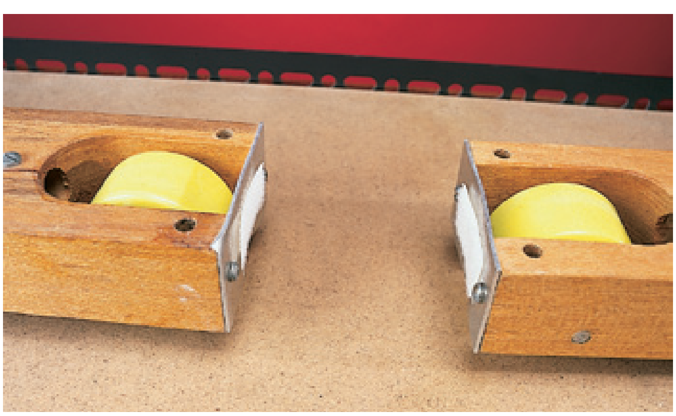
(ب)

الصورة ٥-٣ (أ) تضرب كرة السنوكر الحمراء القادمة من يسار الكرة الصفراء مباشرة . (ب) تصادم زنبَركي بين عربتين.

يمكنك أن ترى نتيجة أخرى مثيرة للاهتمام؛ إذا حدث تصادم بين عربتَين متماثلتَين متحركتَين أماميًا وكان التصادم زنبركيًا فإن كلًا من العربتَين ترتد إلى الخلف؛ أمّا إذا كانت إحدى العربتَين سريعة الحركة واصطدمت بعربة بطيئة الحركة فإن العربة السريعة ترتد بعد التصادم إلى الخلف بسرعة العربة البطيئة قبل التصادم، وترتد العربة البطيئة إلى الخلف بسرعة العربة السريعة قبل التصادم، فيبدو في هذا التصادم كما لو أن سرعتَي العربتَين قد تبادلتا .

التصادمات المتلاصقة

تبيّن الصورة ٥-٤ نوعًا آخر من التصادمات، إذ تحتوي العربتان في هذه الحالة على أشرطة لاصقة بحيث تلتصق العربتان عند تصادم إحداهما بالأخرى. مثل هذا التصادم المتلاصق هو عكس التصادم الزنبركي الذي وُصف في الموضوع السابق.



الصورة ٥-٤ إذا التصقت عربة متحرّكة بعربة ساكنة فإنهما ستتحرّكان معًا.

إذا اصطدمت عربة متحركة بعربة ساكنة مماثلة لها فإنهما ستتحركان معًا كعربة مدمجة وتصبح سرعة العربة المُدمجة (المكوّنة من العربتَين) بعد التصادم نصف السرعة الابتدائية للعربة المتحركة، ويبدو كما لو أن «حركة» العربة المتحركة قد أصبحت مشتركة بين العربتَين، أمّا إذا اصطدمت عربة متحركة بعربة ساكنة لها ضِعف الكتلة فإن العربة المُدمجة منهما ستتحرك بثلث السرعة الأصلية للعربة المتحركة.

من خلال هذه الأمثلة على التصادمات المتلاصقة يمكنك أن ترى ما يحدث للسرعة بعد التصادم، فعندما تزداد كتلة العربة تنخفض سرعتها، فمضاعفة الكتلة يؤدي إلى خفض السرعة إلى النصف بعد التصادم، وهكذا .

سؤال

١ أ. تتحرك كرة A نحو اليمين فتصطدم بكُرة ساكنة B، فترتد الكرة A إلى الخلف في حين تتحرك الكرة B ببطء إلى اليمين. أيّ من الكُرتَين لها كتلة أكبر: الكرة A أم الكرة B؟

ب. تتحرك عربة A نحو اليمين فتصطدم بعربة ساكنة B، فتلتصق العربتان إحداهما بالأخرى وتتحركان معًا بسرعة أقل من نصف السرعة الأصلية للعربة A. أيّ منهما لها كتلة أكبر: العربة A أم العربة B؟

مفهوم كمّية التحرك الخطية

يمكننا أن نرى من الأمثلة التي نوقشت سابقًا أن هناك كمّيتَين مهمّتَين لفهم التصادمات هما:

- الكتلة (m) للجسم.
- السرعة المتجهة ($\vec{v}$) للجسم.

وترتبط هاتان الكميتان معًا لإعطاء كمّيّة واحدة تسمى **كمّية التحرك الخطية (الزخم الخطي)** **Linear momentum** أو ببساطة كمّية التحرك ($\vec{p}$) لجسم ما. تُعرّف كمّية تحرك جسم ما بأنها حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته المتجهة، وبالتالي فإن:

كمّية التحرك = الكتلة × السرعة المتجهة

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

مصطلحات علمية

كمّية التحرك الخطية Linear momentum: هي حاصل ضرب كتلة جسم ما في سرعته المتجهة.

وحدة قياس كمّية التحرك في النظام الدولي للوحدات (SI) هي $kg\ m\ s^{-1}$، ولا يوجد اسم خاص لهذه الوحدة في النظام (SI). كما يمكن استخدام نيوتن ثانية (N s) كوحدة لكمّية التحرك أيضًا (كما سترى لاحقًا في الموضوع ٥-٦).

كمّية التحرك كميّة متجهة؛ لأنها عبارة عن حاصل ضرب كمّية متجهة (السرعة المتجهة) وكمّية عددية (الكتلة)، وبالتالي يكون لكمّية التحرك مقدار واتجاه، واتجاهها هو نفس اتجاه السرعة المتجهة للجسم.

وصفنا في الأمثلة السابقة كيف أن «الحركة» لعربة واحدة تبدو كأنها تنتقل إلى العربة الأخرى، أو تشاركها فيها، والأصح أن نقول أن كمّية التحرك للعربة هي التي انتقلت أو تمّت مشاركتها (وبتعبير أدق يجب أن نشير هنا إلى كمّية التحرك على أنها كمّية تحرك خطية؛ لأن هناك كمّيّة أخرى تسمى كمّية التحرك الزاوية (الزخم الزاوي) التي تمتلكها الأجسام الدوّارة).

مصطلحات علمية

النظام المغلق Closed system: نظام تتفاعل فيه الأجسام بحيث لا توجد قوة محصّلة خارجية تؤثر عليها.

كما هي الحال مع الطاقة؛ نجد أن كمّية التحرك محفوظة أيضًا، وعلينا أن نفكّر في الأجسام التي تشكل **نظامًا مغلقًا** **Closed system** وهذا يعني أنه لا توجد قوة محصّلة خارجية تؤثر عليها. ينص **مبدأ حفظ كمّية التحرك** **Principle of Conservation of momentum** على أن كمّية التحرك الكلّية في أي اتجاه داخل نظام مغلق تكون ثابتة.

يمكن أن يُعبّر عن مبدأ حفظ كمية التحرك أيضًا على النحو الآتي:

في أيّ نظام مغلق لا تؤثر عليه قوة محصلة خارجية في أي اتجاه، نجد أن:

كمّية التحرك الكلّية للأجسام قبل التصادم ($\vec{p_1}$) = كمّية التحرك الكلّية للأجسام بعد التصادم ($\vec{p_2}$).

يكون لمجموعة من الأجسام المتصادمة دائمًا المقدار نفسه من كمّية التحرك قبل التصادم وبعده. وسيتّضح هذا المبدأ في المثال ١.

مهم

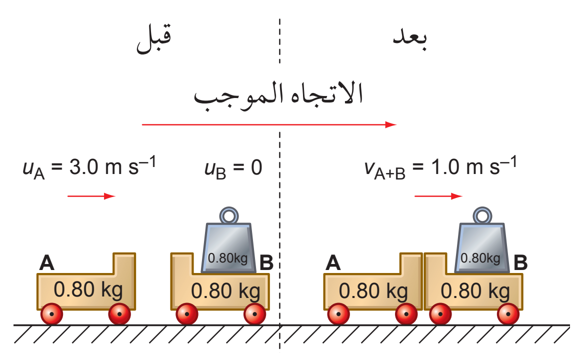
مبدأ حفظ كمية التحرك

Principle of conservation of momentum:

في النظام المغلق تكون كمّية التحرك الكلّية للأجسام ثابتة، أي أن كمّية التحرك قبل التصادم تساوي كمّية التحرك بعد التصادم.

مثال

١. العربة A في الشكل ٥-١ كتلتها (0.80 kg) وتتحرك بسرعة متجهة مقدارها ($3.0\ m\ s^{-1}$)، تتصادم أماميًا مع عربة ساكنة B. كتلة العربة B تساوي ضعف كتلة العربة A. تلتصق العربتان معًا بعد التصادم ويكون لهما سرعة متجهة مشتركة ($1.0\ m\ s^{-1}$). بيّن أن كمّية التحرك محفوظة في هذا التصادم.



الشكل ٥-١ العربتان A و B قبل التصادم وبعده.

الخطوة ١: ارسم مخططًا باستخدام المعلومات الواردة في السؤال. لاحظ أننا بحاجة إلى مخطط لتوضيح الحالتَين قبل التصادم وبعده. وبالمثل، نحتاج إلى عمليتَين حسابيتَين الأولى لكمّية التحرك الكلية للعربتَين قبل التصادم والأخرى لكمّية التحرك الكلّية للعربتَين بعد التصادم.

الخطوة ٢: احسب كمّية التحرك الكلّية للعربتَين قبل التصادم.

لا توجد كمّية تحرُّك للعربة B قبل التصادم، لأنها لم تكن تتحرك (ساكنة).

كمّية التحرك الكلّية للعربتَين قبل التصادم:

$$\vec{p_1} = m_A \times \vec{u_A} + m_B \times \vec{u_B}$$

$$\vec{p_1} = (0.80 \times 3.0) + 0$$

$\vec{p_1} = 2.4\ kg\ m\ s^{-1}$ وباتجاه اليمين

الخطوة ٣: احسب كمّية التحرك الكلّية للعربتَين بعد التصادم.

كمّية التحرك الكلّية للعربتَين بعد التصادم:

$$\vec{p_2} = (m_A + m_B) \times \vec{v_{A+B}}$$

$$\vec{p_2} = (0.80 + 1.60) \times 1.0$$

$\vec{p_2} = 2.4\ kg\ m\ s^{-1}$ وباتجاه اليمين

إذًا كمّية التحرك الكلّية للعربتَين قبل التصادم وبعده تساوي ($2.4\ kg\ m\ s^{-1}$) وفي الاتجاه نفسه أي أن كمّية التحرك الكلّية محفوظة.

أسئلة

٢ احسب كمّية التحرك لكل من الأجسام الآتية:

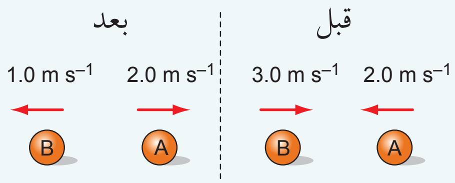
أ. حجر كتلته (0.50 kg) يتحرك بسرعة ($20\ m\ s^{-1}$).

ب. حافلة كتلتها (25000 kg) تتحرك بسرعة ($20\ m\ s^{-1}$).

ج. إلكترون يتحرك بسرعة ($2.0 \times 10^{7}\ m\ s^{-1}$).

(كتلة الإلكترون تساوي 9.11×10^{-31} kg).

٣ تتصادم كُرتان كتلة كل منهما (0.50 kg) كما هو مبيّن في الشكل ٥-٢. بيّن أن كمّية التحرك الكلّية لهما قبل التصادم تساوي كمّية التحرك الكلّية لهما بعد التصادم.



الشكل ٥-٢

٥-٢ حفظ الطاقة

لا يمكن استحداث الطاقة أو إفناؤها، ولكن يمكن تحويلها من شكل إلى آخر.

من المفترض أن نكون قادرين دائمًا على جمع كميات الطاقة الكلّية في البداية، ومعرفة أشكال تحوّلها، وعلى حسابها جميعًا في النهاية. لا يمكننا التأكد من أن هذه هي الحال دائمًا، ولكننا دائمًا نتوقع تحقق مبدأ حفظ الطاقة.

مهمّ

مبدأ حفظ الطاقة

Principle of conservation of energy: الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم، ولكن يمكن تحويلها من شكل إلى آخر.

يجب علينا أن نفكّر في تغيّرات الطاقة في نظام مغلق ما؛ وهذا يعني أننا يجب أن نرسم حدودًا خيالية حول جميع الأجسام المتفاعلة والمتضمنة في نقل الطاقة.

يبدو تطبيق مبدأ حفظ الطاقة في بعض الأحيان لغزًا علميًا، فعندما كان علماء الفيزياء يستقصون الاضمحلال الإشعاعي المتضمن جُسيمات بيتا وجدوا أن الطاقة الكلّية للجسيمات بعد الاضمحلال أقل من الطاقة الكلية للجسيمات قبل الاضمحلال، وعندها توقّعوا أن هناك جُسيمًا آخر غير مرئي يحمل الطاقة المفقودة، وقد اقترح عالِم الفيزياء النظرية ولفجانج باولي (Wolfgang Pauli) عام 1931م تسمية هذا الجسيم نيوترينو، الذي لم يكتشفه العلماء إلّا بعد مرور 25 عامًا.

على الرغم من أننا لا نستطيع إثبات أن الطاقة دائمًا محفوظة، إلّا أن هذا المثال يبيّن أن مبدأ حفظ الطاقة يمكن أن يكون أداة قوية في المساعدة على فهم ما يجري في الطبيعة، كما يمكن أن يساعدنا في وضع تنبّؤات واعدة حول مستقبل التجارب.

سؤال

٤ يسقط حجر من قمة جرف صخري ارتفاعه (80 m) وعندما يصل إلى قاع الجرف تصبح سرعته ($38\ m\ s^{-1}$).

أ. احسب نسبة طاقة وضع الجاذبية الابتدائية للحجر التي تحولت إلى طاقة حركية.

ب. ماذا حدث لبقية الطاقة الابتدائية للحجر؟

٥-٣ فهم التصادمات

تعرضت السيارتان في الصورة ٥-٥ لأضرار بالغة بسبب تصادمهما أماميًا، فالجزء الأمامي من السيارة مصمّم لامتصاص تأثير التصادم؛ إذ لدى السيارة منطقة امتصاص للصدمات «منطقة الانبعاج» والتي تتهشم عند التصادم، وهذه المنطقة تمتص معظم طاقة الحركة التي كانت للسيارة قبل التصادم، إذ من الأفضل أن تنتقل طاقة حركة السيارة إلى المنطقة الماصة للصدمات «منطقة الانبعاج» بدلًا من انتقالها إلى السائق والركاب.

الصورة ٥-٥ تهشم مقدمة كل من السيارتَين المتصادمتَين نتيجة التصادم أماميًا.

يستفيد صانعو السيارات من مختبرات التجريب لاستقصاء كيفية استجابة سياراتهم لتأثيرات التصادم؛ فعندما تُصمّم السيارات تحرص الشركات المصنعة على الجمع بين المواد اللينة القابلة للانضغاط والتي تمتص الطاقة، والهياكل الصلبة التي تحمي الركّاب في السيارة، أما في الماضي فقد كانت هياكل السيارات القديمة أكثر صلابة بحيث كانت في حال حدوث تصادم ترتد هياكلها الصلبة إلى الخلف بقوى عنيفة قد تؤدي إلى الوفاة.

نوعا التصادم

عندما يتصادم جسمان قد يتهشّمان وقد تختفي كذلك طاقتهما الحركية تمامًا أي أنهما يتوقّفان عن الحركة؛ يُعدّ هذا التصادم مثالًا على **التصادم غير المرن Inelastic collision**. عمليًا وفي معظم التصادمات يتحوّل جزء من طاقة الحركة إلى أشكال أخرى من الطاقة (مثل الحرارة أو الصوت) ويكون هذا التصادم أيضًا غير مرن، أما إذا ارتدّ الجسمان إلى الخلف محتفظَين بكل الطاقة الحركية فإن هذا التصادم يسمى **التصادم المرن كلّيًا Perfectly elastic collision**. وصفنا سابقًا التصادمات بأنها «زنبركية» أو «متلاصقة»؛ أمّا الآن فعلينا استخدام المصطلحات العلمية الصحيحة وهي تصادمات مرنة كلّيًا وتصادمات غير مرنة.

سننظر في أمثلة لهذَين النوعَين من التصادمات، ونرى ما يحدث لكمّية التحرك ولطاقة الحركة في كلّ منهما.

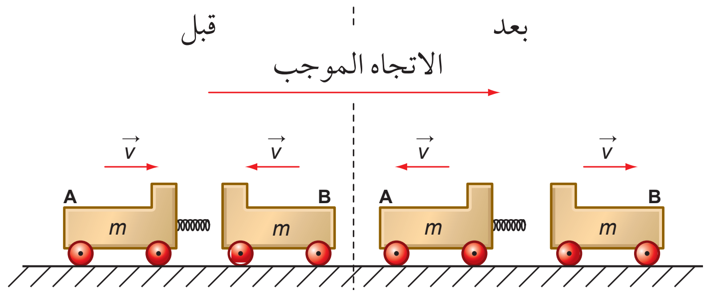
مصطلحات علمية

التصادم غير المرن Inelastic collision: في حالة التصادم غير المرن لا تكون طاقة الحركة محفوظة؛ حيث يتحول بعضها إلى أشكال أخرى من الطاقة مثل الحرارة.

التصادم المرن كليًا Perfectly elastic collision: تبقى طاقة الحركة الكلّية لجميع الأجسام في حالة التصادم المرن كليًا محفوظة.

التصادم المرن كلّيًا

يتحرك جسمان متماثلان A و B بالسرعة نفسها ولكن باتجاهَين متعاكسَين، ويحدث لهما تصادم مباشر، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٣. ويرتد كل من الجسمَين إلى الخلف بسرعته الأصلية نفسها وفي الاتجاه المعاكس. هذا النوع هو تصادم مرن كلّيًا.



الشكل ٥-٣ تصادم مرن كلّيًا بين عربتَين.

يجب أن تدرك أنه في التصادم المرن كلّيًا يجب أن تكون كلّ من كمّية التحرك وطاقة الحركة محفوظتَين؛ حيث يتحرك الجسم A الذي كتلته (m) قبل التصادم إلى اليمين بسرعة (v) وكذلك يتحرك الجسم B الذي كتلته (m) إلى اليسار بسرعة (v)، وبعد التصادم تتحرك كل من الكتلتَين (m) بسرعة (v)، ولكن يتحرك الجسم A إلى اليسار ويتحرك الجسم B إلى اليمين. يوضح الجدول ٥-١ كيف يمكن التعبير عن ذلك رياضيًا.

قبل التصادم

الجسم	الكتلة	السرعة	كمّية التحرك
A	m	v	mv
B	m	$-v$	$-mv$

الجدول ٥-١ الكتلة والسرعة وكمية التحرك للجسمَين **A** و **B** قبل التصادم.

لاحظ أن السرعة المتجهة وكمّية التحرك للجسم B سالبتان؛ لأنه يتحرك بالاتجاه المعاكس للجسم A، لذلك تكون:

كمية التحرك الكلّية قبل التصادم = كمية التحرك للجسم A + كمية التحرك للجسم B

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_A + \vec{p}_B$$

$$\vec{p}_1 = mv + (-mv) = 0$$

مجموع طاقة الحركة قبل التصادم:

طاقة الحركة الكلّية قبل التصادم = طاقة الحركة للجسم A + طاقة الحركة للجسم B

$$K.E_1 = (K.E)_A + (K.E)_B$$

$$K.E_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mv^2$$

مما سبق يتضح أن مقدار كمّية التحرك متساوٍ لكِلا الجسمَين، ونظرًا لأن كمية التحرك كميّة متجهة، يجب علينا

أن نأخذ في الحسبان الاتجاهات التي تتحرك بها الأجسام، لذلك فإن كمّية التحرك الكلية للجسمَين تساوي صفرًا، أمّا طاقة الحركة من ناحية أخرى فهي كمّية عددية، لا علاقة لها باتجاه الحركة، وبما أن لِكلا الجسمَين المقدار نفسه من طاقة الحركة، فإن طاقة الحركة الكلية تساوي ضعف طاقة الحركة لجسم واحد.

بعد التصادم

يكون لِكلا الجسمَين A و B بعد التصادم سرعة بعكس سرعتهما الابتدائية كما يوضح الجدول ٥-٢.

الجسم	الكتلة	السرعة	كمّية التحرك
A	m	$-v$	$-mv$
B	m	v	mv

الجدول ٥-٢ الكتلة والسرعة وكمية التحرك للجسمَين A و B بعد التصادم.

لذلك تكون:

كمية التحرك الكلّية بعد التصادم = كمّية التحرك للجسم A + كمّية التحرك للجسم B

$$\vec{p_2} = \vec{p_A} + \vec{p_B}$$

$$\vec{p_2} = mv + (-mv) = 0$$

مجموع طاقة الحركة بعد التصادم:

طاقة الحركة الكلية بعد التصادم = طاقة الحركة للجسم A + طاقة الحركة للجسم B

$$K.E_2 = (K.E)_A + (K.E)_B$$

$$K.E_2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mv^2$$

يتضح مما سبق أن كلًا من كمّية التحرك الكلّية وطاقة الحركة الكلّية لم يتغيّرا قبل التصادم وبعده؛ فكلتاهما محفوظة لأن التصادم مرن كلّيًا، ويمكن أن نميّز التصادم المرن كلّيًا من خلال السرعة النسبية وهي سرعة أحد الجسمَين بالنسبة إلى سرعة الجسم الآخر. تكون السرعة النسبية للجسمَين في هذا التصادم ($2v$) قبل التصادم، وبالمقابل تنعكس سرعة كل منهما بعد التصادم بحيث تكون السرعة النسبية لهما بعد التصادم ($2v$) مرة أخرى، وهذا ما يميز التصادمات المرنة كلّيًا.

لنفهم الآن كيف نجِد السرعة النسبية؛ فإذا كان الجسمان يتحركان مباشرة أحدهما باتجاه الآخر بسرعة (v) عندما تقاس بواسطة شخص ثابت على الأرض -عندئذٍ فإن كل جسم «يرى» الآخر يقترب منه بسرعة ($2v$) وهذه هي السرعة النسبية للاقتراب.

لإيجاد السرعة النسبية لجسمَين متحركَين فإنه علينا طرح سرعة أحدهما من سرعة الآخر، وهذا يماثل إضافة مقدارَي سرعتَيهما عندما تكون السرعتان في اتجاهَين متعاكسَين؛ لذلك فإنه إذا اقترب جسمان أحدهما من الآخر في اتجاهَين متعاكسَين تمامًا بسرعتَين (v_1) و ($-v_2$)، فإن سرعتهما النسبية:

$$v_1 - (-v_2) = v_1 + v_2$$

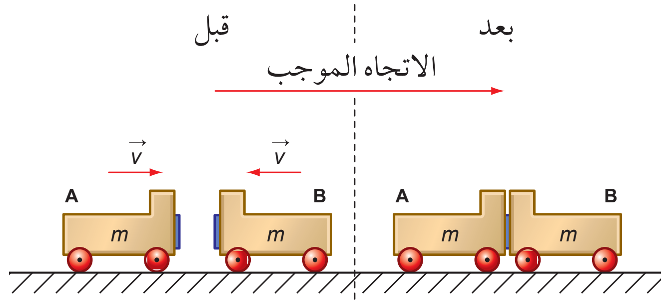
مهمّ

تكون السرعة النسبية للتقارب في التصادم المرن كلّيًا لجسمَين مساوية للسرعة النسبية لتباعدهما.

وبالتالي فإذا كان الجسمان يتحركان باتجاهَين متعاكسَين فإننا نضيف مقدارَي سرعتَيهما لإيجاد السرعة النسبية، أمّا إذا كان الجسمان يتحركان بالاتجاه نفسه فإننا نطرح مقدارَي سرعتَيهما لإيجاد السرعة النسبية.

التصادم غير المرن

في الشكل ٥-٤ يتصادم الجسمان المذكوران سابقًا في الشكل ٥-٣، لكن هذه المرة يلتصق أحدهما بالآخر بعد التصادم فيتوقفان.



الشكل ٥-٤ تصادم غير مرن بين عربتَين؛ حيث تتوقف العربتان بعد التصادم.

مهمّ

تكون طاقة الحركة الكلّية للأجسام في أثناء التصادم غير المرن أقل ممّا كانت عليه قبل التصادم.

من الواضح أن كمّية التحرك الكلّية وطاقة الحركة الكلّية بعد التصادم يكون كل منهما صفرًا، حيث لا يتحرك أي من الجسمَين. يوضح الجدول ٥-٣ كلًا من كمّية التحرك وطاقة الحركة قبل التصادم وبعده.

	قبل التصادم	بعد التصادم
كمّية التحرك	0	0
طاقة الحركة	mv^2	0

الجدول ٥-٣ كمّية التحرك وطاقة الحركة قبل التصادم وبعده.

يمكننا أن نلاحظ هنا أيضًا أن كمّية التحرك محفوظة، في حين لا تكون طاقة الحركة محفوظة، وفي كثير من الأحيان تفقد الطاقة بسبب انتقالها إلى المنطقة المحيطة وتحوّلها إلى صوت مثلًا أو بسبب الشغل المبذول في تشويه الجسمَين.

في الحقيقة تكون **كمّية التحرك محفوظة دائمًا في جميع التصادمات**؛ فلا يوجد شيء آخر يمكن تحويل كمّية التحرك إليه. وعادة ما تكون طاقة الحركة غير محفوظة في التصادمات؛ لأنه يمكن تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة، كالطاقة الصوتية مثلًا، فقد يؤدي التصادم إلى صوت صاخب، أو كالطاقة التي تشوّه الأجسام (والتي عادةً ما تنتهي كطاقة داخلية في الأجسام فتصبح الأجسام أكثر دفئًا). وبالطبع فإن الطاقة الكلّية تبقى ثابتة، كما هو مذكور في مبدأ حفظ الطاقة.

سؤال

٥ انسخ الجدول، واختر الكلمات الصحيحة من كل زوج من الكلمات فيه.

نوع التصادم	التصادم المرن	التصادم غير المرن
كمّية التحرك	محفوظة/غير محفوظة	محفوظة/غير محفوظة
طاقة الحركة	محفوظة/غير محفوظة	محفوظة/غير محفوظة
الطاقة الكلّية	محفوظة/غير محفوظة	محفوظة/غير محفوظة

حل أسئلة التصادم

يمكننا استخدام مبدأ حفظ كمّية التحرك لحل المسائل، كما هو مبيّن في المثال ٢.

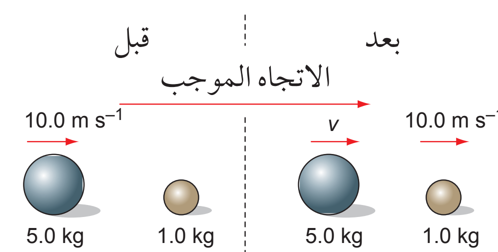
مثال

٢. دحرج لاعب كرة كبيرة باتجاه كرة أصغر ساكنة. كتلة الكرة الكبيرة (5.0 kg) وتتحرك بسرعة ($10.0\ m\ s^{-1}$) وتصدم الكرة الساكنة التي كتلتها (1.0 kg) فتتحرك الكرة الأصغر بسرعة ($10.0\ m\ s^{-1}$).

أ. جِد السرعة المتجهة النهائية للكرة الكبيرة بعد التصادم.

ب. احسب طاقة الحركة «المفقودة» في التصادم.

الخطوة ١: ارسم مخططًا يوضح الحالة قبل التصادم وبعده. يبيّن الشكل ٥-٥ مقدار كلٍّ من الكتلة والسرعة المتجهة لكل من الكرتَين؛ ونظرًا لأننا لا نعرف سرعة الكرة الكبيرة بعد التصادم، فإنها تظهر في المخطط على أنها (v). اعتبر الاتجاه من اليسار إلى اليمين هو الاتجاه «الموجب».



الشكل ٥-٥ مخطط يوضح حالة الأجسام قبل التصادم وبعده وقيم الكمّيات الخاصة بها.

الخطوة ٢: باستخدام مبدأ حفظ كمّية التحرك، اكتب المعادلة وجِد قيمة (v):

كمّية التحرك الكلّية قبل التصادم = كمّية التحرك الكلّية بعد التصادم

$$\vec{p_1} = \vec{p_2}$$

$$(5.0 \times 10.0) + (1.0 \times 0) = (5.0 \times v) + (1.0 \times 10.0)$$

$$50 + 0 = 5.0\,v + 10.0$$

$$v = \frac{40}{5.0}$$

$$v = 8.0\ m\ s^{-1}$$

نلاحظ أن سرعة الكرة الكبيرة تنخفض إلى ($8.0\ m\ s^{-1}$) بعد التصادم. في حين يبقى اتجاه حركتها كما هو لم يتغير؛ أيّ أن السرعة تبقى بالاتجاه الموجب (قيمة السرعة موجبة).

الخطوة ٣: بمعرفة السرعة المتجهة النهائية للكرة الكبيرة، يمكن حساب التغيّر في طاقة الحركة في أثناء التصادم:

مجموع طاقة الحركة قبل التصادم:

$$K.E = \frac{1}{2} \times 5.0 \times (10.0)^2 + 0$$

$$= 250\ J$$

مجموع طاقة الحركة بعد التصادم:

$$K.E = \frac{1}{2} \times 5.0 \times (8.0)^2 + \frac{1}{2} \times 1.0 \times (10.0)^2$$

$$= 210\ J$$

طاقة الحركة المفقودة خلال التصادم:

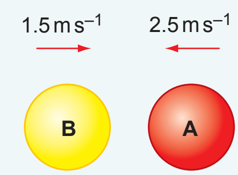
$$K.E = 250\ J - 210\ J$$

$$= 40\ J$$

ستظهر طاقة الحركة «المفقودة» كطاقة داخلية (فتصبح الكُرتان أكثر دفئًا)، وكذلك كطاقة صوتية (نسمع صوت التصادم بين الكرتَين).

أسئلة

٦ يبيّن الشكل ٥-٦ كرتَين متماثلتَين A و B على وشك التصادم مباشرة وجهًا بوجه، وكتلة كل كرة من الكرتَين (4.0 kg). بعد التصادم ترتد الكرة A بسرعة ($1.5\ m\ s^{-1}$) وترتد الكرة B بسرعة ($2.5\ m\ s^{-1}$).



الشكل ٥-٦ قبل التصادم.

أ. احسب كمّية التحرك لكل كرة قبل التصادم.

ب. احسب كمّية التحرك لكل كرة بعد التصادم.

ج. هل كمّية التحرك الكلية محفوظة في التصادم؟

د. بيّن أن طاقة الحركة الكلية للكرتَين محفوظة في التصادم.

هـ. بيّن أن السرعة النسبية للكرتَين هي نفسها قبل التصادم وبعده.

٧ تتحرك عربة كتلتها (1.0 kg) بسرعة ($2.0\ m\ s^{-1}$) فتتصادم مع عربة أخرى ساكنة كتلتها (2.0 kg) فتتحرك العربة الساكنة بعد التصادم بسرعة ($1.2\ m\ s^{-1}$).

أ. ارسم مخططًا يوضح حالتَي العربتَين «قبل» و «بعد» التصادم.

ب. استخدم مبدأ حفظ كمّية التحرك لحساب سرعة العربة الأولى بعد التصادم واذكر الاتجاه الذي تتحرك فيه.

٥-٤ الانفجارات والارتطام بالأرض

هناك حالات قد يبدو فيها أن كمّية التحرك تُستحدث من العدم، أو أنها تفنى من دون أن تترك أثرًا. هل هذه الحالات تتعارض مع مبدأ حفظ كمّية التحرك؟

صواريخ الألعاب النارية المبيّنة في الصورة ٥-٦ ترتفع عاليًا في السماء، وعندما تبدأ بالسقوط فإنها تبعث زخات من عبوات المواد الكيميائية، حيث تنفجر كل من هذه العبوات لإنتاج كرات لامعة من المواد الكيميائية المحترقة. تطير هذه المواد في جميع الاتجاهات لتكوين عرض مدهش.

الصورة ٥-٦ تنتج صواريخ الألعاب النارية المنفجرة عرضًا مدهشًا للشرر الساطع في السماء ليلًا.

هل الانفجار يستحدث كمّية تحرك من العدم (من لا شيء)؟ النقطة المهمة التي يجب ملاحظتها هنا هي أن المادة المحترقة تنتشر بالتساوي في جميع الاتجاهات، وكل شرارة صغيرة منها لها كمّية تحرك، ولكن لكل شرارة هناك شرارة أخرى تتحرك في الاتجاه المعاكس أي بكمّية تحرك معاكسة، وبما أن كمّية التحرك كميّة متجهة فإن كمّية التحرك الكلية الناشئة تساوي صفرًا وهذا يعني أن كمّية التحرك محفوظة.

في الوقت نفسه تنشأ طاقة حركة في الانفجار؛ فالمواد المحترقة تطير مبتعدةً عن مركز الانفجار، فتكتسب طاقتها الحركية من طاقة الوضع الكيميائية المخزّنة في المواد الكيميائية قبل أن تحترق.

الشموع الرومانية (الصورة ٥-٧) هي نوع من الألعاب النارية التي تُطلق مواد محترقة نفاثة في السماء، وهي عبارة عن نوع آخر من الانفجارات لكنه لا يبعث موادّ في جميع الاتجاهات، حيث يوجه أنبوب الألعاب النارية المادة نحو الأعلى. هل استُحدثت كمّية تحرُّك هنا من العدم (من لا شيء)؟

مرة أخرى الجواب لا. المواد الكيميائية في الشمعة الرومانية لديها كمّية تحرُّك اتجاهها إلى أعلى، ولكن في الوقت نفسه تدفع الشمعة الرومانية إلى الأسفل على الأرض، وبالتالي فإنها تُعطي كمّية تحرُّك متساوية إلى الأرض. والأرض ذات كتلة كبيرة بالطبع، فلا نلاحظ التغيّر الطفيف في سرعة الأرض المتجهة التي تنتج من انطلاق الشمعة الرومانية.

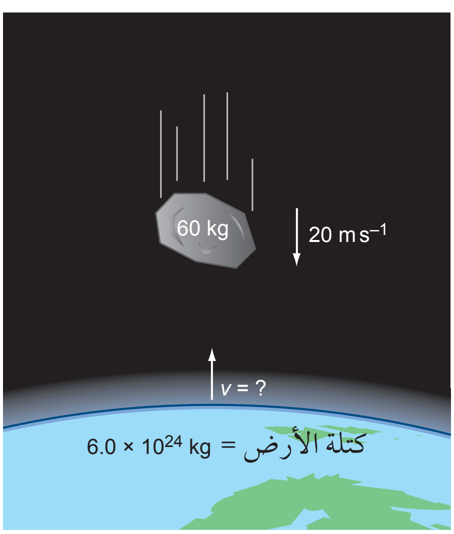
الصورة ٥-٧ شمعة رومانية تُطلق شرارات (مواد محترقة نفاثة) في السماء.

السقوط نحو الأرض

إذا دفعت صخرة كبيرة من فوق منحدر صخري، فإن سرعتها تزداد كلما هبطت إلى أسفل. من أين تأتي كمّية تحركها؟ وعندما تصل إلى سطح الأرض، أين تختفي كمّية تحركها؟

تسقط الصخرة بفعل قوة جاذبية الأرض المؤثرة عليها؛ وهذه القوة -وزنها- هي التي تجعل الصخرة تتسارع نحو الأرض، فوزنها يبذل شغلًا يُكسب الصخرة طاقة حركة، وكذلك تكتسب الصخرة كمّية تحرُّك إلى أسفل، ولكنّ شيئًا ما يجب أن يكسب قدرًا مساويًا من كمّية التحرك ولكن في الاتجاه المعاكس (إلى الأعلى): إنها الأرض التي تبدأ بالتحرك إلى الأعلى في أثناء سقوط الصخرة إلى الأسفل. إلّا أن كتلة الأرض كبيرة لدرجة أن التغيّر في سرعتها المتجهة يكاد لا يكون ملحوظًا.

عندما تصطدم الصخرة بالأرض، تصبح كمّية تحركها صفرًا، فتتوقف الأرض في اللحظة نفسها عن التحرك إلى أعلى أيضًا، فتلغي كمّية تحرُّك الصخرة كمّية تحرُّك الأرض. وطوال فترة سقوط الصخرة حتى ارتطامها بالأرض، تبقى كمّية التحرك محفوظةً.



الشكل ٥-٧ تكتسب كلّ من الصخرة والأرض كمّية تحرُّك في اتجاهَين متعاكسَين.

إذا سقطت صخرة كتلتها (60 kg) باتجاه الأرض بسرعة ($20\ m\ s^{-1}$) فما مدى سرعة تحرك الأرض نحو الصخرة؟ يبيّن الشكل ٥-٧ هذه الحالة، حيث تبلغ كتلة الأرض (6.0×10^{24} kg) لذلك تكون:

كمّية التحرك للأرض والصخرة معًا = 0

بالتالي:

$$(60 \times 20) + (6.0 \times 10^{24} \times v) = 0$$

$$v = -2.0 \times 10^{-22}\ m\ s^{-1}$$

توضّح الإشارة السالبة (-) أن سرعة الأرض تكون بالاتجاه المعاكس لسرعة الصخرة؛ فالأرض تتحرك بسرعة صغيرة جدًا تقطع خلالها مسافة قصيرة جدًا أقل بكثير من قطر نواة ذرّة، في الوقت الذي تسقط فيه الصخرة.

أسئلة

٨ ناقش ما إذا كانت كمّية التحرك محفوظةً في كل من الحالات الآتية:

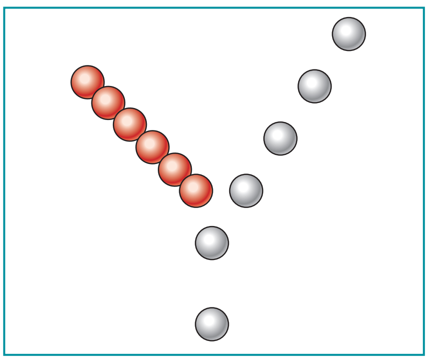
أ. نجم ينفجر في كل الاتجاهات (نجم مستعر أعظم supernova star).

ب. تقفز من فوق أرضية الترامبولين. فتنخفض سرعتك في أثناء صعودك، وتزيد سرعتك عندما تهبط مرة أخرى.

٩ قُذفت كرة كتلتها (0.40 kg) نحو جدار. فصدمت الجدار بسرعة ($1.5\,m\,s^{-1}$) عموديًا، ثم ارتدت عنه بسرعة ($1.2\,m\,s^{-1}$). وضّح التغيّرات في كمّية التحرك وطاقة الحركة التي حدثت في التصادم بين الكرة والجدار. أعطِ القيم الرقمية حيثما أمكن ذلك.

٥-٥ التصادم في بُعدَين

من النادر أن تحدث التصادمات في خط مستقيم (في بُعد واحد). يبيّن الشكل ٥-٨ تصادمًا في بُعدَين بين كرتَين من كرات السنوكر. يمكننا أن نلاحظ من الصور المتعددة كيف تتغيّر السرعتان المتجهتان للكرتَين:



الشكل ٥-٨ تضرب الكرة البيضاء الكرة الحمراء ضربة جانبية. فتتحرك الكرتان في اتجاهَين مختلفَين.

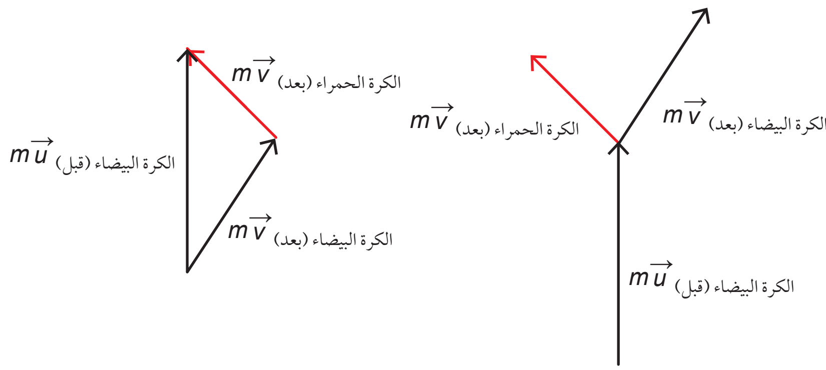
- تتحرك الكرة البيضاء في البداية بشكل مستقيم إلى الأمام، وعندما تصطدم بالكرة الحمراء (الساكنة) فإنها تتحرك إلى اليمين وتنخفض سرعتها. يمكننا أن نستنتج هذا لأن صور الكرة تصبح أكثر تقاربًا بعضها من بعض مما كانت عليه قبل التصادم.
- تتحرك الكرة الحمراء إلى اليسار وبزاوية أكبر من زاوية انحراف الكرة البيضاء، ولكن ببطء أكبر. يمكننا أن نلاحظ هذا لأن مراحل صورة الكرة تظهر بشكل متقارب أكثر من الكرة البيضاء.

كيف نفهم ما يحدث في تصادم كهذا باستخدام كمّية التحرك وطاقة الحركة؟

في البداية تمتلك الكرة البيضاء فقط كمّية تحرُّك وفي اتجاه الأمام، ثم تتقاسم الكرتان في أثناء التصادم كمّية التحرك هذه. ويمكننا ملاحظة ذلك؛ لأن لكل منهما مركّبة سرعة متجهة في الاتجاه الأمامي (الاتجاه الرأسي).

في الوقت نفسه، تكتسب كل كرة كمّية تحرُّك في الاتجاه الجانبي؛ لأن لكل منها مركّبة سرعة متجهة جانبية (في الاتجاه الأفقي)، تكون مركّبة السرعة المتجهة للكرة البيضاء إلى اليمين، في حين تكون مركّبة السرعة المتجهة للكرة الحمراء إلى اليسار. ويجب أن تكون هاتان المركّبتان متساويتَين في المقدار ومتعاكستَين في الاتجاه، وإلّا فإننا سنستنتج أن كمّية التحرك قد استُحدثت من العدم (من لا شيء). تتحرك الكرة الحمراء بزاوية أكبر، ولكن سرعتها المتجهة أقل من السرعة المتجهة للكرة البيضاء، وبالتالي تكون مركّبة سرعتها الأفقية مساوية للمركّبة الأفقية لسرعة الكرة البيضاء.

يبيّن الشكل ٥-٩ (أ) كمّية التحرك لكل كرة قبل التصادم وبعده. يمكننا رسم مثلث متجهات لتمثيل تغيّرات كمّية التحرك في هذا التصادم كما في الشكل ٥-٩ (ب)، حيث يُجمَع متجها كمّية التحرك للكرتَين بعد التصادم ليساويا كمّية تحرُّك الكرة البيضاء قبل التصادم. تشكل المتجهات مثلثًا مغلقًا لأن كمّية التحرك محفوظة في التصادم في بُعدَين.



(ب) (أ)

الشكل ٥-٩ (أ) تمثل هذه المتجهات كمّية التحرك لكل من الكرتَين المتصادمتَين كما هو مبيّن في الشكل ٥-٨.
(ب) يبيّن مثلث المتجهات المغلق أن كمّية التحرك محفوظة في التصادم.

مركّبتا كمّية التحرك

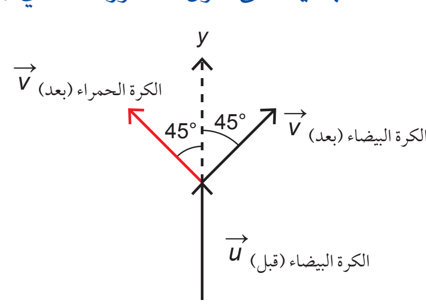
كمّية التحرك كمّية متجهة وبالتالي يمكننا تحليلها إلى مركّبتَين من أجل حل الأسئلة.

يبيّن المثال ٣ كيفية إيجاد سرعة متجهة مجهولة، ويبيّن المثال ٤ كيفية إثبات أن كمّية التحرك في التصادم في بُعدَين محفوظة.

أمثلة

٣. كرة بيضاء كتلتها ($m = 1.0$ kg) تتحرك بسرعة ابتدائية ($u = 0.50$ m s^{-1}) ثم تصطدم بكُرة حمراء ساكنة لها الكتلة نفسها. تتحرك الكرتان بعد التصادم بالسرعة نفسها بحيث كانت الزاوية بين مسارَيهما °90، فما مقدار سرعتهما بعد التصادم؟

الخطوة ١: ارسم مخططًا يوضّح متجهات السرعة المتجهة للكرتَين، قبل التصادم وبعده (الشكل ٥-١٠). بيّن أن الكرة البيضاء تتحرك في البداية على طول المحور الصادي (y).



الشكل ٥-١٠ متجهات السرعة المتجهة للكرتَين البيضاء والحمراء قبل التصادم وبعده.

لأننا نعلم أن الكرتَين متماثلتان ولهما السرعة النهائية نفسها (v)؛ لذا يجب أن يكون مساراهما متماثلَين حول المحور الصادي (y).

ونظرًا لأن مساريهما بعد التصادم يصنع أحدهما مع الآخر °90 لذلك يجب أن يصنع كل منهما °45 مع المحور الصادي (y).

الخطوة ٢: نحن نعلم أن كمّية التحرك محفوظة على المحور الصادي (y)، ومن هنا يمكننا أن نستنتج أن:
كمّية التحرك الابتدائية للكرة البيضاء على المحور الصادي (y) = مركبة كمّية التحرك النهائية للكرة البيضاء على المحور الصادي (y) + مركبة كمّية التحرك النهائية للكرة الحمراء على المحور الصادي (y)

ويمكن أن يكون استخدام الرموز أسهل للفهم:

$$\vec{p}_{(\text{قبل التصادم})} = \vec{p}_{(\text{بعد التصادم})}$$

$$m\vec{u} = m\vec{v_y} + m\vec{v_y}$$

حيث ($\vec{v_y}$) هي مركّبة ($\vec{v}$) على المحور الصادي (y). الطرف الأيمن من هذه المعادلة له حدّان متماثلان، أحدهما للكرة البيضاء والآخر للكرة الحمراء. ويمكننا تبسيط المعادلة لنحصل على:

$$m\vec{u} = 2m\vec{v_y}$$

$$\vec{u} = 2\vec{v_y}$$

تابع

الخطوة ٣: مركّبة ($\vec{v}$) على المحور الصادي (y) تساوي ($v \cos 45°$). بالتعويض عن هذه القيمة وعن قيم (m) و (u)، نحصل على:

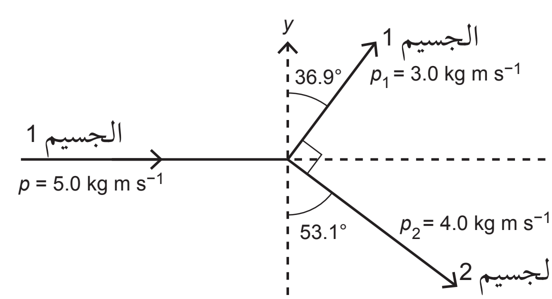
$$2v \cos 45° = 0.50$$

وعليه تكون:

$$v = \frac{0.50}{2 \cos 45°} \approx 0.35 \text{ m s}^{-1}$$

لذلك تتحرك كل كرة بسرعة متجهة مقدارها (0.35 m s^{-1}) وبزاوية $45°$ مع الاتجاه الابتدائي للكرة البيضاء.

٤. يبيّن الشكل ٥-١١ متجهات كمّية التحرك لجُسيمَين 1 و 2 قبل التصادم وبعده، حيث كان الجُسيم 2 ساكنًا قبل التصادم. بيّن أن كمّية التحرك محفوظة في هذا التصادم.



الشكل ٥-١١ متجهات كمّية التحرك: يتحرك الجُسيم 1 من اليسار ويصطدم بالجسيم 2 الساكن.

الخطوة ١: لنأخذ تغيّرات كمّية التحرك على المحور الصادي (y).

- **قبل التصادم:**

كمّية التحرك: $p_{(\text{قبل التصادم})} = 0$

(لأن الجُسيم 1 تحرك على المحور السيني (x) والجُسيم 2 ساكن).

- **بعد التصادم:**

مركّبة كمّية التحرك للجُسيم 1:

$$p_{1y} = p_1 \cos 36.9°$$

$$p_{1y} = 3.0 \cos 36.9° \approx 2.4 \text{ kg m s}^{-1}$$

إلى الأعلى

مركّبة كمّية التحرك للجُسيم ٢:

$$p_{2y} = p_2 \cos 53.1°$$

$$= 4.0 \cos 53.1° \approx 2.4 \text{ kg m s}^{-1}$$

إلى الأسفل

هاتان المركّبتان متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه، وبالتالي يكون مجموعهما صفرًا. وعليه تكون كمّية التحرك قبل التصادم = كمّية التحرك بعد التصادم = صفر، أي أن كمّية التحرك محفوظة على المحور الصادي (y).

الخطوة ٢: لنأخذ تغيّرات كمّية التحرك على المحور السيني (x).

$$p_{x\,(\text{قبل التصادم})} = p_{1x} + p_{2x}$$

- **قبل التصادم:**

كمّية التحرك: $p_x = 5.0 + 0 = 5.0 \text{ kg m s}^{-1}$

إلى اليمين

- **بعد التصادم:**

مركّبة كمّية التحرك للجُسيم 1:

$$p_{1x} = p_1 \sin 36.9°$$

$$p_{1x} = 3.0 \sin 36.9° \approx 1.8 \text{ kg m s}^{-1}$$

إلى اليمين

مركّبة كمّية التحرك للجُسيم 2:

$$p_{2x} = p_2 \sin 53.1°$$

$$= 4.0 \sin 53.1° \approx 3.2 \text{ kg m s}^{-1}$$

إلى اليمين

كمّية التحرك الكلّية بعد التصادم:

$$p_{(\text{الكلّية})} = p_{1x} + p_{2x}$$

$$= 1.8 + 3.2 = 5.0 \text{ kg m s}^{-1}$$

إلى اليمين

لذلك، كمّية التحرك محفوظة على المحور السيني (x).

تابع

الخطوة ٣: تتمثل الطريقة البديلة في رسم مثلث متجهات مشابه للشكل ٥-٩ (ب)، لقد اختيرت الأرقام في هذه الحالة للتسهيل؛ إذ تشكل المتجهات مثلثًا قائم الزاوية أضلاعه (5 – 4 – 3).

وبما أن المتجهات تشكّل مثلثًا مغلقًا، فيمكننا استنتاج ما يأتي:

كمّية التحرك قبل التصادم = كمّية التحرك بعد التصادم

(بمعنى آخر، كمّية التحرك محفوظة).

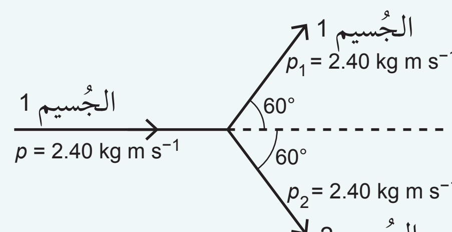
أسئلة

١٠) تضرب كرة سنوكر كرة ساكنة، فتتحرك الكرة الثانية جانبًا بزاوية 60° عن المسار الابتدائي للكرة الأولى.

استخدم فكرة حفظ كمّية التحرك لتوضيح سبب عدم تمكّن الكرة الأولى من المحافظة على حركتها في الاتجاه الابتدائي بعد التصادم. وضح إجابتك بمخطط.

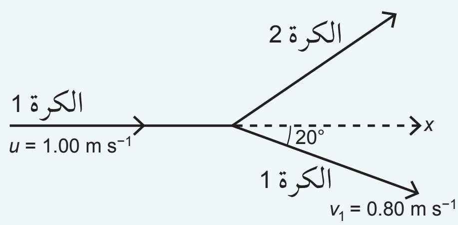
١١) ارجع إلى المثال ٤ لترسم مثلث المتجهات الذي يبيّن أن كمّية التحرك محفوظة في التصادم المبيّن في السؤال ١٠. بيّن قيمة كل زاوية في المثلث.

١٢) يبيّن الشكل ٥-١٢ متجهات كمّية التحرك لجُسيمَين متماثلَين، 1 و 2، قبل التصادم وبعده. كان الجُسيم 2 ساكنًا قبل التصادم. بيّن أن كمّية التحرك محفوظة في هذا التصادم.



الشكل ٥-١٢

١٣) تصطدم كرة سنوكر بكُرة ثانية مماثلة لها كما هو مبيّن في الشكل ٥-١٣.



الشكل ٥-١٣

أ. جِد مركبتَي السرعة المتجهة للكرة الأولى قبل التصادم على كل من المحورَين السينيّ (x) والصادي (y).

ب. جِد مركبتَي السرعة المتجهة للكرة الثانية على كل من المحورَين السينيّ (x) والصادي (y).

ج. جِد السرعة المتجهة (مقدارًا واتجاهًا) للكرة الثانية.

٥-٦ كمّية التحرك وقوانين نيوتن

درسنا في الوحدة الرابعة قوانين نيوتن للحركة. يمكننا الحصول على مزيد من المعرفة حول هذه القوانين من خلال التفكير فيها من حيث كمّية التحرك.

قانون نيوتن الأوّل للحركة

من المتعارف عليه أن الشيء الذي لديه كمّية تحرُّك هو ذلك الذي يستمر في الحركة من تلقاء نفسه، فناقلة النفط يصعب عليها التوقف في البحر بسبب كمّية تحرّكها، وفكرة الاستمرار في الحركة هذه مرتبطة **بقانون نيوتن الأوّل للحركة** **Newton's first law of motion**.

مهمّ

قانون نيوتن الأوّل للحركة Newton's first law of motion: يبقى الجسم في حالة سكون أو في حالة حركة منتظمة ما لم تؤثّر عليه قوة محصّلة.

يبقى الجسم في حالة سكون أو في حالة حركة منتظمة ما لم تؤثّر عليه قوة محصّلة.

الجسم الذي يتحرك بسرعة ثابتة له كمّية تحرُّك ثابتة؛ لذا فإن القانون الأول لنيوتن ينصّ على أن كمّية التحرك لجسم ما تبقى نفسها ما لم تؤثر على الجسم قوة خارجية.

قانون نيوتن الثاني للحركة

مهمّ

قانون نيوتن الثاني للحركة Newton's second law of motion: القوة المحصلة التي تؤثر على جسم ما تتناسب طرديًا مع (أو تساوي) معدل تغيّر كمّية التحرك للجسم.

يربط **قانون نيوتن الثاني للحركة Newton's second law of motion** فكرة محصلة القوى التي تؤثر على الجسم بكمّية التحرك، وينص قانون نيوتن الثاني على أن:

القوة المحصّلة التي تؤثر على جسم ما تتناسب طرديًا مع معدل تغيّر كمّية التحرك للجسم، وتكون القوة المحصلة والتغيّر في كمّية التحرك في الاتجاه نفسه.

وبالتالي:

القوّة المحصلة ∝ معدل تغير كمّية التحرك

يمكن كتابة هذا على النحو الآتي:

$$\vec{F} \propto \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

حيث ($\vec{F}$) هي القوة المحصلة و ($\Delta \vec{p}$) هي التغيّر في كمّية التحرك الذي يحدث في فترة زمنية مقدارها (Δt). (تذكّر أن الحرف اليوناني دلتا (Δ)، هو اختصار لـ «التغيّر في»، لذا فإن ($\Delta \vec{p}$) تعني «التغير في كمّية التحرك»)، فالتغيّر في كمّية التحرك والقوة كلاهما كميّة متجهة؛ لذلك، يجب أن يكون لهاتَين الكمّيتَين الاتجاه نفسه.

تُعرّف وحدة القوة نيوتن (N) بحيث يكون ثابت التناسب يساوي الواحد الصحيح، لذا يمكننا كتابة قانون نيوتن الثاني للحركة رياضيًا على النحو الآتي:

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

يبيّن المثال ٥ كيفية استخدام هذه المعادلة. كما توضح هذه المعادلة أيضًا أن نيوتن ثانية (N s) يمكن أن تُستخدم كوحدة أخرى لكمّية التحرك.

فإذا كانت القوى المؤثرة على جسم ما متزنة فإن محصلة القوى تساوي صفرًا، وبالتالي ستبقى كمّية التحرك للجسم ثابتة؛ أمّا إذا كانت هناك قوة محصلة تؤثر على الجسم فإن كمّية التحرك (مقدار السرعة المتجهة و/أو الاتجاه) ستتغيّر. هذه المعادلة تعبّر عن قانون نيوتن الثاني للحركة بصيغة أخرى، وينص على أن:

القوة المحصلة المؤثرة على جسم ما تساوي معدّل تغيّر كمّية التحرك، وتكون القوة المحصلة والتغيّر في كمّية التحرك بالاتجاه نفسه.

هذه العبارة تُحدد بشكل فعّال ما نعنيه بكلمة قوة؛ فهي التفاعل الذي يسبب تغيّر كمّية التحرك لجسم ما، لذلك إذا كانت كمّية تحرُّك جسم ما تتغير فإنه يجب أن تكون هناك قوة تؤثر عليه، ويمكننا إيجاد مقدار متوسط هذه القوة واتجاهها بواسطة قياس معدل تغيّر كمّية تحرُّك الجسم، ربما لا يكون مقدار القوة ثابتًا أثناء تغير كمّية التحرك، ولهذا السبب تسمح المعادلة فقط بحساب متوسط القوة.

القوة المحصلة = معدل تغير كمّية التحرك

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

مثال

٥. **احسب متوسط القوة المؤثرة على سيارة كتلتها (900 kg) عندما تتغيّر سرعتها من ($5.0\ m\ s^{-1}$) إلى ($30\ m\ s^{-1}$) في زمن مقداره (12 s).**

الخطوة ١: ابدأ بكتابة ما تعرفه.

الكتلة: $m = 900\ kg$

السرعة الابتدائية: $u = 5.0\ m\ s^{-1}$

السرعة النهائية: $v = 30\ m\ s^{-1}$

الزمن: $\Delta t = 12\ s$

الخطوة ٢: احسب كمّية التحرك الابتدائية وكمّية التحرك النهائية للسيارة:

كمّية التحرك = الكتلة × السرعة

كمّية التحرك الابتدائية:

$p_1 = mu = 900 \times 5.0$

$= 4500\ kg\ m\ s^{-1}$

كمّية التحرك النهائية:

$p_2 = mv = 900 \times 30$

$= 27000\ kg\ m\ s^{-1}$

الخطوة ٣: احسب متوسط القوة المؤثرة على السيارة باستخدام قانون نيوتن الثاني للحركة:

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

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

$$= \frac{27000 - 4500}{12}$$

$$F = 1875\ N \approx 1900\ N$$

متوسط القوة المؤثرة على السيارة (1.9 kN) تقريبًا.

حالة خاصة لقانون نيوتن الثاني للحركة

تخيّل جسمًا كتلته (m) ثابتة أثرت عليه قوة محصلة ($\vec{F}$)؛ فإن القوة ستغيّر كمّية التحرك للجسم. وطبقًا لقانون نيوتن الثاني للحركة، يكون لدينا:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{m\vec{v} - m\vec{u}}{t}$$

حيث ($\vec{u}$) هي السرعة المتجهة الابتدائية للجسم، و ($\vec{v}$) هي السرعة المتجهة النهائية للجسم، و (t) هي الزمن المستغرق في تغيّر السرعة. ونظرًا لأن كتلة الجسم (m) ثابتة؛ فإنه يمكن إعادة كتابة المعادلة على النحو الآتي:

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{u})}{\Delta t}$$

$$\vec{F} = m\left(\frac{\vec{v} - \vec{u}}{t}\right)$$

ما بين القوسين في المعادلة السابقة على الطرف الأيمن هو تسارع الجسم ($\vec{a}$). وهذه حالة خاصة من قانون نيوتن الثاني:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

سبق أن درست هذه المعادلة في الوحدة الرابعة، فهل يمكنك في المثال ٥ أن تحسب متوسط القوة المؤثرة على السيارة باستخدام هذه المعادلة المبسطة لقانون نيوتن الثاني للحركة؟ تذكّر أن المعادلة $\vec{F} = m\vec{a}$ هي حالة خاصة من $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$، والتي تنطبق فقط عندما تكون كتلة الجسم ثابتة. هناك حالات تتغيّر فيها كتلة الجسم مع حركته، على سبيل المثال، الصاروخ يحرق كمّية هائلة من الوقود الكيميائي فتتغير كتلته في أثناء تسارعه إلى الأعلى.

أسئلة

١٤ تتحرك سيارة كتلتها (1000 kg) بسرعة متجهة مقدارها ($10\ m\ s^{-1}$) وتتسارع لمدة (15 s)، لتصل سرعتها المتجهة إلى ($24\ m\ s^{-1}$). احسب:

أ. التغير في كمّية تحرك السيارة في الفترة الزمنية (15 s).

ب. متوسط القوة المحصلة المؤثرة على السيارة في أثناء تسارعها.

١٥ ركل لاعب كرة، فكان متوسط القوة المؤثرة على الكرة (240 N) وبقي تأثير القوة مستمرًا لمدة (0.25 s).

أ. احسب التغير في كمّية تحرُّك الكرة.

ب. اذكر اتجاه التغيّر في كمّية التحرك.

١٦ تسقط مياه من أنبوب مكسور على سقف مستوٍ. فتصل سرعة الماء إلى ($5.0\ m\ s^{-1}$) عندما يلامس الماءُ السقف. وكتلة الماء التي تلامس السقف في كل ثانية تساوي ($10\ kg\ s^{-1}$). احسب القوة التي يلامس بها الماء السقف (افترض أن الماء لا يرتدّ عندما يلامس السقف، وإذا ارتدّ الماء، فهل ستكون إجابتك أكبر أم أصغر؟).

١٧ كرة جولف كتلتها (0.046 kg) فإذا كانت السرعة المتجهة النهائية للكرة بعد ضربها بمضرب الجولف ($50\ m\ s^{-1}$)، وبقي مضرب الجولف على تلامس بالكرة لمدة (1.3 ms)، فاحسب متوسط القوة التي أثّر بها مضرب الجولف على الكرة.

قانون نيوتن الثالث للحركة

يتعلق **قانون نيوتن الثالث للحركة Newton's third law of motion** بتفاعل الأجسام. يمكن أن تكون هذه الأجسام مغناطيسَين يتجاذبان أو يتنافران، أو إلكترونَين يتنافران ... إلخ. ينص قانون نيوتن الثالث للحركة على أنه:

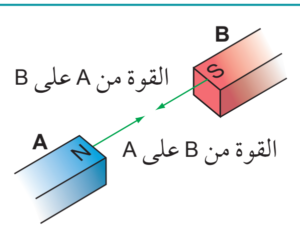
عندما يتفاعل جسمان، فإن القوة التي يؤثر بها كل منهما على الآخر تكون متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه.

مهمّ

قانون نيوتن الثالث للحركة Newton's third law of motion: عندما يتأثر جسمان أحدهما بالآخر، فإن القوى التي يؤثر بها كل منهما على الآخر، تكون متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه.

كيف يمكننا ربط هذا القانون بفكرة كمّية التحرك؟ افترض أنك تمسك بمغناطيسَين، واحد في كل يد، وتعمل على تقريب كل منهما تدريجيًا نحو الآخر (الشكل ٥-١٤) حتى يبدأ كل منهما بجذب الآخر. ستشعر أن كلًا من هاتَين القوّتَين مساوية للأخرى في المقدار، ولو كان أحد المغناطيسَين أكبر حجمًا، وكذلك إذا تمّ استبدال أحد المغناطيسَين بقطعة من الفولاذ غير ممغنطة، فسيستمر كل منهما بجذب الآخر بالتساوي.

إذا حرّرت المغناطيسَين من يدك فسيكتسبان كمّية تحرُّك في أثناء انجذاب كل منهما باتجاه الآخر؛ أحدهما يكسب كمّية تحرُّك إلى اليسار في حين يكسب الآخر كمّية تحرُّك مساوية له إلى اليمين.



الشكل ٥-١٤ ينص قانون نيوتن الثالث على أن القوى التي يؤثر بها كل من المغناطيسَين على الآخر متساوية مقدارًا ومتعاكسة اتجاهًا.

وكل منهما سيؤثر بالقوة نفسها وخلال الفترة الزمنية نفسها، لذلك فإن كمّية التحرك محفوظة. يمكن إثبات قانون حفظ كمّية التحرك في الواقع باستخدام قانون نيوتن الثاني وقانون نيوتن الثالث للحركة. افترض أن جسمًا كتلته (m_A) وسرعته المتجهة ($\vec{v}_A$) يتصادم مع جسم كتلته (m_B) وسرعته المتجهة ($\vec{v}_B$). فإذا كان النظام مغلقًا فإن القوة ($\vec{F}_A$) والقوة ($\vec{F}_B$) المؤثرة على الكتلتَين متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا.

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$$

$$\frac{\Delta(m_A\vec{v}_A)}{\Delta t} = -\frac{\Delta(m_B\vec{v}_B)}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta(m_A\vec{v}_A + m_B\vec{v}_B)}{\Delta t} = 0$$

بما أن $\Delta(m_A\vec{v}_A + m_B\vec{v}_B) = 0$ فإن ذلك يعني أنه لم يحدث أي تغيّر في كمّية التحرك الكلية.

ملخّص

كمّية التحرك هي حاصل ضرب الكتلة في السرعة: $\vec{p} = m\vec{v}$.
مبدأ حفظ كمّية التحرك: كمّية التحرك الكلية في النظام المغلق قبل التفاعل (على سبيل المثال، التصادم) يساوي كمّية التحرك الكلية بعد التفاعل.
تكون كمّية التحرك والطاقة الكلية في جميع التفاعلات أو التصادمات محفوظة.
ينص مبدأ حفظ الطاقة: أن الطاقة لا تستحدث من العدم ولا تفنى، ولكنها تتحوّل من شكل إلى آخر.
طاقة الحركة محفوظة في حالة التصادم المرن كليًا، والسرعة النسبية لا تتغير في حالة التصادم المرن كلّيًا.
طاقة الحركة غير محفوظة في حالة التصادم غير المرن، حيث تتحول إلى أشكال أخرى من الطاقة (مثل الحرارة أو الصوت). معظم التصادمات غير مرنة.
ينص قانون نيوتن الأول على: أن الجسم يبقى في حالة سكون أو في حالة حركة منتظمة ما لم تؤثّر عليه قوة محصّلة.
قانون نيوتن الثاني للحركة: القوة المحصلة المؤثرة على الجسم تساوي معدل تغير كمّية التحرك، أو $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$ في حالة بقاء الكتلة (m) ثابتة، فإن $\vec{F} = m\vec{a}$.
ينص قانون نيوتن الثالث للحركة على أنه: عندما يتفاعل جسمان، فإن القوى التي يؤثر بها كل منهما على الآخر تكون متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه.

أسئلة نهاية الوحدة

١ ما الكميّة التي لها نفس وحدة قياس معدّل تغيّر كمّية التحرك؟

أ. التسارع

ب. الطاقة

ج. الوزن

د. الشغل

٢ تتحرك مقطورة كتلتها (8000 kg) على سكة حديد وعلى طول مسار مستوٍ بسرعة ($2.5\ m\ s^{-1}$) وتتصادم مع مقطورة أخرى ساكنة كتلتها (12000 kg) يستغرق التصادم مدة (4.0 s) وتتحرك المقطورتان بعد التصادم معًا بالسرعة المتجهة نفسها. ما مقدار متوسط القوة المؤثرة على المقطورة التي تبلغ كتلتها (8000 kg) في أثناء الاصطدام؟

أ. 2000 N

ب. 3000 N

ج. 5000 N

د. 12000 N

٣ جسم كتلته (2.0 ± 0.2) kg وسرعته المتجهة $(10 \pm 1)\ m\ s^{-1}$. ما النسبة المئوية لعدم اليقين في كمّية التحرك للجسم؟

أ. 1%

ب. 6%

ج. 10%

د. 20%

٤ تُرك جسم ما ليقع في الهواء، فازدادت كمّية تحرّكه عندما سقط نحو الأرض. وضّح كيف يمكن تطبيق قانون حفظ كمّية التحرك وقانون نيوتن الثالث للحركة على هذه الحالة.

٥ تتحرك كرة كتلتها (2.0 kg) بسرعة ($3.0\ m\ s^{-1}$) فتصدم جدارًا وترتدّ عنه بالسرعة نفسها تقريبًا. وضّح ما إذا كان هناك تغيّر في:

أ. كمّية التحرك للكرة.

ب. طاقة الحركة للكرة.

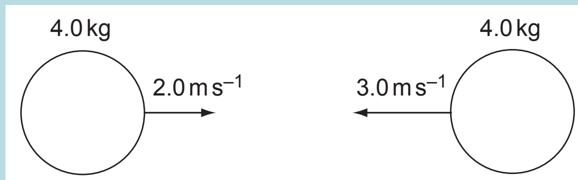
٦ **أ.** عرّف كمّية التحرك لجسم ما.

ب. حدّد الوحدات الأساسية لكمّية التحرك في النظام الدولي للوحدات (SI).

ج. بدأت سيارة كتلتها (900 kg) الحركة من السكون وبتسارع ثابت مقداره ($3.5\ m\ s^{-2}$). احسب كمّية تحرُّك السيارة بعد قطعها مسافة (40 m).

تابع

د. يبيّن المخطط في الشكل ٥-١٥ كرتَين متماثلتَين على وشك التصادم مباشرة. تلتصق الكرتان إحداهما بالأخرى في أثناء التصادم. احسب السرعة النهائية للكرتَين بعد التصادم. اذكر كذلك الاتجاه الذي تتحركان فيه بعد التصادم.



الشكل ٥-١٥

٧ **أ.** ما المقصود بـ:

١. تصادم مرن كلّيًا

٢. تصادم غير مرن

ب. كرة سنوكر كتلتها (0.35 kg) تضرب جانب طاولة السنوكر بزاوية قائمة وترتد عنها بزاوية قائمة أيضًا. كانت سرعتها قبل التصادم ($2.8\ m\ s^{-1}$) وسرعتها بعد التصادم ($2.5\ m\ s^{-1}$). احسب التغير في كمّية التحرك للكرة.

ج. وضّح ما إذا كانت كمّية التحرك محفوظةً في الحالة الموصوفة في الجزئية (ب) من هذا السؤال أم لا.

٨ تتحرك سيارة كتلتها (1100 kg) بسرعة ($24\ m\ s^{-1}$) يضغط السائق على المكابح فتتباطأ سرعة السيارة بشكل منتظم وتتوقف خلال زمن (20 s). احسب:

أ. التغيّر في كمّية التحرك للسيارة.

ب. قوة المكابح على السيارة.

ج. المسافة التي قطعتها السيارة تحت تأثير المكابح.

٩ تتحرك كرة من الرخام كتلتها (100 g) بسرعة ($0.40\ m\ s^{-1}$) على المحور السيني (x).

أ. احسب كمّية التحرك لكرة الرخام.

ب. تضرب كرة الرخام كرة رخام ثانية ساكنة مماثلة لها، فتتحرك كل منهما بزاوية 45° عن المحور السيني (x).

١. استخدم مبدأ حفظ كمّية التحرك لتحديد سرعة كل من كُرتَي الرخام بعد التصادم.

٢. بيّن أن طاقة الحركة محفوظة في هذا التصادم.

تابع

١٠ يضرب مضرب الكريكيت كرة كتلتها (0.16 kg) متحركة نحوه، فتضرب الكرة في البداية المضرب بسرعة ($25\ m\ s^{-1}$) ثم تعود الكرة على مسارها نفسه بالسرعة نفسها. كانت مدة تأثير الضربة (0.0030 s).
افترض أنه لا تؤثر قوة على المضرب من لاعب الكريكيت في أثناء التصادم الفعلي.

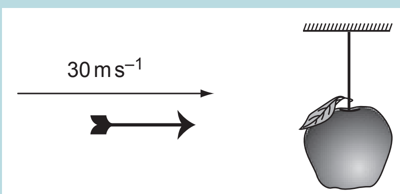
أ. جِد التغيّر في كمّية التحرك لكرة الكريكيت.

ب. جِد القوة التي أثّر بها المضرب على الكرة.

ج. صِف كيفية تطبيق قانونَي حفظ الطاقة وحفظ كمّية التحرك على هذه الضربة، وحدّد ما إذا كانت هذه الضربة تمثل تصادمًا مرنًا كلّيًا أم غير مرن.

١١ **أ.** اذكر نص مبدأ حفظ كمّية التحرك واذكر الشرط الذي يتحقق عنده.

ب. أُطلق سهم كتلته (0.25 kg) أفقيًا بسرعة ($30\ m\ s^{-1}$) باتجاه تفاحة كتلتها (0.10 kg) ساكنة معلّقة بخيط كما هو مبيّن في الشكل ٥–١٦ فاخترق السهم التفاحة واستقرّ داخلها.



الشكل ٥–١٦

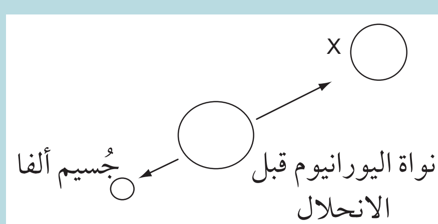
١. احسب السرعة المتجهة الأفقية للتفاحة والسهم مباشرة بعد الاصطدام.

٢. احسب التغيّر في كمّية تحرُّك السهم في أثناء الاصطدام.

٣. احسب التغيّر في طاقة الحركة الكلّية للسهم والتفاحة في أثناء الاصطدام.

ج. يُطلق سهم ذو طرف مطاطي كتلته (0.25 kg) بسرعة ($30\ m\ s^{-1}$) على مركز كرة ساكنة كتلتها (0.25 kg) فكان التصادم مرنًا كلّيًا. صِف ما يحدث، واذكر السرعة النسبية للتباعد بين السهم والكرة.

١٢ يوضح الشكل ٥–١٧ انحلال نواة يورانيوم ساكنة فينبعث منها جُسيم ألفا كتلته (6.65×10^{-27} kg) وتتشكّل نواة أخرى X كتلتها (3.89×10^{-25} kg).



الشكل ٥–١٧

أ. اشرح سبب انبعاث جُسيم ألفا والنواة X باتجاهَين متعاكسَين تمامًا.

ب. باستخدام الرموز (v_α) و (v_x) للسرعتَين المتجهتَين لكل من جُسيم (α) ولنواة (x)، اكتب معادلة حفظ كمّية التحرك في هذا الانحلال.

ج. باستخدام إجابتك عن الجزئية (ب)، احسب النسبة (v_α) : (v_x) بعد الانحلال.

تابع

١٣ **أ.** اذكر **كميّتَين** تكونان محفوظتَين في التصادم المرن كلّيًا.

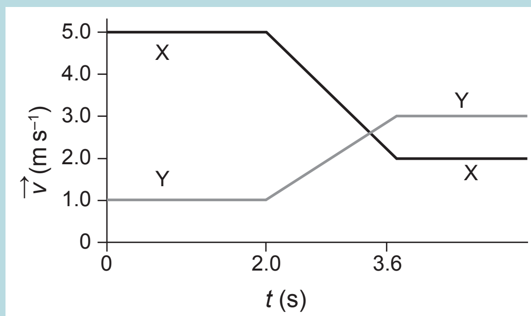
ب. يطلق رشاش رصاصة كتلتها (0.014 kg) بسرعة ($640\ m\ s^{-1}$).

١. احسب كمّية التحرك لكل رصاصة عندما تخرج من فوهة الرشاش.

٢. وضّح سبب تعرض الجندي الذي يحمل الرشاش إلى قوة عند إطلاق الرصاص من الرشاش.

٣. أقصى قوة أفقية ثابتة يمكن للجندي بذلها على الرشاش (140 N) احسب العدد الأقصى لطلقات الرصاص التي يمكن للرشاش أن يطلقها في ثانية واحدة.

١٤ يوضح الشكل ٥-١٨ التمثيل البياني (السرعة المتجهة - الزمن) لمقطورتَين للسكك الحديدية تتحرّكان بالاتجاه نفسه فتتصادمان. تبلغ كتلة المقطورة X (2.0×10^4 kg) وكتلة المقطورة Y (3.0×10^4 kg).



الشكل ٥-١٨

أ. انسخ الجدول وأكمله.

	التغير في كمّية التحرك ($kg\ m\ s^{-1}$)	طاقة الحركة الابتدائية (J)	طاقة الحركة النهائية (J)
المقطورة X			
المقطورة Y			

الجدول ٥-١

ب. اذكر موضّحًا ما إذا كان تصادم المقطورتَين مثالًا على التصادم المرن الكلّي.

ج. حدّد متوسط القوة المؤثرة على كلّ مقطورة في أثناء التصادم.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أعرّف كمّية التحرك وأستخدمها.	٥-١			
أتذكر مبدأ حفظ الطاقة وأطبقه على التصادمات والانفجارات.	٥-٢			
أتذكر أنه في حالة حدوث تصادم مرن كلّيًا، فإن السرعة النسبية للاقتراب تساوي السرعة النسبية للابتعاد.	٥-٣			
أناقش تغيّرات الطاقة في التصادمات المرنة كلّيًا وغير المرنة.	٥-٣			
أذكر مبدأ حفظ كمّية التحرك للتصادم في بُعد واحد وبُعدَين وأطبقه.	٥-٣، ٥-٤، ٥-٥			
أربط القوة بمعدل تغيّر كمّية التحرك.	٥-٦			
أذكر نصوص قوانين نيوتن الثلاثة للحركة.	٥-٦			

الوحدة السادسة

الحركة الدائرية

Circular Motion

أهداف التعلّم

٦-١ يعرّف الإزاحة الزاوية والراديان (rad)، ويعبّر عن الإزاحة الزاوية بوحدة الراديان.

٦-٢ يعرّف السرعة الزاوية ويستخدمها.

٦-٣ يصف العلاقة بين السرعة المتجهة الخطية والسرعة الزاوية ويتذكر المعادلات الآتية لحسابهما ويستخدمها:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$v = r\omega$$

٦-٤ يذكر أن القوة الثابتة المقدار والتي تكون دائمًا عمودية على اتجاه الحركة تتسبب بتسارع مركزي.

٦-٥ يذكر أن التسارع المركزي يتسبب بحركة دائرية بسرعة زاوية ثابتة.

٦-٦ يتذكر المعادلتَين للتسارع المركزي ويستخدمهما:

$$a = r\omega^2$$

$$a = \frac{v^2}{r}$$

٦-٧ يذكر أن القوة المركزية تؤثر على الجسم باتجاه مركز الدائرة عندما يتحرك الجسم في مسار دائري بسرعة ثابتة، ويتذكر المعادلتَين الآتيتَين ويستخدمهما:

$$F = mr\omega^2$$

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

٦-٨ يحدّد القوة المركزية بالنسبة إلى جسم يتحرك في حركة دائرية.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- اشرح لزميلك سبب تدحرج كرة طفل ساكنة على أرضية قطار نحو المقدمة عندما يضغط السائق على المكابح ويبطئ سرعته. اكتب شرحك وناقشه مع أحد زملائك.

العلوم ضمن سياقها

الحركة في دوائر

تُظهر سيارة السباق في الصورة ٦-١ مثالَين على الحركة الدائرية، حيث تدور العجلات حول محاورها، وتتبع السيارة مسارًا مقوسًا في أثناء تسارعها حول المنعطف. تتمثّل مهارة السائق في التحكم بالسرعة القصوى بحيث تنعطف السيارة دون أن تخرج عن نطاق السيطرة. فالسائق عندما يصل بسيارته إلى المنعطف ويغيّر مساره يشعر بأنه يندفع نحو الخارج؛ ومردّ ذلك إلى القصور الذاتي؛ حيث أن جسم السائق «يريد» أن يستمر في خط مستقيم بالسرعة الثابتة نفسها. وكذلك الأمر بالنسبة إلى تفسير تدحرج كرة الطفل في أثناء استخدام سائق القطار المكابح بسبب القصور الذاتي أيضًا؛ حيث «تميل» الكرة إلى الاستمرار في الحركة بخط مستقيم بسرعة ثابتة، وبالتالي تتجه نحو مقدمة القطار.

الصورة ٦-١ الحركة الدائرية: تدور عجلات السيارة حول محاورها في دوائر، كما أن السيارة نفسها تتبّع مسارًا مقوّسًا.

٦-١ وصف الحركة الدائرية

يتحرك الكثير من الأجسام في حركة دائرية، مثل:

- عجلات السيارة أو عجلات الدراجة الهوائية.
- الأرض في مدارها (الدائري تقريبًا) حول الشمس.
- عقارب الساعة.
- قرص DVD دوّار في ألعاب الفيديو.
- حوض الغسالة الدوّار.

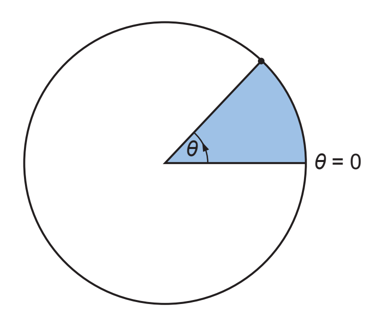
تتحرك الأشياء في بعض الأحيان على طول مسار يمثل جزءًا من دائرة، فعلى سبيل المثال تتحرك السيارة في الصورة ٦-١ حول منعطف في طريق يمثل قوسًا لدائرة.

تختلف الحركة الدائرية عن الحركة في خط مستقيم، والتي ناقشناها سابقًا في دراستنا في الوحدات من الوحدة الثانية إلى الخامسة.

حركة عقارب الساعة

يتحرك عقرب الثواني بثبات حول مركز قرص الساعة فيستغرق دقيقة واحدة للحركة على طول المسار حول الدائرة، ويوجد $360°$ في الدائرة الكاملة و 60 ثانية في الدقيقة؛ لذلك يتحرك عقرب الثواني $6°$ في كل ثانية، فإذا عرفنا الزاوية θ التي يتحرك خلالها عقرب الثواني من وضعه الرأسي (الساعة 12) عندئذ يمكننا أن نتنبأ بمكان عقرب الثواني.

يمكننا بالطريقة نفسها وصف موقع أي جسم في أثناء حركته على مسار دائري، وذلك ببساطة عن طريق ذكر الزاوية θ المقابلة للقوس الذي تحركه من وضع بداية حركته، وهذا مبيّن في الشكل ٦-١.



الشكل ٦-١ لمعرفة المسافة التي تحركها جسم ما على مسار دائري، نحتاج إلى معرفة الزاوية θ.

تُعرف الزاوية θ التي يتحرك خلالها جسم ما باسم **الإزاحة الزاوية Angular displacement**، ويحدّد موقع جسم يتحرك في خط مستقيم من خلال إزاحته (s)، وهي المسافة التي يقطعها من نقطة البداية، فالكمية المقابلة لها في الحركة الدائرية هي الإزاحة الزاوية، و θ هي زاوية القوس الذي من خلاله تحرك الجسم من موقع البداية.

مصطلحات علمية

الإزاحة الزاوية Angular displacement: زاوية القوس الذي يتحرك عليه الجسم من موقع بداية حركته.

سؤال

١ أ. كم درجة تتغير فيها الإزاحة الزاوية لعقرب الساعات خلال ساعة واحدة؟

ب. تشير الساعة إلى (3:30). احسب الإزاحة الزاوية بالدرجات من الموقع (12:00) في الساعة لكل من:

١. عقرب الدقائق.

٢. عقرب الساعات.

٦-٢ الزوايا بالراديان

مصطلحات علمية

الراديان Radian: الزاوية عند مركز الدائرة التي تقابل قوسًا طوله يساوي نصف قطر الدائرة.

عندما نتعامل مع الدوائر والحركة الدائرية يكون من الأنسب لنا قياس الزوايا والإزاحات الزاوية بوحدة قياس تسمى راديان وليس بالدرجات.

إذا تحرك جسم ما مسافة (s) على مسار دائري نصف قطره (r) كما في الشكل ٦-٢ (أ)، فإن إزاحته الزاوية θ بوحدة **الراديان Radians** تُعرّف كما يأتي:

$$\text{الزاوية } \theta \text{ (بوحدة الراديان)} = \frac{\text{طول القوس}}{\text{نصف القطر}}$$

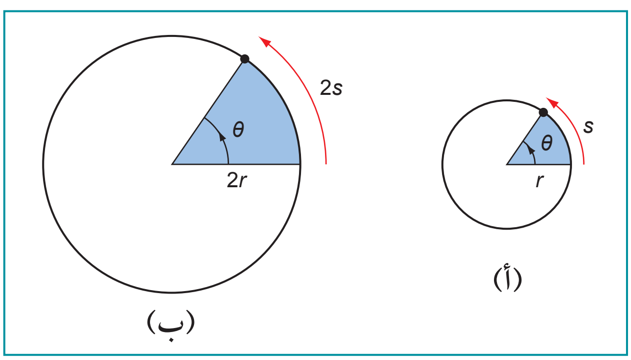
$$\theta = \frac{s}{r}$$

بما أن كلًا من (s) و (r) هي مسافات تُقاس بالأمتار، فإن الزاوية θ مجرد نسبة؛ أي أنها دون أبعاد، فإذا تحرك الجسم مسافة أبعد بمرتَين في دائرة لها ضعف نصف القطر (الشكل ٦- ٢ ب)، عندها تكون الإزاحة الزاوية θ هي نفسها.

$$\theta = \frac{\text{طول القوس}}{\text{نصف القطر}}$$

$$\theta = \frac{2s}{2r}$$

$$\theta = \frac{s}{r}$$



الشكل ٦-٢ يعتمد مقدار الزاوية على نصف القطر وطول القوس، ولكن عند مضاعفة كليهما تبقى الزاوية نفسها دون تغيير.

عندما نعرّف θ بهذه الطريقة فإن وحدة قياسها هي الراديان وليست الدرجة. كيف ترتبط وحدة القياس الراديان بوحدة القياس الدرجة؟ إذا تحرك جسم ما على طول مسار محيط الدائرة كاملًا فإنه يتحرك مسافة $2\pi r$، وبالتالي يمكننا حساب إزاحته الزاوية بوحدة القياس الراديان:

$$\theta = \frac{\text{محيط الدائرة}}{\text{نصف القطر}}$$

$$\theta = \frac{2\pi r}{r}$$

$$\theta = 2\pi$$

ومن هنا فإن الدائرة الكاملة تقابل 2π راديان. لكن يمكننا أن نقول أيضًا أن الجسم قد تحرك بزاوية $360°$ وبالتالي، فإن:

$$360° = 2\pi \text{ rad}$$

وبالمثل فإن:

$180° = \pi$ rad $\qquad 90° = \frac{\pi}{2}$ rad $\qquad 45° = \frac{\pi}{4}$ rad $\qquad$ وهكذا...

تعريف الراديان

يُعرّف الراديان Radian الواحد بأنه الزاوية في مركز الدائرة التي تقابل قوسًا طوله يساوي نصف قطر الدائرة، وهذا مبيّن في الشكل ٦-٣.

الزاوية التي قياسها °360 تساوي 2π rad؛ لذلك يمكننا تحديد ما يعادل 1 راديان بالدرجات.

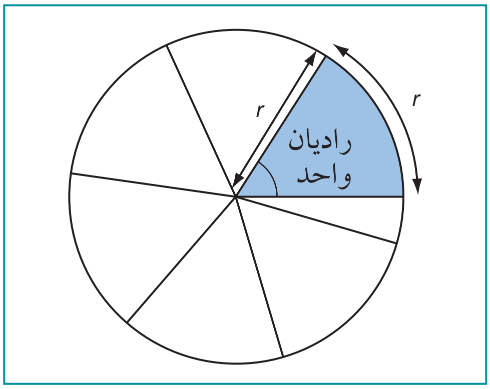
$$1 \text{ rad} = \frac{360°}{2\pi}$$

أو $1 \text{ rad} \approx 57.3°$

فإذا تذكرت أن هناك 2π rad في الدائرة الكاملة، فستتمكن من التحويل بين وحدتَي القياس الراديان والدرجات:

- للتحويل من الدرجات إلى الراديان، اضرب في $\frac{2\pi}{360°}$ أو $\frac{\pi}{180°}$.
- للتحويل من الراديان إلى الدرجات، اضرب في $\frac{360°}{2\pi}$ أو $\frac{180°}{\pi}$.

انظر إلى المثال ١.



الشكل ٦-٣ طول القوس يساوي نصف القطر عندما تكون الزاوية 1 راديان.

مثال

١. إذا كانت ($\theta = 60°$) فما قيمة θ بالراديان؟

الزاوية θ تساوي °60

°360 تعادل 2π راديان وبالتالي فإن:

$$\theta = 60° \times \frac{2\pi}{360°}$$

$$= \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$

أو $= 1.05$ rad

(لاحظ أنه من المفيد غالبًا التعبير عن الزاوية بدلالة π راديان).

سؤال

٢ أ. حوّل الزوايا الآتية من الدرجات إلى الراديان:
°30، °90، °105

ب. حوّل الزوايا الآتية من الراديان إلى الدرجات:
0.5 rad، 0.75 rad، π rad، $\frac{\pi}{2}$ rad.

ج. عبّر عن الزوايا الآتية بدلالة π راديان:
°30، °120، °270، °720

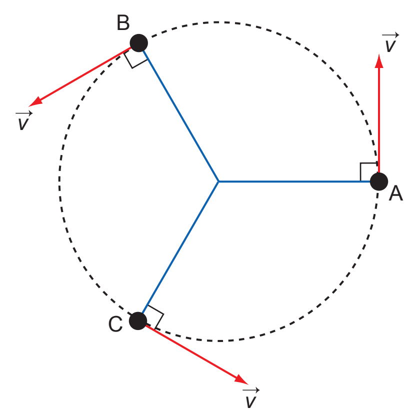
٦-٣ السرعة الثابتة، والسرعة المتجهة المتغيرة

إذا أردنا استخدام قوانين نيوتن للحركة لشرح الحركة الدائرية، فيجب أن نأخذ في الحسبان **السرعة المتجهة Velocity** للجسم الذي يتحرك على مسار دائري بدلًا من **سرعته Speed**.

ثمّة فرق مهم بين السرعة والسرعة المتجهة؛ فالسرعة كمّية عددية لها مقدار فقط، في حين أن السرعة المتجهة كمية متجهة لها مقدار واتجاه.

نحن بحاجة إلى التفكير في اتجاه حركة جسم يتحرك على مسار دائري.

يوضح الشكل ٦-٤ كيف يمكننا تمثيل السرعة المتجهة لجسم في نقاط مختلفة حول مسار حركته الدائرية.



الشكل ٦-٤ تُغيّر السرعة المتجهة ($\vec{v}$) لجسم ما اتجاهها في أثناء تحركه على طول المسار الدائري.

تبيّن الأسهم المستقيمة في المسار الدائري اتجاه الحركة في لحظات معيّنة؛ حيث تُرسم كمماس للمسار الدائري، وعندما ينتقل الجسم عبر النقاط A و B و C وغيرها يبقى مقدار سرعة الجسم ثابتًا في حين يتغيّر اتجاه حركته باستمرار، وبما أن اتجاه السرعة المتجهة ($\vec{v}$) يتغير فهذا يعني أن ($\vec{v}$) نفسها تتغير مع تحرك الجسم على المسار الدائري لأنها كمّية متجهة.

مصطلحات علمية

السرعة المتجهة Velocity: سرعة الجسم باتجاه معيّن، أو معدل تغيّر إزاحة الجسم. وهي كمية متجهة.

السرعة Speed: معدل تغيّر المسافة التي يقطعها الجسم. وهي كمية عددية.

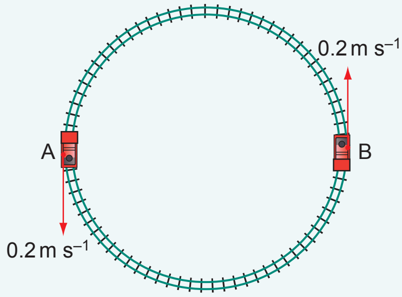
أسئلة

٣ اشرح سبب رسم جميع أسهم السرعة المتجهة في الشكل ٦-٤ بالطول نفسه.

٤ يتحرك قطار لعبة بسرعة ثابتة تبلغ ($0.2\ m\ s^{-1}$) على مسار دائري كما هو موضح في الشكل ٦-٥. A و B نقطتَين متقابلتَين في المسار.

أ. حدّد التغيّر في سرعة القطار في أثناء تحركه من A إلى B.

ب. حدّد التغيّر في السرعة المتجهة للقطار في أثناء تحركه من A إلى B.



الشكل ٦-٥ قطار لعبة يتحرك بسرعة ثابتة على مسار دائري.

٦-٤ السرعة المتجهة الزاوية

بينما تتحرك عقارب الساعة بثبات (حركة دائرية منتظمة) حول مركز قرص الساعة، فإن سرعتها المتجهة تتغيّر باستمرار. يدور عقرب الدقائق $360°$ أو 2π راديان في $(3600\ s)$، وعلى الرغم من أن السرعة المتجهة للعقارب تتغيّر، فالسرعة المتجهة الزاوية **Angular velocity** تكون ثابتة؛ لأن العقارب تتحرك خلال الزاوية نفسها في كل ثانية:

$$\text{السرعة المتجهة الزاوية} = \frac{\text{الإزاحة الزاوية}}{\text{الزمن المستغرق}}$$

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

مصطلحات علمية

السرعة المتجهة الزاوية Angular velocity: الإزاحة الزاوية لكل ثانية.

حيث $\Delta\theta$ هي التغير في الزاوية، و Δt يمثّل التغير في الزمن.

نستخدم الرمز (ω) (الحرف اليوناني أوميجا) للسرعة المتجهة الزاوية، وتُقاس بوحدة الراديان لكل ثانية $(rad\ s^{-1})$. لاحظ أن السرعة المتجهة الزاوية يشار إليها أحيانًا باسم «السرعة الزاوية»؛ هذا لأن اتجاه الحركة الدائرية مهم فقط عندما يكون هناك تغير في الحركة الدائرية، والتي لن تُدرس في هذه الوحدة. وبالنسبة إلى عقرب الدقائق فسرعته الزاوية تساوي:

$$\omega = \frac{2\pi}{3600} = 0.00175\ rad\ s^{-1}$$

يُطلَق على الزمن اللازم لعمل دورة واحدة بالزمن الدوري (T)، والزاوية التي يدور خلالها الجسم دورة واحدة هي 2π راديان. إذًا بالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

أسئلة

٥ بيّن أن السرعة الزاوية لعقرب الثواني للساعة تبلغ نحو $(0.105\ rad\ s^{-1})$.

٦ توضع الملابس في الغسالة في أسطوانة تسمى حوض الغسيل. يكون في حوض الغسيل ثقوب تسمح للماء بالدخول إلى الحوض والتصريف منه إلى الخارج أيضًا. يدور حوض الغسيل في غسالة معيّنة بمعدل $(1200\ rpm)$ (rpm تعني دورة لكل دقيقة).

أ. حدّد عدد دورات حوض الغسيل لكل ثانية.

ب. حدّد السرعة الزاوية لحوض الغسيل.

ربط السرعة المتجهة الخطية بالسرعة المتجهة الزاوية

فكّر مرة أخرى في عقرب الثواني للساعة، في أثناء دوران عقرب الثواني يكون لكل نقطة من هذا العقرب السرعة المتجهة الزاوية نفسها، إلّا أن الأجزاء المختلفة من طول العقرب لها سرعات متجهة مختلفة؛ حيث يتحرك طرف العقرب أسرع من بقية أجزائه أو نقاطه وتتحرك نقاط العقرب الأقرب لمركز قرص الساعة ببطء أكثر.

هذا يبيّن أن السرعة المتجهة $(\vec{v})$ لجسم يتحرك على مسار دائري تعتمد على كمّيتَين:

– السرعة المتجهة الزاوية (ω).

– المسافة بينه وبين مركز الدائرة (r).

يمكننا كتابة العلاقة كمعادلة:

السرعة المتجهة الخطية = السرعة المتجهة الزاوية × نصف القطر

$$v = \omega r$$

يبيّن المثال ٢ كيف تستخدم هذه المعادلة.

مثال

٢. **يقطع قطار لعبة مسارًا دائريًا نصف قطره (2.5 m) في زمن (40 s). ما سرعته الخطية؟**

الخطوة ١: احسب السرعة الزاوية (ω) للقطار. الدورة الواحدة من المسار الدائري تكافئ 2π راديان. يتحرك القطار على المسار الدائري في (40 s) في كل دورة، وبالتالي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{40}$$

$$= 0.157 \text{ rad s}^{-1}$$

الخطوة ٢: احسب سرعة القطار الخطية:

$$v = \omega r = 0.157 \times 2.5 = 0.39 \text{ m s}^{-1}$$

تلميح: بإمكانك أن تصل إلى الإجابة نفسها بحساب المسافة التي تحركها القطار (محيط الدائرة) وقسمته على الزمن المستغرق.

أسئلة

٧ السرعة الزاوية لعقرب الثواني للساعة تساوي (0.105 rad s^{-1}). إذا كان طول عقرب الثواني (1.8 cm)، فاحسب سرعة طرف العقرب في أثناء دورانه.

٨ تتحرك سيارة حول منعطف نصف قطره (50 m)، وزاويته $90°$ خلال زمن قدره (15 s)، احسب:

أ. السرعة الزاوية للسيارة.

ب. السرعة الخطية للسيارة.

٩ مركبة فضائية تدور حول الأرض في مدار دائري نصف قطره (7000 km) بسرعة (7800 m s^{-1}). احسب سرعتها الزاوية.

٦-٥ القوة المركزية

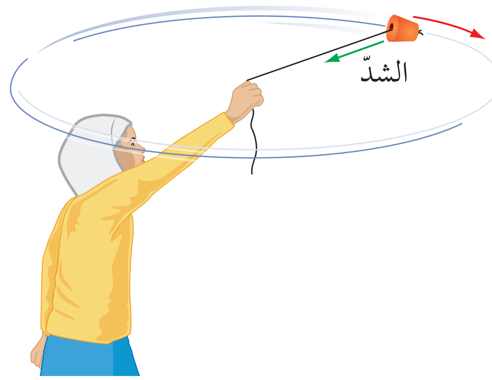
عندما تتغيّر سرعة جسم ما فإنه يكون له تسارع، ويكون التسارع في حالة الحركة الدائرية المنتظمة ليس كما هو في الحركة الخطية؛ لأنه كما رأينا لا تتغيّر سرعة الجسم، في حين أن سرعته المتجهة تتغيّر. كيف يمكن لجسم أن يتسارع وفي الوقت نفسه تكون سرعته ثابتة؟

ثمّة طريقة واحدة لفهم هذه الحالة وهي التفكير فيما يمكن أن تفيدنا به قوانين نيوتن للحركة. ينص قانون نيوتن الأول للحركة على بقاء الجسم في حالة سكون أو في حالة حركة بسرعة منتظمة (بسرعة ثابتة في خط مستقيم) ما لم تؤثر عليه قوة خارجية، ففي حالة جسم يتحرك بسرعة ثابتة على مسار دائري فإن السرعة المتجهة للجسم ليست ثابتة؛ وبالتالي يجب أن تكون هناك قوة محصلة (غير متزنة) تؤثر عليه.

يمكننا الآن التفكير في حالات مختلفة تدور فيها الأجسام في مسار دائري ونحاول إيجاد القوة المؤثرة عليها.

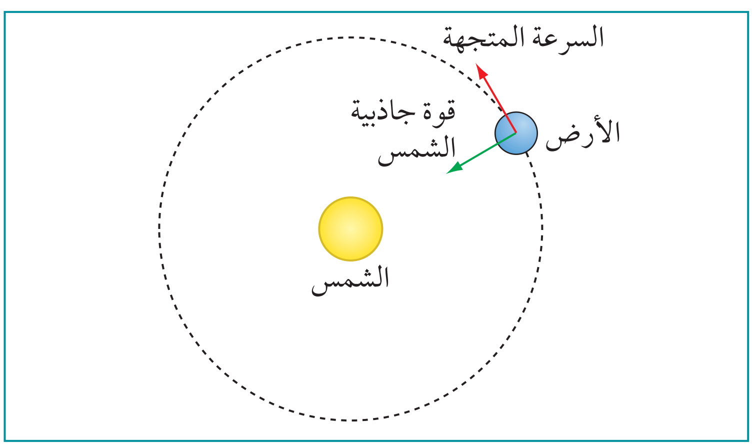
- لنأخذ في الاعتبار سدادة مطاطية مربوطة في طرف خيط. تخيّل تدويرها في دائرة أفقية فوق رأسك (الشكل

٦-٦). حتى تجعلها تدور في دائرة، يجب عليك شدّ الخيط باستمرار في أثناء دورانها، فشدّ الخيط هو القوة غير المتزنة التي تعمل باستمرار على تغيير السرعة المتجهة للسدادة في أثناء دورانها حول رأسك، ولكن إذا أفلتّ الخيط من يدك يرتخي فجأة وتطير السدادة في مسار مماس للدائرة.



الشكل ٦-٦ تدوير سدادة مطاطية مربوطة بخيط مشدود.

- وبالمثل، عندما تدور الأرض حول الشمس (الشكل ٦-٧)، فإن سرعتها المتجهة تتغيّر باستمرار. يوضح قانون نيوتن الثاني أنه لا بد من وجود قوة غير متزنة تؤثر عليها، هذه القوة هي قوة جاذبية الشمس، فإذا اختفت هذه القوة فستتحرك الأرض في خط مستقيم.



الشكل ٦-٧ توفّر قوة جاذبية الشمس القوة المركزية التي تحافظ على بقاء الأرض في مدارها حول الشمس.

مصطلحات علمية

القوة المركزية
Centripetal force
القوة المحصلة المؤثرة على جسم ما في اتجاه مركز الدائرة عندما يدور الجسم على مسار تلك الدائرة بسرعة ثابتة.

يجب أن تكون في كلتا الحالتَين السابقتَين قادرًا على معرفة سبب اتجاه القوة كما هو مبيّن في الشكلَين ٦-٦ و ٦-٧؛ حيث تكون القوة المؤثرة على الجسم متجهة نحو مركز الدائرة. توصف كلٌّ من هذه القوى المحصلة بأنها **قوة مركزية Centripetal force**، أي متجهة نحو المركز.

من المهم أن نلاحظ أن كلمة المركزية هي صفة؛ حيث نستخدمها لوصف القوة التي

تجعل شيئًا ما يتحرك بسرعة ثابتة على مسار دائري، إنها لا تخبرنا عن سبب هذه القوة والتي قد تكون جاذبية أو كهروستاتيكية أو مغناطيسية أو احتكاكية أو أي شيء آخر.

أسئلة

١٠ حدّد في كل من الحالات الآتية نوع القوة المركزية التي تحافظ على بقاء حركة الجسم في مسار دائري.

أ. القمر الذي يدور حول الأرض.

ب. سيارة تدور حول منعطف على طريق منبسط مستوٍ وخشن.

ج. الثقل المعلّق في نهاية البندول المتأرجح.

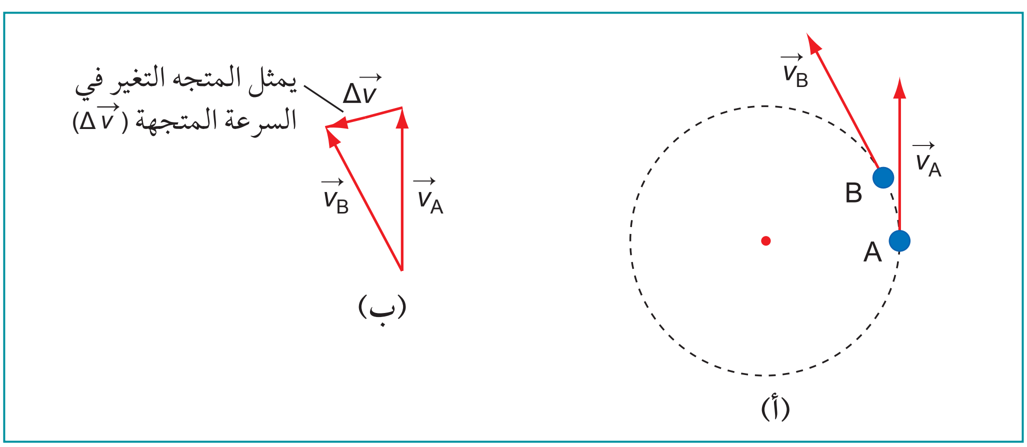
١١ سيارة تسير على طريق مستوٍ في الشتاء. تقترب السيارة من بقعة من الجليد في منعطَف. وضّح سبب عدم قدرة السيارة على التحرك حول المنعطف الجليدي الأملس جدًا. اقترح ما يمكن أن يحدث إذا حاول السائق تدوير عجلة القيادة عندما تكون السيارة على الجليد.

مخططات المتجهات

يبيّن الشكل ٦-٨ (أ) جسمًا يتحرك على طول مسار دائري بسرعة ثابتة في موقعَين مختلفَين A و B على المسار الدائري. يصل الجسم إلى الموقع B بعد مروره بالموقع A بفترة زمنية قصيرة. كيف تغيّرت سرعته المتجهة بين هذَين الموقعَين؟

يمكن إيجاد التغيّر في السرعة المتجهة للجسم باستخدام مثلث المتجهات. يبيّن مثلث المتجهات في الشكل ٦-٨ (ب) الفرق بين السرعة المتجهة النهائية ($\vec{v}_B$) والسرعة المتجهة الابتدائية ($\vec{v}_A$). التغيّر في السرعة المتجهة للجسم بين النقطتَين B و A مبيّن بالسهم الأصغر المسمى ($\Delta\vec{v}$). لاحظ أن التغير في السرعة المتجهة للجسم يكون:

- بزاوية قائمة على السرعة المتجهة عند A.
- يتجه نحو مركز الدائرة.



الشكل ٦-٨ التغيّر في متجه السرعة المتجهة.

يتسارع الجسم لأن سرعته المتجهة تتغيّر، وبما أن التسارع هو معدّل تغيّر السرعة المتجهة؛ يتبع ذلك أن تسارع الجسم يجب أن يكون في اتجاه التغيّر في السرعة المتجهة نفسه أيّ نحو مركز الدائرة، وهذا منطقيّ؛ لأنه ووفقًا

للمعادلة $\vec{F} = m\vec{a}$ يكون تسارع الجسم ($\vec{a}$) في اتجاه القوة المركزية نفسها ($\vec{F}$):

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

ويُطلق على التسارع في الحركة الدائرية **بالتسارع المركزي Centripetal acceleration** لأنه دائمًا في اتجاه مركز المسار الدائري.

مصطلحات علمية

التسارع المركزي Centripetal acceleration: هو تسارع جسم ما باتجاه مركز الدائرة عندما يتحرك الجسم بسرعة ثابتة على مسار تلك الدائرة.

التسارع بسرعة ثابتة

الآن وبعد أن علمنا أن القوة المركزية ($\vec{F}$) والتسارع المركزي ($\vec{a}$) يكون اتجاههما دائمًا عموديًا على اتجاه السرعة المتجهة ($\vec{v}$) لجسم يتحرك على المسار الدائري يمكننا تفسير سبب بقاء مقدار سرعة الجسم ثابتة، فإذا كانت القوة هي التي تجعل الجسم يغيّر مقدار سرعته فإنه يجب أن يكون لها مركّبة في اتجاه السرعة المتجهة للجسم؛ ويجب أن توفر كذلك قوة دفع بالاتجاه الذي يتحرك فيه الجسم فعلًا، ولكن القوة هنا تصنع زاوية °90 مع السرعة المتجهة؛ لذلك ليس لها أي مركّبة في الاتجاه المطلوب (مركّبة القوة في اتجاه السرعة المتجهة $F \cos 90° = 0$)، وتعمل القوة المركزية على شدّ الجسم ليبقى متحركًا على المسار الدائري دون زيادة أو نقصان في مقدار السرعة.

يمكنك أيضًا استخدام فكرة الشغل المبذول لتبيّن أن سرعة الجسم المتحرك على المسار الدائري تبقى كما هي، فالشغل المبذول بواسطة قوة ما يساوي حاصل ضرب القوة في المسافة التي يقطعها الجسم باتجاه القوة، والمسافة التي يقطعها الجسم باتجاه القوة المركزية تساوي صفرًا؛ ولذلك فإن الشغل المبذول يساوي صفرًا، فإذا لم يبذل أي شغل على الجسم فإنه يجب أن تبقى طاقة الحركة للجسم كما هي وبالتالي لا تتغيّر سرعته.

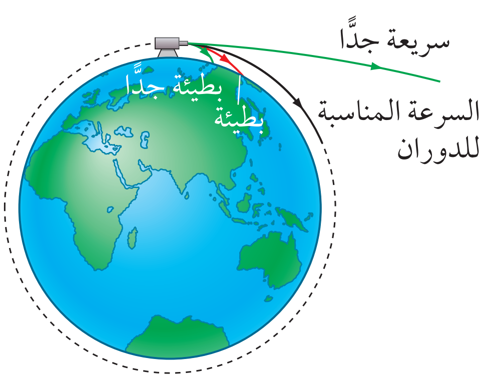
سؤال

١٢) يتحرك جسم على مسار دائري بسرعة ثابتة. صِف كيف تتغيّر كل من الكميات الآتية في أثناء حركة الجسم في هذا المسار: السرعة، السرعة المتجهة، طاقة الحركة، كمية التحرك، القوة المركزية، التسارع المركزي (اعتمادًا على كل من المقدار والاتجاه، وبحسب الملائم منهما).

فهم الحركة الدائرية

ابتكر إسحق نيوتن (Isaac Newton) تجربة فكرية بارعة تسمح لنا بالتفكير في كيفية بقاء جسم ما في مسار دائري حول الأرض، إذ افترض أن مدفعًا كبيرًا موضوع في قمة عالية على سطح الأرض بحيث يمكن إطلاق القذائف أفقيًا. يبيّن الشكل ٦–٩ ما سيحدث إذا أطلقنا قذائف بسرعات مختلفة.

فإذا أُطلقت القذيفة ببطء شديد فستشدّ الجاذبية الأرضية القذيفة إلى الأسفل نحو الأرض وستهبط القذيفة في مسافة قريبة من المدفع؛ أمّا إذا زادت السرعة الابتدائية فيؤدي ذلك إلى هبوط القذيفة بعيدًا عن المدفع.



الشكل ٦–٩ تجربة نيوتن الفكرية.

وإذا حاولنا إطلاق قذيفة أسرع قليلًا من ذي قبل فإن القذيفة ستندفع على طول مسار حول الأرض ولكن علينا إطلاق القذيفة بالسرعة الابتدائية المناسبة لحدوث ذلك، فعندما تُجذب القذيفة إلى الأسفل باتجاه الأرض فإن السطح المقوّس للأرض يجعل القذيفة تتّبع مسارًا دائريًا باستمرار تحت تأثير الجاذبية ولكنها لا تقترب أبدًا من سطح الأرض.

أما إذا أطلقت القذيفة بسرعة كبيرة فإنها ستندفع إلى الفضاء ولن تتحرك على مسار دائري. يمكننا أن نستنتج أن هناك قيمة واحدة للسرعة لتحقيق مسار دائري تحت تأثير الجاذبية كما سترى لاحقًا (لاحظ أننا تجاهلنا تأثير مقاومة الهواء في هذه المناقشة).

٦-٦ حساب التسارع المركزي والقوة المركزية

إذا أدرنا السدادة في مسار دائري (الشكل ٦-٦)، فإننا نستطيع استنتاج العوامل التي تحدد القوة المركزية ($\vec{F}$) المطلوبة لإبقاء السدادة على مسارها الدائري، فكلما ازدادت كتلة السدادة (m) وازداد مقدار سرعتها المتجهة ($\vec{v}$) ازدادت القوة ($\vec{F}$) المطلوبة، أما إذا ازداد نصف قطر الدائرة (r) فإن ($\vec{F}$) تصبح أصغر.

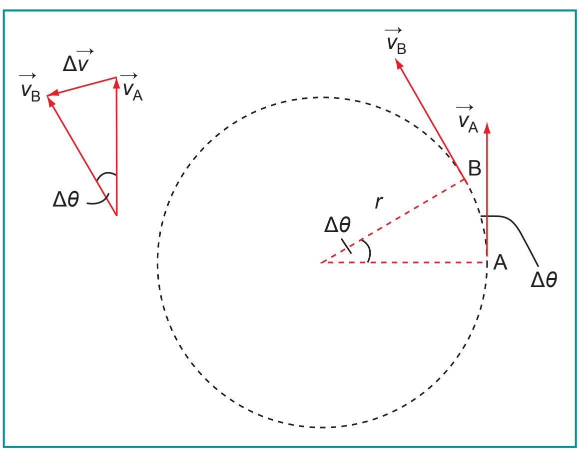
الآن نستطيع التعبير عن التسارع المركزي لجسم يتحرك على مسار دائري بسرعة ثابتة.

يبيّن الشكل ٦-١٠ جُسيمًا يتحرك على مسار دائري، فهو يتحرك خلال زمن (Δt) بزاوية ($\Delta\theta$) من A إلى B حيث تبقى سرعته ثابتة لكن سرعته المتجهة تتغير بمقدار ($\Delta\vec{v}$) كما هو مبيّن في مخطط المتجهات، وبما أن الزاوية الصغيرة جدًا في هذا المثلث هي أيضًا ($\Delta\theta$) يمكننا القول أن:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta v}{v}$$

وبقسمة طرفَي هذه المعادلة على (Δt) وبإعادة الترتيب، نحصل على:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v\Delta\theta}{\Delta t}$$



الشكل ٦-١٠ توضيح استنتاج التسارع المركزي.

الكمية إلى اليسار هي $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$، وهي تسارع الجُسيم.

في الكمية إلى اليمين $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ تساوي ω، وهي السرعة الزاوية، وبالتعويض عنهما في المعادلة نحصل على:

$$a = v\,\omega$$

باستخدام $v = \omega r$، يمكننا التعويض عن (ω) في هذه المعادلة لنحصل على:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

حيث (a) هي التسارع المركزي، و (v) السرعة، و (r) نصف قطر الدائرة.

$$a = \frac{v^2}{r}$$
$$a = r\,\omega^2$$

سؤال

١٣ أثبت أن المعادلة المكافئة للتسارع المركزي هي $a = \omega^2 r$.

قانون نيوتن الثاني للحركة

الآن وبعد أن أصبح لدينا معادلة تسارع مركزي يمكننا استخدام قانون نيوتن الثاني للحركة لاستنتاج معادلة القوة المركزية، فإذا كتبنا القانون $\vec{F} = m\vec{a}$ بدلالة التسارع المركزي فسنجد أن القوة المركزية:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

$$F = mr\omega^2$$

تذكّر أن الجسم يتسارع في اتجاه القوة المحصلة المؤثرة عليه، وأن ذلك يعني أن كلًا من ($\vec{F}$) و ($\vec{a}$) لهما الاتجاه نفسه، أي نحو مركز الدائرة.

أسئلة

١٤ احسب الفترة الزمنية التي تستغرقها كرة لتدور حول الأرض مرة واحدة، فوق السطح مباشرة، بسرعة ($7920\ m\ s^{-1}$). (نصف قطر الأرض $6400\ km$).

١٥ يُدوّر حجر كتلته ($0.20\ kg$) مربوط في طرف خيط حول دائرة رأسية، نصف قطرها ($30\ cm$). سينقطع الخيط عندما يتجاوز الشدّ فيه ($8.0\ N$). احسب السرعة القصوى التي يمكن أن يُدوّر بها الحجر دون أن ينقطع الخيط.

١٦ محطة الفضاء الدولية كتلتها (350) طنًا، وتدور حول الأرض على ارتفاع متوسطه ($340\ km$)، حيث يكون تسارع الجاذبية ($8.8\ m\ s^{-2}$). نصف قطر الأرض ($6400\ km$).

احسب:

أ. القوة المركزية لمحطة الفضاء.

ب. السرعة التي تدور بها.

ج. الزمن المستغرق لكل دورة حول الأرض.

د. عدد المرات التي تدور فيها حول الأرض كل يوم.

١٧ تتحرك شاحنة لعبة كتلتها ($0.40\ kg$) على مسار دائري أفقي نصف قطره ($0.50\ m$). فتعمل ثلاث دورات كاملة كل ($10\ s$). احسب:

أ. سرعتها.

ب. تسارعها المركزي.

ج. القوة المركزية التي تؤثر عليها.

١٨ يدور كوكب المريخ حول الشمس مرة كل 687 يومًا على بُعد ($2.3 \times 10^{11}\ m$) من الشمس. كتلة المريخ ($6.4 \times 10^{23}\ kg$).

احسب:

أ. متوسط سرعته بوحدة المتر في الثانية.

ب. تسارعه المركزي.

ج. قوة الجاذبية التي تؤثر عليه بواسطة الشمس.

حساب السرعة المدارية

يمكننا استخدام معادلة القوة المركزية لحساب السرعة التي يجب أن يمتلكها جسم ما للدوران حول الأرض بسرعة ثابتة تحت تأثير الجاذبية كما في تجربة نيوتن الفكرية. إن القوة المركزية اللازمة هي $F = \frac{mv^2}{r}$. تنشأ هذه القوة بواسطة الجاذبية الأرضية (mg)، وبالتالي فإن:

$$mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$g = \frac{v^2}{r}$$

حيث ($g = 9.81\ \mathrm{m\ s^{-2}}$) هو تسارع السقوط الحر بالقرب من سطح الأرض، ونصف قطر مدار الجسم يساوي نصف قطر الأرض، أي نحو ($6400\ \mathrm{km}$). ومن هنا نحصل على:

$$9.81 = \frac{v^2}{(6.4 \times 10^6)}$$

$$v^2 = 9.81 \times (6.4 \times 10^6)$$

$$v = \sqrt{9.81 \times (6.4 \times 10^6)}$$

$$v \approx 7.9 \times 10^3\ \mathrm{m\ s^{-1}}$$

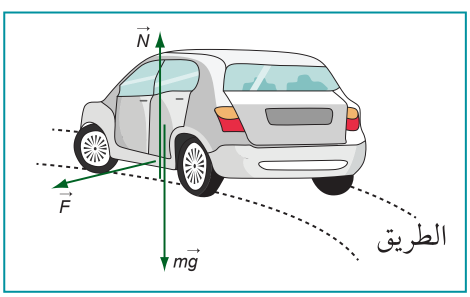
٦-٧ مصدر القوة المركزية

من المفيد دراسة حالة أو حالتَين لا يتضح فيهما الأصل الفيزيائي للقوة المركزية بصورة مباشرة. ستلاحظ في كل حالة أن القوة المؤثرة على الجسم المتحرك في مسار دائري ليست متزنة - أيّ أن هناك قوة محصلة - فالجسم الذي يتحرك على طول مسار دائري لا يكون في حالة توازن، والقوة المحصلة التي تؤثر عليه هي قوة مركزية.

١. تنعطف سيارة على طريق مقوّس مستوٍ (الشكل ٦-١١). تؤثر هذه الطريق على السيارة بقوّتَين:

القوة ($\vec{N}$) وهي قوة تلامس عمودية تتزن مع وزن السيارة ($m\vec{g}$)، إذ ليس للسيارة أي تسارع في الاتجاه الرأسي.

والقوة الثانية هي قوة الاحتكاك ($\vec{F}$) بين الإطارات وسطح الطريق، وهذه هي القوة المركزية غير المتزنة، فإذا لم توفر الطريق أو الإطارات احتكاكًا كافيًا، فلن تدور السيارة حول المنعطف على طول المسار المطلوب، إذًا يوفر الاحتكاك بين الإطارات والطريق القوة المركزية اللازمة للحركة الدائرية للسيارة.



الشكل ٦-١١ تتحرك هذه السيارة مبتعدةً عنا وتنعطف إلى اليسار. يوفر الاحتكاك القوة المركزية. ($\vec{F}$) و ($\vec{N}$) هما على التوالي قوتا التلامس العمودية والاحتكاك التي توفرها ملامسة الإطارات الأربعة للطريق.

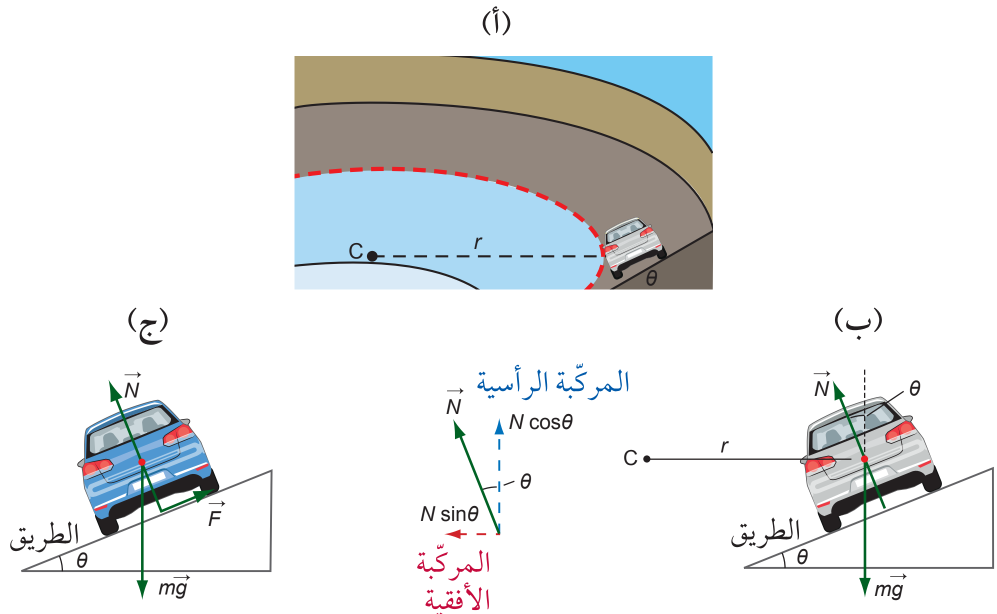
٢. تنعطف سيارة في طريق مقوّس مائل وينحدر سطحه إلى الداخل (الشكل ٦-١٢ أ و ب)، يكون هنا لقوة التلامس العمودية ($\vec{N}$) مركّبة أفقية يمكنها أن توفر قوة مركزية، في حين تتزن المركبة الرأسية لـ ($\vec{N}$) مع وزن السيارة، وبالتالي:

رأسيًا $\quad N\cos\theta = mg$

أفقيًا $\quad N\sin\theta = \frac{mv^2}{r}$

حيث (r) نصف قطر المنعطف الدائري و (v) سرعة السيارة.

إذا كانت السيارة تتحرك حول المنعطف ببطء شديد فإنها ستميل إلى الانزلاق إلى أسفل المنحدر وسيعمل الاحتكاك باتجاه أعلى المنحدر لإبقائها في مسارها (الشكل ٦- ١٢ ج). أمّا إذا تحركت بسرعة كبيرة فستميل إلى الانزلاق إلى أعلى المنحدر، وإذا كان الاحتكاك غير كافٍ، فإنها ستتحرك إلى أعلى المنحدر وتخرج عن الطريق.

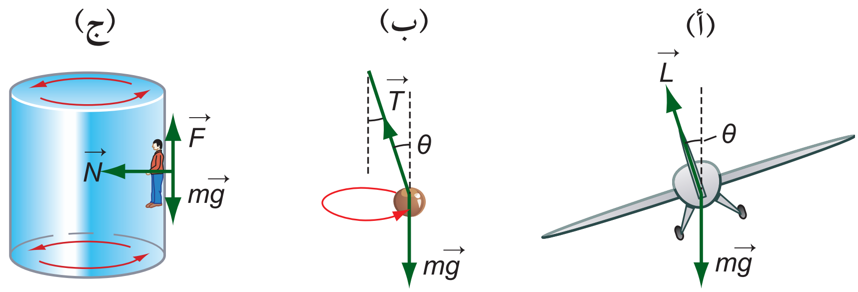


الشكل ٦-١٢ (أ) سيارة على مسار مقوّس مائل. (ب) يمكن أن توفر المركّبة الأفقية لقوة التلامس العمودية، على طريق مائل ينحدر سطحه إلى الداخل، القوة المركزية اللازمة للانعطاف. (ج) يعمل الاحتكاك لسيارة بطيئة السرعة باتجاه أعلى المنحدر لمنع السيارة من الانزلاق إلى الأسفل.

٣. تميل الطائرات في أثناء الطيران (الشكل ٦-١٣ أ) إلى تغيير اتجاهها، حيث يوجه الطيار أجنحة الطائرة، عندها تتزن المركبة الرأسية لقوة الرفع ($\vec{L}$) في الأجنحة مع الوزن، وتوفر المركّبة الأفقية لقوة الرفع ($\vec{L}$) القوة المركزية.

٤. يدور حجر مربوط في طرف خيط في دائرة أفقية. يُعرف هذا التركيب باسم البندول المخروطي الشكل (الشكل ٦-١٣ ب). المركّبة الرأسية لقوة الشدّ ($\vec{T}$) تساوي وزن الحجر. توفر المركّبة الأفقية لقوة الشدّ القوة المركزية للحركة الدائرية.

٥. كلّما دارت لعبة الأسطوانة في الملاهي (Fairground) (الشكل ٦-١٣ ج)، تدفعك الأرضية بعيدًا، فالاحتكاك يتزن مع وزنك، وتوفر قوة التلامس العمودية للجدار القوة المركزية فتشعر وكأنك تُدفع إلى الوراء باتجاه الجدار؛ ما تشعر به هو دفع الجدار في ظهرك.



الشكل ٦-١٣ ثلاث طرائق أخرى لتوفير القوة المركزية.

لاحظ أن الحالات الثلاث المبيّنة في الأشكال ٦-١٢ (ب) و ٦-١٣ (أ) و ٦-١٣ (ب) متشابهة، حيث تؤثر قوة وزن الجسم المتحرك إلى الأسفل، والقوة الثانية لها مركّبة رأسية تتزن مع قوة وزن الجسم ومركّبة أفقية تمثل القوة المركزية.

أسئلة

١٩) وضّح سبب استحالة تدوير سدادة مربوطة في نهاية خيط بحيث يبقى الخيط أفقيًا تمامًا.

٢٠) وضّح سبب ميل الطائرة إلى فقدان ارتفاعها عندما تميل من أجل الانعطاف ما لم يزد الطيار من سرعته بحيث يوفر مزيدًا من الرفع.

٢١) إذا سبق لك أن تزحلقت إلى أسفل مجرى مائي لولبي (الصورة ٦-٢) فقد تكون لاحظت أنك تنزلق إلى الجانب العلوي وأنت تدور حول المنعطف. وضّح كيف يوفر هذا التزحلق القوة المركزية اللازمة لدفعك حول المنعطف. وضّح سبب انزلاقك إلى الجانب العلوي بنسبة أكبر إذا كنت تتحرك أسرع.

الصورة ٦-٢ المنزلق المائي مكان جيد لتجربة القوى المركزية.

ملخّص

يمكن قياس الزوايا بوحدة الراديان. والزاوية 2π rad تساوي ($360°$).
يكون للجسم حركة دائرية منتظمة إذا تحرك بسرعة ثابتة على طول مسار دائري.
الإزاحة الزاوية θ هي قياس الزاوية التي يتحرك خلالها الجسم في دائرة أو جزء من دائرة.
السرعة الزاوية (ω) هي المعدل الذي تتغير به الإزاحة الزاوية: $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$
ترتبط السرعة والسرعة الزاوية لجسم يتحرك بحركة دائرية منتظمة، بالعلاقة: $v = \omega r$.
الجسم المتحرك في مسار دائري لا يكون في حالة اتزان؛ فهناك قوة محصلة تؤثر عليه.
القوة المحصلة المؤثرة على جسم يتحرك بسرعة ثابتة على مسار دائري تتجه نحو مركز الدائرة وتكون عمودية على السرعة المتجهة للجسم.
التسارع المركزي (a) لجسم يتحرك على مسار دائري يُعطى بالعلاقة: $a = \frac{v^2}{r} = r\omega^2$
مقدار القوة ($\vec{F}$) المؤثرة على جسم كتلته (m) يتحرك بسرعة (v) في دائرة نصف قطرها (r) يُعطى بالعلاقة: $F = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2$

أسئلة نهاية الوحدة

١ ما العبارة الصحيحة مما يأتي؟

أ. توجد قوة محصلة تؤثر في جسم يتحرك على طول مسار دائري بسرعة ثابتة بعيدًا عن مركز الدائرة ما يتسبب في دفعه إلى الخارج.

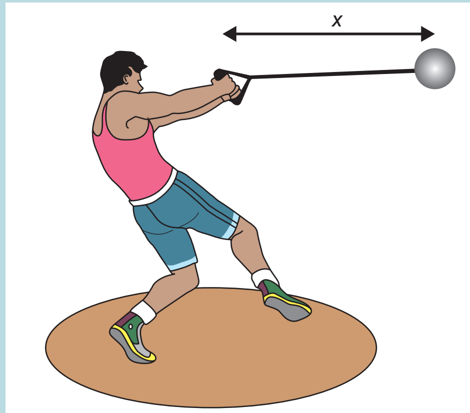
ب. توجد قوة محصلة تؤثر في جسم يتحرك على طول مسار دائري بسرعة ثابتة باتجاه مركز الدائرة ما يتسبب في دفعه إلى الخارج.

ج. توجد قوة محصلة تؤثر في جسم يتحرك على طول مسار دائري بسرعة ثابتة باتجاه مركز الدائرة ما يتسبب في تحركه في مسار دائري.

د. مقدار القوة المحصلة، التي تؤثر في جسم يتحرك على طول مسار دائري بسرعة ثابتة، هو صفر؛ لأنه في حالة اتزان.

٢ في رياضة رمي المطرقة يقوم رياضي بأرجحة كرة مربوطة بسلسلة في مسار دائري، حيث نصف قطر المسار الدائري للكرة هو (x)، كما هو موضح في الشكل ٦-١٤.

تابع



الشكل ٦-١٤

في أيّة حالة تكون القوة المركزية هي الأكبر؟

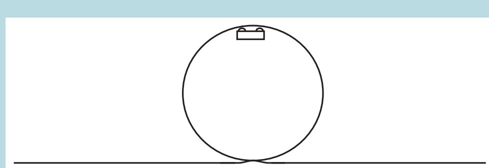
	نصف قطر المسار الدائري x (m)	سرعة مركز كتلة الكرة (m s^{-1})
أ	0.90	9.0
ب	0.90	10.0
ج	1.00	9.0
د	1.00	10.0

الجدول ٦-١

٣ **أ.** اشرح المقصود بالراديان.

ب. يتحرك جسم حول مسار دائري بسرعة ثابتة ويكمل دورة واحدة في (15 s). احسب السرعة الزاوية للجسم.

٤ يوضح الشكل ٦-١٥ جزءًا من مسار قطار الملاهي (الأفعوانة) حيث تدور العربة في الحلقة، وعندما تكون العربة في الموقع المشار إليه لا توجد قوة رد فعل بين عجلات العربة والمسار. قطر الحلقة في المسار (8.0 m).



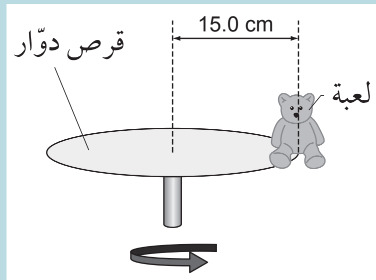
الشكل ٦-١٥

أ. ما الذي يوفر القوة المركزية لإبقاء العربة تتحرك على مسار دائري؟ اشرح إجابتك.

ب. إذا علمت أن تسارع الجاذبية الأرضية (g) يساوي ($9.8\ \text{m s}^{-2}$) فاحسب سرعة العربة.

تابع

٥ يبيّن الشكل ٦-١٦ لعبة كتلتها (60 g) موضوعة على حافة قرص دوّار.

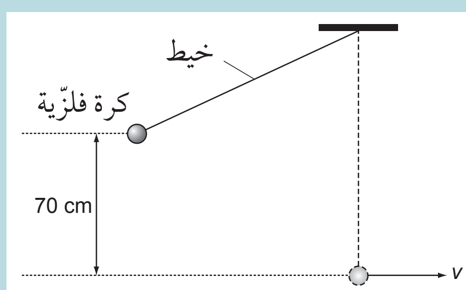


الشكل ٦-١٦

أ. نصف قطر القرص الدوّار (15.0 cm) ويدور 20 دورة لكل دقيقة. احسب القوة المحصلة التي تؤثر في اللعبة.

ب. وضّح سبب سقوط اللعبة عندما تزداد سرعة القرص الدوّار.

٦ ثُبّت أحد طرفَي خيط – طوله (1.50 m) – بسقف وربُطت كرة فلزية كتلتها (50 g) بالطرف الآخر. كانت الكرة في البداية ساكنة في الوضع الرأسي، ثم رُفعت الكرة رأسيًا إلى ارتفاع (70 cm) كما هو مبيّن في الشكل ٦-١٧. بعد أن تحرّرت الكرة تحركت على طول قوس دائري يمر عبر الموضع الرأسي للكرة.



الشكل ٦-١٧

أ. بإهمال تأثير مقاومة الهواء، احسب سرعة الكرة (v) في أثناء مرورها بالوضع الرأسي.

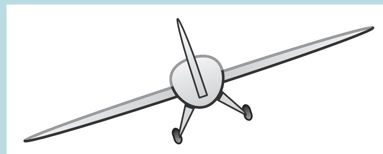
ب. احسب مقدار قوة الشد ($\vec{T}$) في الخيط عندما تمر الكرة بالوضع الرأسي.

ج. وضّح السبب في أن إجابتك في الجزئية (ب) لا تساوي وزن الكرة.

٧ تحركت سيارة حول منعطف فعبَرت فوق بقعة زيت، فانزلقت السيارة عن الطريق إلى حافة عشبية. اشرح حسب فهمك للحركة الدائرية سبب خروج السيارة عن الطريق.

تابع

٨ يوضح الشكل ٦-١٨ مَيل طائرة بغرض القيام بانعطاف أفقي. تطير الطائرة بسرعة ($75\ m\ s^{-1}$) ونصف قطر مسار الدوران ($800\ m$).



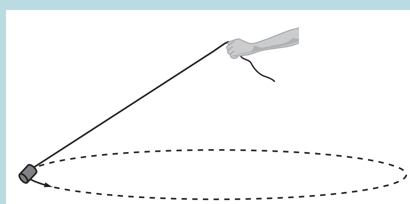
الشكل ٦-١٨

أ. انسخ المخطط (الشكل ٦-١٨) في دفترك، ثم ارسم القوى المؤثرة على الطائرة وسمِّها.

ب. احسب الزاوية التي تصنعها الطائرة مع المحور الأفقي.

٩ **أ.** اشرح المقصود بمصطلح السرعة الزاوية.

ب. يبيّن الشكل ٦-١٩ سدادة مطاطية كتلتها ($200\ g$)، مربوطة في طرف خيط، تتحرك السدادة في دائرة أفقية نصف قطرها ($40\ cm$). يصنع الخيط زاوية $56°$ مع المحور الرأسي.



الشكل ٦-١٩

احسب:

١. قوة الشدّ في الخيط.

٢. السرعة الزاوية للسدادة.

٣. الزمن المستغرق لإكمال دورة كاملة واحدة.

١٠ **أ.** اشرح المقصود بمصطلح التسارع المركزي.

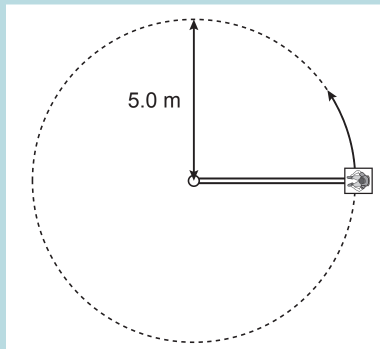
ب. يدير طارق دلوًا من الماء كتلته الكلية ($5.4\ kg$)، في دائرة رأسية قطرها ($1.8\ m$).

١. احسب الحد الأدنى للسرعة التي يجب أن يدور بها الدلو بحيث يبقى الماء في الدلو أعلى الدائرة.

٢. بافتراض أن السرعة تبقى ثابتة، ما مقدار القوة التي ستؤثر بها يد طارق عندما يكون الدلو في أسفل الدائرة؟

تابع

١١ يخضع الطيارون العسكريون في التدريب لاختبارات مختلفة، أحد هذه الاختبارات أن يوضع الطيار في مقعد في نهاية ذراع كبير يُدار بسرعة عالية كما هو مبيّن في الشكل ٦-٢٠.



الشكل ٦-٢٠

أ. صِف ما سيشعر به الطيار رابطًا ذلك بالقوة المركزية.

ب. سيخضع الطيار عند السرعة القصوى لقوة مركزية مكافئةً لستة أمثال وزنه (6 mg).

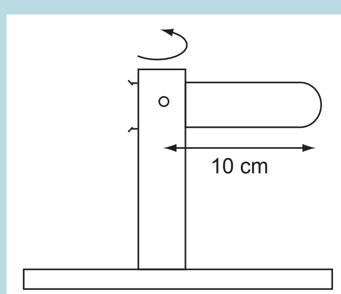
١. احسب سرعة الطيار في هذا الاختبار.

٢. احسب عدد الدورات التي يدورها الطيار في الدقيقة.

ج. اقترح سبب ضرورة أن يكون الطيارون قادرين في هذا التدريب على مواجهة قوى من هذا النوع.

١٢ **أ.** بيّن أنه في دورة واحدة يوجد (2π rad).

ب. يبيّن الشكل ٦-٢١ جهاز طرد مركزي يستخدم لفصل الجسيمات الصلبة المعلقة في سائل أقل كثافة. يُدار الوعاء بمعدل 540 دورة في الدقيقة.



الشكل ٦-٢١

١. احسب السرعة الزاوية للوعاء.

٢. احسب القوة المركزية في جسيم كتلته (20 mg) في نهاية أنبوب الاختبار.

ج. من الطرائق البديلة لفصل الجسيمات عن السائل السماح لها بالاستقرار في قاع وعاء ساكن تحت تأثير الجاذبية، اشرح من خلال مقارنة القوى المتضمنة سبب اعتبار أجهزة الطرد المركزي طريقة أكثر فاعلية لفصل الخليط.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أعرّف الراديان وأستخدمه كوحدة للإزاحة الزاوية.	٦–٢			
أفهم مصطلح السرعة الزاوية.	٦–٤			
أتذكر السرعة الزاوية وأستخدم العلاقة: $\omega = \frac{2\pi}{T}$ حيث T هو الزمن الذي تستغرقه دورة واحدة كاملة.	٦–٤			
أتذكر علاقة السرعة الزاوية وأستخدمها $v = r\omega$.	٦–٤			
أفهم أن القوة المؤثرة في جسم يدور في دائرة تكون باتجاه مركز الدائرة وتسمى القوة المركزية.	٦–٥			
أدرك أن القوة المركزية تكون بزاوية قائمة مع السرعة المتجهة للجسم.	٦–٥			
أدرك أن القوة المركزية تسبب التسارع المركزي.	٦–٥			
أدرك أن القوة المركزية الثابتة المقدار تسبب حركة دائرية بسرعة زاوية ثابتة.	٦–٥			
أتذكر العلاقة الآتية وأستخدمها: $a = \frac{v^2}{r} = r\omega^2$	٦–٦			
أتذكر العلاقة الآتية وأستخدمها: $F = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2$	٦–٦			
أحدد القوة المركزية لجسم يتحرك حركة دائرية.	٦–٧			

الوحدة السابعة

الاهتزازات Oscillations

أهداف التعلّم

٧-١ يعرّف مصطلحات الإزاحة والسعة والزمن الدوري والتردّد والتردّد الزاوي وفرق الطور للحركة الاهتزازية، ويستخدمها.

٧-٢ يوضح العلاقة بين التردّد والتردّد الزاوي ويستخدم المعادلة $\omega = 2\pi f$.

٧-٣ يستخدم المعادلتَين الآتيتَين للزمن الدوري في الحركة الاهتزازية: $T = \frac{1}{f}$ و $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

٧-٤ يذكر أن الحركة التوافقية البسيطة تحدث عندما يتناسب التسارع طرديًا مع الإزاحة من نقطة الاتزان ولكن بالاتجاه المعاكس ويطبقها.

٧-٥ يحلّل منحنيات التمثيل البياني لتغيرات الإزاحة والسرعة والتسارع للحركة التوافقية البسيطة، ويفسّرها.

٧-٦ يستخدم المعادلة $a = -\omega^2 x$ ويتذكر أن المعادلة $x = x_0 \sin(\omega t)$ هي حل لهذه المعادلة ويستخدمها.

٧-٧ يستخدم المعادلتَين $v = v_0 \cos(\omega t)$ و $v = \pm\,\omega\sqrt{x_0^2 - x^2}$ في حل المسائل.

٧-٨ يصف التبادل بين طاقة الحركة وطاقة الوضع أثناء الحركة التوافقية البسيطة.

٧-٩ يستخدم المعادلة $E = \frac{1}{2} m\omega^2 x_0^2$ للطاقة الكلية لنظام يخضع لحركة توافقية بسيطة.

٧-١٠ يذكر أن القوة المقاومة هي القوة التي تؤثر على النظام المهتز فتسبب تخميده.

٧-١١ يستخدم مصطلحات التخميد الضعيف والحرج والقوي.

٧-١٢ يرسم التمثيلات البيانية (الإزاحة-الزمن) التي توضح التخميد الضعيف والحرج والقوي.

٧-١٣ يشرح أن الرنين ينطوي على أقصى سعة للاهتزازات، وأن هذا يحدث عندما يُجبر النظام المهتز على الاهتزاز قسريًا بتردده الطبيعي.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

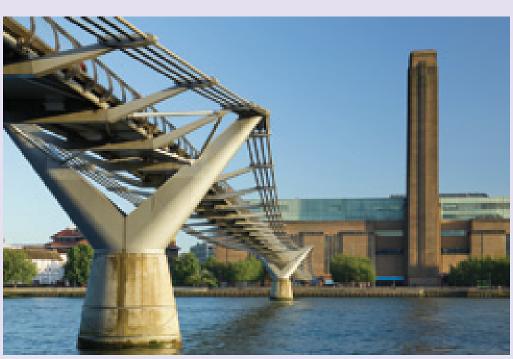
- انظر إلى الأجسام التي تهتز أو تتحرك بشكل متكرّر، مثل بندول الساعة، أو كتلة متصلة بطرف زنبرك، أو لعبة يويو مربوطة بخيط، أو فرع شجرة عند هبوب الرياح، أو أجنحة حشرة وهي تطير. اكتب ثلاثة أمثلة أخرى، وكن مستعدًا لمشاركتها مع زملائك.
- ما المشترك بين حركة هذه الأجسام؟ وما الاختلافات الموجودة بينها؟ ناقش ذلك مع زملائك.

العلوم ضمن سياقها

الاهتزازات والهندسة

يحتاج المصممون عند تصميم منتجات جديدة إلى أخذ الاهتزازات غير المرغوب فيها بالحسبان، سواء كانت هذه المنتجات مكنسة كهربائية، أو جسرًا، أو فرشاة أسنان كهربائية، أو طائرة.

تبيّن الصورة ٧-١ جسر الألفية للمشاة فوق نهر التايمز في لندن. تميز الجسر بتصميم عصري: فهو جسر معلّق من دون أبراج كبيرة داعمة، والتي تُعدّ بشكل عام جزءًا لا يتجزأ من تصميم الجسور المعلقة. لقد بُني هذا الجسر احتفالًا بالألفية الجديدة كونه أحدث معبر يُبنى فوق نهر التايمز منذ أكثر من 100 عام، وقد افتُتح في العاشر من يونيو عام 2000 للميلاد.



الصورة ٧-١ جسر الألفية للمشاة فوق نهر التايمز في لندن.

العلوم ضمن سياقها (تابع)

إلّا أنه أُغلق بعد يومين من افتتاحه عندما اكتشف المهندسون أنه يتعرض للتأرجح والالتواء إذا اكتظّ بالمارة، وما زاد الأمر سوءًا أن الناس عندما كانوا يعدّلون في مشيتهم تلقائيًا لتتوافق خطواتهم مع حركات الجسر كان الجسر يزداد تأرجحًا.

استغرق الأمر ما يقارب عامَين قبل أن يتمكّن المهندسون من حل هذه المشكلة وإعادة افتتاحه بتكلفة تقارب الخمسة ملايين جنيه إسترليني!

لماذا تعتقد أن على المصمم الذي يعمد إلى تصميم فرشاة أسنان كهربائية جديدة أن يكون على دراية بتأثير الاهتزازات؟

لا تكمن الخطورة في الاهتزازات الكبيرة فقط؛ فالاهتزازات الصغيرة والمتكرّرة تتسبب في إحداث تشققات في المعادن، فمثلًا إذا ثنيت صفيحة رقيقة من معدن ما إلى الأمام وإلى الخلف عدة مرات فسيصبح ثنيها أسهل، ثم إن ثنيها بعد ذلك عدة مرات أخرى يُضعف من متانتها وتصبح عرضة للقطع، وهذا مثال واضح على إجهاد المعادن؛ إذ تتسبب الاهتزازات الصغيرة التي تتكرّر بدرجة كافية في إحداث تشققات مجهرية عند نقاط عالية الإجهاد (stress) ما تلبث أن تزداد وفي النهاية تنهار بُنية المعدن.

لقد عانت أول طائرة ركاب نفاثة من طراز دي هافيلاند كومت من هذه المشكلة، وبعد تحطم طائرتَين منها في الجو منعت الشركة المصنّعة جميع الطائرات من الطيران، وقد أجري تحقيق دقيق في الأمر خلص فيه المهندسون إلى أن السبب الأكثر احتمالًا لحوادث تحطم تلك الطائرات هو إجهاد المعادن عند النقاط عالية الإجهاد بالقرب من زوايا النوافذ المربعة الشكل «تقريبًا». ربما لاحظت أن النوافذ في الطائرات الحديثة تميل إلى الشكل البيضاوي من أجل تجنب النقاط عالية الإجهاد الموجودة في زوايا الشكل المربع.

٧-١ الاهتزازات الحرة والقسرية

نشعر بالاهتزازات والتذبذبات في كل مكان، فالطائر في أثناء تحليقه يرفرف بجناحيه إلى الأعلى وإلى الأسفل، وأجنحة الطائرة تهتز أيضًا إلى الأعلى وإلى الأسفل، ولكن هذا الاهتزاز ليس هو الطريقة التي تطير بها الطائرة؛ إذ إن أجنحتها طويلة ورفيعة وتهتز قليلًا لأنها ليست مصمتة كليًا، والكثير من الهياكل الأخرى تهتز أيضًا كالجسور التي تهتز عندما تتدفق عبرها حركة المرور، وكذلك المباني في مواجهة الرياح الشديدة.

المصطلح الأكثر تحديدًا من التذبذب هو **الاهتزاز Oscillation**، يهتز الجسم عندما يتحرك بشكل متكرّر على جانبَي موضع ما يُطلق عليه موضع الاتزان، وعند توقف الجسم عن الاهتزاز فإنه يعود إلى موضع اتزانه.

مصطلحات علمية

الاهتزاز Oscillation: حركة متكرّرة على جانبَي موضع ما يُطلق عليه موضع الاتزان.

نستفيد من الاهتزازات بطرائق عديدة مختلفة، فهي للترفيه (وضع الطفل على الأرجوحة)، وللموسيقى (اهتزازات وتر العود)، وللتوقيت (حركة البندول أو اهتزازات بلورات الكوارتز)، كما أنه عندما نصدر صوتًا فإن جزيئات الهواء تهتز لنقل الطاقة الصوتية، كذلك تهتز ذرات المادة الصلبة أكثر فأكثر كلما ازداد ارتفاع درجة حرارتها.

قد تبدو هذه الأمثلة عن الاهتزازات والتذبذبات مختلفة تمامًا بعضها عن بعض إلّا أنها تشترك في خصائص معيّنة سندرسها في هذه الوحدة.

اهتزاز حرّ أم اهتزاز قسري؟

اهتزاز حرّ

أسهل الاهتزازات للفهم هي الاهتزازات الحرّة، فإذا نقرت على وتر العود فإن الوتر سيستمر في الاهتزاز لبعض الوقت بعد تحريره حيث يهتز وتر العود بتردّد معيّن (عدد الاهتزازات في الثانية) يسمى **التردد الطبيعي Natural frequency** للاهتزاز، والذي يؤدي إلى ظهور النغمة المعيّنة التي تسمعها، وعند تغيير طول الوتر يتغيّر تردده الطبيعي؛ فكلّ جسم مهتز له تردد طبيعي للاهتزاز وهو التردد الذي يهتز به بحرية بعد أن ينزاح أو يضطرب عن موضع الاتزان.

مصطلحات علمية

التردد الطبيعي Natural frequency: التردد الذي يهتز به الجسم عندما لا توجد قوة مقاومة (قوة محصلة خارجية) تؤثر عليه.

اهتزاز قسري

يمكن إجبار العديد من الأجسام على الاهتزاز، فإذا كنت تجلس في حافلة ما فقد تلاحظ أن اهتزازات من المحرك تنتقل إلى جسمك الأمر الذي يجعلك تهتز بالتردد نفسه. هذه ليست اهتزازات حرة لجسمك بل هي اهتزازات قسرية وترددها ليس التردد الطبيعي لاهتزازات جسمك؛ ولكنه التردد القسري بسبب الحافلة.

يمكنك بالطريقة نفسها جعل مسطرة مترية تهتز بالتلويح بها إلى الأعلى وإلى الأسفل؛ ولكن التردد الطبيعي للاهتزاز أكبر بكثير من هذا، يمكنك أن تكتشف ذلك إذا ثبّتَّ أحد طرفَي المسطرة على منضدة ثم دفعت الطرف الآخر إلى الأسفل بسرعة وأبعدت يدك عنه (الصورة ٧-٢).

الصورة ٧-٢ مسطرة تهتز بحرّية بترددها الطبيعي.

سؤال

١ أي الاهتزازات الآتية حرة وأيها قسرية؟

أ. ضربات جناح البعوضة.

ب. حركة البندول في ساعة حائط مثبتة على جدار.

ج. اهتزازات الصنج (آلة موسيقية عبارة عن قرص معدني) بعد طرقها.

د. اهتزاز مبنى في أثناء هزة أرضية.

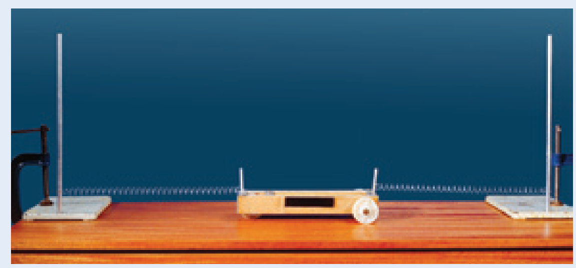
٧-٢ ملاحظة الاهتزازات

العديد من الاهتزازات أسرع وأصغر من أن نلاحظها بسهولة، حيث أن أعيننا لا تستطيع الاستجابة بسرعة كافية إذا كان تردد الاهتزازات أكثر من (5 Hz) (خمس اهتزازات في الثانية)؛ فأي جسم يهتز بتردد أكبر من هذا التردد يظهر بشكل ضبابي، ومن أجل التعرف على الخصائص العامة للأنظمة المهتزة نحتاج إلى إيجاد أنظمة مناسبة تهتز ببطء، والمهارة العملية ٧-١ توضح بعض الأنشطة العملية لاستقصاء الأنظمة المهتزة.

مهارة عملية ٧-١: ملاحظة الاهتزازات البطيئة

نظام كتلة وزنبرك في وضعية أفقية

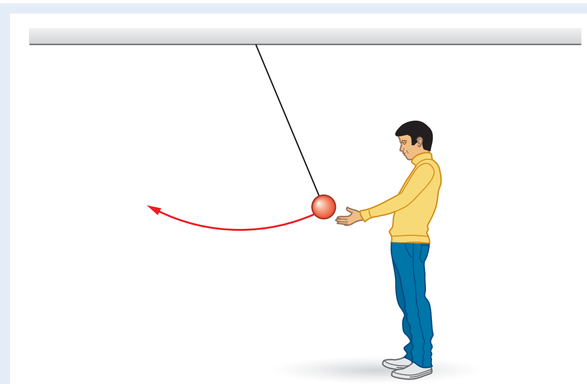
تبيّن الصورة ٧-٣ عربة محمّلة بكتل إضافية مربوطة بزنبركَين متماثلَين مثبّتَين من الجانبَين. حرّك العربة إلى أحد الجانبَين، فستلاحظ أنها تهتز إلى الأمام وإلى الخلف على طول المنضدة. استمع إلى صوت العربة وهي تتحرك. في أي موضع من مسارها تتحرك بسرعة أكبر؟ ماذا يحدث لسرعتها عندما تصل إلى نهايتَي الاهتزاز؟ ماذا يحدث للزنبركَين في أثناء اهتزاز العربة؟



الصورة ٧-٣ تهتز عربة مربوطة بزنبرَكَين بحرّية من جانب إلى آخر.

بندول طويل

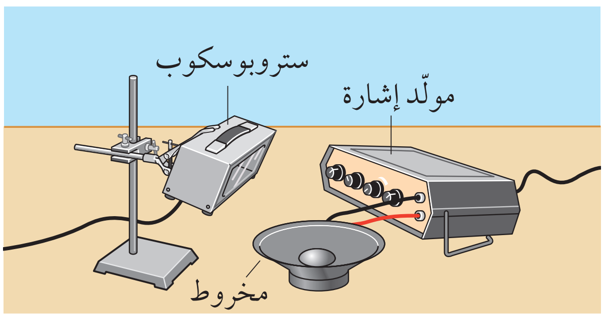
خيط - طوله 2 متر على الأقل - ثُبت أحد طرفَيه في السقف ورُبطت كتلة كبيرة في طرفه الآخر (الشكل ٧-١). اسحب الكتلة مسافة صغيرة إلى أحد الجوانب واتركها تتحرك. سيهتز البندول إلى الأمام وإلى الخلف بالتردد الطبيعي للاهتزاز. حاول ملاحظة خصائص حركته. ما أوجه التشابه بين حركته وحركة العربة المهتزة؟ وما أوجه الاختلاف بينهما؟



الشكل ٧-١ يهتز بندول طويل إلى الأمام وإلى الخلف.

مخروط مكبّر الصوت

ضُبط مولّد إشارة على تردّد منخفض (على سبيل المثال 1 Hz) (الشكل ٧-٢) لتشغيل مكبّر الصوت بحيث يهتز. يجب أن تكون قادرًا على رؤية اهتزاز مخروط مكبّر الصوت.

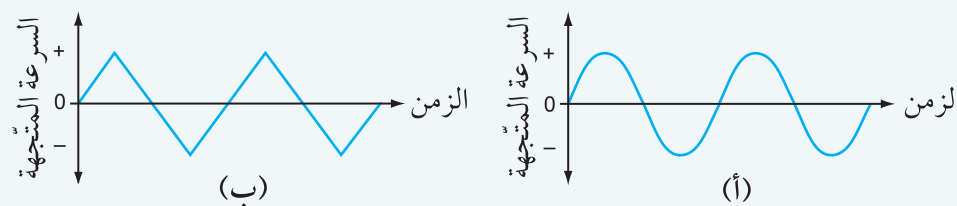


الشكل ٧-٢ مخروط مكبّر الصوت يهتز إلى الأعلى وإلى الأسفل.

كيف تقارن هذه الحركة بحركة البندول والنظام المكوّن من كتلة وزنبرك؟ حاول استخدام تردد أعلى (على سبيل المثال، 100 Hz). استخدم ستروبوسكوبًا إلكترونيًا ومّاضًا بتردد مساوٍ لتردد مولّد الإشارة لتتضح حركة المخروط. (قد يساعدك رسم بقعة بيضاء في وسط المخروط). هل تلاحظ نمط الحركة نفسه كما في المثالَين السابقَين؟

سؤال

٢) إذا كان بإمكانك رسم تمثيل بياني (السرعة المتجهة–الزمن) لأي من الأجسام المهتزة المبيّنة في المهارة العملية ٧–١، فكيف سيكون شكله؟ هل سيكون منحنًى كالذي يظهر في الشكل ٧–٣ (أ)، أو مثلثًا (أسنان منشار) كالذي يظهر في الشكل ٧–٣ (ب)؟



الشكل ٧–٣ تمثيلان بيانيان (السرعة المتجهة–الزمن) محتملان لاهتزاز جسم ما.

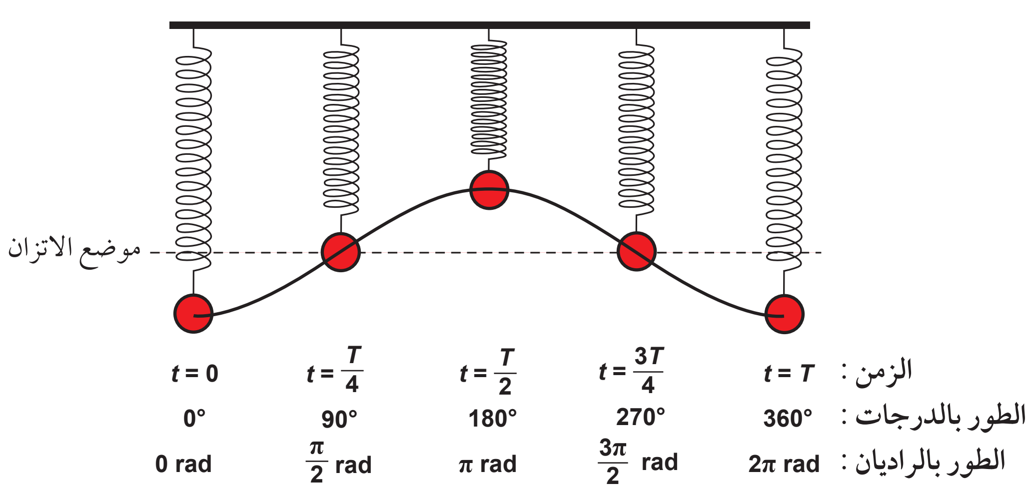
٧-٣ وصف الاهتزازات

كل الأمثلة التي نوقشت حتى الآن تبيّن نمط الحركة نفسه، فالعربة تتسارع في أثناء تحركها باتجاه موضع الاتزان حيث تتحرك بأكبر سرعة في ذلك الموضع، وتتباطأ في أثناء تحركها نحو نهايتَي الاهتزاز، حيث تتوقف للحظة في أبعد موضع، ثم تعكس اتجاه حركتها وتتسارع إلى الخلف نحو موضع الاتزان مرة أخرى.

العديد من المصطلحات والمعادلات المستخدمة لوصف الاهتزازات هي مشتركة مع تلك المستخدمة في الموجات والحركة الدائرية، فالجسم الذي يتحرك بحركة دائرية يمكن أن يوصف بأنه يهتز في بُعدَين في الوقت نفسه.

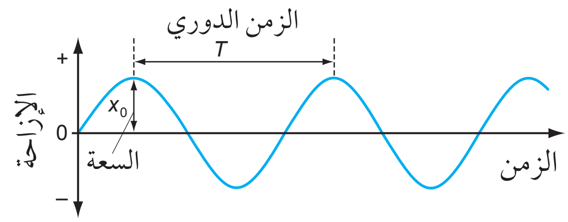
السعة والزمن الدوري والتردد

يبيّن الشكل ٧–٤ كيف يتغير موضع كرة مثبتة بزنبرك تهتز رأسيًا بتغير الزمن. أُزيحت الكرة بدايةً إلى أسفل موضع الاتزان (الخط المتقطع)، ثم تحركت صعودًا حتى أصبحت إزاحتها فوق موضع الاتزان بشكل متناظر مع الموقع الذي وصلت إليه في الأسفل. بعد ذلك تحركت الكرة نزولًا حتى وصلت إلى موضعها الابتدائي في نهاية الاهتزازة.



الشكل ٧–٤ اهتزاز كرة في مواضع مختلفة.

يمكن تمثيل العديد من الأنظمة المهتزة بواسطة التمثيل البياني (الإزاحة–الزمن) مثل ذلك الموضح في الشكل ٧–٥. تتغير **الإزاحة** **Displacement** ($\vec{x}$) على جانبَي نقطة المنتصف (موضع الاتزان)، ويكون شكل هذا التمثيل البياني منحنًى جيبيًا، وتوصف الحركة بأنها جيبية.



الشكل ٧–٥ تمثيل بياني (الإزاحة–الزمن) يوضح السعة والزمن الدوري.

لاحظ أن الإزاحة تتغير بين قيم موجبة وقيم سالبة أثناء تحرك الجسم حول موضع الاتزان، وأقصى إزاحة عن موضع الاتزان تسمى **السعة** **Amplitude** (x_0).

يمكن استخدام التمثيل البياني (الإزاحة–الزمن) لإيجاد الزمن الدوري والتردد للاهتزاز أيضًا. **الزمن الدوري** **Period** (T) هو زمن اهتزازة واحدة كاملة. لاحظ أن الجسم المهتز لكي يكمل اهتزازة واحدة يجب أن ينتقل من أقصى أحد جانبَي الاهتزاز إلى أقصى الجانب الآخر والعودة مرة أخرى (أو ما يعادل هذه الحركة). **التردد** **Frequency** (f) هو عدد الاهتزازات في الثانية، وبالتالي فإن (f) هي مقلوب الزمن الدوري (T):

$$\text{التردُّد} = \frac{1}{\text{الزمن الدوري}}$$

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

ويمكن أيضًا كتابة المعادلة وفق الصيغة:

$$\text{الزمن الدوري} = \frac{1}{\text{التردُّد}}$$

$$\boxed{T = \frac{1}{f}}$$

مصطلحات علمية

الإزاحة Displacement: المسافة والاتجاه المحدّدان من موضع الاتزان إلى موضع الجسم المهتز عند أي لحظة في الاهتزازة.

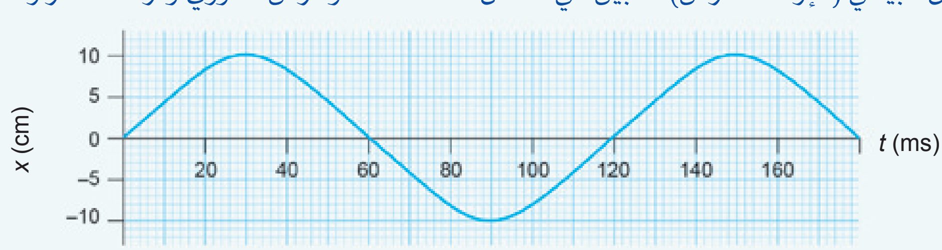
السعة Amplitude: أقصى إزاحة للجسم المهتز عن موضع اتزانه.

الزمن الدوري Period: الزمن الدوري لنظام مهتز هو الزمن المستغرق لعمل اهتزازة واحدة كاملة.

التردد Frequency: عدد الاهتزازات في الثانية أو عدد الموجات التي تعبر نقطة ما في الثانية.

سؤال

٣ حدّد من التمثيل البياني (الإزاحة–الزمن) المبيّن في الشكل ٧–٦، السعة والزمن الدوري وتردد الاهتزازات.



الشكل ٧–٦ تمثيل بياني (الإزاحة–الزمن) لجسم مهتز.

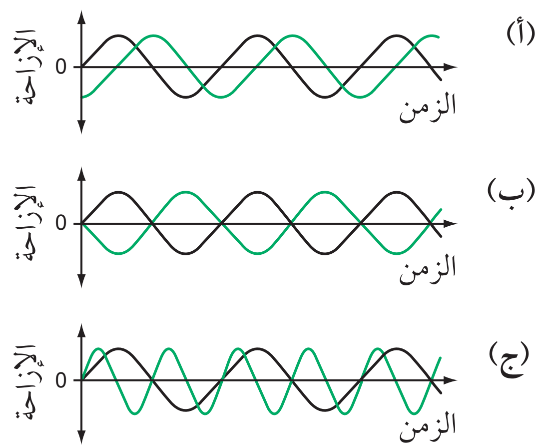
الطور

يعبّر مصطلح **الطور Phase** عن النقطة التي وصلت إليها الكتلة المهتزة بالنسبة إلى الدورة الكاملة لاهتزازة ما، ويقاس الطور إما بالدرجات أو بالراديان، إذ يقع ما بين (0° و 360°) أو (0 و 2π راديان). يبيّن الشكل ٧-٤ الطور في نقاط مختلفة من اهتزاز كرة، وغالبًا ما يكون وصف **فرق الطور Phase difference** بين اهتزازتَين مهمًا، ويبيّن التمثيل البياني في الشكل ٧-٧ (أ) اهتزازتَين متماثلتَين مع وجود فرق طور بينهما؛ أي لا تنطبق إحداهما على الأخرى أو لا تمرّان بالنقطة نفسها في اللحظة الزمنية نفسها، وفي هذا المثال يكون بينهما فرق طور مقداره ربع اهتزازة (90° أو $\frac{\pi}{2}$ rad).

مصطلحات علمية

الطور Phase: النقطة التي وصل إليها الجسم المهتز بالنسبة إلى الدورة الكاملة لاهتزازة ما.

فرق الطور Phase difference: الفرق في طورَي جسمَين مهتزَّين، مقاسًا بالدرجات أو الراديان.

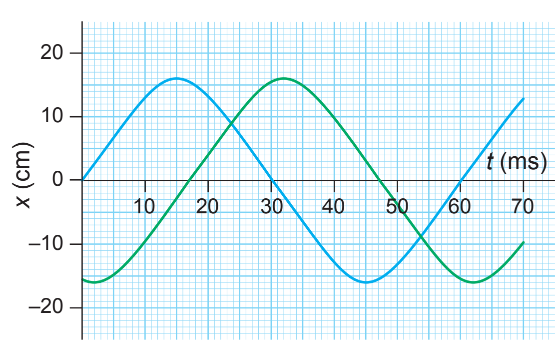


الشكل ٧-٧ توضيح فكرة فرق الطور.

يبين المثال ١ كيف يمكن إيجاد فرق الطور لحركة جسمَين مهتزَين.

مثال

١. **يبيّن الشكل ٧-٨ التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن) لجسمَين مهتزَّين متماثلَين. احسب فرق الطور بين الاهتزازين. أعطِ إجابتك بالدرجات والراديان.**



الشكل ٧-٨ التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن) لجسمَين مهتزَّين لهما الزمن الدوري نفسه.

الخطوة ١: قس الفاصل الزمني (t) بين أي نقطتَين متطابقتَين على منحنيَي التمثيل البياني.

$t = 17$ ms

الخطوة ٢: حدّد الزمن الدوري (T) لاهتزازة واحدة كاملة.

$T = 60$ ms

تلميح: تذكّر أن الاهتزازة الواحدة الكاملة تكون عندما يتحرك الجسم من جانب من جانب إلى آخر ويعود مرة أخرى إلى النقطة نفسها وفي الاتجاه نفسه.

تابع

الخطوة ٣: الآن يمكنك حساب فرق الطور كجزء من اهتزازة.

فرق الطور = جزء من اهتزازة واحدة

وبالتالي:

فرق الطور = $\frac{t}{T}$

$= \frac{17}{60}$

$= 0.28$

يمثل فرق الطور 0.28 من الاهتزازة.

الخطوة ٤: التحويل إلى درجات وراديان. فهناك °360 أو 2π راديان في الاهتزازة الواحدة.

فرق الطور بالدرجات:

$= 0.28 \times 360°$

$= 101° \approx 100°$

فرق الطور بالراديان:

$= 0.28 \times 2\pi$ rad

$= 1.78$ rad ≈ 1.8 rad

سؤال

٤ **أ.** يبيّن الشكل ٧-٧ (ب) اهتزازتَين بينهما فرق في الطور. ما مقدار فرق الطور بينهما كجزء من اهتزازة واحدة؟

ب. لماذا لا يكون من المنطقي أن نسأل السؤال نفسه في ما يخص الشكل ٧-٧ (ج)؟

٧-٤ الحركة التوافقية البسيطة

ثمّة العديد من الحالات التي يمكننا فيها ملاحظة نوع خاص من الاهتزازات يسمى **الحركة التوافقية البسيطة Simple harmonic motion (s.h.m)**. يكون بعضها أكثر وضوحًا من الآخر، على سبيل المثال تُظهر الأوتار المهتزة لآلة موسيقية ما حركة توافقية بسيطة، فتتحرك الأوتار عند نقرها أو طرقها إلى الأمام وإلى الخلف حول موضع الاتزان، وحركة العربة المربوطة في الصورة ٧-٣ والبندول في الشكل ٧-١ هي أيضًا حركة توافقية بسيطة (تحدّد الحركة التوافقية البسيطة بدلالة تسارع الجسم المهتز وإزاحته. انظر الموضوع ٧-٥ تمثيل الحركة التوافقية البسيطة بيانيًا).

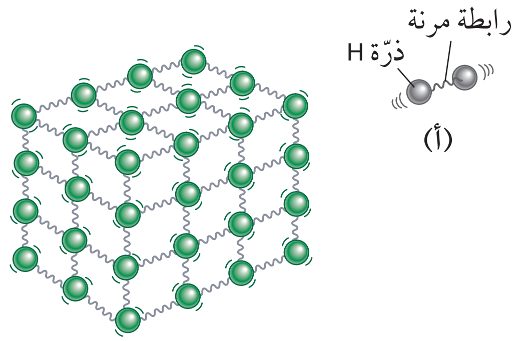
مصطلحات علمية

الحركة التوافقية البسيطة Simple harmonic motion: يتحرك جسم ما حركة توافقية بسيطة إذا كان تسارعه يتناسب طرديًا مع إزاحته عن موضع اتزانه، وبالاتجاه المعاكس لإزاحته.

فيما يأتي بعض الحالات الأخرى التي تتضمن حركة توافقية بسيطة ولكنها أقل وضوحًا:

- عندما تنتقل موجة صوتية نقية (نغمة واحدة) عبر الهواء فإن جزيئات الهواء تهتز بحركة توافقية بسيطة.
- عندما يتدفّق تيار كهربائي متردد في سلك ما فإن الإلكترونات تهتز في السلك بحركة توافقية بسيطة.
- يتولّد تيار كهربائي صغير متردد في هوائي الراديو أو التلفزيون عندما يُضبط على إشارة تكون على شكل إلكترونات تتحرك بحركة توافقية بسيطة.
- تهتز الذرات التي يتكوّن منها الجزيء بحركة توافقية بسيطة (انظر على سبيل المثال جزيء الهيدروجين في الشكل ٧-٩ أ).

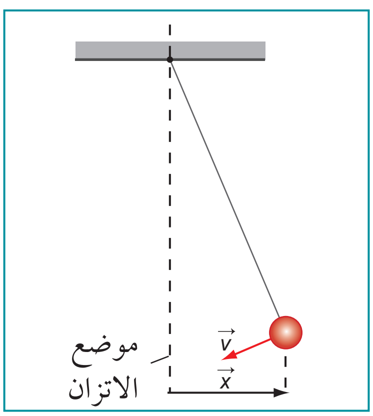
يمكن أن تكون الاهتزازات معقّدة جدًا نتيجة حدوث العديد من الترددات المختلفة للاهتزاز في الزمن نفسه، ومن الأمثلة على ذلك: اهتزازات الآلات، وحركة الأمواج في البحر، وكذلك اهتزاز بلورة صلبة تشكلت نتيجة ترابط الذرات أو الأيونات أو الجزيئات معًا (الشكل ٧-٩ ب)، ومن الممكن تقسيم الاهتزاز المعقّد إلى مجموعة من الاهتزازات البسيطة، ولذلك سنركّز اهتمامنا في هذه الوحدة على الحركة التوافقية البسيطة بتردد واحد فقط، وسنركّز أيضًا على الاهتزازات الميكانيكية الكبيرة، ولكن يجب أن تضع في اعتبارك أن هذا التحليل يمكن أن يمتد ليشمل جميع الحالات التي سبق أن ذكرناها وغيرها.



الشكل ٧-٩ يمكننا التفكير في الروابط بين الذرات على أنها زنبركية؛ وهذا يؤدي إلى اهتزازات، (أ) في جزيء الهيدروجين، و (ب) في البلورة الصلبة.

متطلبات الحركة التوافقية البسيطة

إذا كان البندول البسيط ساكنًا فهو في حالة اتزان؛ حيث أن الخيط والكتلة يتدلّيان رأسيًا، ولبدء تأرجح البندول (الشكل ٧-١٠)، يجب سحب الكتلة إلى أحد جانبَي موضع الاتزان. عندها تكون القوى المؤثرة على الكتلة غير متزنة؛ وهذا ما يجعلها تتحرك إلى موضع الاتزان، وتتأرجح الكتلة بعد هذا الموضع وتستمر في حركتها حتى تسكن لحظيًا عند الجانب الآخر، ثم تتكرّر العملية في الاتجاه المعاكس. لاحظ أن الاهتزازة الكاملة في الشكل ٧-١٠ هي الحركة من اليمين إلى اليسار والعودة مرة أخرى لنقطة بداية الحركة.



الشكل ٧-١٠ بندول متأرجح عند لحظة ما إزاحته ($\vec{x}$) موجبة وسرعته المتجهة ($\vec{v}$) سالبة.

المتطلبات الثلاثة للحركة التوافقية البسيطة لنظام ميكانيكي هي:

- كتلة مهتزة.
- موضع تكون فيه الكتلة في حالة اتزان.
- قوة إرجاع (Restoring force) تعمل على إعادة الكتلة إلى موضع الاتزان: تتناسب قوة الإرجاع ($\vec{F}$) طرديًا مع الإزاحة ($\vec{x}$) ويكون اتجاهها نحو موضع الاتزان أي تكون في اتجاه معاكس للإزاحة.

تغيرات السرعة المتجهة في الحركة التوافقية البسيطة

عندما يتأرجح البندول فإن سرعته المتجهة تتغير باستمرار، فعندما يتأرجح من اليمين إلى اليسار (كما هو مبيّن في الشكل ٧-١٠) فإن سرعته المتجهة سالبة، وهو يتسارع أثناء حركته نحو موضع الاتزان فتكون له أقصى سرعة في هذا الموضع، وبعد ذلك يتباطأ كلما اقترب من نهاية الجانب الآخر للاهتزازة فتكون سرعته صفرًا عند أقصى الجانب، وعندما يتأرجح من اليسار إلى اليمين تكون له سرعة موجبة، ومن جديد فالبندول يتحرك بأقصى سرعة في أثناء مروره بموضع الاتزان، ويتباطأ عندما يتأرجح نحو جانبي الاهتزازة.

هذا النمط (التسارع - التباطؤ - التغيّر في الاتجاه - التسارع مرة أخرى) يعتبر سمة للحركة التوافقية البسيطة، فالسرعة المتجهة لا تتغير بشكل مفاجئ، وسنرى في الموضوع الآتي كيف يمكننا ملاحظة هذه التغيّرات وكيف يمكننا تمثيلها بيانيًا.

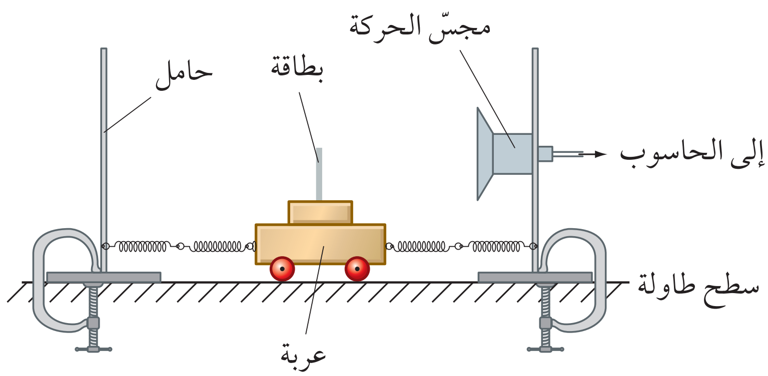
أسئلة

٥ حدّد خصائص حركة العربة في الصورة ٧-٣ التي تحقق المتطلبات الثلاثة للحركة التوافقية البسيطة.

٦ لماذا لا تعدّ حركة شخص ما يقفز إلى الأعلى وإلى الأسفل على الترامبولين حركة توافقية بسيطة؟ اشرح إجابتك (تفقُد أقدامه اتصالها مع الترامبولين خلال كل ارتداد).

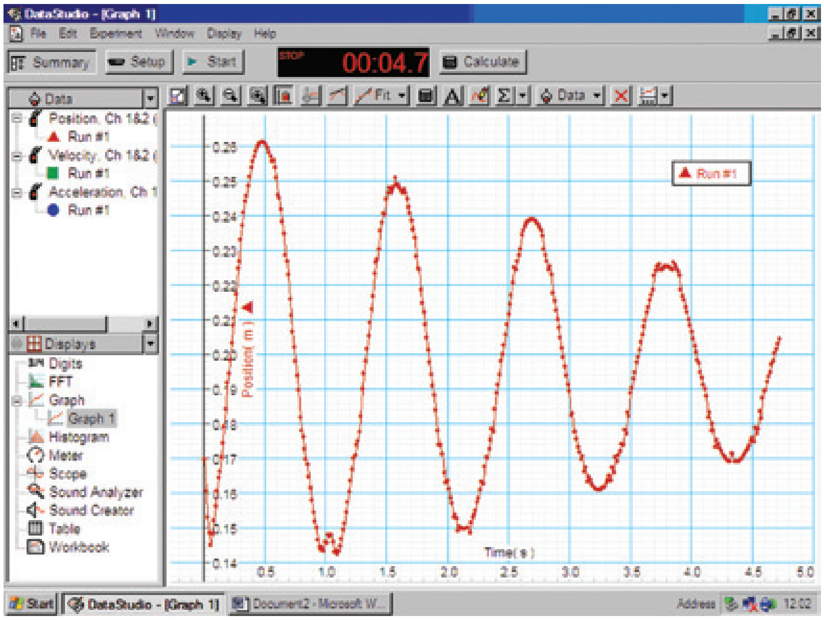
٧-٥ تمثيل الحركة التوافقية البسيطة بيانيًا

إذا قمت بربط عربة بين زنبركَين كما في الشكل ٧-١١، فإنه يمكنك سماع الإيقاع المميّز للحركة التوافقية البسيطة في أثناء تأرجح العربة إلى الأمام وإلى الخلف، ويمكنك بواسطة تعديل مقدار الكتلة التي تحملها العربة الحصول على اهتزازات بزمن دوري مقداره ثانيتان تقريبًا.



الشكل ٧-١١ استخدام مجسّ الحركة لاستقصاء الحركة التوافقية البسيطة لنظام عربة وزنبرك.

يسمح مجسّ الحركة بتسجيل كيف تتباين إزاحة العربة مع الزمن، إذ تنعكس نبضات الموجات فوق الصوتية للمجسّ عن البطاقة الموجودة على العربة، وبعد ذلك تُلتقط النبضات المنعكسة عن العربة. تسمح تكنولوجيا «السونار» هذه للمجسّ بتحديد إزاحة العربة، وهو ما يظهر على شاشة العرض في الصورة ٧-٤.



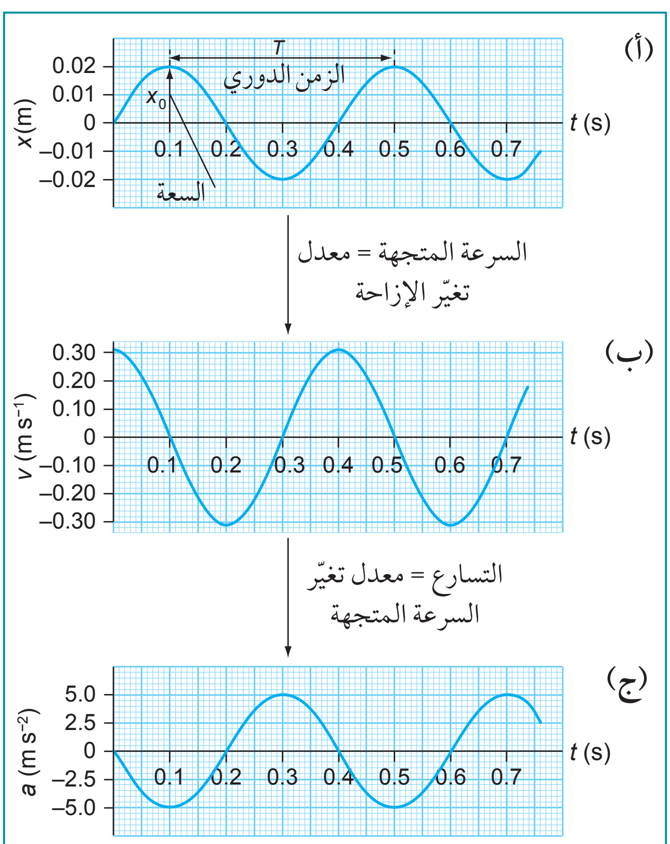
الصورة ٧-٤ تمثيل بياني (الإزاحة-الزمن) للبيانات الملتقطة بواسطة مجسّ الحركة.

يمكن للحاسوب بعد ذلك تحديد السرعة المتجهة للعربة بحساب معدل التغيّر في الإزاحة، وبالمثل يمكنه حساب معدل تغيّر السرعة المتجهة لتحديد التسارع.

يبيّن الشكل ٧-١٢ تمثيلات بيانية مثالية لكل من الإزاحة والسرعة المتجهة والتسارع مع الزمن. سندرس هذه التمثيلات البيانية بالترتيب لنرى ما تفيدنا به عن الحركة التوافقية البسيطة، وكيف ترتبط التمثيلات البيانية الثلاثة بعضها ببعض.

التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن)

تتغير إزاحة الكتلة المهتزة وفقًا للمنحنى المبيّن في الشكل ٧-١٢ (أ). وهذا رياضيًا يمثل منحنى دالة الجيب؛ حيث يوصف تباينه بأنه جيبي. لاحظ أن هذا التمثيل البياني يسمح لنا بتحديد السعة (x_0) والزمن الدوري (T) للاهتزازات. في هذا التمثيل البياني تكون الإزاحة (x) للاهتزازات صفرًا في البداية عندما تكون (t) صفرًا. لقد اعتبرنا هنا أن الحركة تبدأ عندما تكون الكتلة عند نقطة منتصف اهتزازها (موضع الاتزان) وتتحرك إلى اليمين، وكان بإمكاننا اختيار أيّ نقطة أخرى في الدورة كنقطة بداية للحركة، ولكن غالبًا ما نبدأ كما هو مبيّن هنا.



الشكل ٧-١٢ تمثيلات بيانية لكل من الإزاحة ($\vec{x}$) والسرعة المتجهة ($\vec{v}$) والتسارع ($\vec{a}$) مع الزمن (t) للحركة التوافقية البسيطة.

التمثيل البياني (السرعة المتجهة-الزمن)

يمكن تحديد السرعة المتجهة ($\vec{v}$) للجسم المهتز في أي زمن من ميل منحنى التمثيل البياني (الإزاحة–الزمن):

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

لدينا مرة أخرى منحنى (الشكل ٧–١٢ ب)، والذي يبيّن كيف تعتمد السرعة المتجهة ($\vec{v}$) على الزمن (t)، فشكل المنحنى يشبه التمثيل البياني (الإزاحة – الزمن)، ولكنه يبدأ عند نقطة مختلفة في الدورة، فعندما يكون الزمن ($t = 0$) تكون الكتلة عند موضع الاتزان، وهذا هو المكان الذي يتحرك فيه الجسم بأسرع ما يمكن، وعليه تكون للسرعة المتجهة قيمة عُظمى عند هذه النقطة، وتكون هذه القيمة موجبة لأنها في الزمن ($t = 0$) تتجه نحو اليمين.

التمثيل البياني (التسارع-الزمن)

يمكن تحديد التسارع ($\vec{a}$) للجسم المهتز في أي زمن من ميل منحنى التمثيل البياني (السرعة المتجهة–الزمن):

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

وهذا يعطينا منحنى ثالثًا له الشكل العام نفسه (الشكل ٧–١٢ ج)، والذي يبيّن كيف أن التسارع ($\vec{a}$) يعتمد على الزمن (t). تكون الكتلة في بداية الاهتزاز عند موضع اتزانها، ولا توجد قوة محصلة مؤثرة عليها؛ لذلك فإن تسارعها يساوي صفرًا، أما في أثناء حركتها إلى اليمين فتكون قوة الإرجاع نحو اليسار، الأمر الذي يعطيها تسارعًا سالبًا، ويكون للتسارع أكبر قيمة عندما تكون الكتلة عند أقصى إزاحة عن موضع الاتزان. لاحظ أن التمثيل البياني للتسارع هو مقلوب التمثيل البياني للإزاحة، وهذا يدل على أن التسارع يتناسب طرديًا مع الإزاحة وفي عكس اتجاهها:

$$a \propto -x$$

بمعنى آخر عندما يكون للكتلة إزاحة موجبة (إلى اليمين) يكون تسارعها إلى اليسار، والعكس صحيح.

٧-٦ التردد والتردد الزاوي

التردد (f) للحركة التوافقية البسيطة يساوي عدد الاهتزازات في الثانية الواحدة، وكما رأينا سابقًا فإن التردد (f) يرتبط بالزمن الدوري (T) من خلال العلاقة:

$$f = \frac{1}{T}$$

لنأخذ كمثال اهتزازة واحدة كاملة لجسم مهتز أو دورة واحدة للحركة التوافقية البسيطة حيث تُمثّل بـ (2π rad) (وهذا مشابه لدورة كاملة لحركة دائرية عندما يتحرك جسم حركة دائرية خلال 2π rad)، وحيث يتغيّر طور الاهتزازة بمقدار (2π rad) خلال اهتزازة واحدة كاملة، ولذلك إذا كانت هناك (f) من الاهتزازات في الثانية فإنه يجب أن يكون هناك ($2\pi f$ rad) في الثانية، وتسمى هذه الكميّة **التردد الزاوي Angular frequency** للحركة التوافقية البسيطة ويُرمز إليها بالحرف اليوناني (ω) (أوميجا).

مصطلحات علمية

التردد الزاوي Angular frequency: هو تردد الاهتزاز الجيبي معبّرًا عنه بالراديان لكل ثانية.

يرتبط التردد الزاوي (ω) بالتردد (f) بالمعادلة:

$$\boxed{\omega = 2\pi f}$$

وبما أن $f = \frac{1}{T}$ فإن التردد الزاوي (ω) يرتبط بـالزمن الدوري (T) للجسم المهتز من خلال المعادلة:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ أو } T = \frac{2\pi}{\omega}$$

أسئلة

٧) استخدم التمثيلات البيانية المبيّنة في الشكل ٧-١٢ لتحديد قيم الكميّات الآتية:

أ. السعة.

ب. الزمن الدوري.

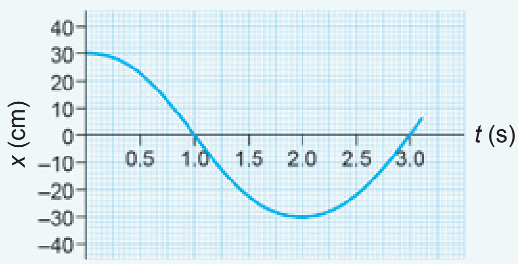
ج. السرعة المتجهة العظمى.

د. أكبر تسارع.

٨) عند أيّ نقطة في اهتزاز الجسم المهتز تكون سرعته المتجهة صفرًا وتسارعه نحو اليمين؟

٩) انظر إلى التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن) للشكل ٧-١٢ (أ). ما مقدار ميل منحنى التمثيل البياني عندما تكون ($t = 0.1$ s)؟ ما مقدار السرعة المتجهة في تلك اللحظة؟

١٠) يبيّن الشكل ٧-١٣ التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن) لكتلة مهتزة.



الشكل ٧-١٣ تمثيل بياني (الإزاحة-الزمن) لكتلة مهتزة.

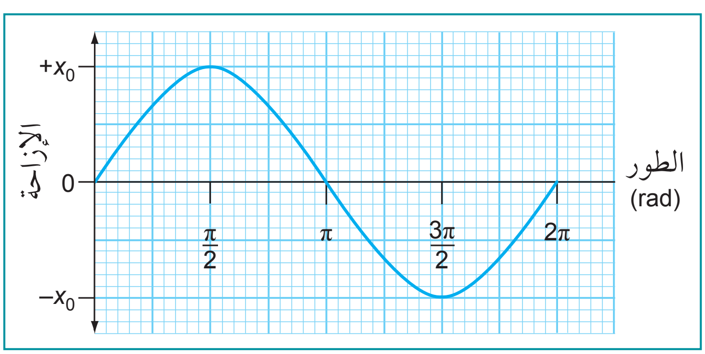
استخدم التمثيل البياني لتحديد الكميّات الآتية:

أ. مقدار السرعة المتجهة بوحدة $cm\ s^{-1}$ عندما تكون ($t = 0$ s).

ب. مقدار السرعة المتجهة العظمى بوحدة $cm\ s^{-1}$.

ج. مقدار التسارع بوحدة $cm\ s^{-1}$ عندما تكون ($t = 1.0$ s).

نظرًا لأن طور الاهتزازة يتغير بمقدار (2π rad) خلال اهتزازة واحدة كاملة فيمكن تمثيل الحركة التوافقية البسيطة كما هو مبيّن في الشكل ٧-١٤، حيث يمثل المحور السيني طور الحركة بوحدة الراديان.



الشكل ٧-١٤ يتباين طور الاهتزازة الواحدة الكاملة من 0 إلى 2π rad خلال دورة واحدة كاملة.

أسئلة

١١) يتحرك جسم ما بحركة توافقية بسيطة بحيث يكمل دورتَين كاملتَين في (1.0 s). احسب:

أ. الزمن الدوري (T).

ب. التردد (f).

ج. التردد الزاوي (ω).

(١٢) يبيّن الشكل ٧-١٥ التمثيل البياني (الإزاحة-الزمن) لكتلة مهتزة. استخدم التمثيل البياني لتحديد ما يأتي:

أ. السعة.

ب. الزمن الدوري.

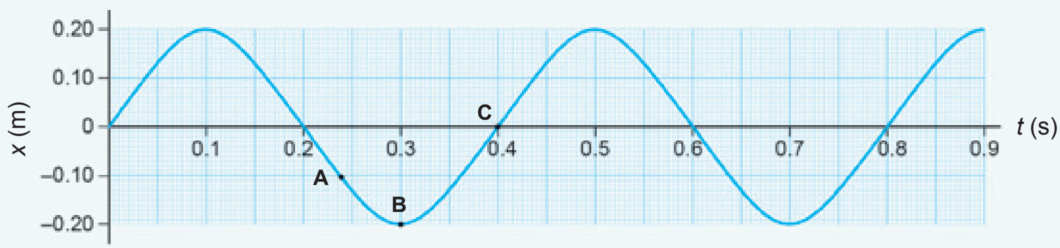
ج. التردد.

د. التردد الزاوي.

هـ. الإزاحة عند A.

و. مقدار السرعة المتجهة عند B.

ز. مقدار السرعة المتجهة عند C.



الشكل ٧-١٥ تمثيل بياني (الإزاحة-الزمن).

(١٣) تهتز ذرّة في بلورة ما بحركة توافقية بسيطة بتردد (10^{14} Hz)، وسعة حركتها (2.0×10^{-12} m).

أ. ارسم تمثيلًا بيانيًا لتوضيح كيف تتغير إزاحة الذرّة خلال دورة واحدة.

ب. استخدم التمثيل البياني لتقدير السرعة العظمى للذرّة.

٧-٧ معادلات الحركة التوافقية البسيطة

يبيّن التمثيل البياني للشكل ٧-١٢ (أ) السابق كيف تتغير إزاحة جسم مهتز خلال الحركة التوافقية البسيطة، ووصفناه بأنه منحنى جيبي. يمكننا عرض المعلومات نفسها على شكل معادلة، فالعلاقة بين الإزاحة (x) والزمن (t) يمكن التعبير عنها رياضيًا كما يأتي:

$$x = x_0 \sin(\omega t)$$

حيث (x_0) هي سعة الحركة و (ω) هي ترددها الزاوي، ويمكن تمثيل الحركة نفسها في بعض الأحيان باستخدام دالة جيب التمام بدلًا من دالة الجيب:

$$x = x_0 \cos(\omega t)$$

معادلتا الإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة:

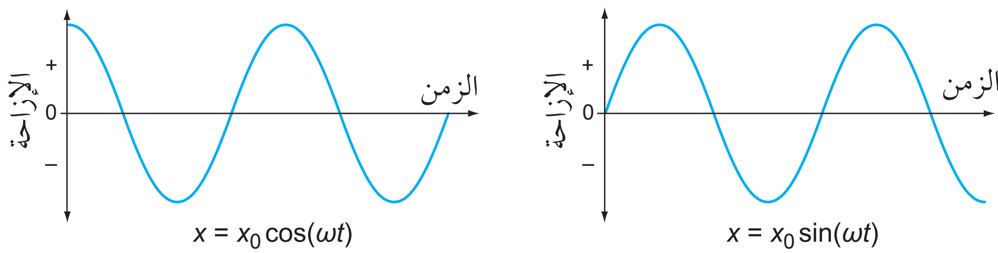
$$x = x_0 \sin(\omega t)$$

$$x = x_0 \cos(\omega t)$$

الفرق بين هاتَين المعادلتَين مبيّن في الشكل ٧-١٦. إذ يبدأ منحنى الجيب عند ($x = 0$)؛ وهذا يكون عندما تبدأ الكتلة المهتزة بالحركة من موضع الاتزان عند الزمن ($t = 0$). أما منحنى جيب التمام فيبدأ عندما تكون ($x = x_0$)، بحيث تكون الكتلة عند الإزاحة العظمى عند الزمن ($t = 0$).

لاحظ أنه عند استخدام هاتَين المعادلتَين في العمليات الحسابية تكون الكميّة (ωt) بوحدة الراديان. تأكد من أن

الآلة الحاسبة الخاصة بك في وضع –راديان– لأيّة عملية حسابية (انظر المثال ٢). ويجب أن يذكرك وجود (π) في المعادلة بهذا الأمر.



الشكل ٧–١٦ تمثيلان بيانيان للحركة التوافقية البسيطة نفسها يختلفان في موضعَي البداية بصيغتَي الجيب وجيب التمام للمعادلة (x) كدالة في (t).

أسئلة

١٤ يُمثّل اهتزاز أحد المكونات في جهاز ما بمعادلة الإزاحة الآتية:

$$x = 3.0 \times 10^{-4} \sin(240\pi t)$$

حيث الإزاحة (x) بالأمتار. حدّد ما يأتي للاهتزازة:

أ. السعة.

ب. التردد.

ج. الزمن الدوري.

١٥ عربة مربوطة بزنبركَين وفي حالة سكون سُحبت بمقدار (0.15 m) إلى أحد الجانبَين، وعندما كان الزمن ($t = 0$) حرّرت بحيث اهتزت إلى الخلف وإلى الأمام بحركة توافقية بسيطة، إذا علمت أن زمنها الدوري (2.0 s):

أ. اكتب معادلة الإزاحة (x) بالنسبة إلى الزمن (t) (افترض أن الحركة لم تتخامد بواسطة قوى الاحتكاك).

ب. ارسم التمثيل البياني (الإزاحة–الزمن) لإظهار دورتَين للحركة مع إعطاء قيم عندما يكون ذلك ملائمًا.

التسارع والإزاحة

يعتمد تسارع الجسم في الحركة التوافقية البسيطة على بُعده عن موضع الاتزان وعلى مقدار قوة الإرجاع، فكلما كانت الإزاحة (x) أكبر، كان التسارع (a) أكبر. يتناسب التسارع (a) في الحقيقة طرديًا مع الإزاحة (x)، ويمكننا كتابة المعادلة الآتية لتمثيل ذلك:

$$a = -\omega^2 x$$

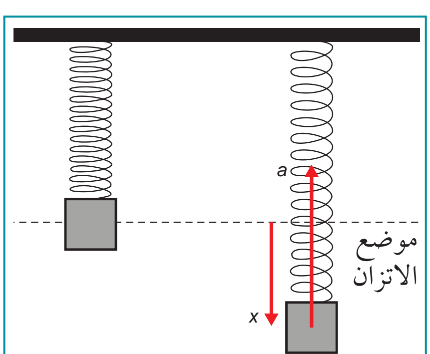
تسارع جسم مهتز في الحركة التوافقية البسيطة.

حيث (a) تسارع الجسم المهتز في الحركة التوافقية البسيطة، و (ω) التردد الزاوي للجسم، و (x) الإزاحة عن موضع الاتزان.

تبيّن هذه المعادلة أن (a) يتناسب طرديًا مع (x)؛ وثابت التناسب هو (ω^2)، وتشير الإشارة السالبة إلى أنه عندما تكون إزاحة الجسم إلى اليمين يكون اتجاه التسارع إلى اليسار.

يتجه التسارع دائمًا نحو موضع الاتزان وباتجاه معاكس للإزاحة.

تساعدنا المعادلة $a = -\omega^2 x$ في تحديد الحركة التوافقية البسيطة. يبين الشكل ٧–١٧ أن التسارع (a) يتناسب طرديًا مع الإزاحة (x)؛ وتشير الإشارة السالبة إلى أنه يكون في الاتجاه المعاكس للإزاحة.

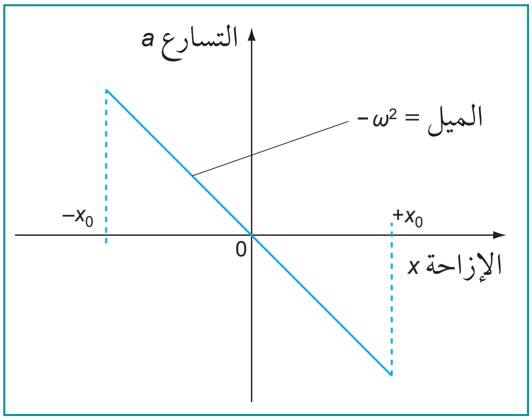


الشكل ٧–١٧ في الحركة التوافقية البسيطة يتناسب التسارع طرديًا مع الإزاحة ويتعاكسان في الاتجاه.

فالجسم يهتز بحركة توافقية بسيطة إذا كان تسارعه يتناسب طرديًا مع إزاحته عن موضع الاتزان ويكون بعكس اتجاه الازاحة. إذا كان (a) و (x) بالاتجاه نفسه (بدون الإشارة السالبة)، فإن تسارع الجسم سيزداد كلما ابتعد عن موضع الاتزان وسيبتعد أسرع وأسرع، ولن يعود إطلاقًا.

يبيّن الشكل ٧-١٨ التمثيل البياني (التسارع-الإزاحة) لجسم مهتز يخضع لحركة توافقية بسيطة. لاحظ ما يأتي:

- التمثيل البياني خط مستقيم يمر بنقطة الأصل وبالتالي ($a \propto x$).
- التمثيل البياني له ميل سالب (الإشارة السالبة في المعادلة $a = -\omega^2 x$). وهذا يعني أن التسارع يتجه دائمًا نحو موضع الاتزان.
- مقدار ميل التمثيل البياني هو (ω^2).
- لا يعتمد الميل على سعة الحركة؛ وهذا يعني أن التردد (f) أو الزمن الدوري (T) للجسم المهتز لا يعتمد على السعة، وهكذا يحافظ الجسم المهتز بحركة توافقية بسيطة على ثبات زمنه الدوري.



الشكل ٧-١٨ التمثيل البياني (التسارع-الإزاحة) لجسم مهتز يخضع لحركة توافقية بسيطة.

وعند اشتقاق معادلة (x) مرّتَين بالنسبة إلى الزمن نحصل على معادلة التسارع، وبالتالي إثبات المعادلة $a = -\omega^2 x$. كما يمكن كتابة معادلة التسارع كالآتي:

$$a = -\omega^2 x_0 \sin(\omega t)$$

حيث يمثل المقدار $\omega^2 x_0$ أقصى تسارع، ويُرمز له بالرمز (a_0). وبالتالي: $a = -a_0 \sin(\omega t)$.

مهمّ

المعادلة $a = -\omega^2 x$ تحدّد الحركة التوافقية البسيطة، فهي توضح المطلوب لأداء الجسم حركة توافقية بسيطة. وتوصف المعادلة $x = x_0 \sin(\omega t)$ بأنها **حل** للمعادلة $a = -\omega^2 x$، لأنها توضح كيف تتباين إزاحة الجسم مع مرور الزمن.

مثال

٢. **يهتز بندول بتردد (1.5 Hz) وسعة (0.10 m). فإذا كان البندول يبدأ حركته من موضع اتزانه عندما ($t = 0$)، فاكتب معادلة لتمثيل إزاحته (x) باستخدام السعة (x_0) والتردد الزاوي (ω) والزمن (t)، ثم جِد إزاحته عندما يكون الزمن ($t = 0.50$ s).**

الخطوة ١: اختر المعادلة الصحيحة. في هذه الحالة، تساوي الإزاحة صفرًا عندما تكون ($t = 0$)، لذلك نستخدم صيغة الجيب:

$$x = x_0 \sin(\omega t)$$

الخطوة ٢: من التردد (f)، احسب التردد الزاوي (ω).

$$\omega = 2\pi f$$
$$= 2 \times \pi \times 1.5 = 3.0\,\pi \text{ rad s}^{-1}$$

الخطوة ٣: عوّض القيم في المعادلة:

$$x_0 = 0.10 \text{ m}$$
$$x = 0.10 \sin(3.0\pi t)$$

تلميح: تذكّر أن تضع الآلة الحاسبة الخاصة بك في وضع راديان.

الخطوة ٤: لإيجاد (x) عندما تكون ($t = 0.50$ s)، عوض عن (t) واحسب الناتج:

$$x = 0.10 \sin(3.0 \times \pi \times 0.50)$$
$$= 0.10 \sin(4.712)$$
$$= -0.10 \text{ m}$$

تابع

هذا يعني أن البندول عند أقصى إزاحة، والإشارة السالبة تعني أنه في الجانب السالب أو الأيسر، على افتراض أنك اخترت في اعتبارك أن الازاحة إلى اليمين تكون موجبة.

من المهم الإشارة إلى أن حاصل (أو نتيجة) الضرب ما بين القوسَين في المعادلة (1.5π) يبيّن أن البندول قد أكمل ثلاثة أرباع دورة خلال هذا الاهتزاز (لأن اهتزازة واحدة عبارة عن 2π).

تنبيه: (إذا كان حلّك بهذه الطريقة:

$$x = 0.10 \sin (3.0 \times \pi \times 0.50)$$

$$= 0.10 \sin (4.712)$$

$$= -8.2 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

فهذا يعني أن الآلة الحاسبة الخاصة بك قد ضُبطت بشكل غير صحيح على وضع الدرجات وليس على الراديان، لذلك يجب تحويل نظام الآلة الحاسبة إلى الراديان أو تحويل الزاوية إلى الدرجات كما درست في الوحدة السابقة إذا بقيت الآلة الحاسبة بنظام الدرجات).

معادلات السرعة المتجهة

تتغير السرعة المتجهة ($\vec{v}$) للجسم المهتز في أثناء حركته إلى الأمام وإلى الخلف على جانبَي موضع الاتزان، فتكون له سرعة متجهة عظمى عندما يمر بموضع الاتزان في منتصف الاهتزازة، فإذا أخذنا الزمن ($t = 0$) عند عبور الجسم المهتز من موضع الاتزان بسرعة متجهة عظمى (v_0)، عندها يمكننا تمثيل التغيّر في السرعة المتجهة بالمعادلة:

$$\vec{v} = v_0 \cos (\omega t)$$

نستخدم دالة جيب التمام لتمثيل السرعة نظرًا لأنه يكون للسرعة قيمة عظمى عندما يكون ($t = 0$).

توضح المعادلة $v = v_0 \cos (\omega t)$ كيف تعتمد (v) على (t). يمكننا كتابة معادلة أخرى لتوضيح مدى اعتماد السرعة المتجهة على إزاحة الجسم المهتز (x):

$$\vec{v} = \pm\, \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$$

يمكن استخدام هذه المعادلة لاستنتاج سرعة الجسم المهتز في أيّ نقطة في الاهتزازة، بما في ذلك السرعة العظمى.

السرعة العظمى للجسم المهتز

إذا كان الجسم المهتز يؤدّي حركة توافقية بسيطة فإن له سرعة عظمى عندما يعبر موضع اتزانه، حيث تكون الإزاحة (x) صفرًا. يعتمد مقدار السرعة العظمى (v_0) للجسم المهتز على التردد (f) وعلى السعة (x_0). بالتعويض عن ($x = 0$) في المعادلة:

$$v = \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$$

عند ($x = 0$)، يكون مقدار السرعة العظمى:

$$v_0 = \omega x_0$$

ووفقًا لهذه المعادلة لاهتزازة معيّنة يكون:

$$v_0 \propto x_0$$

$$v = \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$$

سرعة الاهتزازة

ذكرنا سابقًا أن الزمن الدوري لجسم يهتز بحركة توافقية بسيطة لا يعتمد على سعة الاهتزازة هذا لأن السعة الأكبر تعني أن الجسم المهتز يجب أن يقطع مسافة أكبر في الزمن نفسه، وبالتالي تكون له سرعة أكبر.

تبيّن المعادلة أن السرعة العظمى تتناسب طرديًا مع التردد أيضًا؛ فزيادة التردد تعني زمنًا دوريًا أقصر. فقطع مسافة معيّنة في زمن أقصر يعني أن السرعة أكبر.

ألقِ نظرة مرة أخرى على الشكل ٧-١٢. الزمن الدوري للحركة (0.40 s) وسعة الحركة (0.02 m). لذلك يمكن حساب التردد (f) على النحو الآتي:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$= \frac{1}{0.40}$$

$$= 2.5 \text{ Hz}$$

يمكننا الآن استخدام المعادلة $v_0 = \omega x_0$ حيث $\omega = 2\pi f$ لتحديد السرعة العظمى (v_0):

$$v_0 = (2\pi f)x_0$$

$$= (2\pi \times 2.5) \times 2.0 \times 10^{-2}$$

$$v_0 \approx 0.31 \text{ m s}^{-1}$$

والمعادلة $v = \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$ هي التي حُسبت بها القيم الموجودة في الشكل ٧-١٢ (ب).

أسئلة

١٦ تتحرك كتلة مربوطة في نهاية زنبرك بحركة توافقية بسيطة بتردد (1.4 Hz).

أ. اكتب معادلة التسارع بالصيغة $a = -\omega^2 x$.

ب. احسب تسارع الكتلة عندما تكون إزاحتها (0.050 m) عن موضع اتزانها.

١٧ يهتز بندول قصير بحركة توافقية بسيطة؛ بحيث يكون تسارعه (a) (بوحدة m s^{-2}) مرتبط بالإزاحة (x) (بوحدة m) من خلال المعادلة $a = -300\,x$. احسب تردد الاهتزازات.

١٨ يتأرجح بندول ساعة من جانب إلى آخر في (1.0 s). إذا علمت أن سعة الاهتزازة (12 cm):

أ. فاحسب:

١. الزمن الدوري لحركته.

٢. التردد.

٣. التردد الزاوي.

ب. اكتب معادلة التسارع بالصيغة $a = -\omega^2 x$.

ج. احسب السرعة العظمى لكرة البندول.

د. احسب سرعة كرة البندول عندما تكون إزاحتها (6 cm).

(١٩) عربة كتلتها (m) مثبتة في نهاية زنبرك طرفه الآخر مثبت بجدار رأسي. يمكن ضغط الزنبرك وشدّه. للزنبرك ثابت (k). تتحرك العربة على طاولة أفقية ملساء، وتهتز عندما تُزاح عن موضع اتزانها.

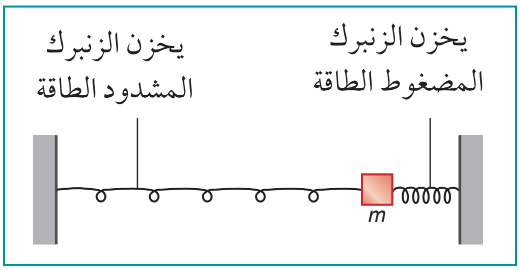
أ. بيّن أن حركة العربة المهتزة هي حركة توافقية بسيطة.

ب. أثبت أن الزمن الدوري (T) للعربة يعطى بالمعادلة:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

٨-٧ تغيّرات الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة

أثناء الحركة التوافقية البسيطة، يحدث تبادل مستمر للطاقة على شكلَين: طاقة وضع وطاقة حركة. يمكننا أن نرى كيف يحدث هذا من خلال النظر إلى نظام الكتلة والزنبرك المبيّن في الشكل ٧-١٩.

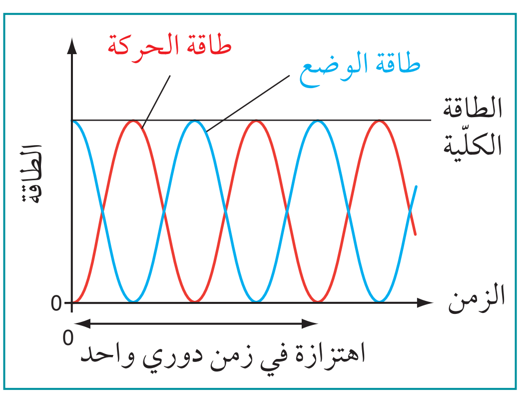


الشكل ٧-١٩ طاقة الوضع المرونية المخزّنة في الزنبرَكَين تتحوّل إلى طاقة حركة عندما تتحرّر الكتلة.

عندما تدفع الكتلة إلى أحد الجانبَين (لبدء الاهتزاز)، يُضغط أحد الزنبركَين ويستطيل الآخر. يُخزّن الزنبركان طاقة وضع مرونية، وعندما تتحرّر الكتلة تتحرك مرة أخرى نحو موضع الاتزان، وتتسارع في أثناء حركتها، فتزداد طاقتها الحركية وتتناقص طاقة الوضع المرونية في الزنبركَين، ويكون مقدار الزيادة في طاقة الحركة مساويًا لمقدار النقصان في طاقة الوضع (طالما أنه لا يوجد فقدٌ للطاقة على شكل حرارة بسبب قوى الاحتكاك)، وبمجرد أن تعبر الكتلة موضع الاتزان فإن طاقتها الحركية تنخفض وتتحوّل مرة أخرى إلى طاقة وضع مرونية يختزنها الزنبركان، وتبقى الطاقة الكلية في النظام ثابتة بشرط أن تكون الاهتزازات غير مخمدة.

التمثيلات البيانية للطاقة

يمكننا تمثيل هذه التغيّرات في الطاقة بطريقتَين. يبيّن الشكل ٧-٢٠ كيف أن طاقة الحركة وطاقة الوضع المرونية تتغيّران بمرور الزمن، فتكون طاقة الوضع عظمى عندما تكون الإزاحة عظمى (موجبة أو سالبة)، وتكون طاقة الحركة عظمى عندما تكون الإزاحة صفرًا. في حين تبقى الطاقة الكلية ثابتة طوال الزمن. لاحظ أن كلًا من طاقة الحركة وطاقة الوضع تمرّان في دورتَين كاملتَين لتبادل الطاقة خلال زمن دوري واحد للاهتزازة، وهذا بسبب أن طاقة الحركة تكون عظمى عندما تتحرك الكتلة عبر موضع الاتزان إلى اليسار ومرة أخرى عندما تتحرك عبر موضع الاتزان إلى اليمين، في حين تكون طاقة الوضع عظمى عند كلّ من نهايتَي الاهتزازة.



الشكل ٧-٢٠ تتباين طاقة الحركة وطاقة الوضع لجسم مهتز دوريًا، لكن الطاقة الكلية تبقى ثابتة إذا كان النظام غير مخمد.

الطريقة الثانية لتمثيل التغيّرات في الطاقة هي رسم تمثيل بياني لكيفية تغير طاقة الوضع وطاقة الحركة مع الإزاحة (الشكل ٧-٢١).

يبيّن التمثيل البياني أن:

- طاقة الحركة تكون عظمى عندما تكون الإزاحة $(x = 0)$.
- طاقة الوضع تكون عظمى عندما $(x = x_0)$.
- الطاقة الكلية عند أيّة نقطة على هذا التمثيل البياني (طاقة الوضع + طاقة الحركة) لها المقدار نفسه.

يترتب على ذلك أنه إذا كانت السرعة عظمى (v_0)، فإن طاقة الحركة العظمى = $\frac{1}{2}mv_0^2$.

تكون كل الطاقة على شكل طاقة حركة عندما تكون $(x = 0)$، وبالتالي فإن الطاقة الكلية للنظام هي:

$$E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$$

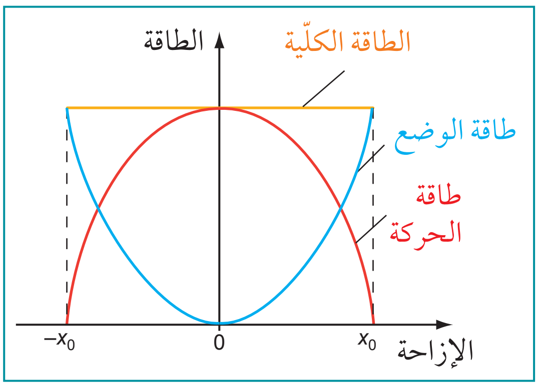
وبما أن:

$$v_0 = \omega x_0$$

فإن:

$$E_0 = \frac{1}{2}m\omega^2 x_0^2$$

الطاقة الكلية لنظام يخضع لحركة توافقية بسيطة.



الشكل ٧-٢١ تكون طاقة الحركة قيمة عظمى عند الإزاحة $(x = 0)$، وقيمة طاقة الوضع عظمى عند إزاحة $(x_0$ و $-x_0)$.

أسئلة

٢٠ لبدء تأرجح بندول، نسحب كتلته قليلًا إلى أحد الجوانب.

أ. ما نوع الطاقة التي تكتسبها الكتلة؟

ب. صف تغيّرات الطاقة التي تحدث عندما تتحرّر الكتلة.

٢١ يبيّن الشكل ٧-٢١ كيف تتغير طاقتا الحركة والوضع مع الإزاحة خلال الحركة التوافقية البسيطة. انسخ التمثيل البياني، مبيّنًا كيف سيختلف إذا أُعطيت الكتلة المهتزة نصف الطاقة الأولية.

٢٢ يبيّن الشكل ٧-٢٢ كيف تتغير السرعة المتجهة (v) لكتلة مقدارها (2.0 kg) مع الزمن (t) خلال استقصاء الحركة التوافقية البسيطة لبندول ما. استخدم التمثيل البياني لتقدير الكمّيات الآتية لهذه الكتلة:

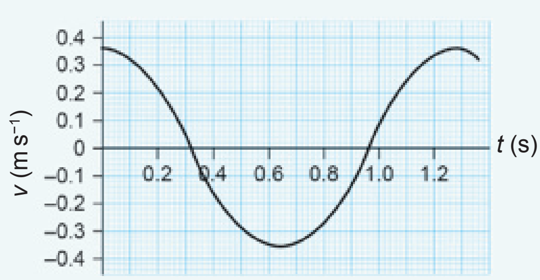
أ. مقدار سرعتها المتجهة العظمى.

ب. طاقتها الحركية العظمى.

ج. طاقة وضعها العظمى.

د. مقدار تسارعها الأقصى.

هـ. قوة الإرجاع العظمى التي أثرت عليها.

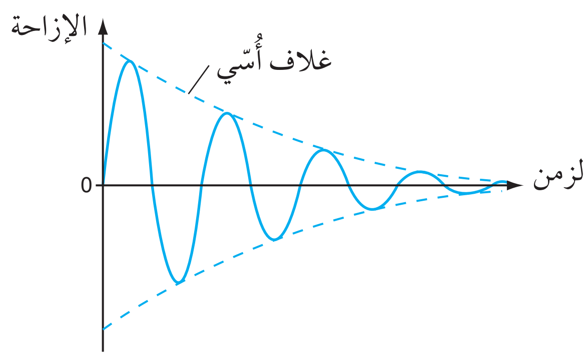


الشكل ٧-٢٢ تمثيل بياني (السرعة المتجهة-الزمن) لبندول.

٧-٩ الاهتزازات المخمدة

من حيث المبدأ يمكن للاهتزازات أن تستمر دون توقف، لكنها في الواقع تضمحل وتتوقف، إما فجأة أو تدريجيًا، فالطفلة على الأرجوحة تعرف أن سعة تأرجحها تتناقص حتى تتوقف في النهاية، إلّا إذا تمكّنت من إعطائها مزيدًا من الطاقة لتستمر في المحافظة على تأرجحها، ويحدث هذا بسبب الاحتكاك، إذ ثمّة احتكاك في الأرجوحة في مكان ربط الأرجوحة بالإطار، وثمّة احتكاك مع الهواء، فتقل سعة اهتزازات الطفلة مع فقد الطاقة بسبب الاحتكاك حيث تنتقل إلى المناطق المحيطة بها.

توصف هذه الاهتزازات بأنها **اهتزازة مخمدة** **Damped oscillation** (الشكل ٧-٢٣). فسعتها تتناقص وفقًا لنمط معيّن، بعكس الاهتزازات التي لديها سعة ثابتة (المبينة في التمثيلات البيانية (الإزاحة-الزمن) السابقة في هذه الوحدة).



الشكل ٧-٢٣ الاهتزازات المخمدة.

مصطلحات علمية

الاهتزازة المخمدة
Damped oscillation: هي اهتزازة تتسبب فيها قوى المقاومة بنقل طاقة النظام إلى المحيط كطاقة داخلية.

سعة الاهتزازات المخمدة لا تتناقص خطيًا؛ بل تتناقص وتضمحل أُسيًا مع مرور الزمن، فالاضمحلال الأُسيّ هو عملية رياضية ذات نمط معيّن يمكن توضيحها على النحو الآتي: تتحرك الأرجوحة بسرعة في البداية، فتتعرض للكثير من مقاومة الهواء التي يجب التغلب عليها، لذا فإن الأرجوحة تفقد طاقتها بسرعة ويتناقص اتساع تأرجحها بمعدل مرتفع، فتتحرك الأرجوحة بعد ذلك ببطء أكثر، وتصبح مقاومة الهواء عليها أقل مع بطء حركتها، لذلك يكون فقدان الطاقة أبطأ، وكذلك تتناقص السعة بمعدل أقل، ومن هنا نحصل على الشكل المقوس المميّز، وهو «غلاف» التمثيل البياني في الشكل ٧-٢٣.

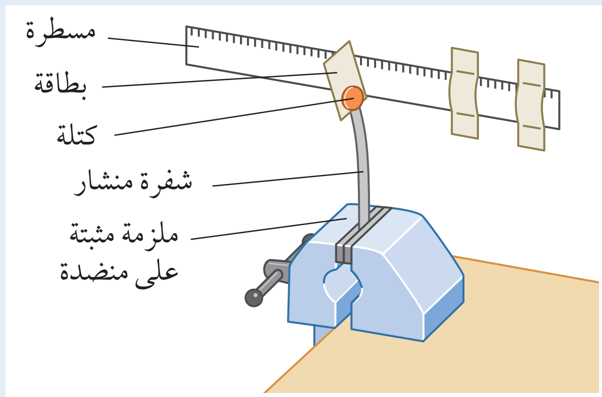
لاحظ أن تردد الاهتزازات لا يتغيّر مع تناقص السعة، وهذه هي خاصية الحركة التوافقية البسيطة، فقد تتأرجح الطفلة على سبيل المثال إلى الأمام وإلى الخلف مرة كل ثانيتَين بشكل ثابت سواء كانت السعة كبيرة أم صغيرة.

مهارة عملية ٧-٢: استقصاء الاضمحلال

يمكنك استقصاء التناقص الأُسيّ في اضمحلال سعة الاهتزازات باستخدام تجربة مخبرية بسيطة (الشكل ٧-٢٤). حيث تُثبّت شفرة منشار أو أي شريط فلزي زنبركي آخر (رأسيًا أو أفقيًا) على المنضدة، وتثبّت كتلة عند نهاية الشفرة الحرة، فتهتز هذه الشفرة بحرّية إذا أزحتها إلى أحد الجانبَين.

تثبّت قطعة من الورق المقوى (بطاقة) بالكتلة حتى تتكوّن مقاومة كبيرة للهواء مع اهتزاز الكتلة.

سيتناقص اتساع الاهتزازات بحيث يمكن قياسه كل خمس

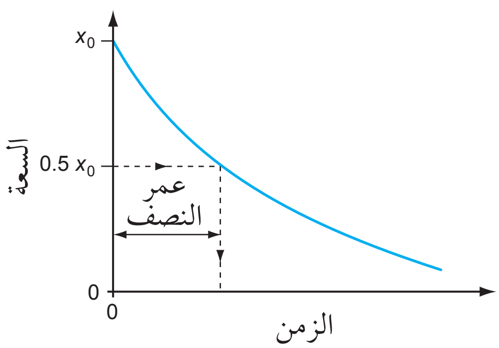


الشكل ٧-٢٤ الاهتزازات المخمدة لشفرة منشار.

اهتزازات من خلال الحكم على موقع الشفرة بالنسبة إلى المسطرة المثبّتة على طول جانبها.

وسيُبيّن التمثيل البياني للسعة مقابل الزمن التناقص الأُسّي المميّز. يمكنك إيجاد فترة «عمر النصف» لهذا التمثيل البياني للاضمحلال الأُسّي بواسطة تحديد الزمن المستغرق لتناقصه إلى نصف السعة الابتدائية (الشكل ٧-٢٥).

يمكن تغيير درجة التخميد من خلال تغيير حجم البطاقة، وبالتالي يتغير عمر النصف للحركة.



الشكل ٧-٢٥ تمثيل بياني للسعة مقابل الزمن للاهتزازات المخمدة.

الطاقة والتخميد

يمكن أن يكون التخميد مفيدًا جدًا إذا أردنا التخلّص من الاهتزازات. فعلى سبيل المثال تحتوي السيارة على زنبركات (الصورة ٧-٥) تجعل قيادتها أكثر راحة لنا عندما نتجاوز مطبًا ما، وحيث أننا لا نرغب في استمرار السيارة بالاهتزاز إلى الأعلى وإلى الأسفل طوال الرحلة، لذلك تعمل الزنبركات على التخميد عبر امتصاص الصدمات، فنتابع القيادة بسلاسة بعد كل مطب.

يتحقّق التخميد بإدخال قوة الاحتكاك في النظام الميكانيكي، حيث تبقى الطاقة الكلّية للاهتزاز غير المخمد ثابتة. ثمّة تبادل طاقة منتظم بين طاقة الوضع وطاقة الحركة؛ وبإدخال الاحتكاك يكون للتخميد تأثير في إزالة بعض الطاقة من النظام المهتز، فتقل سعة الاهتزاز وسرعته العظمى.

الصورة ٧-٥ الزنبركات وممتصات الصدمات في السيارة تشكّل نظام تعليق مخمد.

سؤال

٢٣ **أ.** وضّح بيانيًا كيف تتغيّر كلّ من الكميّات الآتية مع الزمن خلال مسار دورة واحدة كاملة لحركة توافقية بسيطة لبندول غير مخمد: طاقة الحركة، طاقة الوضع، الطاقة الكلية.

ب. اذكر كيف ستكون التمثيلات البيانية مختلفة في حالة بندول يتعرض للتخميد.

٧-١٠ الرنين

يمكن أن تظهر في العديد من المواقف المختلفة ظاهرة فيزيائية مهمة وهي **الرنين Resonance**، والمثال الدرامي هو جسر الألفية للمشاة في لندن (الصورة ٧-٦)، إذ عندما كان يكتظ بالمئات من المارة كان يبدأ بالتأرجح بشكل خطر، وممّا زاد الطين بلة تمايل الناس أيضًا تزامنًا مع تمايل الجسر، الأمر الذي تسبب في زيادة سعة اهتزازاته، فيحدث ما يُسمّى الرنين. وأُغلق الجسر لتحليل المشكلة، ثم أعيد افتتاحه بعد أن أضاف المهندسون «مخمدات» إلى الجسر لامتصاص طاقة اهتزازاته.

ستلاحظ أمثلة كثيرة مألوفة للرنين عند دفع طفل صغير على أرجوحة يكون لاهتزاز الأرجوحة وللطفل تردد طبيعي، فدفعة صغيرة في كل دورة ينتج عنها زيادة في السعة حتى يتأرجح الطفل عاليًا في الهواء.

الصورة ٧-٦ أُغلق جسر الألفية للمشاة «المهتز» في لندن لمدة عامَين تقريبًا لتصحيح المشكلات التي حدثت بسبب الرنين.

مصطلحات علمية

الرنين Resonance: يحدث عندما يكون تردد الدافع مساويًا للتردد الطبيعي للنظام المهتز. حيث يمتص النظام أكبر طاقة ممكنة من الدافع فتصبح له سعة عظمى.

مهارة عملية ٧-٣: ملاحظة الرنين

يمكن أن يكون الرنين ملاحظًا مع أي نظام مهتز تقريبًا، فالنظام يهتز قسريًا بتردد معيّن؛ فإذا كان التردد القسري الذي يحدث يتطابق مع التردد الطبيعي لاهتزاز النظام، فعندئذ يمكن أن تتراكم سعات الاهتزازات الناتجة لتصبح كبيرة جدًا.

بندولات بارتون

بندولات بارتون (الصورة ٧-٧) تُعدّ مثالًا على الرنين، فهو يتكوّن من عدة بندولات ذات أطوال مختلفة تتدلى من خيط أفقي، لكل منها تردد طبيعي للاهتزاز خاص بها يعتمد على طول الخيط، فالبندول «الدافع» موجود في النهاية، وهو مختلف وله كتلة كبيرة في نهايته، وطوله يساوي طول أحد البندولات الأخرى. يوضع البندول الدافع في حالة اهتزاز، فتبدأ البندولات الأخرى بالحركة تدريجيًا، ومع ذلك فإن البندول الذي يتطابق طوله مع طول البندول الدافع هو فقط الذي تتراكم سعته لتصبح كبيرة بحيث يحدث له رنين.

الصورة ٧-٧ بندولات بارتون.

ما الذي يجري للبندولات؟ لقد رُبطت كل البندولات بحيث تكون متجاورة بخيط تعليق واحد. عندما يهتز البندول الدافع فإنه يحرك خيط التعليق والذي بدوره يحرك البندولات الأخرى. تردد البندول المطابق في الطول للبندول الدافع سيكون له التردد نفسه للبندول الدافع، الأمر الذي يجعله يكتسب طاقة وتتراكم سعته تدريجيًا، في حين أن البندولات الأخرى لها ترددات طبيعية مختلفة، وبالتالي فإن تأثير البندول الدافع عليها ضئيل.

بطريقة مماثلة إذا كنت ستدفع الطفل على الأرجوحة مرة واحدة كل ثلاثة أرباع اهتزازة، فستجد أن التأرجح سوف يكون إلى الخلف أثناء محاولتك دفع الأرجوحة إلى الأمام، بحيث يؤدي دفعك إلى إبطائها.

نظام كتلة وزنبرك في وضعية رأسية

يمكنك ملاحظة الرنين بنفسك بطريقة بسيطة بواسطة نظام كتلة وزنبرك. أنت بحاجة إلى وضع كتلة في نهاية زنبرك (الصورة ٧-٨)، وتختارها بحيث تهتز الكتلة إلى الأعلى وإلى الأسفل بتردد طبيعي نحو (1 Hz). أمسك الآن الطرف العلوي من الزنبرك وحرّك يدك إلى الأعلى وإلى الأسفل بسرعة، بحيث تكون سعة الاهتزازة سنتيمترًا واحدًا أو سنتيمترَين، تلاحظ أن السعة تزداد قليلًا. حرك يدك الآن إلى الأعلى وإلى الأسفل ببطء أكثر، لتقترب من (1 Hz).

يجب أن ترى أن الكتلة تهتز بزيادة تدريجية في سعتها. اضبط حركاتك على التردد المحدّد للاهتزازات الطبيعية للكتلة وسترى التأثير الأكبر.

الصورة ٧-٨ الرنين لكتلة معلقة في زنبرك.

تحديد الرنين

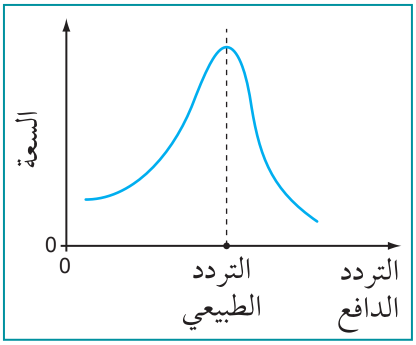
لكي يحدث الرنين يجب أن يكون لدينا نظام قادر على الاهتزاز بحرّية، ويجب أن نعتمد طرائق تدفع النظام إلى الاهتزاز، وعندما يتطابق التردد القسري مع التردد الطبيعي للنظام تزداد سعة الاهتزازات بشكل كبير.

إذا كان التردد الدافع لا يتطابق تمامًا مع التردد الطبيعي فإن سعة الاهتزازات تزداد، ولكن ليس بالقدر نفسه الذي يحدث عندما يتحقّق الرنين. يبيّن الشكل ٧-٢٦ كيف تعتمد سعة الاهتزازات على التردد الدافع في المنطقة القريبة من الرنين.

في حالة الرنين، تنتقل الطاقة من الدافع إلى النظام المهتز بشكل أكثر كفاءة منه في حال لم يحدث رنين، فعلى سبيل المثال نقل الطاقة من المشاة على جسر الألفية إلى الجسر نفسه تسبب باهتزازات ذات سعات كبيرة.

أي نظام في حالة الرنين ينطبق عليه الآتي:

- تردده الطبيعي يساوي تردد الدافع (المحفز).
- سعته تكون عظمى.
- يمتص أكبر قدر ممكن من الطاقة من خلال الدافع.



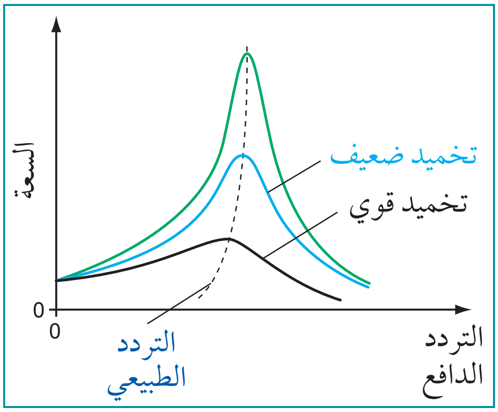
الشكل ٧-٢٦ تتحقق السعة العظمى عندما يتطابق تردد الدافع مع التردد الطبيعي للاهتزاز.

الرنين والتخميد

تُدفع المباني إلى الاهتزاز في أثناء الزلازل بسبب اهتزازات الأرض، ويمكن أن يحدث رنين للمباني فيؤدي إلى أضرار جسيمة (الصورة ٧-٩). قد تكون المباني في المناطق التي تحدث فيها الزلازل بشكل متكرر على أساسات تمتص طاقة الاهتزازات الأرضية، وبهذه الطريقة «تخمد» الاهتزازات بحيث لا يمكن أن تصل سعتها إلى مستويات خطرة. لا شك أنه عمل مكلف، ويقتصر ذلك حاليًا على المناطق الأكثر ثراءً في العالم.

الصورة ٧-٩ تأثير الرنين في زلزال حدث في الثاني والعشرين من شهر فبراير لعام 2011 للميلاد على بلدة كرايستشيرش في نيوزيلندا، والذي تسبب في انهيار العديد من المباني. كان مركز الزلزال في ليتيلتون على بُعد 10 كيلومترات جنوب شرق الحي التجاري المركزي في كرايستشيرش، وكان بدرجة 6.3 حيث راح ضحيته ما يقرب من 200 شخص.

إذا أردنا تقليل أضرار آثار الرنين فيمكن الاستفادة من التخميد. يبيّن الشكل ٧-٢٧ كيف أن التخميد يغيّر منحنى الاستجابة للرنين في الشكل ٧-٢٦. لاحظ أنه مع زيادة درجة التخميد فإن سعة اهتزازات الرنين تقل، وتصبح ذروة منحنى الرنين أوسع، وهناك تأثير على التردد الطبيعي الذي يحدث فيه الرنين أيضًا، حيث يصبح أقل كلما ازداد التخميد.



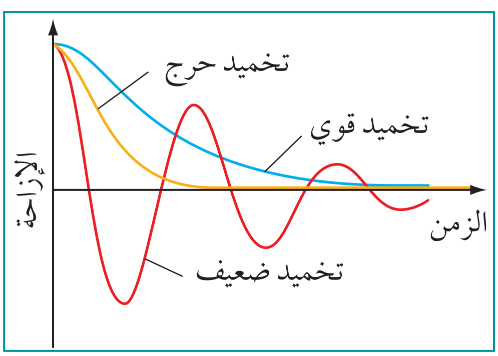
الشكل ٧-٢٧ يقلّل التخميد من سعة الاهتزازات الرنانة.

نجد مثالًا شائعًا على التخميد في بعض الأبواب، على سبيل المثال قد يكون لأحد المطاعم باب يؤدي إلى المطبخ يتأرجح ليفتح في كلا الاتجاهَين، وقد صُمِّم هذا الباب للإغلاق التلقائي بعد مرور شخص ما من خلاله؛ من الناحية المثالية فإن الباب يجب أن يتأرجح إلى الخلف بسرعة من دون أن يتجاوز حد موضع الإغلاق، ولتحقيق ذلك الأمر يجب أن تؤدي مفصلات الباب (أو آلية الإغلاق) إلى التخميد الصحيح، أما إذا كانت تلك المفصلات تؤدي إلى تخميد ضعيف جدًا فإن الباب سيتأرجح إلى الأمام وإلى الخلف عدة مرات عند إغلاقه، وأما إذا كانت المفصلات تؤدي إلى تخميد قوي جدًا فإن إغلاق الباب سيستغرق زمنًا طويلًا، ولكن إن كانت تؤدي إلى **تخميد حرج Critical damping** فسيعود الباب ليغلَق بسرعة بدون اهتزاز.

مصطلحات علمية

تخميد حرج Critical damping:
الحد الأدنى من التخميد الذي يتسبب في عودة النظام المهتز إلى موضع اتزانه في أقل زمن وبدون اهتزاز. سيسمح أي تخميد أضعف للنظام بالاهتزاز مرة واحدة أو أكثر؛ وسيؤدي أي تخميد أقوى إلى استغراق النظام زمنًا أطول للعودة إلى موضع اتزانه.

التخميد الحرج هو الحد الأدنى من التخميد المطلوب لإعادة الجسم المهتز إلى موضع اتزانه من دون اهتزاز، ونتائج التخميد الضعيف (Under-damping) في الاهتزازات غير مرغوب فيها؛ وبالمقابل يؤدي التخميد القوي (Over-damping) إلى العودة البطيئة إلى موضع الاتزان (انظر الشكل ٧-٢٨). يستخدم نظام التعليق في السيارات زنبركات للمرور بسلاسة فوق المطبات الموضوعة على الطريق، وعادة ما تؤدي إلى تخميد حرج؛ بحيث لا يعاني الركاب أيَّ اهتزازات غير مرغوب فيها أثناء اجتياز السيارات للمطبات.



الشكل ٧-٢٨ التخميد الحرج يكفي لضمان أن يعود النظام المخمد إلى وضع الاتزان من دون اهتزاز في أقل زمن.

استخدام الرنين

كما رأينا يمكن أن يمثل الرنين مشكلة في الأنظمة الميكانيكية، ومع ذلك يمكن أن يكون مفيدًا أيضًا، فالعديد من الآلات الموسيقية مثلًا تعتمد على الرنين.

ولا يقتصر الرنين على الأنظمة الميكانيكية فحسب بل يمكن استخدامه في أفران الميكروويف مثلًا؛ فموجات الميكروويف المستخدمة لها تردد مطابق للتردد الطبيعي لاهتزاز جُزيئات الماء (موجات الميكروويف هي «الدافع» وجُزيء الماء هو «نظام الرنين»)، بحيث تدفع جُزيئات الماء الموجودة في الطعام إلى الاهتزاز فتمتص طاقة إشعاع الميكروويف، ويصبح الماء أكثر سخونة وتنتشر الطاقة الممتصة عبر الطعام فتطبخه أو تسخنه.

يستخدم التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) في الطب لإنتاج صور مثل الصورة ٧-١٠، فهي تُظهِر جوانب الأعضاء الداخلية للمريض. يستخدم نطاق من ترددات موجات الراديو في التصوير، فتمتص نوى الذرّات ترددات معيّنة منه، ويعتمد التردد الممتص على نوع النواة ومحيطها، بحيث يمكن إنتاج صورة حاسوبية من تحليل امتصاص موجات الراديو.

الصورة ٧-١٠ تبيّن صورة التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) رجلًا وامرأة وطفلًا يبلغ من العمر تسع سنوات. لُوِّنت الصورة لتظهر العظام (بيضاء) والرئتَين (سوداء داكنة) وأعضاء أخرى.

كما يعتمد الراديو أو التلفاز أيضًا على الرنين في دوائر التوليف الخاصة به، إذ يلتقط الهوائي إشارات ذات ترددات كثيرة مختلفة من العديد من أجهزة الإرسال. ويمكن ضبط دائرة التوليف لتصدر رنينًا عند تردد محطة الإرسال المطلوبة، فتنتج دائرة التوليف إشارة ذات سعة كبيرة لهذا التردد فقط.

أفكار عظيمة في الفيزياء

توضح دراسة الحركة التوافقية البسيطة بعض الجوانب المهمة في الفيزياء:

- غالبًا ما يأخذ الفيزيائيون مشكلة معقدة (مثل: كيف تهتز الذرّات في مادة صلبة؟) واختزالها إلى مشكلة أبسط وأكثر قابلية للإدارة (مثل: كيف يهتز نظام كتلة وزنبرك؟). إنه سؤال أبسط من سواه لأننا نعلم أن الزنبرك يخضع لقانون هوك، بحيث تتناسب هذه القوة طرديًا مع مقدار الإزاحة.
- يشعر الفيزيائيون عمومًا بالسعادة إذا تمكنوا من كتابة معادلات رياضية تعطي حلولًا عددية للمشكلات المطروحة. فالمعادلة $a = -\omega^2 x$، التي تصف الحركة التوافقية البسيطة يمكن حلّها لإعطاء معادلتَي الجيب وجيب التمام التي درسناهما سابقًا.
- بمجرد أن يحل الفيزيائيون مشكلة واحدة كهذه، تجدهم ينظرون حولهم بحثًا عن مواقف أخرى بحيث يمكن استخدام تلك الأفكار نفسها مرة أخرى. لذا فإن نموذج الكتلة والزنبرك تناسب جيدًا اهتزاز الذرات والجزيئات أيضًا، وكذلك الأجسام التي ترتد إلى الأعلى وإلى الأسفل في الماء، وفي العديد من المواقف الأخرى.

- يسعى الفيزيائيون إلى تعديل النظرية لتناسب أكبر مجموعة من المواقف أيضًا: على سبيل المثال، ماذا يحدث إذا تعرضت الكتلة المهتزة لقوة احتكاك وهي تهتز؟ (سيحدث تخميد). أو ماذا يحدث إذا كان الزنبرك لا يخضع لقانون هوك؟ (هذا سؤال تصعب الإجابة عنه).

ومن هذا المنطلق يساعدك كتاب الفيزياء على تقدير الجهود للأفكار الكبيرة في مجالات الفيزياء المختلفة مثل المغناطيسية والكهربائية والجاذبية والطاقة وغيرها.

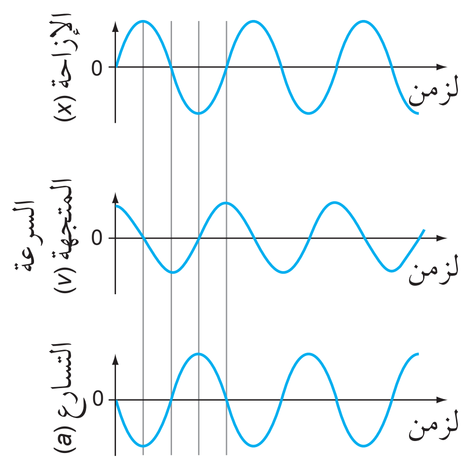
سؤال

٢٤ أعطِ مثالًا على موقف يشكّل فيه الرنين مشكلة، ومثالًا آخر يكون فيه الرنين مفيدًا. حدّد في كل مثال النظام المهتز والسبب الذي يدفعه إلى الرنين.

ملخّص

تهتز أيّة أنظمة ميكانيكية وغيرها بحرّية عند اضطرابها عن مواضع اتزانها.

بعض الأنظمة المهتزة توصف حركتها بأنها **حركة توافقية بسيطة** (s.h.m.). تُعدّ التمثيلات البيانية للإزاحة والسرعة المتجهة والتسارع مقابل الزمن بالنسبة إلى هذه الأنظمة منحنيات جيبية. انظر الشكل ٧-٢٩.



الشكل ٧-٢٩ تمثيلات بيانية للحركة التوافقية البسيطة.

يتغيّر الطور خلال دورة واحدة للحركة التوافقية البسيطة بمقدار 2π rad. يرتبط التردد الزاوي (ω) للحركة بالزمن الدوري (T) والتردد (f) من خلال المعادلات:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ و } \omega = 2\pi f$$

يمكن تمثيل الإزاحة (x) والسرعة المتجهة (v) والتسارع (a) في الحركة التوافقية البسيطة كدوال للزمن (t) بواسطة المعادلات بالصيغ الآتية في حالة بدء الحركة من موضع الاتزان:

$$x = x_0 \sin(\omega t) \text{ و } v = v_0 \cos(\omega t) \text{ و } a = -a_0 \sin(\omega t)$$

يتحرك الجسم حركة توافقية بسيطة إذا كان تسارعه يتناسب طرديًا مع إزاحته عن موضع اتزانه، ويكون اتجاهه دائمًا نحو موضع الاتزان.

تابع

يرتبط التسارع (a) في الحركة التوافقية البسيطة بالإزاحة (x) من خلال المعادلة: $a = -\omega^2 x$
تعطى السرعة العظمى (v_0) في الحركة التوافقية البسيطة من خلال المعادلة: $v_0 = \omega x_0$
تعطى الطاقة الكلية (E) في الحركة التوافقية البسيطة من خلال المعادلة: $E_0 = \frac{1}{2} m\omega^2 x_0^2$
التردد والزمن الدوري لجسم يهتز بحركة توافقية بسيطة لا يعتمدان على سعة الاهتزاز.
هناك تبادل منتظم بين طاقة الحركة وطاقة الوضع في الحركة التوافقية البسيطة.
تزيل قوى المقاومة طاقة من النظام المهتز وهو ما يعرف بالتخميد. والتخميد يسبب تناقص السعة مع مرور الزمن.
التخميد الحرج هو الحد الأدنى من التخميد المطلوب لإعادة الجسم المهتز إلى وضع اتزانه من دون اهتزاز.
عندما يُدفع نظام مهتز إلى الاهتزاز بالقرب من تردده الطبيعي، فإن سعة الاهتزاز تزداد باطّراد. وتكون السعة عظمى عندما يتطابق التردد الدافع مع التردد الطبيعي للنظام؛ وهذا هو الرنين.
يمكن أن يسبب الرنين مشكلة، ولكنه قد يكون مفيدًا جدًا أيضًا.

أسئلة نهاية الوحدة

١ أي العبارات الآتية صحيحة لكتلة معلّقة في زنبرك وتهتز بحركة توافقية بسيطة؟
- أ. تكون القوة المؤثرة على الكتلة أكبر عندما تكون إزاحة الكتلة أكبر.
- ب. تكون القوة المؤثرة على الكتلة أكبر عندما تكون سرعة الكتلة أكبر.
- ج. تكون القوة المؤثرة على الكتلة متناسبة طرديًا مع التردد الزاوي للكتلة المهتزة.
- د. تكون القوة المؤثرة على الكتلة متناسبة عكسيًا مع الزمن الدوري للكتلة المهتزة.

٢ بندول بسيط معلّق به كرة كتلتها (0.40 kg) تهتز بزمن دوري (2.0 s) وبسعة (0.15 m). طاقة وضعها عند إحدى النقاط في دورتها تبلغ (0.020 J). ما مقدار طاقة الحركة لكرة البندول عند تلك النقطة؟

أ. 0.024 J ب. 0.044 J ج. 0.14 J د. 0.18 J

أفعال إجرائية

برّر Justify: ادعم الموضوع بالأدلة والحجة.

٣ حدّد وبرّر ما إذا كانت الاهتزازات الآتية تُظهِر حركة توافقية بسيطة:
- أ. ارتداد كرة سلة بشكل متكرّر عن الأرض.
- ب. اهتزاز وتر العود.
- ج. اهتزاز كرة من مادة موصلة بين صفيحتَين متوازيتَين مشحونتَين بشحنتَين مختلفتَين في النوع.
- د. بندول ساعة.

٤ يُزاح بندول ساعة حائط مسافة (4.0 cm)، ليهتز بعدها بحركة توافقية بسيطة بزمن دوري (1.0 s).
- أ. اكتب معادلة تصف الإزاحة (x) لكرة البندول مع الزمن (t).

تابع

ب. احسب:

١. السرعة المتجهة العظمى لكرة البندول.

٢. سرعتها المتجهة عندما تكون إزاحتها (2.0 cm).

٥ كتلة مقدارها (50 g) معلقة بزنبرك مثبت طرفه الآخر بإحكام. سُحبت الكتلة إلى الأسفل (16 mm) ثم حرّرت، الأمر الذي أدى إلى حدوث اهتزاز بحركة توافقية بسيطة زمنه الدوريّ (0.84 s).

أ. احسب تردد الاهتزاز.

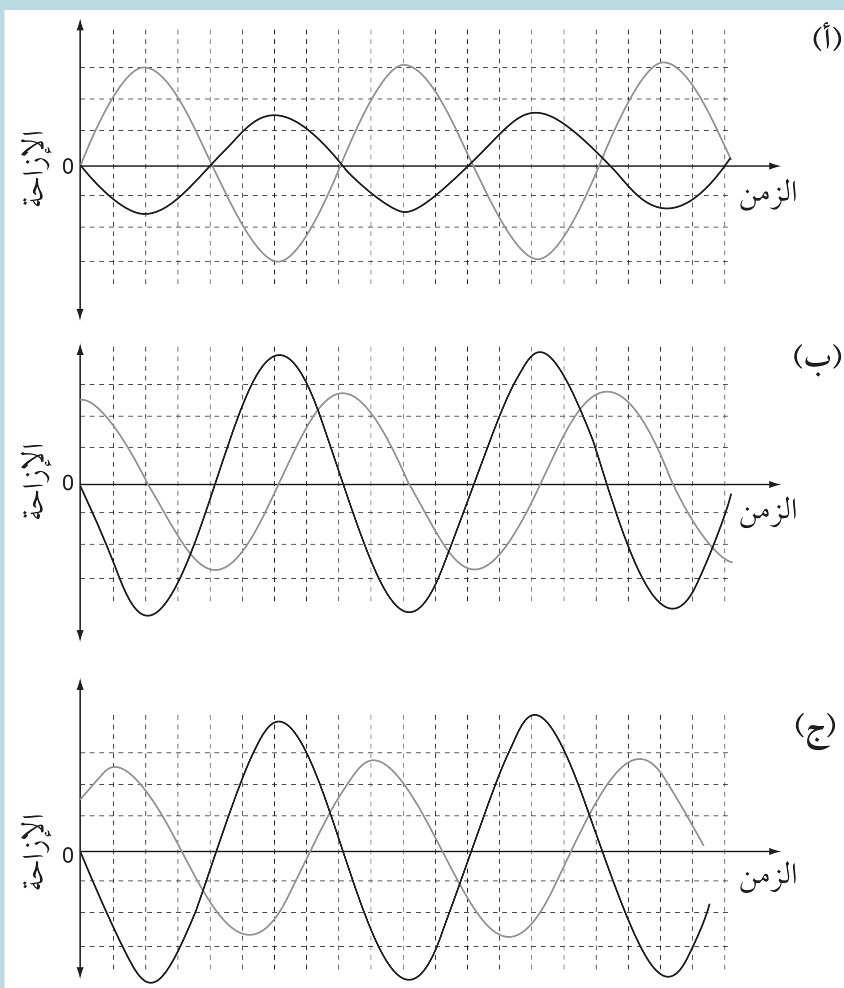
ب. احسب السرعة المتجهة العظمى للكتلة، واذكر نقطة الاهتزاز التي سيكون لها هذه السرعة المتجهة.

ج. احسب الطاقة الحركية العظمى للكتلة.

د. جِد طاقة وضع الجاذبية العظمى للكتلة (نسبة إلى موضع اتزانها). يمكنك افتراض أن التخميد لا يكاد يُذكر.

٦ في كلّ من التمثيلات البيانية الثلاثة الآتية، (أ) و (ب) و (ج) في الشكل ٧–٣٠، أعطِ فرق الطور بين المنحنيَين:

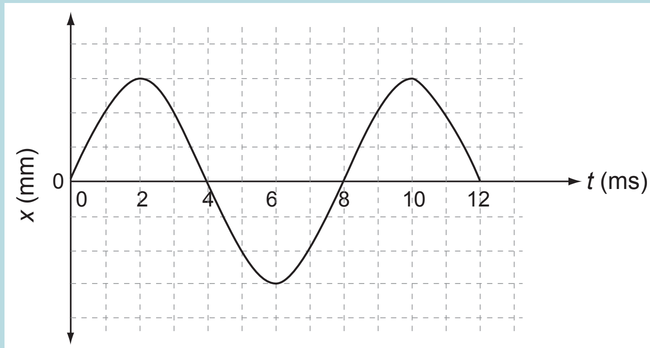
أ. كجزء من اهتزازة واحدة. **ب.** بالدرجات. **ج.** بالراديان.



الشكل ٧–٣٠

تابع

٧ **أ.** حدّد مقدار التردد والزمن الدوري للاهتزاز الذي يصفه التمثيل البياني في الشكل ٧-٣١.



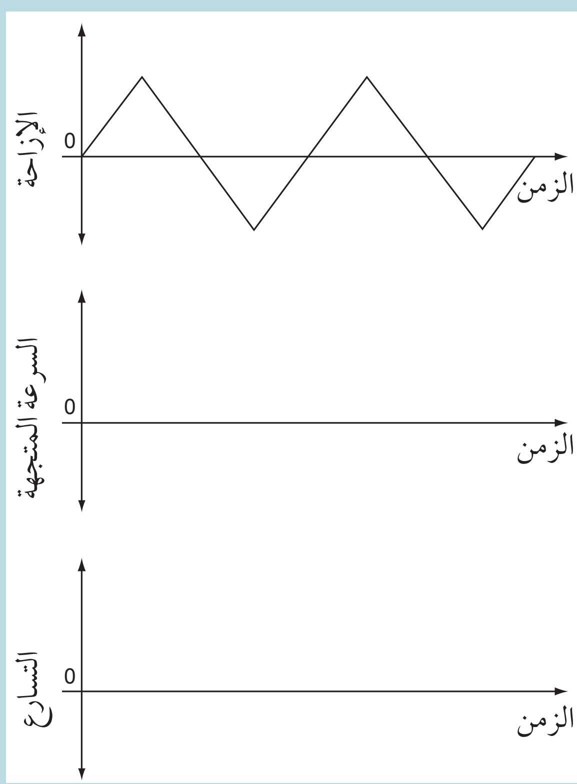
الشكل ٧-٣١

ب. استخدم نسخة من التمثيل البياني وارسم على المحاور نفسها:

١. السرعة المتجهة للجسم.

٢. تسارع الجسم.

٨ تبيّن التمثيلات البيانية في الشكل ٧-٣٢ إزاحة جسم ما في أثناء اهتزازه بين نقطتَين.



الشكل ٧-٣٢

أ. حدّد ما إذا كان الجسم يتحرك حركة توافقية بسيطة، واشرح إجابتك.

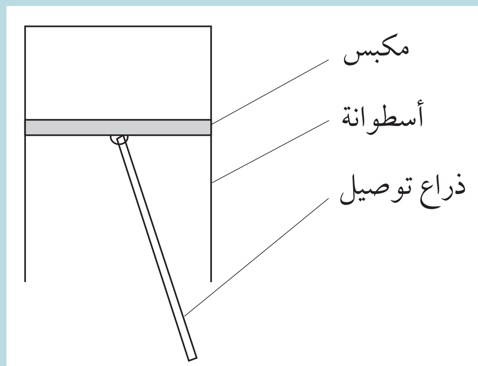
تابع

ب. انسخ التمثيلات البيانية الثلاثة.

١. ارسم التمثيل البياني (السرعة المتجهة – الزمن).

٢. ارسم التمثيل البياني (التسارع – الزمن).

٩ يبيّن المخطّط في الشكل ٧–٣٣ مكبس محرك سيارة صغير يهتز في الأسطوانة بحركة تماثل الحركة التوافقية البسيطة بمعدل 4200 اهتزازة في الدقيقة. كتلة المكبس (0.24 kg).



الشكل ٧–٣٣

أ. اشرح المقصود بالحركة التوافقية البسيطة.

ب. احسب تردد الاهتزازة.

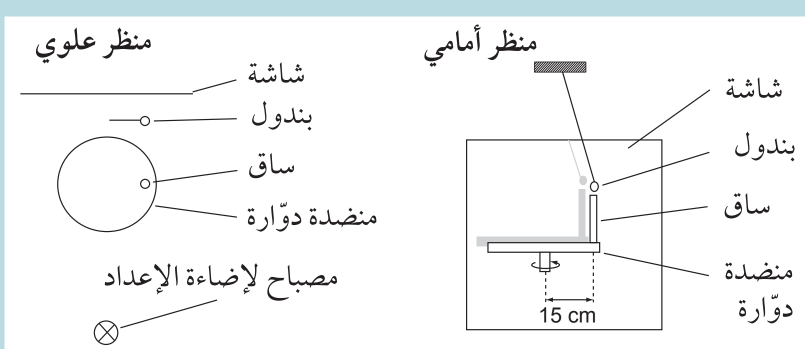
ج. سعة الاهتزازة (12.5 cm). احسب:

١. السرعة العظمى التي يتحرك بها المكبس.

٢. أكبر تسارع للمكبس.

٣. القوة المطلوب التأثير بها على المكبس لإنتاج أكبر تسارع.

١٠ يبيّن المخطط في الشكل ٧–٣٤ منضدة دوّارة وساقًا مثبّتة عليها، تبعد الساق عن مركزها مسافة (15 cm). تُضاء المنضدة الدوّارة من الجانب بحيث يسقط ظل الساق على الشاشة.



الشكل ٧–٣٤

وُضع بندول بسيط خلف المنضدة الدوّارة وضُبط ليهتز بحيث يكون له سعة مساوية للمسافة التي تبعدها الساق عن مركز المنضدة الدوّارة.

تابع

ضُبطت سرعة دوران المنضدة الدوّارة، بحيث تدور بمعدل 1.5 دورة في الثانية، ولوحظ أن ظِلَّ كل من البندول والساق كانا يتحركان إلى الأمام وإلى الخلف على الشاشة بالطور نفسه.

أ. اشرح المقصود بعبارة: الطور نفسه.

ب. اكتب معادلة لوصف الإزاحة (x) للبندول من موضع اتزانه والتردد الزاوي لاهتزازه.

ج. عندما تدور المنضدة الدوّارة بمقدار $60°$ من موضع الإزاحة العظمى كما هو مبيّن في الشكل ٧-٣٤.

١. احسب إزاحة البندول (من موضع اتزانه) في هذه النقطة.

٢. احسب سرعته عند هذه النقطة.

٣. ما الزاوية الأخرى التي يجب أن تدور بها المنضدة الدوّارة قبل أن يصبح البندول بهذه السرعة مرة أخرى؟

١١ عندما تصطدم كرة كريكت بمضرب كريكت بسرعة عالية، يمكن أن تتسبب في تكوين اهتزازات على المضرب. ففي أحد الأمثلة، تحرّك مقبض مضرب كريكت بتردد (60 Hz) وبسعة (2.8 mm).

يمكن اعتبار الحركة الاهتزازية لمقبض مضرب الكريكت حركة توافقية بسيطة.

أ. اذكر شروط الحركة التوافقية البسيطة.

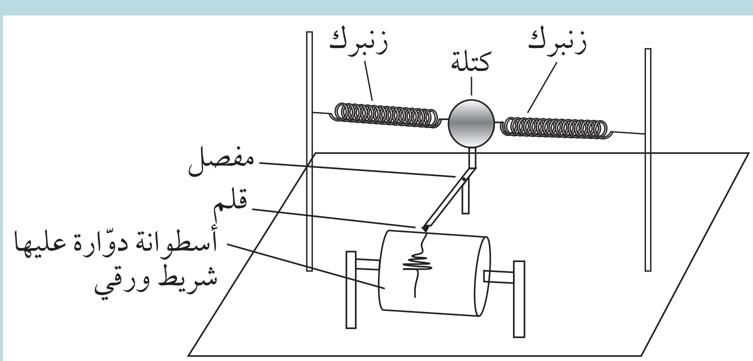
ب. احسب أكبر تسارع لمقبض مضرب الكريكت.

ج. بالنظر إلى أن الجزء الذي يمسك به لاعب الكريكت من مقبض مضرب الكريكت الذي كتلته (0.48 kg)، احسب القوة القصوى التي ستؤثر على يدَي اللاعب.

د. تضعف الاهتزازات وتتلاشى بعد نحو خمس دورات كاملة. ارسم تمثيلًا بيانيًا (الإزاحة-الزمن) لإظهار هذه الاهتزازات.

١٢ يستخدم جهاز رصد الزلازل (السيزموجراف) للكشف عن الموجات الصدمية التي تنتقل عبر الأرض بسبب الزلازل وقياسها.

يبيّن الشكل ٧-٣٥ تركيب جهاز رصد الزلازل البسيط. ستتسبب الموجة الصدمية في اهتزاز الكتلة، الأمر الذي يؤدي إلى رسم أثر على شريط ورقي دوّار.

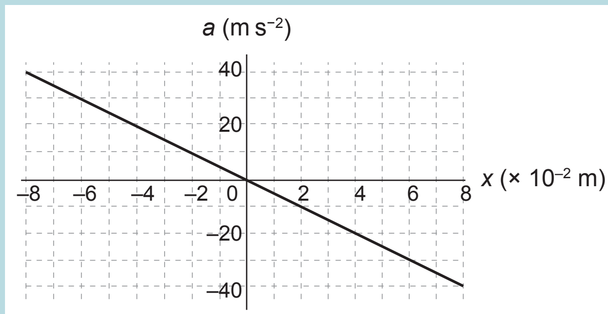


الشكل ٧-٣٥

تابع

أ. يتراوح تردد الموجة الصدمية النموذجية (بين 30 Hz و 40 Hz). اشرح سبب وجوب أن يكون التردد الطبيعي لنظام الكتلة والزنبرك في جهاز رصد الزلازل أقل بكثير من مدى الترددات هذا.

يبيّن التمثيل البياني في الشكل ٧-٣٦ تسارع الكتلة مقابل إزاحتها عندما يسجل جهاز رصد الزلازل زلزالًا.



الشكل ٧-٣٦

ب. ما الدليل الذي يقدمه التمثيل البياني على أن الحركة توافقية بسيطة.

ج. استخدم المعلومات من التمثيل البياني لحساب تردد الاهتزاز.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم مصطلحات الإزاحة والسعة والزمن الدوري والتردد والتردد الزاوي وفرق الطور.	٧-٣، ٧-٦			
أعبّر عن الزمن الدوري باستخدام التردد والتردد الزاوي.	٧-٣، ٧-٦			
أفهم أنه توجد في الحركة التوافقية البسيطة قوة متغيّرة تؤثر على الجسم المهتز، وهي تتناسب طرديًا مع إزاحة الجسم المهتز عن نقطة معيّنة وتكون دائمًا متجهة نحو تلك النقطة.	٧-٤			
أتذكر المعادلة: $a = -\omega^2 x$ وأستخدمها.	٧-٧			
أفهم أن حل المعادلة $a = -\omega^2 x$ هو $x = x_0 \sin(\omega t)$.	٧-٧			
أستخدم المعادلة: $v = v_0 \cos(\omega t)$.	٧-٧			
أستخدم المعادلة: $v = \pm\,\omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$	٧-٧			

تابع

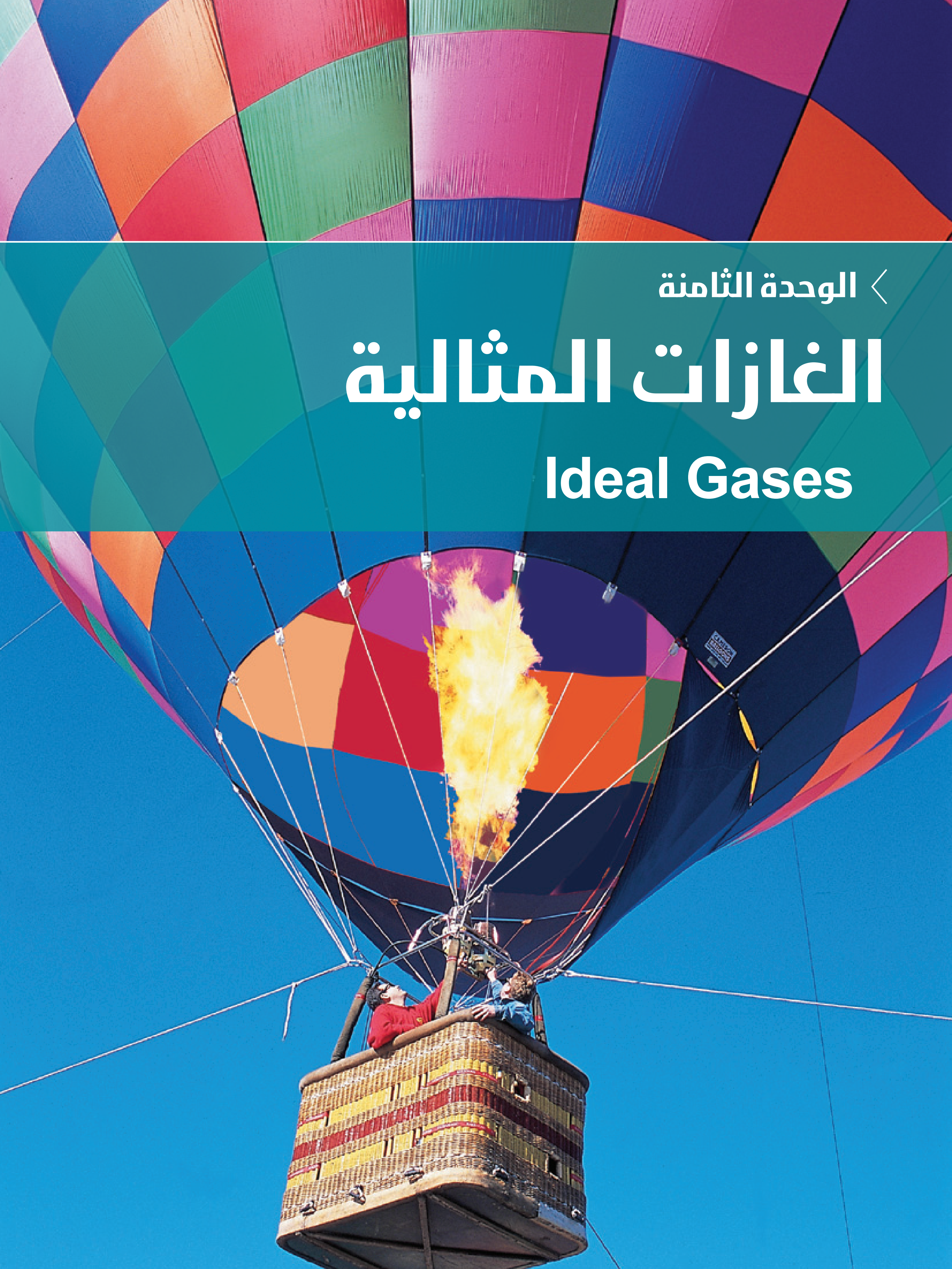
بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم التبادل بين طاقة الوضع وطاقة الحركة في الحركة التوافقية البسيطة.	٧–٨			
أفهم أن الطاقة الكلية لجسم مهتز بحركة توافقية بسيطة يبقى ثابتًا وأحدّده بواسطة سعة الجسم المهتز وكتلته وتردده.	٧–٨			
أذكر المعادلة: $E = \frac{1}{2} m \omega^2 x_0^2$ لطاقة الجسم المهتز الكلية وأستخدمها.	٧–٨			
أفهم أن قوة المقاومة تؤثر على الجسم المهتز وتسبب التخميد.	٧–٩			
أفهم مصطلحات التخميد الضعيف، والتخميد الحرج والتخميد القوي.	٧–١٠			
أُمثّل بيانيًا الإزاحة لأُبيّن الأنواع المختلفة من التخميد.	٧–١٠			
أفهم مفهوم الرنين.	٧–١٠			
أفهم أن الرنين يحدث عندما يكون التردد الدافع مساويًا للتردد الطبيعي للنظام المهتز.	٧–١٠			

الوحدة الثامنة

الغازات المثالية

Ideal Gases



أهداف التعلّم

٨-١ يذكر أن كميّة المادة هي كميّة أساسية في النظام الدولي للوحدات (SI) ووحدتها الأساسية هي المول (mol).

٨-٢ يستخدم الكميّات المولية في العمليات الحسابية، حيث أن المول الواحد من أي مادة هو الكميّة التي تحتوي على عدد من جسيمات تلك المادة يساوي عدد أفوجادرو (N_A).

٨-٣ يصف الضغط على المستويَين المجهري والجهري ويشرحهما.

٨-٤ يحوّل درجات الحرارة بين الكلفن والدرجة السيليزية باستخدام العلاقة: $T\,(\text{K}) = \theta\,(^\circ\text{C}) + 273.15$.

٨-٥ يذكر أن أدنى درجة حرارة ممكنة على مقياس درجة الحرارة المطلقة هي درجة الصفر كلفن وتعرف بدرجة الصفر المطلق.

٨-٦ يصف قانون بويل المعبّر عنه بـ: $p \propto \frac{1}{V}$ و $p_1V_1 = p_2V_2$ ويستخدمه.

٨-٧ يصف قانون شارل المعبّر عنه بـ: $V \propto T$ و $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$، حيث ($T$) هي درجة الحرارة المطلقة ويستخدمه.

٨-٨ يصف قانون جاي لوساك المعبّر عنه بـ: $p \propto T$ و $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ويستخدمه.

٨-٩ يعرّف الغاز المثالي لكتلة ثابتة من الغاز على أنه غاز يخضع للعلاقة: $\frac{pV}{T}$ = مقدار ثابت.

٨-١٠ يستخدم معادلة الغاز المثالي معبّرًا عنها بالصيغة: $pV = nRT$، والصيغة: $pV = NkT$.

٨-١١ يذكر الافتراضات الأساسية للنظرية الحركية للغازات.

٨-١٢ يستخدم العلاقة: $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$ في حل المسائل، حيث ($< c^2 >$) هو متوسط مربع سرعة الجزيئات.

٨-١٣ يقارن المعادلتَين: $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$ و $pV = NkT$؛ لاستنتاج أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيء ما هي: $\frac{3}{2} kT$.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- اكتب بمشاركة زميلك في الصف ما تعرفه عن الحركة البراونية وما تُظهِره تلك الحركة عن جزيئات الغاز.
- اكتب قائمة بقوانين نيوتن للحركة.
- اذكر قانون نيوتن الثاني للحركة بدلالة التغيّر في كمية التحرك.
- اشرح لزميلك في الصف - مستخدمًا التغيّر في كمية التحرك - السبب في أن الكرة التي تصطدم بجدار تؤثر عليه بقوة.
- اقترح كيف يمكن أن تساعدنا قوانين الفيزياء هذه في تفسير الضغط الذي يؤثر به الغاز داخل البالون.

العلوم ضمن سياقها

فكرة الغاز

تبيّن الصورة ٨-١ إطلاق بالون طقس. تحمل مثل هذه البالونات أجهزة إلى الأعلى في الغلاف الجوي لقياس الضغط ودرجة الحرارة وسرعة الرياح ومتغيّرات أخرى.

يُملأ البالون بالهيليوم بحيث تكون كثافته الكلية أقل من كثافة الهواء المحيط به، والنتيجة هي أن قوة الطفو تؤثر على البالون - والتي تكون أكبر من وزنه - لذلك فهو يرتفع إلى الأعلى، ومع صعود البالون إلى الأعلى فإن الضغط الجوي المحيط بالبالون ينخفض، وهذا يعني أن القوى التي تدفع جدران البالون إلى الداخل تتناقص مقارنة بالقوى التي تدفع جدران البالون إلى الخارج، وبالتالي فإن حجم البالون سوف يميل إلى التمدّد، وفي الوقت نفسه فإن درجة حرارة كلٍّ من الغلاف الجوي المحيط بالبالون والغاز داخل البالون ستنخفض، وهذا سيؤدي إلى أن يميل حجم الغاز في البالون إلى الانخفاض.

العلوم ضمن سياقها - تابع

كيف يؤثر هذان العاملان على حجم البالون عندما يرتفع؟ في هذه الوحدة سندرس سلوك الغازات عند تغيّر ضغطها ودرجة حرارتها وحجمها.

الصورة ٨-١ إطلاق بالون لمراقبة الطقس.

٨-١ كمية المادة

من أجل تقديم نموذج يحاكي سلوك الغازات وشرحه نحتاج إلى تعريف الكميات الرئيسية التي تحدّد حالة الغاز، وأول هذه الكميات التي يجب تعريفها هي كمية الغاز.

تعلمنا - في الصفوف السابقة - أن جميع الكميات في الفيزياء معرّفة ضمن نظام قياس يُعرف باسم النظام الدولي للوحدات (SI)، فكل العلاقات في الفيزياء تعرّف بالمعادلات التي تستخدم وحدات (SI) للمتغيّرات أو الثوابت المتضمنة.

كما عرفت أيضًا أن هناك سبع كميات أساسية لكل منها وحدة أساسية محدّدة، ويمكن اشتقاق جميع الوحدات الأخرى في الفيزياء من هذه الوحدات الأساسية السبع.

تسمى الكمية الأساسية **لكمية المادة** **المول Mole**، وتكتب وحدتها **بالمول** (mol).

لاحظ أن مفهوم كمية المادة يختلف عن مفهوم كتلة المادة؛ فالمول الواحد من المادة - وبغضّ النظر عن نوع المادة - يحتوي دائمًا على عدد الجسيمات نفسه، سواء أكانت ذرات أم جزيئات، أو أي نوع آخر من الجسيمات، ولكن غالبًا ما يكون لمعظمها كتل مختلفة عند مقارنتها بمول واحد من مادة أخرى.

يُعرّف المول الواحد على أنه كمية المادة التي تحتوي على عدد من الجسيمات يساوي ($6.02214076 \times 10^{23}$)، وهذا العدد يسمى **عدد أفوجادرو Avogadro number (N_A)**.

مصطلحات علمية

المول Mole:
المول الواحد هو كمية المادة التي تحتوي على عدد من الجسيمات يساوي عدد أفوجادرو، والمول كمية أساسية في النظام الدولي للوحدات (SI) لكمية المادة، ووحدته الأساسية المول (mol).

عدد أفوجادرو Avogadro number:
عدد الجسيمات في مول واحد من أي مادة، ويرمز له بـ (N_A).
$N_A = 6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$

تُسمى كتلة 1 مول من المادة **الكتلة المولية**، ويمكن الحصول على الكتلة المولية لأي مادة في الجدول الدوري بأخذ الكتلة الجزيئية للمادة، أي أن المول الواحد من تلك المادة سيكون له كتلة بالجرام تساوي الكتلة الجزيئية للمادة، فعلى سبيل المثال: الكتلة الجزيئية لغاز الهيدروجين (H_2) هي (2.0 u) (حيث u وحدة مشتقة تسمى وحدة الكتلة الذرية)؛ لأن كل ذرة هيدروجين لها كتلة تساوي (1.0 u)، وهذا يعني أن 1 مول من

H_2 سيكون له كتلة تساوي (2.0 g). يمكنك الاستعانة بملحق الجدول الدوري في نهاية الكتاب لمعرفة الكتل الجزيئية للعناصر.

ويمكن إيجاد عدد المولات أو كمية المادة من خلال:

$$n = \frac{\text{عدد الجسيمات}}{\text{عدد أفوجادرو}} = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{\text{كتلة المادة (g)}}{\text{الكتلة المولية }(g\ mol^{-1})} = \frac{m}{M}$$

n: عدد المولات أو كمية المادة

أمثلة

١. أ. **احسب كتلة 1 مول من ثاني أكسيد الكربون (CO_2).**

ب. يحتوي بالون على (132 g) من غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2). احسب كمية غاز ثاني أكسيد الكربون (بالـ mol) في البالون.

ج. احسب عدد جزيئات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في البالون.

أ. كتلة 1 مول من (CO_2) تساوي الكتلة الجزيئية لـ CO_2 بالجرام.

الكتلة المولية لـ CO_2:

$= 12.0 + (2 \times 16.0) = 44.0\ g$

ب. كمية الغاز بـ (mol):

$$\text{الكمية } (n) = \frac{\text{كتلة المادة (g)}}{\text{الكتلة المولية }(g\ mol^{-1})}$$

يحتوي (132 g) من غاز ثاني أكسيد الكربون على:

$$n = \frac{132}{44.0} = 3.00\ mol$$

ج. يحتوي 1 مول من أي مادة على عدد أفوجادرو (N_A) من الجزيئات.

$N_A = 6.02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$

عدد الجزيئات في 3.0 مول من ثاني أكسيد الكربون:

$N = 3.0 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.81 \times 10^{24}$ جزيء

٢. **تحتوي أسطوانة غاز على (1.51×10^{24}) جزيء من الأكسجين.**

أ. احسب كمية جزيئات الأكسجين في الأسطوانة بوحدة (mol).

ب. احسب كتلة غاز الأكسجين الموجود.

أ. $\text{الكمية } (n) = \frac{\text{عدد الجزيئات}}{\text{عدد أفوجادرو}}$

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{1.51 \times 10^{24}}{6.02 \times 10^{23}} = 2.51\ mol$$

ب. الكتلة = الكمية (مول) × الكتلة المولية لجزيء واحد

الكتلة المولية للأكسجين (O_2):

$= (2 \times 16.0) = 32.0\ g$

الكتلة $= 2.51 \times 32.0 = 80.3\ g$

أسئلة

١) إذا علمت أن كتلة ذرّة من الكربون-12 (^{12}C) تساوي (12.0 u)، فاحسب:

أ. كتلة ذرة من الكربون-12 بوحدة الـ kg، إذا اعتبرت أن ($1\ u = 1.66 \times 10^{-27}\ kg$).

ب. عدد الذرات وعدد المولات في (54.0 g) من الكربون.

ج. عدد الذرات في (1.0 kg) من الكربون.

٢) **أ.** احسب كتلة ذرة اليورانيوم-235 (^{235}U) بالجرام إذا علمت أن كتلتها بوحدة الكتل الذرية (235 u).

ب. عيّنة صغيرة من اليورانيوم-235 (^{235}U) كتلتها (20.0 mg). لهذه العيّنة، احسب:

١. عدد المولات.

٢. عدد ذرات اليورانيوم.

٣) (1.0 kg) من أي مادة يحتوي تقريبًا على 10^{26} ذرّة. تحقق من صحة هذه العبارة بإجراء تقديرات مناسبة.

٨-٢ الضغط والنموذج الحركي

نعلم أن جسيمات الغاز تتحرك بسرعة عالية، وفي أثناء حركتها تصطدم ببعضها وبجدران الإناء الذي يحويها (انظر الشكل ٨-١). ولكن كيف استنتجنا ذلك؟

الشكل ٨-١ تصادم جسيمات الغاز بجدران الوعاء بفعل ضغط الغاز (جسيمات الغاز ليس لها ظلال مثل تلك التي في الشكل. أُضيفت الظلال هنا لإظهار العمق).

تصوُّر حركة جسيمات الغاز أصعب من تصور حركة جسيمات المادة الصلبة؛ لأنها تتحرك بطريقة عشوائية، كما أن المسافة بين جسيمات الغاز كبيرة جدًا مقارنة بحجم الجسيمات.

تم استقصاء حركة جسيمات الغاز في عشرينيات القرن التاسع عشر من قبل عالم النبات الأسكتلندي روبرت براون (Robert Brown). فعندما كان يستخدم مجهرًا لفحص حبوب اللقاح وهي معلقة في الماء رأى جسيمات صغيرة جدًا تتحرك داخل الماء، ثم رأى الحركة نفسها في جسيمات الغبار في الهواء، وفي المختبر يسهل علينا رؤية جسيمات صغيرة من الدخان تتحرك في الهواء بحركة عشوائية، ونعتقد أن هذه الحركة العشوائية ناتجة من اصطدامها بجسيمات من الماء أو الهواء حولها غير مرئية، فجسيمات حبوب اللقاح والغبار كبيرة بما يكفي لتُرى بالمجهر العادي، في حين أن جزيئات الهواء أصغر من أن تُرى بالمجهر العادي.

جزيئات سريعة

سترى لاحقًا أن متوسط سرعة جزيئات الهواء عند درجة حرارة وضغط الغرفة في الظروف القياسية أو المعيارية (STP) وهي ($0\ °C$) و ($100\ kPa$)؛ تساوي ($0.4\ km\ s^{-1}$) تقريبًا، فإذا تمكنّا من تتبّع حركة جزيء واحد من جزيئات الهواء فسنجد أن سرعته في بعض الأحيان تكون أكبر من هذا المتوسط وتكون أقل في أحيان أخرى؛ حيث تتغيّر السرعة المتجهة (المقدار والاتجاه) للجزيء الواحد في كل مرة يتصادم فيها مع أي شيء آخر.

هذه القيمة لسرعة الجزيئات معقولة، إذ يمكن مقارنتها بسرعة الصوت في الهواء وهي تقريبًا ($330\ m\ s^{-1}$) في الظروف القياسية (ولكن سرعة الجزيئات أكبر). يمكن للجسيمات ذات السرعات العالية جدًا الإفلات بسهولة من مجال الجاذبية الأرضية، إذ تبلغ سرعة الإفلات المطلوبة تقريبًا ($11.2\ km\ s^{-1}$)، وسرعة جزيئات الهواء أقل بكثير من هذه القيمة وهو ما يفسر وجود الغلاف الجوي. هذا النموذج لحركة الجسيمات في الغاز - أو في الحالات الأخرى للمادة - يُعرف بالنموذج الحركي، وهو أساس ما سيتم اكتشافه لاحقًا من خصائص الغازات في النظرية الحركية.

> **مصطلحات علمية**
>
> **الضغط Pressure**:
> يُعرّف الضغط بأنه القوة التي تؤثر على وحدة المساحة من سطح ما.
>
> وحدة الضغط في النظام الدولي للوحدات هي باسكال (Pa). ومن المعادلة: $p = \frac{F}{A}$
> $1\ Pa = 1\ N/m^2$.

٨-٣ تفسير الضغط

يسبب الغاز **ضغطًا Pressure** على أي سطح يلامسه، والضغط هو مثال على الخصائص الجهرية أو الماكروسكوبية (تُرى بالعين المجردة أي العيانية). والخصائص الجهرية هي تلك الخصائص التي يمكن ملاحظتها دون مساعدة أدوات تكبير كالمجاهر أو أجهزة الاستشعار، ويشار إلى الخصائص التي لا يمكن

ملاحظتها وقياسها إلا باستخدام بعض أنواع أجهزة الاستشعار أو المجاهر بالخصائص المجهرية أو المايكروسكوبية.

يُحسب الضغط من العلاقة:

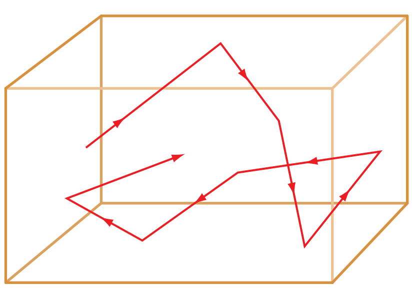
$$\text{الضغط} = \frac{\text{القوّة}}{\text{المساحة}}$$

$$p = \frac{F}{A}$$

من المعروف أن ضغط الغلاف الجوي عند مستوى سطح البحر يساوي (100 kPa) تقريبًا، فإذا كانت مساحة سطح جسم الإنسان العادي تساوي تقريبًا ($2.0\ m^2$)، فإن القوة التي يؤثر بها الغلاف الجوي على الشخص تساوي تقريبًا (200 000 N)، وهذا يعادل وزن 200 000 تفاحة!

من نِعم الله علينا أن الهواء والسوائل والدم الموجودة داخل جسم الإنسان تضغط إلى الخارج بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه لقوة الضغط الجوي؛ لذلك لا يتحطم الجسم تحت تأثير هذه القوة الكبيرة. يمكننا شرح الظاهرة الجهرية للضغط من خلال التفكير في سلوك الجسيمات المجهرية التي يتكوّن منها الغلاف الجوي.

يبيّن الشكل ٨-٢ حركة جزيء واحد من جزيئات الهواء داخل صندوق، حيث يرتد عدة مرات داخل الصندوق نتيجة اصطدامه بمختلف أسطحه الداخلية، وعند كل تصادم يؤثر بقوة صغيرة على جدار الصندوق، والضغط على الجزء الداخلي من الصندوق هو نتيجة القوى التي يؤثر بها العدد الهائل من الجزيئات في الصندوق.



الشكل ٨-٢ مسار أحد جزيئات الهواء في صندوق فارغ.

هناك عاملان يؤثران على القوة وبالتالي على الضغط الذي يؤثر به الغاز داخل الصندوق:

- عدد الجزيئات التي تصطدم بكل جانب من جوانب الصندوق في الثانية الواحدة.
- القوة التي يتصادم بها الجزيء مع الجدار.

إذا تصادم جزيء كتلته (m) تصادمًا عموديًا بالجدار بسرعة (v) فسيرتد بسرعة (v) في الاتجاه المعاكس، عندها يكون التغيّر في كمية تحرك الجزيء هو ($2mv$)، وبما أن القوة تساوي معدّل تغير كمية التحرك فإنه كلما كانت سرعة الجزيء أكبر ازدادت القوة التي يؤثر بها عندما يتصادم مع الجدار، ومن هنا فإن الضغط على الجدار سيزداد إذا تحركت الجزيئات أسرع.

هناك طرائق مختلفة يمكن أن يتغيّر بها الضغط داخل الوعاء، ويمكننا أن نفهم ذلك من خلال النظر في التجارب الذهنية الآتية:

أولًا: ماذا يحدث إذا أضفنا المزيد من الغاز إلى الوعاء؟ إذا أضفنا المزيد من الغاز فسنزيد كمية المادة (n) وسيكون هناك المزيد من الجسيمات داخل الوعاء، وبالتالي سيكون هناك المزيد من التصادمات مع جدران الوعاء في الثانية، وسيؤدي ذلك إلى ازدياد الضغط.

ثانيًا: إذا أغلقنا الوعاء بإحكام، ورفعنا درجة حرارة الغاز الذي بداخله (عن طريق التسخين) فإن متوسط طاقة حركة

الجسيمات سيزداد، وهذا يعني أن مقدار كمية التحرك المؤثرة على جدران الوعاء لكل تصادم سيزداد، وبالتالي ستزداد القوة المؤثرة عند كل تصادم، ومرة أخرى سيزداد ضغط الغاز.

أخيرًا: إذا غيّرنا حجم الوعاء فإننا بذلك نغيّر مساحة السطح التي تحدث عليه التصادمات. تصوّر مكبسًا بسيطًا كمنفاخ عجلة الدرّاجة الهوائية؛ فعندما يُدفع المكبس إلى الداخل فإن حجم الغاز في الأسطوانة يقل وكذلك مساحة سطحها الداخلي، ولكن عدد التصادمات في الثانية والقوة لكل تصادم ستبقى كما هي (بافتراض أن درجة حرارة الغاز داخل الأسطوانة لم تتغيّر)، وهذا الأمر سيجعل الضغط أكبر داخل الأسطوانة.

في الواقع ربما لاحظت أنه عندما تدفع مكبس منفاخ عجلة الدرّاجة إلى الداخل بسرعة فإن المنفاخ يصبح أكثر دفئًا، والسبب في ذلك هو أننا ننقل طاقة حركة إلى داخل النظام عندما ندفع المكبس، وبالتالي يزداد متوسط طاقة حركة جسيمات الغاز، وينتج عن ذلك ازدياد ملحوظ في درجة الحرارة، وهذا الارتفاع في درجة الحرارة يؤدي بدوره إلى زيادة الضغط الذي يؤثر به الغاز على الوعاء أيضًا، والعكس صحيح كذلك؛ فعندما نسحب المكبس إلى الخارج بسرعة فإنه يمكننا تقليل كل من الضغط ودرجة حرارة الغاز في الداخل فيصبح الغاز أكثر برودة.

من هذه التجارب الذهنية يمكننا أن نرى أن هناك متغيرات مهمة يجب مراعاتها عند وصف سلوك الغازات وهي: الضغط ودرجة الحرارة والحجم والكتلة أو كمية المادة.

أسئلة

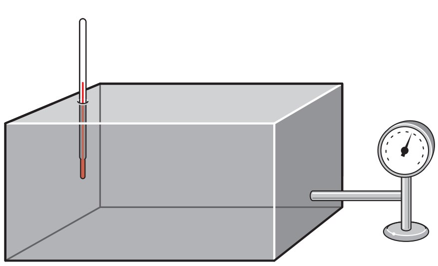
٤ اشرح مستعينًا بالنموذج الحركي (حركة الجزيئات)، ما يحدث للضغط داخل إطار عجلات سيارة عند ضخ المزيد من الجزيئات داخل الإطار عند درجة الحرارة نفسها.

٥ اشرح -باستخدام النموذج الحركي- السبب في احتمالية انفجار عبوة تحتوي على هواء إذا ارتفعت درجة حرارتها.

٦ عند السفر في مركبة لمسافات طويلة فإن درجة حرارة الإطارات تزداد بسبب الاحتكاك مع سطح الطريق. اشرح باستخدام النموذج الحركي أهمية قياس ضغط الإطارات فقط بعد عودة تلك الإطارات إلى درجة حرارة البيئة المحيطة.

٨-٤ متغيرات النظرية الحركية

في استكشافنا للنظرية الحركية للغازات؛ وللتبسيط سنتخيل صندوقًا يحتوي على غاز ما مثل الصندوق المبيّن في الشكل ٨-٣. من المناقشة السابقة رأينا أن هناك أربع خصائص (متغيرات) لهذا الغاز يمكننا قياسها: الضغط ودرجة الحرارة والحجم والكتلة. في هذه الوحدة ستتعلّم كيف ترتبط هذه الكميات ببعضها، وسيكون من المفيد في هذه المرحلة تلخيص تعريف هذه الكميات ووحداتها.



الشكل ٨-٣ لأي غاز أربع خصائص (متغيرات) قابلة للقياس مرتبطة ببعضها: الضغط ودرجة الحرارة والحجم والكتلة.

الضغط

هو القوة العمودية التي يؤثر بها الغاز لكل وحدة مساحة ($1\ m^2$) من جدران الوعاء، ويقاس الضغط بوحدة الباسكال (Pa)، ($1\ Pa = 1\ N\ m^{-2}$).

درجة الحرارة

تُقاس درجة الحرارة عادة بالدرجات السيليزية (°C)، ولكن من المناسب في النظرية الحركية استخدام درجة الحرارة المطلقة **Absolute temperature (*T*)** مقاسة بوحدة الكلفن (K). في مقياس درجة الحرارة المطلقة تُعرّف أدنى قيمة (0 K) على أنها درجة الحرارة التي لا تمتلك فيها جسيمات المادة أي طاقة حركة، وهذا يعني أنه لن يكون لجسيمات المادة عند درجة (0 K) أي طاقة حركة، وستكون مستقرة (ساكنة) تمامًا.

مصطلحات علمية

درجة الحرارة المطلقة Absolute temperature: هي درجة الحرارة التي تقاس بالنسبة إلى أدنى درجة حرارة (الصفر المطلق)، وتقاس بوحدة الكلفن (K).

في الحقيقة هذه النقطة افتراضية؛ حيث لم تُرصد درجة الحرارة هذه في أي مكان في الكون، حتى في أعمق أجزاء الفضاء بين المجرات، حيث قيست درجة الحرارة فكانت (2.725 K)، ويُعتقد أنها نتيجة «الشفق المتبقي» أو الطاقة المتبقية من الانفجار العظيم (تُعرف هذه الطاقة باسم «الخلفية الميكروويفية الكونية» لأنها تتوافق مع الموجات في منطقة الميكروويف من الطيف الكهرومغناطيسي)، علاوة على ذلك فإذا كانت درجة حرارة أي مادة تساوي (0 K) فلن نكون قادرين على رصدها؛ لأننا حتى نرصدها سنحتاج إلى أخذ طاقة بشكل ما من المادة، وأي أداة سنستخدمها ستنقل طاقة حركة فورًا إلى المادة وبالتالي ترفع درجة حرارتها. لذلك يحدّد الفيزيائيون «الصفر المطلق» من خلال استقراء درجة الحرارة من القيم المقاسة، وبهذه الطريقة يحدّد الصفر المطلق ليكون مكافئًا لـ (−273.15 °C)، وعليه فإن:

$$T\,(\mathrm{K}) = \theta\,(^\circ\mathrm{C}) + 273.15$$

حيث (θ) هي درجة الحرارة بالدرجة السيليزية ولتسهيل الحسابات سنقرّب الرقم (273.15) إلى (273).

الحجم

هو مقياس للحيّز الذي يشغله الغاز، ويقاس الحجم بوحدة (m^3).

الكتلة

هي مقدار ما يحويه الجسم من مادة، وتقاس الكتلة بوحدة (g) أو بوحدة (kg)، وعمليًا يفضل قياس **كمية** الغاز بوحدة المول.

٨-٥ قانون بويل

اكتشف العالِم الإيرلندي روبرت بويل (Robert Boyle) عام 1662 م قانونًا يربط بين ضغط الغاز (p) وحجمه (V) وعرف باسم قانون بويل **Boyle's law**.

إذا ضُغِط غاز ما عند درجة حرارة ثابتة فإن ضغطه يزداد وحجمه يقل، وانخفاض الحجم الذي يشغله الغاز يعني وجود مزيد من الجسيمات لكل وحدة حجم ومزيد من تصادمات الجسيمات في الثانية لكل وحدة مساحة من سطح الجدار، وبما أنّ درجة الحرارة ثابتة فإن متوسط سرعة الجزيئات لن يتغيّر، وهذا يعني أن كل تصادم مع الجدار سيكون له التغيّر نفسه في كمية التحرك، ولكن مع المزيد من التصادمات في الثانية على وحدة المساحة من سطح الجدار يكون معدل التغيّر في كمية التحرك أكبر، وبالتالي يكون الضغط على الجدار أكبر.

مهمّ

قانون بويل Boyle's law: يتناسب الضغط الذي تؤثر به كتلة ثابتة من الغاز عكسيًا مع حجمه، بشرط أن تبقى درجة حرارته ثابتة.

يتناسب الضغط والحجم تناسبًا عكسيًا، وعليه يمكننا كتابة قانون بويل Boyle's law على النحو الآتي:

$$p \propto \frac{1}{V}$$

أو ببساطة:

$$pV = \text{مقدار ثابت}$$

لاحظ أن هذا القانون يربط بين متغيّرَين، الضغط والحجم، ويتطلب أن يبقى المتغيران الآخران (الكتلة ودرجة الحرارة) ثابتَين.

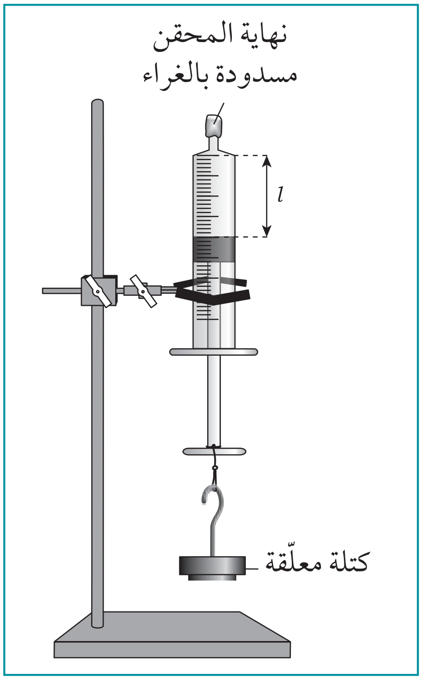
يمكننا التحقّق من قانون بويل تجريبيًا باستخدام التركيب المبيّن في الشكل ٨-٤.

يمكن إغلاق نهاية محقن الغاز باستخدام سدادة أو غراء، تأكّد أولًا من أن المكبس مسحوب بحيث يحصر حجم ثابت معيّن من الهواء داخل المحقن، ثم تضاف الكتل إلى علّاقة الكتل، ويُقاس عندئذ الحجم الجديد من الغاز. من المهم أن تترك دقيقة تقريبًا بين كل قياس وآخر للتأكد من أن الغاز داخل المحقن عاد إلى درجة حرارة الغرفة. فالضغط يُحسب باستخدام العلاقة:

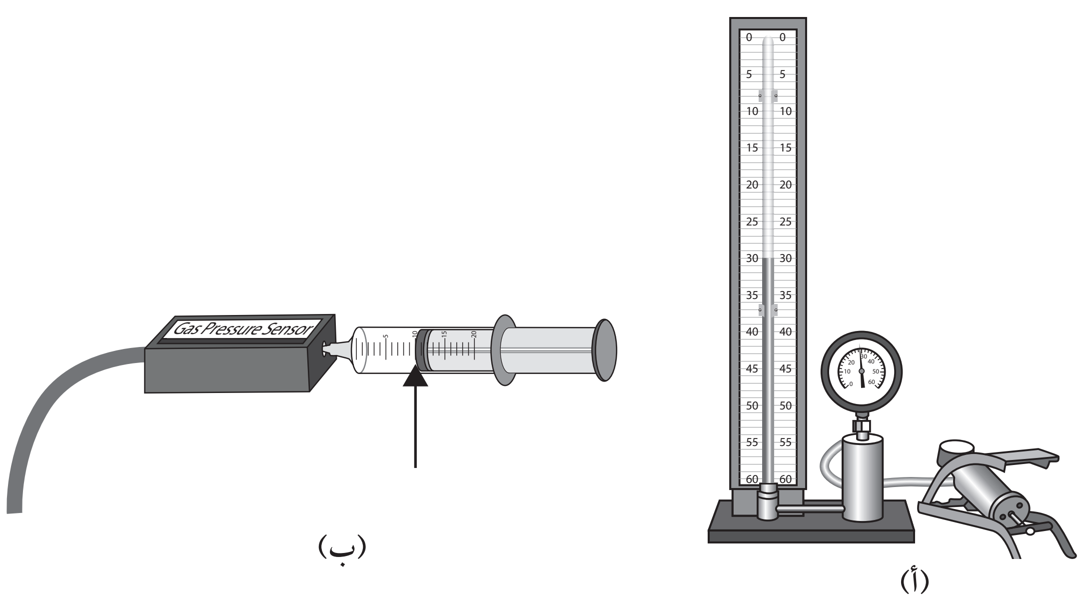
$$p = \frac{F}{A}$$

حيث $F = mg$ (الوزن المؤثر على المحقن) و A هي مساحة سطح المكبس الدائري.

هناك طريقة أخرى لإجراء هذه التجربة (الشكل ٨-٥) باستخدام مقياس ضغط أو مستشعر ضغط إلكتروني لقياس ضغط الغاز مباشرة كلما ضُغِط مكبس المحقن.



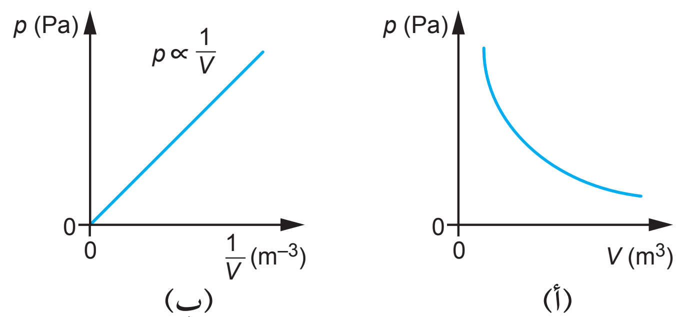
الشكل ٨-٤ تركيب بسيط يُستخدم للتحقّق من قانون بويل.



الشكل ٨-٥ (أ) جهاز يستخدم مقياس ضغط. (ب) جهاز يستخدم مستشعر ضغط إلكتروني.

عند تمثيل نتائج التجربة السابقة بيانيًا نحصل على العلاقة العكسية بين الضغط والحجم المبيّنة في الشكل ٨-٦ (أ).

أما التمثيل البياني لـ (p) مقابل $\frac{1}{V}$ فهو خط مستقيم يمر بنقطة الأصل، فيظهر التناسب الطردي في الشكل ٨-٦ (ب).



الشكل ٨-٦ تمثيلات بيانية للعلاقة بين ضغط الغاز وحجمه (قانون بويل).

قد تجد أنه من الأسهل حلّ المسائل باستخدام قانون بويل على الصيغة:

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

هنا p_1 و V_1 تمثلان ضغط الغاز وحجمه قبل التغيير، و p_2 و V_2 تمثلان ضغط الغاز وحجمه بعد التغيير. يبيّن المثال ٣ كيفية استخدام هذه المعادلة.

مثال

٣. تحتوي أسطوانة على (0.80 m³) من غاز النيتروجين عند ضغط جوي مقداره (1.2 atm). يتم ضغط الغاز ببطء بواسطة مكبس إلى (6.0 atm)، بحيث تبقى درجة حرارة الغاز ثابتة. احسب الحجم النهائي للغاز. (1 atm = 1.01 × 10⁵ Pa)

لاحظ من السؤال أن درجة حرارة الغاز ثابتة وأن كتلته كذلك ثابتة (لأنه محصور في أسطوانة). وهذا يعني أنه يمكننا تطبيق قانون بويل.

الخطوة ١: سنستخدم قانون بويل بالصيغة $p_1V_1 = p_2V_2$. اكتب الكميات التي تعرفها والتي تريد أن تعرفها.

$V_1 = 0.80\ m^3 \qquad p_1 = 1.2\ atm$

$V_2 = ? \qquad p_2 = 6.0\ atm$

لاحظ أنه لا داعي للقلق بشأن وحدات الضغط والحجم المحدّدة والمستخدمة هنا، طالما أنها متماثلة في كلا طرفَي المعادلة. ستكون القيمة النهائية لـ (V_2) بوحدة m³؛ لأن (V_1) بوحدة m³.

الخطوة ٢: عوّض القيم الموجودة في المعادلة، وأعد ترتيبها للحصول على (V_2):

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

$$1.2 \times 0.80 = 6.0 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{1.2 \times 0.80}{6.0} = 0.16\ m^3$$

لذلك ينخفض حجم الغاز إلى (0.16 m³).

لاحظ أن الضغط ازداد إلى 5 أمثال ما كان عليه، لذلك ينخفض الحجم إلى $\frac{1}{5}$ حجمه الابتدائي.

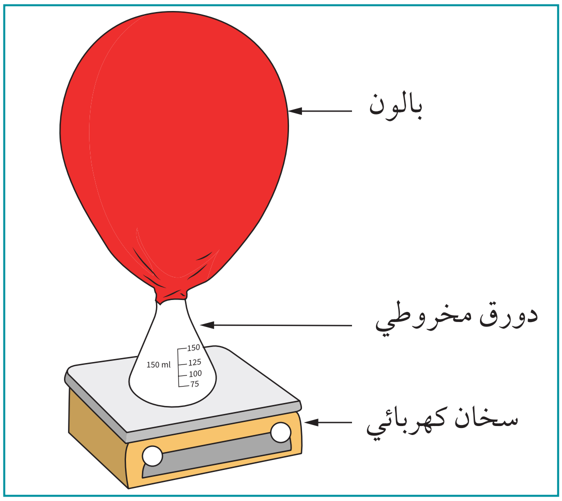
سؤال

٧ يحتوي بالون على (0.04 m³) من الهواء عند ضغط (120 kPa). احسب الضغط المطلوب لخفض حجمه إلى (0.025 m³) عند درجة الحرارة نفسها.

٨-٦ تغيّر درجة الحرارة

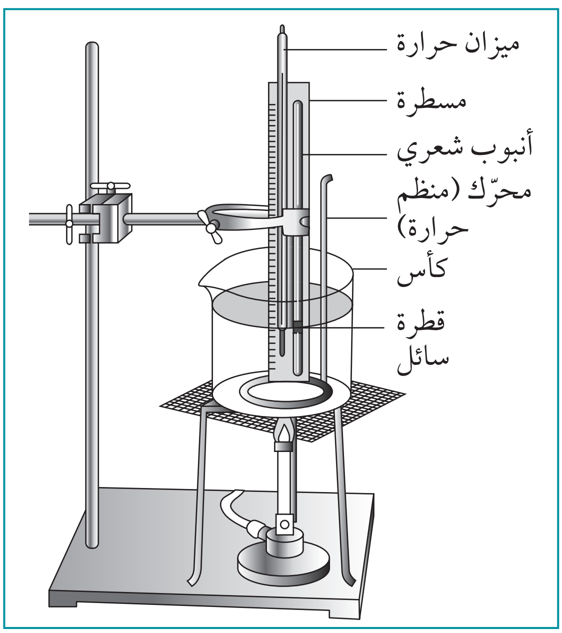
يبيّن الشكل ٨-٧ عرضًا بسيطًا لتأثير تغيّر درجة الحرارة على الحجم لكتلة ثابتة من الغاز؛ حيث يوصّل بالون نصف منفوخ بفوهة دورق مخروطي بحيث يمكن تثبيت كمية الغاز في البالون والدورق معًا، فعندما يوضع الدورق المخروطي على السخان الكهربائي يسخن الهواء الموجود في الدورق فيتمدد البالون وينتفخ.

على العكس من ذلك، يمكننا ملاحظة تأثير انخفاض درجة الحرارة على الغاز عن طريق وضع الدورق مع البالون المنفوخ في مجمّد ثلاجة؛ إذ ينتج من انخفاض درجة الحرارة تقلّص الغاز وانكماش البالون، وفي كلتا الحالتَين فإن ضغط الغاز داخل البالون والدورق سيبقى ثابتًا بينما الحجم الذي يشغله الغاز سيكون مختلفًا.



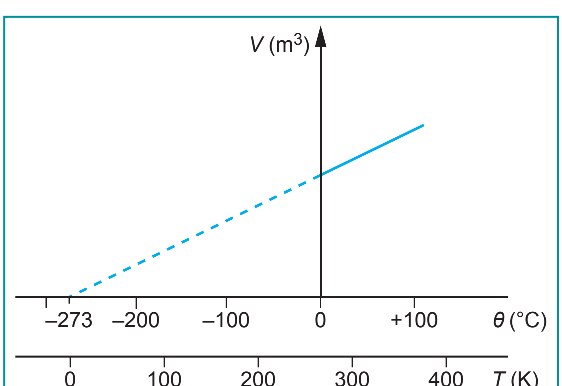
الشكل ٨-٧ تأثير ازدياد درجة الحرارة على حجم كتلة ثابتة من الغاز.

يبيّن الشكل ٨-٨ تركيبًا بسيطًا لاستقصاء هذا التأثير تجريبيًا. يكون الأنبوب الشعري محكم الإغلاق من طرفه السفلي، وتُدَخل فيه قطرة صغيرة من سائل حمض الكبريتيك المركّز مثلًا أو من زيت نباتي لحصر كمية ثابتة من الغاز، وعند وضع الأنبوب في كأس من الماء وتسخينه باستخدام موقد بنزن فإن قطرة السائل سوف تتحرك إلى الأعلى عندما يتمدّد الغاز الموجود أسفلها، الأمر الذي يسمح لنا بقراءة طول عمود الغاز من التدريج الموجود على المسطرة، وكذلك تُقرأ درجة الحرارة من ميزان الحرارة المثبّت بجانب الأنبوب الشعري، ويمكن بعد ذلك حساب حجم عمود الغاز من طوله ومساحة المقطع العرضي للأنبوب الشعري.



الشكل ٨-٨ تركيب بسيط لقياس تغير حجم غاز ما بتغيّر درجة حرارته (قانون شارل).

يشترط قانون بويل أن تكون درجة حرارة الغاز ثابتة. ماذا يحدث إذا سُمح لدرجة حرارة الغاز بالتغيّر؟ يبيّن الشكل ٨-٩ نتائج تجربة بُرّدت فيها كتلة ثابتة من الغاز تحت ضغط ثابت حيث تقلّص الغاز فنقص حجمه.



الشكل ٨-٩ يتناقص حجم الغاز بانخفاض درجة حرارته (قانون شارل).

لاحظ أن هذا التمثيل البياني لا يبيّن أن حجم الغاز يتناسب مع درجة حرارته على المقياس السيليزي؛ فلو تقلّص حجم الغاز إلى الصفر عند درجة حرارة (0 °C) فإن الغلاف الجوي سيتكثف في الأيام الباردة وسنواجه صعوبة كبيرة في التنفس! ومع ذلك فإن التمثيل البياني يُظهر – من حيث المبدأ – أن هناك درجة حرارة يتقلص عندها حجم الغاز إلى الصفر، وبالنظر إلى تدريج درجة الحرارة السفلي على التمثيل البياني فإن درجات الحرارة تظهر

بوحدة الكلفن (K)، حيث يمكننا أن نرى أن درجة الحرارة هذه تساوي (0 K) أو صفرًا مطلقًا. (تاريخيًا، هكذا نشأت فكرة الصفر المطلق لأول مرة).

يمكننا تمثيل العلاقة بين الحجم (*V*) ودرجة الحرارة المطلقة (*T*) على النحو الآتي:

$$V \propto T$$

أو ببساطة:

$$\frac{V}{T} = \text{مقدار ثابت}$$

لاحظ أن هذه العلاقة تنطبق فقط عندما يكونُ كلٌّ من ضغط الغاز وكتلته ثابتَين.

مهمّ

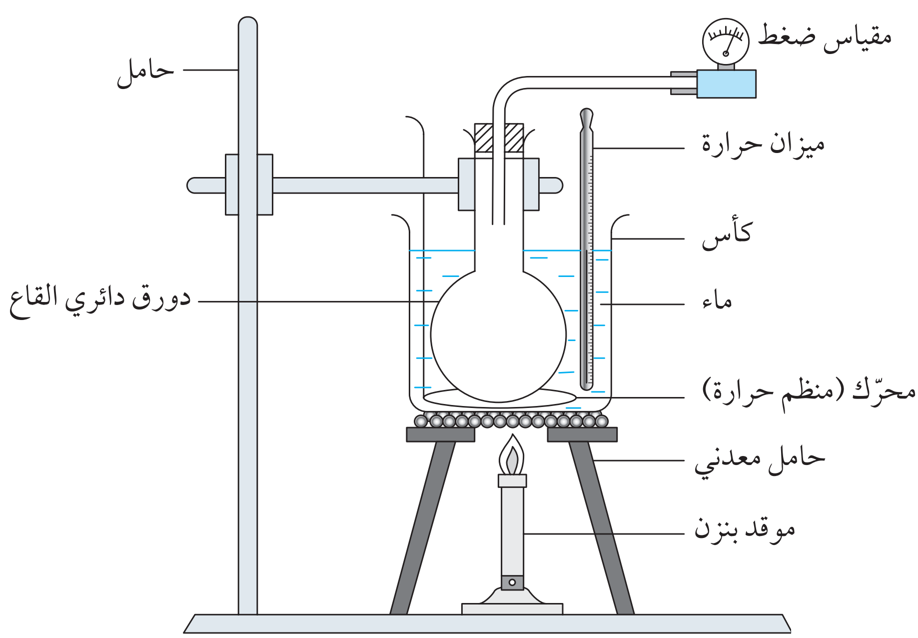
قانون شارل Charles's law:
يتناسب الحجم الذي يشغله غاز ما عند ضغط ثابت طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة.

تُعرف هذه العلاقة **بقانون شارل Charles's law**، وسُمّي بذلك نسبة إلى العالِم الفيزيائي الفرنسي جاك تشارلز (Jacques Charles)، وهو الذي أجرى تجاربه عام 1787 م على غازات مختلفة تحت ضغطٍ ثابت.

$$\frac{V}{T} = \text{مقدار ثابت}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

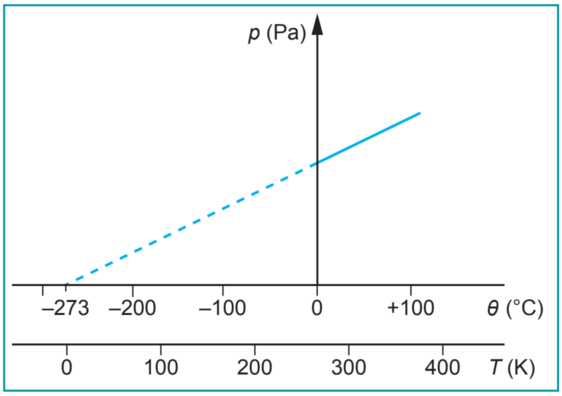
لتكون الصورة مكتملة يمكن أيضًا استقصاء تأثير تغيّر درجة الحرارة على الضغط لحجم ثابت من الغاز. يبيّن الشكل ٨-١٠ تجربة لاستقصاء هذا التأثير.



الشكل ٨-١٠ تجربة لقياس تأثير التغيّر في درجة الحرارة على ضغط الغاز عند ثبات حجمه.

يجب أن نقيس ضغط الغاز في هذه التجربة مباشرةً باستخدام مقياس ضغط أو جهاز استشعار، فكلما سُخّن الغاز في الدورق ترتفع درجة الحرارة ويزداد الضغط (الشكل ٨-١١).

لاحظ أنه كما هي الحال في قانون شارل يتقاطع الخط الموجود على التمثيل البياني مع محور درجة الحرارة عند (−273 °C). يشير هذا إلى أنه عند القيمة النظرية للصفر المطلق فقط سيكون ضغط الغاز صفرًا، وهذا يعني أن الجسيمات الموجودة في الغاز لن تمتلك نظريًا أي طاقة حركة وبالتالي لا يمكن أن يؤثر الغاز بأي قوة على الجدران الداخلية للوعاء الذي يحتويه، ومع ذلك فإن هذا لا يمكن أن يحدث في الواقع لأن حالة الغاز تكون قد تغيرت عند درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق ولن يسلك سلوك الغاز.



الشكل ٨-١١ ينخفض ضغط كمية غاز ما كلما انخفضت درجة حرارته (قانون جاي لوساك).

يُعرف هذا التأثير باسم **قانون جاي لوساك** **Gay-Lussac's law**.

$$\frac{p}{T} = \text{مقدار ثابت}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

مهم

قانون جاي لوساك **Gay-Lussac's law**:

يتناسب ضغط الغاز طرديًا مع درجة حرارته المطلقة عندما يكون حجمه ثابتًا.

إذا جمعنا بين قانون جاي لوساك وقانون بويل وقانون شارل، يمكننا أن نتوصل إلى معادلة واحدة لكتلة ثابتة من غاز ما وهي:

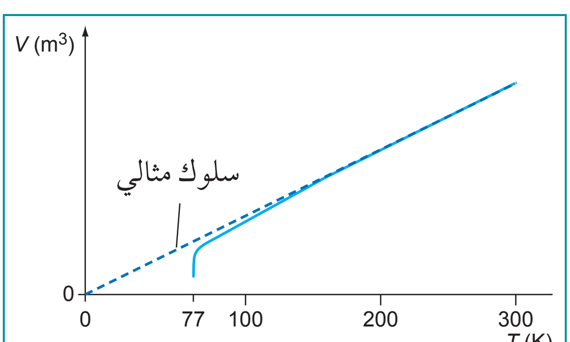
$$\frac{pV}{T} = \text{مقدار ثابت}$$

لكتلة ثابتة من غاز ما.

لاحقًا سنوضح المقصود بالمقدار الثابت في هذه المعادلة، ولكن قبل ذلك سنرى إلى أي مدى يمكن تطبيق هذه المعادلة على الغازات الحقيقية.

٨-٧ الغازات الحقيقية والمثالية

تستند العلاقات بين (p) و (V) و (T) التي تطرقنا إليها سابقًا إلى الملاحظات التجريبية للغازات مثل الهواء والهيليوم والنيتروجين وغيرها عند درجات حرارة وقيم للضغط قريبة من درجة حرارة الغرفة وضغطها، وعمليًا إذا انتقلنا إلى ظروف أكثر تطرّفًا – مثل درجات الحرارة المنخفضة أو قيم الضغط العالية – فإن الغازات تبدأ بالانحراف عن هذه القوانين حيث تؤثر ذرات الغاز على بعضها بقوى كهربائية كبيرة. يبيّن الشكل ٨-١٢ على سبيل المثال ما يحدث لغاز النيتروجين عند تبريده تدريجيًا للوصول



الشكل ٨-١٢ ينحرف الغاز الحقيقي (في هذه الحالة النيتروجين) عن السلوك الذي تنبأ به قانون شارل عند درجات الحرارة المنخفضة.

إلى الصفر المطلق (0 K)، فالتمثيل البياني (الحجم-درجة الحرارة) يتبع خطًا مستقيمًا في البداية، ومع الاقتراب من درجة الحرارة التي يتكثّف عندها الغاز ينحرف الغاز عن السلوك المثالي، وعند درجة حرارة (77 K) يتكثّف الغاز ليصبح نيتروجينًا سائلًا.

وبالتالي علينا أن نضع شرطًا للعلاقات التي تحدّثنا عنها سابقًا وهو أنها تنطبق فقط على **الغاز المثالي Ideal gas**.

مصطلحات علمية

الغاز المثالي Ideal gas:
الغاز الذي يخضع للمعادلة:
$pV = nRT$

يجب أن نكون مدركين عندما نتعامل مع غازات حقيقية أن سلوكها قد يكون مختلفًا بشكل كبير عن الغاز المثالي.

وبالتالي فإن الغاز المثالي هو الغاز الذي يمكننا أن نطبّق عليه المعادلة:

$$\frac{pV}{T} = \text{مقدار ثابت لكتلة ثابتة من الغاز}$$

٨-٨ معادلة الغاز المثالي

حتى الآن رأينا كيف يرتبط الضغط (p) والحجم (V) ودرجة الحرارة المطلقة (T)، ومن الممكن كتابة معادلة واحدة تربط بين هذه الكميات وتأخذ بعين الاعتبار كمية الغاز قيد الدراسة.

ويمكننا القيام بذلك بواسطة تحديد ثابت التناسب وهو (R) المعروف باسم ثابت الغاز المولي العام، وبما أن التناسب يفترض وجود كمية ثابتة من الغاز فيجب أن نضمّن كمية الغاز (n) بالمول حيث يمكننا كتابة المعادلة بالصيغة الآتية:

$$pV = nRT$$

حيث (n) هي كمية الغاز المثالي (عدد المولات)، و (R) هو ثابت الغاز المولي العام.

$$R = 8.31\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}$$

كما يمكن كتابة المعادلة بالصيغة الآتية:

$$pV = NkT$$

حيث (N) هو عدد الجزيئات و (k) هو ثابت بولتزمان Boltzmann كما سترى لاحقًا في الموضوع ٨-١١.

هذه المعادلة تسمى **معادلة الحالة Equation of state** للغاز المثالي (أو **معادلة الغاز المثالي Equation of ideal gas**). وتتعلق بالكميات الأربع المتغيّرة التي نُوقشت في بداية هذه الوحدة.

لاحظ أنه لا يهم نوع الغاز الذي نتحدث عنه، إذ يمكن أن يكون غازًا «خفيفًا» جدًا مثل الهيدروجين أو أثقل منه كثاني أكسيد الكربون؛ فطالما أنه يسلك سلوك الغاز المثالي فإنه يمكننا استخدام معادلة الحالة نفسها مع الثابت (R) نفسه.

معادلة الحالة أو معادلة الغاز المثالي:

$pV = NkT$ أو $pV = nRT$

يمكننا أن نرى من معادلة الغاز المثالي أن حجم أي كمية ثابتة من الغاز سيكون هو نفسه عند درجة الحرارة والضغط المعطيَين -بغضّ النظر عن نوع الغاز الذي نحن بصدده- ولهذا السبب تم تحديد الشروط القياسية (المعيارية).

تُعرّف درجة الحرارة والضغط القياسيان أو المعياريان (Standard temperature and pressure أو STP) على أنهما درجة الحرارة ($0\ °C$ أو $273.15\ K$) وضغط ($10^5\ Pa$).

وفي الظروف العادية تُعرّف درجة الحرارة والضغط (Normal temperature and pressure أو NTP) بدرجة حرارة ($20\ °C$ أو $293.15\ K$) وضغط ($1.01325 \times 10^5\ Pa$) (أو ما يعادل ضغطًا جويًا واحدًا أو 1 atm).

غالبًا ما يستخدم الكيميائيون درجة الحرارة والضغط القياسيَين (STP)، في حين تكون درجة الحرارة والضغط العاديَين (NTP) أقرب إلى ظروف العمل النموذجية في المختبر.

أمثلة

٤. احسب الحجم الذي يشغله مول واحد من غاز مثالي عند درجة حرارة الغرفة ($20\ °C$) وضغط ($1.013 \times 10^5\ Pa$).

الخطوة ١: اكتب الكميات التي تعرفها والتي تريد أن تعرفها.

$n = 1.0 \quad p = 1.013 \times 10^5\ Pa$

$V = ? \quad T = 20\ °C = 293\ K$

تلميح: لاحظ أن درجة الحرارة حُولت إلى كلفن.

الخطوة ٢: عوّض القيم المعطاة في معادلة الحالة، وأعد ترتيبها للحصول على (V):

$$V = \frac{nRT}{p}$$

$$V = \frac{1 \times 8.31 \times 293}{1.013 \times 10^5} = 0.0240\ m^3$$

$$= 2.40 \times 10^{-2}\ m^3$$

$$= 24.0\ dm^3$$

تلميح:

$1\ dm = 10^{-1}\ m$؛ بالتالي $1\ dm^3 = 10^{-3}\ m^3$.

هذه القيمة أي ($24.0\ dm^3$) هي حجم مول واحد من الغاز عند درجة حرارة الغرفة والضغط بها، وهي قيمة تستحق التذكّر. بالتأكيد هي معروفه من قبل معظم الكيميائيين. وأي غاز تحت درجة الحرارة والضغط العاديَين (NTP) يشغل الحجم نفسه، ويمكننا استخدام هذا الحجم لحساب مقدار الغاز الموجود بغضّ النظر عن نوع الغاز.

٥. يحتوي إطار سيارة على ($0.020\ m^3$) من الهواء عند درجة حرارة ($27\ °C$) و ضغط ($3.0 \times 10^5\ Pa$). احسب كتلة الهواء في الإطار.

(الكتلة المولية للهواء = $28.8\ g\ mol^{-1}$).

الخطوة ١: نحتاج أولًا إلى حساب عدد مولات الهواء باستخدام معادلة الحالة. لدينا:

$V = 0.020\ m^3 \quad p = 3.0 \times 10^5\ Pa$

$T = 27\ °C = 300\ K$

تلميح: لا تنسَ تحويل درجة الحرارة إلى كلفن.

لذلك من معادلة الحالة:

$$n = \frac{pV}{RT}$$

$$n = \frac{3.0 \times 10^5 \times 0.020}{8.31 \times 300}$$

$$= 2.4\ mol$$

الخطوة ٢: الآن يمكننا حساب كتلة الهواء:

الكتلة = عدد المولات × الكتلة المولية

الكتلة $= 2.4 \times 28.8 = 69.3\ g \approx 69\ g$

أسئلة

للأسئلة الآتية، ستحتاج إلى القيمة: $R = 8.31\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$

٨ عند أي درجة حرارة (بوحدة K) يَشغل ($1.0\ mol$) من غاز ما حجمًا مقداره ($1.0\ m^3$) عند ضغط ($1.0 \times 10^4\ Pa$)؟

٩ يتكون غاز النيتروجين من جزيئات (N_2). الكتلة المولية للنيتروجين هي ($28.0\ g\ mol^{-1}$). لكتلة مقدارها ($100\ g$) من النيتروجين، احسب:

أ. عدد المولات.

ب. الحجم الذي تشغله في درجة حرارة الغرفة ($20\ °C$) والضغط ($1.01 \times 10^5\ Pa$).

١٠ احسب حجم ($5.0\ mol$) من غاز مثالي عند ضغط ($1.0 \times 10^5\ Pa$) ودرجة حرارة ($200\ °C$).

(١١) تحتوي عيّنة من غاز ما على 3.0×10^{24} جزيء. احسب حجم الغاز عند درجة حرارة (300 K) وضغط (120 kPa).

(١٢) عند أي درجة حرارة يَشغل (1.0 kg) من الأكسجين حجمًا مقداره ($1.0\ m^3$) عند ضغط (1.0×10^5 Pa)؟ (الكتلة المولية لـ O_2 = $32\ g\ mol^{-1}$).

(١٣) أسطوانة تحتوي كمية من الهيدروجين حجمها ($0.100\ m^3$). وُجِد أن ضغطها يكون (20 atm) عند (20 °C).

أ. احسب كتلة الهيدروجين في الأسطوانة.

ب. إذا مُلِئت الأسطوانة بالأكسجين بدلًا من الهيدروجين عند الضغط نفسه، فما مقدار كتلة الأكسجين الذي ستحتويه؟

(الكتلة المولية لـ H_2 = $2.0\ g\ mol^{-1}$ ؛ الكتلة المولية لـ O_2 = $32\ g\ mol^{-1}$ ؛ $1\ atm = 1.01 \times 10^5$ Pa).

٨-٩ نمذجة الغازات: النموذج الحركي

سنُركّز في هذه الوحدة على الخصائص الجهرية للغازات (الضغط والحجم ودرجة الحرارة)؛ حيث يمكن قياس كل من هذه الخصائص بسهولة في المختبر. والمعادلة الآتية هي علاقة تجريبية:

$$\frac{pV}{T} = \text{مقدار ثابت}$$

بعبارة أخرى لقد تم استنتاج هذه المعادلة من نتائج التجارب، فهي تعطي وصفًا جيدًا للغازات في العديد من المواقف المختلفة، ومع ذلك فإن المعادلة التجريبية لا تفسّر سبب سلوك الغازات بهذه الطريقة، إذ يتطلب التفسير منا التفكير في الطبيعة الأساسية للغاز وكيف يثير ذلك ملاحظاتنا.

يتكوّن غاز ما من جسيمات (ذرّات أو جزيئات)، وينشأ الضغط عن تصادم الجسيمات مع جدران الوعاء، فكلما كانت التصادمات أكثر تكرارًا أو أشدّ فإنها تؤدي إلى زيادة الضغط، وتشير درجة حرارة الغاز إلى متوسط طاقة الحركة لجسيمات الغاز؛ فكلما تحركت الجسيمات أسرع ازداد متوسط طاقتها الحركية وارتفعت درجة حرارتها.

مهمّ

النظرية الحركية للغازات Kinetic theory of gases: نموذج يعتمد على الحركة المجهرية لذرات الغاز أو جزيئاته.

النظرية الحركية للغازات Kinetic theory of gases هي نظرية تربط الخصائص المجهرية للجسيمات (الذرّات أو الجزيئات) بالخصائص الجهرية للغاز. يبيّن الجدول ٨-١ الافتراضات التي تعتمد عليها هذه النظرية.

الافتراضات	التفسير/ التعليق
تحتوي كمية من غاز ما على عدد كبير من الجسيمات (الذرّات أو الجزيئات) التي تتحرك عشوائيًا وتتصادم تصادمًا مرنًا مع جدران الوعاء ومع بعضها.	لا يمكن فقدان طاقة الحركة، فالطاقة الداخلية للغاز هي طاقة الحركة الكلية للجسيمات. إضافة إلى أي طاقة وضع مخزنة في الروابط بين الذرات في الجزيئات.
القوى بين جسيمات الغاز مهملة، إلا أثناء التصادمات.	إذا كان هناك قوى تجاذب مؤثرة بين الجسيمات فإن الجسيمات لن تنتشر لتملأ الوعاء بل ستميل إلى ملء حيز صغير من الوعاء.
حجم جسيمات الغاز مهمل مقارنة بالحجم الذي يشغله الغاز.	عندما يغلي السائل ليصبح غازًا فإن جسيماته تصبح متباعدة كثيرًا عن بعضها.
زمن تصادم أحد جسيمات الغاز بجدران الوعاء مهمل مقارنة بالزمن بين كل من هذه التصادمات.	تصطدم الجسيمات تصادمًا مرنًا مع جدران الوعاء عند اعتبارها كريات صلبة.

الجدول ٨-١ الافتراضات الأساسية للنظرية الحركية للغازات.

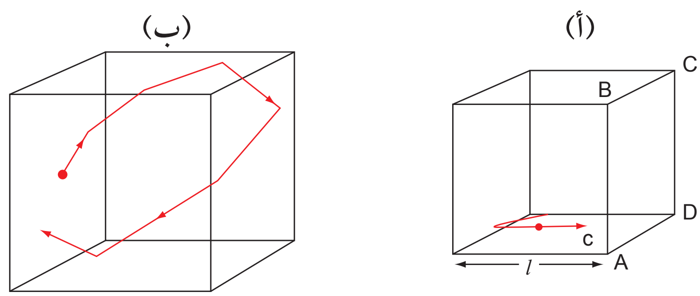
أثبتت النظرية الحركية أنها نموذج قوي جدًا، فلقد أقنعت العديد من علماء الفيزياء بوجود الجسيمات قبل فترة طويلة من إمكانية تصورها.

سؤال

١٤ يبيّن الشكل ٨-١٢ السلوك الحقيقي لغاز النيتروجين عند درجات الحرارة المنخفضة. كمادة في الحالة الغازية تقترب من التكثّف (بالقرب من درجة (نقطة) الغليان) يصبح سلوك هذا الغاز غير مثالي تدريجيًا.
اشرح ذلك في ضوء النظرية الحركية للغازات.

٨-١٠ استنتاج الضغط

يمكننا استخدام النموذج الحركي لاستنتاج معادلة تربط الخصائص الجهرية للغاز (الضغط والحجم) بالخصائص المجهرية لجزيئاته (الكتلة والسرعة). لنتخيل جسيمًا في صندوق على شكل مكعب طول ضلعه (l) (الشكل ٨-١٣). يمتلك هذا الجسيم كتلة مقدارها (m)، ويتحرك بسرعة (c) موازية لأحد جوانب الصندوق (c ليست سرعة الضوء في هذه الحالة). يتحرك الجسيم إلى الأمام وإلى الخلف فيتصادم على فترات منتظمة مع جوانب الصندوق وبالتالي يُسهم في ضغط الغاز. نحن بصدد حساب الضغط الذي يبذله هذا الجسيم على أحد جوانب الصندوق ثم استنتاج الضغط الكلي التي تنتجه جميع جسيمات الغاز.



الشكل ٨-١٣ تحرك جسيم واحد من غاز ما في صندوق.

نحتاج إلى تتبع خطوات الإثبات الآتية بعناية لاستنتاج المعادلة النهائية للضغط. المراحل المتضمنة في هذا الحساب هي:

١. جِد التغيّر في كمية التحرك كلما اصطدم جسيم واحد بالجدار عموديًا أي بزاوية 90°.
٢. احسب الزمن بين تصادمَين متتاليَين.
٣. جِد التغيّر في كمية التحرك في الثانية.
٤. جِد الضغط على الجدار.
٥. ضع في اعتبارك أن التأثير لثلاثة اتجاهات يمكن للجسيم أن يتحرك بها.

$$\text{القوة} = \frac{\text{التغيّر في كمية التحرّك}}{\text{الزمن المستغرق}}$$

$$F = \frac{\Delta mv}{t}$$

$$\text{الضغط} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}}$$

$$p = \frac{F}{A}$$

انظر بنفسك، في أثناء استعراض الخطوات: في أيّ مكان بدأت كل مرحلة؟ وأين انتهت؟

لنفترض تصادمًا يصطدم فيه الجسيم بالجانب ABCD من المكعب في الشكل ٨-١٣ (أ). ويرتد ارتدادًا مرنًا في

الاتجاه المعاكس بحيث تكون سرعته المتجهة $(-c)$؛ حيث تتغير كمية تحركه من (mc) إلى $(-mc)$ فيكون التغيّر الناشئ في كمية التحرك عن هذا التصادم الفردي (للجسيم الواحد) هو:

$$\Delta \vec{p} = -mc - (+mc)$$
$$= -mc - mc = -2mc$$

يقطع الجسيم بين التصادمات المتتالية مع الجانب ABCD، مسافة $(2l)$ بسرعة (c) لذلك:

يكون الزمن بين التصادمات مع الجانب ABCD $= \frac{2l}{c}$

يمكننا الآن إيجاد القوة التي يبذلها هذا الجسيم على الجانب ABCD باستخدام قانون نيوتن الثاني للحركة، وهذا يعني أن القوة الناتجة تساوي معدل التغيّر في كمية التحرك:

$$\text{القوة} = \frac{\text{التغيّر في كمية التحرّك}}{\text{الزمن المستغرق}}$$

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

$$F = \frac{2mc}{\left(\frac{2l}{c}\right)}$$

$$F = \frac{mc^2}{l}$$

(نستخدم $(+2mc)$ لأننا الآن نفكر في القوة التي يؤثر بها الجسيم على الجانب ABCD، وهو عكس اتجاه التغيّر في كمية تحرك الجسيم).

مساحة الجانب ABCD هي (l^2). ومن تعريف الضغط، يكون لدينا:

$$\text{الضغط} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}}$$

$$p = \frac{\left(\frac{mc^2}{l}\right)}{l^2}$$

$$p = \frac{mc^2}{l^3}$$

هذا الاستنتاج لجسيم واحد، ولكن يوجد عدد كبير (N) من الجسيمات في الصندوق، ولكل منها سرعة مختلفة وكل منها يُسهم في الضغط، لذا نكتب القيمة المتوسطة لـ (c^2) على الشكل $(<c^2>)$، ونضرب في (N) لإيجاد الضغط الكلي:

$$p = \frac{Nm <c^2>}{l^3}$$

لكن هذا يفترض أن جميع الجسيمات تتحرك بالاتجاه نفسه وتتصادم فقط مع زوج الجانبَين المتقابلَين من المكعب، بينما في الواقع هي تتحرك في جميع الأبعاد الثلاثة بالتساوي.

إذا اعتبرنا المركّبات الثلاث للسرعة المتجهة (c_x) و (c_y) و (c_z) في الاتجاهات الثلاثة x و y و z فإن:

$$c^2 = c_x^2 + c_y^2 + c_z^2$$

وفي المتوسط فإن الجسيمات ستتحرك بشكل متساوٍ في جميع الاتجاهات x و y و z، لذلك فإن:

$$< c_x^2 > = < c_y^2 > = < c_z^2 >$$

وعليه تكون:

$$< c_x^2 > = \frac{1}{3} < c^2 >$$

إن معادلة الضغط المستنتجة في الصفحة السابقة تتضمن فقط مركّبة السرعة في الاتجاه x، فإذا كانت (c) هي السرعة الفعلية للجسيم نكون بحاجة إلى القسمة على 3 لإيجاد الضغط الذي تبذله الجسيمات.

$$p = \frac{1}{3}\left(\frac{Nm < c^2 >}{l^3}\right)$$

هنا، (l^3) يساوي حجم المكعب (V)، لذا يمكننا كتابة:

$$p = \frac{1}{3}\left(\frac{Nm}{V}\right) < c^2 >$$

أو $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$

(لاحظ أنه لدينا في الطرف الأيسر من المعادلة الخصائص الجهرية للغاز وهما الضغط والحجم، وفي الطرف الأيمن من المعادلة الخصائص المجهرية للجسيمات).

معادلة الغاز المثالي:

$$p = \frac{1}{3}\left(\frac{Nm}{V}\right) < c^2 >$$

أو $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$

أخيرًا، الكمية (Nm) هي كتلة جميع جسيمات الغاز، وهي ببساطة تساوي الكتلة (M) للغاز. إذًا $\frac{Nm}{V}$ تساوي كثافة الغاز (ρ) وتنطق رو، لذا يمكننا كتابة المعادلة على الصيغة:

$$p = \frac{1}{3} \rho < c^2 >$$

لذا فإن ضغط الغاز يعتمد فقط على كثافته ومتوسط مربع السرعة لجسيماته.

معادلة معقولة؟

يجدر بنا التفكير قليلًا فيما إذا كانت المعادلة $p = \frac{1}{3}\left(\frac{Nm}{V}\right) < c^2 >$ تبدو منطقية. يجب أن يكون واضحًا لك أن الضغط يتناسب طرديًا مع عدد الجزيئات (N)، ومزيد من الجسيمات يعني ضغطًا أكبر، وكلما ازدادت كتلة كل جسيم أيضًا ازدادت القوة التي سيؤثر بها الجزيء أثناء التصادم.

تشير المعادلة إلى أن الضغط (p) يتناسب طرديًا مع متوسط قيمة مربع السرعة؛ وهذا لأن الجزيء إذا تحرك أسرع فهو بذلك لن يضرب الوعاء بقوة أكبر فقط بل يضربه مرات عديدة أيضًا.

تشير المعادلة إلى أن الضغط (p) يتناسب عكسيًا مع الحجم الذي يشغله الغاز، وهنا نكون قد استنتجنا قانون بويل. وباعتبار النموذج الحركي يمكننا أن نرى أنه إذا شغلت كتلة من الغاز حجمًا أكبر فإن عدد التصادمات بين الجسيمات

لكل وحدة مساحة من الجدار ستنخفض، إذ تبيّن المعادلة أن الضغط لا يكون فقط أقل بل يتناسب عكسيًا مع الحجم، وعند اختبار المعادلة بهذه الطريقة يمكننا ملاحظة أنها تصف سلوك الغاز بطريقة واقعية – على الرغم من أن هذه الحجج لا تعطينا إثباتًا لهذه المعادلة.

أسئلة

١٥ تحقّق من أن الوحدات الأساسية للنظام الدولي للوحدات الموجودة على الجانب الأيسر هي نفسها الموجودة على الجانب الأيمن من المعادلة:

$$p = \frac{1}{3}\left(\frac{Nm}{V}\right) < c^2 >$$

١٦ الكمية (Nm) هي الكتلة الكلية لجزيئات الغاز، أي كتلة الغاز. تكون كثافة الهواء عند درجة حرارة الغرفة $(1.29\ \text{kg m}^{-3})$ تقريبًا عند ضغط $(10^5\ \text{Pa})$.

أ. استخدم هذه الأرقام لاستنتاج قيمة $(< c^2 >)$ لجزيئات الهواء عند درجة حرارة الغرفة.

ب. جد قيمة نموذجية لسرعة جزيء من الهواء بحساب $(\sqrt{< c^2 >})$، كيف تقارن هذه السرعة مع سرعة الصوت في الهواء، وهي $(330\ \text{m s}^{-1})$ تقريبًا؟

٨-١١ درجة الحرارة وطاقة حركة الجزيئات

يمكننا الآن مقارنة المعادلة $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$ مع معادلة الغاز المثالي $pV = nRT$. فالطرفان الأيسران متساويان لذلك يجب أن يكون الطرفان الأيمنان متساويَين أيضًا:

$$\frac{1}{3} Nm < c^2 > = nRT$$

يمكننا استخدام هذه المعادلة لإثبات كيف ترتبط درجة الحرارة المطلقة لغاز ما (خاصية جهرية) بكتلة الغاز وسرعة جزيئاته. إذا ركّزنا على الكميات التي تهمّنا هنا فيمكننا ملاحظة العلاقة الآتية:

$$m < c^2 > = \frac{3nRT}{N}$$

الكمية $\frac{N}{n} = N_A$ هي عدد أفوجادرو (عدد الجسيمات في 1 مول). لذلك:

$$m < c^2 > = \frac{3RT}{N_A}$$

بقسمة طرفي المعادلة على 2، نحصل على التعبير المألوف لطاقة الحركة:

$$\frac{1}{2} m < c^2 > = \frac{3RT}{2N_A}$$

تُعرّف الكمية $\frac{R}{N_A}$ على أنها **ثابت بولتزمان Boltzmann constant (k)**، وقيمته $1.38 \times 10^{-23}\ \text{J K}^{-1}$.

ثابت بولتزمان:

$$k = \frac{R}{N_A}$$

بتعويض (k) بدلًا من $\frac{R}{N_A}$ نحصل على:

$$\frac{1}{2} m < c^2 > = \frac{3}{2} kT$$

$$\overline{\text{K.E}} = \frac{3\,kT}{2}$$

مصطلحات علمية

ثابت بولتزمان Boltzmann constant: ثابت أساسي يُعطى بواسطة $k = \frac{R}{N_A}$، حيث R هو ثابت الغاز المثالي و N_A هو عدد أفوجادرو.

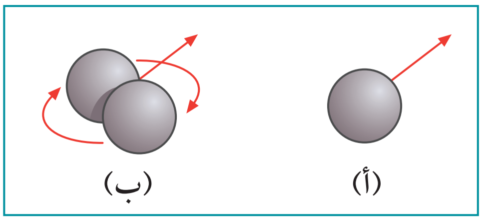
هذا هو متوسط طاقة الحركة ($\overline{K.E}$) للجزيء في الغاز، وبما أن (k) مقدار ثابت فإن درجة الحرارة المطلقة (T) تتناسب طرديًا مع متوسط طاقة الحركة للجزيء.

يتناسب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لذرّة (أو لجزيء) الغاز المثالي مع درجة الحرارة المطلقة، ومن الأسهل تذكّر هذا على النحو الآتي:

متوسط طاقة الحركة الانتقالية لذرّة ما

$$\overline{K.E} \propto T$$

نحن بحاجة إلى النظر في اثنين من المصطلحات في هذه العبارة؛ أولًا: تحدثنا عن طاقة الحركة **الانتقالية**، وهي طاقة الحركة التي يمتلكها الجزيء لأنه يتحرك من موقع إلى آخر في الحيز الذي يشغله، ويمكن لجزيء مكوّن من ذرّتَين أو أكثر أن يدور أو يتأرجح أيضًا، لذلك يقال إنه يمتلك طاقة حركة دورانية (انظر الشكل ٨-١٤).



الشكل ٨-١٤ (أ) الجزيء أحادي الذرّة له طاقة حركة انتقالية فقط. (ب) يمكن أن يمتلك الجزيء ثنائي الذرّة طاقة حركة انتقالية إضافة إلى طاقة حركة دورانية في الوقت نفسه.

ثانيًا: تحدثنا عن **متوسط** طاقة الحركة. هناك طريقتان لإيجاد متوسط طاقة الحركة لجزيء غاز ما، وذلك بجمع كل الطاقات الحركية للجزيئات الفردية للغاز وبعد ذلك نحسب متوسط طاقة الحركة لكل جزيء، أو من خلال تتبع جزيء واحد خلال فترة من الزمن وهو يتحرك ويتصادم بجزيئات أخرى وبجدران الوعاء ثم حساب متوسط طاقة حركته خلال هذا الزمن، فكلاهما يجب أن يعطيا الإجابة نفسها.

ثابت بولتزمان يُعد ثابتًا مهمًا في الفيزياء لأنه يخبرنا كيف ترتبط الخاصية المجهرية للجسيمات (طاقة الحركة لجزيئات الغاز) مع الخاصية الجهرية للغاز (درجة الحرارة المطلقة)، وهذا هو سبب أن وحدته تساوي جول لكل كلفن ($J\ K^{-1}$) وقيمته صغيرة جدًا ($1.38 \times 10^{-23}\ J\ K^{-1}$) لأن الازدياد في طاقة الحركة بوحدة الـ (J) لجزيء ما صغيرة جدًا لكل ازدياد بمقدار واحد كلفن ($1\ K$) في درجة الحرارة.

متوسط طاقة الحركة (لجسيم ما)

$$\overline{K.E} = \frac{3}{2} kT$$

مثال

٦. جِد متوسط طاقة الحركة لجسيم أكسجين في الظروف القياسية (أو المعيارية).
($T = 293\ K$، $p = 1.013 \times 10^5\ Pa$)

الخطوة ١: استخدم معادلة متوسط طاقة الحركة:

$$\overline{K.E} = \frac{3}{2} kT$$

الخطوة ٢: عوّض في المعادلة:

$$\overline{K.E} = \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 293$$

$$\overline{K.E} = 6.07 \times 10^{-21}\ J$$

أسئلة

١٧ ثابت بولتزمان (k) يساوي $\frac{R}{N_A}$. بيّن من قيم (R) و (N_A) أن (k) لها قيمة تساوي ($1.38 \times 10^{-23}\ J\ K^{-1}$).

١٨ احسب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لذرات غاز مثالي عند درجة حرارة ($27\ °C$).

١٩ تمتلك ذرات غاز ما متوسط طاقة حركة انتقالية يساوي ($5.0 \times 10^{-21}\ J$). احسب درجة حرارة هذا الغاز بوحدة (K) وبوحدة (°C).

ملخّص

كمية المادة هي كمية أساسية في النظام الدولي للوحدات (SI) مع وحدة القياس الأساسية المول (mol).

يحتوي مول واحد من أي مادة على عدد أفوجادرو (N_A) من الجسيمات (ذرات أو جزيئات):

N_A = عدد أفوجادرو = $6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$

للحصول على درجة الحرارة المطلقة (T) بوحدة الكلفن (K) من درجة الحرارة السيليزية (θ) بالـ (°C) نستخدم المعادلة الآتية:

$$T\ (K) = \theta\ (°C) + 273.15$$

يكون للغاز المثالي:

$\frac{pV}{T}$ = مقدار ثابت

إن الضغط (p) والحجم (V) ودرجة الحرارة (T) للغاز المثالي ترتبط مع بعضها بالقوانين التجريبية للغازات:

١. قانون بويل: pV = مقدار ثابت
٢. قانون شارل: $\frac{V}{T}$ = مقدار ثابت
٣. قانون جاي لوساك: $\frac{p}{T}$ = مقدار ثابت

معادلة الحالة للغاز المثالي هي:

$pV = nRT$ لعدد n من المولات $pV = NkT$ لعدد N من الجزيئات

هناك أربعة افتراضات للنظرية الحركية للغازات:

١. تتحرك الجزيئات عشوائيًا، وتتصادم تصادمات مرنة مع الجدران.
٢. حجم الجزيئات صغير مقارنة بحجم الوعاء.
٣. لا توجد قوى بين الذرات في الغاز.
٤. زمن كل تصادم صغير مقارنة بالزمن بين التصادمات.

يمكننا من النموذج الحركي لغاز ما استنتاج العلاقة:

$pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$ أو $p = \frac{1}{3} \rho < c^2 >$، حيث $< c^2 >$ هو متوسط مربع السرعة للجزيئات، و (ρ) هو كثافة الغاز.

يتناسب متوسط طاقة الحركة الانتقالية ($\overline{K.E}$) لجسيم (ذرة أو جزيء) لغاز مثالي تناسبًا طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة (T):

$$\overline{K.E} = \frac{1}{2} m < c^2 > = \frac{3}{2} kT$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ **أ.** كم عدد الذرات الموجودة في:

١. مول من غاز الهيليوم (غاز الهيليوم (^{4}He) يتكوّن من ذرّة واحدة)؟

٢. مول من غاز الكلور (غاز الكلور (^{35}Cl) يتكوّن من ذرّتَين)؟

٣. كيلو مول من غاز النيون (غاز النيون (^{20}Ne) يتكوّن من ذرّة واحدة)؟

ب. تحتوي حاوية على أربعة مولات من ثاني أكسيد الكربون (CO_2). احسب:

١. عدد جزيئات ثاني أكسيد الكربون الموجودة في الحاوية.

٢. عدد ذرات الكربون الموجودة في الحاوية.

٣. عدد ذرات الأكسجين الموجودة في الحاوية.

٢ قطعة من الذهب–197 (^{197}Au) تزن (1.0 kg). احسب:

أ. كتلة ذرة ذهب بوحدة kg.

ب. عدد ذرات الذهب في القطعة.

ج. عدد مولات الذهب في القطعة.

(تحتوي ذرة الذهب على 197 نيوكليون (عدد البروتونات والنيوترونات) وكتلتها 197 u).

٣ تحتوي أسطوانة مزودة بمكبس على ($140\ m^3$) من النيتروجين في درجة حرارة الغرفة وضغطها. دُفع المكبس لخفض حجم النيتروجين إلى ($42\ m^3$) ببطء حتى لا يحدث تغيّر في درجة الحرارة.

أ. احسب ضغط النيتروجين بعد دفع المكبس لخفض حجم النيتروجين.

ب. اشرح تأثير دفع المكبس بسرعة كبيرة على درجة حرارة النيتروجين وضغطه.

٤ الضغط الجوي يساوي (100 kPa)، أي ما يعادل الضغط الذي يبذل بواسطة عمود من الماء ارتفاعه (10 m). تحرّرت فقاعة أكسجين حجمها ($0.42\ cm^3$) بواسطة نبات مائي على عمق (25 m). احسب حجم الفقاعة عندما تصل إلى السطح. اذكر أي افتراضات قمت بها.

٥ تحتوي أسطوانة على ($4.0 \times 10^{-2}\ m^3$) من ثاني أكسيد الكربون عند ضغط ($4.8 \times 10^{5}\ Pa$) ودرجة حرارة الغرفة. احسب:

أ. عدد مولات ثاني أكسيد الكربون.

ب. كتلة ثاني أكسيد الكربون.

(الكتلة المولية لثاني أكسيد الكربون = 44.0 g أو جزيء واحد من ثاني أكسيد الكربون له كتلة 44 u).

٦ احسب حجم مول واحد من غاز مثالي عند ضغط ($1.01 \times 10^{5}\ Pa$) ودرجة حرارة (0 °C).

٧ يحتوي وعاء حجمه ($0.20\ m^3$) على (3.0×10^{26}) جزيء غاز عند درجة حرارة (127 °C). احسب الضغط الذي يبذله الغاز على جدران الوعاء.

تابع

٨ توجد عيّنة من النيون في أسطوانة عند درجة حرارة (27 °C). ارتفعت درجة حرارتها إلى (243 °C).

أ. احسب متوسط طاقة حركة ذرات النيون عند:

١. 27 °C

٢. 243 °C

ب. احسب النسبة بين سرعتَي الجزيئات عند درجتَي الحرارة.

٩ تعبر شاحنة الصحراء، إذ تبدأ رحلتها قبل الفجر بقليل عندما تكون درجة الحرارة (3 °C). يبلغ حجم الهواء المحصور في كل إطار ($1.50\ m^3$) والضغط في كل إطار (3.42×10^5 Pa).

أ. اشرح كيف تضغط جزيئات الهواء في الإطار على جدران الإطار.

ب. احسب عدد مولات الهواء في الإطار.

ج. بحلول منتصف النهار تكون درجة الحرارة قد ارتفعت إلى (42 °C).

١. احسب الضغط في الإطار عند درجة الحرارة الجديدة هذه. قد تفترض أنه لا يوجد تسرّب للهواء وأن حجم الإطار لم يتغيّر.

٢. احسب النسبة بين متوسطي طاقة الحركة الانتقالية لجزيئات الهواء في الإطار قبل وبعد ارتفاع درجة الحرارة.

١٠ معادلة الغاز المثالي هي $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$.

أ. اذكر دلالة كل من الرموز (N) و (m) و ($< c^2 >$).

ب. تحتوي أسطوانة على غاز الهيليوم-4 (^4He) حجمه ($4.1 \times 10^4\ cm^3$) عند ضغط (6.0×10^5 Pa) ودرجة حرارة (22 °C). يمكنك افتراض أن الهيليوم يسلك سلوك الغاز المثالي، إذا علمت أن غاز الهيليوم-4 يحتوي على 4 نيوكليونات، كتلة كل منها (1.66×10^{-27} kg). حدّد:

١. كميّة الغاز بالمول.

٢. عدد الذرات الموجودة في الغاز.

١١ **أ.** وضّح المقصود بالغاز المثالي.

ب. تحتوي أسطوانة على (500 g) من الهيليوم-4 عند ضغط (5.0×10^5 Pa) ودرجة حرارة (27 °C). إذا علمت أن الكتلة المولية للهيليوم-4 هي (4.0 g)، فاحسب:

١. عدد مولات الهيليوم التي تحتويها الأسطوانة.

٢. عدد ذرات الهيليوم التي تحتويها الأسطوانة.

٣. حجم الأسطوانة.

١٢ **أ.** إحدى افتراضات النظرية الحركية للغازات هي أن تلك الجزيئات تمارس تصادمات مرنة تمامًا مع جدران الوعاء الذي يحتويها.

١. اشرح المقصود بالتصادم المرن كلّيًا.

٢. اذكر الافتراضات الثلاثة الأخرى للنظرية الحركية.

تابع

ب. يوجد جزيء واحد داخل مكعب طول ضلعه (0.30 m). كتلة الجزيء (2.4×10^{-26} kg)، يتحرك إلى الأمام وإلى الخلف موازيًا لجانب واحد من الصندوق بسرعة (400 m s^{-1}). ويتصادم تصادمًا مرنًا مع الجانب P (أحد جوانب الصندوق).

١. احسب التغيّر في كميّة التحرك في كل مرة يضرب فيها الجزيء الجانب P.

٢. احسب عدد التصادمات التي قام بها الجزيء مع الجانب P في (1.0 s).

٣. احسب متوسط القوة التي يؤثر بها الجزيء على الجانب P.

١٣ تحتوي أسطوانة على (1.0 mol) من غاز مثالي. يُسخّن الغاز بينما يبقى حجم الأسطوانة ثابتًا. احسب الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز بمقدار (1.0 °C).

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أستخدم الكميّات المولية وأفهم أن المول الواحد هو كميّة من مادة تحتوي على (N_A) جسيم، حيث (N_A) هو عدد أفوجادرو.	٨-١			
أفهم أن الغاز المثالي يخضع للعلاقة $pV \propto T$ حيث (T) هي درجة الحرارة المطلقة.	٨-٧			
أستخدم معادلة حالة الغاز المثالي مُعبرًا عنها بـ $pV = nRT$ ، حيث (n) = كمية المادة (عدد المولات)، و $pV = NkT$، حيث (N) = عدد الجزيئات.	٨-٨			
أذكر الافتراضات الأساسية للنظرية الحركية للغاز.	٨-٩			
أشرح كيف تسبب الحركة الجزيئية الضغط الذي يبذله الغاز وأستنتج العلاقة: $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$، حيث $< c^2 >$ هو متوسط مربع السرعة للجزيئات.	٨-١٠			
أقارن العلاقتَين $pV = \frac{1}{3} Nm < c^2 >$ مع $pV = NkT$ لأستنتج أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيء ما هو $\frac{3}{2} kT$.	٨-١١			

قائمة المصطلحات

الأفعال الإجرائية

في ما يأتي تعريفات المنهج للأفعال الإجرائية المعتمدة ويمكن استخدامها في الاختبارات.

اشرح Explain: اعرض الأهداف أو الأسباب / اجعل العلاقات بين الأشياء واضحة / توقّع لماذا و/ أو كيف وادعم إجابتك بأدلّة ذات صلة.

برّر Justify: ادعم الموضوع بالأدلة والحجة.

بيّن أن (Show (that: قدّم دليلًا منظّمًا يؤدّي إلى نتيجة معيّنة.

حدّد Determine: أجب استنادًا إلى المعلومات المتاحة.

صِف Describe: قدّم الخصائص والميزات الرئيسية.

علّق Comment: أعط رأيًا علميًا حول الموضوع.

المصطلحات العلمية

الإزاحة Displacement: المسافة والاتجاه المحدّدان من موضع الاتزان إلى موضع الجسم المهتز عند أي لحظة في الاهتزازة. (ص ٧٢)

الإزاحة الزاوية Angular displacement: زاوية القوس الذي يتحرك عليه الجسم من موقع بداية حركته. (ص ٤٦)

الاهتزاز Oscillation: حركة متكرّرة على جانبَي موضع ما يُطلق عليه موضع الاتزان. (ص ٦٨)

الاهتزازة المخمدة Damped oscillation: هي اهتزازة تتسبب فيها قوى المقاومة بنقل طاقة النظام إلى المحيط كطاقة داخلية. (ص ٨٧)

تخميد حرج Critical damping: الحد الأدنى من التخميد الذي يتسبب في عودة النظام المهتز إلى موضع اتزانه في أقل زمن وبدون اهتزاز. سيسمح أي تخميد أضعف للنظام بالاهتزاز مرة واحدة أو أكثر؛ وسيؤدي أي تخميد أقوى إلى استغراق النظام زمنًا أطول للعودة إلى موضع اتزانه. (ص ٩٢)

التردد Frequency: عدد الاهتزازات في الثانية أو عدد الموجات التي تعبر نقطة ما في الثانية. (ص ٧٢)

التردد الزاوي Angular frequency: هو تردد الاهتزاز الجيبي معبّرًا عنه بالراديان لكل ثانية. (ص ٧٨)

التردد الطبيعي Natural frequency: التردد الذي يهتز به الجسم عندما لا توجد قوة مقاومة (قوة محصلة خارجية) تؤثر عليه. (ص ٦٩)

التسارع المركزي Centripetal acceleration: هو تسارع جسم ما باتجاه مركز الدائرة عندما يتحرك الجسم بسرعة ثابتة على مسار تلك الدائرة. (ص ٥٤)

التصادم غير المرن Inelastic collision: في حالة التصادم غير المرن لا تكون طاقة الحركة محفوظة؛ حيث يتحول بعضها إلى أشكال أخرى من الطاقة مثل الحرارة. (ص ٢٤)

التصادم المرن كليًا Perfectly elastic collision: تبقى طاقة الحركة الكلّية لجميع الأجسام في حالة التصادم المرن كليًا محفوظة. (ص ٢٤)

ثابت بولتزمان Boltzmann constant: ثابت أساسي يُعطى بواسطة $k = \frac{R}{N_A}$، حيث R هو ثابت الغاز المثالي و N_A هو عدد أفوجادرو. (ص ١٢١)

الحركة التوافقية البسيطة Simple harmonic motion: يتحرك جسم ما حركة توافقية بسيطة إذا كان تسارعه يتناسب طرديًا مع إزاحته عن موضع اتزانه، وبالاتجاه المعاكس لإزاحته. (ص ٧٤)

درجة الحرارة المطلقة Absolute temperature: هي درجة الحرارة التي تقاس بالنسبة إلى أدنى درجة حرارة (الصفر المطلق)، وتقاس بوحدة الكلفن (K). (ص ١٠٩)

الراديان Radian: الزاوية عند مركز الدائرة التي تقابل قوسًا طوله يساوي نصف قطر الدائرة. (ص ٤٧)

الرنين Resonance: يحدث عندما يكون تردد الدافع مساويًا للتردد الطبيعي للنظام المهتز. حيث يمتص النظام أكبر طاقة ممكنة من الدافع فتصبح له سعة عظمى. (ص ٨٩)

الزمن الدوري Period: الزمن الدوري لنظام مهتز هو الزمن المستغرق لعمل اهتزازة واحدة كاملة. (ص ٧٢)

السرعة Speed: معدل تغيّر المسافة التي يقطعها الجسم. وهي كمية عددية. (ص ٤٩)

السرعة المتجهة Velocity: سرعة الجسم باتجاه معيّن، أو معدل تغيّر إزاحة الجسم. وهي كمية متجهة. (ص ٤٩)

السرعة المتجهة الزاوية Angular velocity: الإزاحة الزاوية لكل ثانية. (ص ٥٠)

السعة Amplitude: أقصى إزاحة للجسم المهتز عن موضع اتزانه. (ص ٧٢)

الضغط Pressure: يُعرّف الضغط بأنه القوة التي تؤثر على وحدة المساحة من سطح ما. وحدة الضغط في النظام الدولي للوحدات هي باسكال (Pa). ومن المعادلة: $p = \frac{F}{A}$ ($1\ Pa = 1\ N/m^2$). (ص ١٠٦)

الطور Phase: النقطة التي وصل إليها الجسم المهتز بالنسبة إلى الدورة الكاملة لاهتزازة ما. (ص ٧٣)

عدد أفوجادرو Avogadro number: عدد الجسيمات في مول واحد من أي مادة، ويرمز له بـ (N_A) ($N_A = 6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$). (ص ١٠٤)

الغاز المثالي Ideal gas: الغاز الذي يخضع للمعادلة: $pV = nRT$. (ص ١١٥)

فرق الطور Phase difference: الفرق في طورَي جسمَين مهتزَّين، مقاسًا بالدرجات أو الراديان. (ص ٧٣)

قانون بويل Boyle's law: يتناسب الضغط الذي تؤثر به كتلة ثابتة من الغاز عكسيًا مع حجمه، بشرط أن تبقى درجة حرارته ثابتة. (ص ١٠٩)

قانون جاي لوساك Gay-Lussac's law: يتناسب ضغط الغاز طرديًا مع درجة حرارته المطلقة عندما يكون حجمه ثابتًا. (ص ١١٤)

قانون شارل Charles's law: يتناسب الحجم الذي يشغله غاز ما عند ضغط ثابت طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة. (ص ١١٣)

قانون نيوتن الأوّل للحركة Newton's first law of motion: يبقى الجسم في حالة سكون أو في حالة حركة منتظمة ما لم تؤثّر عليه قوة محصّلة. (ص ٣٤)

قانون نيوتن الثالث للحركة Newton's third law of motion: عندما يتأثر جسمان أحدهما بالآخر، فإن القوى التي يؤثر بها كل منهما على الآخر، تكون متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه. (ص ٣٧)

قانون نيوتن الثاني للحركة Newton's second law of motion: القوة المحصلة التي تؤثر على جسم ما تتناسب طرديًا مع (أو تساوي) معدل تغيّر كمّية التحرك للجسم. (ص ٣٥)

القوة المركزية Centripetal force القوة المحصلة المؤثرة على جسم ما في اتجاه مركز الدائرة عندما يدور الجسم على مسار تلك الدائرة بسرعة ثابتة. (ص ٥٢)

كمّية التحرك الخطية Linear momentum: هي حاصل ضرب كتلة جسم ما في سرعته المتجهة. (ص ٢١)

مبدأ حفظ الطاقة Principle of conservation of energy: الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم، ولكن يمكن تحويلها من شكل إلى آخر. (ص ٢٣)

مبدأ حفظ كمية التحرك Principle of conservation of momentum: في النظام المغلق تكون كمّية التحرك الكلّية للأجسام ثابتة، أي أن كمّية التحرك قبل التصادم تساوي كمّية التحرك بعد التصادم. (ص ٢٢)

المول Mole: المول الواحد هو كمية المادة التي تحتوي على عدد من الجسيمات يساوي عدد أفوجادرو، والمول كمية أساسية في النظام الدولي للوحدات (SI) لكمية المادة، ووحدته الأساسية المول (mol). (ص ١٠٤)

النظام المغلق Closed system: نظام تتفاعل فيه الأجسام بحيث لا توجد قوة محصّلة خارجية تؤثر عليها. (ص ٢١)

النظرية الحركية للغازات Kinetic theory of gases: نموذج يعتمد على الحركة المجهرية لذرات الغاز أو جزيئاته. (ص ١١٧)

ملحق: الجدول الدوري للعناصر

المفتاح

العدد الذري
الرمز
الاسم
الكتلة الذريّة النسبية

المجموعة

الدورة	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
1								1 H هيدروجين hydrogen 1.0										2 He هيليوم helium 4.0
2	3 Li ليثيوم lithium 6.9	4 Be بريليوم beryllium 9.0											5 B بورون boron 10.8	6 C كربون carbon 12.0	7 N نيتروجين nitrogen 14.0	8 O أكسجين oxygen 16.0	9 F فلور fluorine 19.0	10 Ne نيون neon 20.2
3	11 Na صوديوم sodium 23.0	12 Mg ماغنيسيوم magnesium 24.3											13 Al ألومنيوم aluminium 27.0	14 Si سيليكون silicon 28.1	15 P فوسفور phosphorus 31.0	16 S كبريت sulfur 32.1	17 Cl كلور chlorine 35.5	18 Ar أرغون argon 39.9
4	19 K بوتاسيوم potassium 39.1	20 Ca كالسيوم calcium 40.1	21 Sc سكانديوم scandium 45.0	22 Ti تيتانيوم titanium 47.9	23 V فناديوم vanadium 50.9	24 Cr كروم chromium 52.0	25 Mn منغنيز manganese 54.9	26 Fe حديد iron 55.8	27 Co كوبالت cobalt 58.9	28 Ni نيكل nickel 58.7	29 Cu نحاس copper 63.5	30 Zn خارصين zinc 65.4	31 Ga غاليوم gallium 69.7	32 Ge جيرمانيوم germanium 72.6	33 As زرنيخ arsenic 74.9	34 Se سيلينيوم selenium 79.0	35 Br بروم bromine 79.9	36 Kr كريبتون krypton 83.8
5	37 Rb روبيديوم rubidum 85.5	38 Sr سترونشيوم strontium 87.6	39 Y إيتريوم yttrium 88.9	40 Zr زيركونيوم zirconium 91.2	41 Nb نيوبيوم niobium 92.9	42 Mo موليبدنوم molybdenum 95.9	43 Tc تكنيشيوم technetium –	44 Ru روثينيوم ruthenium 101.1	45 Rh روديوم rhodium 102.9	46 Pd بالاديوم palladium 106.4	47 Ag فضة silver 107.9	48 Cd كادميوم cadmium 112.4	49 In إنديوم indium 114.8	50 Sn قصدير tin 118.7	51 Sb أنتيمون antimony 121.8	52 Te تيلوريوم tellurium 127.6	53 I يود iodine 126.9	54 Xe زينون xenon 131.3
6	55 Cs سيزيوم caesium 132.9	56 Ba باريوم barium 137.3	57–71 lanthanoids	72 Hf هافنيوم hafnium 178.5	73 Ta تانتالوم tantalum 180.9	74 W تنغستن tungsten 183.8	75 Re رينيوم rhenium 186.2	76 Os أوزميوم osmium 190.2	77 Ir إريديوم iridium 192.2	78 Pt بلاتين platinum 195.1	79 Au ذهب gold 197.0	80 Hg زئبق mercury 200.6	81 Tl ثاليوم thallium 204.4	82 Pb رصاص lead 207.2	83 Bi بيزموث bismuth 209.0	84 Po بولونيوم polonium –	85 At أستاتين astatine –	86 Rn رادون radon –
7	87 Fr فرانسيوم francium –	88 Ra راديوم radium –	89–103 actinoids	104 Rf رذرفورديوم rutherfordium –	105 Db دوبنيوم dubnium –	106 Sg سيبورجيوم seaborgium –	107 Bh بوريوم bohrium –	108 Hs هاسيوم hassium –	109 Mt متنيريوم meitnerium –	110 Ds دارمستاديوم darmstadtium –	111 Rg رونتجينيوم roentgenium –	112 Cn كوبرنيسيوم copernicium –	113 Nh نيهونيوم nihonium –	114 Fl فليروفيوم flerovium –	115 Mc موسكوفيوم moscovium –	116 Lv ليفرموريوم livermorium –	117 Ts تينيسين tennessine –	118 Og أوغانيسون oganesson –

57 La لانثانوم lanthanum 138.9	58 Ce سيريوم cerium 140.1	59 Pr برازيوديميوم praseodymium 140.9	60 Nd نيوديميوم neodymium 144.4	61 Pm بروميثيوم promethium –	62 Sm ساماريوم samarium 150.4	63 Eu أوروبيوم europium 152.0	64 Gd غادولينيوم gadolinium 157.3	65 Tb تيربيوم terbium 158.9	66 Dy ديسبروسيوم dysprosium 162.5	67 Ho هولميوم holmium 164.9	68 Er إيربيوم erbium 167.3	69 Tm ثوليوم thullium 168.9	70 Yb إيتربيوم ytterbium 173.1	71 Lu لوتيشيوم lutetium 175.0
89 Ac أكتينيوم actinium –	90 Th ثوريوم thorium 232.0	91 Pa بروتاكتينيوم protactinium 231.0	92 U يورانيوم uranium 238.0	93 Np نبتونيوم neptunium –	94 Pu بلوتونيوم plutonium –	95 Am أميرسيوم americium –	96 Cm كوريوم curium –	97 Bk بيركيليوم berkelium –	98 Cf كاليفورنيوم californium –	99 Es إينشتاينيوم einsteinium –	100 Fm فيرميوم fermium –	101 Md مانديليفيوم mendelevium –	102 No نوبيليوم nobelium –	103 Lr لاورنسيوم lawrencium –

شكر وتقدير

يتوجه المؤلفون والناشرون بالشكر الجزيل إلى جميع من منحهم حقوق استخدام مصادرهم أو مراجعهم. وبالرغم من رغبتهم في الإعراب عن تقديرهم لكل جهد تم بذله، وذكر كل مصدر تم استخدامه لإنجاز هذا العمل، إلا أنه يستحيل ذكرها وحصرها جميعًا. وفي حال إغفالهم لأي مصدر أو مرجع فإنه يسرهم ذكره في النسخ القادمة من هذا الكتاب.

F9photos/Getty Images; TRL LTD./SCIENCE PHOTO LIBRARY/Getty Images; Baona/Getty Images; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY/SCIENCE PHOTO LIBRARY (x3); Motoring Picture Library/Alamy Stock Photo; ULTRA.F/Getty Images; nikkytok/Shutterstock; FooTToo/Shutterstock; Massimo Bettiol/Stringer/Getty Images; Gray Wall Studio/Shutterstock; argus/Shutterstock; S. Greg Panosian/Getty Images; Ministry of Education, Oman; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY/SCIENCE PHOTO LIBRARY; Pgiam/Getty Images; Alan Copson/Getty Images; Ministry of Education, Oman; Fairfax Media/Getty Images; SIMON FRASER/Getty Images; JanakaMaharageDharmasena/Getty Images; Martin Rietze/Getty Images

تم بحمد الله

رقم الإيداع:
٦٨٧٣ / ٢٠٢٣م

مزون للطباعة والنشر والتغليف (ش.م.م) - ٢٤٨١٥٦٩٣

الفيزياء – كتاب الطالب

يساعد البحث المكثف على تلبية الاحتياجات الحقيقة للطلبة الذين يدرسون مادة الفيزياء. حيث تضمن الأسئلة الواردة في نهاية كل وحدة الشعور بالثقة أثناء عملية التقييم، وفرصًا أكثر للتفكير، و تساعد قوائم المراجعة الخاصة بالتقييم الذاتي؛ على أن تصبح مسؤولاً عن عملية التعلم.

يؤمّن كتاب الطالب مجموعة من أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية وأسئلة المناقشة، والتي تساعدك على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

- بعض الميزات مثل «قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة»، والملخصات، وكيفية التعلم النشط، وبناء المهارات، تمنح فرصًا للتفكير.
- ميزات «العلوم ضمن سياقها»، من تفسير الأفكار ضمن سياق العالم الواقعي، إضافة إلى مناقشة المفاهيم مع الطلبة الآخرين.
- تعمل الأسئلة ذات الجزئيات المتعددة الموجودة في نهاية كل وحدة على التحضير لخوض الامتحانات بثقة.
- تساعد أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية والعمل ضمن مجموعات، وأسئلة المناقشة، على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

يشمل منهج الفيزياء للصف الحادي عشر من هذه السلسلة أيضًا:

– كتاب التجارب العملية والأنشطة
– دليل المعلّم

ISBN 978-9-99698-908-7

9 789996 989087 >

www.moe.gov.om

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS