يكاد لاعب كرة (القاعدة) البيسبول أن يُسرّع الكرة بقوة يده ليكسبها سرعة متجهة عالية بدءًا من السكون. وهو بذلك يبذل شغلا على الكرة ينجم عنه إزاحتها مسافة عدة أمتار تبدأ من خلف رأسه لتنتهي عندما يترك الكرة، ويده ممتدة نحو الأمام إلى أقصى مسافة ممكنة. وبهذا يصبح الشّغل المبذول على الكرة معادلًا لطاقتها الحركيّة المكتسبة ($\frac{1}{2}mv^2$)؛ وهذا هو مبدأ الشّغل والطّاقة.

الفصل 6

الشّـغل والطّـاقـة

لقد درسنا حتى الآن حركة الأجسام الانتقالية بدلالة قوانين نيوتن الثلاثة للحركة. وبناءً على التحليل السابق، فإنّ القوة ككمية متجهة تكون قد أدّت الدور الأساس في تحديد الحركة. وسنتناول في الفصلين الحالي والذي يليه طريقة مختلفة لتحليل حركة الأجسام الانتقالية باستخدام الكميتين القياسيتين: الشغل والطاقة. حيث تكمن أهميتهما في إمكانية حفظهما لتبقى كلّ منهما ثابتة تحت الظروف المعيارية. كما تمنحنا هاتان الكميتان المحفوظتان فرصة للتمعن في طبيعة العالم من حولنا، وتوفران لنا طريقة منهجية لحلّ المسائل العملية.

اكتسب قانونا حفظ الطاقة والزخم الخطيّ أهمية واسعة؛ لسهولة تطبيقهما عند التعامل مع الأنظمة متعددة الأجسام، وخاصة عندما يكون التعامل مع القوة المسببة للحركة صعبًا أو مستحيلا. كما تجدر الإشارة هنا إلى إمكانية استخدام هذين القانونين أيضًا في مجالات الفيزياء المتعددة الأخرى، والذي من ضمنها علم الفيزياء الذرية بفروعه المختلفة، وتحديدًا عند تعذّر استخدام قوانين نيوتن للحركة؛ لعدم صلاحيتها تحت تأثير تلك الظروف.

لقد تمّ تكريس هذا الفصل للحديث عن مبدأين مهمين في الفيزياء، هما: الشغل والطاقة. ويُعدّ التعامل مع هاتين الكميتين القياسيتين أمرا يسيرا، ولا يحتاج إلى عمليات رياضية معقدة أو متطورة؛ نظرًا إلى عدم ارتباطهما بأيّ اتجاه مقارنةً مع الكميات المتجهة.

6-1 الشّغل المبذول بواسطة قوة ثابتة

الشّغل

على الرّغم من ارتباط كلمة شغل بأكثر من معنى في حياتنا اليومية، فإنّ لها معنًى خاصًّا ومُحدّدًا في الفيزياء. ولقد تمّ تعريف مصطلح الشغل في الفيزياء ليصف تأثير القوة الخارجية الثابتة مقدارًا واتجاهًا المؤثرة في جسم ما، والتي ينجم عنها إزاحة هذا الجسم عن موضعه الأصلي. ونستطيع التعبير عن ذلك رياضيًّا كالتالي:

$$W = F_{\parallel} d$$

حيث $F_{\parallel}$ هي مركبة القوة الثابتة $\vec{\mathbf{F}}$ الموازية للإزاحة $\vec{\mathbf{d}}$.

كما يمكننا التعبير عن المعادلة السابقة كالتالي:

تعريف الشغل (للقوة الثابتة)

$$W = Fd\cos\theta \qquad \mathbf{(1-6)}$$

حيث F هي مقدار القوة الثابتة، و d هي مقدار إزاحة الجسم، أما θ فهي الزاوية المحصورة بين اتجاهي القوة والإزاحة (انظر الشّكل $1-6$). وبمقارنة المعادلتين السابقتين نستنتج أنّ $F\cos\theta\,(=F_{\parallel})$ هي المركبة $\vec{\mathbf{F}}$ الموازية للإزاحة $\vec{\mathbf{d}}$. حيث إن الشغل كمية عددية لها مقدار قد يكون سالب أو موجب.

وعندما يكون اتجاه القوة موازيًا تمامًا لاتجاه إزاحة الجسم، فإنّ الزاوية المحصورة بينهما تساوي صفرًا. وعليه، فإنّ: $\cos\theta = 1$، ويمكن إعادة صياغة معادلة $(1-6)$ لتكتب كما يلي: $W = Fd$. وعلى سبيل المثال، فعند دفع عربة مليئة بالمشتريات مسافة 50 m بواسطة قوة أفقية ثابتة مقدارها 30 N، فسيكون الشغل المبذول على العربة هو $30\ \text{N} \times 50\ \text{m} = 1500\ \text{N}\cdot\text{m}$.

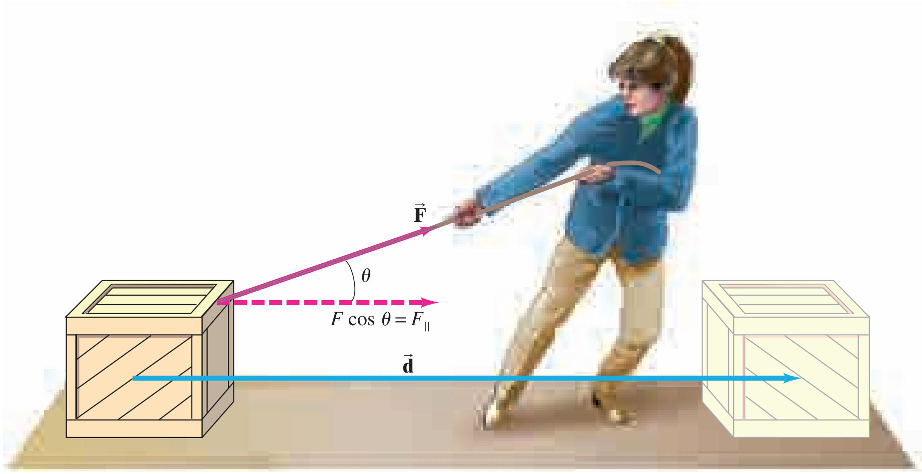
وحدة الشغل: الجول

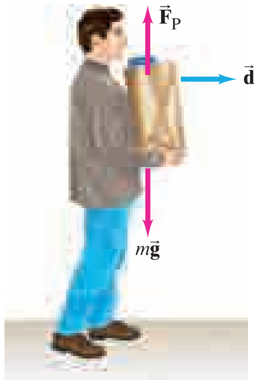
ولقد تمت إعادة تعريف وحدة الشغل $(\text{N}\cdot\text{m})$ طبقًا لنظام الوحدات الدولي SI لتصبح **الجول (Joule)** وتُكتب باختصار (J)، حيث إنّ $1\ \text{J} = 1\ \text{N}\cdot\text{m}$.

وتعطى وحدة الشغل بالإرج (erg) طبقًا لنظام (cgs) أو نظام cgs حيث إنّ $1\ \text{erg} = 1\ \text{dyne}\cdot\text{cm}$. وكذلك يُقاس الشغل حسب الوحدات البريطانية بالقدم – باوند (ft.lb).

وأمّا العلاقة بين الوحدات السابقة فهي كالتالي: $1\ \text{J} = 10^7\ \text{erg} = 0.7376\ \text{ft}\cdot\text{lb}$.

الشّكل 6 – 1: عند سحب الفتاة الصندوق بمحاذاة الأرض كما في الشكل، فإنّ الشغل المبذول بواسطة القوة $\vec{\mathbf{F}}$ يُعطى بالمعادلة التاليــة: $W = Fd\cos\theta$، حيث $\vec{\mathbf{d}}$ تمثل هنا إزاحة الصندوق عن موضعه الأصليّ.





الشكل 6–2 لا يبذل الرجل أي شغل على كيس المشتريات؛ لأنّ اتجاه القوة $\vec{F}_P$ عموديّ على اتجاه الإزاحة $\vec{d}$.

تنويه:
قوة لا تحدث شغلا

من الممكن أن يتأثر جسم ما بقوة لا تحدث شغلًا. فعلى سبيل المثال، لا يتمّ بذل أيّ شغلٍ على كيس المشتريات الثقيل عند إمساكه بواسطة اليدين وهما في وضع السكون. فعلى الرغم من تأثر كيس المشتريات بقوّة الرفع، فإنّ عدم إزاحة الكيس أفقيًا جعلت قيمة الشغل المبذول عليه مساويةً للصفر، $W = 0$. وبما أننا بحاجة إلى كلٍّ من القوة والإزاحة للحصول على الشغل، فإنّه لا يتمّ بذل أيّ شغل على الكيس الثقيل عند حمله والسير به أفقيًا بسرعةٍ ثابتةٍ كما في (الشكل 6 – 2). تعني السرعة الثابتة أنّ محصّلة القوى على الكيس في اتجاه الحركة تساوي صفرًا. إنّ الشخص الظاهر في(الشّكل 6 – 2) يرفع كيس المشتريات الثقيل بقوّةٍ عموديّةٍ إلى أعلى تعادل بالقيمة وتعاكس بالاتجاه قوة جذب الأرض للكيس. ومن الواضح أنّ هذه القوّة العموديّة لا تساهم في حركة الكيس الأفقيّة أو إزاحته. وعليه، فهي لا تبذل أيّ شغل على الكيس. إنّ تفسير هذه النتيجة الحتمية يكمن في طريقة تعريفنا للشغل بدلالة (المعادلة 6 – 1): $W = 0$، لأنّ $\theta = 90°$ و $\cos 90° = 0$. لذا، فإنّ القوة العموديّة على اتجاه الحركة لا تبذل أيّ شغل (لاحظ أنّه يتمّ بذل شغل على الكيس بواسطة قوّتي التسارع والتباطؤ الأفقيّتين لحظة بدء الحركة وعند التوقف).

تنويه:
اذكر ما إذا كان الشغل مبذولا على الجسم أو بوساطته.

ومن الضروري أن نحدّد ما إذا كان الجسم المعني هو الذي بذل الشغل أو أنّ الشغل قد بُذِلَ عليه. ومن المهمّ كذلك أن نحدّد ما إذا كان الشغل المبذول هو نتيجة تأثّر هذا الجسم بقوّةٍ ما، أم أنّه محصّلة لعدّة قوى تؤثّر فيه.

المثال 6-1 الشغل المبذول على عربة

يدفع شخص عربة كتلتها 50-kg مسافة 40 m بمحاذاة سطحٍ أفقي بواسطة قوّةٍ ثابتةٍ مقدارها $F_P = 100\ \text{N}$، تعمل بزاوية مقدارها $37°$ فوق الأفق كما في (الشّكل 6 – 3). فإذا كان السّطح الأفقي الخشن سببًا لقوّة الاحتكاك ذات المقدار $F_{fr} = 50\ \text{N}$، فحدّد كلًّا من: (أ) الشغل المبذول على العربة بواسطة كلّ قوّةٍ على حدة. (ب) المحصّلة الكليّة للشغل المبذول على العربة.

النّهج: يتمّ اختيار نظام الإحداثيّات بحيث يمكن اعتبار $\vec{x}$ متجهًا يمثل الإزاحة (40-m) بمحاذاة المحور السيني). إن القوى المؤثّرة في الجسم هي أربع قوى مختلفة في هذا المثال كما في (الشكل 6 – 3) وهي كما يلي: قوّة الدفع $\vec{F}_P$، وقوّة الاحتكاك مع السطح $\vec{F}_{fr}$، وقوّة جذب الأرض للعربة (الوزن) $m\vec{g}$، وقوّة دفع السطح العمودية إلى أعلى $\vec{F}_N$. وبذلك تكون محصلة القوى المؤثّرة في العربة هي محصّلة الجمع الاتجاهي لهذه القوى الأربع.

الحـــــلّ: (أ) إنّ الشغل المبذول بواسطة كلٍّ من القوّة العمودية وقوّة جذب الأرض للأجسام يساوي صفرًا، ويعود السبب في ذلك بالضرورة إلى الاتجاه العمودي لهاتين القوّتين مقارنةً مع اتجاه الإزاحة $\vec{x}$ ($\theta = 90°$ في المعادلة 6 – 1):

$$W_G = mgx\cos 90° = 0$$
$$W_N = F_N x\cos 90° = 0$$

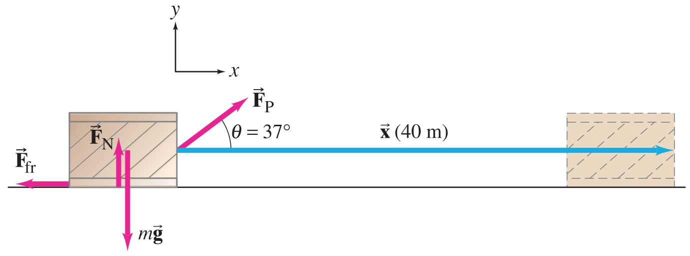
الشغل المبذول بواسطة $\vec{F}_P$ هو:

$$W_P = F_P x\cos\theta = (100\ \text{N})(40\ \text{m})\cos 37° = 3200\ \text{J}$$

الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك هو:

$$W_{fr} = F_{fr} x\cos 180° = (50\ \text{N})(40\ \text{m})(-1) = -2000\ \text{J}$$

إنّ الزاوية المحصورة بين كلٍّ من الإزاحة $\vec{x}$ والقوّة $\vec{F}_{fr}$ هي $180°$. وعليه، فإنّ اتجاه قوّة الاحتكاك يعاكس اتجاه الحركة ليكون الناتج شغلًا سالبًا مبذولًا على العربة.



الشّكل 6 – 3 (المثال 6 - 1). تُدفعُ عربةٌ كتلتها 50-kg بمحاذاة السطح.

ب) من الممكن حساب محصّلة الشغل بطريقتين متكافئتين هما:

(1) بناءً على تعريف الشغل ككميّة: عن طريق الجمع الجبري للشغل المبذول بواسطة القوى المختلفة حيث W_{net} هي محصّلة الشغل الكلّيّ المبذول بواسطة القوى المؤثّرة جميعها في الجسم.

$$W_{net} = W_G + W_N + W_P + W_{fr}$$
$$= 0 + 0 + 3200\text{ J} - 2000\text{ J}$$
$$= 1200\text{ J}$$

W_{net} هو الشغل المبذول بواسطة القوى المؤثرة جميعها في الجسم.

(2) عن طريق تحديد محصّلة القوى الاتجاهيّة المؤثّرة في الجسم، ومن ثم أخذ مركبتها المحاذية لاتجاه الإزاحة:

$$(F_{net})_x = F_P \cos\theta - F_{fr}$$

وبذلك تكون محصّلة الشغل

$$W_{net} \equiv (F_{net})_x x = (F_P \cos\theta - F_{fr})x$$
$$= (100\text{ N} \cos 37° - 50\text{ N})(40\text{ m})$$
$$= 1200\text{ J}$$

تنعدم الإزاحة في الاتجاه العمودي (الاتجاه العادي). لذا، لا يوجد شغلٌ في هذا الاتجاه .

تنويه: شغل سالب

لقد رأينا في (المثال 6 – 1)كيف أنّ قوّة الاحتكاك تبذل شغلًا سالبًا. وعلى نحو عام، يُعدّ الشغل المبذول بواسطة قوّة ما سالبًا عندما تؤثّر القوّة (أو مركبة القوة، $F_{\parallel}$) باتجاه معاكس لاتجاه الحركة . ونستطيع أن نرى بوضوح أنّ القوّة التي تبذل شغلًا سالبًا يمكن أن تعمل على إبطاء الجسم إذا كانت هي القوّة الوحيدة المؤثّرة فيه. أمّا عندما يكون الشغل موجبًا، فإنّ القوّة المؤثّرة تعمل بالطبع على زيادة سرعة الجسم.

تمرين أ: تمّ سحب صندوقٍ بمحاذاة السطح بواسطة قوة $\vec{F}_P$ تعمل زاوية θ مع الأفقي كما في (الشكل 6 – 1 أو 6 – 3). عندما نُبقي قيمة القوّة $\vec{F}_P$ ثابتة ونزيد قيمة الزاوية θ، فهل يبقى الشغل المبذول بواسطة $\vec{F}_P$: (أ) ثابتًا كما هو؟ أم (ب) يزداد؟ أم (جـ) يقلّ؟ أم (د) يزداد أولا، ومن ثمّ يقلّ؟

طريقة حل المسائل: الشّغل

1. ارسم **مخطط جسمٍ حرٍّ** مظهرًا القوى المؤثّرة جميعها في الجسم المراد دراسته.

2. **اختر نظامًا إحداثيًّا** xy مناسبًا. من المناسب أن تختار اتجاه أحد المحاور موازيًا لاتجاه إحدى القوى المؤثّرة في الجسم المتحرك، أو موازيًا لاتجاه الحركة. [أي من الممكن اختيار اتجاه أحد المحاور موازيًا لاتجاه حركة الجسم على السطح المائل، وبذلك يكون المحور موازيًا للسطح المائل.]

3. طبّق **قوانين نيوتن** لتحديد أيّ قوّةٍ مجهولة.

4. أوجد **قيمة الشغل المبذول بواسطة أيّ قوّة** باستخدام $W = Fd\cos\theta$ مع مراعاة كون الشغل سالبًا عندما تعاكس القوّة اتجاه الإزاحة.

5. لحساب **محصّلة الشغل** المبذول على الجسم؛ عليك أن: (أ) تعمل على إيجاد الشغل المبذول بواسطة كلّ قوّة على حدة، ومن ثمّ تقوم بجمعها حسابيًّا. أو (ب) تعمل على إيجاد محصلة القوى المؤثرة في الجسم F_{net}، ومن ثَمّ تحسب محصلة الشغل المبذول، في حالة القوّة الثابتة، فتكون: $W_{net} = F_{net}\,d\cos\theta$.

المثال 6-2 الشغل المبذول على حقيبة الظهر:

حدّد كلًّا من: (أ) مقدار الشغل الذي يجب أن يبذله متسلّق جبال على حقيبة ظهر كتلتها 15.0-kg عند حملها إلى قمة ارتفاعها $h = 10.0$ m كما في (الشكل 6 − 4 أ). (ب) الشغل المبذول على حقيبة الظهر بواسطة الجاذبية. (جـ) محصّلة الشغل المبذول على حقيبة الظهر. وللسهولة: اهمل الاحتكاك، وافرض أن الحركة تتم بسرعة ثابتة (اهمل التسارع).

النهج: اتبع الطريقة المقترحة للحل أعلاه خطوة خطوة.

الحـــل:

1. ارسم مخطط جسم حرّ. تظهر القوى المؤثرة في حقيبة الظهر في (الشكل 6 − 4 ب)اتجاه قوّة جذب الأرض $m\vec{g}$ إلى الأسفل، والقوّة التي يجب أن يؤثّر بها المتسلّق إلى الأعلى، $\vec{F}_H$، ليدعم حقيبة الظهر. وبما أنّ المتسلّق يتحرك بسرعة ثابتة، فإنّه لا يؤثّر بأيّ قوى أفقية في الحقيبة نتيجة انعدام تسارعه.

2. اختر نظامًا إحداثيًّا. بما أننا نهتم بالحركة العمودية لحقيبة الظهر، فسنختار الاتجاه الصّاديّ الموجب إلى أعلى.

3. طبّق قوانين نيوتن. إنّ تطبيق قانون نيوتن الثاني على حقيبة الظهر بالاتجاه العمودي يعطي:

$$\Sigma F_y = ma_y$$
$$F_H - mg = 0$$

وعليه، فإنّ

$$F_H = mg = (15.0\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2) = 147\,\text{N}$$

4. أوجد قيمة الشغل المبذول بواسطة القوة. (أ) لحساب الشغل المبذول على حقيبة الظهر: نكتب (المعادلة 6 − 1) كالتالي :

$$W_H = F_H(d\cos\theta)$$

ونلاحظ (الشكل 6 − 4 أ) أنّ $h = d\cos\theta$. لذا، فإنّ الشغل المبذول بواسطة المتسلق

$$W_H = F_H(d\cos\theta) = F_H h = mgh$$
$$= (147\,\text{N})(10.0\,\text{m}) = 1470\,\text{J}$$

لاحظ أنّ الشغل المبذول لا يعتمد على زاوية ميل التلة θ، ولكنه يعتمد على التغيير في مقدار الارتفاع فقط . أي أنّ المتسلق سيبذل الشغل نفسه عند رفعه حقيبة الظهر إلى ارتفاع h.

(ب) الشغل المبذول على حقيبة الظهر بواسطة الجاذبية الأرضية (قوة جذب الأرض) من (المعادلة 6 − 1) و (الشكل 6 − 4 جـ) هي

$$W_G = F_G d\cos(180° - \theta)$$

وبما أنّ

$$\cos(180° - \theta) = -\cos\theta$$

إذن

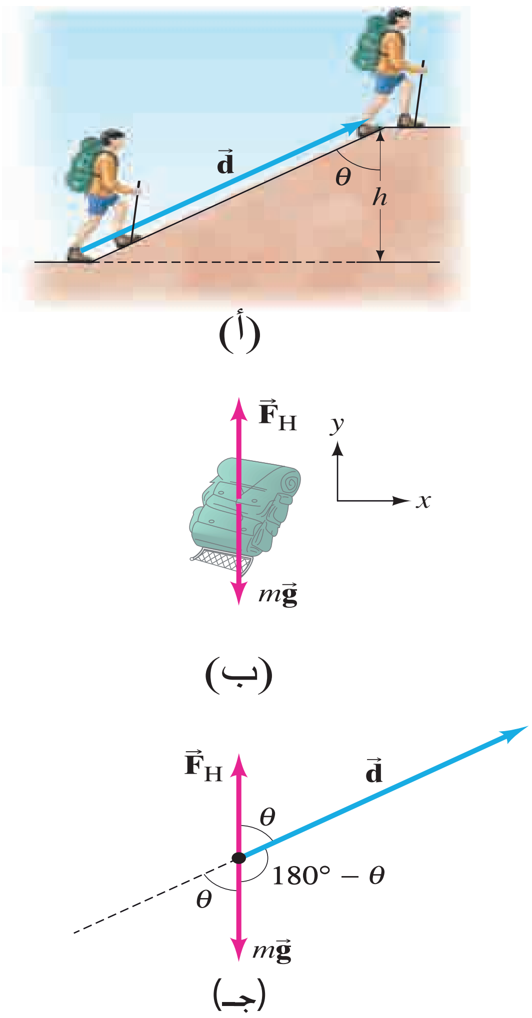
$$W_G = F_G d(-\cos\theta) = mg(-d\cos\theta)$$
$$= -mgh$$
$$= -(15.0\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2)(10.0\,\text{m}) = -1470\,\text{J}$$

ملحوظة: لا يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبية الأرضية (السالب هنا) على زاوية الميل، ولكنه يعتمد على مقدار ارتفاع التلة h فقط. ويمكن تفسير ذلك بناءً على الاتجاه العمودي لتأثير قوة جذب الأرض للأجسام. ولهذا، فإنّ المركبة العمودية للإزاحة هي المركبة الوحيدة التي تساهم في بذل الشغل.

5. احسب محصلة الشغل المبذول. (أ) إنّ **محصلة** الشغل المبذول على حقيبة الظهر هي نتيجة حتمية لأنّ $W_{net} = 0$ محصلة القوى المؤثرة في الحقيبة تساوي صفرًا (تسارع الحقيبة يساوي صفرًا). ونستطيع كذلك تحديد محصلة الشغل المبذول بجمع الشغل المبذول بواسطة كلّ قوة على حدة

$$W_{net} = W_G + W_H = -1470\,\text{J} + 1470\,\text{J} = 0$$

ملحوظة: على الرغم من أنّ **محصّلة** الشغل المبذول على حقيبة الظهر تساوي صفرًا، فإنّ المتسلّق يبذل شغلًا على حقيبة الظهر يعادل 1470 J الطاقة جميعها



الشكل 6 − 4 (المثال 6 - 2) .

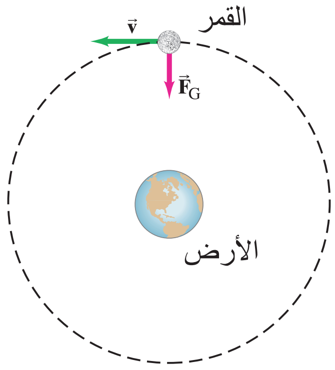
حل المسائل

يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبية على الارتفاع (ارتفاع التلة)، ولا يعتمد على زاوية ميل المنحدر.

المثال المفاهيمي 6-3 هل تبذل الأرض شغلًا على القمر؟

يدور القمر حول الأرض في مدار يكاد يكون كرويًّا تحت تأثير قوّةٍ جذب الأرض له. فهل تبذل الجاذبية الأرضية: (أ) شغلًا موجبًا على القمر؟ أم (ب) شغلًا سالبًا على القمر؟ أم (جـ) أيّ شغل على القمر؟

الحل: تعمل قوة الجاذبية الأرضية على جذب (الأجسام) القمر باتجاه الأرض، وبذلك توفر تسارعًا مركزيًّا إلى الداخل، وباتجاه موازٍ لامتداد نصف قطر مدار القمر حول الأرض. ويكون اتجاه إزاحة القمر عند كلّ لحظة باتجاه مماس الدائرة، وباتجاه سرعة القمر المتجهة نفسها؛ أي عموديًّا على كلّ من نصف قطر المسار واتجاه قوة الجاذبية الأرضية. وعليه، فإنّ الزاوية المحصورة بين اتجاه القوّة $\vec{\mathbf{F}}_G$ والإزاحة اللحظية للقمر هي $90°$. ولذلك، فإنّ الشغل المبذول بواسطة الأرض على القمر خلال دورانه حولها يساوي صفرًا $(\cos 90° = 0)$. وهذا هو السبب في أنّ القمر والأقمار الصناعية جميعها تستطيع البقاء في مداراتها حول الأرض دون الحاجة إلى صرف أيّ كمّيةٍ من الوقود؛ أي أنّها لا تحتاج إلى بذل أيّ شغل ضد قوّة الجاذبيّة الأرضيّة وهي في مداراتها.



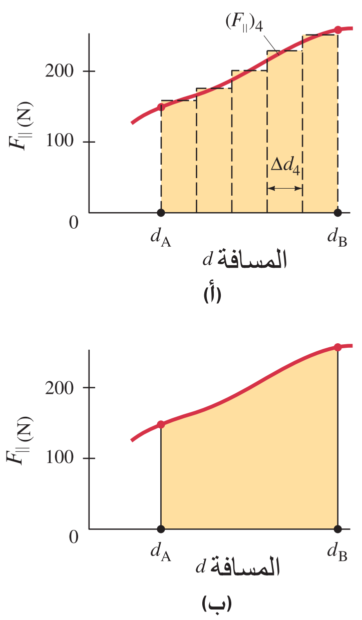
الشكل 6 – 5 (المثال 6 - 3).

* 6-2 الشغل المبذول بواسطة قوة متغيرة

يمكن حساب الشغل المبذول على جسم ما بواسطة قوة ثابتة باستخدام (المعادلة 6 – 1). وتكون القوّةُ المسبّبة للشغل متغيّرةً في حالاتٍ كثيرةٍ مقدارًا أو اتجاهًا. وعلى سبيل المثال، الشغل الناتج من ابتعاد صاروخ عن سطح الأرض؛ فهو شغل متغير ناتج من تغير قوة جذب الأرض للصاروخ التي تتناسب عكسيًّا مع مربع بُعد الصاروخ عن مركز الأرض. وهناك أمثلة أخرى للشغل الناجم عن قوّةٍ متغيّرة، مثل قوة إرجاع الزنبرك التي تزداد بزيادة مقدار استطالته، وكذلك الشغل المتغير الناجم عن قوة دفع صندوق أو عربة إلى أعلى تلّة.

يمكن حساب الشغل الناتج من القوّة المتغيّرة بالرسم. وتستخدم الخطوات نفسها التي تم اتباعها في السابق لحساب الإزاحة عند معرفة السرعة المتجهة بدلالة الزمن (البند 2–8). ولحساب الشغل الناتج من القوة المتغيرة: نرسم $F_\parallel (= F\cos\theta)$، مركبة $\vec{\mathbf{F}}$ الموازية لاتجاه الحركة عند أيّ نقطة) بدلالة المسافة d، كما في (الشكل 6– 6 أ). تقسم المسافة إلى مقاطع صغيرة Δd، ويمثل متوسط $F_\parallel$ لكلّ مقطع بخطّ متقطع ليكون الشغل المرتبط بكلّ مقطع هو $\Delta W = F_\parallel \Delta d$، وهي مساحة المستطيل ذي العرض Δd والارتفاع $F_\parallel$. وعليه، فإنّ الشغل اللازم لإزاحة جسم ما مسافة كلية مقدارها $d = d_B - d_A$ هو مجموع مساحات المستطيلات (وعددها 5 كما هو موضح في الشكل 6– 6أ)، وعادةً ما يتم تقدير قيمة $F_\parallel$ المتوسطة لكلّ مقطع كي تكون قيمة الشغل التقريبية المقدرة مقبولة. وعندما يتم تقسيم المسألة إلى عدد أكبر من المقاطع، فإنّ ذلك يؤدي إلى صغر قيمة Δd بهدف إيجاد شغل مبذول أكثر دقة. وعندما تقترب قيمة Δd من الصفر، تقترب قيمة المساحة الكلية للمستطيلات ذات السمك الضئيل جدًّا إلى مقدار المساحة تحت المنحنى (الشكل 6 – 6 ب). وعليه، فإنّ الشغل الناتج من إزاحة جسم ما بواسطة قوّةٍ متغيّرةٍ بين نقطتين يعادل المساحة تحت منحنى $F_\parallel$ و d بين تلك النقطتين.

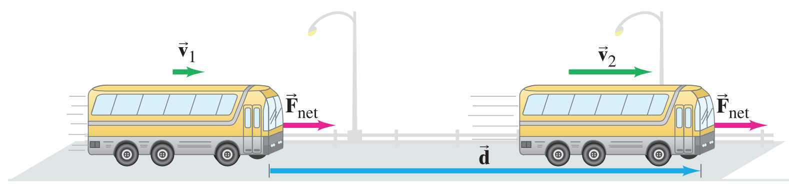
الشكل 6 – 6 (المثال 6 - 3).
يمكن حساب الشغل المبذول بواسطة القوة F عن طريق مايلي: (أ) جمع مساحات المستطيلات. (ب) حساب المساحة تحت المنحنى $F_\parallel$ بدلالة d.



6-3 الطّاقة الحركيّة، ومبدأ الشّغل والطّاقة

تُعدّ الطاقة من أهم المبادئ في العلوم. وعلى الرغم من ذلك، فلا يمكننا إعطاء وصف شامل للطاقة بإيجاز. إلا أنّه من الممكن ببساطة تعريف كلّ نوع من أنواع الطاقة على حدة. وسنعرّف في هذا الفصل الطاقة الحركيّة الانتقالية وبعض أشكال طاقة الوضع. وسنختبر في الفصول القادمة أنواعًا مختلفةً من الطاقة كتلك المرتبطة بالحرارة (الفصلان الرابع عشر والخامس عشر). الأمر الحاسم لأنواع الطاقة جميعها هو مجموعها الكلي "الطاقة الكلية"، وهي كميّة ذات قيمة ثابتة إذا تم قياسها قبل حدث ما ومقارنة ذلك بمقدارها بعد الحدث؛ أي أنّ الطاقة ككميّة هي محفوظة. وسنعرّف الطاقة هنا بالطريقة التقليديّة لتخدمنا في هذا الفصل تحديدًا على أنها القدرة على بذل الشغل. يُعدّ هذا التعريف البسيط غير دقيق تمامًا، وليس صالحًا لوصف أنواع الطاقة جميعها.* لكنه يُعدّ تعريفًا مناسبًا وصالحًا للاستخدام عند التعامل مع الطاقة الميكانيكية، كما في هذا الفصل؛ ليقدّم ربطًا أساسيًّا بين الشغل والطاقة.

* هناك أيضًا أنواعٌ اخرى من الطاقة غير قادرة على بذل شغل. كتلك المرتبطة بالحرارة وسيتم التعرّض لها ومناقشتها في (الفصل 15).



الشكل 6 − 7 قوة محصلة ثابتة F_{net} تعمل على تسريع حافلة من سرعة v_1 إلى سرعة v_2 خلال إزاحة مقدارها d. محصلة الشغل المبذول هي $W_{net} = F_{net}\, d$.

وسنعرف الآن، ونناقش أحد الأشكال الأساسية للطاقة، وهي الطاقة الحركية.
يستطيع جسم متحرّك أن يبذل شغلًا على جسم آخر عندما يصطدم به. ومثال ذلك، اصطدام قذيفة مدفعية بحائط فتسقطه، ومطرقة تدقّ مسمارًا داخل لوح من الخشب فتدفعه إلى داخل هذه القطعة. ففي كلتا الحالتين السابقتين، يبذل الجسم المتحرك شغلًا على جسم ثابت لإزاحة الجسم الثابت عن موضعه الأصلي. فالجسم المتحرك قادر على بذل شغل. ولهذا يُقال إنّه يمتلك طاقة. وتُسمّى هذه الطاقة المرتبطة بالحركة **الطاقة الحركية**، وهي مشتقّة من كلمة يونانية بمعنى الحركة.

وللحصول على تعريف كمّيّ لهذه الطاقة، سنتناول جسمًا صلبًا كتلته m يسير في خطّ مستقيم بسرعة ابتدائية مقدارها v_1. فعندما تؤثّر في الجسم قوّة محصّلة ثابتة F_{net} باتجاه موازٍ لحركته وتسبب إزاحةً مقدارها d كما في (الشكل 6−7)، فإنّها تعمل على تسريعه بانتظام إلى سرعة v_2، لتصبح محصلة الشغل المبذول على الجسم $W_{net} = F_{net}\, d$. نستخدم قانون نيوتن الثاني، $F_{net} = ma$، وكذلك (المعادلة 2−11 ج) التي تُكتب الآن كالتالي: $v_2^2 = v_1^2 + 2ad$، بحيث تمثل v_1 السرعة الابتدائية، في حين تمثّل v_2 السرعة النهائية. ونحلّ المعادلة السابقة للحصول على التسارع، a، في (المعادلة 2−11 ج)،

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2d}$$

ونعوّض في $F_{net} = ma$ ، ونحدد الشغل المبذول كما يلي:

أو

$$W_{net} = F_{net}\, d = mad = m\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2d}\right)d = m\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2}\right) \qquad \textbf{(2 − 6)}$$

$$W_{net} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

تُعرّف الكميّة $\frac{1}{2}mv^2$ بالطاقة الحركيّة الانتقالية (KE) للجسم:

$$\mathrm{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad \textbf{(3 − 6)}$$

تعريف الطاقة الحركية

(تمّت هنا إضافة كلمة "انتقالية" إلى الطاقة الحركية ليتم تمييزها عن الطاقة الحركية الدورانية التي سنشرحها في الفصل الثامن). كما يمكن تطبيق المعادلة 6 − 2 على جسم يتحرك انتقاليًا في ثلاثة أبعاد تحت تأثير قوى متغيرة، على الرغم من أنّ هذه المعادلة تمّ اشتقاقها أصلًا لتصف حركة جسم يتأثر بقوة ثابتة في بُعدٍ واحد.
ونكتب (المعادلة 6 − 2)كما يلي:

$$W_{net} = \mathrm{KE}_2 - \mathrm{KE}_1$$

أو:

$$W_{net} = \Delta\mathrm{KE} \qquad \textbf{(4 − 6)}$$

مبدأ الشغل والطاقة

تُعدّ (المعادلة 6 − 4 أو المعادلة 6 − 2) نتيجة مهمة تُعرف بمبدأ الشغل والطاقة. ويمكن وصفها بما يلي:

محصّلة الشغل المبذول على جسم ما تعادل التغيّر في طاقة الجسم الحركية.

مبدأ الشغل والطاقة

لاحظ أنّه قد استخدم قانون نيوتن الثاني، $F_{net} = ma$ وحيث تمثل F_{net} محصلة القوى العاملة والمؤثرة في الجسم جميعها. لذا، فإن مبدأ الشغل والطاقة ينطبق عندما تكون W هي الشغل الكلّي المبذول على الجسم: أي الشغل المبذول بواسطة القوى العاملة المؤثرة في الجسم جميعها.

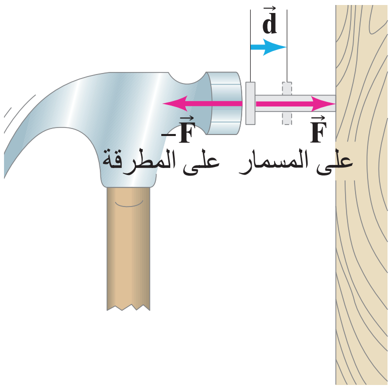
تنويه:
الشغل والطاقة صحيحة فقط باستخدام الشغل الكلي.

يُعدّ مبدأ الشغل والطاقة طريقةً ناجحةً في إعادة صياغة قوانين نيوتن. ويخبرنا هذا المبدأ أنه إذا تم بذل محصلة شغل (موجب) W على جسم ما، فإنّ طاقة الجسم الحركية تزداد بمقدار W. ويظلّ هذا المبدأ صالحًا للتطبيق في الاتجاه المعاكس؛ أي إذا كانت محصلة الشغل المبذول على الجسم سالبة، فإنّ طاقة الجسم الحركية تتناقص بمقدار W. أي أنّ تأثير محصلة قوى على جسم ما باتجاه معاكس لاتجاه حركته يعمل على تقليل سرعته وطاقته الحركية. ومثال ذلك المطرقة المتحركة في (الشكل 6−8)والتي تعمل على طرق المسمار. وتعمل القوة المحصلة على المطرقة $-\vec{F}$ في (الشكل 6−8) ، التي تم افتراضها ثابتة للسهولة) باتجاه اليسار، في حين أن إزاحة المطرقة $\vec{d}$ فتعمل في اتجاه اليمين. ولذلك، فإنّ الشغل الكلي المبذول على المطرقة، $W_h = (F)(d)(\cos 180°) = -Fd$، تكون سالبة، وتعمل على تناقص الطاقة الحركية للمطرقة (غالبًا إلى الصفر).

يبين (الشكل 6 – 8) كيف يمكن اعتبار الطاقة القدرة على بذل شغل. تعمل المطرقة، وهي تتباطأ، شغلاً موجبًا على المسمار: إذا أثّر المسمار بقوة $-\vec{F}$ في المطرقة لإبطائها، فإنّ المطرقة ستؤثّر في المسمار بقوة $+\vec{F}$ (قانون نيوتن الثالث) من خلال المسافة d. وعليه، يكون الشغل المبذول على المسمار بواسطة المطرقة هو: $W_n = (+F)(+d) = Fd$، وهو موجب. ويكون الشغل المبذول على المسمار $W_n = Fd = -W_h$ يعادل سالب الشغل المبذول على المطرقة؛ أي أنّ انخفاض قيمة الطاقة الحركية للمطرقة W_n يعادل قيمة الشغل التي تستطيع المطرقة القيام به على جسم آخر، وهو متوافق مع القدرة على بذل شغل. في حين تتناسب الطاقة الحركية الانتقالية $(=\frac{1}{2}mv^2)$ طرديًّا مع كتلة الجسم ومربّع سرعته. ولذلك، فعند مضاعفة الكتلة تتضاعف الطاقة الحركية. أمّا عند مضاعفة السرعة، فإنّ الطاقة الحركية تصبح أربعة أضعاف ما كانت عليه لتتضاعف قدرتها على بذل الشغل إلى أربعة أضعاف.

لنلخص الآن العلاقة بين الشغل والطاقة الحركية (المعادلة 6–4) بما يلي: تزداد الطاقة الحركية للجسم إذا كانت محصلة الشغل المبذول على الجسم موجبة. ولكن إذا كانت محصّلة الشغل W المبذول على الجسم سالبة، فإنّ طاقة الجسم الحركية يجب أن تقلّ. أما إذا كانت محصّلة الشغل W المبذول على الجسم تساوي صفرًا، فإنّ الطاقة الحركية تبقى ثابتة (وهذا يدل على أنّ سرعة الجسم تبقى مقدارًا ثابتًا).

ونتيجة للعلاقة المباشرة بين الشغل والطاقة الحركية (المعادلة 6–4)، فإنّ وحدات الطاقة هي نفسها وحدات الشغل وهي: الجول حسب النظام الدولي SI، والإرج حسب نظام (cgs)، والقدم – باوند حسب النظام البريطاني. وكالشغل تمامًا، فإنّ الطاقة الحركية هي كميّة قياسيّة. الطاقة الحركيّة الكليّة لمجموعة من الأجسام هي مجموع الطاقة الحركية لهذه الأجسام كلّ على حدة.



الشكل 6 - 8 تعمل مطرقة متحركة على دقّ مسمار، ثم تتوقف كلّيًا. تؤثر المطرقة بقوة F في المسمار خلال فترة تلامسهما؛ ويؤثر المسمار بقوة في المطرقة (قانون نيوتن الثالث). ويُعدّ الشغل المبذول من المسمار على المطرقة موجبا ($W_n = Fd > 0$). أما الشغل المبذول بواسطة المطرقة على المسمار فهو سالب ($W_h = -Fd$).

تزداد KE إذا كان $If\ W_{net} > 0$
ولكنها تقلّ KE إذا كان $If\ W_{net} < 0$

وحدة الطاقة: الجول

المثال 6-4 KE والشغل المبذول على كرة بيسبول.

قذفت كرة بيسبول كتلتها 145-g فاكتسبت سرعة مقدارها 25 m/s، احسب مايلي:
(أ) طاقة الكرة الحركية. (ب) محصّلة الشغل المبذول على الكرة لإكسابها هذه السرعة، إذا بدأت الحركة من السكون.

النّهج: نبدأ بتعريف الطاقة الحركية (المعادلة 6–3)، ومن ثَمَّ نستخدم مبدأ الشغل والطاقة (المعادلة 6 – 4).

الحلّ: (أ) الطاقة الحركية لكرة البيسبول بعد قذفها هي:

$$\mathrm{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}(0.145\,\mathrm{kg})(25\,\mathrm{m/s})^2 = 45\,\mathrm{J}$$

(ب) بما أنّ الطاقة الحركية الابتدائية كانت تعادل صفرًا، فإنّ الشغل المبذول يعادل الطاقة الحركية النهائية ومقدارها 45 J.

المثال 6-5 شغل مبذول على سيارة يزيد من طاقتها الحركية KE .

ما مقدار محصّلة الشغل اللازم بذله لتسريع سيارة كتلتها 1000-kg من 20 m/s إلى 30 m/s (الشكل 6–9)؟

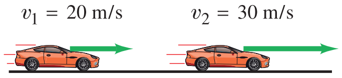
النّهج: لكي نستطيع استخدام مبدأ الشغل والطاقة ولتبسيط الوضع: سنتعامل مع السيارة وكأنها جسيم جاسىء (صلب) متماسك.

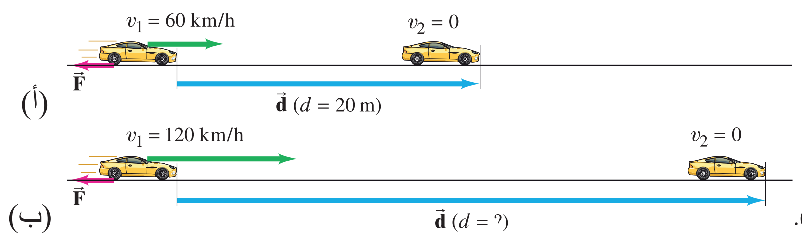
الحــلّ: محصّلة الشغل المبذول تساوي الزيادة في الطاقة الحركية:

$$W = \mathrm{KE}_2 - \mathrm{KE}_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$
$$= \tfrac{1}{2}(1000\,\mathrm{kg})(30\,\mathrm{m/s})^2 - \tfrac{1}{2}(1000\,\mathrm{kg})(20\,\mathrm{m/s})^2 = 2.5\times10^5\,\mathrm{J}$$

ملحوظة: قد ترغب في محاولة حلّ هذا المثال عن طريق إيجاد القوة باستخدام (المعادلة 6–1) ، ولكنك لن تصل إلى النتيجة المرجوة باستخدام هذه الطريقة، ويعود السبب في ذلك إلى عدم وجود أيّ معلومات عن زمن تسارع السيارة، ولا عن المسافة المقطوعة خلال التسارع. لذا، يمكن لقوّة كبيرةٍ أن تعمل خلال إزاحةٍ صغيرةٍ أو أن تعمل قوّةً صغيرةً خلال إزاحةٍ كبيرةٍ لتبذلا الشغل ذاته.

الشّكل 6-9 المثال 6-5.





الشكل 6 - 10 (المثال 6 - 6).

المثال المفاهيمي 6-6

الشغل المطلوب لإيقاف السيارة. تحتاج مركبة تسير بسرعة 60 km/h إلى مسافة $d = 20$ m لكي تتوقّف توقّفًا تامًا (الشكل 6–10أ). ما المسافة التي تحتاج إليها المركبة للوقوف إذا كانت تتحرك بضعف سرعتها الابتدائية السابقة؛ أي بسرعة 120 km/h (الشّكل 6–10ب)؟ افرض أنّ قوة الإيقاف العظمى لا تعتمد على مقدار السرعة.

الحل: بما أنّ قوّة الإيقاف F، تُعدّ ثابتة تقريبًا، فإنّ الشغل اللازم بذله لإيقاف المركبة Fd يتناسب طرديًا مع المسافة المقطوعة. وعندما نطبق مبدأ الشغل والطاقة، علمًا أنّ اتجاه $\vec{\mathbf{F}}$ هو عكس اتجاه $\vec{\mathbf{d}}$ وأنّ السرعة النهائية للمركبة هي صفر، فسنحصل على ما يلي:

$$W_{\text{net}} = Fd\cos 180° = -Fd$$

إذن

$$-Fd = \Delta \text{KE} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

$$= 0 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

وعليه، بما أنّ القوّة والكتلة كمّيتان ثابتتان، فإنّ مسافة الإيقاف d ستزداد طرديًّا مع مربّع السرعة:

$$d \propto v^2$$

إذا تضاعفت السرعة الابتدائية للمركبة، فستصبح مسافة الإيقاف $(2)^2 = 4$ أكبر بأربعة أضعاف سابقتها أو تعادل 80 m.

تطبيق الفيزياء

مسافة إيقاف السيارة ∝ مربع السرعة الابتدائية

التمرين ب: هل يمكن للطاقة الحركية أن تكون مقدارًا سالبًا؟

6-4 طاقة الوضع

طاقة الوضع

لقد ناقشنا حتى الآن طاقة الجسم المرتبطة بحركته، والتي سُمّيت بالطاقة الحركيّة. والآن، سنتكلّم عن **طاقة وضع الأجسام أو الجسم**، التي ترتبط بمكان وجوده، أو تشكيله مقارنةً بما يحيط به أو حوله. ويمكن تعريف أنواع عدّة من طاقة الوضع (PE) بحيث يرتبط كلّ نوع بقوّةٍ ما.

ويُعتبر نابض الألعاب التي تدار بواسطتها مثالًا على جسم له طاقةً كامنة. وقد اختزنت هذه الطاقة الكامنة في النابض من خلال الشغل الذي يبذله مشغل اللعبة عند لفه للنابض. وعند استرخاء النابض، فإنّه يؤدّي بقوّةٍ عملًا لجعل اللعبة تتحرك.

طاقة الوضع الناتجة من الجاذبية الأرضية

ربما تُعدّ طاقة جذب الأرض للأجسام من **أكثر طاقات الوضع** شيوعًا. فعلى سبيل المثال، سيمتلك حجر البناء طاقة وضعٍ جديدة مرتبطة بموقعه الجديد ناجمة عن رفعه من وضعه الأصلي. ولكي يستطيع هذا الحجر أن يبذل شغلًا عندما يُترك ليسقط من موضعه باتجاه سطح الأرض، ولكي يكون هذا الشغل ناتجًا من قوة جذب الأرض له، دعونا الآن نختبر شكل طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض لجسم موجود بالقرب من سطح الأرض. ولكي يتم رفع جسم كتلته m عن سطح الأرض؛ يجب أن يؤثر فيه بقوة mg قد تكون كتلك الناتجة من تأثير ذراع شخصٍ ما.

ولرفع الحجر من موضعه الأصلي رأسيًّا وبلا تسارع مسافة h، من موضع y_1 إلى موضع y_2 كما في الشكل 6−11 (تم اختيار الاتّجاه الموجب إلى الأعلى)؛ يجب أن يبذل شخص شغلًا يعادل حاصل ضرب القوة الخارجية اللازمة، $F_{ext} = mg$ إلى الأعلى، بالإزاحة الرأسية h. حيث إنّ

$$W_{ext} = F_{ext}\, d \cos 0° = mgh$$
$$= mg(y_2 - y_1) \quad \text{(6 – 5 أ)}$$

تؤثّر الجاذبية الأرضية في الجسم أيضًا عندما يتحرك من y_1 إلى y_2، وتبذل شغلا عليه يساوي

$$W_G = F_G\, d \cos\theta = mgh \cos 180°$$

وهنا $\theta = 180°$ لأنّ اتّجاه كلٍّ من $\vec{F}_G$ و $\vec{d}$ متعاكسان. وعليه، فإنّ

$$W_G = -mgh$$
$$= -mg(y_2 - y_1) \quad \text{(6 – 5 ب)}$$

وإذا تُرك الجسم من السكون ليسقط سقوطًا حرًّا من ارتفاع h تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة، فإنّه سيكتسب سرعةً تعطى بالعلاقة $v^2 = 2gh$ (المعادلة 2 − 11 ج). وتصبح طاقته الحركيّة، $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2gh) = mgh$

وإذا اصطدم بسطح الأرض، فسيكون قادرًا على بذل شغل يعادل mgh (مبدأ الشغل − الطاقة). لذا، فإنّ رفع جسم كتلته m مسافة h يحتاج إلى شغلٍ مقداره mgh (المعادلة 6−5أ). وعندما يصبح الجسم على ارتفاع h، يصبح قادرًا على بذل شغل مقداره mgh.

وبناءً على ما سبق، نستطيع تعريف **طاقة الوضع** الناتجة من جذب الأرض للجسم، كحاصل ضرب وزن الجسم mg بارتفاعه y فوق مستوًى مرجعي (مثل سطح الأرض):

$$PE_{grav} = mgy \quad \text{(6 – 6)}$$

كلّما ارتفع الجسم عن سطح الأرض، زادت طاقة وضعه الناتجة من جذب الأرض له. وعند ربط (المعادلة 6−5 أ بالمعادلة 6−6)، سنحصل على

$$W_{ext} = mg(y_2 - y_1)$$
$$W_{ext} = PE_2 - PE_1 = \Delta PE \quad \text{(6 – 7 أ)}$$

أي أنّ الشغل المبذول بواسطة قوّةٍ خارجيّةٍ لنقل جسم كتلته m من نقطة 1 إلى نقطة 2 (بلا تسارع) يُعادل التغيّر في طاقة الوضع بين الموضعين 1 و 2.

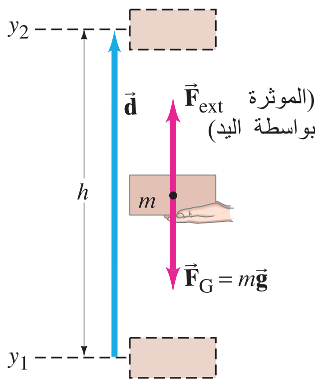
وبطريقة بديلة، نستطيع التعبير عن التغيّر في طاقة الوضع، ΔPE، بدلالة الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضية نفسها : بدءًا من (المعادلة 6−5 ب)، نحصل على

$$W_G = -mg(y_2 - y_1)$$
$$W_G = -(PE_2 - PE_1) = -\Delta PE \quad \text{(6 – 7 ب)}$$

أي أنّ الشغل المبذول بواسطة الجاذبية الأرضية على جسم كتلته m خلال انتقاله من النقطة 1 إلى النقطة 2 يعادل سالب التغيّر في طاقة الوضع بين الموضعين 1 و 2.

ترتبط طاقة الوضع بقوّة، والقوّة المؤثّرة في جسمٍ ما عادةً ما تكون ناتجةً من جسمٍ آخر. لذلك تُعدّ طاقة الوضع خاصيّة للنظام ككلّ. والتغيّر في طاقة وضع جسمٍ ما تمّ رفعه مسافة y فوق سطح الأرض هي mgy. ويتكون النظام في هذه الحالة من الجسم والأرض، وصفتاهما المهمّتين هنا هما: كتلة الجسم (m)، والجاذبيّة الأرضيّة (g).

تعتمد طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض للأجسام على الارتفاع الرأسي **للأجسام فوق مستوى مرجعي** (المعادلة 6−6). ففي بعض الحالات، يختلط علينا الأمر ونتساءل عن المستوى المرجعي للارتفاع y. وعلى سبيل المثال، نستطيع أن نتساءل، ما المستوى المرجعي لكتاب رُفع عاليًا فوق طاولةٍ ما، هل هو مستوى سطح الطاولة؟ أم سطح الأرض؟ أم أنّ هناك نقطةً مرجعيّةً أخرى؟



الشكل 6 – 11 شخص يؤثر إلى الأعلى بقوة $F_{ext} = mg$ ليرفع حجرًا من y_1 إلى y_2.

طاقة الوضع PE الناتجة من الجاذبية الأرضية

تنويه:

ترتبط طاقة الوضع بنظام لا بجسم بمفرده.

تنويه: التغير في طاقة الوضع PE فقط هو الذي له معنى فيزيائيّ.

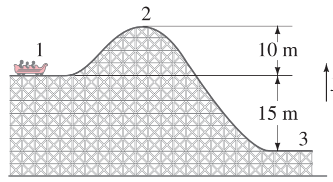
هناك معنى فيزيائي للتغيّر في قيمة طاقة الوضع فقط، ΔPE، وهو ما يرتبط بالشغل المبذول (المعادلة 6–7). وبما أنّ ما يمكن قياسه هو فقط ΔPE. فإنّنا نستطيع قياس y من أيّ نقطة مرجعية مناسبة على أن يتمّ تحديدها منذ البداية لتبقى ثابتةً لا تتغيّر وحتى نهاية الحسابات، علمًا أنّ التغيّر في طاقة الوضع بين أيّ نقطتين لا يعتمد على عملية اختيار هذه النقطة المرجعيّة أبدًا.

تعتمد طاقة الوضع PE المرتبطة بالجاذبية الأرضية بالارتفاع الرأسيّ.

ترتبط قوة جذب الأرض للأجسام بنتيجة مهمّة تمّت مناقشتها سابقا (انظر المثال 6–2 والشّكل 6–4)، بحيث تبذل هذه القوّة شغلًا في الاتجاه الرأسي : يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضيّة على الارتفاع العمودي h، ولا يعتمد على المسار الحقيقي سواء أكان مباشرة إلى الأعلى، أم خلال مسار مائل إلى الأعلى. وعليه، نرى من (المعادلتين 6 − 7)أنّ التّغيّر في طاقة الوضع الناجّ من جذب الأرض للأجسام يعتمد على الارتفاع الرأسي فقط، ولا يعتمد على المسار المتبع.

المثال 6-7 التغيّر في طاقات الوضع الأفعوانيّة.

تنتقل عربة أفعوانية كتلتها 1000-kg من النقطة 1 (الشكل 6–12) إلى النقطة 2، ومن ثَمَّ إلى النقطة 3. (أ) ما مقدار طاقة الوضع الناجّة من جذب الأرض للعربة عند كلّ من النقطتين 2 و3 مقارنةً بالنقطة 1؟ (ب) ما التغيّر في طاقة الوضع عند انتقال العربة من النقطة 2 إلى النقطة 3؟ (ج) أعدْ حلّ الجزأين (أ) و (ب)، مع أخذ النقطة المرجعية $(y = 0)$ عند النقطة 3.



الشّكل 6 – 12 المثال 6 –7

النّهج: نهتمُّ هنا بطاقة وضع النظام المكوّن من العربة والأرض. ونحدّد اتجاه y الموجب إلى أعلى، ومن ثمَّ نستخدم تعريف طاقة الوضع الناجّة من جذب الأرض للأجسام لحساب طاقة الوضع (PE).

الحلّ: (أ) نحسب الارتفاعات نسبة إلى النقطة 1. وعليه، فإنّ طاقة الوضع الابتدائية تعادل صفرًا .

عند النقطة 2، $y_2 = 10\,\text{m}$ ،

$$\text{PE}_2 = mgy_2 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(10\,\text{m}) = 9.8 \times 10^4\,\text{J}$$

عند النقطة 3، $y_3 = -15\,\text{m}$؛ لأنّ النقطة 3 أخفض من النقطة 1. لذلك، فإنّ

$$\text{PE}_3 = mgy_3 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(-15\,\text{m}) = -1.5 \times 10^5\,\text{J}$$

(ب) إنّ التغيّر في طاقة الوضع $(\text{PE}_{\text{final}} - \text{PE}_{\text{initial}})$، عند الانتقال من النقطة 2 إلى النقطة 3 هي:

$$\text{PE}_3 - \text{PE}_2 = (-1.5 \times 10^5\,\text{J}) - (9.8 \times 10^4\,\text{J})$$
$$= -2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

تقلّ طاقة الوضع الناجّة من جذب الأرض للأجسام بمقدار $2.5 \times 10^5\,\text{J}$.

(جـ) في هذه الحالة، $y_1 = +15\,\text{m}$ عند النقطة 1. لذا، فإنّ طاقة الوضع الابتدائية (عند النقطة 1) هي:

$$\text{PE}_1 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(15\,\text{m}) = 1.5 \times 10^5\,\text{J}$$

عند النقطة 2، $y_2 = 25\,\text{m}$. لذلك، فإنّ طاقة الوضع هي:

$$\text{PE}_2 = 2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

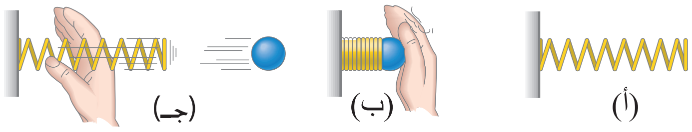
عند النقطة 3، $y_3 = 0$. ولهذا، فإنّ طاقة الوضع تكون صفرًا. التغيّر في طاقة الوضع عن الانتقال من النقطة 2 إلى النقطة 3 هي:

$$\text{PE}_3 - \text{PE}_2 = 0 - 2.5 \times 10^5\,\text{J} = -2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

وهي تمامًا القيمة نفسها كما في البند (ب).

تعريف طاقة الوضع PE على نحو عام

هناك أشكال أخرى لطاقة الوضع، بالإضافة إلى تلك الناجّة من جذب الأرض للأجسام. وترتبط أشكال طاقات الوضع الأخرى جميعها بقوّةٍ ما، ويمكن تعريفها بطريقة مماثلة لتعريفنا للطاقة الناجّة من جذب الأرض للأجسام. وعلى نحو عام، يعادل التغير في طاقة الوضع، الناجّ من تأثير قوّةٍ ما، الشغل السالب المبذول بواسطة تلك القوّة إذا انتقل الجسم من نقطةٍ إلى أخرى (كما في المعادلة 6–7 ب للجاذبية) . وبطريقةٍ أخرى، وبناءً على قانون نيوتن الثالث، نستطيع تعريف التغيّر في طاقة الوضع بالشغل اللازم بذله بواسطة قوّةٍ خارجيّة لنقل جسمٍ بلا تسارع بين النقطتين، كما في (المعادلة 6−7 أ).



الشكل 6 - 13 (أ) يستطيع الزنبرك أن يخزن طاقةً مرنةً (PE Elastic) عندما يتمّ ضغطه كما في الشكل (ب)، ويستطيع أن يبذل شغلًا عندما يتحرّك كما في الشكل (جـ).

طاقة الزنبرك المرن

وهناك شكل آخر لطاقة الوضع يرتبط بالمواد المرنة وله تطبيقاتٌ عمليَّةٌ كثيرةٌ ومختلفة. انظر الآن إلى الزنبرك البسيط في (الشّكل 6–13). يمتلك هذا الزنبرك طاقة وضع ناجمة من ضغطه (أو استطالته)، ويستطيع بذل شغل على الكرة عند إطلاقه كما في الشكل أعلاه. يتطلّب إبقاء الزنبرك مضغوطًا أو غير مضغوطٍ مسافة x، مقارنةً مع طوله الطبيعي الذي يؤثر عليه بقوة F_P، تناسبا طرديًا مع x أي أنّ

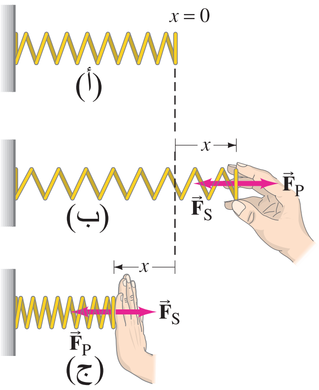
$$F_P = kx$$

حيث k مقدارٌ ثابتٌ يُدعى ثابتَ الإرجاع للزنبرك، وهو مقياسٌ لمدى صلابة زنبرك معيّن. يؤثر الزنبرك المضغوط أو المستطال بقوة F_S بالاتجاه المعاكس لاتجاه اليد المؤثّرة فيه، كما في (الشكل 6–14):

$$F_S = -kx \qquad \textbf{(8 – 6)}$$

تُعرف هذه القوّة أيضًا "بقوة الإرجاع" نتيجة تأثير قوّة الزنبرك باتجاه معاكس لاتجاه الإزاحة. لذلك ظهرت إشارة السالب في (المعادلة 6–8) معادلة الزنبرك والمسماة أيضًا قانون هوك، وهي معادلةٌ دقيقةٌ وصحيحةٌ طالما بقيت x صغيرة. (أصغر بكثير من طول الزنبرك). ولحساب طاقة وضع زنبرك مستطال، دعنا نحسب الشغل اللازم بذله لإطالته (الشكل 6–14 ب). وقد نرغب في استخدام (المعادلة 6–1) لحساب الشغل المبذول على الزنبرك، $W = Fx$، بحيث تمثل x مقدار استطالته مقارنة مع طوله الطبيعي. إلا أنّ هذا التطبيق المباشر غير صحيح هنا؛ لأنّ القوة $F_P\,(=kx)$ غير ثابتة، بل متغيّرة خلال هذه المسافة، لتبدأ بالزيادة كلّما ازدادت الاستطالة x، كما هو مبين تمثيليًّا في (الشّكل 6–15) ، لذلك سنستخدم متوسط القوّة المؤثّرة، $\bar{F}$. وبما أنّ F_P تتغيّر باستمرار من الصفر (الموضع الابتدائي غير المستطال) إلى الموضع النهائي عندما تصبح الاستطالة x، فإنّ متوسّط القوّة هو: $\bar{F} = \frac{1}{2}[0 + kx] = \frac{1}{2}kx$، وتمثّل x مقدار الاستطالة النهائيّة (مبيّنة x_f في الشكل 6–15 للتوضيح). لذلك، يكون الشغل المبذول هو:

$$W = \bar{F}x = \left(\tfrac{1}{2}kx\right)(x) = \tfrac{1}{2}kx^2$$



الشكل 6 - 14 (أ) الزنبرك في وضعه الطبيعي (غير مستطال). (ب) الزنبرك مستطال بواسطة شخص أثر فيه بقوة $\vec{F}_P$ إلى اليمين (الاتجاه الموجب). يدفع الزنبرك بالاتجاه المعاكس بقوة $\vec{F}_S$، بحيث $F_S = -kx$. (جـ) يضغط شخص الزنبرك ($x < 0$). تؤثر قوة $\vec{F}_P$ إلى اليسار، ويدفع الزنبرك بالاتجاه المعاكس بقوة $F_S = -kx$، بحيث $F_S > 0$ لأنّ $x < 0$.

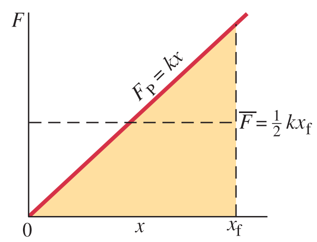
وعليه، فإنّ طاقة الوضع المرنة تتناسب مع مربّع مقدار الاستطالة كما يلي:

PE المرنة

$$\text{PE (المرن)} = \tfrac{1}{2}kx^2 \qquad \textbf{(9 – 6)}$$

إذا تمّ ضغط زنبرك مسافة x ابتداءً من طوله الطبيعي، فإنّ متوسّط القوّة $F = \frac{1}{2}kx$، ومرّةً أخرى تعطى طاقة الوضع (بالمعادلة 6–9) . لذلك، فإنّ x تمثّل مقدار انضغاط الزنبرك أو استطالته مقارنةً بطول الطبيعي. لاحظ أنّه تمّ اختيار نقطة المرجع بدلالة الطول الطبيعي* للزنبرك لتكون عندها طاقة الوضع مساويةً للصفر.

* نستطيع أيضًا الحصول على (المعادلة 6–9)باستخدام (البند 6–2). الشغل المبذول، وكذلك ΔPE، يساوي المساحة تحت منحنى F و x كما في (الشكل 6–15). وتمثّل هذه المساحة مساحة المثلّث الملوّن (الشكل 6–15) الذي ارتفاعه kx وقاعدته x. وعليه، فإنّ مساحة المثلّث تساوي $\frac{1}{2}(kx)(x) = \frac{1}{2}kx^2$.



الشكل 6-15 عندما يُضغط زنبرك (أو يُستطال)، تتزايد القوّة اللازمة لتحفيز هذا التغيّر بدلالة x:
منحنى تغيّر $F = kx$ بدلالة x من $x = 0$ إلى $x = x_f$.

في كلٍّ من الأمثلة السابقة لطاقة الوضع – من حجر البناء المثبت على ارتفاع y، إلى الزنبرك المستطال أو المضغوط – فإنّ كلّ جسم يمتلك القدرة أو إمكانية بذل شغل على الرغم من أنه لم يبدأ بعد ببذل هذا الشغل. تظهر هذه الأمثلة إمكانية تخزين الطاقة؛ لاستخدامها لاحقًا، على شكل طاقة وضع (الشكل 6–13، كمثال على الزنبرك).

لاحظ أنّ هناك معادلةً وحيدةً شاملةً للطاقة الحركيّة الانتقاليّة للجسم $\frac{1}{2}mv^2$، ولا تُوجد معادلة وحيدة شاملة لطاقة الوضع. وبدلًا من ذلك، فإنّ النمط الرياضي لطاقة الوضع يعتمد على طبيعة القوة المرتبطة بها.

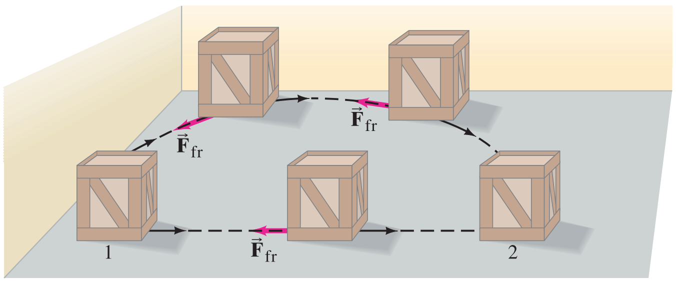
6-5 القوى المحافظة وغير المحافظة

إنَّ الشغل المبذول ضدَّ الجاذبيّة الأرضيّة لنقل جسمٍ من نقطةٍ إلى أخرى لا يعتمد على المسار المتبع (المقطوع). وكمثالٍ على ذلك، يتطلّب رفع جسمٍ كتلته m مسافة معيّنة رأسيًّا الشغل نفسه $(= mgy)$ اللازم بذله لحمل ذات الجسم إلى أعلى سطحٍ مائلٍ مرتفعٍ للمسافة الرأسيّة السابقة نفسها، كما في (الشكل 6–4 انظر المثال 6–62). وتُدعى القوى التي تبذل شغلًا يعتمد على الموضعين النهائي والابتدائي فقط للجسم، ولا يعتمد على المسار المتبع، مثل قوّة جذب الأرض للأجسام-**القوى المحافظة**. وتُعدّ قوى الإرجاع في الزنبرك (أو في أيّ مادة مرنة) حيث $F = -kx$، قوى مرنة أيضًا. إنّ الجسم الذي يبدأ من نقطةٍ ما ويعود إلى النقطة نفسها تحت تأثير قوّةٍ محافظةٍ لا يخضع لأيِّ شغلٍ كنتيجةٍ مباشرةٍ لعدم تغيّر طاقة وضعه بعد رحلة الذهاب والإياب التي قطعها.

وعلى الوجه الآخر، تُعدّ قوّة الاحتكاك **غير محافظة** لاعتماد شغلها على المسار المقطوع. وعلى سبيل المثال، عندما يُحرّك صندوق شحن من نقطة على الأرض إلى أخرى، فإنّ الشغل المبذول يعتمد على ما إذا كان المسار المتبع خطًّا مستقيمًا، أو ملتويًا، أم متمايلاً. كما هو مبيّن في (الشكل 6–16)، إذا تمّ دفع صندوق شحن من النقطة 1 إلى النقطة 2 خلال المسار الدائري الأطول بدلًا من المسار المباشر، فسيكون – بالطبع - مقدار الشغل المبذول للتغلّب على الاحتكاك أكبر خلال المسار نصف الدائري الأطول مقارنةً بالمسار المباشر. وهذا مخالف لشغل قوّة الجاذبيّة الأرضيّة. إنّ اتّجاه قوّة الاحتكاك هو دائمًا معاكسٌ لاتجاه الحركة. كما أنّ الزاوية θ في (المعادلة 6–1) هي دائمًا $-1 = 180°$ عند نقاط مسار قوّة الاحتكاك جميعها. لذلك، فإنّ شغل الاحتكاك المبذول كما في (الشكل 6–16) لا يعتمد على النقطتين 1 و 2 فقط. ومن القوى الأخرى غير المحافظة القوى التي يؤثر بها شخصٌ ما، سواء دفعًا أم سحبًا، وكذلك قوّة الشدّ في الحبال (انظر الجدول 6–1).

الجدول 6 – 1
القوى المحافظة وغير المحافظة

القوى المحافظة	القوى غير المحافظة
الجاذبيّة	الاحتكاك
المرنة	مقاومة الهواء
الكهربائيّة	الشد في الحبال
	دفع المحرك أو الصاروخ
	الدفع أو السحب بواسطة شخص ما



الشكل 6–16 تمّ دفع صندوق الشحن على الأرض من الموضع 1 إلى الموضع 2 في مسارين؛ أحدهما مباشر في خطٍّ أفقيٍّ مستقيم، والآخر في مسارٍ دائري. اتجاه قوة الاحتكاك هو دائمًا عكس اتجاه الإزاحة. وعليه، تمتلك قوة الاحتكاك الثابتة مقدارًا يعطى بالمعادلة التالية:
$W_{fr} = -F_{fr}d$. لذلك، كلّما زادت المسافة المقطوعة d كما في المسار المائل ازدادت قيمة W. لا يعتمد الشغل المبذول على النقطتين 1 و 2 فقط (البداية والنهاية).

يمكن تعريف طاقة الوضع $_{PE}$ لقوة محافظة فقط.

ليست هناك طاقة وضع $_{PE}$ للاحتكاك.

ولأنّ طاقة الوضع هي طاقة ترتبط بموضع الأجسام أو بترتيبها، فإنّها تكون ذات معنى فقط عندما تحدّد على نحوٍ فريدٍ عند نقطةٍ ما. وهذا ما لا يمكن عمله بوجود قوّةٍ غير محافظة (كالاحتكاك)؛ حيث يعتمد شغلها المبذول على مسارها المتبع (كما في الشكل 6–16). وعليه، يمكن تعريف طاقة الوضع فقط عندما تكون القوّة محافظة.

التمرين جـ: ينتقل جسمٌ متأثّرًا بقوّةٍ ثابتة F من نقطة أولى إلى نقطة أخرى، ومن ثَمَّ يعود إلى النقطة الأولى. فإذا كان الشغل F المبذول على الجسم خلال مساره المغلق 60 J، فهل تستطيع أن تحدّد ما إذا كانت القوّة F المؤثّرة في هذا الجسم خلال مساره المغلق قوّة محافظة أم لا؟

نستطيع الآن أن نُعدِّل على **مبدأ الشغل والطاقة** (الذي نوقش في البند 6–3) لإضافة طاقة الوضع إليه. لنفرض أنّ عدّة قوى تعمل مؤثّرةً في جسمٍ ما قادرٍ على الحركة الانتقاليّة، وأنّ بعض هذه القوى هي قوى

غير محافظة. نكتب الشغل (المحصل) الكلّيّ W_{net} كمجموع لكلٍّ من الشغل المبذول بواسطة القوى المحافظة W_C. والشغل المبذول بواسطة القوى غير المحافظة، W_{NC}:

$$W_{net} = W_C + W_{NC}$$

ومن مبدأ الشغل والطاقة (المعادلة $6-4$)، يصبح لدينا ما يلي:

$$W_{net} = \Delta KE$$

$$W_C + W_{NC} = \Delta KE$$

حيث $\Delta KE = KE_2 - KE_1$. بعد ذلك

$$W_{NC} = \Delta KE - W_C$$

يمكن كتابة الشغل المبذول بواسطة قوّةٍ محافظةٍ بدلالة طاقة الوضع، مثلما رأينا في (المعادلة $6-7$ ب) لطاقة وضع الجاذبية :

$$W_C = -\Delta PE$$

مبدأ الشغل و الطاقة (الشكل العام)

وبضمّ المعادلتين الأخيرتين معًا:

$$W_{NC} = \Delta KE + \Delta PE \qquad (6-10)$$

وعليه، فإنّ الشغل W_{NC} المبذول بواسطة القوى غير المحافظة على جسمٍ ما يعادل التغير الكلي في طاقتي الحركة والوضع.

ويجب التنويه هنا إلى ضرورة إضافة القوى المؤثّرة في الجسم جميعها في (المعادلة $6-10$) ، سواء من خلال حدّ طاقة الوضع على يمين المعادلة (إذا كانت القوى محافظة)، أو من خلال حدّ الشغل على اليسار (ولكن ليس من خلال الحدّين!).

6-6 الطاقة الميكانيكيّة وحفظها

إذا كانت القوى المحافظة هي القوى الوحيدة المؤثرة في النظام، فسوف نصل إلى علاقةٍ سهلةٍ وجيّدةٍ للطاقة.

وعندما لا يكون هناك أيّ قوى غير محافظة، فإنّ $W_{NC} = 0$، ويصبح الشكل العام لمبدأ الشغل والطاقة في (المعادلة $6-10$) كما يلي:

$$\Delta KE + \Delta PE = 0 \qquad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (6-11\ \text{أ})$$

أو

$$(KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = 0 \qquad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (6-11\ \text{ب})$$

تعريف الطاقة الميكانيكية الكلية

نعرف الآن كمية E التي تُسمّى **الطاقة الميكانيكية الكلية** للنظام، وهي مجموع طاقتي الحركة والوضع عند أيّ لحظة:

$$E = KE + PE$$

ونستطيع الآن إعادة كتابة (المعادلة $6-11$ب) كالتالي:

حفظ الطاقة الميكانيكية

$$KE_2 + PE_2 = KE_1 + PE_1 \qquad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (6-12\ \text{أ})$$

أو

$$E_2 = E_1 = \text{ثابت} \qquad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (6-12\ \text{ب})$$

تُعبّر (المعادلات $6 - 12$) عن مبدأ مفيد ومحدّد بدقّة للطاقة الميكانيكيّة الكليّة للنظام، وهي أنّها كمية محفوظة. تبقى الطاقة الميكانيكية الكلية ثابتة إذا لم تؤثر أيّ قوى غير محافظة:

$(KE + PE)$ عند زمنٍ ابتدائي 1 تعادل $(KE + PE)$ عند زمنٍ لاحق 2.

ولعرضها بطريقةٍ أخرى، انظر إلى (المعادلة $6 - 11$ أ) التي تعطي $\Delta PE = -\Delta KE$؛ أي أنّه إذا زادت الطاقة الحركية KE للنظام، فإنّ طاقة الوضع PE يجب أن تقلّ بمقدارٍ مكافئ. وعليه، فإنّ المجموع الكلّيّ، $(KE + PE)$ سيبقى ثابتًا:

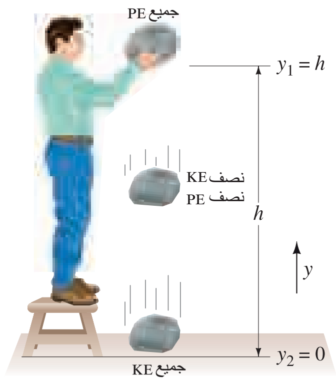
حفظ الطاقة الميكانيكية

إذا كانت القوى المؤثّرة هي قوى محافظة فقط، فإنّ الطّاقة الميكانيكيّة الكلّيّة لا تقلّ ولا تزداد في أيّ عمليّة، بل تبقى ثابتة.

وهذا هو مبدأ **حفظ الطاقة الميكانيكيّة** للقوى المحافظة.

سوف نرى في البند التالي الفائدة الكبيرة لمبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية في حالاتٍ مختلفة، وكيف يُعدّ استخدامها عادة أسهل من استخدام معادلات الحركة أو قوانين نيوتن. وبعد ذلك سنناقش كيفية إضافة أشكال الطاقة الأخرى إلى قانون حفظ الطاقة العام، الذي يشمل الطاقة المرتبطة بالقوى غير المحافظة.

7-6 حلّ مسائل باستخدام حفظ الطاقة الميكانيكيّة



الشكل 6-17 تتغير طاقة الوضع في الصخرة إلى طاقة حركية خلال سقوطها.

يُعدّ سقوط صخرة تحت تأثير الجاذبية من ارتفاع h فوق سطح الأرض مثالًا بسيطًا على حفظ الطاقة الميكانيكيّة (عند إهمال مقاومة الهواء)، كما في (الشكل 6–17). فإذا بدأت الصخرة سقوطها من السكون، فستكون طاقتها الابتدائية كلّها طاقة وضع. وعندما تسقط الصخرة إلى الأسفل، تفقد جزءًا من طاقة وضعها (لأنّ ارتفاعها y يقلّ)، وتزداد طاقتها الحركيّة للتعويض عن نقصان طاقة وضعها؛ بحيث يبقى مجموع الطاقتين مقدارًا ثابتًا. فعند أيّ نقطة خلال المسار، تعطى الطاقة الميكانيكيّة الكليّة كالتالي:

$$E = \mathrm{KE} + \mathrm{PE} = \tfrac{1}{2}mv^2 + mgy$$

حيث تمثل y ارتفاع الصخرة فوق سطح الأرض عند أيّ لحظة، في حين تمثل v سرعتها عند تلك النقطة . وإذا أشرنا إلى الموضع الابتدائي للصخرة بالرقم 1، والموضع عند أيّ لحظة لاحقة بالموضع 2، فسنكتب أنّ:

الطاقة الميكانيكيّة الكليّة عند نقطة 1 = الطاقة الميكانيكيّة الكليّة عند نقطة 2 أو (انظر أيضًا إلى المعادلة 6 – 12)

حفظ الطاقة الميكانيكية تحت تأثير الجاذبية الأرضية

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 \qquad \text{[فقط الجاذبية وضع طاقة]} \quad \mathbf{(13-6)}$$

ستتحول طاقة الوضع كاملةً إلى طاقةٍ حركيّةٍ لحظيًّا قبل اصطدام الصخرة بسطح الأرض؛ حيث اخترنا $y = 0$.

المثال 6-8 الصخرة السّاقطة

إذا كان الارتفاع الأصلي للصخرة في (الشكل 6–17) هو $y_1 = h = 3.0\ \mathrm{m}$، فاحسب سرعة الصخرة عندما تسقط إلى ارتفاع $1.0\ \mathrm{m}$ فوق سطح الأرض.

النّهج: من الممكن استخدام معادلات الحركة كما في الفصل الثاني كإحدى طرائق الحلّ. وبدلًا من ذلك، سنطبّق مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكيّة (المعادلة 6–13) معتبرين تأثير الجاذبية الأرضية فقط في الصخرة. وسنختار مستوى سطح الأرض كمرجع.

الحلّ: إن موضع الصخرة لحظة سقوطها من السكون من نقطة 1 هو $y_1 = 3.0\ \mathrm{m}$، $v_1 = 0$ ولمعرفة سرعة الصخرة عندما تصبح على ارتفاع $y_2 = 1.0\ \mathrm{m}$، نعوض في المعادلة 6–13:

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

بحيث تلغي الكتلة بعضها بعضًا من طرفي المعادلة. وعند التعويض بالمعادلة بقيمة $v_1 = 0$، نحصل على:

$$\begin{aligned} v_2^2 &= 2g(y_1 - y_2) \\ &= 2(9.8\ \mathrm{m/s^2})[(3.0\ \mathrm{m}) - (1.0\ \mathrm{m})] = 39.2\ \mathrm{m^2/s^2} \end{aligned}$$

وعليه، فإنّ

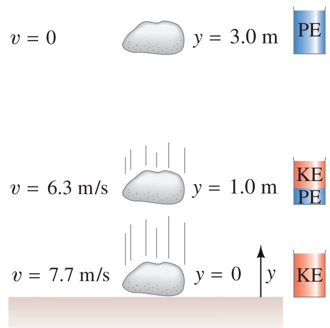
$$v_2 = \sqrt{39.2}\ \mathrm{m/s} = 6.3\ \mathrm{m/s}$$

السرعة للصخرة، على ارتفاع $1.0\ \mathrm{m}$ فوق سطح الأرض، هي $6.3\ \mathrm{m/s}$ باتجاه أسفل التلة.

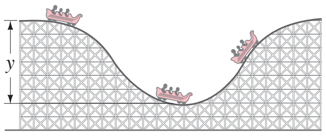
ملحوظة: لا تعتمد السرعة عند النقطة 2 على كتلة الصخرة.

التمرين د: حلّ (المثال 6–8)بتطبيق مبدأ الشغل والطاقة على الصخرة، دون الحاجة إلى استخدام مفهوم طاقة الوضع. بيّن المعادلات المستخدمة جميعها بدءًا من (المعادلة 6–4)، مبيّنًا مفهوم طاقة الوضع.

الشكل 6-18 صناديق الطاقة (في المثال 6–8). طاقة الحركة حمراء وطاقة الوضع زرقاء. المجموع $(\mathrm{KE} + \mathrm{PE})$ للنقاط الثلاث ثابت. السرعة عند $y = 0$ لحظيا قبل اصطدام الصخرة بسطح الأرض هي: $\sqrt{2(9.8\ \mathrm{m/s^2})(3.0\ \mathrm{m})} = 7.7\ \mathrm{m/s}$



تُعدّ طريقة "صناديق الطاقة" من أسهل الطرائق للنظر إلى حفظ الطاقة، كما هو مبيّن في (الشكل 6–18). وعلى سبيل المثال، تظهر كلّ من الطاقة الحركية وطاقة الوضع عند كلّ نقطة خلال سقوط الصخرة كمادتين مختلفتين باللون داخل الصندوق، مع بقاء (= الطاقة الميكانيكية الكلية) المحتوى الكلّي المادي للصندوق ثابتًا.



الشّكل 6-19 يوضح عربة أفعوانية تتحرك من غير احتكاك مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية.

نستطيع تطبيق (المعادلة 6−13)على أيّ جسمٍ يتحرّك تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة دون أيّ احتكاك. وعلى سبيل المثال ، يظهر (الشكل 6−19) عربة أفعوانية تبدأ الحركة من السكون عند أعلى نقطة في التلة، لتتسارع بلا احتكاك نحو أسفل المسار، وتكمل الطريق مرتفعةً باتّجاه التلة، على الجانب الآخر.* في البداية، كانت العربة تمتلك طاقة وضع فقط خلال انتقالها متسارعةً نحو أسفل المسار، وتفقد طاقة وضعها وتكتسب طاقةً حركيةً في الوقت ذاته، مع بقاء مجموع الطاقتين ثابتًا، لتصبح طاقة العربة طاقةً حركيّةً فقط عند وصولها إلى أسفل المسار، وهي أعلى طاقةٍ حركيّة يمكن أن تمتلكها العربة. وعندما تبدأ العربة بصعود التلة الأخرى على الجانب الآخر، تبدأ بفقدان طاقتها الحركيّة لتزداد طاقة وضعها. وعندما تتوقف العربة تمامًا، تكون قد فقدت طاقتها الحركيّة واكتسبت طاقة وضع مرة أخرى. وبما أنّ طاقة الوضع تتناسب تناسبًا طرديًّا مع الارتفاع الرأسي، فإنّ مبدأ حفظ الطاقة (عند غياب الاحتكاك) يُخبرنا بأنّ السيارة لا تتوقف تمامًا إلا عندما تصل إلى ارتفاع يعادل الارتفاع الأصلي الذي بدأت الحركة منه. فإذا كان ارتفاع التلتين متساويًا، فستتوقف العربة عندما تكاد تصل الارتفاع نفسه أعلى التّلة الثانية، أمّا إذا كان ارتفاع التلة الثانية أقلّ من ارتفاع الأولى، فلن تتحوّل الطاقة الحركية كلّها التي تمتلكها العربة إلى طاقة وضع، بل سيبقى جزءٌ من هذه الطاقة الحركية للعربة لتكمل الطريق بعد وصولها إلى قمة التلة الثانية، ولربما ستتحرّك إلى أسفل التّلة الثانية مكملةً طريقها. أما إذا كانت التلة الثانية أعلى من الأولى، فسوف تصل العربة إلى ارتفاع عند التلة الثانية يعادل الارتفاع الذي بدأت منه الحركة لتتوقف عنده. وتُعدّ هذه الحالات صحيحة دائما (عند غياب الاحتكاك) مهما كانت شدّة المنحدر لاعتماد طاقة الوضع على الارتفاع الرأسي فقط (المعادلة 6−6).

تعتمد طاقة الوضع الناجمة عن الجاذبية الأرضية على الارتفاع لا على طول المسار (المعادلة 6−6)

المثال 6-9 **السرعة لأفعوانية باستخدام حفظ الطاقة** إذا كان ارتفاع التلّة في (الشّكل 6 − 19) 40 m، في حين تبدأ عربة أفعوانيّة الحركة من وضع السكون في أعلى التلّة. فاحسب: (أ) سرعة العربة عندما تصل أسفل التلة. (ب) الارتفاع التي ستمتلك عنده العربة نصف هذه السرعة. افرض أنّ $y = 0$ عند أسفل التلة.

النّهج: نختار النقطة رقم 1 لتمثّل موضع العربة أولًا عندما بدأت حركتها من الصفر ($v_1 = 0$) عند أعلى التلّة ($y_1 = 40\,\text{m}$)، ونختار مستوى النقطة رقم 2 عند أسفل التلة، حيث $y_2 = 0$.
سوف نستخدم حفظ الطاقة الميكانيكيّة.

الحـــلّ: (أ) باستخدام (المعادلة 6−13) حيث $v_1 = 0$ و $y_2 = 0$،

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$
$$mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2$$

وباختصار الكتلة m من طرفي المعادلة، والتعويض $y_1 = 40\,\text{m}$، نحصل على

$$v_2 = \sqrt{2gy_1} = \sqrt{2(9.8\,\text{m/s}^2)(40\,\text{m})} = 28\,\text{m/s}$$

(ب) نستخدم حفظ الطاقة أيضًا

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

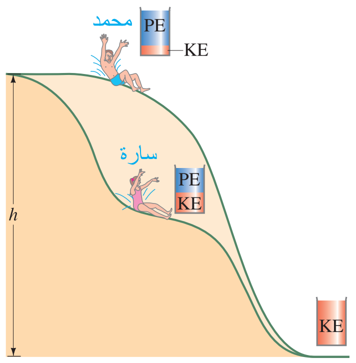
ونعوّض الآن $v_2 = 14\,\text{m/s}$، (نصف السرعة السابقة 28 m/s)، ونحلّ للقيمة المجهولة لـ y_2، ونختصر الكتلة m من طرفي المعادلة السابقة، ثم نضع $v_1 = 0$

$$y_2 = y_1 - \frac{v_2^2}{2g} = 30\,\text{m}:$$

أي أنّ سرعة السيارة ستصبح 14 m/s عندما تصل إلى ارتفاع رأسي يعادل 30 m مقارنةً بأخفض نقطةٍ وهي تهبط من أعلى التلة من الجهة اليسرى، أو وهي تصعد التلة من الجهة اليمنى.

ملحوظة: إنّ طريقة الحساب المتبعة في هذا المثال مطابقة لتلك المتبعة في (المثال 6−8) مع وجود اختلاف جوهري بينهما. كان بالإمكان حلّ (المثال 6−8) باستخدام القوّة، والتسارع، ومعادلات الحركة (المعادلات 2−11). ولكن عندما تكون الحركة رأسية، تصبح هذه الطريقة معقدة جدًّا، في حين يعطي مبدأ حفظ الطاقة الحل بكلّ سهولة.

* القوى المؤثّرة في السيارة هي: قوّة الجاذبيّة، وقوّة دفع السّكة العموديّة، وقوّة الاحتكاك (تمّ افتراضها صفرًا). تعمل القوّة العموديّة دائمًا باتّجاهٍ عموديٍّ على اتّجاه الحركة. لذا، فهي لا تبذل أيّ شغل. لذلك، فإنّ $W_{NC} = 0$ في (المعادلة 6 − 10) ، (الطاقة الميكانيكيّة تكون محفوظه) ويمكن استخدام (المعادلة 6 − 13) لتكون طاقة الوضع ناجمة عن الجاذبيّة فقط. وسوف نرى كيفيّة التعامل مع الاحتكاك عندما تكون $W_{NC} \neq 0$، في (البند 6 − 9).



الشكل 6-20 المثال 6-10

المثال المفاهيمـــي 6-10 **السرعات على انزلاقين مائيّين.** منزلقان مائيان لهما الطول نفسه ويبدآن من الارتفاع h نفسه، ولكن لكلّ منهما مسار مختلف عن الآخر (الشكل 6−20). إذا بدأ متسابقان، محمد وسارة، بالانزلاق من السكون في آن واحد كلٌّ من مسار مختلف، فأيّ المتسابقين: (أ) سيتحرك بسرعةٍ أعلى عند أسفل المنزلق؟ (ب) سيصل إلى الأسفل أولاً؟ أهمل الاحتكاك.

النّهج: (أ) ستتحول طاقة الوضع الابتدائية mgh لكلّ متسابق إلى طاقة حركية، بحيث نحصل على السرعة v عند الأسفل من العلاقة $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$. وبعد اختصار الكتلة من طرفي المعادلة، نحصل على السرعة النهائية لتكون هي نفسها لكلا المتسابقَيْن عند أسفل المنحدر؛ لأنّ كلًّا منهما بدأ الحركة من الارتفاع الرأسي نفسه.

(ب) لاحظ أنّ موضع سارة الرأسي هو أسفل موضع محمد عند كلّ لحظة، وعلى كلّ ارتفاع حتى النهاية. وهذا يدلّ على أنّ طاقة وضع سارة قد تحولت إلى طاقة حركية قبل محمد عند كلّ لحظة. لذا، فهي تتحرك بسرعة أعلى من سرعة محمد خلال الرحلة كاملة، ما عدا قرب نهاية المسار، التي يتساوى عندها سرعة كلٍّ منهما. وبما أنّ سارة تتحرك بسرعة أعلى خلال معظم الرحلة، فمن المتوقع أن تصل أسفل المسار أولًا.

التمرين هـ: تُركت كرتان لتسقطان من الارتفاع نفسه. إذا سقطت الكرة أ سقوطًا حرًّا خلال الهواء، وانزلقت الكرة ب على سطح أملس مائل باتجاه سطح الأرض، فما سرعة كلٍّ من الكرتين مقارنة ببعضهما لحظة وصولهما إلى سطح الأرض؟

حلّ الأسئلة:
أيهما نستخدم: الطاقة أم قوانين نيوتن؟

يتمّ التساؤل أحيانًا عن مدى جدوى استخدام مبدأ الشغل والطاقة عند تناول مشكلة المقارنة مع قوانين نيوتن. فعندما تكون القوة ثابتةً، يمكن استخدام أيٍّ من الطريقتين من حيث المبدأ. أمّا عندما تكون القوى غير ثابتة أو أنّ المسار معقد، فيصبح استخدام مبدأ حفظ الطاقة الطريقة الفضلى للحلّ.

تطبيق الفيزياء في الرياضة

الشكل 6–21 تحوّل الطاقة خلال القفز بالعصا.

هنالك أمثلةٌ كثيرةٌ مهمّةٌ من الألعاب الرياضية التي يمكن تناولها لشرح مبدأ حفظ الطاقة. وعلى سبيل المثال عصا القفز العالي المبينة في (الشكل 6−21) . ونحن على الأغلب نلجأ إلى التقريبات، ومع هذا، فإنّ تسلسل الأحداث لعصا القفز العالي هي غالبًا كالتالي: تتحوّل طاقة الرياضي الحركيّة الابتدائيّة الناجمة عن ركضه إلى طاقة وضعٍ مرنةٍ في عصا القفز المعوجّة لتتحوّل بعد ذلك إلى طاقة وضعٍ جاذبيّةٍ عند ارتفاع اللاعب عن سطح الأرض. وعندما يصل اللاعب القافز إلى أعلى نقطة لحظة اعتدال عصا القفز، تكون الطاقة جميعها قد تحوّلت إلى طاقة وضعٍ ناجمةٍ من الجاذبية الأرضية (عند إهمال سرعة القافز الأفقيّة الضئيلة فوق العمود الأفقي).

لا تُعدّ عصا القفز مصدرًا لأيّ طاقة، ولكنها تعمل كجهاز لتخزين الطاقة والمساهمة في تحويل الطاقة الحركيّة إلى طاقة وضع (نتيجة الجاذبية الأرضية) وهي النتيجة المحصلة. وتعتمد الطاقة اللازمة للعبور فوق العمود الأفقي على مدى ارتفاع مركز ثقل (CM) اللاعب القافز. فعندما يثني الرياضي القافز جسده، فإنّه يعمل على إبقاء مركز ثقله منخفضًا للدرجة التي يستطيع عندها إرغام مركز الثقل على العبور أسفل العمود الأفقي العلوي مباشرة (الشكل 6−22)، ليتمكن من العبور فوق العمود مباشرة، حيث لا يمكن له القفز فوقه دون ثني جسده بتلك الطريقة (سيغطى مركز الثقل في الفصل السابع).

الشكل 6–22 يستطيع قافزو العصي الطويلة عند ثني أجسادهم إبقاء مراكز ثقلهم منخفضة إلى درجة تبقيها أسفل عمود القفز الأفقي. ويستطيع الرياضيون القفز فوق الأعمدة الأفقية المرتفعة عند تحويل طاقاتهم الحركية المكتسبة نتيجة الركض إلى طاقات وضع ناتجة من الجاذبية الأرضية، $(=mgh)$ حيث لا يمكنهم القفز فوقها دون ثني أجسادهم خلال القفز.

وكمثال آخر على حفظ الطاقة الميكانيكيّة، دعنا نتناول جسمًا كتلته m موصول بزنبركٍ أفقيٍّ مهملَ الكتلة وثابتًا صلابته k. إذا كانت سرعة الكتلة m عند أيّ لحظة هي v، وطاقة وضع النظام (الجسم والزنبرك معا) معطاة (بالعلاقة 6−9) ، $\mathrm{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، حيث تمثل x إزاحة الزنبرك عن وضع الاتزان، فإنّ حفظ الطاقة الميكانيكيّة عند إهمال قوّة الاحتكاك وأيّ قوّةٍ أخرى تخبرنا بالتالي:

حفظ الطاقة الميكانيكية عندما تكون طاقة الوضع مرنة

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 \qquad \text{[PE فقط المرنة]} \quad \textbf{(14–6)}$$

حيث إن 1 و 2 تعودان إلى السرعة والإزاحة عند لحظتين مختلفتين.

المثال 6-11 مسدس لعب الأطفال

ضُغط زنبرك مسدّس لعبة أطفال (ثابت صلابته $k = 250\,\mathrm{N/m}$) مسافة 6.0 cm بسهم مطاطي كتلته 0.100 kg، ثم تُرك كما هو مبيّن في (الشكل 6−23 أ). ما السرعة التي سيصل إليها السّهم المطاطيّ عند تحرره من الزنبرك لحظة رجوع هذا الزنبرك إلى طوله في حالة الاسترخاء ($x = 0$)؟

النّهج: إنّ السّهم المطاطيّ كان ساكنًا بداية (النقطة - 1). لذلك، فإنّ $\mathrm{KE}_1 = 0$. وعند إهمال الاحتكاك، وباستخدام حفظ الطاقة الميكانيكيّة، فإنّ طاقة الوضع الوحيدة هي طاقة المرونة.

الحلّ: باستخدام (المعادلة 6−12) عند النقطة 1 لحظة انضغاط الزنبرك لقيمته القصوى حيث $v_1 = 0$، (لم يبدأ السّهم المطاطيّ بالحركة بعد) عند $x_1 = -0.060\,\mathrm{m}$. تمّ اختيار النقطة 2 لحظة انطلاق السّهم المطاطيّ، كما في (الشّكل 6−23 ب) ، حيث $x_2 = 0$، وتحدّد قيمة v_2 من (المعادلة 6−14) كالتالي:

$$0 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

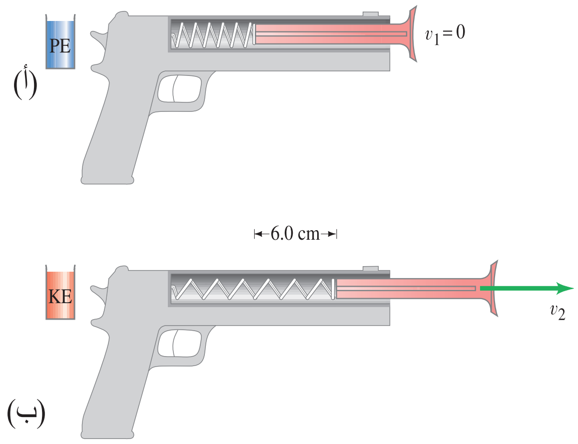
لذلك

$$v_2^2 = \frac{kx_1^2}{m}$$

$$= \frac{(250\,\mathrm{N/m})(-0.060\,\mathrm{m})^2}{(0.100\,\mathrm{kg})} = 9.0\,\mathrm{m^2/s^2}$$

وعليه: $v_2 = \sqrt{v_2^2} = 3.0\,\mathrm{m/s}$

ملحوظة: إنّ القوة الوحيدة المؤثّرة في السّهم المطاطيّ بالاتجاه الأفقيّ (وعند إهمال الاحتكاك) هي قوّة الزنبرك. أمّا في الاتجاه الرّأسيّ، فإنّ قوّة جذب الأرض تمّت معادلتها بالقوّة العموديّة المؤثّرة في السّهم بواسطة أسطوانة المسدّس. وعند مغادرة السّهم المطاطيّ لأسطوانة المسدّس أخيرًا ، فإنّها ستتبع مسار مقذوفٍ يتحرّك تحت تأثير الجاذبية الأرضية.



الشّكل 6 – 23 المثال 6 - 11 (أ) سهم مطاطيّ تمّ دفعه ليعمل على ضغط الزنبرك مسافة 6.0 cm، ثم تُرك السّهم، وفي (ب) ينطلق السّهم مغادرا الزنبرك بسرعة v_2.

مثال إضافي

يبين المثال التالي كيفيّة حلّ معضلةٍ تتضمّن نوعين من طاقة الوضع.

المثال 6-12 **نوعان من طاقة الوضع (PE).**

تسقط كرةٌ كتلتها $m = 2.60\ \text{kg}$ من السكون من ارتفاع رأسي $h = 55.0\ \text{cm}$ لتصطدم بزنبرك، وتضغطه مسافة $Y = 15.0\ \text{cm}$ كما في (الشكل 6–24). حدّد مقدار معامل صلابة الزنبرك (اهمل كلًّا من مقاومة الهواء وكتلة الزنبرك).احسب المسافات جميعها بالنسبة إلى النقطة الأولى التي تلامس عندها الكرةُ الزنبركَ غير المضغوط (افترض تلك النقطة عند $y = 0$).

النّهج: إنّ القوّتين المؤثّرتين في الكرة هما قوّة جذب الأرض وقوّة الزنبرك المرنة. وبما أنّ القوّتين محافظتان، فإنّنا نستطيع استخدام حفظ الطاقة الميكانيكية بما فيها نوعي طاقة الوضع. ومع هذا فيجب أن نكون حذرين؛ لأنّ طاقة الوضع نتيجة جذب الأرض تؤثّر في الكرة خلال سقوطها (الشكل 6–24)، في حين تبدأ قوّة الزنبرك المرنة بالتأثير في الكرة فقط عند ملامسة الكرة للزنبرك (الشكل 6–24 ب). نختار الاتجاه الصّاديّ الموجب إلى أعلى لتكوّن $y = 0$ عند نهاية الزنبرك في حالة الاسترخاء.

الحلّ: يتم تقسيم الحلّ إلى جزأين (هناك طريقة أخرى للحلّ سيتم عرضها لاحقًا).

الفرع 1: دعنا أولًا نتناول التغيّر في الطاقة خلال سقوط الكرة من ارتفاع $y_1 = h = 0.55\ \text{m}$، كما في (الشكل 6–24 أ) إلى $y_2 = 0$ لحظة ملامستها للزنبرك، كما في (الشكل 6–24ب). إنّ نظامنا يتكوّن من الكرة الساقطة تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة والزنبرك الذي لا يقوم بأيّ عمل حتى هذه اللحظة. وعليه، فإنّ

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

$$0 + mgh = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

ولإيجاد السرعة $v_2 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(9.80\ \text{m/s}^2)(0.550\ \text{m})} = 3.283\ \text{m/s} \approx 3.28\ \text{m/s}$

وهي سرعة الكرة لحظة ملامستها أعلى الزنبرك (الشكل 6–24 ب).

الفرع 2: ماذا يحدث عندما تضغط الكرة الزنبرك؟ (الشكل 6–24 ب و ج) حيث إنّ الكرة تخضع لقوّتين محافظتين في هذه الحال، هما قوّة جذب الأرض وقوّة الارجاع في الزنبرك. لذا، فإنّ معادلة حفظ الطاقة تصبح كالتالي:

$$E\ (\text{عند ملامسة الكرة للزمبرك}) = E\ (\text{عند انضغاط الزمبرك})$$

$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 + \tfrac{1}{2}ky_2^2 = \tfrac{1}{2}mv_3^2 + mgy_3 + \tfrac{1}{2}ky_3^2$$

حفظ الطاقة: الجاذبية والمرونة

لقد تمّ اعتبار النقطة 2 اللحظة التي تلامس الكرة عندها الزنبرك؛ أي أنّ $y_2 = 0$ و $v_2 = 3.283\ \text{m/s}$، (محتفظين بخانة إضافيّة إلى الآن). وتمّ اعتبار النقطة 3 اللحظة التي تتوقف عندها الكرة تمامًا في حين يكون الزنبرك منضغطًا تمامًا. وعليه، فإنّ $v_3 = 0$، و $y_3 = -Y = -0.150\ \text{m}$ (معطاة). وبالتعويض في معادلة الطاقة أعلاه نحصل على

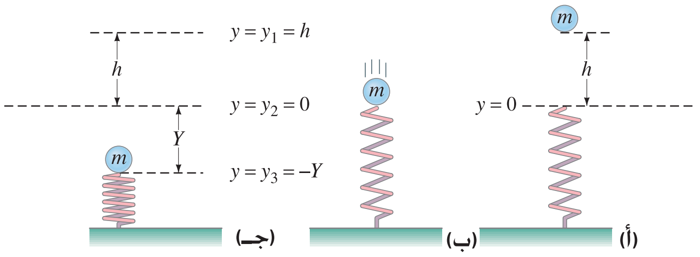
$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 + 0 + 0 = 0 - mgY + \tfrac{1}{2}kY^2$$

وبمعرفة كلّ من m, v_2 و Y، نستطيع حلّ المعادلة للحصول على k:

$$k = \frac{2}{Y^2}\left[\tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgY\right] = \frac{m}{Y^2}\left[v_2^2 + 2gY\right]$$

$$= \frac{(2.60\ \text{kg})}{(0.150\ \text{m})^2}\left[(3.283\ \text{m/s})^2 + 2(9.80\ \text{m/s}^2)(0.150\ \text{m})\right] = 1590\ \text{N/m}$$

وهي النتيجة التي سعينا إليها.



الشكل **6-24** (المثال 6-12)

حلّ الأسئلة:

طرق حلّ بديلة

طريقة حلّ بديلة: من الممكن الوصول إلى الحلّ بصورةٍ مباشرةٍ خطوةٍ واحدةٍ بدلًا من تقسيم الحلّ إلى جزأين. على أيّ حال، نحن من يحدد أيّ النقطتين سيتمّ تعويضهما على يسار معادلة الطاقة ويمينها. سنختار النقطتين 1 و 3 ونعوضهما في معادلة الطاقة (الشكل 6–24) حيث إنّ النقطة 1 هي النقطة الابتدائية قبل أن تبدأ الكرة بالسقوط مباشرة (الشّكل 6–24 أ)، $v_1 = 0, y_1 = h = 0.550\ \mathrm{m}$، والنقطة 3 هي عندما ينضغط الزنبرك تماما (الشّكل 6–24 ج)، حيث $v_3 = 0, y_3 = -Y = -0.150\ \mathrm{m}$. إنّ القوتين المؤثرتين في الكرة في هذه الحالة هما قوّة جذب الأرض (على الأقل لجزء من الوقت) وقوة الزنبرك. لذلك، فإنّ حفظ الطاقة يخبرنا بالتالي:

$$\begin{aligned}\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 + \tfrac{1}{2}k(0)^2 &= \tfrac{1}{2}mv_3^2 + mgy_3 + \tfrac{1}{2}ky_3^2\\ 0 \quad + mgh + \quad 0 \quad &= \quad 0 \quad - mgY + \tfrac{1}{2}kY^2\end{aligned}$$

حيث عرضنا $y = 0$ للزنبرك عند النقطة 1 لعدم تأثّره في تلك اللحظة سواء انضغاطًا أو استطالةً . وتصبح قيمة k عن طريق الحلّ كالتالي:

$$k = \frac{2\,mg(h + Y)}{Y^2} = \frac{2(2.60\ \mathrm{kg})(9.80\ \mathrm{m/s^2})(0.550\ \mathrm{m} + 0.150\ \mathrm{m})}{(0.150\ \mathrm{m})^2} = 1590\ \mathrm{N/m}$$

وهو الحل نفسه باستخدام الطريقة الأولى.

8-6 أشكال أخرى للطاقة، وتحوّلات الطاقة، وقانون حفظها

يمكن تعريف أشكال أخرى للطاقة، إضافةً إلى كلٍّ من الطاقة الحركيّة وطاقة الوضع. تُعدّ كلٌّ من الطّاقة الكهربائيّة، والطّاقة النوويّة، والطّاقة الحراريّة، والطّاقة الكيميائيّة المخزّنة في الغذاء أو الوقود أمثلة على هذه الأشكال الأخرى للطاقة. ومع تطور النظريّة الذريّة، أصبح يُنظر إلى هذه الأشكال الأخرى للطاقة على أنّها طاقة وضع، أو طاقةٌ حركيّةٌ على المستوى الذرّي أو الجزيئي. فعلى سبيل المثال، وبناءً على النظرية الذريّة، فإنّ الطاقة الحراريّة ما هي إلا طاقة حركية للجزيئات المتحركة بسرعاتٍ عالية — ترتفع سرعات الجزيئات المكوّنة لجسم ما نتيجة تسخين الجسم. إلى جانب أنّ الطاقة المخزنة في الطعام والوقود هي طاقة وضع ناجمة من مواضع الذّرات داخل الجزيئات بالنسبة إلى بعضها بعضًا، وناجمة كذلك من القوى الكهربائية المتبادلة بين الذرات (عادةً ما تُعرف بالروابط الكيميائية). ولكي تتم الاستفادة من الطاقة المخزّنة في الروابط الكيميائيّة لإنجاز شغلٍ ما؛ يجب أن تتحرّر هذه الطاقة، وعادةً ما يتم ذلك من خلال التفاعلات الكيميائية . وهذا شيءٌ مماثلٌ للشغل الذي يمكن بذله بواسطة زنبركٍ مضغوط عند تحركه. ويمكن أيضًا افتراض كلٍّ من الطاقة الكهربائية والمغناطيسيّة والنوويّة أمثلةً على الطاقتين الحركيّة والوضع (المخزنة). وسوف نتعامل مع هذه الأشكال الأخرى للطاقة في الفصول القادمة. فمن الممكن أن تتحول الطاقة من شكل إلى آخر، وقد ناقشنا عدّة أمثلةٍ على ذلك حتى الآن، نذكر منها أنّ طاقة الصخرة المعلقة عاليًا في الهواء هي طاقة وضع؛ وتبدأ هذه الطاقة بالتناقص كلّما هوت الصخرة إلى الأسفل باتجاه سطح الأرض؛ أي كلّما قلّ ارتفاعها. وفي الوقت نفسه، فإنّ الصخرة تكتسب طاقة حركة نتيجة تسارع الصخرة باتجاه سطح الأرض وازدياد سرعتها . وبهذا، فإنّ طاقة الوضع تكون قد تحولت إلى طاقة حركة.

غالبًا ما يتم انتقال الطاقة من جسم إلى آخر خلال عمليّة تحولها. فقد كان ذلك جليًّا عند تحوّل طاقةِ الوضع المخزّنة في الزنبرك (الشكل 6–13 ب) إلى طاقةٍ حركيّةٍ للكرة (الشكل 6–13 جـ). إنّ الماء المخزّن خلف سدٍّ يمتلك طاقة وضعٍ يمكن أن تتحوّل إلى طاقة حركية نتيجة تساقط المياه. ومن الممكن تحويل الطاقة الحركيّة مرةً أخرى إلى شكلٍ آخر للطاقة، كالطاقة الكهربائيّة من خلال تمرير المياه عند قاعدة السّد على شفرات مولد، كما سنرى في الفصول اللاحقة. كما أنّ طاقة الوضع المخزنة في القوس عند ثنيه ستتحوّل إلى طاقةٍ حركية في السهم (الشكل 6–25).

الشكل 6–25 طاقة وضع القوس المثني تكاد تتحول إلى طاقة حركية في السهم.

في كلّ مثالٍ من هذه الأمثلة السابقة، كان هناك مقدار من الشغل المبذول مصاحبًا لعملية التحوّل في الطاقة. فالزنبرك في (الشّكل 6–13) بذل شغلًا على الكرة، في حين بذلت المياه شغلا على فراشات المولد، أمّا القوس فيبذل شغلًا على السّهم. إنّ هذه الملحوظة تعمق فهمنا للعلاقة التي تربط الشغل بالطاقة؛ فهناك شغلٌ يُبذل نتيجة انتقال الطاقة من جسم إلى آخر* . يزوّدنا الشخص الذي يقذف كرةً أو يدفع عربة المشتريات بمثال آخر. ونخلص من هذا إلى أنّ الشغل المبذول هو النتيجة الحتميّة لانتقال الطاقة من الشخص (هذه الطاقة مشتقّة من الطاقة الكيميائيّة في الطعام) إلى الكرة أو عربة المشتريات.

يبذل الشغل عند انتقال الطاقة من جسم إلى آخر.

* إذا كانت الأجسام عند درجات حرارة مختلفة، فيمكن للحرارة أن تتدفق بين هذه الأجسام، إضافةً إلى انتقال الطاقة بينها أو بدلا من ذلك. (انظر الفصلين 14 و15) .

إنّ إحدى أهم النتائج في الفيزياء، أنه عند انتقال الطاقة أو تحولها، لا يتمّ فقدان أيّ مقدارٍ منها أو اكتسابه خلال تلك العملية. وإذا كان هذا هو الوضع، فنكون قد وصلنا إلى فحوى قانون حفظ الطاقة الذي يُعدّ من أهم المبادىء في الفيزياء، ويمكن صياغة هذا القانون كالتالي:

قانون حفظ الطاقة

يمكن أن تتحول الطّاقة في أيّ عمليّةٍ من شكل إلى آخر، أو تنتقل من جسم إلى آخر، بحيث لا تزداد ولا تنقص. ويبقى مقدارها الكلّيّ ثابتًا دون تغيّر.

لقد ناقشنا حفظ الطاقة للأنظمة الميكانيكيّة بوجود قوًى محافظة، ورأينا كيف يمكن اشتقاقها بناءً على قوانين نيوتن. وهنا تظهر أهميّة قانون حفظ الطاقة الذي يمكن تطبيقه استنادًا إلى الملاحظات العمليّة بوجود أنواع الطاقة جميعها بما فيها غير المحافظة أو الناتجة من قوًى غير محافظة، مثل قوى الاحتكاك. ومع أنّ قوانين نيوتن غير قادرةٍ على الصمود في عالم الذرات عند الأبعاد المتناهية في الصغر، فإنّ قانون حفظ الطاقة أثبت صلاحيّته وإمكانيّة تحقيقه عمليًا في التجارب جميعها وتحت مختلف الظروف.

9-6 حفظ الطاقة بوجود قوى مبدّدة: حلول مسائل

لقد أهملنا الاحتكاك (قوّة غير محافظة) عندما تكلّمنا عن تطبيقات حفظ الطاقة في (البند السابق 6−7) . ومع هذا، فهناك حالاتٌ كثيرةٌ لا يمكن إهمال الاحتكاك عند تناولها. فعلى أرض الواقع وعلى سبيل المثال في (الشكل 6-19) ، لن تستطيع العربة الأفعوانيّة العودة إلى الارتفاع نفسه الذي بدأت الحركة عنده نتيجة الاحتكاك. ففي هذه الحالة، وفي حالاتٍ طبيعيّة أخرى، لا تبقى الطاقة الميكانيكيّة (مجموع طاقتي الحركة والوضع) ثابتة، بل تتناقص بسبب تأثير قوى الاحتكاك.

قوى مبدّدة

ومع بقاء مقدار الطاقة الكلّي ثابتًا، فقد سُميّت هذه القوى **بالقوى المبدّدة**. ومن ناحية تاريخية، فإنّ وجود القوى المبدّدة عمل على تأخير الوصول إلى قانون حفظ الطاقة الكليّة حتى منتصف القرن التاسع عشر. وكان ذلك نتيجة التأخّر في فهم الحرارة وتفسيرها على أنّها شكلٌ من أشكال الطاقة الناتجة من الاحتكاك (حاول دلك يديك ببعضهما بعضًا). أوضحت دراسات كمّيّة قام بها علماء القرن التاسع عشر (تمّ تناولها في الفصلين الرابع عشر والخامس عشر) أنّه إذا اعتبرت الحرارة انتقالاً للطاقة (طاقة حرارية)، فإنّ الطاقة الكليّة محفوظةٌ في أيّ عمليّة. ومثال ذلك، إذا كانت العربة الأفعوانيّة في (الشكل 6−19) معرّضة لقوى الاحتكاك، فستصبح طاقتها الكلّية الأوليّة مكافئة لكلٍّ من طاقتها الحركيّة وطاقة وضعها عند أيّ موضعٍ لاحقٍ خلال مسارها، إضافةً إلى مقدار الطاقة الحرارية المولّدة خلال المسار. إنّ الطاقة الحراريّة المولّدة خلال المسار بواسطة قوة الاحتكاك الثابتة F_{fr} تعادل الشغل المبذول نتيجة الاحتكاك. نطبق الآن القانون العام لمبدأ الشغل والطاقة، (المعادلة 6−10) :

$$W_{NC} = \Delta KE + \Delta PE$$

نستطيع كتابة $W_{NC} = -F_{fr}\,d$، حيث إن d هي المسافة المقطوعة خلال فترة تأثير قوّة الاحتكاك ($\vec{F}$ و $\vec{d}$ في اتجاهين متعاكسين، وعليه تظهر الضرورة لوجود الإشارة السالبة). باستخدام $KE = \frac{1}{2}mv^2$ و $PE = mgy$، فإنّ

$$-F_{fr}\,d = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_2 - mgy_1$$

أو

حفظ الطاقة تحت تأثير الجاذبية والاحتكاك

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 + F_{fr}\,d \quad \text{[الاحتكاك والجاذبيّة من كلّ تأثير]} \quad (6-15)$$

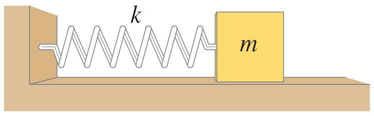
علمًا بأنّ d هي المسافة التي قطعتها خلال مسارها بين النقطتين 1 و 2. ويمكن رؤية (المعادلة 6−15) على أنها (المعادلة 6−13) المعدّلة والمحتوية على الاحتكاك. ويمكن تفسيرها بصورةٍ مبسّطةٍ كما يلي: تعادل الطاقة الميكانيكيّة الأولية للعربة (عند النقطة 1) كلًّا من الطاقة الميكانيكيّة (المخفضة) النهائيّة للعربة، والطاقة المتحوّلة بواسطة الاحتكاك إلى طاقة حراريّة.

عندما نأخذ الطاقات الأخرى بالحسبان، ونعمل على إدخالها في الحساب، مثل الطاقة الكيميائية والكهربائية، سنجد أنّ الطاقة الكليّة هي كميّة محفوظة دائمًا. وعليه، يمكن الجزم بعالمية قانون حفظ الطاقة.

يُعدّ مبدأ الشغل والطاقة مكافئًا لقانون حفظ الطاقة. والفارق الوحيد بينهما هو طريقة استخدام كلٍّ منهما، وتحديدًا طريقة اختيار النظام المدروس. فعندما يبذل مؤثّرٌ خارجيٌّ شغلًا ما على النظام الذي تم اختياره (المكون من جسيم واحد أو أكثر)، يجب استخدام مبدأ الشغل والطاقة: الشغل المبذول بواسطة القوى الخارجية على النظام يعادل التغيّر الكلّي في طاقة النظام المختار.

وعلى الوجه الآخر، إذا تمّ اختيار نظام لا يتأثّر بأيّ قوًى خارجيّة ولا يُبذل عليه شغل، فإنّنا نستطيع تطبيق قانون حفظ الطاقة على هذا النظام.

لنتناول على سبيل المثال، زنبركًا مرتبطًا بمكعب موضوع على سطح طاولة أملس (الشكل 6−26) . عند اختيار المكعب كنظام، فإن الشغل المبذول على المكعب بواسطة الزنبرك يعادل التغيّر في طاقة المكعب الحركيّة اعتمادًا على مبدأ الشغل والطاقة. (لاحظ أن قانون حفظ الطاقة لا ينطبق على هذا النظام؛ لأنّ طاقة المكعب متغيّرة). أمّا إذا تمّ اختيار نظام مكوّن من زنبركٍ ومكعبٍ، فيترتّب على ذلك عدم وجود قوًى خارجيّة قادرة على بذل شغل على النظام (أصبح الزنبرك جزءًا من النظام). ومع هذا، يمكن تطبيق قانون حفظ الطاقة على هذا النظام: عندما يتم ضغط الزنبرك، ثم تحريره، فإنّ الزنبرك يبقى قادرًا على التأثير في المكعب بقوّة. ونستطيع التعبير عن الحركة الناتجة من ذلك بدلالة كلٍّ من طاقتي الحركة $(\frac{1}{2}mv^2)$ والوضع $(\frac{1}{2}kx^2)$، علمًا بأنّ مجموع الطاقتين سيبقى ثابتا. وينطبق قانون حفظ الطاقة على أيّ نظام معزول أو أيّ نظامٍ لا يتأثّر بأيّ قوًى خارجيّة قادرة على بذل شغل عليه.



الشكل 6-26 زنبرك مرتبط بمكعب على سطح طاولة أملس. إذا اخترت النظام ليتكون من مكعب وزنبرك، فإن $E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$؛ أي أن طاقة النظام محفوظة.

طريقة حل المسائل: حفظ الطاقة

1. **ارسم صورة** لحالة النظام الطبيعية.
2. **حدّد النظام** ذا الطاقة المحفوظة: الجسيم أو الجسيمات والقوى المؤثرة.
3. اسأل نفسك عن الكمية التي تبحث عنها، وقرر موضع كلٍّ من نقطتي **البداية** (1) **والنهاية** (2).
4. إذا تغيّر ارتفاع الجسم خلال فترة دراستك له، **فاختر إطارًا مرجعيًّا** يسهّل التعامل معه لتكون عنده $y = 0$ بالنسبة إلى طاقة الوضع الناتجة من الجاذبيّة الأرضيّة، عادةً ما تكون أخفض نقطةٍ هي الخيار المناسب. أما إذا كان النظام يحتوي على زنبرك أو أكثر، فإنّ موضع الزنبرك غير المستطال هو الخيار المناسب حيث $x = 0$ (أو y)
5. **طبق حفظ الطاقة.** وفي غياب الاحتكاك أو أيّ قوة غير محافظة أخرى، فإنّ الطاقة الميكانيكيّة تكون محفوظة: $\mathrm{KE}_1 + \mathrm{PE}_1 = \mathrm{KE}_2 + \mathrm{PE}_2$ أمّا إذا وجدت أيّ قوّةٍ غير محافظةٍ ومن ضمنها قوّة الاحتكاك، فتصبح الحاجة ماسّة إلى وجود حدٍّ آخر (W_{NC}):
$W_{NC} = \Delta\mathrm{KE} + \Delta\mathrm{PE}$.
عليك استخدام حسّك لمعرفة ما إذا كان W_{NC} موجبًا أو سالبًا بناءً على إجابتك عن التساؤل الآتي: هل زادت الطاقة الميكانيكيّة الكليّة أم تناقصت نتيجة هذه العملية؟
6. استخدم المعادلة (المعادلات) التي طوّرتها **لإيجاد** الكميّة المجهولة.

المثال 6-13 احتكاك على الأفعوانية

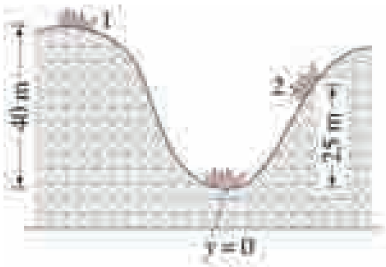
تصل العربة الأفعوانية في (المثال 6−9)إلى ارتفاع رأسي مقداره 25 m فقط أعلى التلّة الثانية قبل أن تتوقف تمامًا لوهلة (الشكل 6−27) . إذا قطعت العربة مسافة 400 m، فقدّر متوسّط قوّة الاحتكاك (على افتراض أنها ثابتة) للعربة ذات الكتلة 1000 kg.

النهج: سنتتبع النهج المقترح خطوة خطوة.

الحل:

1. **ارسم صورة.** (انظر الشكل 6−27) .
2. **النظام.** يتكوّن النظام من العربة الأفعوانية (والأرض التي تؤثّر بقوّة جذب). القوتان المؤثرتان في العربة هما قوتا الاحتكاك وجذب الأرض. (تؤثّر القوّة العموديّة في العربة أيضًا، ولكنّها لا تبذل أيّ شغلٍ. لذا، فهي لا تؤثّر في الطاقة).
3. **اختيار موضعي البداية والنهاية.** تختار النقطة 1 لحظة بدء العربة بالحركة (عند أعلى التلّة الأولى)، والنقطة 2 لحظة توقف العربة على مسافة 25 m أعلى التلّة الثانية.
4. **اختيار إطار مرجعي.** تختار أخفض نقطة $y = 0$ لتكون طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض عندها مساوية للصفر.
5. **تطبيق حفظ الطاقة.** بسبب وجود احتكاك يؤثّر في العربة: سنستخدم حفظ الطاقة من (المعادلة 6 − 15) ، وبتعويض $v_1 = 0$، $y_1 = 40\ \mathrm{m}$، $v_2 = 0$، $y_2 = 25\ \mathrm{m}$ و $d = 400\ \mathrm{m}$ فتصبح:
6. **حل:** نستطيع حل هذه المعادلة لإيجاد F_{fr}: $F_{fr} = 370\ \mathrm{N}$.

الشكل 6 − 27 (المثال 6 − 13) لا تستطيع العربة الأفعوانية الوصول إلى الارتفاع الأصلي فوق التلة الثانية بسبب الاحتكاك.



لا يمكن التعامل مع النهج المقترح كمجموعةٍ من القوانين الواجب اتباعها خطوةً خطوة. لذلك، فإنّ النهج المقترح، صفحة 157 هو *ملخّص* خطوات تساعد على البدء في حلّ المسائل المتعلّقة بالطاقة.

10-6 القدرة

تعريف القدرة

تمّ تعريف القدرة على أنّها معدل بذل الشغل، أمّا القدرة المتوسّطة فهي الشغل المبذول خلال الفترة الزمنيّة اللازمة لبذله. ويمكن تعريف القدرة أيضًا على أنّها معدّل تحوّل الطاقة. وعليه، فإنّ:

القدرة المتوسطة

$$\overline{P} = \text{القدرة المتوسّطة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}} = \frac{\text{(الطاقة المتحوّلة)}}{\text{الزمن}} \qquad (16-6)$$

وحدة القدرة: الواط

إنّ القدرة الحصانيّة هي الشغل المبذول مقسومًا على الزمن؛ أي الشغل المبذول خلال وحدة الزمن (الثانية). تُصنّف قدرة المحرك بناءً على كميّة الطاقة الكيميائيّة أو الكهربائيّة القابلة للتحوّل إلى طاقةٍ ميكانيكيّةٍ خلال وحدة الزمن. وتقاس وحدة القدرة حسب النظام الدولي بالجول لكل ثانية، وأعطيت هذه الوحدة اسمًا خاصًا، وهو "واط" (W): $1\,\text{W} = 1\,\text{J/s}$ واعتدنا جميعًا على استعمال الواط (W) من خلال استخدامنا للأجهزة الكهربائية: وهي معدّل تغيير الطاقة الكهربائية لضوء في المصباح الكهربائي أو لطاقةٍ حراريّةٍ في المدفأة؛ كما يستخدم الواط لتحوّلات الطاقة الأخرى أيضًا. أمّا في النظام البريطاني، فإنّ وحدة القدرة هي القدم – باوند لكلّ ثانية (ft.lb/s). وتستخدم أيضًا وحدة عملية كبيرة وهي **القدرة الحصانيّة** *horsepower(hp)*.* التي تمّ تعريفها كمقدار يعادل 550ft.lb/s، وهي مكافئة لـ 746 W.

القدرة الحصانية

انظر إلى المثال التالي لكي تفرّق بين الطاقة والقدرة. يُعدّ الشخص مقيّدًا بمقدار الشغل القادر على بذله، ليس من جهة مقدار الطاقة اللازمة فقط، بل ومن جهة سرعة تحول الطاقة أيضًا، وهذا ما يعرف بالقدرة. وعلى سبيل المثال، يمكن لشخص ما أن يسير مسافة طويلة، أو أن يصعد درجًا وطوابق كثيرةً قبل أن يضطر للوقوف نتيجة استهلاكه قدرًا كبيرًا من الطاقة. وفي الوقت نفسه ، إذا حاول الشخص ذاته صعود الدرج راكضًا مسرعًا فإنّه قد يشعر بالتعب سريعًا قبل أن يقطع مسافة طابق أو طابقين إلى أعلى . وعادةً ما يحدث هذا بسبب القدرة؛ أي المعدّل الذي يستطيع عنده جسم الشخص تحويل الطاقة الكيميائيّة إلى طاقة ميكانيكيّة.

تنويه:
ميّز القدرة من الطاقة

المثال 6-14 القدرة على صعود الدرج يحتاج عداءٌ كتلته 60-kg إلى زمن قدره 4.0 s لصعود درج طويل (الشكل 6–28). إذا علمت بأن الارتفاع الرأسي للدرجات 4.5 m: (أ) فاحسب قدرة العدّاء الناتجة بدلالة كلٍّ من الواط والحصان (hp). (ب) ما مقدار الطاقة اللازمة لذلك؟

النهج: إنّ الشغل المبذول W من العداء هو ضدُّ الجاذبيّة الأرضيّة، ويعادل $W = mgy$. وللحصول على القدرة الناتجة، نقسم الشغل المبذول W على الزمن المستهلك.

الحل: (أ) متوسّط القدرة الناتجة:

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{mgy}{t} = \frac{(60\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(4.5\,\text{m})}{4.0\,\text{s}} = 660\,\text{W}$$

بما أنّ هناك 746 W في 1 hp، فإنّ العدّاء يعمل شغلاً بمعدّل يكاد يقلّ عن 1 hp. أي إنّ الإنسان على نحو عام لا يستطيع أن يبذل شغلاً بالمعدّل نفسه ولمدّة طويلة.

(ب) الطاقة اللازمة هي $E = \overline{P}t$ (معادلة 6–16). بما أن $E = \overline{P}t$. إذن $E = (660\,\text{J/s})(4.0\,\text{s}) = 2600\,\text{J}$ وهذه النتيجة تعادل $W = mgy$.

ملحوظة: يحتاج الشخص في الواقع إلى تحويل مقدارٍ من الطاقة يزيد على 2600 J. ويعود السبب في ذلك إلى أنّ الطاقة الكليّة المتحوّلة بواسطة الشخص أو حتى الآلة، تحتوي دائمًا على أشكال الطاقة جميعها ومن ضمنها الطاقة الحراريّة (تذكّر ارتفاع درجة حرارة جسمك عندما تركض صاعدًا الدرج).

الشكل **6 - 28** (المثال 6 - 14)

* تم اختيار الوحدة من قِبَل جيمس واط (1736 – 1819)، الذي احتاج إلى طريقةٍ ما لوصف القدرة الناتجة من الآلة البخاريّة التي طوّرها والجديدة في حينه. لقد وجد أن الحصان السليم قادرٌ على بذل شغل طوال اليوم بمتوسّط معدّلٍ يقارب 360 ft.lb/s. ولكي لا ينظر إليه على أنّه يبالغ ليزيد من مبيعات آلاته البخاريّة الجديدة، فقد ضرب هذا الرقم بمقدار $1\frac{1}{2}$، عند تعريفه لوحدة القدرة الحصانية hp.

تبذل محرّكات السيّارات شغلًا لكي تتمكّن من صعود التلال والتسارع، والتغلّب أيضًا على قوّة الاحتكاك (بما فيها مقاومة الهواء). وتُعدّ السيّارات مقيدةً بمعدّل قدرة كلٍّ منها على بذل الشغل، مما يحتّم تصنيف محركاتها بدلالة قدرتها بالأحصنة. تحتاج السيارة إلى قدرتها، وبالأخص عندما تتسلّق المرتفعات أو عند تسارعها. وسنقدّم أمثلةً توضيحيّةً على ذلك عند حساب القدرة اللازمة لسيارة ذات حجم متوسط كما في الحالات السابق ذكرها. ويجب أن تكون السيارة قادرةً على بذل شغل كافٍ عندما تتحرّك بسرعةٍ ثابتةٍ على طريقٍ مستوٍ للتغلّب على كلٍّ من قوّتي الاحتكاك الداخلي ومقاومة الهواء؛ لأنّ هذه القوى تعتمد عادةً على سرعة السيارة، وكذلك على الظروف المحيطة لتتراوح قيمتها ما بين 400 N — 1000 N.

يُعدّ التعامل مع القدرة بدلالة القوّة المحصّلة المؤثّرة في جسمٍ وسرعته v خيارًا ملائمًا في أغلب الأوقات .

ويمكن الوصول إلى هذه الصيغة بسهولة حيث $\overline{P} = W/t$، و $W = Fd$، لتكون d هي المسافة المقطوعة .

وعليه:

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{Fd}{t} = F\overline{v} \qquad \textbf{(17 – 6)}$$

حيث $\overline{v} = d/t$ هي متوسط سرعة الجسم.

المثال 6-15 حاجة السيارة من القدرة

احسب القدرة اللازمة لسيارة كتلتها 1400-kg تخضع للظروف التالية: (أ) تتسلق السيارة تلّةً مائلةً بزاوية 10° درجات إلى الأعلى (تلّة ذات درجة ميل عالية) بسرعة ثابتة مقدارها 80 km/h. (ب) تتسارع السيارة من سرعة 90 km/h إلى سرعة 110 km/h خلال 6.0 s لتتجاوز سيارة أخرى على طريق مستوٍ . افترض أن قوة الممانعة على السيارة هي $F_R = 700\text{ N}$ طوال الوقت (انظر الشكل 6–29).

النهج: يجب أولًا عدم الخلط بين قوة الممانعة $\vec{F}_R$ على السيارة الناتجة من مقاومة الهواء والاحتكاك الداخلي مع القوة $\vec{F}$ اللازمة لتسريع السيارة إلى الأمام، وهي قوّة الاحتكاك التي يؤثّر بها الطريق في عجلات السيارة كرد فعلٍ لدفع عجلات السيارة للطريق إلى الخلف نتيجة دوران المحرك. لذا، يجب تحديد القوة قبل حساب القدرة.

الحل: (أ) لكي تتحرك السيارة بسرعة ثابتة وهي تتسلق التلة، يجب أن تؤثّر السيارة بقوة F، بناءً على قانون نيوتن الثاني، مكافئةً لكلٍّ من الممانعة، 700 N، ومركبة الجاذبية الموازية للطريق، $mg \sin 10^\circ$ وعليه:

$$\begin{aligned} F &= 700\text{ N} + mg\sin 10^\circ \\ &= 700\text{ N} + (1400\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2)(0.174) = 3100\text{ N} \end{aligned}$$

حيث $\overline{v} = 80\text{ km/h} = 22\text{ m/s}$، وهي موازية لـ $\vec{F}$، لتصبح (المعادلة 6–17) القـــدرة:

$$\overline{P} = F\overline{v} = (3100\text{ N})(22\text{ m/s}) = 6.80 \times 10^4\text{ W} = 91\text{ hp}$$

(ب) تتسارع السيارة من 25.0 m/s إلى 30.6 m/s (90 إلى 110 km/h)؛ أي يجب أن تؤثر السيارة بقوة كافية للتغلّب على قوّة الممانعة، 700 N وتعمل على تسارع السيارة:

$$\overline{a}_x = \frac{(30.6\text{ m/s} - 25.0\text{ m/s})}{6.0\text{ s}} = 0.93\text{ m/s}^2$$

ونطبق قانون نيوتن الثاني للحركة باتجاه المحور السيني:

$$ma_x = \Sigma F_x = F - F_R$$

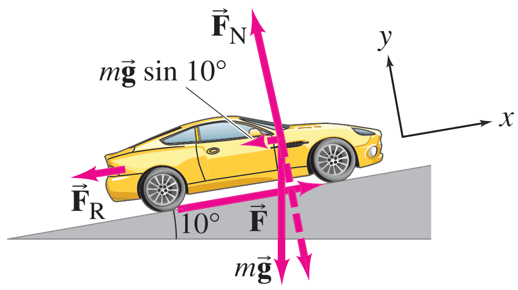
وعليه، فإنّ القوّة اللازمة، F، هي:

$$\begin{aligned} F &= ma_x + F_R \\ &= (1400\text{ kg})(0.93\text{ m/s}^2) + 700\text{ N} \\ &= 1300\text{ N} + 700\text{ N} = 2000\text{ N} \end{aligned}$$

وبما أنّ $\overline{P} = F\overline{v}$، فإنّ القدرة اللازمة تزداد مع ازدياد السرعة العالية، وعلى المحرّك أن يكون قادرًا على تزويد قدرة عظمى مقدارها:

$$\overline{P} = (2000\text{ N})(30.6\text{ m/s}) = 6.12 \times 10^4\text{ W} = 82\text{ hp}$$

ملحوظة: عند الأخذ بالحسبان حقيقة أن 60 إلى 80% فقط من قدرة المحرك الناتجة تصل إلى عجلات السيارة، فإنّه من المناسب القول وبناءً على هذه الحسابات إنّ محرّك سيّارة بقدرة 100 إلى 150 hp هو محرك مناسب جدًّا، من وجهة النظر العملية، للقيام بالمهمة السابقة أعلاه.



الشكل 6 – 29 مثال 6-15أ
حساب القوة الأزمة لسيارة تتسلق هضبة.

لقد ذكرنا في (المثال 6−15) أن جزءًا يسيرًا من الطاقة الناتجة من محرك السيارة يصل إلى دواليبها. وبالإضافة إلى ضياع مقدار لا بأس به من الطاقة خلال انتقالها من المحرك إلى الدواليب، فإن جزءًا كبيرًا لا يستهان به من الطاقة الناتجة من الوقود لا تعمل شغلًا نافعًا ويتمّ هدرها خلال المحرك. لذلك، فإن الصفة المهمة والمميزة لمختلف أنواع الآلات هي كفاءتها الكلية e، التي تم تعريفها كالتالي: النسبة بين القدرة المفيدة الناتجة من الآلة، P_{out} ، إلى القدرة المدخلة، P_{in}:

الكفاية

$$e = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

إنّ مقدار الكفاءة الناتج هو باستمرار أقل من 1.0، ويعود ذلك إلى عدم قدرة أيّ آلة على استحداث الطاقة من العدم، إضافةً إلى عدم قدرتها على تحويل الطاقة من شكل إلى آخر من غير فقدان جزء من هذه الطاقة على هيئة احتكاك أو حرارة، أو على نحو آخر من الطاقة غير النافعة. وعلى سبيل المثال، فإنّ محرّك السيارة يعمل على تحويل الطاقة الكيميائية الناتجة من احتراق الوقود إلى طاقة ميكانيكيّة تعمل على تحريك مكابس السيارة الأسطوانيّة في البداية؛ لتؤدي إلى تحريك دواليب السيارة في النهاية. ومع هذا، فإن 85% من الطاقة المدخلة يتم فقدانه كطاقةٍ حراريّة تمرّ من خلال نظام التبريد وأنبوب العادم، إضافة إلى فقدان ما تبقى منها نتيجة احتكاك الأجزاء المتحركة ببعضها بعضًا. وعليه، فإن كفاءة محركات السيارات تكاد تصل إلى 15%. وسوف ندرس ونناقش هذا الموضوع بالتفصيل في الفصل الخامس عشر.

ملخّص

يُبذلُ **الشغل** على جسمٍ بواسطة قوّةٍ ما خلال تحرك الجسم مسافة d. وإذا صنعت القوة الثابتة F زاوية مقدارها θ مع اتجاه الحركة، فإنّ الشغل المبذول بواسطة هذه القوة يعطى كالتالي:

$$W = Fd\cos\theta \qquad (1-6)$$

يمكن تعريف **الطاقة** على أنها إمكانية عمل شغلٍ ما. ويتمّ قياس الشغل والطاقة حسب النظام الدولي للوحدات (SI) باستخدام وحدة الجول: $(1\,J = 1\,N\cdot m)$.

وتمّ تعريف **الطاقة الحركيّة** (KE) على أنها الطاقة الناتجة من حركة الأجسام. ويمتلك جسم كتلته m وسرعته v طاقة حركية انتقالية مقدارها:

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad (3-6)$$

تُعرّفُ **طاقة الوضع** (PE) على أنها الطاقة المرتبطة بالموضع. وتُعطى طاقة الوضع الناتجة من قوة جذب الأرض للأجسام كالتالي:

$$\text{PE}_{grav} = mgy \qquad (6-6)$$

ويمثل y ارتفاع جسمٍ ما كتلته m مقارنةً بنقطة مرجعيّة عشوائيّة يتمّ اختيارها. وتُعطى طاقة الوضع المرنة لزنبرك متمدّد أو مضغوط بالعلاقة التالية :

$$\text{PE}_{\text{المرن}} = \tfrac{1}{2}kx^2 \qquad (9-6)$$

حيث تمثّل x إزاحة الزنبرك عن موضع الاتزان، في حين تمثّل k ثابت صلابته . وهناك طاقات وضع، أو طاقات كامنة أخرى من ضمنها الطاقة الكيميائية، والكهربائيّة، والنوويّة. إنّ التغيّر في طاقة الوضع الناتج من تغير موضع الجسم يعادل قيمة الشغل الخارجي اللازم لنقل الجسم من موضع إلى آخر.

بناءً على **مبدأ الشغل والطاقة** فإنّ محصّلة **الشغل المبذول على جسمٍ ما** (بواسطة القوّة المحصّلة) تعادل التغيّر في طاقة الجسم الحركية، ويُعطى حسب المعادلة التالية:

$$W_{net} = \Delta\text{KE} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 \qquad (4-6 \text{ ، } 2-6)$$

بناءً على **قانون حفظ الطاقة**، يمكن أن تتحوّل الطاقة من شكلٍ إلى آخر شريطة أن يبقى مقدارها الكلّي ثابتًا لا يتغيّر. ويبقى هذا القانون صحيحًا بوجود الاحتكاك لاعتبار الاحتكاك أو الطاقة الحرارية شكلًا من أشكال تحوّل الطاقة.

وعندما تكون القوى الفاعلة محافظةً تصبح الطاقة الميكانيكيّة الكليّة محفوظة:

$$\text{KE} + \text{PE} = \text{مقدار ثابت}$$

أمّا عندما تكون القوى الفاعلة غير محافظةٍ كقوّة الاحتكاك، فتصبح المعادلة كالتـــالي:

$$W_{NC} = \Delta\text{KE} + \Delta\text{PE} \qquad (10-6)$$

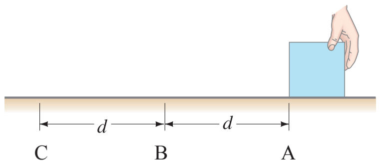
بحيث تمثّل الشغل المبذول بواسطة القوى غير المحافظة.

وتمّ تعريف **القدرة** (*Power*) على أنّها معدّل عمل الشغل، أو معدّل تغيّر الطاقة من شكلٍ إلى آخر. وعليه، فإنّ الوحدة الدوليّة للقدرة حسب نظام الوحدات الدولي (SI) هي **"واط"** *Watt* حيث $(1\,W = 1\,J/s)$.

أسئلة

1. ما أوجه الشبه والاختلاف في تعريف "الشغل" كمصطلحٍ فيزيائيٍّ مقارنةً مع لغة الناس عامة؟ دعّم إجابتك بالأمثلة المناسبة لكلا الحالتين.
2. هل يمكن للقوّة المركزيّة أن تعمل أيّ شغلٍ على الجسم؟ وضّح إجابتك.
3. هل يمكن للقوّة العموديّة أن تعمل أيّ شغلٍ على الجسم؟ وضّح إجابتك.
4. هل يعمل السبّاح أي شغلٍ عندما يحاول السباحة بعكس التيّار ممّا ينجم عن بقائه في موضعه نسبةً إلى الشاطئ؟
5. هل يمكن القول بأنّ شغل قوى الاحتكاك هو مقدار سالب دائما؟ (تنويه: انظر ما يحدث للأطباق على الطاولة عندما يتم سحب غطاء الطاولة من تحتها).
6. لم يُعدّ دفع حائط مبنى صلبٍ ساكنٍ أمرًا صعبًا مع أنّك لم تبذل شغلا؟
7. إذا كان لديك زنبركان متماثلان مع فرق واحد وهو أن الزنبرك الأول أكثر صلابةً من الثاني $(k_1 > k_2)$، فعلى أي منهما يكون الشغل المبذول أكبر: أ) إذا تمت استطالتهما تحت تأثير القوة نفسها؟ أم ب) إذا تمت استطالتهما للمسافة نفسها؟

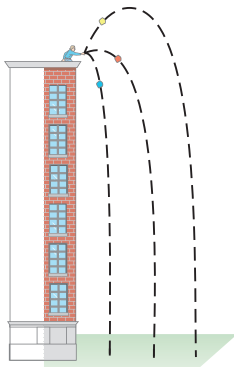
8. تؤثّر يدٌ بقوّةٍ أفقيّةٍ ثابتةٍ في مكعبٍ قادرٍ على الانزلاق على سطحٍ أملس (الشكل 6 − 30). إذا بدأ المكعب بالحركة من السكون من النقطة A ليقطع مسافة d ويصل إلى النقطة B ستصبح سرعته v_B. فما سرعة المكعب عندما يقطع مسافة إضافية مقدارها d ليصل بعدها إلى النقطة C، هل هي أقلّ من $2v_B$؟ وضّح الأسباب وراء إجابتك.



الشكل 6-30
(السؤال 8).

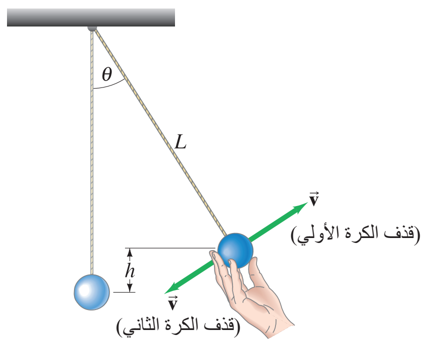
9. ما مقدار التغيّر التقريبي في طاقة جذب الأرض لك عندما تقفز إلى أعلى ارتفاع ممكن ناجٍ من قوة دفع أقدامك؟

10. في (الشكل 6−31)، وعند إهمال مقاومة الهواء، أي بالون مليء بالماء يصطدم بسرعة أعلى بالأرض عندما يتمّ قذفه من أعلى البناية؟ (علمًا بأنّ السرعة الابتدائية للبالونات جميعها واحدة، ولكن لكلّ بالون زاوية قذفٍ مختلفة).



الشكل 6-31
(السؤال 10).

11. تمّ إطلاق بندول بسيط بطريقتين مختلفتين من الارتفاع h نفسه، مقارنةً بأخفض نقطةٍ يمكن أن يصل إليها (الشكل 6−36). تمّ إعطاء البندول سرعةً ابتدائيّةً مقدارها 3.0 m/s خلال الإطلاقين، بحيث يكون أولهما إلى الأعلى والثاني إلى الأسفل على امتداد المسارين. أيّ من الإطلاقين سيسبّب أكبر زاوية تذبذب للبندول مقارنةً مع وضع الاتزان؟ وضح إجابتك.



الشكل 6 - 32 (السؤال 11).

12. إذا تمّ التأثير في ملفٍّ زنبركيٍّ ساكنٍ على سطح طاولة (ذي كتلة m) بالضغط عليه باليد إلى أسفل، ثم أزيحت اليد جانبًا، فهل يستطيع الزنبرك القفز عن الطاولة؟ وضّح إجابتك مستعينًا بقانون حفظ الطاقة.

13. إذا أراد مدرّسٌ أن يتفادى الإصابة الناجمة من كرة البولينج المعلّقة في السقف بواسطة سلكٍ معدنيٍّ عند ارتدادها باتجاهه، فعليه أن يمسك الكرة بدايةً من أمام أنفه، وظهره مستندًا إلى الحائط، ثم يترك الكرة لتبدأ بالحركة من وضع السكون، كما في (الشكل 6 − 33). لماذا يجب على المدرس أن يفعل ذلك من غير دفع الكرة؟

الشكل 6 - 33
(السؤال 13).

14. ماذا يحدث لطاقة الوضع الناجمة من جذب الأرض عندما تسقط المياه من أعلى الشلال باتجاه بركة مياه في الأسفل؟

15. صف التغيّر في أشكال الطاقة عندما يقفز طفل على العصاة الزنبركية (عصاة البوجو).

16. صف التغيّر في أشكال الطاقة الناجمة من التزلج على الجليد من أعلى منحدر، بدءًا من السكون إلى لحظة الاصطدام بالثلج المتراكم أسفل المنحدر ووقوف المتزلج المفاجيء والتام.

17. يبدأ طفل بالانزلاق من السكون على مزلاجته إلى أسفل منحدر ارتفاعه h (الكتلة الكلية m)، فهل ستعتمد سرعة المزلاجة أسفل المنحدر على درجة ميلانه: (أ) عندما يكون سطح المنحدر مغطّى بطبقة صقيع (لا يوجد احتكاك). (ب) عندما يكون سطح المنحدر مغطّى بطبقةٍ من الثلج الكثيف المسبب للاحتكاك.

18. لماذا يفضل الرحالة الموسميون القفز عن الأغصان المتساقطة إلى جانبها الآخر للمرور بدلاً من الوقوف عليها؟ وضّح إجابتك.

19. إذا تمّ إطلاق قوسين سرعة أحدهما ضعف سرعة الآخر على رزمةٍ من محصولٍ زراعي، فما الفرق في مسافة اختراق السهم السريع للرزمة مقارنة مع المسافة التي سيخترقها السهم البطيء، إذا افترضنا أنّ الرزمة تؤثّر بقوّة احتكاكٍ ثابتةٍ على كلا القوسين؟ وضّح إجابتك.

20. حلّل بدلالة الطاقة حركة بندول بسيط يهتز عند: (أ) إهمال الاحتكاك. (ب) أخذ الاحتكاك بالحسبان. وضح لماذا يجب أن تتم تعبئة الساعة البندوليّة.

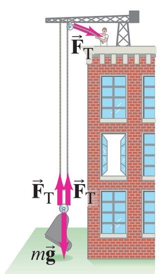
21. هل يمكن لكرةٍ مثاليّةٍ تسقط باتجاه الأرض أن ترتدّ لتصل إلى مستوى أعلى من ارتفاعها الأصلي؟ وضّح إجابتك.

22. يعتمد الشغل المبذول على حقيبةٍ عند رفعها من الأرض إلى طاولة على: (أ) ما إذا تم رفعها مباشرة إلى أعلى أو من خلال طريق متشعب. (ب) الوقت المستغرق في رفعها. (ج) ارتفاع الطاولة. (د) وزن الحقيبة.

23. أعد حل المسألة السابقة بالنسبة إلى القدرة بدلًا من الشغل المبذول على الحقيبة.

24. لماذا تُعدّ عملية صعود الجبل باستخدام طريقٍ متعرّجٍ دائمًا أسهل مقارنةً مع الصعود المباشر إلى الأعلى؟

25. تذكر من الفصل الرابع، (المثال 4–14)، بأنك تستطيع أن تستخدم بكرةً وحبلاً للتقليل من قيمة القوة اللازمة لرفع حمل ثقيل إلى أعلى (انظر الشكل 6–34). ما طول الحبل الواجب سحبه ليتم رفع الثقل مسافة 1 m إلى أعلى؟ استخدم مبدأ الطاقة.



الشكل 6 - 34
(السؤال 25).

مسائل

6 – 1 الشغل، القوة الثابتة

1. (I) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة قوة جذب الأرض عندما تسقط رافعة كتلتها 265-kg مسافة 2.80 m؟

2. (I) ما مقدار الشغل الذي يبذله رجل الدفاع المدني (كتلته 65.0-kg) عندما يصعد درجًا إلى أعلى مسافة 20.0 m؟

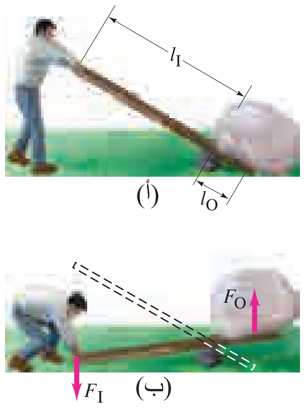
3. (I) ما مقدار الشغل اللازم بذله لتحريك صندوق شحن وزنه 1300-N بسرعة ثابتة: (أ) مسافة 4.0 m عن سطح الأرض ضدَّ قوّة احتكاك مقدارها 230 N؟ (ب) مسافة 4.0 m عموديًّا؟

4. (I) ما مقدار الشغل الذي يجب أن يقوم به العمّال عند دفعهم صندوق شحنٍ كتلته 160-kg مسافةً أفقيّةً مقدارها 10.3 m على سطح أرضٍ خشنٍ من غير تسارع إذا كان معامل الاحتكاك الفاعل يعادل 0.50؟

5. (II) أوجد محصّلة الشغل المبذول على صندوقٍ كتلته 5.0 kg عند تسارعه من السكون على سطح الأرض بمعدل $2.0\ m/s^2$ لمدة 7.0 s.

6. (II) ما مقدار الشغل اللازم بذله لوضع ثمانية كتبٍ فوق بعضها بعضًا على سطح طاولة، إذا كان سمك كلّ كتابٍ هو 4.3 cm وكتلته 1.7 kg؟

7. (II) يمكن استخدام العتلة الرافعة لرفع أثقال من غير الممكن رفعها بأيّ طريقةٍ أخرى، كما في (الشكل 6 – 35). أثبت أنّ العلاقة بين القوّة الناتجة F_O إلى القوّة المدخلة F_I ونسبة الأطوال l_I و l_O كالتالي: مقارنةً بنقطة الارتكاز. $F_O/F_I = l_I/l_O$ أهمل كلًّا من قوة الاحتكاك وكتلة العتلة الرافعة، وافترض أن الشغل الناتج يعادل الشغل المدخل.



الشكل 6 – 35
(المسألة 7).
عتلة رافعة بدائية

8. (II) تنزلق آلة بيانو كتلتها 330-kg مسافة 3.6 m بلا تسارع إلى أسفل سطح بميل بمقدار 28° نتيجة دفعها بقوّةٍ موازيةٍ للسطح المائل، كما في (الشكل 6 – 36). إذا كان معامل الاحتكاك الحركي يعادل 0.40، فاحسب كلًّا من: (أ) القوة التي تتأثر بها الآلة. (ب) الشغل المبذول على الآلة. (جـ) الشغل المبذول بواسطة قوّة الاحتكاك. (د) الشغل المبذول بواسطة قوّة الجاذبية الأرضيّة. (هـ) محصّلة الشغل المبذول على آلة البيانو.

الشكل 6 - 36
(المسألة 8) .

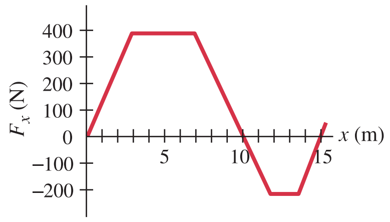
9. (II) (أ) أوجد القوّة اللازمة لتزويد طائرةٍ عمودية كتلتها M بتسارع مقداره $0.10g$ إلى الأعلى. (ب) أوجد الشغل المبذول بواسطة هذه القوة عند ارتفاع الطائرة العمودية مسافة h إلى الأعلى.

10. (II) ما أقل قدر من الشغل اللازم لدفع سيارة كتلتها 950-kg مسافة 810 m إلى أعلى على سطح مائل بزاوية 9.0° فوق الأفقي: (أ) عند إهمال الاحتكاك؟ (ب) عند فرض معامل الاحتكاك الفاعل للسيارة 0.25؟

*6 – 2 الشغل والقوة المتغيرة

***11.** (II) افترض أن محور المسافة خطّي، و $d_A = 10.0\ m$ و $d_B = 35.0\ m$، كما في (الشكل 6–16 أ) . قدّر الشغل المبذول بواسطة القوّة F عند تحريك جسم كتلته 2.80-kg من d_A إلى d_B.

***12.** (II) تتغيّـر القـوّة المؤثّـرة في جسـمٍ مـا باتجـاه المحور السـيني، كما يظهر في (الشـكل 6–37) حدّد الشـغل المبذول بواسـطـة هذه القوة عنـد تحريـك الجسـم: (أ) مـن $x = 0.0$ إلـى $x = 10.0\ m$. (ب) من $x = 0.0$ إلـى $x = 15.0\ m$.



الشكل 6–37
(المسألة 12) .

***13.** (II) استخدم الرسم البياني لتحدد الشغل اللازم بذله عند استطالة زنبرك ثابت صلابته $k = 88\ N/m$ من $x = 3.8\ cm$ إلى $x = 5.8\ cm$، بحيث تمثل x إزاحة الزنبرك عن وضع الاتزان.

14. (II) تؤثّر القوّة المحصّلة في جسم باتجاه المحور السيني الموجب. ويزداد مقدارها خطيًّا من صفر عند $x = 0$ إلى 24.0 N عند $x = 3.0\ m$. وتبقى قيمتها ثابتة عن القيمة 24.0 N من النقطة $x = 3.0\ m$ إلى النقطة $x = 8.0\ m$ ثم تبدأ بالنقصان خطيًّا حتى تصل قيمتها إلى صفر عند $x = 13.0\ m$. احسب الشغل اللازم لنقل الجسم من $x = 0$ إلى $x = 13.0\ m$ باستخدام الرسم البياني وحساب المساحة الواقعة تحت منحنى F_x مقابل المحور السيني.

6 – 3 الطاقة الحركية؛ مبدأ الشغل والطاقة

15. (I) ما سرعة جزيء الأكسجين عند درجة حرارة الغرفة إذا كانت كتلته تعادل $5.31 \times 10^{-26}\ kg$ وتقدّر طاقته الحركية بـ $6.21 \times 10^{-21}\ J$ تقريبًا؟

16. (I) (أ) ما معامل ازدياد سرعة القوس عند مضاعفة طاقته الحركيّة؟ (ب) ما معامل ازدياد طاقته الحركية عند مضاعفة سرعتها؟

17. (I) ما مقدار الشغل اللازم لإيقاف إلكترون $(m = 9.11 \times 10^{-31}\ kg)$ يتحرّك بسرعةٍ مقدارها $1.90 \times 10^6\ m/s$؟

18. (II) احسب الشغل الضروري بذله لإيقاف سيارةٍ تسير بمعدل 105 km/h إذا كانت كتلتها 1250-kg؟

19. (II) كتلة سهم 88-g أُطلق من قوسٍ يؤثّر عليه بقوّة متوسّطة مقدارها 110 N خلال مسافة 78 cm. ما سرعة السهم عند انطلاقه من القوس تحت تأثير تلك القوّة؟

20. (II) ما متوسط تأثير قوّة كرة بيسبول كتلتها $(m = 140\ g)$ تسير بسرعة 32 m/s خلال دفعها ليد اللاعب إلى الخلف مسافة 25 cm في أثناء إمساكه بالكرة؟

21. (II) حدّد معامل ازدياد المسافة اللازمة للتوقّف عند زيادة سرعة السيارة بمقدار 50%؟ اهمل زمن ردّ فعل السائق مفترضًا أنّ المؤثرات الأخرى جميعها ثابتة.

22. (II) قاس محقّقون آثار العجلات المنزلقة في موقع حادث فوجدوها تصل إلى 88 m. تم تقدير معامل الاحتكاك الحركي على السطح المبلل بمياه الأمطار ليكون 0.42. استخدم هذه المعلومات لتحديد سرعة السيارة لحظة تطبيق السائق (وإغلاق) كوابح السيارة. علّق لِمَ لا تدخل كتلة السيارة في حساب سرعتها.

23. (II) خسرت كرة بيسبول (كتلتها 0.25 kg) 10% من سرعتها الأصلية 95 km/h منذ لحظة إرسالها إلى وقت وصولها إلى القاعدة. احسب متوسط قوة مقاومة الهواء خلال إرسالها إذا كانت المسافة الفاصلة بين المرسل والقاعدة النهائية هي 15 m. (اهمل قوّة جذب الأرض للكرة).

24. (II) إلى أيّ ارتفاع ستصل كرة كتلتها 1.85-kg إذا قذفتها فتاة مباشرة إلى أعلى عند بذلها J 80.0 على الكرة؟ (اهمل مقاومة الهواء).

25. (III) إذا تم رفع ثقلٍ كتلته 285-kg مسافة 22.0 m إلى أعلى باستخدام حبل رفع سميك بتسارع قدره $a = 0.160\,g$، فاحسب: (أ) قوّة الشد في الحبل. (ب) محصّلة الشغل المبذول على الثقل. (جـ) الشغل الذي بذله الحبل على الثقل. (د) السرعة النهائية للثقل على افتراض أنّه بدأ الحركة من السكون.

6 – 4 و 6 – 5 طاقة الوضع

26. (I) ما مقدار الاستطالة اللازمة لزنبرك (ثابت صلابته: k = 440 N/m) لكي يخزن طاقة مقدارها 25 J؟

27. (I) ما مقدار التغيّر في طاقة الوضع لقرد كتلته 7.0 kg، عندما ينتقل من فرع شجرة إلى آخر يرتفع بمقدار 1.2 m؟

28. (I) ما مقدار التغيّر في طاقة وضع لاعب قفْزٍ عالٍ كتلته 64-Kg، عندما يرتفع مركز كتلته 4.0 m تقريبًا خلال القفز؟

29. (II) تتحرك سيارة كتلتها 1200-kg على سطحٍ أفقيٍّ بسرعةٍ مقدارها $v = 65\,\text{km/h}$ وتصطدم بزنبرك لتضغطه مسافة 2.2 m قبل أن تصل إلى السكون.ما معامل الصلابة للزنبرك؟

30. (II) يرفع طالبٌ طوله 1.60 m كتابًا كتلته 2.10-kg عن سطح الأرض إلى ارتفاع 2.20 m. ما طاقة الوضع للكتاب نسبة إلى: (أ) سطح الأرض؟ (ب) أعلى رأس الطالب؟ (جـ) ما علاقة الشغل المبذول بواسطة الطالب بالإجابة عن الفرعين السابقين؟

31. (II) يبدأ رياضيٌّ كتلته 55-kg بالتسلّق من ارتفاع 1600 m ليصل إلى قمّة ترتفع بمقدار 3300-m. (أ) ما التغيّر في طاقة وضع الرياضي؟ (ب) ما مقدار أدنى شغلٍ يجب على الرياضي بذله؟ (جـ) هل يمكن للشغل المبذول الفعلي أن يكون أكثر من ذلك؟ فسر لماذا.

32. (II) عندما تمّ تعليق زنبرك ($k = 53$ N/m) عموديًّا بجوار مسطرة، كانت القراءة على المسطرة قرب نهاية الزنبرك هي 15-cm. ما القراءة الجديدة على المسطرة بقرب نهاية الزنبرك عندما يتمّ تعليق كتلةٍ مقدارها 2.5-kg به؟ (ملحوظة: تُؤخذ القراءة فقط لحظة اتزان النظام المكوّن من الزنبرك والكتلة المعلقة به).

6 – 6 و 6 – 7 حفظ الطاقة الميكانيكيّة

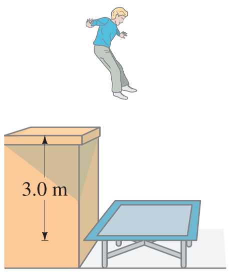
33. (I) أمسكت جميلة وهي تركض خلف طرزان بسرعةٍ عالية (مقدارها 5.3 m/s) بجذعٍ يتدلّى عموديًّا من شجرةٍ في الغابة. ما أعلى ارتفاع تستطيع أن تصل إليه؟ وهل يؤثر طول الجذع في الإجابة؟

34. (I) تبدأ متزلجةٌ هاويةٌ بالانزلاق من السكون إلى الأسفل على سطح أملس ارتفاعه 185 m ويميل بزاوية $35.0°$. ما السرعة النهائية للمتزلجة عند أسفل المنحدر؟

35. (I) ما السرعة الابتدائيّة لمزلاج تمّ دفعه إلى أعلى منحدرٍ أملسٍ يميل بزاوية $28.0°$ لحظة وصوله إلى ارتفاع مقداره 1.35 m مقارنةً مع موضعه الابتدائي؟

36. (II) تُحوّل فاطمة طاقتها الحركيّة إلى طاقة وضع خلال الوثب العالي دون الحاجة إلى استخدام عمود الوثب. ما أدنى سرعةٍ يجب أن تصل إليها فاطمة لكي تستطيع أن ترفع مركز كتلتها بمقدار 2.10 m لتتمكن من القفز فوق العارضة بسرعة مقدارها 0.70 m/s؟

37. (II) يقفز لاعب كتلته 65-kg إلى الأعلى من منصّة قفز بسرعةٍ مقدارها 5.0 m/s. (أ) ما سرعة اللاعب لحظة وصوله إلى النطاط الموجود على ارتفاع 3.0 m أسفل المنصة (الشكل 6–38)؟ (ب) ما مقدار انضغاط النطاط إلى أسفل عند اعتباره زنبركًا ذا ثابت صلابة يساوي 6.2×10^4 N/m؟

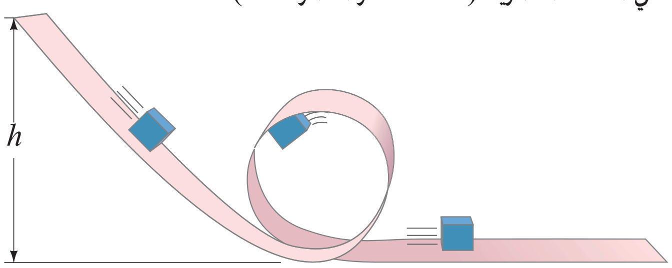


الشكل 6 – 38
(المسألة 37) .

38. (II) أطلق مقذوف من قمّة جرفٍ بسرعة 185 m/s إلى الأعلى بزاوية $45.0°$ ما سرعة المقذوف لحظة اصطدامه بالأرض إذا كان ارتفاع الجرف 265-m؟ (استخدم مبدأ حفظ الطاقة).

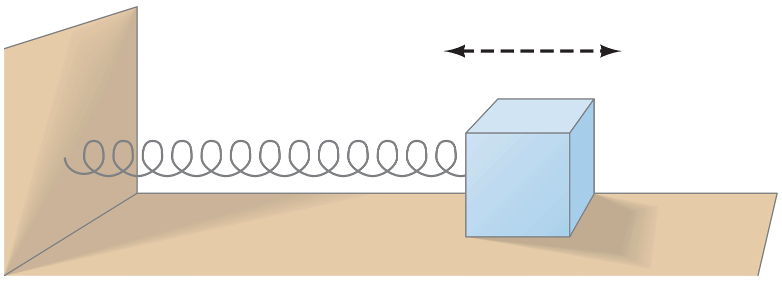
39. (II) تمّ ضغط زنبركٍ عموديٍّ (مهمل الكتلة) على سطح طاولة مسافة 0.150 m. إذا كان ثابت صلابة الزنبرك 950 N/m، فاحسب: (أ) السرعة العموديّة المعطاة لكرة كتلتها 0.30-kg عند إفلات الزنبرك؟ (ب) أقصى ارتفاع يمكن أن تصل إليه الكرة مقارنةً مع موقعها الأصلي عندما يكون الزنبرك مضغوطًا؟

40. (II) ينزلق مكعب كتلته m على طول مسارٍ حلقيٍّ أملس لا يحدث أي احتكاك كما في (الشكل 6 – 39) . ما أدنى ارتفاع h يجب أن يبدأ المكعب عنده بالانزلاق بحيث يبقى المكعب ملاصقاً للمسار، حتى عند أعلى نقطة في الحلقة الدائرية (نصف قطر الدائرة = r).



الشكل 6 – 39 (المسألة 40 و 75) .

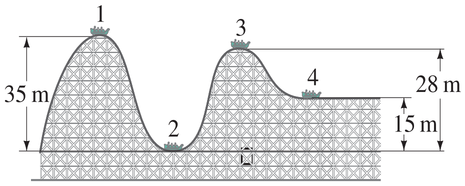
41. (II) تم ربط مكعب كتلته m بنهاية زنبرك (ثابت صلابة الزنبرك = k) كما في (الشكل 6 – 40). اكتب معادلة الطاقة الميكانيكيّة الكليّة (مهملا الاحتكاك وكتلة الزنبرك) بدلالة كلٍّ من x_0 والموضع x، والسرعة v عندما يبدأ المكعب بالتذبذب إلى الأمام والخلف نتيجة إزاحته مسافة ابتدائية مقدارها x_0.



الشكل 6 – 40 (المسألة 41، 55 و 56) .

42. (II) تقفز لاعبة كتلتها 62-kg من أعلى جسر. فإذا هوت مسافة 31 m إلى الأسفل وهي ممسكة بحبل مرن (طوله في حالة الاسترخاء 12 m) فاحسب: (أ) ثابت معامل صلابة الحبل المرن k الخاضع لقانون هوك. (ب) احسب أقصى تسارع تشعر به اللاعبة.

43. (II) تمّ سحب عربة أفعوانية كما في (الشكل 6 – 41) إلى الموضع 1، ومن ثمّ تُركت لتهوي من السكون. احسب السرعة عند كل من المواضع 2، 3، 4 (أهمل الاحتكاك).



الشكل 6 – 41
(المسألة 43 و 53)

44. (II) رُميت كرةٌ كتلتها 0.40-kg بسرعة مقدارها 12 m/s بزاوية 33° (أ) ما سرعة الكرة عند أعلى نقطة. (ب) ما أعلى ارتفاع تصل إليه الكرة؟ (استخدم مبدأ حفظ الطاقة، واهمل مقاومة الهواء).

45. (III) صمم مهندس زنبركًا ليتم وضعه أسفل عمود التحكم بالمصعد. احسب قيمة ثابت صلابة الزنبرك k الذي يضمن ألا يزداد تسارع الركاب على 5.0 g أضعاف عجلة الجاذبية الأرضية عندما يُجلب المصعد للسكون عند انقطاع حبل تثبيت المصعد.

46. (III) ينوي درّاج أن يتسلق تلّةً درجة ميلها 7.8° وارتفاعها الرأسي 150 m. إذا كانت كتلتا الدّراج والدّراجة معًا 75 kg، فاحسب: (أ) مقدار الشغل اللازم بذله ضدّ عجلة الجاذبية الأرضية. (ب) متوسط القوة التي يجب أن تطبق على بدالات الدراجة إذا كانت كل دورة كاملة للبدالات تنقل الدّراجة مسافة 5.1 m. (اهمل شغل الاحتكاك وأي شغل ضائع آخر، علمًا بأنّ قطر دائرة البدالات هي 36 cm).

6 – 8 و 6 – 9 قانون حفظ الطاقة

47. (I) تتصادم مقطورتان على سكة حديد (كتلة كل منهما 7650 kg وتسيران بسرعة 95 km/h باتجاهين متعاكسين) تصادمًا رأسيًا لتقفا بعدها وقوفًا تامًّا. ما مقدار الطاقة الحرارية المولدة الناتجة من هذا التصادم؟

48. (II) يبدأ طفل كتلته 21.7-kg بالانزلاق على سطح مائل من ارتفاع 3.5 m ليصل إلى سرعة مقدارها 2.2 m/s عند أسفل المنحدر. ما الطاقة الحرارية المولدة خلال الاحتكاك نتيجة عملية الانزلاق هذه؟

49. (II) يبدأ متزلّج بالانزلاق من السكون مسافة 75 m على سطح مائل بزاوية 22°. (أ) ما سرعة المتزلّج عند أسفل المنحدر إذا كان معامل الاحتكاك 0.090؟ (ب) ما المسافة التي سيقطعها المتزلج قبل أن يقف وقوفًا كاملا بعد أن يصل إلى أسفل المنحدر إذا كان معامل احتكاكٍ الثلج المستوي على سطح الأرض الأفقي هو الرقم السابق نفسه؟ استخدم طرق الطاقة.

50. (II) أُسقطت كرة بيسبول كتلتها 145-g من شجرة ترتفع 13.0 m فوق سطح الأرض. (أ) ما سرعة اصطدامها بالأرض لحظة إهمال مقاومة الهواء؟ (ب) ما متوسط قوة مقاومة الهواء للكرة لحظة اصطدامها بالأرض بسرعة فعلية 8.00 m/s؟

51. (II) عندما تسقط الكرة من ارتفاع 2.0 m لترتد مرتفعة مسافة 1.5 m، حدّد: (أ) نسبة الطاقة الضائعة نتيجة الارتداد. (ب) سرعة الكرة لحظة ارتدادها من سطح الأرض. (جـ) أوجه ضياع الطاقة.

52. (II) تمّ دفع عربة كتلتها 110-kg على سطح أفقي بواسطة قوة أفقية ثابتة مقدارها 350 N. ما السرعة النهائية للعربة إذا كان السطح أملس خلال أول 15 m، ثم أصبح خشنًا بمعامل احتكاك مقداره 0.30 لمسافة 15 m؟

53. (II) افترض أن سرعة عربة أفعوانية لحظة مرورها بالموضع 1 تصل إلى 1.70 m/s كما في (الشكل 6–41). ما سرعتها عندما تصل الموضع 2 إذا كان متوسّط طاقة الاحتكاك يعادل خمس وزنها. علمًا بأنّ المسافة المقطوعة هي 45.0 m؟

54. (II) يصل متزلّج يسير بسرعة 12.0 m/s إلى أسفل منحدر يميل بزاوية 18.0° ليبدأ بعدها بصعود سطح مائل وفقدان سرعته ليصل إلى السكون بعد أن يقطع مسافة 12.2 m. ما متوسط معامل الاحتكاك؟

55. (III) يربط مكعب خشبي كتلته 0.620 kg بإحكام بزنبرك أفقي ضعيف جداً ($k = 180$ N/m) كما في (الشكل 6 – 40). يخضع نظام المكعب والزنبرك للاستطالة إلى الخارج مسافة 2.3 cm مبتعدًا عن وضع الاتزان قبل أن يتوقف ويرتد في الاتجاه الآخر كنتيجة لضغطه مسافة 5.0 cm. ما معامل الاحتكاك الحركي بين سطحي المكعب والطاولة؟

56. (III) يربط مكعب خشبي كتلته 280-g بإحكام بزنبركٍ أفقي ضعيف جداً،(الشكل 6–40) يستطيع المكعب الانزلاق على سطح طاولة ليكون معامل الاحتكاك 0.30. ما مقدار استطالة الزنبرك القصوى مقارنة مع وضع الاتزان عند تحرّره وبعد انضغاطه مسافة 18 cm بواسطة قوة مقدارها 22N؟

57. (III) أُطلقت مركبة فضاء خلال تجاربها الأولى للطيران أفقيًّا بسرعة 500 km/h من ارتفاع 3500 m بواسطة زلّاجة (كتلتها وكتلة الطيار معًا 980 kg) لتهبط الزلّاجة بعدها بسرعة مقدارها 200 km/h. (أ) ما سرعة الهبوط في حالة انعدام احتكاك الهواء؟ (ب) ما متوسط قوّة مقاومة الهواء المؤثّرة فيه إذا عاد إلى الأرض بسرعةٍ ثابتةٍ بزاوية 10°؟

6 – 10 القدرة

58. (I) ما مقدار الزمن اللازم لمحرّك قدرته 1750-W لرفع آلة بيانو كتلتها 315 kg إلى شباك في الطابق السادس على ارتفاع 16.0 m. إلى الأعلى؟

59. (I) ما متوسط القوة المؤثرة في سيارة نتيجة الاحتكاك ومقاومة الهواء، إذا كانت السيارة تولد قدرة مقدارها 18 hp عندما تسير بسرعة ثابتة مقدارها 88 km/h؟

60. (I) ما متوسط قدرة محرك سيارة كتلتها 1400-kg تتسارع من السكون إلى 95 km/h خلال 7.4 s؟

61. (I) أثبت أن القدرة الحصانيّة الواحدة (550 ft.lb/s) تعادل 746 W. (ب) ما القدرة الحصانيّة لمصباح ضوئي قدرته 75-W؟

62. (II) يعبر عادةً عن وحدات الطاقة الكهربائية بدلالة "كيلو واط. ساعة". (أ) اثبت أنّ واحد كيلو واط-ساعة (kWh) يُعادل 3.6×10^6J. (ب) ما كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة بدلالة kWh التي ستظهر على فاتورة الكهرباء لعائلة مكونة من أربعة أشخاص، (جـ) كم من الجولات تعادل هذه الكمية؟ إذا كان متوسط معدل استهلاكهم للطاقة الكهربائية هو 520 W. (د) ما قيمة هذا الاستهلاك بالدولار إذا كانت قيمة $kWh = \$0.12$؟ هل تعتمد قيمة فاتورتهم الشهرية على متوسط معدل استهلاكهم من الطاقة الكهربائيّة.

63. (II) لاحظت سائقة أن سيارتها (ذات 1150-kg) تتباطأ على السطح الأفقي من سرعة 85 km/h إلى سرعة 65 km/h خلال 6.0 s عند تثبيت عمود السرعات في الوضعية المحايدة. ما القدرة (بدلالة كل من الواط والقدرة الحصانية) اللازمة للمحافظة على سرعة السيارة ثابتة عند 75 km/h؟

64. (II) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة محرك قدرته 3.0-hp خلال ساعة واحدة؟

65. (II) ما متوسط القدرة اللازمة لتسريع كرة ثقيلة كتلتها 7.3-kg عند قذفها من السكون لتصل إلى سرعة مقدارها 14 m/s خلال 1.5 s؟

66. (II) ترفع مضخةٌ ماءً كتلته 18.0 kg مسافة 3.60 m خلال دقيقة واحدة. ما مقدار قدرة محرك المضخة (بالواط)؟

67. (II) ركض لاعبو فريق جامعة لكرة القدم خلال التدريب إلى أعلى مدرج الملعب خلال 66 s. إذا كان طول المدرج المائل بـ 32° هو 140 m، ومتوسط كتلة اللاعب 95 kg، فاحسب متوسط قدرة اللاعب خلال صعوده إلى أعلى المدرج. اهمل الاحتكاك ومقاومة الهواء.

.68 (II) ما السرعة التي يجب أن يتسلّق بها راكب درّاجة هوائيّة ميلانها 6.0° ليحافظ على قدرة ناتجة مقدارها 0.25 hp؟ اهمل شغل الاحتكاك. مع العلم أنّ كتلة الراكب والدرّاجة تساوي 68 kg.

.69 (II) سيارة كتلتها 1200-kg، لها قدرة عظمى مقدارها 120 hp. ما درجة ميلان التلة القادرة على تسلّقها بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارها 75 km/h إذا كانت محصلّة قوى الاحتكاك هي 650 N؟

.70 (II) ما أدنى مقدار لقدرة محرّك بدلالة الأحصنة تمكّنه من دفع صندوقٍ كتلته 310-kg بمحاذاة سطحٍ أفقيٍّ بسرعة 1.20 m/s عندما يكون معامل الاحتكاك 0.45؟

.71 (III) يسرعُ درّاجٌ منحدرًا إلى أسفل تلةٍ تميل بمقدار 7.0° بسرعة ثابتة مقدارها 5.0 m/s. ما مقدار القدرة اللازمة للدّراج ليرتقي التلة نفسها وبالسرعة ذاتها إذا كانت كتلته مع الدراجة تعادل 75 kg؟

مسائل عامة

.72 صمّم مصمّمو السيارات الحاليين مصدّات للسيارات مرنة وقابلة للانضغاط لتعود إلى شكلها الأساسي بعد التصادم إذا لم تتجاوز سرعة السيارة 8 km/h، من غير أن تخضع لأيّ ضرر دائم. ما مقدار عامل الصلابة الفاعل للمصدّ عندما ينضغط مسافة 1.5 cm نتيجة اصطدام السيارة بحائط إذا كانت كتلة السيارة هي 1300 kg؟

.73 إذا كان ارتفاع رفّ الكتب الأول في المكتبة هو 10.0 cm، وكان ارتفاع كلّ رفٍّ من الرفوف الأربعة التالية التي تعلوه هو 30.0 cm فوق الرفّ الذي يسبقه. وإذا كانت سعة كلّ رفٍّ هي 25 كتابًا بمتوسط كتلة مقدارها 1.5 kg للكتاب الواحد ذي الارتفاع 21 cm، فما الشغل الكلّي اللازم بذله لملء الرفوف جميعها بالكتب الملقاة على أرض المكتبة؟

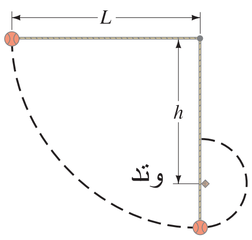
.74 ارتفع مركز كتلة أحد لاعبي القفز العالي في أولمبياد 1936 مسافة 1.1m فوق نقطة انطلاقه (الشكل 6−42). ما أقلّ سرعةٍ يجب أن يصلها اللاعب قبل أن يقفز إلى أعلى كي يصل إلى سرعة 6.5 m/s عند أعلى نقطةٍ يصلها؟

الشكل 6−42
(المسألة 74)

.75 يجب أن يبقى مكعب كتلته m ملامسًا للمسار طوال الوقت خلال انزلاقه، وخصوصًا عند أعلى نقطةٍ من المسار الحلقي الدائري ذي نصف القطر r كما في (الشكل 6−39) . (أ) حدّد أقل ارتفاع h يمكن أن يحقق شرط التلامس بدلالة الكميات المعطاة (كما في المسألة 40). وإذا كان ارتفاع نقطة الانطلاق هو $2h$ فاحسب كلا من: (ب) القوّة العموديّة للمسار عند أخفض نقطةٍ من المسار الحلقي. (جـ) القوّة العموديّة للمسار عند أعلى نقطةٍ من المسار الحلقي. (د) القوّة العموديّة للمسار عندما يصبح المكعب خارج الحلقة ويتحرّك أفقيًا على ما تبقّى من المسار.

.76 هوى طيّار إلى أسفل مسافة 370 m بعد قفزه من طائرته دون أن يفتح مظلّته ليصطدم بتلّة من الثلج الخفيف وينجو بحياته بعد أن تسبّب بعمل حفرةٍ في الثلج بعمق 1.1 m. إذا كانت كتلة الطيّار 78 kg، وسرعته الحدّية 35 m/s، فقدّر كلًّا من: (أ) الشغل المبذول من الثلج لإيقاف الطيّار. (ب) متوسّط القوّة المطبقة من الثلج على الطيّار لإيقافه. (جـ) الشغل المبذول على الطيّار من مقاومة الهواء له خلال سقوطه.

.77 حبل طوله L، مثبت من طرف ومعلقة به كرة من طرفه الآخر (الشكل 6−43). (أ) ما سرعة الكرة عند أخفض نقطةٍ في مسارها (الخط المتقطع)؟ (ب) إذا وضـــع وتد أسفل الطرف المثبت من الحبل بحيث تكون $h = 0.80L$، فما سرعة الكرة عندما تصل إلى أعلى نقطة ممكنة خلال مسارها الدائري حول الوتد؟



الشكل 6−43
(المسألة 77).

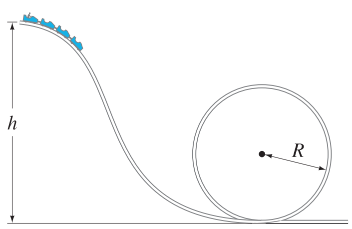
.78 يحتاج متزلّج كتلته 65-kg إلى 5.0 h ليصل إلى قمّة جبل ارتفاعه 3700 m عندما يبدأ الحركة من ارتفاع 2300 m. احسب: (أ) الشغل المبذول من المتزلج ضد الجاذبية الأرضية. (ب) متوسّط القدرة الناتجة بدلالة كلٍّ من الواط والأحصنة. (جـ) افترض أن نسبة كفاءة الجسم هي 15%، احسب مقدار معدل الطاقة اللازمة المدخلة.

.79 ينقطع حبل مصعد كتلته 920-kg عندما يكون المصعد على ارتفاع 38 m فوق زنبرك ضخم ($k = 2.2 \times 10^{5}$ N/m) موجود أسفل غرفة المصعد. احسب ما يلي: (أ) الشغل المبذول من الجاذبيّة الأرضيّة على المصعد قبل أن يصطدم بالزنبرك. (ب) السرعة للمصعد قبل أن يصطدم بالزنبرك. (جـ) مقدار انضغاط الزنبرك. (لاحظ الشغل المبذول بواسطة كلٍّ من الزنبرك والجاذبيّة الأرضيّة في هذا الفرع).

.80 يزعم القائمون على منطقة تزلج في ولاية كاليفورنيا الأمريكيّة أن المصاعد قادرة على نقل 47,000 فرد في الساعة. إذا كان المصعد بالمتوسط ينقل الأفراد مسافة 200 m عموديًّا إلى أعلى، فما القدرة اللازمة لذلك تقديرا؟

.81 تتدفق المياه ($v \approx 0$) فوق سدٍّ بمعدل 650 kg/s وتتساقط 81 m عموديا قبل أن تصطدم بشفرات عجلة شحن. احسب: (أ) سرعة المياه قبل أن تصطدم بشفرات عجلة الشحن (عند إهمال مقاومة الهواء). (ب) معدل انتقال الطاقة الميكانيكيّة إلى شفرات عجلة الشحن، مفترضا أن الكفاءة لن تزيد على 58%.

.82 أثبت أن الفرق في الوزن الظاهري للراكب بين أعلى وأخفض نقطتين من المسار الدائري للأفعوانية (الشكل 6−44) هو 6 g ؛ أي أنّه يعادل 6 أضعاف وزن الراكب (بعد إهمال الاحتكاك). أثبت أيضًا أن الحلّ النهائي لا يعتمد على أبعاد المسار الدائري أو على سرعة الراكب خلال مروره بالحلقة إذا كانت سرعته أعلى من السرعة الدنيا اللازمة.



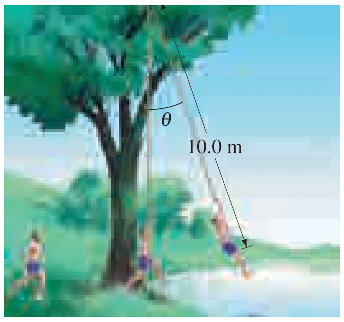
الشكل 6 − 44
(المسألة 82).

83. (أ) إذا كان الجسم البشري قادرًا على تحويل قطعة حلوى مباشرةً إلى شغل، فما أعلى ارتفاع يستطيع رجل كتلته 82-kg أن يصله عند صعوده سلّمًا بعد تناوله قطعة حلوى (كتلتها = 1100 kJ)؟ (ب) ما سرعة الرجل لحظة وصوله إلى الأرض عند قفزه من أعلى نقطةٍ يستطيع أن يصلها على السلّم؟

84. أُطلق مقذوفٌ بزاوية 45.0° إلى الأعلى من فوق سطح مبنى ارتفاعه 165-m بسرعةٍ مقدارها 175 m/s. ما سرعة المقذوف لحظة اصطدامه بالأرض؟ (استخدم قانون حفظ الطاقة مع إهمال مقاومة الهواء).

85. وقف فتى على ميزان، فظهرت القراءة 710 N نتيجة انضغاط زنبرك الميزان مسافة 0.60 mm. ما قراءة الميزان العظمى عندما يقفز الفتى نفسه عليه من ارتفاع 1.0 m؟

86. أمسك طالب كتلته 65-kg بحبل وهو يركض بسرعة 5.0 m/s ليتأرجح به فوق بركة ماء (الشكل 6–45) وليترك الحبل عندما تصبح سرعته صفرًا. (أ) ما الزاوية θ التي سيترك الطالب عندها الحبل؟ (ب) ما الشدّة في الحبل قبل تركه مباشرة؟ (جـ) ما الشدّة العظمى في الحبل؟



الشكل 6–45
المسألة 86.

87. يتسلّق رياضيٌّ كتلته 72-kg حبلًا إلى الأعلى مسافة 5.0 m خلال 9.0 s. ما مقدار القدرة اللازمة لهذا الإنجاز؟

88. تستخدم بعض شركات الكهرباء المياه لتخزين الكهرباء عن طريق ضخّ المياه بواسطة مضخّات عجلات شحن من خزّانٍ منخفضٍ إلى آخر مرتفع. ما كمية المياه بالأمتار المكعبة اللازم ضخّها خلال ساعة واحدة من الخزّان المنخفض إلى الخزّان المرتفع إذا تمّ استخدام محطة كهرباء قدرتها 120-MW $(120 \times 10^{6}\text{ W})$؟ افترض أنّ الخزّان العلوي يرتفع مسافة 520 m فوق الخزّان السفلي، واهمل عمق المياه في كلا الخزانين. كتلة المياه هي 1000 kg لكل 1.0 m^3.

89. قُطع زنبرك ثابت صلابته k إلى نصفين. ما ثابت الصلابة الناتج لكلٍّ نصف؟

90. دُفع مكعبٌّ كتلته 6.0-kg مسافة 8.0 m بمحاذاة سطحٍ يميل إلى الأعلى بزاوية 37° بواسطة قوّةٍ أفقيّة مقدارها 75 N. إذا كانت السرعة الابتدائيّة للمكعب هي 2.2 m/s، وقوّة الاحتكاك الحركيّة الثابتة المعاكسة للحركة 25 N، فاحسب: (أ) الطاقة الحركيّة الابتدائيّة للمكعب. (ب) الشغل المبذول بواسطة القوّة ذات 75-N. (جـ) الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضيّة. (د) الشغل المبذول بواسطة قوّة دفع السطح العموديّة. (هـ) الطاقة الحركيّة النهائيّة للمكعب.

91. إذا استطاعت سيّارة كتلتها 1500-kg أن تتسارع من 35 km/h إلى 55 km/h خلال 3.2 s، فما الزمن اللازم لكي تتسارع السيارة من 55 km/h إلى 75 km/h؟ (افترض ثبات القدرة، واهمل تأثير الاحتكاك).

92. يمشي مريضٌ خلال الفحص العام لوظائف القلب (فحص الإجهاد) على جهاز الحركة المائل إلى الأعلى (الشكل 6–46). ما القدرة التقريبية اللازمة لمريض كتلته 75-kg لإتمام الفحص بأمان إذا كانت زاوية ميلان الجهاز 15° وسرعته 3.3 km/h؟ (قارن النتيجة مع القدرة المقدرة لمصباح ضوئي).

الشكل 6 – 46 (المسألة 92).

93. (أ) إذا قُذفت صخرةٌ كتلتها 500-kg من فوهة بركانٍ مسافة 500 m إلى الأعلى، فما سرعة الصخرة الابتدائيّة لحظة خروجها من الفوهة؟ (ب) ما القدرة اللازمة لقذف 1000 صخرةٍ مماثلةٍ خلال دقيقةٍ واحدةٍ من فوهة البركان؟

94. يُسمح لكميّاتٍ كبيرةٍ من المياه أن تتساقط بمعدّل 95 kg/s من ارتفاع 2.0 m على عجلة لإنتاج الكهرباء (أ) ما القدرة العظمى الناتجة؟ (ب) ما سرعة المياه لحظة اصطدامها بالعجلة؟

إجابات التمارين

(أ): (جـ)

(ب): كلاّ؛ لأنّ السرعة v ستصبح مكافئةً للجذر التربيعي لرقم سالب، وهي كميّة غير حقيقيّة.

(جـ): إنّها كميّة غير محفوظة؛ لأن $W = 0$ لقوّةٍ محافظةٍ خلال رحلة الذهاب والإياب.

(د): محصلة الشغل = التغيّر في الطاقة الحركيّة، حيث محصّلة الشغل $= mg(y_1 - y_2)$ والتغيّر في الطاقة الحركيّة $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 =$. إذن $v_2^2 = 2g(y_1 - y_2)$.

(هـ): سرعات متعادلة.