

# الزخم الخطي والتصادمات

مادة الفيزياء للصف الثاني عشر  
( العلمي و الصناعي )

إعداد :

الأستاذ : محمد الدرابيع  
0787277434

الأستاذ : محمود الحوامدة  
0799216940

الكون  
في الفيزياء

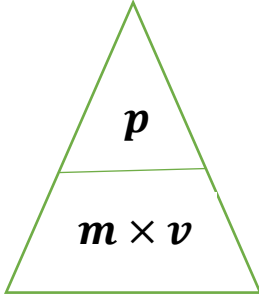
الزخم الخطي والدفع

الزخم الخطي

- عند تحرك جسمان **متماثلان** في كتلتهم ولكن بسرعات **مختلفة** مقداراً , فأى جسم يتم إيقافه بصورة أسهل ؟
- \* يتم إيقاف الجسم الذي يمتلك سرعة أقل بصورة أسهل من الجسم الذي يمتلك سرعة أكبر.
- عند تحريك جسمان **مختلفان** في الكتلة ويمتلكان سرعة **متشابهة** , فأى جسم يتم إيقافه بصورة سهلة ؟
- \* الجسم الذي يمتلك كتلة أقل يتم إيقافه بصورة أسهل من الجسم الذي يمتلك كتلة أكبر.

- الآن سوف ندرس كمية فيزيائية جديدة تخص الكتلة والسرعة للأجسام.

الزخم الخطي : يعرف بأنه ناتج ضرب كتلة الجسم (  $m$  ) في سرعته المتجهة (  $v$  ) نرسم له بالرمز (  $p$  ) , وهو كمية متجهة ويقاس بوحدة (  $Kg \cdot m/s$  ) .



- ما اتجاه الزخم الخطي للجسم الذي يمتلك سرعة ؟

\* يكون اتجاه الزخم الخطي باتجاه سرعة الجسم .

- أعبّر عن الزخم الخطي بالمعادلة الآتية :

$$p = mv$$

حيث :

$m$  : كتلة الجسم و وحدته (  $Kg$  ) .

$v$  : سرعة الجسم و وحدته (  $m/s$  ) .

$p$  : الزخم الخطي للجسم و وحدته (  $Kg \cdot m/s$  )

- على ماذا يعتمد الزخم الخطي للجسم ؟

(1) كتلة الجسم ( علاقة طردية )

(2) سرعة الجسم ( علاقة طردية )

- ماذا نعني بقولنا إن الزخم الخطي لجسم ما يساوي (  $5 kg \cdot m/s$  ) ؟  
\* هذا يعني ان جسماً كتلته (  $5kg$  ) يتحرك بسرعة (  $1m/s$  ) تحت تأثير قوة خارجية.

ملاحظة : إن الزخم الخطي يتغير بتغير السرعة والكتلة او كليهما معا .

- يعد الزخم الخطي مقياس **لممانعة** الجسم لتغيير حالته الحركية.

- عند **زيادة** الزخم الخطي للجسم يؤدي ذلك الى قوة أكبر لتأثر بها على الجسم لتغير من حالته الحركية.

- نلاحظ ان عند تغير الحالة الحركية للجسمان كان التغير في الحالة الحركية للجسم الذي يمتلك زخم خطي أكبر (سبب اختلاف الكتلة و السرعة ) يحتاج لقوة أكبر .

- **الزخم الخطي والقانون الثاني لنيوتن في الحركة :**

- لاحظنا اننا نحتاج لقوة لتغيير من قيمة الزخم الخطي مقداراً واتجهاً أو كليهما , لذلك تم صياغة قانون نيوتن الثاني بالربط بين الزخم الخطي للجسم والقوة المحصلة المؤثرة في ذلك الجسم .

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

حيث  $\sum F$  هي القوة المحصلة المؤثرة في الجسم. وعند ثبات كتلة الجسم نستطيع إعادة كتابة القانون الثاني لنيوتن بدلالة الزخم كما يأتي:

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

ويمكن التعبير عن القانون الثاني لنيوتن عند تغير الزخم الخطي  $\Delta p$  خلال الفترة الزمنية  $\Delta t$  كالآتي:

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv_f - mv_i}{t_f - t_i} = \frac{m(\Delta v)}{\Delta t} = ma$$

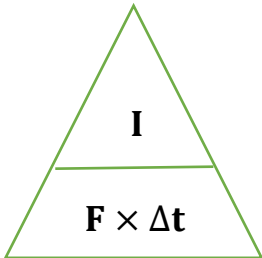
- نص قانون نيوتن الثاني في الحركة :

المعدل الزمني لتغير الزخم الخطي لجسم يساوي القوة المحصلة المؤثرة فيه. ويكون متجه التغير في الزخم الخطي باتجاه القوة المحصلة دائماً.

### العلاقة بين الزخم الخطي والدفع

- الدفع : هو ناتج ضرب القوة المحصلة المؤثرة في الجسم في زمن تأثيرها على الجسم .

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



I : الدفع المؤثر في الجسم ووحدته ( N.s ) .

$\sum F$  : محصلة القوة المؤثرة في الجسم ووحدته ( N ) .

$\Delta t$  : زمن تأثير القوة على الجسم ووحدته ( s ) .

- مبرهنة الزخم الخطي والدفع :

من قانون نيوتن الثاني :

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

نحصل على :

$$\Delta p = \sum F \Delta t$$

إذا يمكننا التعبير على أن الدفع  $\Delta I$  يساوي  $\Delta p$  .

$$I = \Delta p$$

- تنص هذه المبرهنة على أن :

"دفع قوة محصلة مؤثرة في جسم يساوي التغير في زخمه الخطي".

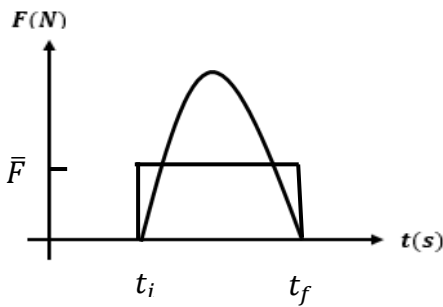
- الدفع كمية متجهة , يكون باتجاه تغير الزخم الخطي , هو اتجاه القوة المحصلة نفسه.

- **انتبه** : الزخم الخطي والدفع والقوة كميات متجهة لذلك الإشارات الموجبة والسالبة ضرورية لتحديد اتجاهاتها , لذا يلزم اختيار نظام احداثيات يحدد فيه الاتجاه الموجب.

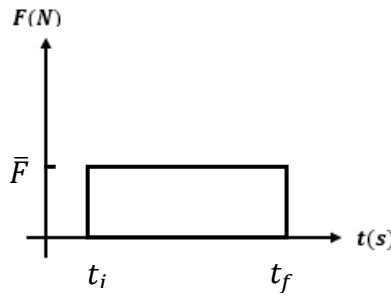
- **الزخم الخطي والرسم البياني ( منحنى القوة - الزمن ) :**

- إن التغير في الزخم الخطي يساوي الدفع , وأن الدفع هو حاصل ناتج ضرب القوة المحصلة المؤثرة في الجسم في زمن تأثير القوة على الجسم . أي أن الزخم الخطي يتغير بين القوة المؤثرة على الجسم وزمن تأثير القوة على الجسم .

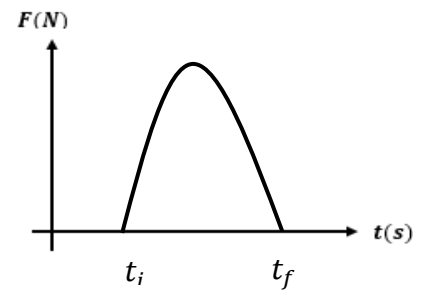
- منحنى ( القوة - الزمن ) :



متوسط قوة الدفع



الدفع الناتج عن قوة  
ثابتة مقدارا



الدفع الناتج عن قوة  
متغيرة مقدارا

- **الحالة الأولى** : عندما تكون القوة متغيرة :

في الشكل نلاحظ أن القوة التي أثرت على الجسم خلال فترة الزمن متغيرة بحيث كانت قيمة صغرى عند  $(t_i)$  ثم ارتفعت إلى قيمة عظمى وبعدها انخفضت إلى الصفر عند نهاية الفترة الزمنية  $(t_f)$ .

- **الحالة الثانية** : عندما تكون القوة ثابتة :

في الشكل نلاحظ أن القوة ثابتة خلال الفترة الزمنية التي أثرت بها على الجسم ولذلك تم تمثيل منحنى القوة بخط مستقيم يوازي محور الزمن وارتفاعه يعبر عن قيمة القوة .

\* المساحة تحت المنحنى في كلتا الحالتين يعطي قيمة الدفع .

- **متوسط قوة الدفع** :

من منحنى القوة - الزمن يمكننا في حالة القوة المتغيرة مع الزمن أن نعرف كمية فيزيائية جديدة هي ( القوة المتوسطة ) .

- القوة المتوسطة : هي القوة المحصلة الثابتة التي إذا أثرت في الجسم لفترة زمنية  $(\Delta t)$  لأحدثت الدفع نفسه الذي تحدثه القوة المتغيرة أثناء الفترة الزمنية نفسها.

- ويوضح الشكل قوة متغيرة تؤثر على جسم خلال فترة زمنية  $(\Delta t)$  تعادل القوة الثابتة المنتظمة التي تؤثر على الجسم خلال نفس الفترة الزمنية.

\* المساحة تحت المنحنى الذي يمثل القوة المتغيرة يساوي المساحة تحت المنحنى الذي يمثل القوة الثابتة .

- **نستنج** من منحنى ( القوة - الزمن ) :

1- عند ثبات مقدار القوة المحصلة المؤثرة , يزداد مقدار التغير في الزخم الخطي بزيادة زمن تأثير هذه القوة.

2- عند ثبات مقدار التغير في الزخم الخطي , يتناسب مقدار القوة المحصلة المؤثرة عكسيا مع زمن تأثيرها.

شيفرة الإشارات

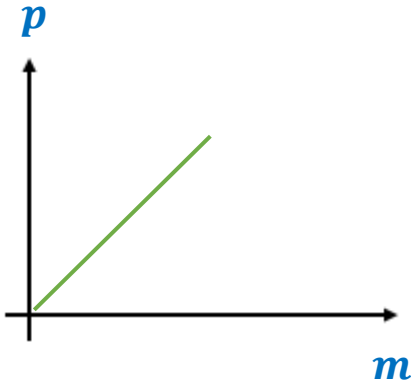
1- إذا كان اتجاه القوة المؤثرة نحو  $( +x )$  أو  $( +y )$  نعوض الإشارة الموجبة في قانون الدفع .

2- إذا كان اتجاه القوة المؤثرة نحو  $( -x )$  أو  $( -y )$  نعوض الإشارة السالبة في قانون الدفع .

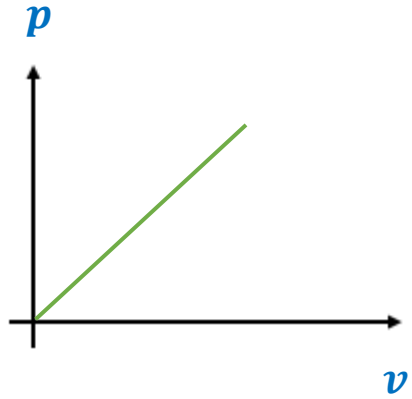


- الزخم والسرعة والكتلة - الرسم البياني - :

- لاحظنا أن العلاقة بين الزخم الخطي والكتلة والسرعة علاقة طردية خطية ويمكننا تمثيل العلاقة بيانيا كالآتي:



$$\text{slope} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta p}{\Delta m} = v$$



$$\text{slope} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta p}{\Delta v} = m$$

ملاحظات مهمة لحل المسائل البيانية :

- 1- تفقد المحاور وعلى ماذا يدل كل محور .
- 2- التأكد من وحدات قياس المحاور وإذا احتاجت لتحويل نقوم بتحويلها حسب النظام العالمي للوحدات .
- 3- استخراج الميل وعلى ماذا يدل الميل .

ب) الدفع المؤثر في الصندوق :

$$I = \Delta p$$

$$I = p_f - p_i$$

$$I = mv_f - mv_i$$

$$I = (100 \times 0) - 2 \times 10^3$$

$$I = 0 - 2 \times 10^3 = -2 \times 10^3 (kg. m/s)$$

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

- الدفع سالب , حيث يؤثر في اتجاه الغرب ( -x )  
لأنه يؤثر في الصندوق بعكس اتجاه السرعة الابتدائية.

ج) قوة الاحتكاك المتوسطة اللازم تأثيرها في الصندوق  
لمنعه من الإنزلاق :

- أستخدم القانون الثاني لنيوتن لحساب قوة الاحتكاك  
اللازم تأثيرها في الصندوق لمنعه من الانزلاق , وهي  
نفسها القوة المتوسطة المؤثرة فيه خلال فترة توقف  
الشاحنة.

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

$$\bar{f}_s = \frac{-2 \times 10^3}{5} = -4 \times 10^2 N$$

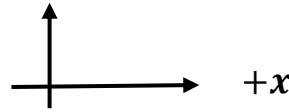
$$\bar{f}_s = 4 \times 10^2 N, -x$$

- تؤثر قوة الاحتكاك في الاتجاه المعاكس لاتجاه سرعة  
الصندوق : لذا يكون اتجاهها نحو ال ( -x ) غربا.

الأمثلة

مثال (1)

- وضع صندوق كتلته ( 100 kg ) في شاحنة تتحرك  
شرقاً بسرعة مقدارها ( 20 m/s ) , إذا ضغط السائق  
على دواسة المكابح , فتوقفت الشاحنة خلال ( 5 s )  
من لحظة الضغط على المكابح ,  
فأحسب مقدار ما يأتي :  
أ) الزخم الابتدائي للصندوق .  
ب) الدفع المؤثر في الصندوق .  
ج) قوة الاحتكاك المتوسطة اللازم تأثيرها في الصندوق  
لمنعه من الإنزلاق.



المعطيات :

$$, v_i = 20 m/s, +x \quad , v_f = 0 m = 100kg$$

$$, \Delta t = 5 s$$

- أختار نظام إحداثيات يكون فيه الإتجاه الموجب  
باتجاه حركة الشاحنة , وهو اتجاه ( +x ) .

أ) الزخم الخطي الابتدائي لصندوق :

$$p_i = mv_i = 100 \times 20 = 2000 (kg. m/s)$$

$$p_i = 2 \times 10^3 (kg. m/s) , +x$$

- الزخم الخطي الابتدائي موجب , فيكون باتجاه محور  
( +x ) .

مثال (2)

ج) الدفع المؤثر في الكرة خلال زمن تلامسها مع قدم اللاعب :

$$I = \Delta p = p_f - p_i = 13.5 - 0$$

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

-الدفع موجب ; حيث يؤثر في اتجاه  $+x$  ; لأنه يؤثر في الكرة باتجاه القوة المحصلة المؤثرة فيها من قدم اللاعب .

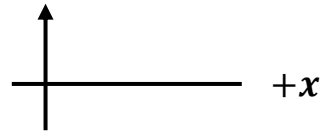
OR

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

$$I = 135 \times 0.10 = 13.5 \text{ N.s}, +x$$

- يركل لاعب كرة قدم ساكنة كتلتها ( 0.450 kg ) ; فتنتقل بسرعة ( 30 m/s ) في اتجاه محور  $+x$  . إذا علمت أن القوة المتوسطة المؤثرة في الكرة خلال زمن تلامسها مع قدم اللاعب تساوي ( 135 N ) ; فأحسب مقدار ما يأتي بإهمال وزن الكرة مقارنة بالقوة المؤثرة فيها :

أ) زخم الكرة عند لحظة ابتعادها عن قدم اللاعب .  
ب) زمن تلامس الكرة مع قدم اللاعب .  
ج) الدفع المؤثر في الكرة خلال زمن تلامسها مع قدم اللاعب .



المعطيات :

$$m = 0.450 \text{ kg}, v_i = 0, v_f = 30 \text{ m/s}, +x$$

$$\sum F = 135 \text{ N}, +x$$

- أختار نظام إحداثيات يكون فيه الإتجاه الموجب باتجاه المحور, وهو اتجاه  $(+x)$  .

أ) زخم الكرة عند لحظة ابتعادها عن قدم اللاعب :

$$p_f = mv_f = 0.450 \times 30$$

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

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

ب) زمن تلامس الكرة مع قدم اللاعب :

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

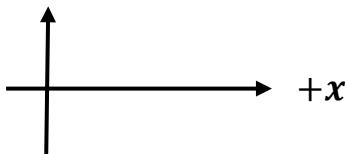
$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\sum F} = \frac{p_f - p_i}{135} = \frac{13.5 - 0}{135} = 0.1 \text{ s}$$

مثال (3)

- كرة تنس كتلتها ( 0.06 kg ) ; يقذفها لاعب إل أعلى , وعند وصولها إلى قمة مسارها الرأسي يضربها أفقياً بالمضرب فتنتقل بسرعة مقدارها ( 55 m/s ) في اتجاه محور  $+x$  . إذا علمت أن زمن تلامس الكرة مع المضرب (  $4 \times 10^{-3} \text{ s}$  ) ; أحسب مقدار ما يلي :

أ) الدفع الذي يؤثر به المضرب في الكرة .

ب) القوة المتوسطة التي أثر بها المضرب على الكرة.



- أختار نظام إحداثيات يكون فيه الإتجاه الموجب باتجاه المحور, وهو اتجاه  $(+x)$  .

المعطيات :

$$m = 6 \times 10^{-2} \text{ kg}, v_i = 0, v_f = \frac{55 \text{ m}}{\text{s}}, +x$$

$$\Delta t = 4 \times 10^{-3} \text{ s}$$

أ) الدفع الذي يؤثر به المضرب في الكرة :

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

$$I = 6 \times 10^{-2} \times 55 - 0$$

$$I = 33 \times 10^{-1} \text{ kg.m/s}, +x$$



(أ) التغير في الزخم الخطي للسيارة :

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_f - p_i \\ \Delta p &= mv_f - mv_i \\ \Delta p &= 0 - 1.35 \times 10^3 \times 15 \\ \Delta p &= -20.25 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \Delta p &= 20.25 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}, -x\end{aligned}$$

(ب) القوة المتوسطة التي يؤثر به الجدار في السيارة:

$$\begin{aligned}\sum F &= \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{20.25 \times 10^3}{115 \times 10^{-3}} \\ \sum F &= 0.176 \times 10^6 \text{ N}, -x\end{aligned}$$

(ب) القوة المتوسطة التي أثر بها المضرب على الكرة :

$$\begin{aligned}\sum F &= \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_f - p_i}{\Delta t} = \frac{33 \times 10^{-1}}{4 \times 10^{-3}} \\ \sum F &= 8.25 \times 10^2 \text{ N}, +x\end{aligned}$$

مثال ( 5 )

- إذا علمت أن الزخم الخطي لسيارة كتلتها ( m ) يساوي ( p ) وأن الزخم الخطي لشاحنة كتلتها ( 4m ) يساوي ( p ) ; فما مقدار السرعة التي تتحرك بها السيارة بالنسبة لسرعة الشاحنة ؟

$$\begin{aligned}p_T &= 4m_T v_T \\ p_C &= m_C v_C \\ p_C &= p_T \\ m_C v_C &= 4m_T v_T \\ v_C &= 4v_T\end{aligned}$$

مثال ( 7 )

- أثرت قوة محصلة مقدارها (  $1 \times 10^3 \text{ N}$  ) في جسم ساكن كتلته ( 10 kg ) وحركته باتجاهها فترة زمنية مقدارها ( 0.01 s ) . أحسب مقدار ما يأتي :  
(أ) التغير في الزخم الخطي للجسم .  
(ب) السرعة النهائية للجسم .



المعطيات :

$$\sum F = 1 \times 10^3 \text{ N}, +x, m = 10 \text{ kg}, v_i = 0 \\ \Delta t = 0.01 \text{ s}$$

(أ) التغير في الزخم الخطي للجسم :

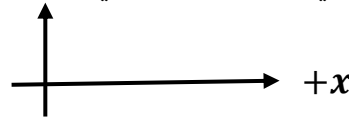
$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad \Delta p = \sum F \Delta t$$

$$\Delta p = 1 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-2}$$

$$\Delta p = 10 \text{ N} \cdot \text{s}, +x$$

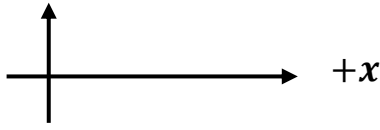
مثال ( 6 )

- تتحرك سيارة كتلتها (  $1.35 \times 10^3 \text{ kg}$  ) , بسرعة مقدارها ( 15 m/s ) شرقاً , فتصطدم بجدار وتوقف تماماً بعد التصادم . إذا علمت أن زمن التلامس بين السيارة والجدار ( 0.115 s ) , فأحسب مقدار ما يلي :  
(أ) التغير في الزخم الخطي للسيارة .  
(ب) القوة المتوسطة التي يؤثر به الجدار في السيارة.



المعطيات :

$$m = 1.35 \times 10^3 \text{ kg}, v_i = 15 \text{ m/s}, +x, v_f = 0 \\ \Delta t = 0.115 \text{ s}$$



المعطيات :

$$m = 3\text{kg}, v_i = 0, \Delta t = 10\text{s}$$

(أ) الدفع المؤثر في الصندوق خلال الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة , وأحدد اتجاهها :

- الدفع المؤثر في الصندوق يساوي المساحة المحصورة بين منحنى ( القوة - الزمن ) ومحور الزمن ويساوي مجموع مساحات ( A-B-C ) :  
مساحة المثلث = الارتفاع  $\times$  القاعدة  $\times \frac{1}{2}$   
مساحة المستطيل = الطول  $\times$  العرض

$$I = A + B + C$$

$$I = \left(\frac{1}{2} \times 4 \times 4\right) + (4 \times 2) + \left(\frac{1}{2} \times 4 \times 4\right)$$

$$I = 24\text{kg} \cdot \text{m/s}, +x$$

(ب) السرعة النهائية للصندوق في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة , وأحدد اتجاهها :

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

$$24 = mv_f - 0$$

$$v_f = \frac{24}{3} = 8\text{ m/s}, +x$$

(ج) القوة المتوسطة المؤثرة في الصندوق خلال هذه الفترة الزمنية :

$$\sum F = \bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{24}{10} = 2.4\text{N}, +x$$

(ب) السرعة النهائية للجسم :

$$\Delta p = p_f - p_i$$

$$\Delta p = mv_f - mv_i$$

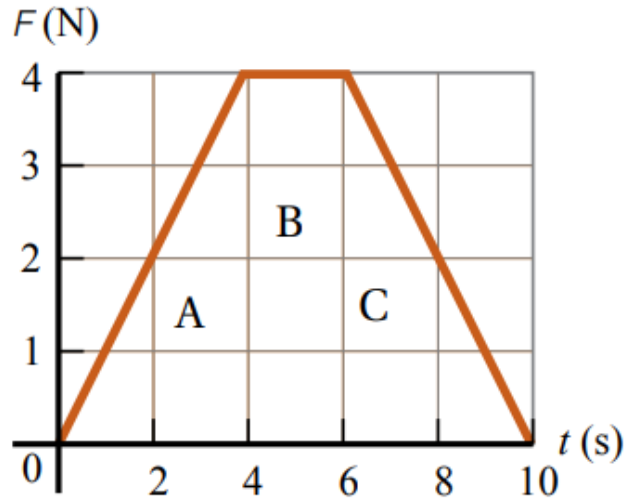
$$\Delta p = 10 \times v_f - 0$$

$$10 = 10v_f$$

$$v_f = 1\text{ m/s}, +x$$

مثال ( 8 )

- تؤثر قوة محصلة باتجاه  $+x$  , في صندوق ساكن كتلته ( 3 kg ) مدة زمنية مقدارها ( 10 s ) , إذا علمت أن مقدار القوة المحصلة يتغير بالنسبة للزمن كما هو موضح في منحنى ( القوة - الزمن ) ; فأحسب مقدار ما يأتي :



(أ) الدفع المؤثر في الصندوق خلال الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة , وأحدد اتجاهها.

(ب) السرعة النهائية للصندوق في نهاية الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة , وأحدد اتجاهها .

(ج) القوة المتوسطة المؤثرة في الصندوق خلال هذه الفترة الزمنية .

مثال ( 9 )

(أ) ما الذي يمثله الرقم ( 18 ) على محور القوة ؟  
أكبر قوة تتأثر بها كرة البيسبول أثناء ملامستها  
للمضرب.

(ب) مقدار الدفع المؤثر في الكرة خلال زمن تلامسها  
مع المضرب :

$I =$  مساحة المثلث

$$I = \frac{1}{2} \times 1.5 \times 18 = 13.5 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}, +x$$

(ج) مقدار السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة الزمنية  
لتأثير القوة المحصلة فيها باعتبارها ساكنة لحظة تأثير  
القوة المحصلة :

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

$$I = 0.145 \times v_f - 0$$

$$13.5 = 0.145 \times v_f$$

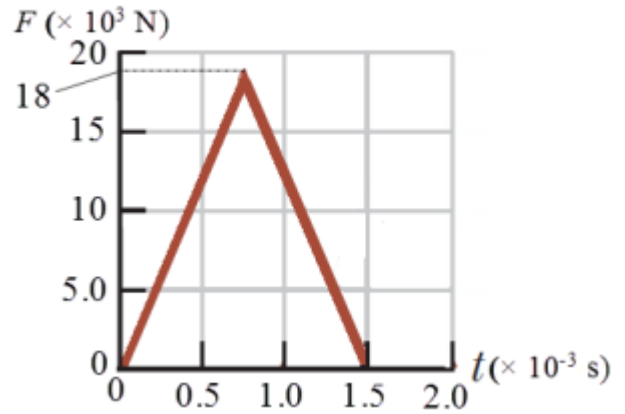
$$v_f = \frac{13.5}{0.145} = 93 \frac{\text{m}}{\text{s}}, +x$$

(د) مقدار القوة المتوسطة المؤثرة في الكرة خلال زمن  
تلامسها مع المضرب :

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

$$= \frac{13.5}{1.5 \times 10^{-3}} = 9 \times 10^3 \text{ N}, +x$$

- يوضح الشكل المجاور منحنى ( القوة - الزمن ) للقوة  
المحصلة المؤثرة في كرة بيسبول كتلتها ( 145 g ) في  
أثناء زمن تلامسها مع المضرب . أستعين بهذا المنحنى  
والبيانات المثبتة فيه للإجابة عما يأتي بإهمال وزن  
الكرة :

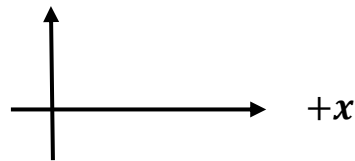


(أ) ما الذي يمثله الرقم ( 18 ) على محور القوة ؟

(ب) أحسب مقدار الدفع المؤثر في الكرة خلال زمن  
تلامسها مع المضرب .

(ج) أحسب مقدار السرعة النهائية للكرة في نهاية الفترة  
الزمنية لتأثير القوة المحصلة فيها باعتبارها ساكنة  
لحظة تأثير القوة المحصلة .

(د) احسب مقدار القوة المتوسطة المؤثرة في الكرة  
خلال زمن تلامسها مع المضرب .

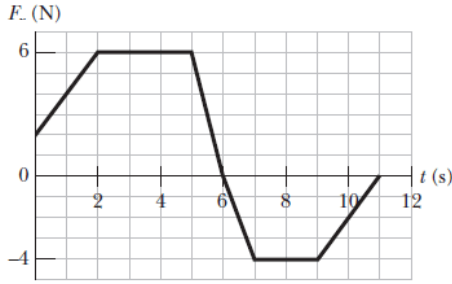


المعطيات :

$$m = 145 \text{ g} = 145 \times 10^{-3} \text{ kg}, v_i = 0 ,$$

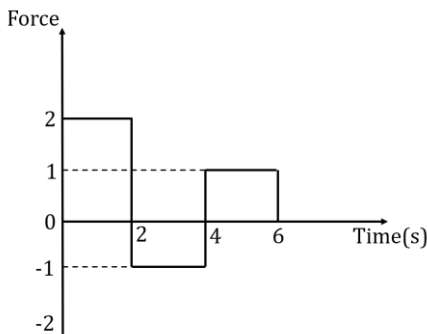
$$\Delta t = 1.5 \times 10^{-3}$$

مثال ( 10 )



- يوضح الشكل المجاور منحنى ( القوة - الزمن ) للقوة المحصلة المؤثرة على جسم كتلته ( 2kg ) خلال مدة زمنية مقدارها ( 11s ) ،  
جد ما يلي :  
أ- مقدار الدفع المؤثر في الجسم خلال الفترة الزمنية ( 0s,6s ) ؟  
ب- مقدار الدفع المؤثر في الجسم خلال الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة وحدد اتجاهها ؟  
ج- القوة المتوسطة المؤثرة في الجسم خلال الفترة الزمنية لتأثير القوة المحصلة ؟

مثال ( 11 )



- يوضح الشكل المجاور العلاقة بين القوة وزمن تأثيرها على جسم كتلته ( 6kg ) خلال الفترة الزمنية ( 6 s ) .  
جد ما يلي :  
الدفع المؤثر في الجسم خلال الفترة الزمنية ( 6 s ) ؟

أختبر نفسك

- أثبت أن وحدة الزخم الخطي  $(J \cdot s/m)$  ؟

- جسمان لهما نفس الزخم الخطي , إذا كانت كتلة الجسم الأول تساوي ضعفين كتلة الجسم الثاني فما النسبة بين مقدار الزخم الخطي للجسم الأول والثاني ؟

- كرة كتلتها  $(3kg)$  تسقط من السكون من ارتفاع  $(5m)$  عن سطح الأرض , احسب زخم الكرة عند وصولها سطح الأرض :

- سيارة كتلتها ( 4kg ) تسير على سطح أفقي خشن إذا أثرت في السيارة قوة شد أفقية مقدارها ( 13N ) نحو الشرق لتحركه من السكون مدة ( 6s ) , فاحسب مقدار الدفع الكلي للجسم , ( علما أن مقدار قوة الاحتكاك بين السطح والسيارة ( 1N ) :

- جسمان يتحركان في خط مستقيم كتلة الجسم ( A ) تساوي ضعفين كتلة الجسم ( B ) وسرعة الجسم ( A ) تساوي نصف سرعة الجسم ( B ) , جد نسبة الزخم الخطي للجسم ( A ) والزخم الخطي للجسم ( B ) .

- أثبت أن المعدل الزمني لتغير الزخم الخطي يساوي القوة المحصلة المؤثرة فيه :

مثال ( 11 )

- ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة :

1) وحدة قياس الزخم الخطي حسب النظام الدولي للوحدات , هي :

- أ)  $N.m/s$       ب)  $kg.m^2/s$       ج)  $N/s$       د)  $kg.m/s$   
الجواب : ( د )

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

- أ) زاد مقدار الدفع المؤثر فيه , وزاد مقدار التغير في زخمه الخطي.  
ب) زاد مقدار الدفع المؤثر فيه , نقص مقدار التغير في زخمه الخطي.  
ج) نقص مقدار الدفع المؤثر فيه , زاد مقدار التغير في زخمه الخطي.  
د) نقص مقدار كل من : الدفع المؤثر فيه , والتغير في زخمه الخطي.  
الجواب : ( أ )

3) يعتمد الزخم الخطي لجسم على :

- أ) كتلته فقط.      ب) سرعته المتجهة فقط.      ج) كتلته وسرعته المتجهة.      د) وزنه وتسارع السقوط الحر  
الجواب : ( ج )

4) يتحرك جسم كتلته ( 10 kg ) أفقياً بسرعة ثابتة ( 5 m/s ) شرقاً . إن مقدار الزخم الخطي لهذا الجسم واتجاهه هو :

- أ)  $0.5 kg.m/s$  شرقاً.      ب)  $50 kg.m/s$  غرباً.      ج)  $2 kg.m/s$  شرقاً.      د)  $50 kg.m/s$  شرقاً.  
الجواب : ( د )

5) تتحرك سيارة شمالاً بسرعة ثابتة ; بحيث كان زخمها الخطي (  $9 \times 10^4 N.s$  ). إذا تحركت السيارة جنوباً بمقدار السرعة نفسه فإن زخمه الخطي يساوي :

- أ)  $9 \times 10^4 N.s$       ب)  $-9 \times 10^4 N.s$       ج)  $18 \times 10^4 N.s$       د) 0  
الجواب : ( د )

6) تركض ليلى غرباً بسرعة ( 3 m/s ) . إذا ضاعفت ليلى مقدار سرعتها مرتان فإن مقدار زخمها الخطي :

- أ) يتضاعف مرتين      ب) يتضاعف أربع مرات.      ج) يقل بمقدار نصف.      د) يقل بمقدار الربع.  
الجواب : ( أ )

7) رميت كرة كتلتها (  $m$  ) أفقيا بسرعة مقدارها (  $v$  ) نحو الجدار ; فارتدت الكرة أفقيا بمقدار السرعة نفسها .  
إن مقدار التغيير في الزخم الخطي للكرة يساوي :  
أ)  $mv$       ب)  $-mv$       ج)  $2mv$       د)  $0$   
الجواب : ( ب )

8) المساحة المحصورة تحت منحنى ( القوة - الزمن ) هي :  
أ) القوة المحصلة .      ب) الزخم الخطي .      ج) الدفع .      د) الطاقة الحركية .  
الجواب : ( ج )

9 ) تحرك جسم بشكل أفقي نحو الغرب زخمه (  $5p$  ) إذا أثرت عليه قوة فأصبح زخمه (  $7p$  ) نحو الشرق فإن  
دفع محصلة القوة عليه تساوي :  
أ)  $12p$  شرقا .      ب)  $12p$  غربا .      ج)  $2p$  شرقا .      د)  $2p$  غربا .  
الجواب ( أ )

10) يركض أحمد غربا بسرعة (  $5m/s$  ) , اذا ضاعف مقدار سرعته ثلاث مرات فكم يصبح مقدار زخمه  
الخطي ؟  
أ)  $6m/s$       ب)  $15m/s$       ج)  $20m/s$       د)  $25m/s$   
الجواب : ( ب )

- علل ما يأتي :

1- تكون مواشير المدافع والبنادق ذات المدى الكبير طويلة .  
حتى تستغرق القذيفة زمن اطول داخل الماسورة ويكون الدفع على القذيفة اكبر ما يمكن.

2- عندما يقفز شخص من مكان مرتفع إلى أرض منخفضة فإنه يثني ركبتيه عند ملامسة قدميه على الأرض .  
في هذه الحالة يعمل الشخص على زيادة الفترة الزمنية بين قدميه والارض وهذا يؤدي الى تقليل القوة المؤثرة  
عليه من الارض.

3- سرعة ارتداد المدفع اقل من سرعة انطلاق القذيفة.  
كمية التحرك للقذيفة والمدفع محفوظة وبما ان كتلة المدفع اكبر بكثير من كتلة القذيفة اذا سرعته يجب ان  
تكون اقل بكثير من سرعة القذيفة.

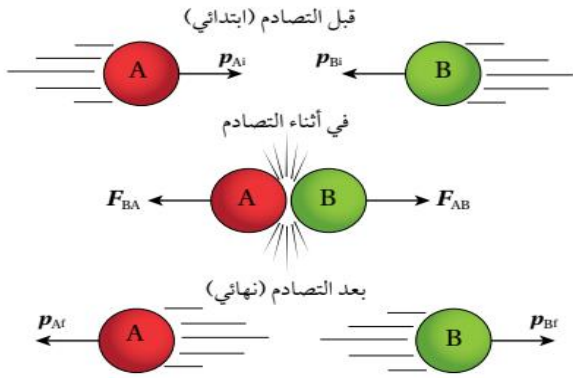
4- يضرب لاعب كرة القدم الكرة بمشط رجله.  
حتى يزيد من زمن تلامس الكرة مع الرجل وبالتالي تكتسب اكبر دفع لتصل الى اكبر مدى.

5- تزود المركبات الحديثة بوسادات هوائية (Air bags) لحماية الركاب اثناء وقوع تصادم.  
عندما تنتفخ الوسادات الهوائية تكون الفترة الزمنية طويلة جدا بين الراكب والوسادة الهوائية وبالتالي التقليل  
من القوة المؤثرة عليه.



حفظ الزخم الخطي

- النظام المعزول : النظام الذي تكون فيه القوة المحصلة الخارجية المؤثرة فيه صفراً. وتكون القوى المؤثرة فيه قوى داخلية فقط.



- في الشكل توجد قوة احتكاك ( قوى خارجية ) ولكنها صغيرة مقارنة بالقوة التي تؤثر بها كل من الكرتين في الأخرى أثناء التصادم ( قوة داخلية ) ; لذا نهمل هذه القوة الخارجية ونعتبر النظام معزولاً.

تصادم كرتين في بعد واحد في نظام معزل

\* حفظ الزخم الخطي والقانون الثالث لنيوتن في الحركة :

- في الشكل أعلاه تؤثر الكرتان عند ملامستهما لبعض بقوة على الأخرى , وحسب قانون نيوتن الثالث ( فعل ورد فعل ) تكون القوتان متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه.

$$F_{AB} = -F_{BA}$$

- الفترة الزمنية للتلامس متساوية بالنسبة للكرتان لذلك نضرب طرفي المعادلة ب  $\Delta t$  ونحصل على :

$$F_{AB}\Delta t = -F_{BA}\Delta t$$

$$I_{AB} = -I_{BA}$$

$$I_B = -I_A$$

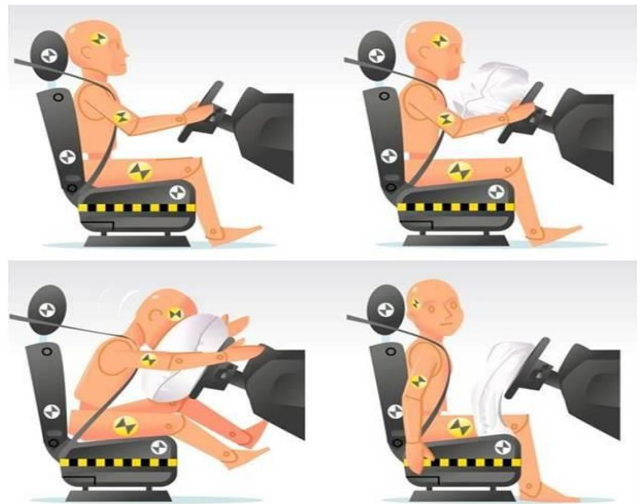
الدفع على A      ←      →      الدفع على B

$$\Delta p_B = -\Delta p_A$$

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

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

$$\sum p_i = \sum p_f$$



- حيث  $v_{Ai}$  ,  $v_{Af}$  تمثلان سرعتان المتجهتين للجسم الأول قبل التصادم وبعده .  
و  $v_{Bi}$  ,  $v_{Bf}$  تمثلان سرعتان المتجهتين للجسم الثاني قبل التصادم وبعده .

- تشير هذه المعادلة إلى قانون حفظ الزخم الخطي , إذ ينص على أنه :  
" عندما يتفاعل جسمان أو أكثر في نظام معزول , يظل الزخم الخطي الكلي للنظام ثابتاً".

-ويمكن التعبير عنه بأن : الزخم الخطي الكلي لنظام معزول قبل التصادم مباشرة يساوي الزخم الخطي الكلي للنظام بعد التصادم مباشرة .

- ماذا يحدث للأجسام المتصادمة بعد التصادم ؟

1) ترتد عن بعضها بعضاً .

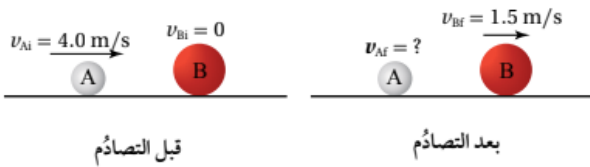
2) تلتصق ببعضها بعضاً .

3) تنفصل عن بعضها بعضاً ( كالانفجارات ) .

- عند انفصال جسم الى أجزاء يكون الزخم الخطي محفوظاً , أي أنه إن كان الجسم ساكناً فإن الزخم الخطي الكلي يكون صفراً.

### مثال ( 1 )

- يوضح الشكل تصادم كرتين A و B , حيث تتحرك الكرة A باتجاه محور  $+x$  بسرعة مقدارها  $( 4m/s )$  نحو الكرة B الساكنة , بعد التصادم تحركت الكرة B بسرعة مقدارها  $( 1.5m/s )$  باتجاه محور ال  $+x$  اذا علمت أن  $( m_A = 1kg )$  و  $( m_B = 2kg )$  ; فاحسب سرعة الكرة A بعد التصادم وأحدد اتجاهها:



المعطيات :

$$v_{Ai} = 4m/s , +x , \quad v_{Bi} = 0 , m_B = 2kg$$

$$v_{Bf} = 1.5m/s , +x \quad m_A = 1kg$$

الحل :

$$1 \times 4 + 2 \times 0 = 1 \times v_{Af} + 2 \times 1.5$$

$$4 = v_{Af} + 3$$

$$v_{Af} = 4 - 3 = 1m/s , +x$$

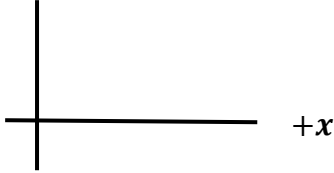
$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

مثال ( 2 )

- مدفع ساكن كتلته (  $2 \times 10^3 \text{ kg}$  ) , فيه قذيفة كتلتها (  $50 \text{ kg}$  ) أطلقت القذيفة أفقياً بسرعة (  $1.2 \times 10^2 \text{ m/s}$  ) باتجاه محور  $+x$  . أحسب مقدار مما يأتي :  
أ- الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع , وأحدد اتجاهها.  
ب- سرعة ارتداد المدفع .



أفترض أن رمز المدفع A و رمز القذيفة B .  
المعطيات :

$$m_A = 2 \times 10^3 \text{ kg} , m_B = 50 \text{ kg} , v_{Ai} = 0 , v_{Bi} = 0 , v_{Bf} = 1.2 \times 10^2 \text{ m/s} , +x$$

ب - سرعة ارتداد المدفع :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

$$2 \times 10^3 \times 0 + 50 \times 0 = 2 \times 10^3 \times v_{Af} + 50 \times 1.2 \times 10^2$$

$$v_{Af} = \frac{-6 \times 10^3}{2 \times 10^3} = -3 \text{ m/s} = 3 \text{ m/s} , -x$$

أ- الدفع الذي تؤثر به القذيفة في المدفع ,  
وأحدد اتجاهها :

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

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

$$= -m_B (v_{Bf} - v_{Bi})$$

$$= -50 \times (1.2 \times 10^2 - 0)$$

$$= -6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$I_{BA} = 6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s} , -x$$

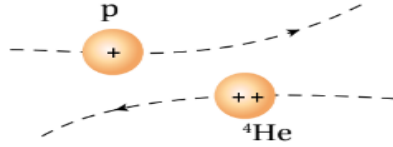
## التصادمات

## الزخم الخطي والطاقة الحركية في التصادمات

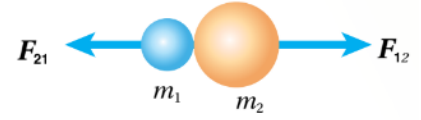
- التصادمات : هي تمثيل حدث يقترب فيه جسمان أحدهما من الآخر ويؤثر كل منهما في الآخر.

- أشكال التصادمات :

- (1) يتضمن التصادم تلامساً بين جسمين. مثل : الأجسام والكتل الكبيرة.
- (2) لا يتضمن التصادم تلامساً بين الأجسام . مثل : بروتون وجسيم ألفا ( نواة الهيليوم ).



(2)



(1)

- لماذا لا يحتاج تصادم جسيم ألفا والبروتون لتلامس ؟  
لأنهما مشحونتان بشحنة موجبة لذلك سوف يتنافران ولا يقتربان من بعضهما .

- التصادمات والطاقة الحركية :

- الطاقة الحركية الخطية لجسم ( KE ) : هي الطاقة المرتبطة بحركته عند انتقاله من مكان الى آخر ( حركة انتقالية).

$$KE = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

- حيث أن :

$m$  : الكتلة ( KG )

$v$  : السرعة ( m/s )

- تعلمنا أن الزخم الخطي محفوظ عند تصادم الأجسام أو انفصال الأجسام عن بعضها البعض في الأنظمة المعزولة.

- إن لم تكن الطاقة الحركية محفوظة في النظام عند التصادم فهذا يدل على أن جزءاً من هذه الطاقة تحول إلى شكل أو أشكال أخرى من الطاقة .

- أنواع التصادمات من حيث حفظ الطاقة الحركية :  
 (1) تصادم مرن. (2) تصادم غير مرن.

**- التصادم المرن :**

تكون الطاقة الحركية في التصادمات المرنة محفوظة , أي أن مجموع الطاقة الحركية لأجزاء النظام قبل التصادم مساوية لمجموع الطاقة الحركية بعد التصادم .

**- مثال على التصادم المرن :**

تصادم كرات البلياردو مع إهمال الطاقة المفقودة على شكل طاقة صوتية .

- الآن عند تصادم جسم A وجسم B تصادم مرن نطبق المعادلات الآتية :  
 (1) معادلة حفظ الزخم الخطي :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

- (2) معادلة حفظ الطاقة الحركية :

$$\sum KE_i = \sum KE_f$$

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

**- التصادم الغير مرن :**

لا تكون الطاقة الحركية في النظام محفوظة , أي أن مجموع الطاقة الحركية قبل التصادم لا تساوي مجموع الطاقة الحركية بعد التصادم .

\* لكن يكون الزخم الخطي محفوظا في كل أنواع التصادمات التي تكون القوة الخارجية المؤثرة في الأجسام إن وجدت صغيرة جدا بقوة الفعل ورد الفعل في الأجسام.

**- مثال على التصادم الغير مرن :**

تصادم كرة مطاطية بسطح صلب , حيث تفقد جزءا من طاقتها الحركية عندما تتشوه الكرة في أثناء ملامستها للسطح.

- عند التحام الأجسام بعد التصادم الغير مرن يسمى هذا التصادم تصادم عديم المرونة .

- **التصادم عديم المرونة** : هو التصادم الذي ينتج عنه التحام الأجسام المتصادمة معا بعد التصادم , لتصبح جسما واحداً تساوي كتلته مجموع كتل الأجسام المتصادمة.

- **مثال على التصادم عديم المرونة :**

- 1) اصطدام سيارتان معا وتحركهما معا بعد التصادم .
- 2) اصطدام كرسي صلب معا .



- بتطبيق معادلة حفظ الزخم الخطي على هذا النظام نحصل على :

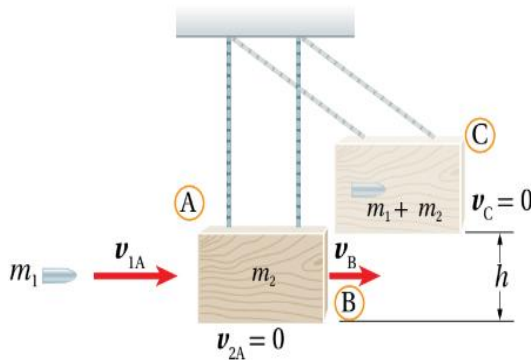
$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf}$$

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

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

- **تطبيق عملي :** البندول القذفي :

- يستخدم هذا البندول لقياس مقدار سرعة مقذوف كالرصاصة.



\* يتم إطلاق رصاصة كتلتها  $m_1$  باتجاه كتلة ساكنة كبيرة من الخشب كتلتها  $m_2$  , وتكون الكتلة الكبيرة معلقة بخيطين خفيفين , وعندما تخترق الرصاصة الكتلة الكبيرة وتستقر داخلها , فإن النظام يتحرك كجسم واحد .  
- لحساب سرعة الرصاصة قبل اصطدامها بقطعة الخشب يجب معرفة الارتفاع ( h ) .

- نطبق قانون حفظ الزخم الخطي قبل التصادم :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

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

الرمز A يدل على النظام قبل التصادم .

الرمز B يدل على النظام بعد التصادم .

الرمز C يدل على النظام عند أقصى ارتفاع .

- عند افتراض النقطة B نقطة مرجع أي أن طاقة الوضع عند النقطة تساوي صفراً (  $PE_B = 0$  ), وبما أنه لا توجد قوى محافظة تبذل شغلاً على النظام في أثناء حركته بعد التصادم فإن الطاقة الميكانيكية محفوظة, وتكون الطاقة الحركية عند أقصى ارتفاع عند النقطة C تساوي صفراً (  $KE_C = 0$  ).

$$ME_B = ME_C$$

$$KE_B + KP_B = KE_C + PE_C$$

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

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

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

س: أقارن بين التصادم المرن, والتصادم الغير مرن, والتصادم عديم المرونة من حيث: حفظ الزخم الخطي, حفظ الطاقة الحركية, التحام الأجسام بعد التصادم.

| تصادم عديم المرونة | التصادم غير المرن | التصادم المرن |                            |
|--------------------|-------------------|---------------|----------------------------|
|                    |                   |               | حفظ الطاقة الحركية         |
|                    |                   |               | حفظ الزخم الخطي            |
|                    |                   |               | التحام الأجسام بعد التصادم |

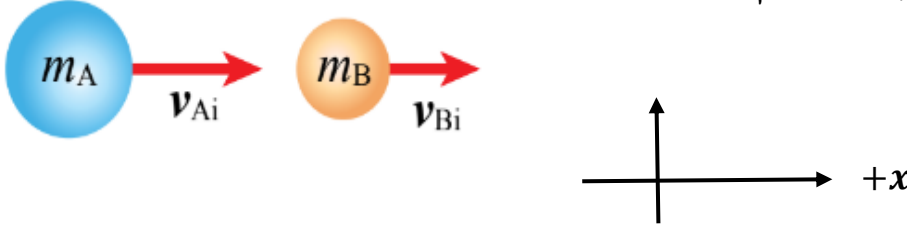
- التصادم في بعد واحد :

هو التصادم الذي يحدث عندما يتحرك جسمان قبل التصادم على امتداد الخط المستقيم نفسه, ويتم الاصطدام رأساً برأس, وتبقى حركتهما على المسار المستقيم نفسه.



مثال ( 1 )

- تتحرك الكرة (A) باتجاه محور (+x) بسرعة (6 m/s) ; فتصطدم رأساً برأس بكرة أخرى (B) أمامها تتحرك باتجاه محور (+x) بسرعة (3 m/s) . بعد التصادم تحركت الكرة (B) بسرعة مقدارها (5 m/s) بالاتجاه نفسه قبل التصادم إذا علمت أن (m<sub>B</sub> = 3 kg , m<sub>A</sub> = 5 kg) فأجد ما يلي :



ب- أحدد نوع التصادم .

المعطيات :

$$v_{Ai} = 6 \text{ m/s} , +x , v_{Bi} = 3 \text{ m/s} , +x , v_{Bf} = 5 \text{ m/s} , +x , m_A = 5 \text{ kg} , m_B = 3 \text{ kg}$$

أ - أكتب مقدار سرعة الكرة (A) بعد التصادم وأحدد اتجاهها :

$$\begin{aligned} \sum p_i &= \sum p_f \\ m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} &= m_A v_{Af} + m_B v_{Bf} \\ 5 \times 6 + 3 \times 3 &= 5 \times v_{Af} + 3 \times 5 \\ v_{Af} &= \frac{39 - 15}{5} = \frac{24}{5} \\ &= 4.8 \text{ m/s} , +x \end{aligned}$$

ب - حدد نوع التصادم :  
\* لتحديد نوع التصادم يجب حساب التغير في الطاقة الحركية .

$$\begin{aligned} \Delta KE &= KE_f - KE_i \\ &= \frac{1}{2} m_A v_{Af}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bf}^2 - \left( \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 \right) \\ &= \frac{1}{2} (5 \times (4.8)^2 + 3 \times (5)^2) - \frac{1}{2} (5 \times (6)^2 + 3 \times 3^2) \\ \Delta KE &= -8.4 \text{ J} \end{aligned}$$

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

مثال ( 2 )

- أطلق سعد سهماً كتلته (0.03kg) أفقياً باتجاه بندول قذفي كتلته (0.72kg) فاصطدم به والتحما معاً، بحيث كان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوق المستوى الابتدائي له يساوي (20cm) وباعتبار تسارع السقوط الحر (10 m/s<sup>2</sup>) أجب عما يلي :

أ - أي مراحل حركة النظام المكون من البندول والسهم يكون فيها الزخم الخطي محفوظاً ؟  
ب - أي مراحل حركة النظام تكون فيها الطاقة الميكانيكية محفوظة ؟  
ج - أكتب مقدار السرعة الابتدائية للسهم .

- افرض رمز كتلة البندول القذفي A و السهم B .  
ج -

$$\begin{aligned} v_{Bi} &= \left( \frac{m_A + m_B}{m_B} \right) \sqrt{2gh} \\ &= \left( \frac{0.72 + 0.03}{0.03} \right) \sqrt{2 \times 10 \times 0.2} \\ &= 50 \text{ m/s} \end{aligned}$$

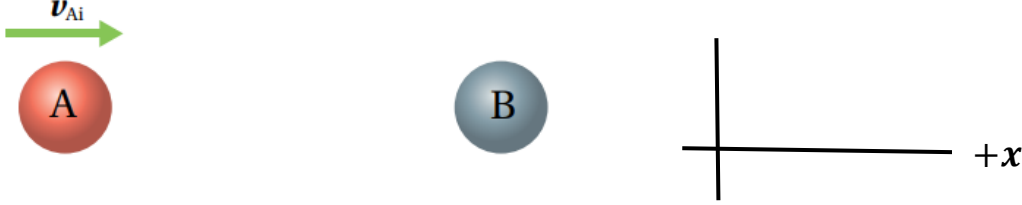
الحل :

أ - يكون الزخم الخطي محفوظاً في التصادم عديم المرونة بين السهم والبندول .  
ب - تكون الطاقة الميكانيكية محفوظة للسهم قبل التصادم كما تكون الطاقة الميكانيكية محفوظة للبندول والسهم بدأ من حركتهما معاً بعد التصادم مباشرة وحتى وصولهما إلى أقصى ارتفاع وذلك عند إهمال قوى الاحتكاك .



مثال (3)

- كرتا بلياردو كتلة كل منهما ( 0.16 kg ) , تتحرك الكرة الحمراء ( A ) باتجاه محور  $+x$  بسرعة ( 2 m/s ) نحو الكرة الزرقاء ( B ) الساكنة وتتصادمان رأساً برأس تصادماً مرناً . جد مقدار سرعة الكرة ( B ) بعد التصادم وحدد اتجاهها .



المعطيات :

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

$$KE_i = KE_f$$

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

$$\frac{1}{2} m_{AB} (v_{Ai}^2 + v_{Bi}^2) = \frac{1}{2} m_{AB} (v_{Af}^2 + v_{Bf}^2)$$

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

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

- نعوض المعادلة 1 في المعادلة 2 :

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

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

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

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

$$v_{Bf} = 0 , \quad v_{Bf} = 2 \text{ m/s} , +x$$

- بتعويض الحلول في المعادلة 1 :

$$v_{Af} = 2 - 0 = 2 \text{ m/s} , +x$$

- وهذا يعني أن الكرة ( A ) اخترقت الكرة ( B ) وهذا امر مستحيل .

$$v_{Af} = 2 - 2 = 0$$

- وهذا يعني أن الكرة ( A ) سكنت بعد التصادم وهذا يحدث إذا كان التصادم مرناً , وكانت للكرتان الكتلة نفسها .

الحل :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$m_{AB} (v_{Ai} + v_{Bi}) = m_{AB} (v_{Af} + v_{Bf})$$

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

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

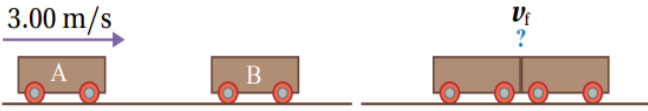
$$v_{Af} + v_{Bf} = 2$$

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

- بما أنه يوجد كميتان مجهولتان؛ أحتاج الى معادلة ثانية أحصل عليها بتطبيق حفظ الطاقة الحركية على نظام لكرتين قبل التصادم وبعده لأن التصادم مرن

مثال (4)

- عربة قطار (A) كتلتها  $(1.8 \times 10^3 \text{ kg})$  تتحرك في مسار افقي مستقيم لسكة حديد بسرعة مقدارها  $(3 \text{ m/s})$  باتجاه محور  $+x$  ، فتصطدم بعربة أخرى (B) كتلتها  $(2.2 \times 10^3 \text{ kg})$  تقف على المسار نفسه ، وتلتحمان معا وتتحركان على المسار المستقيم لسكة الحديد نفسه ، أجب عما يلي :



أ- سرعة عربتي القطار بعد تصادم ، وأحدد اتجاهها.  
ب- ما نوع التصادم ؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادمات؟ برر إجابتك .

المعطيات :

$$m_A = 1.8 \times 10^3 \text{ kg} , m_B = 2.2 \times 10^3 \text{ kg} , v_{Ai} = 3 \text{ m/s} , +x , v_{Bi} = 0$$

ب - ما نوع التصادم ؟ وهل الطاقة الحركية محفوظة في هذا النوع من التصادمات؟ برر إجابتك .

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

$$= \frac{1}{2} \times 1.8 \times 10^3 \times (3)^2 + 0 = 8.1 \times 10^3 \text{ J}$$

$$KE_f = \frac{1}{2} (m_A + m_B) v_f^2$$

$$= \frac{1}{2} (1.8 \times 10^3 \text{ kg} + 2.2 \times 10^3 \text{ kg}) (1.35)^2$$

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

$$\Delta KE = 3.65 \times 10^3 - 8.1 \times 10^3$$

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

- التغير في الطاقة الحركية سالب ، أي أن الطاقة الحركية غير محفوظة ، والعريتان التحمتا معا بعد التصادم لذا فإن التصادم عديم المرونة

أ- سرعة عربتي القطار بعد تصادم ، واتجاهها :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$1.8 \times 10^3 \times 3 + 0 = (1.8 \times 10^3 + 2.2 \times 10^3) v_f$$

$$5.4 \times 10^3 = 4 \times 10^3 v_f$$

$$v_f = \frac{5.4 \times 10^3}{4 \times 10^3} = 1.35 \text{ m/s} , +x$$

مثال (5)

- أطلق محقق رصاصة كتلتها  $(0.03 \text{ kg})$  أفقيا باتجاه بندول قذفي كتلته  $(0.97 \text{ kg})$  ، فاصطدمت به والتحما مع بعض ، فكان أقصى ارتفاع وصل إليه البندول فوق المستوى الابتدائي له  $(45 \text{ cm})$  ، أحسب مقدار السرعة الابتدائية للرصاصة.

الحل :

- نفرض رمز كتلة البندول القذفي B و الرصاصة A .

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

$$v_{Ai} = \left( \frac{0.03 + 0.97}{0.033} \right) \sqrt{2 \times 10 \times 0.45} = 100 \text{ m/s}$$

مثال (6)

- كرة صلصال كتلتها ( 2kg ) تتحرك شرقا بسرعة ثابتة  
وتصطدم بكرة صلصال اخرى ساكنة فتلتحمان معا  
وتتحركان شرقا بسرعة يساوي مقدارها ربع مقدار  
السرعة الابتدائية للكرة الأولى .  
جد مقدار كتلة الكرة الثانية .  
المعطيات :

- نفرض رمز الكرة الاولى A والكرة الثانية B .

$$m_A = 2kg , v_{Bi} = 0 , v_f = \frac{1}{4} v_{Ai}$$

الحل :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$m_A v_{Ai} + 0 = (m_A + m_B) \frac{1}{4} v_{Ai}$$

$$2v_{Ai} = \frac{1}{4} v_{Ai} (2 + m_B)$$

$$8v_{Ai} = v_{Ai} (2 + m_B)$$

$$m_B = 8 - 2 = 6kg$$

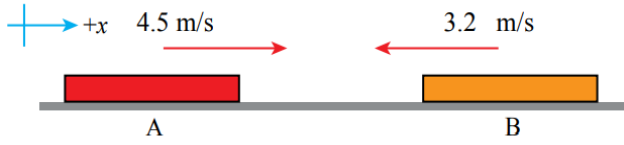
مثال (5)

- كرتا بلياردو ( A, B ) لهما الكتلة نفسها وتتحركان في  
الاتجاه نفسه في خط مستقيم , قبل التصادم , سرعة  
الكرة A يزيد بمقدار ( 1.2m/s ) عن مقدار سرعة  
الكرة B . بعد التصادم , مقدار سرعة الكرة A يساوي  
مقدار سرعة الكرة B قبل التصادم ومقدار سرعة الكرة  
B يزيد بمقدار ( 1.2 m/s ) عن مقدار سرعة الكرة A.  
هل التصادم مرن أم غير مرن . برر إجابتك.



مثال (7)

-عربتان ( A , B ) تتحركان 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 العريبتين بعد التصادم مباشرة :  
: (  $v_{Bf} = 3.7 \text{ m/s}$  ) (  $v_{Af} = -1.9 \text{ m/s}$  )



جد ما يلي :

أ- أحسب مقدار كتلة العربة (B).

ب- أستخدم القانون الثالث لنيوتن في الحركة لتوضيح سبب أن يكون الزخم الخطي محفوظاً في هذا التصادم.

ج- أوضح هل التصادم مرن أم غير مرن ؟

أ-

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$0.28 \times 4.5 - m_B \times 3.2 = 0.28 \times -1.9 + m_B \times 3.7$$

$$1.26 - 3.2m_B = -0.532 + 3.7m_B$$

$$-3.7m_B - 3.2m_B = -0.532 - 1.26$$

$$-6.9m_B = -1.8$$

$$m_B = \frac{1.8}{6.9} = 0.26 \text{ kg}$$

ب-

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

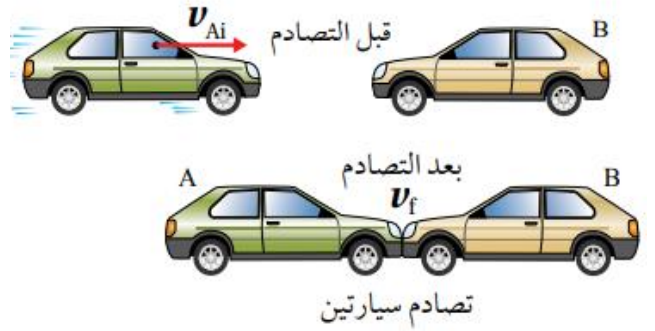
$$0.28 \times 4.5 - 2.6 \times 3.2 = 0.28 \times -1.9 + 2.6 \times 3.7$$

$$0.43 = 0.43$$

ج-

مثال (6)

- السيارة A كتلتها (  $1.1 \times 10^3 \text{ kg}$  ) تتحرك بسرعة (  $6.4 \text{ m/s}$  ) باتجاه محور  $+x$  فتصطدم رأساً برأس بسيارة ساكنة B كتلتها (  $1.2 \times 10^3 \text{ kg}$  ) وتلتحم السيارتان معا بعد التصادم وتتحركان على المسار المستقيم نفسه قبل التصادم، جد ما يلي :  
أ- سرعة السيارتين بعد التصادم، وأحدد اتجاهها.  
ب- الدفع الذي تؤثر به السيارة B في السيارة A.



أ- سرعة السيارتين بعد التصادم، وأحدد اتجاهها :

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$1.1 \times 10^3 \times 6.4 + 0 = ((1.1 + 1.2)10^3 v_f)$$

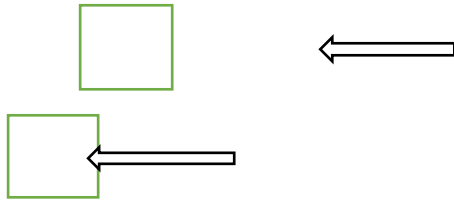
$$7 \times 10^3 = 2.3 \times 10^3 v_f$$

$$v_f = \frac{7 \times 10^3}{2.3 \times 10^3} = 3.06 \text{ m/s}, +x$$

ب- الدفع الذي تؤثر به السيارة B في السيارة A :

مثال (9)

- أطلقت مريم سهما كتلته (0.2 kg) أفقياً بسرعة مقدارها (15 m/s) باتجاه الغرب نحو هدف ساكن كتلته (5.8 kg) فاصطدم به واستقر فيه وتحركا كجسم واحد نحو الغرب. جد ما يلي :  
أ- سرعة النظام (السهام والهدف) بعد التصادم.  
ب- التغير في الطاقة الحركية للنظام.



أ-

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$0.2 \times -15 + 5.8 \times 0 = (0.2 + 5.8) v_f$$

$$-3 + 0 = 6 v_f$$

$$v_f = \frac{-3}{6} = -0.5 \text{ m/s}$$

$$v_f = 0.5 \text{ m/s} , -x$$

ب-

$$\Delta KE = \frac{1}{2} (m_A + m_B) v_f^2 - \left( \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2 \right)$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2} (0.2 + 5.8) (0.5)^2 - \frac{1}{2} (0.2) (15)^2$$

$$\Delta KE = 0.75 - 22.5$$

$$\Delta KE = -21.75 \text{ J}$$

مثال (8)

- تنزلق كرة زجاجية كتلتها (0.3 kg) باتجاه الغرب بسرعة مقدارها (0.2 m/s)، فتصطدم رأساً برأس بكرة أخرى كتلتها (0.5 kg) تنزلق شرقاً بسرعة مقدارها (0.1 m/s) بعد التصادم ارتدت الكرة الأولى شرقاً بسرعة مقدارها (0.3 m/s). جد ما يلي :  
أ- إحسب مقدار سرعة الكرة الثانية بعد التصادم، وأحدد اتجاهها.  
ب- أحدد نوع التصادم.



أ-

$$\sum p_i = \sum p_f$$

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

$$0.3 \times -0.2 + 0.5 \times 0.1 = 0.3 \times 0.3 + 0.5 v_{Bf}$$

$$-0.06 + 0.05 = 0.09 + 0.5 v_{Bf}$$

$$-0.01 - 0.09 = 0.5 v_{Bf}$$

$$v_{Bf} = \frac{-0.1}{0.5} = -0.2 \text{ m/s}$$

$$v_{Bf} = 0.2 \text{ m/s} , -x$$

ب-

- ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة :

1- صندوقان ( B,A ) يستقران على سطح أفقي أملس أثرت في كل منهما القوة المحصلة نفسها باتجاه محور  $x +$  للفترة الزمنية نفسها (  $\Delta t$  ). إذا علمت ان كتلة الصندوق (  $m_A$  ) أكبر من كتلة الصندوق (  $m_B$  ) فأى العلاقات الآتية صحيحة في نهاية الفترة الزمنية نفسها ؟

- 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.  $p_A > p_B , KE_A > KE_B$  .  
الجواب ( د )

2- كرة A تتحرك بسرعة ( 2m/s ) غربا ; فتصطدم بكرة اخرى ساكنة B مماثلة لها تصادما مرنا في بعد واحد . إذا توقفت الكرة A بعد التصادم , فإن مقدار سرعة الكرة B واتجاهها بعد التصادم يساوي :  
أ. ( 2m/s ) شرقا . ب. ( 2m/s ) غربا . ج. ( 1m/s ) شرقا . د. ( 1m/s ) غربا .  
الجواب : ( ب )

3- يركض عمر شرقا بسرعة ( 4m/s ) , ويقفز في ( 90kg ) تتحرك شرقا بسرعة مقدارها ( 1.5m/s ) . إذا أن كتلة عمر ( 60kg ) ; فما مقدار سرعة حركة عمر والعربة معا ؟ وما اتجاهها ؟  
أ. ( 2m/s ) شرقا . ب. ( 5.5m/s ) غربا . ج. ( 2.75m/s ) شرقا . د. ( 2.5m/s ) شرقا .

4- جسم كتلته ( 4kg ) يتحرك بسرعة مقدارها ( 2m/s ) أثرت عليه قوة مقدارها ( 8 N ) بنفس اتجاه حركته لمدة ( 5 s ) فإن الزخم الخطي النهائي يساوي بوحدة (kg.m/s):  
أ. 32 . ب. 8 . ج. 40 . د. 48 .  
الجواب (د).

5- كرة كتلتها ( 0.2kg ) تقترب من مضرب بسرعة ( 40m/s ) وترتد عنه بسرعة ( 50m/s ) إذا كان زمن التلامس ( 0.2s ) فإن القوة التي يؤثر بها المضرب على الكرة تساوي بوحدة نيوتن :  
أ. 18 . ب. 10 . ج. 90 . د. 2 .  
الجواب (ج)

6. يدور قمر صناعي كتلته m حول الأرض في مسار دائري بسرعة ثابتة v فإن التغير في زخمه عند اجتيازه ربع دورة  
أ. 0 . ب. 2mv . ج.  $mv\sqrt{2}$  . د. 0.5mv .  
الجواب(ج)

7. يدور قمر صناعي كتلته m حول الأرض في مسار دائري بسرعة ثابتة v فإن التغير في زخمه عند اجتيازه نصف دورة  
أ. 0 . ب. 2mv . ج.  $mv\sqrt{2}$  . د. 0.5mv .  
الجواب(ب)

8. الكمية المحفوظة دائماً في اي عملية تصادم هي:  
أ. الطاقة الحركية  
ب. الزخم الخطي  
ج. السرعة  
د. الطاقة الميكانيكا  
الجواب (د)

9. عندما يصطدم جسمان مختلفان في الكتلة فإن الدفع الذي يؤثر به كل جسم على الآخر  
أ. متساوي في المقدار ومتعاكس في الاتجاه لجميع أنواع التصادمات  
ب. متساوي في المقدار ومتعاكس في الاتجاه للتصادمات المرنة فقط  
ج. متساوي في المقدار لجميع أنواع التصادمات  
أ. متساوي في المقدار ومتعاكس في الاتجاه لجميع أنواع التصادمات المرنة فقط  
الجواب (ب)

10. اي العبارات التالية ليست صحيحة لجميع أنواع التصادمات في نظام معزول  
أ. يكون احد الجسمين على الاقل متحرك  
ب. الطاقة الحركية للنظام محفوظة  
ج. قد لا يتلامس الجسمات المتصادمان  
د. الزخم للنظام محفوظ  
الجواب (ب)

11. اصطدم جسم A كتلته  $m_1$  يتحرك بسرعة  $v_1$  بكرة كتلتها  $m_2$  و سرعتها  $v_2$  حيث أن  $m_2 > m_1$   
و  $v_1 > v_2$  تصادم عديم المرونة , فإن التغير في الزخم:  
أ. يكون أكبر للجسم A منه للكرة  
ب. يكون أكبر للكرة منه للجسم A  
ج. متساوٍ لكل منهما متعاكس في الاتجاه  
د. متساوٍ لكل منهما مقداراً واتجاهاً  
الجواب (ج)

12. إذا ركل رائد فضاء حجراً وهو في الفضاء الخارجي , اي العبارات التالية صحيحة:  
أ. يتحرك رائد الفضاء والحجر بنفس السرعة و في اتجاهين متعاكسين  
ب. يتحرك رائد الفضاء والحجر بسرعتين مختلفتين مقداراً ولكن في نفس الاتجاه  
ج. يتحرك رائد الفضاء بسرعة أقل من سرعة الحجر و باتجاه معاكس لسرعة الحجر  
د. لا يتحرك اي منهما  
الجواب (ج): لأنه الزخم محفوظ وبالتالي تتناسب السرعة عكسياً مع الكتلة

13. ينزلق متزلج كتلته (40kg) على الجليد بسرعة مقدارها (2m/s) اصطدم بزلاجة ثابتة كتلتها (10kg) على الجليد و واصل المتزلج إنزلاقه مع الزلاجة بنفس اتجاه حركته الاصلية فإن السرعة المشتركة له بعد التصادم:  
أ. 0.4 m/s  
ب. 0.8 m/s  
ج. 1.6m/s  
د. 3.2m/s  
الجواب (ج)

14. كرتان كتلتها ( 3.5 kg ) و ( 1.5 kg ) يسيران باتجاه واحد وعلى خط مستقيم على الترتيب بسرعة ( 10m/s ) و ( 4m/s ) اذا تصادمتا وكونتا جسماً واحداً بعد التصادم فان سرعة كل منهما بعد التصادم بوحدة m/s :

- أ. 12      ب. 6      ج. 7      د. 8.2  
الجواب : ( د )

- اقرأ الفقرة التالية ثم أجب على الأسئلة ( 15,16,17 ) :  
تتحرك كرة كتلتها ( 2kg ) اتجاه الغرب بسرعة ( 6m/s ) فتصطدم بأخرى كتلتها ( 3kg ) تتحرك باتجاه الشرق بسرعة ( 4m/s ) , فإذا أصبحت سرعة الكرة الأولى بعد التصادم ( 4.5m/s ) مباشرة نحو الشرق , ودام التصادم ( 0.02s ) جد :

- 15- سرعة الكرة الثانية بعد التصادم مباشرة بوحدة ( m/s ) :  
أ. 30      ب. -3      ج. 3      د. -30  
الجواب: ( ب )

16- متوسط القوة التي أثرت بها الكرة الأولى على الكرة الثانية أثناء التصادم بوحدة ( N ) :  
أ. 1000      ب. 1050      ج. 750      د. -1050  
الجواب : ( د )

17- نوع التصادم :  
أ- تصادم مرن      ب- تصادم غير مرن  
ج- تصادم عديم المرونة      د- تصادم مرن  
الجواب : ( ب )

18- يتحرك جسم كتلته ( 16kg ) في اتجاه +x بسرعة ( 3m/s ) , ويتحرك جسم آخر كتلته ( 4kg ) في اتجاه -x بسرعة ( 6m/s ) يصطدم الجسمان بشكل مباشر ويلتحمان , ما سرعتها بعد الاصطدام مباشرة بوحدة (m/s) :

- أ- 4      ب- 3      ج- 1.2      د- 3.2  
الجواب : ( ج )

- اقرأ الفقرة التالية ثم أجب على الأسئلة ( 19,20 ) :  
جسم سرعته ( 55m/s ) وكتلته  $m_1$  تصادما مرنا مع جسم آخر ساكن كتلته ( 5kg ) , وبعد التصادم تحرك الجسم الأول في الاتجاه المعاكس بسرعة ( 20m/s ) أجب عما يلي :

- 19- كتلة الجسم الأول بوحدة ( kg ) :  
أ- 2.4      ب- 2      ج- 2.9      د- 4  
الجواب : ( أ )

20- سرعة الجسم الثاني بعد التصادم مباشرة :  
أ- 3      ب- 27      ج- 3.8      د- 4.5  
الجواب : ( ج )



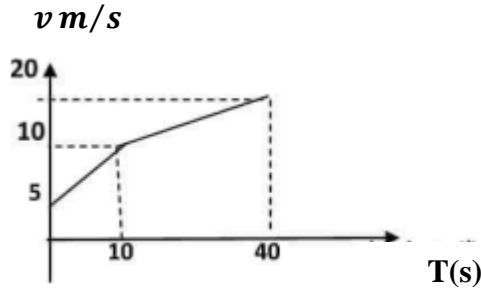
- أمثلة متنوعة على الرسم البياني :

1- في الشكل المجاور يمثل العلاقة البيانية بين السرعة والزمن

لجسم كتلته 2kg , احسب :

أ- الدفع خلال 40s .

ب- قوة الدفع خلال 10s .



2- جسم كتلته ( 2kg ) يتحرك بسرعة ( 5m/s ) على سطح أفقي

أثرت عليه قوة متغيرة مع الزمن , أحسب :

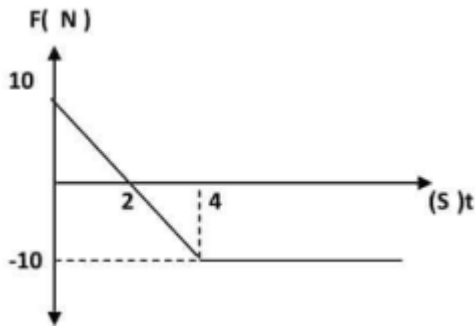
أ. أكبر سرعة للجسم .

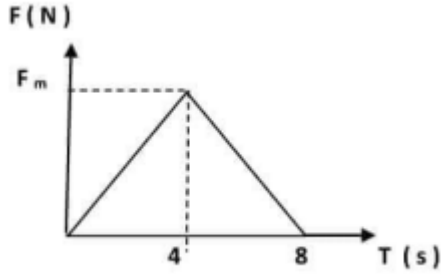
ب. زمن توقف الجسم .

ج. دفع القوة خلال 4s .

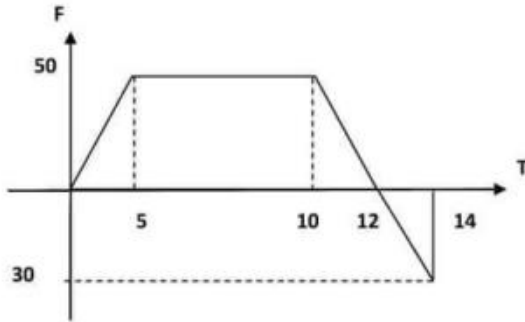
د. متوسط القوة المؤثرة من بداية تأثيرها وحتى

سكون الجسم .



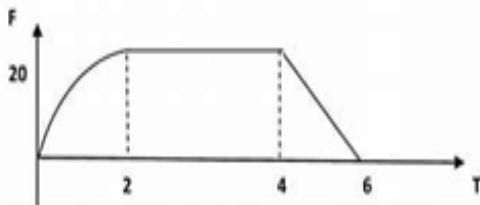


- 3- أثرت قوة متغيرة على جسم ساكن كتلته ( 4kg ) فأصبحت سرعته ( 20m/s ) . احسب :  
أ. القيمة القصوى للقوة المتغيرة .  
ب. متوسط القوة المؤثرة على الجسم .



- 4- في الشكل المجاور يتحرك جسم كتلته ( 5kg ) بسرعة ( 5m/s ) تحت تأثير قوة متغيرة احسب :  
أ. تسارع الجسم في الفترة ( 5s-10s ) .  
ب. الدفع الكلي .  
ج. السرعة النهائية للجسم .  
د. متوسط قوة الدفع المؤثرة على الجسم .

- 5- أثرت قوة متغيرة على جسم كتلته ( 4kg ) يتحرك بسرعة ( 5 m/s ) . فإذا كانت كمية التحرك النهائية ( 100 N.s ) احسب :



- أ. الدفع المؤثر خلال 20s .  
ب-سرعة الجسم وطاقته الحركية بعد 2s .  
ج- متوسط القوة الدافعة .

علل ما يأتي :

- 1- يضرب لاعب كرة القدم الكرة بمشط رجله.  
حتى يزيد من زمن تلامس الكرة مع الرجل وبالتالي تكتسب أكبر دفع لتصل إلى أكبر مدى.
- 2- تحطم عدد من حجارة الطوب المرتبة فوق بعضها البعض عندما يضربها اللاعب سريعا.  
يؤثر اللاعب بدفع كبير على الحجرة بسبب السرعة العالية والفترة الزمنية الصغيرة نسبيا ويظهر الدفع الكبير بتحطم حجرة الطوب .
- 3- يمكن اهمال تأثير القوى الخارجية خلال فترة التصادم.  
وذلك بسبب التأثير الكبير للقوى المتبادلة اثناء عملية التصادم مقارنة بتاثير القوى الخارجية .
- 4- توضع اكياس من الرمل بمحاذاة خنادق الجنود في الاماكن المعرضة للقصف.  
حتى يكون زمن تصادم القذيفة مع الرمل طويل نسبيا بالمقارنة مع تصادمها مع المواد الصلبة وهذا بدوره يقلل من قوة الدفع على الرصاصة وتقليل الضرر.
- 5- يوضع البيض في وعاء من الكرتون بدل من وعاء من المعدن.  
في وعاء الكرتون تكون فترة التلامس بين البيض والكرتون طويلة نسبيا وبالتالي القوة المؤثرة عليه قليلة فيما لو كان في وعاء من المعدن.

أثبت ما يأتي :

- 1- أثبت أن الطاقة الحركية لجسم ما تعطى بالعلاقة  $( KE = \frac{p^2}{2m} )$  .
- 2- أثبت أن القوة تساوي معدل التغير في الزخم .
- 3- أثبت أن وحدة الزخم الخطي  $( kg.m/s )$  تكافئ وحدة الدفع  $( N.s )$  .