

ملخص وتدريبات الزخم والتصادمات



تم تحميل هذا الملف من موقع المناهج الإماراتية

موقع المناهج ⇨ المناهج الإماراتية ⇨ الصف الحادي عشر المتقدم ⇨ فيزياء ⇨ الفصل الثالث ⇨ ملخصات وتقارير ⇨ الملف

تاريخ إضافة الملف على موقع المناهج: 2026-06-28 12:52:18

ملفات اكتب للمعلم اكتب للطالب | اختبارات الكترونية | اختبارات | حلول | عروض بوربوينت | أوراق عمل
منهج انجليزي | ملخصات وتقارير | مذكرات وبنوك | الامتحان النهائي | للمدرس

المزيد من مادة
فيزياء:

التواصل الاجتماعي بحسب الصف الحادي عشر المتقدم



صفحة المناهج
الإماراتية على
فيسبوك

الرياضيات

اللغة الانجليزية

اللغة العربية

التربية الاسلامية

المواد على تلغرام

المزيد من الملفات بحسب الصف الحادي عشر المتقدم والمادة فيزياء في الفصل الثالث

ملخص وتدريبات الزخم والتصادمات

1

تجميع قوانين الفيزياء

2

BE READY END OF TERM 3 REVISION - ANSWERS PHYSICS

3

كن مستعدا مراجعة نهاية الفصل 2026م

4

مراجعة هيكل الامتحان كراسة تدريبية

5

الزخم الخطي Linear Momentum

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

يُعرف الزخم الخطي (كمية التحرك) **Linear momentum** لجسم؛ بأنه ناتج ضرب كتلة الجسم (m) في سرعته الخطية المتجهة (v)، رمزه p ، ويُقاس بوحدة $kg.m/s$ حسب النظام الدولي للوحدات. وأُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$p = mv$$

والزخم الخطي كمية متجهة، له اتجاه السرعة نفسه. وألاحظ من هذه المعادلة أن الزخم الخطي لجسم يزداد بزيادة مقدار سرعته أو كتلته أو كليهما. فمثلاً؛ الزخم الخطي للشاحنة الموضحة في الشكل (1) أكبر منه للسيارة عند حركتهما بمقدار السرعة نفسه. ولاحظت في أثناء تنفيذي التجربة الاستهلاكية أن تأثير جسم متحرك في جسم آخر عند التصادم يعتمد على كتلته وسرعته المتجهة؛ أي يعتمد على زخمه الخطي.

✓ **أنحقق:** ما المقصود بالزخم الخطي؟

الزخم الخطي والقانون الثاني لنيوتن في الحركة

Linear Momentum and Newton's Second Law of Motion

يلزم التأثير بقوة في جسم لتغيير مقدار زخمه الخطي أو اتجاهه أو كليهما. ويُستخدم القانون الثاني لنيوتن في الحركة للربط بين التغيير في الزخم الخطي

الشكل (1): شاحنة وسيارة

تتحركان بمقدار السرعة نفسه.

الفكرة الرئيسة:

ترتبط مفاهيم الدفع والقوة والتغير في الزخم الخطي بعلاقات رياضية. ولحفظ الزخم الخطي أهمية كبيرة في حياتنا اليومية.

نتائج التعلم:

- أعرف الزخم الخطي (كمية التحرك) لجسم.
- أُعبر عن القانون الثاني لنيوتن بدلالة معدل التغير في الزخم الخطي لجسم.
- أعرف الدفع بدلالة القوة والزمن.
- أحسب الدفع الذي تؤثر به قوة ثابتة أو متغيرة في جسم.
- أستنتج العلاقة بين الدفع الكلي المؤثر في جسم والتغير في زخمه الخطي.
- أستقصي قانون حفظ الزخم الخطي عند تصادم الأجسام بفعل قوى داخلية.
- أطبق بحل مسائل على الزخم الخطي وحفظه.

المفاهيم والمصطلحات:

الزخم الخطي Linear Momentum

الدفع Impulse

مبرهنة (الزخم الخطي - الدفع)

Impulse - Momentum Theorem

قانون حفظ الزخم الخطي

Law of Conservation of Linear Momentum

أفكر: هل يُمكن أن يكون مقدار الزخم الخطي لسيارة مساوياً مقدار الزخم الخطي لشاحنة كبيرة كتلتها عشرة أضعاف كتلة السيارة؟ أفسر إجابتي.

✓ **أتحقّق:** أعرّف القوة المحصّلة المؤثرة في جسم بدلالة الزخم الخطي.

الربط بالتكنولوجيا

تتنفخ الوسادة الهوائية في أثناء حدوث تصادم لسيارة، إذ تُحفّز القوة الناتجة عن التصادم مجسّاً يُطلق تفاعلاً كيميائياً ينتج عنه غاز يؤدي إلى انتفاخ الوسادة بسرعة. وتعمل الوسادة الهوائية على زيادة زمن تأثير القوة الذي خلاله يتوقّف جسم الراكب عن الحركة، وبالتالي تقليل مقدار القوة المؤثرة فيه؛ فيقلّل ذلك من احتمال حدوث الإصابات أو خطورتها. كما تعمل الوسادة الهوائية على توزيع القوة على مساحة كبيرة من جسم الراكب، فيقلّ ضغط هذه القوة المؤثر فيه.



للجسم والقوة المحصّلة المؤثرة فيه، علماً أنّ العالم نيوتن صاغ قانونه الثاني بدلالة الزخم الخطي كما يأتي:

$$\sum F = \frac{dp}{dt}$$

حيث $\sum F$ هي القوة المحصّلة المؤثرة في الجسم. وعند ثبات الكتلة يمكن إعادة كتابة القانون الثاني لنيوتن بدلالة الزخم كما يأتي:

$$\sum F = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$$

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

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

ينص القانون الثاني لنيوتن في الحركة بحسب هذه الصيغة أنّ: "المعدل الزمني لتغيّر الزخم الخطي لجسم يساوي القوة المحصّلة المؤثرة فيه". ويكون متّجه التغيّر في الزخم الخطي باتّجاه القوة المحصّلة دائماً.

العلاقة بين الزخم الخطي والدفع

Relationship between Linear Momentum and Impulse

عندما يركل لاعب كرة قدم ساكنة؛ يحدث تلامس بين قدمه والكرة لمدة زمنية، وتتغير سرعتها المتجهة بسبب القوة المؤثرة فيها من قدم اللاعب، وتكتسب الكرة زخماً خطياً باتّجاه محدد نتيجة دفع قدم اللاعب لها.

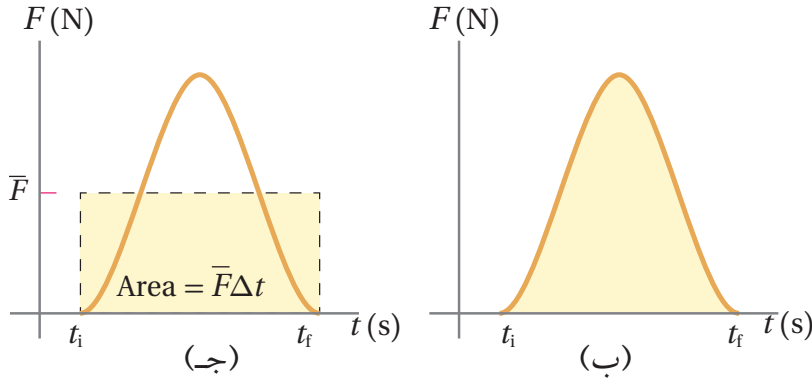
يُعرّف **الدفع (Impulse (I** المؤثر في جسمٍ بأنّه ناتج ضرب القوة المحصّلة المؤثرة في الجسم في زمن تأثيرها، كما يأتي:

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

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

$$I = \Delta p$$

تسمّى هذه المعادلة **مبرهنة (الزخم الخطي - الدفع) Impulse - momentum theorem**، وتنصّ على: "دفع قوة محصّلة مؤثرة في جسمٍ يساوي التغيّر في زخمه الخطي"، والدفع كمية متّجهة، يكون باتّجاه تغيّر الزخم الخطي، وهو اتّجاه القوة المحصّلة نفسه. وبما أنّ الزخم الخطي والدفع والقوة كميات متّجهة؛ فإنّ الإشارات الموجبة والسالبة ضرورية لتحديد اتّجاهاتها، لذا؛ سنختار في هذا الدرس نظام إحداثيات يكون فيه الاتّجاه الموجب نحو محور (+x).



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

يبين الشكل (2/أ) قدم لاعب يركل كرة قدم؛ فيتغيّر زخمها الخطّي بسبب قوّته المؤثرة فيها. بينما يوضح الشكل (2/ب) كيفية تغيّر مقدار تلك القوة مع الزمن أثناء ملامسة قدم اللاعب للكرة لفترة زمنية (Δt) . يُحسب مقدار الدفع المؤثر في الكرة عن طريق إيجاد المساحة Area المحصورة بين منحنى (القوة - الزمن) ومحور الزمن الموضح في الشكل (2/ب)، أو باستخدام مقدار القوة المتوسطة مضروباً في زمن تأثيرها، كما في الشكل (2/ج)، عن طريق إيجاد المساحة المحصورة بين منحنى (القوة المتوسطة - الزمن) ومحور الزمن خلال الفترة الزمنية نفسها. والقوة المتوسطة $(\bar{F})$ كما في الشكل (2/ج) هي القوة المُحصّلة الثابتة التي إذا أثرت في الجسم لفترة زمنية (Δt) لأحدثت الدفع نفسه الذي تحدثه القوة المتغيرة أثناء الفترة الزمنية نفسها.

تُستخدم مبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع) في توضيح نقطتين مهمتين:

1. عند ثبات القوة المُحصّلة المؤثرة، يزداد التغيّر في الزخم الخطّي بزيادة زمن تأثير هذه القوة. فمثلاً؛ عند دفع عربة تسوّق ساكنة بقوة، يزداد التغيّر في زخمها الخطّي بزيادة المدة الزمنية لتأثير القوة من لحظة تحريك العربة وحتى تركها. أنظر الشكل (3/أ).
2. عند ثبات مقدار التغيّر في الزخم الخطّي، يتناسب مقدار القوة المُحصّلة المؤثرة عكسياً مع زمن تأثيرها. فمثلاً؛ يثنّي المظليّ رجليه لحظة ملامسة قدميه سطح الأرض، وهذا يجعل تغيّر زخمه الخطّي يستغرق فترة زمنية أطول، فيقلّ مقدار القوة المُحصّلة المؤثرة فيه. أنظر الشكل (3/ب). كما أنني أثني رجليّ تلقائياً عند ملامسة قدمي سطح الأرض بعد القفز.

✓ **أتحقّق:** ما العلاقة بين دفع قوّة محصّلة مؤثرة في جسم والتغيّر في زخمه الخطّي؟



(ب)

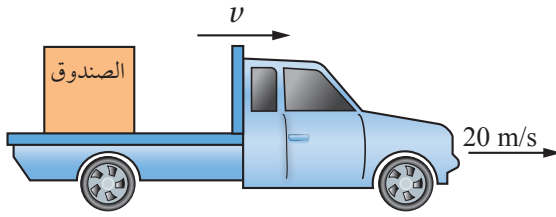


(أ)

الشكل (3):

- (أ) شخص يؤثر في عربة تسوق بقوة مدّة من الزمن فيحدث دفعا يغيّر زخمها الخطّي.
- (ب) يثنّي المظليّ رجليه لحظة ملامسة قدميه سطح الأرض لزيادة زمن التغيّر في زخمه الخطّي.

المثال ١



وُضِعَ صندوقٌ كتلته (100 kg) في شاحنةٍ تتحرّكُ بسرعة (20 m/s) شرقاً، كما هو موضحٌ في الشكل (4). إذا ضغط السائقُ على دَوَّاسَةِ المكابح، فتوقفت الشاحنةُ خلال (5.0 s) من لحظة الضغط على المكابح دون أن ينزلق الصندوق؛ فأحسبُ ما يأتي:

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

أ. الزخم الخطّي الابتدائي للصندوق.

ب. الدفع المؤثر في الصندوق.

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

المعطيات:

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

المطلوب:

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



الحلّ:

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

أ. تتحرّك الشاحنة باتجاه محور +x؛ لذا تكون السرعة الابتدائية للصندوق موجبةً، وأحسبُ زخمه الخطّي الابتدائي كما يأتي:

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

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

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

الزخم الخطّي الابتدائي موجبٌ؛ فيكون باتجاه محور +x.

ب. أستخدم مُبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع) لحساب الدفع. ألاحظُ أنّ الزخم الخطّي النهائي للصندوق يساوي صفراً؛ لأنّ مقدار سرعته النهائية يساوي صفراً.

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

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

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

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

الدفع سالبٌ، حيث يؤثّر في اتجاه الغرب (-x)؛ لأنه يؤثّر في الصندوق بعكس اتجاه سرعته الابتدائية.

ج. أستخدم القانون الثاني لنيوتن لحساب قوّة الاحتكاك المتوسطة المؤثرة في الصندوق أثناء مدّة توقّف الشاحنة.

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

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

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

تؤثّر قوّة الاحتكاك في الاتجاه المُعاكس لاتّجاه سرعة الصندوق؛ لذا يكون اتجاهها في اتجاه -x (غرباً).



الشكل (5): لاعب يركل كرة قدم.

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

أ. الزخم الخطي للكرة عند لحظة ابتعادها عن قدم اللاعب.

ب. زمن تلامس الكرة مع قدم اللاعب.

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

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

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

الحل:

أ. أحسب الزخم الخطي النهائي للكرة لحظة ابتعادها عن قدم اللاعب.

$$p_f = mv_f = 0.450 \times 30.0 \\ = 13.5 \text{ kg.m/s}$$

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

الزخم الخطي النهائي موجب؛ إذ تتحرك الكرة في اتجاه محور $+x$.

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

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

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

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

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

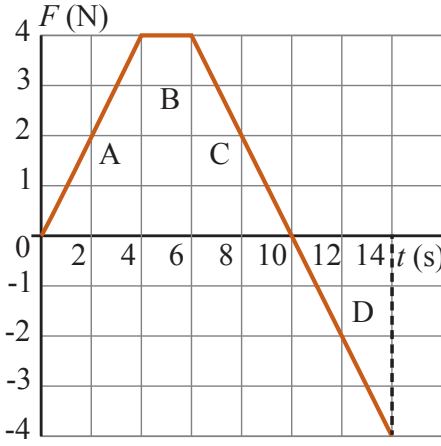
الدفع موجب؛ إذ يؤثر في اتجاه محور $+x$ ؛ لأنه يؤثر في الكرة باتجاه القوة المحصلة المؤثرة فيها من قدم اللاعب.

كما يمكن حساب الدفع باستخدام تعريف الدفع كما يأتي:

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

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

المثال 3



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

- الدفع الكلي المؤثر في الصندوق نتيجة لتأثير القوة المحصلة.
- السرعة النهائية للصندوق في نهاية المدة الزمنية لتأثير القوة المحصلة.
- القوة المتوسطة المؤثرة في الصندوق خلال هذه المدة الزمنية.

الشكل (6): منحنى (القوة - الزمن).

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

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

الحل:

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

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

$$16 = mv_f - 0$$

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

السرعة النهائية موجبة، فيكون اتجاهها باتجاه محور $+x$.

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

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

يكون اتجاه القوة المتوسطة باتجاه المحور $+x$.

المعطيات:

المطلوب:

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

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

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

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

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

اتجاه الدفع باتجاه محور $+x$.

لتدرب

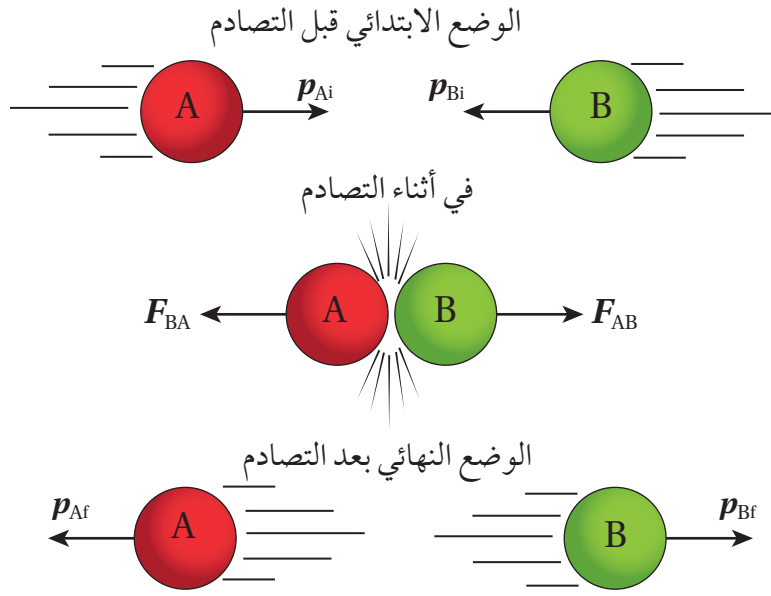


أستخدم الأرقام: كرة تنس كتلتها (0.060 kg) ؛ يرميها لاعب إلى أعلى قليلاً، وعند بلوغها أقصى ارتفاع يضربها أفقياً بالمضرب؛ فتنتقل بسرعة (55 m/s) في اتجاه محور $+x$. أنظر الشكل (7). إذا علمت أن زمن تلاؤم الكرة مع المضرب $(4.0 \times 10^{-3} \text{ s})$ ؛ أحسب ما يأتي:

أ. الدفع الذي يؤثر به المضرب في الكرة.

ب. القوة المتوسطة التي أثر بها المضرب في الكرة.

الشكل (7): لاعب يقذف كرة تنس.



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

حفظ الزخم الخطي Conservation of Linear Momentum

يكون الزخم الخطي محفوظاً تحت شروط معينة. وكى أتوصل إلى قانون حفظ الزخم الخطي؛ أنظر الشكل (8)، الذي يوضح تصادم كرتي بلياردو في بُعد واحد، حيث يتحرك الجسمان قبل التصادم على امتداد الخط المستقيم نفسه، ويتصادمان رأساً برأس، وتبقى حركتهما بعد التصادم على المسار المستقيم نفسه. أتذكر أن النظام المعزول Isolated system هو النظام الذي تكون القوة المحصلة الخارجية المؤثرة فيه صفراً، وتكون القوى المؤثرة قوى داخلية فقط. ويُعد النظام المكون من كرتي البلياردو في الشكل (8) معزولاً؛ إذ إن القوى الخارجية المؤثرة فيه، مثل قوة الاحتكاك تكون صغيرة مقارنة بالقوى الداخلية المؤثرة في النظام وهي قوى الفعل ورد الفعل التي تؤثر بها كل من الكرتين في الأخرى في أثناء التصادم؛ لذا نهمل قوى الاحتكاك الخارجية.

✓ **أتحقق:** متى يمكن إهمال القوى الخارجية المؤثرة في نظام كي يُعدّ نظاماً معزولاً؟

حفظ الزخم الخطي والقانون الثالث لنيوتن في الحركة

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

يوضح الشكل (8) كرتي بلياردو قبل التصادم مباشرة، وفي أثناء التصادم، وبعده مباشرة. تؤثر كل كرة بقوة في الكرة الأخرى في أثناء تصادمهما معاً، وأفترض أن مقدار كل من القوتين ثابت في أثناء الفترة الزمنية لتلامس الكرتين. تكون هاتان

القوتان متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه؛ بحسب القانون الثالث لنيوتن في الحركة، إذ إنهما تمثّلان زوجي تأثير متبادل (فعل ورد فعل)، وأُعبّر عنهما كما يأتي:

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

وبضرب طرفي المعادلة بالفترة الزمنية لتلاؤم الكرتين، أتوصل إلى العلاقة الآتية:

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

وتعني هذه العلاقة أنّ دفع الكرة A في الكرة B وهو ($\mathbf{I}_{AB} = \Delta \mathbf{p}_B$) يساوي في المقدار دفع الكرة B في الكرة A وهو ($\mathbf{I}_{BA} = \Delta \mathbf{p}_A$)، ويعاكسه في الاتجاه. وبما أن التغيّر في الزخم الخطّي يساوي الدفع بحسب مبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع)، فإنّه يمكن كتابة العلاقة السابقة كما يأتي:

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

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

أي أن:

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

وبإعادة ترتيب حدود هذه المعادلة نحصل على معادلة قانون حفظ الزخم الخطّي:

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

حيث $\mathbf{v}_{Ai}$ و $\mathbf{v}_{Af}$ تمثّلان السرعتين المتجهتين للجسم الأول قبل التصادم وبعده مباشرة على الترتيب، و $\mathbf{v}_{Bi}$ و $\mathbf{v}_{Bf}$ تمثّلان السرعتين المتجهتين للجسم الثاني قبل التصادم وبعده مباشرة على الترتيب. تشير هذه المعادلة إلى **قانون حفظ الزخم الخطّي** Law of conservation of linear momentum، إذ ينصّ أنّه: «عندما يتفاعل جسمان أو أكثر في نظام معزول، يبقى الزخم الخطّي الكلي للنظام ثابتاً». كما يمكن التعبير عنه بأن: الزخم الخطّي الكلي لنظام معزول قبل التصادم مباشرة يساوي الزخم الخطّي الكلي للنظام بعد التصادم مباشرة. وسوف نتعامل مع الأنظمة جميعها في هذه الوحدة على أنها معزولة.

✓ **أنحقّق:** ما العلاقة بين اتجاه الدفع المؤثّر في جسم واتّجاه التغيّر في زخمه الخطّي؟

تعرّف إثبات حفظ الزخم الخطّي رياضياً، ولاستقصاء حفظ الزخم الخطّي عملياً؛ أنفذ التجربة الآتية:

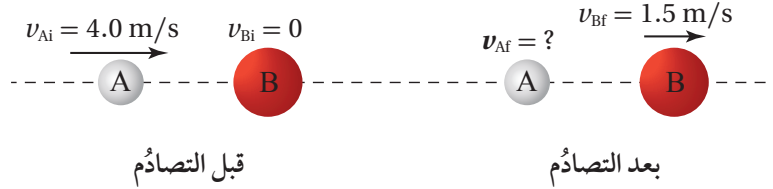
✓ **أنحقّق:** أذكر نص قانون حفظ الزخم الخطّي.

ألاحظُ بعد تنفيذ التجربة أن الزخم الخطي الكلي لنظام العريتين قبل التصادم يساوي الزخم الخطي الكلي لنظام العريتين بعد التصادم. وهذا يتوافق مع قانون حفظ الزخم الخطي في الأنظمة المعزولة.

يُمكن أن يحتوي النظام أعداداً مختلفة من الأجسام المتفاعلة (المتصادمة) معاً، وقد يحدث التصادم بينها في بُعد واحد أو بُعدين أو ثلاثة أبعاد، وبعد تصادم هذه الأجسام؛ فإنها قد تتردّد عن بعضها بعضاً، أو تلتصق ببعضها بعضاً، وفي الدرس الثاني سوف تُناقش الأنواع المختلفة للتصادمات وحفظ الزخم فيها، كما سيناقش حفظ الزخم في الانفجارات، حيث يتجزأ الجسم الواحد إلى أجزاء عدة.

المثال 4

يُوضّح الشكل (9) تصادم كرتين A و B، حيث تتحرك الكرة A باتجاه محور $+x$ بسرعة (4.0 m/s) نحو الكرة B الساكنة. بعد التصادم تحركت الكرة B بسرعة (1.5 m/s) باتجاه محور $+x$. إذا علمتُ أن $(m_A = 1.0 \text{ kg})$ و $(m_B = 2.0 \text{ kg})$ ؛ فأحسب سرعة الكرة A بعد التصادم.



الشكل (9): تصادم كرتين.

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

المعطيات:

$v_{Af} = ?$

المطلوب:

الحل:

بتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي على نظام الكرتين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

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

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

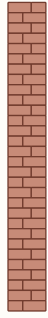
$$v_{Af} = 1.0 \text{ m/s}, +x$$

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

مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسة: ما المقصود بالزخم الخطي لجسم؟ ما العلاقة بين الدفع المؤثر في جسم والتغير في زخمه الخطي؟
2. **أستنتج:** بحسب علاقة تعريف الزخم الخطي $p = mv$ ؛ تكون وحدة قياسه kg.m/s ، وبحسب مبرهنة (الزخم الخطي - الدفع) تكون وحدة قياسه (N.s) . أثبت أن هاتين الوحدتين متكافئتان.
3. أوضح: متى يكون الزخم الخطي لنظام محفوظاً؟
4. **أفسر:** ذهب محمد إلى مدينة الألعاب، وعند قيادته سيارة كهربائية واصطدامها بالسيارات الأخرى وجد أن تأثير هذه التصادمات عليه قليل. وعند تركيز انتباهه على هذه السيارات؛ لاحظ وجود حزام من مادة مطاطية يحيط بجسم السيارة. أفسر سبب وجود هذا الحزام المطاطي.
5. **أفسر ما يأتي:**
 - أ. يسند الصياد كعب بندقية الصيد إلى كتفه بإحكام عند إطلاق الرصاص.
 - ب. تغير المركبة الفضائية من مقدار سرعتها أو اتجاه حركتها عن طريق التحكم بكمية الغازات المندفعة منها واتجاه اندفاعها.
6. **أستخدم الأرقام:** تنزل عربة (A) كتلتها (0.2 kg) على مدرج هوائي (عديم الاحتكاك) بسرعة (5 m/s) باتجاه $(+x)$ ، فتصطدم بعربة أخرى (B) ساكنة على المدرج كتلتها (0.6 kg) . إذا كان التغير في الزخم الخطي للعربة (A) نتيجة التصادم يساوي (-1.6 kg.m/s) ؛ أحسب ما يأتي:
 - أ. سرعة كل من العربتين بعد التصادم مباشرة.
 - ب. زمن التلامس بين العربتين إذا كانت القوة التي أثرت بها إحدى العربتين في الأخرى (5.0 N) .
7. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:
 1. أثرت قوة محصلة مقدارها (3.2 N) في جسم ساكن كتلته (4 kg) مدةً زمنيةً مقدارها (20 s) ، وحركته باتجاهها. إن مقدار السرعة النهائية للجسم بوحدة (m/s) يساوي:

أ . 64 ب . 16 ج . 4 د . 0.04

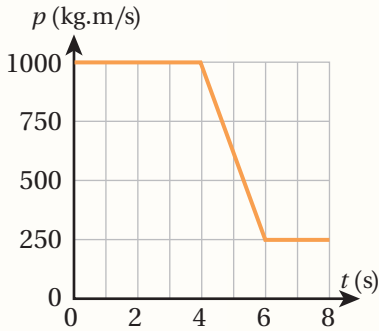


2. كرة كتلتها (0.5 kg) تتحرك باتجاه محور $-x$ ، فتصطدم بجدار بسرعة $(v_i = 30 \text{ m/s})$ ، وترتد عنه بسرعة (v_f) ، كما يبين الشكل. إذا كان الدفع المؤثر في الكرة (25 kg.m/s) ؛ فإن مقدار السرعة (v_f) بوحدة (m/s) يساوي:

- أ. 80 ب. 30
ج. 20 د. 5

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

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



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

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

- أ. 125 N ب. 250 N ج. 375 N د. 750 N

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

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

الطاقة الحركية والزخم الخطي في الأنظمة المعزولة

Kinetic Energy and Linear Momentum in Isolated Systems

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

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

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

حفظ الزخم الخطي عند إطلاق قذيفة

Linear Momentum Conservation when Firing a Shell

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

الفكرة الرئيسة:

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

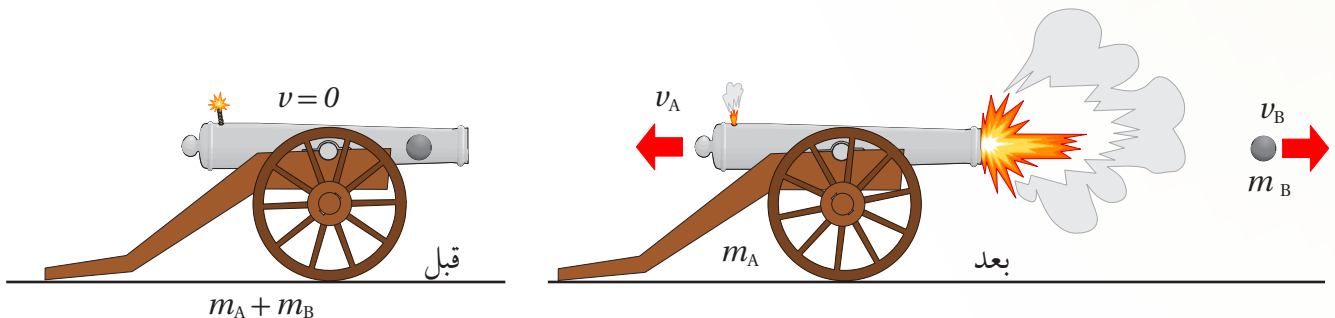
نتائج التعلم:

- أصنّف التصادمات إلى مرنة وغير مرنة وفقًا للتغيرات التي تطرأ على الطاقة الحركية للأجسام المتصادمة.
- أفسّر التغير في الطاقة الحركية في أثناء التصادم في ضوء انتقال الطاقة وتحولاتها ومبدأ حفظ الطاقة.
- أفسر مبدأ عمل تطبيقات عملية تقلل من الأضرار الناتجة عن تصادم جسمين.
- أطبق بحلّ مسائل على التصادمات.

المفاهيم والمصطلحات:

Elastic Collision	تصادم مرّن
Inelastic Collision	تصادم غير مرّن

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



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



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

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

في الأنظمة المعزولة التي يكون فيها الجسم متحركاً قبل الانقسام (انفصال صاروخ إلى جزأين مثلاً)، يكون الزخم الخطّي محفوظاً أيضاً، ويمتلك النظام طاقةً حركيةً قبل الانقسام، وبعد الانقسام يزداد مقدار هذه الطاقة عما كان عليه قبل الانقسام.

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

المثال 5

مدفع ساكن كتلته $(2.0 \times 10^3 \text{ kg})$ ، فيه قذيفة كتلتها (50.0 kg) . أطلقت القذيفة أفقياً من المدفع بسرعة $(1.2 \times 10^2 \text{ m/s})$ باتجاه محور $+x$. أحسب ما يأتي:

أ. الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع.

ب. سرعة ارتداد المدفع.

المعطيات: أفترض رمز المدفع A ورمز القذيفة B.

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

$$I_{BA} = ?, v_{Af} = ?$$

المطلوب:

الحل:

أ. الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع (I_{BA}) يساوي في المقدار الدفع الذي يؤثر به المدفع في القذيفة (I_{AB})، ويُعكّسه في الاتجاه. أستخدم مبرهنة (الزخم الخطّي - الدفع) لحساب الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع.

$$I_{BA} = -I_{AB} = -\Delta p_B$$

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

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

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

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

الدفع سالب، حيث يؤثر في المدفع باتجاه محور $-x$.

ب. أطبق قانون حفظ الزخم الخطّي على القذيفة والمدفع قبل إطلاق القذيفة وبعد إطلاقها مباشرةً، مع ملاحظة أن مجموع الزخم الخطّي للقذيفة والمدفع يساوي صفراً قبل إطلاق القذيفة.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

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

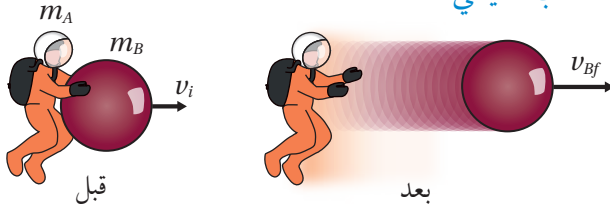
$$v_{Af} = \frac{-6.0 \times 10^3}{2.0 \times 10^3} = -3.0 \text{ m/s}$$

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

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

المثال 6

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



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

أ. سرعة رائد الفضاء بعد قذفه للجسم.

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

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

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

الحل:

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

$$\Sigma p_i = \Sigma p_f$$

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

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

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

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

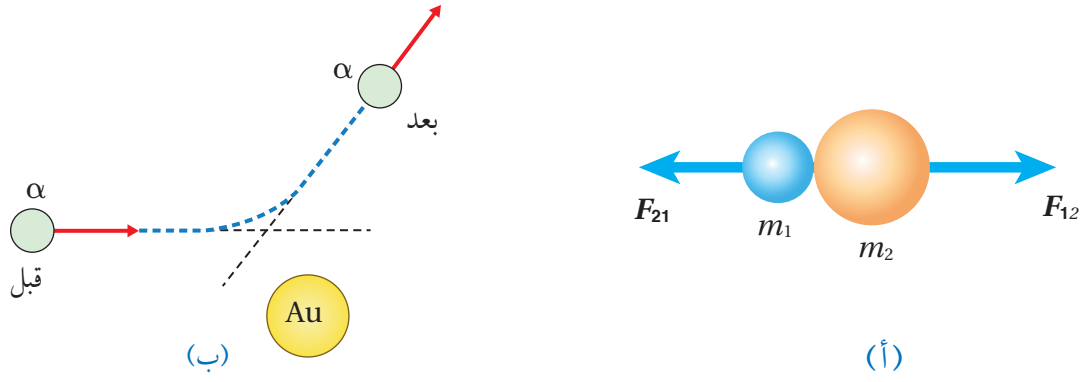
نستنتج من الإشارة السالبة لسرعة رائد الفضاء بعد الانفصال؛ أنه تحرك باتجاه معاكس لحركته قبل الانفصال ($-x$).
ب. التغير في الطاقة الحركية:

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

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

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

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



الشكل (13):

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

الطاقة الحركية والزخم الخطي في التصادمات

Kinetic Energy and Linear Momentum in Collisions

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

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

تختلف طاقة الحركة في التصادمات عن الزخم الخطي؛ إذ أنها ليست محفوظة دائماً، مع أن النظام يكون معزولاً والزخم الخطي الكلي له يكون محفوظاً. عدم حفظ الطاقة الحركية يعني أن جزءاً منها تحول إلى شكل أو أشكال أخرى من الطاقة، مثل الطاقة الحرارية أو الصوتية أو المرونية، وهذا يُحقق مبدأ حفظ الطاقة العام عندما تتحول من شكل إلى آخر. وتأسيساً على حفظ الطاقة الحركية أو عدمه؛ تُصنف التصادمات إلى نوعين رئيسيين، هما:



الشكل (14): تصادم كرات
البلياردو.

التصادم المرن Elastic Collision

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

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$\sum KE_i = \sum KE_f$$

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

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

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

وكتابة معادلة حفظ الطاقة الحركية على الصورة:

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

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

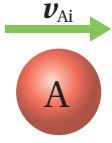
$$v_{Ai} + v_{Af} = v_{Bi} + v_{Bf}$$

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

* اشتقاق العلاقة غير مطلوب

المثال 7

كرتا بلياردو كتلة كل منهما (0.16 kg). تتحرك الكرة (A) باتجاه محور x بسرعة (2 m/s) نحو الكرة (B) الساكنة وتتصادمان رأساً برأس تصادمًا مرئيًا، أنظر الشكل (15). أحسب سرعة الكرة (B) بعد التصادم.



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

المطلوب: $v_{Bf} = ?$

الحل:

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

أطبّق قانون حفظ الزخم الخطّي على نظام الكرتين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$v_{Bf} - v_{Af} = 2 \quad \dots\dots\dots 2$$

بحل المعادلتين (1)، (2) بالحذف:

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

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

نتوصل إلى أن:

$$2v_{Bf} = 4$$

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

أي أنّ الكرة (A) سكنت بعد التصادم، بينما اكتسبت الكرة (B) السرعة الابتدائية للكرة (A). وهذا يحدث إذا كان التصادم مرئيًا، وكان للكرتين الكتلة نفسها.

التصادم غير المرن Inelastic Collision

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

ويوصف التصادم غير المرن بأنه تصادم عديم المرونة Perfectly inelastic collision عندما تلتحم الأجسام المتصادمة معاً بعد التصادم، لتصبح جسماً واحداً تساوي كتلته مجموع كتل الأجسام المتصادمة. ومثال ذلك ما يحدث عند اصطدام كرتي صلصال معاً، أو اصطدام سيارتين وتحركهما معاً بعد التصادم. وأحسب مقدار السرعة النهائية لتصادم عديم المرونة بين جسمين، كما هو موضح في الشكل (17)، بتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي على النظام المكون منهما كما يأتي:

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

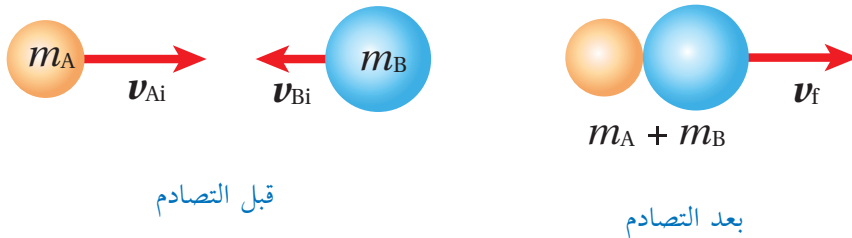
$$v_f = \frac{m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi}}{m_A + m_B}$$

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



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

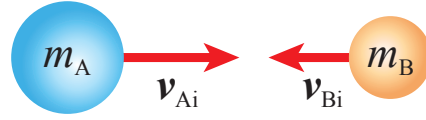
أفكر: عند تصادم جسمين في بُعد واحد تصادمًا عديم المرونة، ما الشرط الضروري لتفقد الطاقة الحركية الابتدائية للنظام جميعها بعد الاصطدام؟



الشكل (17): تصادم عديم المرونة بين جسمين.

المثال 8

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



الشكل (18): تصادم كرتين في بُعد واحد.

- أ. أحسب سرعة الكرة (A) بعد التصادم.
- ب. أحدد نوع التصادم.

المعطيات:

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

المطلوب:

$$v_{Af} = ?$$

الحل:

أ. أطبق قانون حفظ الزخم الخطي على نظام الكرتين.

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

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

بما أن سرعة الكرة (A) بعد التصادم موجبة؛ فهذا يعني أن اتجاه سرعتها باتجاه محور $+x$.
ب. لتحديد نوع التصادم يلزم حساب التغير في الطاقة الحركية للنظام.

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

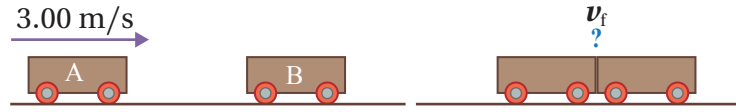
$$\Delta KE = \frac{1}{2} \times [5.0 \times (3.0)^2 + 3.0 \times (2.0)^2] - \frac{1}{2} \times [5.0 \times (6.0)^2 + 3.0 \times (3.0)^2]$$

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

بما أن التغير في الطاقة الحركية للنظام سالب، فهذا يعني حدوث نقص في الطاقة الحركية، والكرتان لم تلتحما بعد التصادم؛ إذن: التصادم غير مرن.

المثال 9

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



الشكل (19): تصادم عربتي قطار.

- أحسب سرعة عربتي القطار بعد التصادم.
- ما نوع التصادم؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادمات؟ أبرر إجابتي.

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

المطلوب: $v_f = ?$

الحل:

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

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

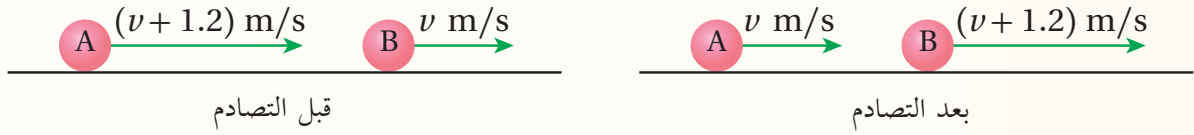
$$\Delta KE = 3.65 \times 10^3 - 8.10 \times 10^3$$

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

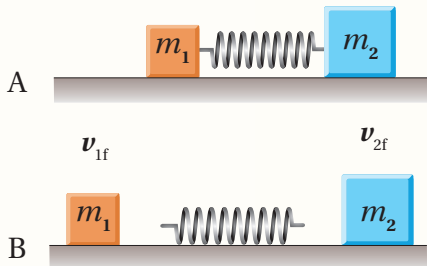
التغير في الطاقة الحركية سالب؛ أي يوجد نقص في الطاقة الحركية، والعربتان التحتما معاً بعد التصادم، لذا؛ فإن التصادم عديم المرونة.

مراجعة الدرس

- الفكرة الرئيسية: ما نوعا التصادم بحسب حفظ الطاقة الحركية؟ وما الفرق بينهما؟
- أفسر:** عندما تصادم سيارتان فإنهما عادة لا تلتحمان معاً؛ فهل يعني ذلك أن تصادمهما مرناً؟ أوضح إجابتي.
- أستنتج:** تصادم جسمان تصادمًا مرناً. أجب عما يأتي:
 - هل يتساوى الزخم الخطي لكل جسم قبل التصادم مع زخمه الخطي بعد التصادم؟ أفسر إجابتي.
 - هل تتساوى الطاقة الحركية لكل جسم قبل التصادم مع طاقته الحركية بعد التصادم؟ أفسر إجابتي.
- أستخدم الأرقام:** كرة صلصال كتلتها (2 kg) تتحرك شرقاً بسرعة ثابتة، وتصطدم بكرة صلصال أخرى ساكنة، فتلتحمان معاً وتتحركان شرقاً بسرعة مقدارها ربع مقدار السرعة الابتدائية للكرة الأولى. أحسب كتلة الكرة الثانية.
- أستنتج:** كرتا بلياردو (A و B) لهما الكتلة نفسها وتتحركان في الاتجاه نفسه في خط مستقيم، كما هو موضح في الشكل. بالاستعانة بالبيانات المثبتة في الشكل، أبين إذا كان التصادم مرناً أم غير مرناً.



- أصدر حكماً:** تتحرك شاحنة غرباً بسرعة ثابتة؛ فتصطدم تصادمًا عديم المرونة مع سيارة صغيرة تتحرك شرقاً بمقدار سرعة الشاحنة نفسه. أجب عما يأتي:
 - أيهما يكون التغير في مقدار زخمها الخطي أكبر؛ الشاحنة أم السيارة؟
 - أيهما يكون التغير في طاقتها الحركية أكبر؛ الشاحنة أم السيارة؟

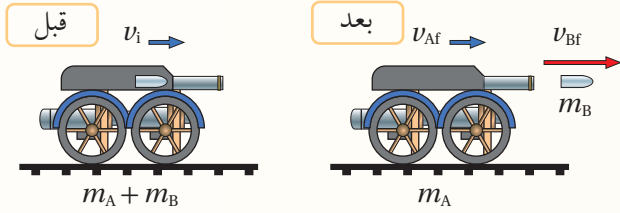


- أستنتج:** وضعت إسلام نابضاً خفيفاً مضغوطاً بين صندوقين كتليتهما m_1 و m_2 موضوعين على سطح أفقي أملس، كما هو مبين في الشكل A. لحظة إفلات إسلام الصندوقين، تحركتا باتجاهين متعاكسين كما في الشكل B. إذا علمت أن $m_2 = 2m_1$ ، فأجد ما يأتي:

- نسبة مقدار سرعة الصندوق الأول إلى مقدار سرعة الصندوق الثاني لحظة ابتعاد كل منهما عن النابض.
- نسبة طاقة الحركة للصندوق الأول إلى طاقة الحركة للصندوق الثاني.

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

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



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

- أ. (3.2) ب. (8.5) ج. (12.8) د. (13)

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

- أ. (0.4) غرباً. ب. (0.4) شرقاً. ج. (4.4) غرباً. د. (4.4) شرقاً.

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

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

- أ. (2.5) شرقاً. ب. (7.5) شرقاً. ج. (2.5) غرباً. د. (7.5) غرباً.

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

- أ. (2.5). ب. (5). ج. (7.5). د. (10).

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

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

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

- ج. (v) باتجاه (+x). د. (v) باتجاه (-x).

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

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

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

1. كلما زاد زمن تأثير قوة (F) في جسم كتلته (m):

- أ. زاد الدفع المؤثر فيه، وزاد التغير في زخمه الخطي. ب. زاد الدفع المؤثر فيه، ونقص التغير في زخمه الخطي.
ج. نقص الدفع المؤثر فيه، وزاد التغير في زخمه الخطي. د. نقص كل من: الدفع المؤثر فيه، والتغير في زخمه الخطي.

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

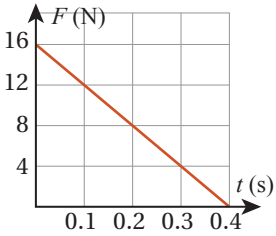


- أ. إنقاص معدل تغير الزخم الخطي. ب. إنقاص التغير في الزخم الخطي.
ج. زيادة معدل تغير الزخم الخطي. د. زيادة التغير في الزخم الخطي.

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

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

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



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

5. صندوقان (A و B) يستقران على سطح أفقي أملس. أثرت في كل منهما القوة المحصلة نفسها باتجاه محور x للفترة الزمنية (Δt) نفسها. إذا علمت أن كتلة الصندوق (m_A) أكبر من كتلة الصندوق (m_B)؛ فأني العلاقات الآتية صحيحة في نهاية الفترة الزمنية؟

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

6. رُميت كرة كتلتها m أفقياً بسرعة مقدارها v نحو جدار؛ فارتدت أفقياً بمقدار السرعة نفسه. بإهمال تأثير الجاذبية فإن مقدار التغير في الزخم الخطي للكرة يساوي:

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

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

- أ. (350) شرقاً. ب. (350) غرباً. ج. (375) شرقاً. د. (375) غرباً.

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

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

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

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

أ. (-0.7) ب. (0.7) ج. (1.6) د. (-1.6)

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

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

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

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

12. تقفز شذى من قاربٍ ساكنٍ على سطح الماء كتلته (300 kg) إلى الشاطئ بسرعة أفقية مقدارها (3 m/s). إذا علمت أن كتلة شذى (50 kg) فما سرعة القارب؟

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

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

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

13. ما سرعة الشاحنة قبل التصادم مباشرة؟

أ. (5 m/s) شرقاً. ب. (4 m/s) شرقاً. ج. (5 m/s) غرباً. د. (4 m/s) غرباً.

14. ما الزخم الخطي الكلي للنظام المكوّن من الشاحنة والسيارة قبل التصادم؟

أ. $(-10 \times 10^3 \text{ kg.m/s})$. ب. $(10 \times 10^3 \text{ kg.m/s})$.

ج. $(-30 \times 10^4 \text{ kg.m/s})$. د. $(30 \times 10^4 \text{ kg.m/s})$.

15. ما التغير في الطاقة الحركية للنظام نتيجة التصادم؟

أ. $(90 \times 10^3 \text{ J})$. ب. $(-90 \times 10^3 \text{ J})$. ج. $(40 \times 10^3 \text{ J})$. د. $(-40 \times 10^3 \text{ J})$.

2. أفسر ما يأتي:

أ. تقف نرجس على زلاجةٍ ساكنةٍ موضوعةٍ على أرضيةٍ غرفةٍ ملساء وهي تحمل حقيبتها. وعندما قذفت حقيبتها إلى الأمام تحركت هي والزلاجة معاً إلى الخلف.

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

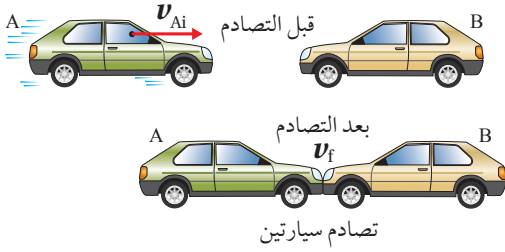
مراجعة الوحدة

3. يقف صيَّاد على سطح قاربٍ صيِّد ساكن على سطح الماء، ثم يتحرك من نهاية القارب نحو مقدمته. أجب عما يأتي:
 أ. **أفسر:** هل يتحرك القارب أم لا؟ أفسر إجابتي.
 ب. **أقارن** بين مجموع الزخم الخطي للقارب والصيَّاد قبل بدء حركة الصيَّاد وبعد حركته.

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

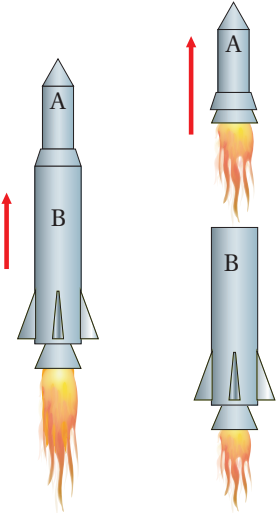
5. **أصدر حكماً:** في أثناء دراسة غيثٍ لهذا الدرس، قال: «إنَّ وسائل الحماية في السيارات قديماً أفضل منها في السيارات الحالية؛ إذ إنَّ هياكل السيارات الحديثة مرنةٌ تشوّه بسهولة عند تعرّض السيارة لحادث، على عكس هياكل السيارات القديمة الصلبة». أناقش صحّة قول غيث.

6. **أستخدم الأرقام:** تتحرّك سيارةٌ كتلتها $(1.35 \times 10^3 \text{ kg})$ بسرعة (15 m/s) شرقاً، فتصطدم بجدارٍ وتتوقف تماماً خلال فترة زمنية (0.115 s) ، فأحسب ما يأتي:
 أ. التغيّر في الزخم الخطي للسيارة.
 ب. القوة المتوسطة التي يؤثر بها الجدار في السيارة.

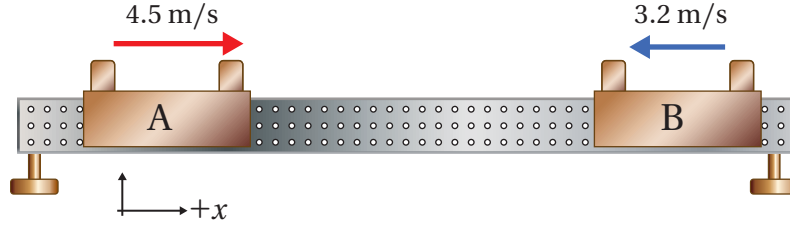


7. **أستخدم الأرقام:** السيارة (A) كتلتها $(1.1 \times 10^3 \text{ kg})$ تتحرّك بسرعة (6.4 m/s) باتجاه محور $+x$ ، فتصطدم رأساً برأس سيارةٍ ساكنةٍ (B) كتلتها $(1.2 \times 10^3 \text{ kg})$ ؛ وتلتحم السيارتان معاً بعد التصادم وتتحركان على المسار المستقيم نفسه قبل التصادم، كما هو موضح في الشكل المجاور. أحسب ما يأتي:
 أ. سرعة السيارتين بعد التصادم.
 ب. الدفع الذي تؤثر به السيارة (B) في السيارة (A).

8. **أستخدم الأرقام:** أثّرت قوّة محصلة مقدارها $(1 \times 10^3 \text{ N})$ في جسم ساكن كتلته (10 kg) وحركته باتجاهها مدّة زمنية (0.01 s) . أحسب مقدار ما يأتي:
 أ. التغيّر في الزخم الخطي للجسم.
 ب. السرعة النهائية للجسم.



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



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

- أحسب كتلة العربة (B).
- أستخدم القانون الثالث لنيوتن في الحركة لتوضيح سبب أن يكون الزخم الخطي محفوظاً في هذا التصادم.
- أوضح هل التصادم مرناً أم غير مرناً؟

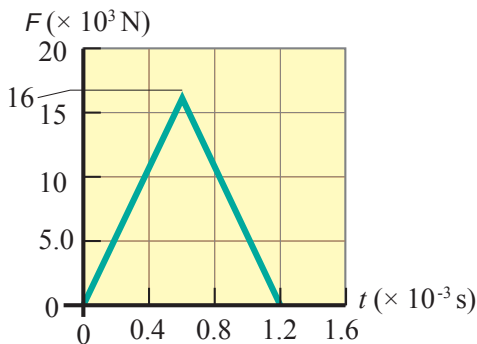
11. **أستخدم الأرقام:** أطلقت مريم سهمًا كتلته (0.20 kg) أفقيًا بسرعة (15 m/s) باتجاه الغرب نحو هدف ساكن كتلته (5.8 kg)، فاصطدم به واستقر فيه وتحركا كجسم واحد نحو الغرب. أحسب ما يأتي:

- سرعة النظام (السهم والهدف) بعد التصادم.
- التغير في الطاقة الحركية للنظام.

12. **أستخدم الأرقام:** تتحرك كرة زجاجية كتلتها (1.0 kg) باتجاه الغرب بسرعة (0.5 m/s)، فتصطدم رأساً برأس بكرة زجاجية أخرى كتلتها (2.0 kg) تتحرك بسرعة (0.4 m/s) شرقًا. بعد التصادم ارتدت الكرة الأولى شرقًا بسرعة (0.7 m/s). أجيب عما يأتي:

- أحسب سرعة الكرة الثانية بعد التصادم.
- أحدد نوع التصادم.

13. **أستنتج:** يوضح الشكل المجاور منحنى (القوة - الزمن) للقوة المحصلة المؤثرة في كرة بيسبول كتلتها (145 g) في أثناء زمن تلامسها مع المضرب. مستعينا بالمنحنى أحسب ما يأتي، بإهمال وزن الكرة:



- الدفع المؤثر في الكرة نتيجة تلامسها مع المضرب.
- السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة فيها، باعتبارها ساكنة لحظة بدء تأثير القوة المحصلة.
- القوة المتوسطة المؤثرة في الكرة أثناء زمن تلامسها مع المضرب.