



تخت جمشید — شمال شیراز

بیش از ۲۵۰۰ سال پیش، ایرانیان با ذوق و سخت‌کوش تمدنی را برپا کردند که بخشی از آثار به جای مانده آن را در این تصویر می‌بینید. این مکان به **دروازه همه کشورها** معروف بوده است.

کار و انرژی

هنگامی که فعالیت‌های یک روز خود را در نظر می‌گیرید، مشاهده می‌کنید که کارهای متفاوتی انجام می‌دهید: راه می‌روید، از پله بالا می‌روید، می‌نویسید، کیف خود را حمل می‌کنید. با انجام این کارها انرژی جنبشی یا پتانسیل گرانشی خود و یا اجسام را کاهش و یا افزایش می‌دهید و برای انجام آن‌ها به انرژی نیاز دارید که توسط مواد غذایی تأمین می‌شود. افراد دیگر نیز به همین ترتیب فعالیت‌های گوناگون دارند. بسیاری از این کارها، توسط وسیله‌هایی چون اتومبیل، جرثقیل و ... که برای انجام فعالیت‌های خاصی طراحی شده‌اند نیز انجام می‌شوند. این وسیله‌ها از انرژی الکتریکی، شیمیایی و یا ... استفاده می‌کنند. بنابراین، ملاحظه می‌کنید که همواره در اطراف شما انجام کارهای متفاوت و تبدیل‌های مختلف انرژی در جریان‌اند. در فیزیک (۱) و آزمایشگاه تا حدی با مفهوم انرژی و نوع‌های مختلف آن و تبدیل انرژی‌ها به یکدیگر آشنا شدید. در این فصل با مفهوم کار، انرژی مکانیکی و توان آشنا می‌شوید و تعریف دقیق‌تری از نوع‌های مختلف انرژی پتانسیل ارائه می‌شود.

۴-۱- کار

همه‌روزه با افرادی که در حال کار کردن هستند مواجه می‌شوید. نجار را می‌بینیم که در حال اره و یا رنده کردن است. در فعالیت‌های ساختمانی کارگران مصالح ساختمانی را از محلی به محلی دیگر حمل می‌کنند و ... البته بعضی از کارها توسط ماشین‌های مخصوص انجام می‌شوند. در شکل (۴-۱) تعدادی از این فعالیت‌ها نشان داده شده‌اند.

فعالیت ۴-۱

تعداد دیگری از کارهایی را که در اطراف خود مشاهده می‌کنید یادداشت و به کلاس گزارش کنید. در انجام این کارها چه عامل‌هایی مشترک‌اند؟ این سؤال را در گروه به بحث بگذارید.



ب



الف



پ

شکل ۱-۴

در کارهایی که انجام می‌شوند؛

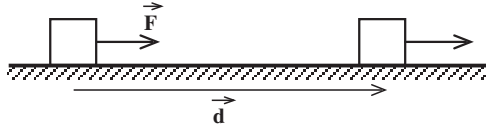
الف - به اجسام نیرو وارد می‌شود. ب - آن‌ها جابه‌جا می‌شوند.

به عنوان مثال، در شکل (الف-۱-۴) شخص به جسم نیرویی به سمت بالا وارد می‌کند و آن را بالا می‌برد. در شکل (ب-۱-۴) شخص به کالسکه نیرو وارد می‌کند و آن را به جلو می‌راند. باتوجه به آنچه گفته شد کار به صورت حاصل ضرب نیرو در جابه‌جایی تعریف می‌شود. یعنی، اگر مطابق شکل (۲-۴) به جسم نیرویی به اندازه F وارد و آن را به اندازه d جابه‌جا کنیم، طبق تعریف، کار نیروی ثابت F ، با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W_F = Fd$$

(۱-۴)

شکل ۲-۴



یکای کار N.m است که ژول نامیده می‌شود. این یکا را با نماد J نمایش می‌دهیم. کار یک کمیت نرده‌ای است و مثلاً اگر در شکل (۲-۴) کار را با چند جابه‌جایی متوالی انجام دهیم، کار کل را می‌توان از جمع جبری کار انجام‌شده در تک‌تک جابه‌جایی‌ها به دست آورد.

مثال ۱-۴

در شکل (۱-۴) اگر شخص نیروی افقی برابر 4 N را به کالسکه وارد و آن را به اندازه 10 m جابه‌جا کند، چه مقدار کار انجام می‌دهد؟
حل: بر طبق رابطه (۱-۴) داریم:

$$W = Fd$$

$$W = 4 \times 10 = 40\text{ J}$$

مثال ۲-۴

مطابق شکل (۱-۴) الف) اگر شخصی نیروی برابر 30 N را به جسم وارد کند و آن را به اندازه $5/0$ متر بالا ببرد چه مقدار کار انجام می‌دهد؟
حل:

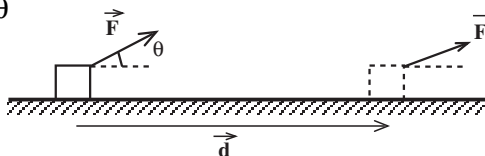
$$W = Fd$$

$$W = 30 \times 0/5 = 15\text{ J}$$

در مثال ۲-۴ نیروی وزن نیز به جسم وارد می‌شود. این نیرو در خلاف جهت جابه‌جایی است. هم‌چنین، در شکل (۱-۴) پ) نیروی وارد به جسم، با افق زاویه می‌سازد. در این گونه موارد کار را چگونه می‌توان تعریف کرد؟ برای این منظور به صورت زیر عمل می‌کنیم. فرض کنید که نیروی وارد به جسم مطابق شکل (۳-۴) با بردار جابه‌جایی زاویه θ می‌سازد، در این حالت کار نیروی ثابت F به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W_F = Fd \cos \theta$$

(۲-۴)



شکل ۳-۴

اگر در این رابطه $\theta = 0^\circ$ باشد، رابطه (۱-۴) به دست می‌آید.

مثال ۳-۴

در شکل (۳-۴) نیروی ۵ نیوتونی را تحت زاویه 6° به جسم وارد می‌کنیم. کار نیروی F را در ۶ متر جابه‌جایی حساب کنید.
 حل: بر طبق رابطه (۲-۴) داریم:

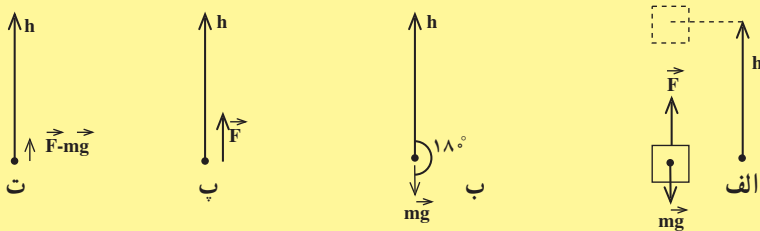
$$W_F = Fd \cos \theta$$

$$W_F = Fd \cos \theta = 5 \times 6 \times \cos 6^\circ = 15 \text{ J}$$

در مواردی که بیش از یک نیرو به جسم وارد می‌شود، می‌توان کار هر یک از نیروها را از رابطه (۲-۴) به دست آورد. به چند مثال در این مورد توجه کنید.

مثال ۴-۴

جسمی به جرم m را مطابق شکل (۴-۴ الف) به اندازه h بالا می‌بریم. کار نیروی وزن چه قدر است؟



شکل ۴-۴

حل: در این حالت زاویه بین وزن و بردار جابه‌جایی 18° است (شکل ۴-۴ ب).
 در نتیجه، بر طبق رابطه (۲-۴) داریم:

$$W_{mg} = mgh \cos 18^\circ$$

$$W_{mg} = -mgh$$

مثال ۵-۴

در مثال (۴-۴)،

الف - کار نیروی F

ب - کار نیروی برآیند را محاسبه کنید.

حل: الف - زاویه جابه‌جایی صفر است (شکل ۴-۴-پ) در نتیجه

کار نیروی F برابر Fh است.

ب - بزرگی برآیند نیروهای وارد بر جسم برابر $F - mg$ است. زاویه بردار برآیند

نیروها و بردار جابه‌جایی صفر است (شکل ۴-۴-ت). در نتیجه، با استفاده از رابطه (۴-۲)

داریم:

$$W_{\text{برآیند}} = (F - mg)h \cos 0^\circ$$

$$W_{\text{برآیند}} = (F - mg)h$$

در قسمت الف مثال (۵-۴) دیدیم که کار نیروی F برابر Fh است و همان‌طور که در مثال

(۴-۴) دیدیم کار نیروی وزن برابر با mgh - است. در نتیجه، کار برآیند نیروها را می‌توان با جمع کردن

کار هر یک از نیروها نیز به دست آورد. این نتیجه برای یک مثال خاص اثبات شد ولی می‌توان نشان

داد که در حالت کلی هم برقرار است.

تمرین ۱-۴

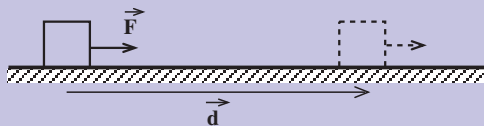
در شکل (۵-۴) نیروی ثابت F در امتداد افق به جسمی به جرم m وارد می‌شود

و آن را در روی سطحی با ضریب اصطکاک جنبشی μ_k جابه‌جا می‌کند. مطلوب است

الف - کار نیروی F ب - کار نیروی اصطکاک جنبشی پ - کار نیروی عمودی تکیه‌گاه

ت - کار نیروی وزن ث - کار برآیند نیروها ج - نشان دهید که کار برآیند نیروها برابر

است با جمع جبری کار حاصل از تک تک نیروها.



شکل ۵-۴

مثال ۷-۴

فرض کنید که شخص در شکل (۴-۱-الف) جسم را به بالا ببرد و همان جا نگاه دارد. او برای نگهداری جسم چه مقدار کار انجام می‌دهد؟

حل: در این حالت شخص برای نگاهداشتن جسم نیرویی برابر با وزن آن به جسم وارد می‌کند. ولی چون جابه‌جایی صفر است، کار او برابر است با:

$$W = Fd = mg \times 0 = 0$$

یعنی، شخص برای نگهداری جسم کاری انجام نمی‌دهد.

مثال ۷-۴

شخصی با سرعت ثابت در حال حرکت است و سطل آبی به جرم m را مطابق شکل (۴-۶) حمل و به اندازه d جابه‌جا می‌کند. او برای حمل سطل چقدر کار انجام می‌دهد.

حل: شخص برای این که سطل را نگه دارد، باید نیرویی برابر با وزن سطل رو به بالا به آن وارد کند. چون سطل با سرعت ثابت حرکت می‌کند، شخص نیرویی در جهت افقی به آن وارد نمی‌کند. زاویه بین نیرو و جابه‌جایی 90° است، در نتیجه:

$$W = Fd \cos \theta = mgd \cos 90^\circ = 0$$



شکل ۴-۶

یعنی شخص برای حمل سطل، با سرعت ثابت، کاری انجام نمی‌دهد.

مثال‌های (۴-۶ و ۴-۷) نشان می‌دهند کاری را که در فیزیک تعریف می‌شود با مفهوم کاری که در گفت و گوهای عادی خود به کار می‌بریم تفاوت دارد. زیرا، در صحبت‌های روزمره فعالیت‌های ذکر شده در مثال‌های بالا را نیز کار می‌نامیم. ولی با تعریفی که برای کار ارائه کردیم، در مثال‌های یاد شده کاری انجام نمی‌شود.

۲-۴- قضیه کار و انرژی

در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که انرژی جنبشی جسمی به جرم m و سرعت v با رابطه

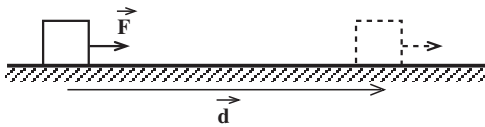
$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3-4)$$

داده می‌شود. هنگامی که توپی را در امتداد قائم به هوا پرتاب می‌کنیم، سرعت توپ رفته‌رفته کاهش می‌یابد. در نتیجه، انرژی جنبشی توپ در حین بالا رفتن کاهش می‌یابد. اگر توپ را از حال سکون از یک بلندی رها کنیم، انرژی جنبشی توپ در حین پایین آمدن افزایش می‌یابد. ما روزانه شاهد تغییر انرژی جنبشی اجسام در محیط اطراف خود هستیم. انرژی جنبشی اتومبیلی که ترمز کرده است، کاهش می‌یابد. هنگامی که میخی را به دیوار می‌کوبیم، در حین برخورد چکش به میخ انرژی جنبشی میخ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

فعالیت ۲-۴

مثال‌های دیگری که در مورد تغییر انرژی جنبشی اجسام اطراف خود می‌بینید را یادداشت و به کلاس گزارش کنید.

قضیه کار و انرژی، رابطه بین کار و تغییر انرژی جنبشی را بیان می‌کند. برای توضیح دادن این قضیه مثال زیر را در نظر می‌گیریم. جسمی به جرم m را مطابق شکل (۴-۷) در نظر بگیرید که بر ایند نیروهای وارد بر آن ثابت و برابر \vec{F} است و جسم تحت تأثیر این نیرو به اندازه d بر روی یک سطح افقی جابه‌جا می‌شود.



کار نیروی F با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W = Fd \quad (4-4)$$

شکل ۴-۷

از طرف دیگر چون F بر ایند نیروهای وارد بر جسم است، داریم

$$F = ma \quad (5-4)$$

در اثر اعمال نیروی F سرعت جسم از مقدار v_1 در نقطه (۱) به مقدار v_2 در نقطه (۲) تغییر می‌کند. با استفاده از رابطه (۲-۱۱) داریم:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2ad \quad (6-4)$$

اگر از این رابطه a را به دست آوریم و در رابطه (۵-۴) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$F = m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2d} \quad (7-4)$$

با قرار دادن این رابطه در رابطه (۴-۴) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \quad (8-4)$$

جمله اول طرف راست در این رابطه انرژی جنبشی جسم در نقطه (۲) و جمله دوم انرژی جنبشی جسم در نقطه (۱) است.

در نتیجه اگر این دو انرژی جنبشی را به ترتیب با K_2 و K_1 نشان دهیم، رابطه (۸-۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$W = K_2 - K_1 \quad (9-4)$$

رابطه (۹-۴) قضیه کار و انرژی نامیده می‌شود. بر طبق این قضیه، کار برآیند نیروی وارد بر یک جسم در یک جابه‌جایی برابر است با تغییر انرژی جنبشی جسم در آن جابه‌جایی. باتوجه به این رابطه می‌توان دریافت که انرژی جنبشی اجسام چگونه تغییر می‌کند. اگر کار برآیند نیروها مثبت باشد، $K_2 > K_1$ است و انرژی جنبشی جسم افزایش می‌یابد. اگر کار برآیند نیروها منفی باشد، $K_2 < K_1$ است و انرژی جنبشی جسم کاهش می‌یابد. اگر کار برآیند نیروها صفر باشد، $K_2 = K_1$ است و انرژی جنبشی جسم تغییر نمی‌کند.

فعالیت ۳-۴

باتوجه به نکات فوق علت افزایش و یا کاهش انرژی جنبشی اجسام را در مثال‌هایی که در ابتدای این بخش ذکر شدند توضیح دهید.
قضیه کار و انرژی را در رویدادهایی که در اطراف خود می‌بینید به کار ببرید.

مثال ۸-۴

جسمی به جرم ۱ کیلوگرم را از ارتفاع ۱۰ متری رها می‌کنیم. با استفاده از قضیه کار و انرژی تعیین کنید هنگامی که جسم به زمین می‌رسد، انرژی جنبشی آن چه قدر است (شتاب گرانش را 10 m/s^2 فرض کنید).

حل: در این مثال تنها نیروی وارد بر جسم نیروی وزن است. کار این نیرو برابر است با:

$$W = mgh \cos(0^\circ) = 1 \times 10 \times 10 \times 1 = 100 \text{ J}$$

انرژی جنبشی اولیه آن صفر است. بر طبق قضیه کار و انرژی داریم:

$$W = K_2 - K_1$$

با قرار دادن مقادیر W و K_1 در این رابطه خواهیم داشت:

$$100 = K_2 - 0$$

$$K_2 = 100 \text{ J}$$

مثال ۹-۴

اتومبیلی به جرم 1500 kg با سرعت 72 km/h در حرکت است. اگر راننده ترمز کند، اتومبیل پس از طی مسافتی می ایستد. کار نیروی اصطکاک را به دست آورید.

حل: سرعت اتومبیل قبل از ترمز کردن برابر است با:

$$v_1 = \frac{72 \times 1000}{3600} = 20 \text{ m/s}$$

در نتیجه، انرژی جنبشی آن قبل از ترمز کردن برابر است با:

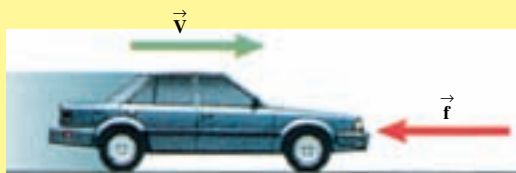
$$K_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} (1500)(20)^2 = 300,000 \text{ J}$$

همچنین $K_2 = 0$ است.

از طرف دیگر، نیروی اصطکاک، نیروی عمودی تکیه گاه و نیروی وزن نیروهایی هستند که بر جسم اثر می کنند. در نتیجه:

$$W = W_f + W_N + W_{mg}$$

برایند



شکل ۸-۴

ولی کار نیروی عمودی تکیه گاه و نیروی وزن برابر صفر است. در نتیجه:

$$W_f = K_2 - K_1 = 0 - 300,000 = -300,000 \text{ J}$$

از قضیه کار و انرژی می‌توان برای محاسبه کمیت‌های مختلف استفاده کرد. این امر در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

مثال ۱۰-۴

اتومبیلی به جرم یک تن با سرعت 36 km/h در حرکت است. راننده ترمز می‌کند. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین جاده و لاستیک‌های اتومبیل 0.5 باشد، اتومبیل پس از طی چه مسافتی متوقف می‌شود ($g = 10 \text{ m/s}^2$ فرض می‌شود)؟
 حل: در این مسئله نیروی اصطکاک جنبشی و نیروی عمودی تکیه‌گاه و نیروی وزن بر جسم وارد می‌شوند. کار نیروی اصطکاک برابر است با:

$$W_f = f d \cos \theta = \mu_k m g d \cos 180^\circ \\ = -0.5 \times 1000 \times 10 \times d = -5000 d$$

و کار نیروی عمودی تکیه‌گاه و وزن صفر است. سرعت اولیه جسم برابر است با:

$$v_1 = \frac{36 \times 1000}{3600} = 10 \text{ m/s}$$

در نتیجه، انرژی جنبشی اولیه جسم برابر است با:

$$K_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} (1000)(10)^2 = 50000 \text{ J}$$

و $K_2 = 0$ است. با استفاده از قضیه کار و انرژی داریم:

$$W = K_2 - K_1 \\ -5000 d = 0 - 50000$$

که از آن مقدار $d = 10 \text{ m}$ به دست می‌آید.

فعالیت ۴-۴

آزمایشی طراحی کنید که با استفاده از آن بتوان ضریب اصطکاک جنبشی لاستیک ماشین و جاده را تخمین زد.

مثال ۱۱-۴

جسمی را از ارتفاع h رها می‌کنیم.

با استفاده از قضیه کار و انرژی سرعت آن را در ارتفاع $\frac{3}{4}h$ به دست آورید.

(از مقاومت هوا صرف نظر کنید).

حل:

جسم به اندازه $\frac{1}{4}h$ سقوط می کند. تنها نیروی وارد بر جسم وزن آن است. کار وزن در این جابه جایی برابر $\frac{1}{4}mgh$ است. انرژی جنبشی اولیه $K_1 = 0$ و انرژی جنبشی

$$W = K_2 - K_1 \quad \text{نهایی برابر } K_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 \text{ است. در نتیجه:}$$

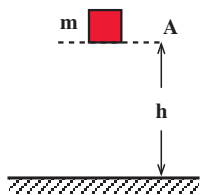
$$\frac{1}{4}mgh = \frac{1}{2}mv_2^2 - 0$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{2}gh}$$

تمرین ۲-۴

مثال (۱۱-۴) را برای ارتفاع های $\frac{1}{4}h$ و $\frac{1}{2}h$ و صفر نیز حل کنید و جدول زیر را تکمیل کنید (قسمت های مربوط به انرژی پتانسیل و مجموع آن با انرژی جنبشی را پس از حل تمرین (۳-۴) پر کنید).

ارتفاع	انرژی جنبشی	سرعت	انرژی پتانسیل	مجموع انرژی های جنبشی و پتانسیل
h				
$\frac{3}{4}h$				
$\frac{1}{2}h$				
$\frac{1}{4}h$				
0				



شکل ۹-۴

۳-۴- انرژی پتانسیل

در فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که انرژی پتانسیل گرانشی انرژی ای است که جسم به علت ارتفاعش از سطح زمین دارد. یعنی، اگر جسم مطابق شکل (۹-۴) در ارتفاع

h از سطح زمین باشد، دارای انرژی پتانسیل گرانشی است.

چگونه می توان فهمید که این جسم دارای انرژی پتانسیل گرانشی است؟

در این بخش می خواهیم این انرژی را به صورت کمی تعریف کنیم. برای بالا بردن جسم از سطح زمین تا ارتفاع h باید کار انجام دهیم. چون جسم انرژی پتانسیل گرانشی را از این طریق کسب کرده است، می توان گفت کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل در جسم ذخیره شده است. باتوجه به نکات فوق انرژی پتانسیل گرانشی به صورت زیر تعریف می شود:

«انرژی پتانسیل گرانشی یک جسم در یک نقطه نسبت به زمین برابر است با کاری که انجام می دهیم تا جسم را با سرعت ثابت از سطح زمین تا نقطه یادشده منتقل کنیم».

برای این که جسم در شکل (۴-۹) را با سرعت ثابت تا ارتفاع h بالا ببریم، باید نیروی برابر با وزن جسم رو به بالا به آن وارد کنیم. در نتیجه، کار انجام شده برابر است با:

$$W = mgh \cos (0^\circ) = mgh$$

با استفاده از تعریف فوق انرژی پتانسیل گرانشی جسم در ارتفاع h را رابطه زیر داده می شود:

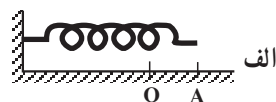
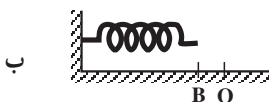
$$U = mgh \quad (4-10)$$

تمرین ۳-۴

انرژی پتانسیل جسم در شکل (۴-۹) را در ارتفاع $\frac{1}{3}h$ ، $\frac{2}{3}h$ و $\frac{1}{4}h$ و صفر به دست آورید و جدول تمرین (۴-۲) را تکمیل و نمودار تغییرات انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل گرانشی و مجموع آن ها را بر حسب ارتفاع رسم کنید.

لازم به تذکر است که اگر شرط با سرعت ثابت در تعریف انرژی پتانسیل ذکر نمی شد، سرعت جسم مثلاً افزایش می یافت و مقداری از کار صرف افزایش انرژی جنبشی جسم می گردید. انرژی پتانسیل کشسانی را نیز می توان به روش فوق تعریف کرد. در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم هنگامی که فنر، مطابق شکل (۴-۱۰ الف و ب)، کشیده یا فشرده شده است دارای انرژی پتانسیل است.

چگونه می توان پی برد که در این حالت ها انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره شده است؟



شکل ۴-۱۰

در این حالت نیز می‌توان گفت کاری که با سرعت ثابت برای کشیدن فنر تا نقطه A و یا فشردن آن تا نقطه B انجام می‌دهیم، به صورت انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره می‌شود. به عبارت دیگر: انرژی پتانسیل فنر در یک وضعیت کشیده (فشرده) خاص، نسبت به حالت آزاد فنر، برابر است با کاری که انجام می‌دهیم تا آن را از حالت آزاد با سرعت ثابت به وضعیت یادشده برسانیم. لازم به تذکر است که نیروی کشسانی فنر متغیر است و مقدار آن، همان‌طور که رابطه (۳-۱) نشان می‌دهد، به مقدار کشیدگی و یا فشردگی فنر بستگی دارد. چون در این فصل فقط چگونگی محاسبه کار نیروی ثابت را بیان کرده‌ایم، از این رو محاسبه کار نیروی فنر از سطح این کتاب خارج است و در نتیجه ارایه یک رابطه کمی مانند رابطه (۴-۱) برای انرژی پتانسیل کشسانی فنر مقدور نیست. در سال‌های بعد با این رابطه آشنا خواهید شد.

مثال ۴-۱۲

نشان دهید که هرچه فنر کشیده‌تر و یا فشرده‌تر باشد، انرژی پتانسیل آن نسبت به وضعیت آزاد فنر بیشتر است.

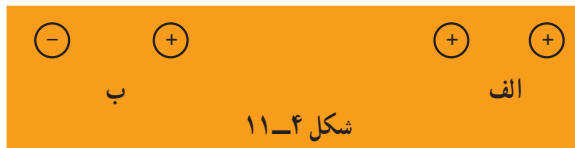
حل: برای کشیدن فنر باید کار انجام دهیم و این کار در فنر به صورت انرژی پتانسیل ذخیره می‌شود. برای این که فنر را بیشتر بکشیم باید کار بیشتری انجام دهیم. در نتیجه، انرژی پتانسیل آن بیشتر می‌شود.

در مورد فشردگی فنر نیز می‌توان به همین روش استدلال کرد.

فعالیت ۴-۵

وسیله‌هایی را نام ببرید که با استفاده از انرژی پتانسیل کشسانی فنر کار می‌کنند.

اکنون به تعریف انرژی پتانسیل الکتریکی می‌پردازیم. در شکل (۴-۱۱-الف) دو بار همنام و در شکل (۴-۱۱-ب) دو بار غیرهمنام نشان داده شده‌اند. این دو بار باید به طریقی ساکن نگه‌داشته شوند. زیرا، اگر هریک از آن‌ها آزاد باشد، شروع به حرکت خواهد کرد. در نتیجه، می‌توان گفت که مجموعه دو بار دارای انرژی پتانسیل است. در این حالت نیز می‌توان گفت کاری که با سرعت ثابت



برای نزدیک کردن دوبار در شکل (۴-۱۱-الف) و دور کردن آن‌ها در شکل (۴-۱۱-ب) انجام می‌دهیم، به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در دو بار ذخیره می‌شود. در این حالت نیز می‌توان کار انجام شده را محاسبه و یک رابطه کمی برای انرژی پتانسیل الکتریکی ارایه کرد که انجام آن از سطح این کتاب خارج است.

تمرین ۴-۴

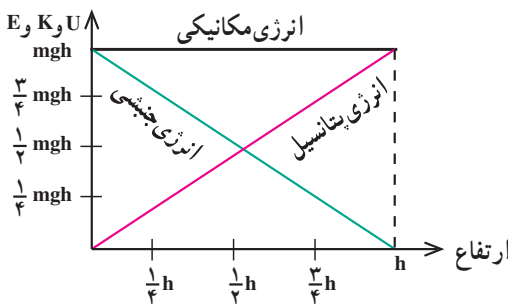
نشان دهید هر اندازه دوبار همانم به یکدیگر نزدیک تر باشند، انرژی پتانسیل آن‌ها بیشتر و هر اندازه دوبار غیرهمنام، از یکدیگر دورتر باشند، انرژی پتانسیل آن‌ها بیشتر است.

فعالیت ۶-۴

آزمایشی طراحی کنید که در آن بتوان ذخیره‌شدن انرژی پتانسیل الکتریکی را آزمود. این آزمایش را انجام دهید و نتیجه آن را به کلاس گزارش دهید.

۴-۴- پایستگی انرژی مکانیکی

هنگامی که جسمی به جرم m را از ارتفاع h رها می‌کنیم، انرژی جنبشی و پتانسیل جسم در حین سقوط تغییر می‌کند. مقادیر انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل این جسم در تمرین‌های (۴-۲) و (۴-۳) به دست آمده‌اند و نمودار تغییرات آن‌ها در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مقادیر به دست آمده، در جدول مربوط به این تمرین‌ها و نیز نمودار شکل (۴-۱۲) نشان می‌دهند، در حین سقوط انرژی پتانسیل جسم کاهش و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. ولی مجموع این دو انرژی در حین حرکت پایسته (ثابت) می‌ماند.



شکل ۴-۱۲

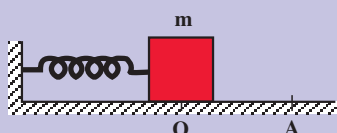
مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل انرژی مکانیکی نامیده می‌شود. این انرژی را با E نمایش می‌دهیم.

$$E = K + U \quad (۴-۱۱)$$

این مثال نشان می‌دهد که انرژی مکانیکی در سقوط آزاد یک جسم پایسته است.

هرچند پایستگی انرژی مکانیکی در مورد این مثال خاص نشان داده شد، ولی می‌توان نشان داد در مواردی که با نیروهایی مانند کشسانی فنر، نیروی الکتریکی و ... سروکار داریم نیز انرژی مکانیکی پایسته می‌ماند.

تمرین ۵-۴



شکل ۴-۱۳

در شکل (۴-۱۳) جسمی به جرم m به فنر متصل است و روی یک سطح بدون اصطکاک قرار دارد. جسم را تا نقطه A می‌کشیم و سپس رها می‌کنیم. با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی چگونگی حرکت جرم m را توصیف کنید.

مثال ۴-۱۳



شکل ۴-۱۴

در شکل (۴-۱۴) بار $+q_1$ با سرعت \vec{v}_1 به طرف بار $+q_2$ که ساکن نگه‌داشته شده است پرتاب می‌شود. فرض کنید به جز نیروی الکتریکی، نیروی دیگری به بار q_1 وارد نمی‌شود. چگونگی حرکت بار q_1 را با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی توضیح دهید.

حل: با نزدیک شدن بار q_1 به بار q_2 انرژی پتانسیل آن‌ها افزایش می‌یابد و چون انرژی مکانیکی پایسته است، انرژی جنبشی q_1 کاهش می‌یابد. هرچه q_1 به q_2 نزدیک‌تر می‌شود، کاهش انرژی جنبشی بیشتر می‌شود تا این‌که در نهایت در نقطه‌ای مانند A سرعت q_1 صفر می‌شود و جسم برمی‌گردد. با دور شدن q_1 از q_2 انرژی پتانسیل آن کاهش و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد و هرچه q_1 از q_2 دورتر می‌شود، سرعت آن بیشتر می‌شود.

در مواردی که به جسم در حال حرکت نیروی اصطکاک جنبشی (یا نیروی اتلاف‌کننده دیگری چون مقاومت هوا) وارد می‌شود، جسم انرژی مکانیکی خود را ازدست می‌دهد. انرژی ازدست‌رفته به صورت انرژی درونی جسم و سطح تماس و یا محیط درمی‌آید. در این گونه موارد انرژی مکانیکی پایسته نیست.

با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی می‌توان کمیت‌های مختلف را محاسبه کرد. این امر در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

مثال ۱۴-۴

جسمی به جرم 0.5 kg را از ارتفاع 2 m با سرعت 10 m/s به بالا پرتاب می‌کنیم. این جسم حداکثر تا چه ارتفاعی بالا می‌رود ($g = 10 \text{ m/s}^2$ فرض و از مقاومت هوا صرف نظر شود).

حل: انرژی جنبشی جسم در نقطه پرتاب برابر است با:

$$K_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} (0.5)(10)^2 = 25 \text{ J}$$

و انرژی پتانسیل گرانشی آن در همین نقطه برابر است با:

$$U_1 = mgh_1 = 0.5 \times 10 \times 2 = 10 \text{ J}$$

انرژی جنبشی آن در بالاترین نقطه $K_2 = 0$ است و انرژی پتانسیل گرانشی آن در این

$$U_2 = mgh_2 = 0.5 \times 10 \times h_2 = 5h_2 \quad \text{نقطه برابر است با:}$$

$$U_1 + K_1 = U_2 + K_2 \quad \text{برطبق پایستگی انرژی مکانیکی}$$

$$10 + 25 = 5h_2 + 0 \quad \text{با جای‌گذاری مقادیر آن‌ها داریم:}$$

که با حل آن، مقدار زیر برای ارتفاع نهایی جسم به دست می‌آید:

$$h_2 = 7 \text{ m}$$

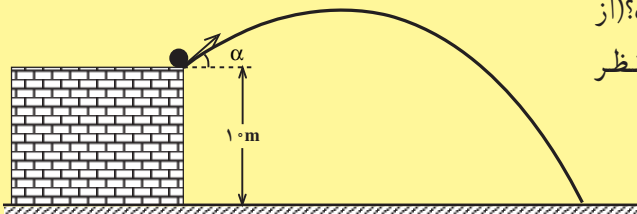
مثال ۱۵-۴

از بالای یک بلندی به ارتفاع 10 m متر جسمی به جرم 4 kg را مطابق شکل (۴-۱۵) با سرعت 20 m/s پرتاب می‌کنیم. سرعت جسم در هنگام برخورد

بازمین چه قدر است؟ (از

مقاومت هوا صرف نظر

شود).



شکل ۱۵-۴

حل: انرژی‌های جنبشی و پتانسیل گرانشی جسم در نقطه پرتاب برابرند با:

$$K_1 = \frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1}{2} (0/4)(20)^2 = 80 \text{ J}$$

$$U_1 = mgh_1 = 0/4 \times 10 \times 10 = 40 \text{ J}$$

و نیز انرژی جنبشی و پتانسیل گرانشی جسم در لحظه برخورد با زمین به ترتیب

$$K_2 = \frac{1}{2} mv_2^2 = \frac{1}{2} \times 0/4 \times v_2^2 = 0/2 v_2^2 \quad \text{برابرند با:}$$

$$U_2 = mgh_2 = 0/4 \times 10 \times 0 = 0$$

بر طبق پایستگی انرژی مکانیکی داریم:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2$$

با جای‌گذاری مقادیرها داریم:

$$80 + 40 = 0/2 v_2^2 + 0$$

$$v_2 = 24/5 \text{ m/s}$$

۴-۵- توان

در بخش (۴-۱) در مورد محاسبه کار انجام شده بحث شد. ولی، در مورد زمانی که این کار انجام می‌شود، صحبتی نشد. کار می‌تواند کند و یا تند انجام شود. یک جسم را می‌توانیم مثلاً در ۲ و یا ۵ ثانیه به یک ارتفاع معین برسانیم. در هر دو مورد کار انجام شده یکسان است. ولی در مورد اول کار سریع‌تر انجام شده است. برای در نظر گرفتن زمان انجام کار کمیّت مناسبی را به نام توان تعریف می‌کنیم.

فرض کنید کار W در زمان t انجام شده است. توان متوسط \bar{P} به صورت کار انجام شده در واحد زمان تعریف می‌شود و از تقسیم کردن کار به زمان انجام آن به دست می‌آید:

$$\bar{P} = \frac{W}{t} \quad (4-12)$$

یکای توان در SI ژول بر ثانیه (J/s) است که به احترام کارهای علمی جیمز وات، وات (W) نامیده می‌شود.

بر طبق این تعریف، هر اندازه کار معینی در زمان کمتری انجام شود و یا در زمان معینی کار بیشتری انجام گیرد، توان مقدار بیشتری دارد.

مثال ۴-۱۷

چمدانی به جرم 20 کیلوگرم را با سرعت ثابت به اندازه $5/0$ متر در 2 ثانیه بالا می‌بریم. این کار با چه توان متوسطی انجام شده است؟ (g را برابر با 10 m/s^2 فرض کنید).

حل: ابتدا کار انجام شده را محاسبه می‌کنیم. چون سرعت ثابت است برای این کار باید نیروی برابر با mg به چمدان وارد کنیم.

$$W = mgh = 20 \times 10 \times 0.5 = 100 \text{ J}$$

$$\bar{P} = \frac{W}{t} = \frac{100}{2} = 50 \text{ W}$$

فعالیت ۴-۷

از پله‌های یک ساختمان یک بار به صورت عادی و بار دیگر به سرعت بالا بروید. و در هر حالت توان خود را به دست آورید.

هر وسیله‌ای مانند اتومبیل، جاروبرقی، آسانسور و ... که کاری را انجام دهد، انرژی مصرف می‌کند. برای استفاده از این وسیله‌ها باید به آن‌ها انرژی داد. این انرژی را انرژی ورودی یا مصرفی می‌نامند.

فعالیت ۴-۸

فهرستی از وسیله‌های اطراف خود را که هر کدام کار خاصی انجام می‌دهند تهیه و مشخص کنید انرژی ورودی هریک چگونه تأمین می‌شود.

از آنجا که مقداری از این انرژی به علت اصطکاک تلف و یا صرف حرکت دادن اجزای وسیله می‌شود، کار یا انرژی مفید خروجی وسیله با انرژی ورودی آن برابر نیست. در نتیجه، فقط کسری از انرژی ورودی قابل استفاده است.

این کسر معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود و بازده نامیده می‌شود:

$$\text{بازده} = \frac{\text{کار خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \times 100$$

این کمیت تعیین می‌کند که چه درصدی از انرژی ورودی به کار یا انرژی خروجی تبدیل می‌شود.

مثال ۴-۱۷

در یک ساختمان، مصالح ساختمانی را با استفاده از یک موتور الکتریکی با توان متوسط یک کیلووات بالا می‌برند. اگر بازده موتور ۸۰ درصد باشد، بار ۱۰۰ کیلوگرمی را در چند ثانیه می‌توان به ارتفاع ۱۰ متری برد؟ ($g = 10 \text{ m/s}^2$ فرض شود).
حل: با استفاده از رابطه بازده توان خروجی موتور برابر است با:

$$\bar{P} = 1000 \times 0.8 = 800 \text{ W}$$

$$W = mgh = 100 \times 10 \times 10 = 10000 \text{ J}$$

$$\bar{P} = \frac{W}{t}$$

$$800 = \frac{10000}{t}$$

$$t = 12.5 \text{ s}$$

تمرین‌های فصل چهارم

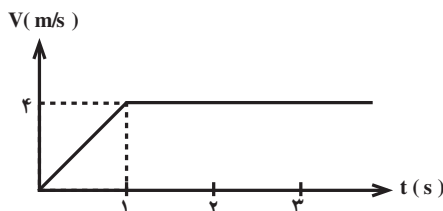
۱- شخصی به جرم 50 کیلوگرم در داخل آسانسوری قرار دارد. آسانسور 5 متر بالا می‌رود. در هریک از موارد زیر کار هریک از نیروهای وارد بر شخص و کار نیروی برآیند وارد بر او را حساب کنید.

الف - آسانسور با سرعت ثابت بالا می‌رود.

ب - آسانسور با شتاب 2 m/s^2 بالا می‌رود.

۲- در تمرین ۱ کار برآیند نیروها را با استفاده از قضیه کار و انرژی به دست آورید.

۳- نمودار سرعت - زمان متحرکی به جرم 5 kg در شکل ۴-۱۶ داده شده است. کار نیروی برآیند را (الف) به طور مستقیم (ب) با استفاده از قضیه کار و انرژی برای این متحرک حساب کنید.



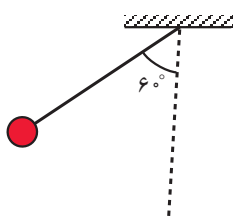
شکل ۴-۱۶

۴- گلوله‌ای به جرم 24 گرم با سرعت 50 m/s وارد تنه درختی می‌شود. اگر گلوله به اندازه 12 cm در تنه درخت فرو رود، نیروی متوسطی که تنه به آن وارد می‌کند چند نیوتون است؟

۵- اتومبیلی به جرم یک تن با سرعت 72 km/h در حرکت است. راننده اتومبیل ناگهان مانعی را در 30 متری خود می‌بیند و ترمز می‌کند. اگر ضریب اصطکاک بین لاستیک اتومبیل و جاده 5% باشد، آیا اتومبیل به مانع برخورد می‌کند؟

این تمرین را یک بار با استفاده از قضیه کار و انرژی و بار دیگر با استفاده از معادله‌های فصل حرکت‌شناسی و دینامیک حل کنید.

۶- آونگی به جرم m و طول l را مطابق شکل (۴-۱۷) به اندازه 60° از وضعیت قائم منحرف



شکل ۴-۱۷

و از حال سکون رها می‌کنیم.

الف - سرعت آونگ هنگامی که از وضعیت قائم می‌گذرد

چقدر است؟

ب - آونگ تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟

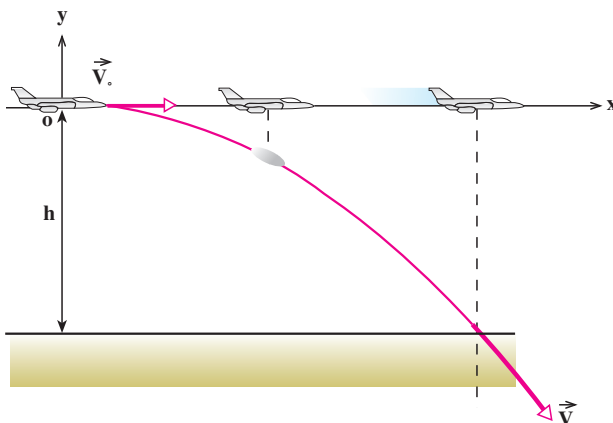
(از مقاومت هوا صرف نظر کنید.)

۷- در شکل (۱۸-۴) یک واگن تفریحی نشان داده شده است. اگر واگن در A از حال سکون شروع به حرکت کند، سرعت آن در B و C چقدر است؟ از اصطکاک قطار با ریل صرف نظر کنید.



شکل ۱۸-۴

۸- در شکل (۱۹-۴) هواپیمای بمب افکنی که در ارتفاع ۲۰۰ متری با سرعت 900 km/h به طور افقی پرواز می کند بمب خود را رها می کند. سرعت بمب در هنگام برخورد به زمین چه قدر است؟ (از مقاومت هوا صرف نظر کنید.)



شکل ۱۹-۴

۹- شخصی به جرم 70 kg ، پله را در زمان یک دقیقه طی می کند. توان متوسط او چند وات است؟ ارتفاع هر پله را 30 cm متر فرض کنید.

۱۰- آسانسوری با سرعت ثابت 1 m/s نفر مسافر را در 3 دقیقه تا ارتفاع 80 m متر بالا می برد. اگر جرم متوسط هر مسافر 80 kg و جرم آسانسور 1000 kg باشد، توان متوسط موتور آن چند وات است؟