هر جسم در حال حرکت، انرژی دارد. انرژی‌ای که اجسام متحرک به خاطر حرکتشان دارند **انرژی جنبشی** نامیده می‌شود.

انرژی جنبشی جسمی به جرم m که با تندی v حرکت می‌کند، از رابطهٔ روبه‌رو به دست می‌آید:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

از این رابطه پیداست که هر چه جرم جسم یا تندی آن بیشتر باشد، انرژی جنبشی بیشتری دارد.

نکته در رابطهٔ بالا یکای جرم، کیلوگرم (kg) و یکای تندی، متر بر ثانیه (m/s) است. بنابراین یکای انرژی جنبشی (و هر نوع دیگری از انرژی) در SI، $kg.m^2/s^2$ یا همان ژول (J) است.

$$1\frac{kg.m^2}{s^2} \equiv 1\,J$$

نکته انرژی جنبشی یک کمیت نرده‌ای و همواره مثبت (یا صفر) است و جهت حرکت جسم در آن تأثیری ندارد.

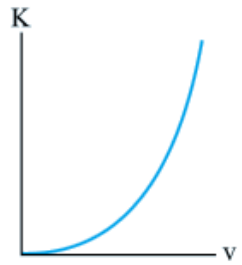
نکته برای مقایسهٔ انرژی جنبشی در دو حالت، از رابطهٔ مقابل استفاده می‌کنیم:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{m_2}{m_1} \times \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2$$

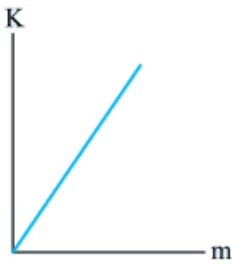
مثال **جرم خودروی پراید $790\,kg$ است. اگر سه نفر با جرم متوسط $70\,kg$ سوار آن شوند و اتومبیل با تندی $72\,km/h$ در حال حرکت باشد، انرژی جنبشی کل، چند ژول و چند کیلوژول است؟**

نمودارهای انرژی جنبشی (K) برحسب جرم (m) و تندی (v) و مجذور تندی (v^2) را به صورت کیفی رسم کرده و دربارهٔ شکل هر نمودار توضیح دهید.

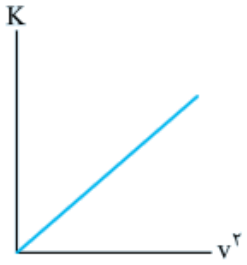
نمودارهای خواسته‌شده را با توجه به رابطهٔ $K = \frac{1}{2}mv^2$ رسم می‌کنیم:



K با توان دوم v رابطهٔ مستقیم دارد، بنابراین شکل نمودار یک سهمی است.



رابطهٔ K و m یک رابطهٔ خطی بوده و شیب این خط برابر $\frac{1}{2}v^2$ است.



رابطهٔ K و v^2 خطی بوده و شیب آن برابر $\frac{1}{2}m$ است.

مثال امروزه تنها نزدیک به ۱۰۰ یوزپلنگ در زیستگاه‌های ایران زندگی می‌کنند. این حیوان ارزشمند، سریع‌ترین پستاندار روی زمین است که در مسافت‌های کوتاه می‌تواند با سرعت بسیار بالایی بدود. انرژی جنبشی یک پوزپلنگ به جرم ۵۰ kg که با تندی ۱۰۵ km / h در حال دویدن است، چند برابر انرژی جنبشی یک فیل آفریقایی به جرم ۶ تن است که با تندی ۳۵ km / h راه می‌رود؟

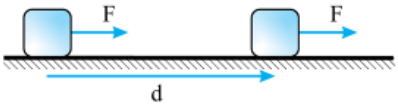
در فیزیک هنگامی روی جسمی کار انجام می‌شود که هر دو شرط زیر برقرار باشد:

۱) به جسم **نیرو** وارد شود. ۲) جسم در راستای نیروی واردشده **جابه‌جا** شود.

کار انجام‌شده توسط نیروی ثابت

ساده‌ترین حالت کار وقتی اتفاق می‌افتد که نیروی ثابت F به جسم وارد شده و جسم در جهت نیرو به اندازهٔ d جابه‌جا شود. در این حالت، کار به صورت ضرب اندازهٔ نیرو در اندازهٔ جابه‌جایی تعریف می‌شود و از رابطهٔ مقابل محاسبه می‌شود:

$$W = Fd$$

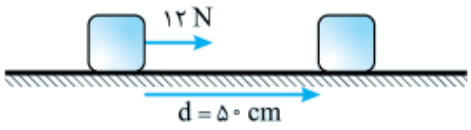


کار، یک کمیت نرده‌ای است و یکای آن در SI، ژول (J) نامیده می‌شود. اگر نیروی یک نیوتونی به جسمی وارد شود و جسم در جهت نیرو به اندازهٔ یک متر جابه‌جا شود، یک ژول کار انجام شده است.

$$1\,N.m \equiv 1\,J \qquad \text{ژول} ۱ \equiv \text{متر} \times \text{نیوتون} ۱$$

یکای انرژی هم ژول است. **کار** و **انرژی** از یک جنس هستند.

مثال روی یک سطح بدون اصطکاک، جسمی را با نیروی ثابت ۱۲ N به اندازهٔ ۵۰ cm و به طور مستقیم جابه‌جا کرده‌ایم. کار انجام‌شده روی جسم چند ژول است؟



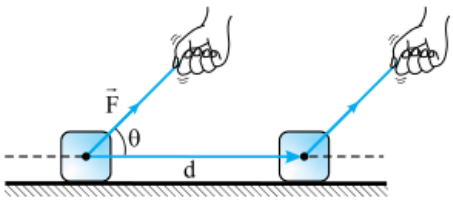
محاسبهٔ کار یک نیروی ثابت (در حالت کلی)

در شکل روبه‌رو، آن قسمتی از نیروی ثابت F کار انجام می‌دهد که در جهت جابه‌جایی باشد. این قسمت از نیروی F، همان مؤلفهٔ افقی F است. در یادآوری ریاضی دیدیم که این مؤلفه برابر است با $F\cos\theta$.

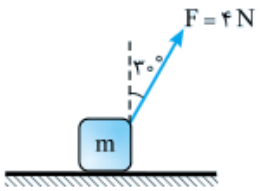
هر وقت بخواهیم کار نیروی ثابت F را در یک جابه‌جایی به اندازهٔ d به دست آوریم، باید مؤلفه‌ای از F را که در جهت جابه‌جایی است، حساب کرده و آن را در جابه‌جایی ضرب کنیم؛ یعنی کار یک نیروی ثابت در حالت کلی از رابطهٔ مقابل به دست می‌آید:

$$W = (F\cos\theta)d = Fd\cos\theta$$

در این رابطه، θ زاویهٔ بین بردار نیرو و جابه‌جایی است.

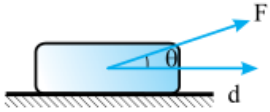


مثال در شکل روبه‌رو نیروی $F = ۴\ N$ وزنهٔ m را روی سطح افقی در هر ثانیه $۲\ m$ جابه‌جا می‌کند. کار این نیرو در مدت $۱۰\ s$ برابر چند ژول است؟

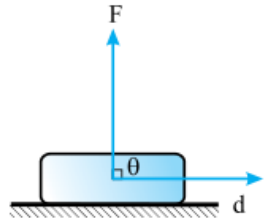


نکته بسته به این‌که زاویهٔ بین نیرو و جابه‌جایی (θ) چه‌قدر باشد، سه حالت ممکن است رخ دهد:

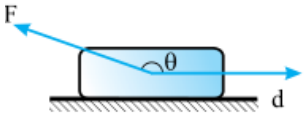
۱) زاویهٔ θ حاده باشد $(۰ \le \theta < ۹۰)$: کار مثبت است $(W > ۰)$.



۲) زاویهٔ θ قائمه باشد $(\theta = ۹۰)$: کار صفر است $(W = ۰)$.



۳) زاویهٔ θ منفرجه باشد $(۹۰ < \theta \le ۱۸۰)$: کار منفی است $(W < ۰)$.



نکته در حالت‌های زیر کاری انجام نمی‌شود $(W = ۰)$.

۱) نیرو به جسم وارد نشود $(F = ۰)$. ۲) جابه‌جایی اتفاق نیفتد $(d = ۰)$. ۳) نیرو بر جابه‌جایی عمود باشد $(\theta = ۹۰)$.

مثال وزنه‌برداری وزنهٔ ۲۰۰ کیلوگرمی را با حرکت یک ضرب بالای سر خود می‌برد. در این حرکت وزنه ۲ متر جابه‌جا شده است. $(g = ۱۰\ N/kg)$

الف) کاری که وزنه‌بردار برای بالابردن وزنه انجام داده، چند ژول است؟

ب) کار نیروی وزن در این جابه‌جایی چه‌قدر است؟

پ) اگر وزنه‌بردار وزنه را ۳ ثانیه بالای سر خود نگه دارد، در این مدت چه‌قدر کار انجام داده است؟

کار کل

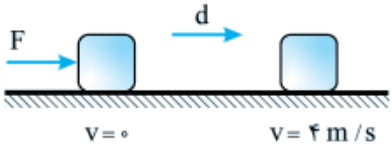
خیلی وقت‌ها چند نیرو به صورت هم‌زمان بر یک جسم اثر می‌کنند. در چنین حالتی کار کل را می‌توان با جمع کارها به دست آورد.

جمع کارها (W_t): کار هر کدام از نیروها را جداجدا حساب کرده و در آخر، همهٔ کارها را با هم جمع جبری می‌کنیم. (یادمان نرفته که کار کمیتی اسکالر است و کمیت‌های اسکالر به صورت معمولی با هم جمع می‌شوند.)

مثال یک آسانسور شخصی به جرم $۶۵\ kg$ را با تندی ثابت، $۳\ m$ بالا می‌برد. کار کل انجام‌شده بر روی شخص چند ژول است؟ $(g = ۱۰\ m/s^۲)$

مثال باری به وزن $mg = ۱/۸ \times ۱۰^۴\ N$ را با دو گاو به اندازهٔ $۲۴۸\ m$ جابه‌جا کرده‌ایم. نیروی ثابت $F_۱ = ۸ \times ۱۰^۳\ N$ با زاویهٔ $\theta = ۶۰^\circ$ بالای افق از طرف گاوها به بار وارد می‌شود. نیروی اصطکاک جنبشی بین بار و زمین $f_k = ۳ \times ۱۰^۳\ N$ است. کار کل انجام‌شده در این جابه‌جایی را محاسبه کنید.

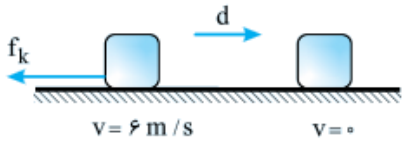
مثال مطابق شکل، جسمی به جرم $۶\ kg$ در حال سکون است. اگر به این جسم نیرویی به اندازهٔ $۶\ N$ وارد شود، تندی آن پس از $۸\ m$ جابه‌جایی به $۴\ m/s$ می‌رسد.



الف) کار نیروی F در این جابه‌جایی چه‌قدر است؟

ب) انرژی جنبشی جسم در پایین جابه‌جایی چه‌قدر است؟

مثال با توجه به شکل زیر، جسمی به جرم $۲\ kg$ با تندی $۶\ m/s$ شروع به حرکت می‌کند و پس از $۴\ m$ جابه‌جایی متوقف می‌شود و مقدار نیروی اصطکاک جنبشی آن $۹\ N$ است:



الف) کار نیروی اصطکاک را به دست آورید.

ب) چون جسم در انتهای حرکت متوقف شده است، انرژی جنبشی نهایی آن صفر است. انرژی جنبشی جسم در ابتدای حرکت را محاسبه کنید.

هرگاه نیروی خالصی به یک جسم وارد شده و روی آن کار مثبت انجام دهد، انرژی جسم افزایش پیدا می‌کند (کار مثبت به معنای دادن انرژی به جسم است). و اگر کار نیروی وارد بر جسم منفی باشد، انرژی جسم کاهش می‌یابد (کار منفی به معنای گرفتن انرژی از جسم است).

قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی

$$W_t = K_2 - K_1$$

کار کل انجام‌شده روی یک جسم با تغییر انرژی جنبشی آن برابر است.

در این رابطه K_1 و K_2 به ترتیب انرژی جنبشی جسم قبل از انجام کار و بعد از انجام کار هستند. بنابراین:

- اگر تندی جسم در طول جابه‌جایی ثابت باشد و یا تندی جسم در نقاط ابتدا و انتهای حرکت برابر باشد، $K_1 = K_2$ بوده و کار برایند نیروها صفر است. (مشابه این نکته را قبلاً هم دیده بودیم.)
- اگر تندی جسم در طول حرکت زیاد شود، $K_2 > K_1$ بوده و کار برایند نیروها مثبت است.
- اگر تندی جسم در طول حرکت کم شود، $K_2 < K_1$ بوده و کار برایند نیروها منفی است.

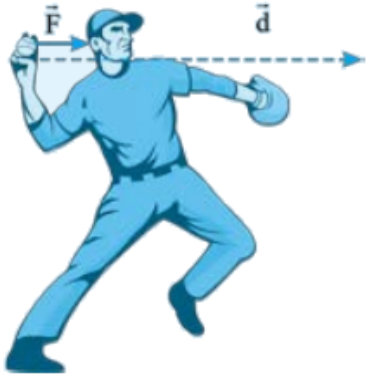
نکته قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی مختص حرکت یک جسم روی مسیر مستقیم نیست و در هر مسیری (مستقیم یا پیچ‌درپیچ) می‌توان از آن استفاده نمود.

مثال **کیف مدرسهٔ خود را مطابق شکل مقابل در دست گرفته‌اید و در مسیر افقی راه می‌روید. در هر کدام از موارد زیر، توضیح دهید که آیا نیروی دست شما کاری روی کیف انجام می‌دهد؟**

الف **با تندی ثابت راه بروید.**

ب **تندی حرکت شما در طول مسیر، کم و زیاد شود.**

مثال **مطابق شکل، ورزشکاری می‌خواهد توپی به جرم ۲۰۰ g را به صورت افقی پرتاب کند. برای این‌که توپ با تندی بیشتری پرتاب شود، او نیروی ثابت ۱۰۰ N را تا لحظهٔ پرتاب توپ و در جهت جابه‌جایی به طول ۱/۶ m بر آن وارد می‌کند. توپ با چه سرعتی پرتاب می‌شود؟ (مقاومت هوا نداریم.)**



مثال اولین هواپیمای نوی خریداری‌شده توسط ایران در سال‌های اخیر، چندی پیش از فرانسه وارد ایران شد. این هواپیما از نوع ایرباس A۳۲۱ بود که جرم بدون مسافر آن در حدود ۹۰ تن، بالاترین ارتفاع پروازی آن ۱۲۰۰۰ m و تندی بهینه‌اش ۸۲۸ km / h است.

الف) انرژی جنبشی هواپیما را وقتی با تندی بهینه‌اش پرواز می‌کند، به دست آورید.

ب) کار نیروی وزن تا رسیدن هواپیما به ارتفاع اوج چند ژول است؟

پ) با استفاده از قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی، کار کل وارد بر هواپیما را از لحظهٔ شروع حرکت تا رسیدن به تندی بهینه حساب کنید. ($g = ۱۰ \, m / s^۲$)

مثال یک زن چای‌کار لاهیجانی سبدی از برگ سبز چای را به جرم ۸ kg با نیروی متوسط ۸۰ N از حال سکون در راستای قائم تا ارتفاع ۱/۶ m بلند کرده و روی سر خود می‌گذارد. ($g = ۱۰ \, N / kg$)

الف) کار نیروی وزن و کار انجام‌شده توسط چای‌کار را در بالابردن سبد حساب کنید.

ب) کار کل انجام‌شده روی سبد چای در موقع بالارفتن چند ژول است؟

پ) اگر این زن سبد چای را با تندی ثابت، ۲۰۰ m روی سر خود تا کنار مزرعه حمل کند، چند ژول کار روی سبد انجام داده است؟

ت) کار انجام‌شده توسط این چای‌کار هنگامی که سبد را با نیروی ثابت ۷۰ N پایین آورده و روی زمین می‌گذارد، چند ژول است؟

مثال **تلسکوپ فضایی هابل در سال ۱۹۹۰ (۱۳۶۹ هـ .ش) توسط شاتل دیسکاوری در مدار زمین قرار گرفت و از آن تاریخ، عکس‌های فوق‌العاده‌ای را از فضا به زمین ارسال کرده است. این تلسکوپ در حدود ۱۱ تن جرم دارد و با تندی $۷/۶\ km/s$ در مداری دور زمین در گردش است.**

الف **انرژی جنبشی تلسکوپ هابل را حساب کنید.**

ب **شکل مقابل، مدل‌سازی حرکت این تلسکوپ دور زمین را نشان می‌دهد. با وجود آن‌که همواره نیروی خالص وزن به تلسکوپ وارد می‌شود، چگونه ممکن است که انرژی جنبشی آن ثابت بماند؟**

به نوعی از انرژی که به دلیل شکل یا موقعیت اجسام نسبت به یکدیگر در آن‌ها **ذخیره** می‌شود، **انرژی پتانسیل** (U) می‌گوییم.

نکتهٔ مهم دربارهٔ انرژی پتانسیل این است که بیش از آن‌که خودش برای ما مهم باشد، تغییراتش برای ما مهم است. کار چند نیروی مهم را می‌توانیم با استفاده از تغییرات انرژی پتانسیل به شکل روبه‌رو حساب کنیم:

$$W = -\Delta U$$

از رابطهٔ بالا می‌توان برای به دست آوردن کار نیروی وزن استفاده کرد:

$$W_{\text{نیروی وزن}} = -\Delta U_{\text{گرانشی}}$$

نکته دیدیم که انرژی جنبشی یک جسم فقط به جرم و سرعت آن بستگی دارد و برای هر جسمی به طور جداگانه و مستقل از اجسام دیگر به دست می‌آید؛ اما انرژی پتانسیل این‌گونه نیست. انرژی پتانسیل به شکل و موقعیت اجسام نسبت به یکدیگر وابسته است و نمی‌توانیم برای یک جسم منفرد، انرژی پتانسیل تعریف کنیم. چند جسم که در ارتباط با هم هستند و انرژی پتانسیل برای آن‌ها تعریف می‌شود را **سامانه** می‌نامیم. انرژی پتانسیل به مکان اجسام یک سامانه نسبت به یکدیگر بستگی دارد.

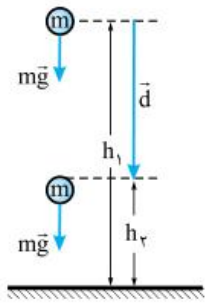
انرژی پتانسیل گرانشی

نیروی وزن $(m\vec{g})$ به تمامی اجسام نزدیک سطح زمین وارد می‌شود. این نیرو همواره عمودی و به سمت زمین است. نیروی وزن وقتی کار انجام می‌دهد که ارتفاع جسم تغییر کند. به نوعی از انرژی پتانسیل که برای سامانهٔ جسم ـ زمین تعریف می‌شود و تغییراتش به تغییر ارتفاع جسم از زمین وابسته است، **انرژی پتانسیل گرانشی** می‌گویند.

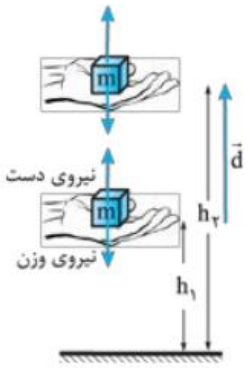
اگر جسمی به جرم m در ارتفاع h از سطح زمین باشد، انرژی پتانسیل گرانشی سامانهٔ جسم ـ زمین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = mgh$$

حالا به دو شکل زیر نگاه کنید:



الف) جسمی به جرم m از ارتفاع h_1 رها شده و تا ارتفاع h_2 سقوط می‌کند.



ب) جسمی به جرم m از ارتفاع h_1 به ارتفاع h_2 برده می‌شود.

کار نیروی وزن را برای هر دو تصویر حساب می‌کنیم:

الف در این شکل نیروی وزن و جابه‌جایی هم‌جهت هستند و داریم: $\theta = 0 \Rightarrow \cos\theta = 1$

$$W_{\text{وزن}} = (F\cos 0^\circ)d = mg(h_1 - h_2) \xrightarrow{h_2<h_1} W_{\text{وزن}} = -(mgh_2 - mgh_1)$$

کار نیروی وزن مثبت است و انرژی پتانسیل گرانشی کاهش می‌یابد $(\Delta U < 0)$.

ب در این شکل نیروی وزن و جابه‌جایی در خلاف جهت هم هستند و داریم: $\theta = 180^\circ \Rightarrow \cos 180^\circ = -1$

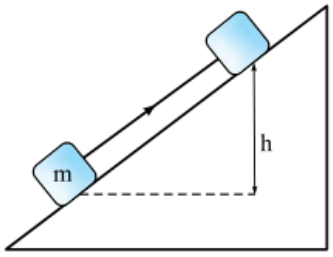
$$W_{\text{وزن}} = (F\cos 180^\circ)d = -mg(h_2 - h_1) \xrightarrow{h_2>h_1} W_{\text{وزن}} = -(mgh_2 - mgh_1)$$

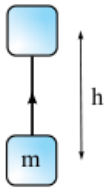
کار نیروی وزن منفی است و انرژی پتانسیل گرانشی افزایش می‌یابد $(\Delta U > 0)$.

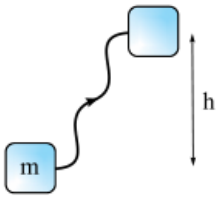
دو محاسبهٔ بالا نشان می‌دهد که برای هر دو حالت (و برای هر حالت دیگری)، کار نیروی وزن برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است:

$$W_{\text{وزن}} = -(U_2 - U_1) = -\Delta U_{\text{گرانشی}}$$

نکته کار نیروی وزن فقط به تغییر ارتفاع جسم وابسته است و به مسیر بستگی ندارد. مثلاً کار نیروی وزن بر جرم m در هر سه شکل زیر برابر است، زیرا تغییر ارتفاع در هر سه شکل برابر با h است.







نکته انرژی پتانسیل گرانشی به انتخاب مبدأ پتانسیل وابسته است؛ یعنی می‌توانیم U را در هر نقطه‌ای که بخواهیم برابر با صفر تعریف کنیم. معمولاً سطح زمین را به عنوان مبدأ برای محاسبهٔ انرژی پتانسیل گرانشی انتخاب می‌کنند.

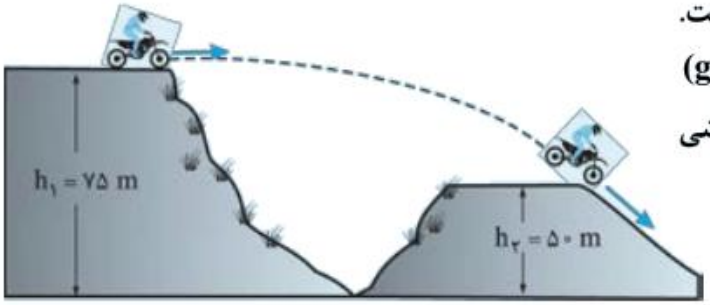
توجه هر چند انرژی پتانسیل گرانشی برای سامانهٔ جسم ـ زمین تعریف می‌شود، اما گاهی وقت‌ها برای سادگی می‌گوییم: انرژی پتانسیل جسم.

مثال **یک هواپیمای مسافربری به جرم $۷/۲\times۱۰^{۴}\ kg$ با سرعت $۷۰۰\ km/h$ در ارتفاع $۹\ km$ حرکت می‌کند. انرژی پتانسیل گرانشی را برای سامانهٔ هواپیما ـ زمین حساب کنید. $(g = ۱۰\ m/s^{۲})$**

مثال **مجموع جرم موتورسواری به همراه موتورش $۱۸۰\ kg$ است. موتورسوار پرشی مطابق شکل روبه‌رو انجام می‌دهد. $(g = ۱۰\ m/s^{۲})$**

الف **اگر مبدأ پتانسیل را سطح زمین انتخاب کنیم، انرژی پتانسیل گرانشی سامانهٔ موتورسوار ـ زمین روی هر یک از تپه‌ها چند کیلوژول است؟**

ب **کار نیروی وزن را در این پرش حساب کنید.**



به مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل هر جسم، **انرژی مکانیکی** آن گفته می‌شود.

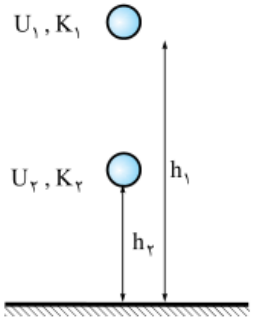
$E = K + U$:انرژی مکانیکی

فرض کنید جسمی مطابق شکل مقابل و در شرایطی که مقاومت هوا وجود ندارد، در حال سقوط‌کردن است. در این حالت، تنها نیرویی که به جسم وارد می‌شود، نیروی وزن است. بنا بر قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی، کار برایند نیروهای وارد بر این جسم، برابر با تغییر انرژی جنبشی آن است: $W_t = W_{وزن} = K_۲ - K_۱$

از طرفی برای محاسبهٔ کار نیروی وزن داشتیم: $W_{وزن} = -(U_۲ - U_۱)$

هر دو رابطهٔ اخیر بیان‌کنندهٔ کار نیروی وزن در این سقوط است و داریم:

$$K_۲ - K_۱ = -(U_۲ - U_۱) \Rightarrow K_۱ + U_۱ = K_۲ + U_۲ \Rightarrow E_۱ = E_۲$$



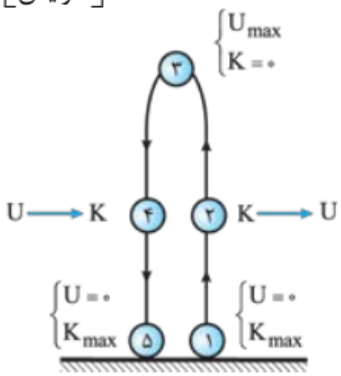
چون در این مثال نقطه‌های ۱ و ۲ اختیاری بودند، پس رابطهٔ بالا را می‌توان برای هر دو نقطهٔ دلخواهی از مسیر نوشت. به این نتیجهٔ به دست آمده، **اصل پایستگی انرژی مکانیکی** گفته می‌شود.

اصل پایستگی انرژی مکانیکی: اگر نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا نادیده گرفته شوند، انرژی مکانیکی یک جسم در تمام نقاط مسیر حرکتش ثابت است.

توجه در بسیاری از مسائل این فصل که از نیروهای اتلافی (مانند اصطکاک و مقاومت هوا) چشم‌پوشی می‌شود، بهترین راه حل، برابر قرار دادن انرژی‌های مکانیکی در دو نقطه از مسیر است.

نکته در صورت پایسته‌بودن انرژی مکانیکی یک جسم، به همان اندازه که انرژی جنبشی آن [افزایش / کاهش] می‌یابد، انرژی پتانسیل آن [کاهش / افزایش] پیدا می‌کند.

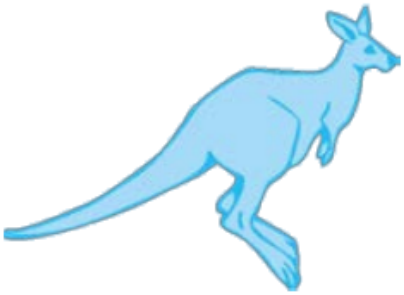
نمونه وقتی جسمی را در شرایط خلأ[1] از سطح زمین و به طور عمودی به طرف بالا پرتاب می‌کنیم، انرژی جنبشی اولیه به مرور کاهش یافته و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می‌یابد. جسم در بالاترین نقطه فقط انرژی پتانسیل گرانشی دارد و انرژی جنبشی آن صفر است. پس از یک توقف بسیار کوتاه در نقطهٔ اوج، جسم سقوط می‌کند. این بار از انرژی پتانسیل گرانشی کاسته شده و انرژی جنبشی افزایش می‌یابد.



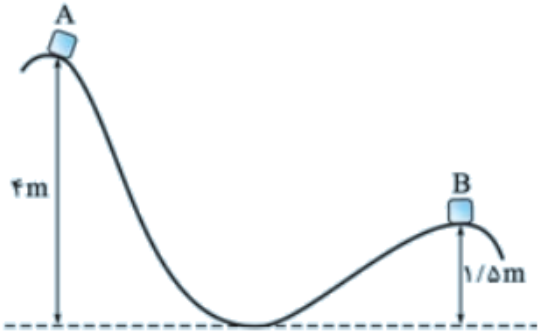
مثال **پاهای کانگورو نمی‌توانند مستقل از یکدیگر حرکت کنند. به خاطر همین کانگوروها مجبور به پریدن هستند. کانگورویی قهوه‌ای به جرم ۲۰ kg می‌تواند حداکثر تا ارتفاع ۱/۸ m بپرد. ($g = ۱۰\ m/s^۲$)**

الف **با صرف‌نظر از مقاومت هوا، تندی اولیهٔ کانگورو در هنگام پرش را به دست آورید.**

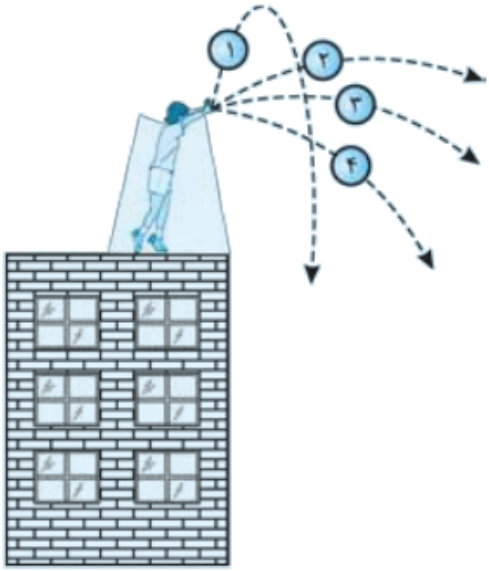
ب **انرژی جنبشی کانگورویی به جرم ۲۰ kg در لحظهٔ پریدن چند ژول است؟**



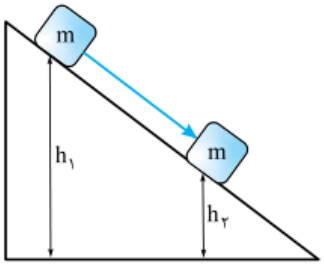
مثال **مطابق شکل، از نقطهٔ A جسمی از حال سکون رها شده است تا بر روی سطح بدون اصطکاک به طرف پایین بلغزد. تندی جسم در نقطهٔ B چند m/s خواهد بود؟ ($g = ۱۰\ m/s^۲$)**



مثال مطابق شکل، چهار توپ تنیس یکسان را از بالای ساختمانی با تندی برابر پرتاب کرده‌ایم. انرژی جنبشی توپ‌ها را هنگام رسیدن به زمین با هم مقایسه کنید. (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.)



اگر نیروهای اصطکاک و مقاومت هوا وجود نداشته باشند، انرژی مکانیکی ثابت می‌ماند؛ اما با وجود این نیروها، انرژی مکانیکی دیگر پایسته نیست. انرژی درونی را برای چنین شرایطی معرفی کرده و بیشتر مسائلی که در آن‌ها با کار نیروهای اصطکاک یا مقاومت هوا روبه‌رو هستیم، به کمک آن حل می‌کنیم. به عنوان یک حالت کلی، شکل زیر را ببینید.



در این شکل، جسم m با وجود اصطکاک از بالای سطح شیبدار پایین آمده است.

می‌خواهیم کار نیروی اصطکاک را در این جابه‌جایی به دست آوریم. می‌دانیم:

جمع کار تک‌تک نیروهای وارد بر جسم = کار کل

بر این جسم تنها دو نیروی وزن و اصطکاک اثر می‌کنند[1] و داریم:

$$W_t = W_{\text{وزن}} + W_{\text{اصطکاک}}$$

$$W_{\text{اصطکاک}} = W_t - W_{\text{وزن}}$$

بنا بر قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی، W_t برابر با تغییرات انرژی جنبشی (ΔK) است و دیدیم که $W_{\text{وزن}} = -\Delta U_{\text{گرانشی}}$؛ در نتیجه می‌توان نوشت:

$$W_{\text{اصطکاک}} = W_f = \Delta K - (-\Delta U) = \Delta K + \Delta U \Rightarrow W_f = (K_۲ - K_۱) + (U_۲ - U_۱) = \overbrace{(K_۲ + U_۲)}^{E_۲} - \overbrace{(K_۱ + U_۱)}^{E_۱}$$

$$\Rightarrow W_f = E_۲ - E_۱ \Rightarrow \boxed{W_f = \Delta E}$$

کار نیروی اصطکاک (و نیروی مقاومت هوا) برابر است با تغییر انرژی مکانیکی جسم.

کار نیروی اصطکاک باعث می‌شود تا مقداری از انرژی مکانیکی جسم به **انرژی درونی** تبدیل شود.

انرژی درونی

به مجموع انرژی‌های ذره‌های تشکیل‌دهندهٔ یک جسم، انرژی درونی آن می‌گویند. انرژی درونی هر جسم به دو عامل بستگی دارد:

۱ **تعداد ذرات.** هر چه تعداد ذرات سازندهٔ جسم بیشتر باشد، انرژی درونی بیشتر است.

۲ **انرژی هر ذره.** هر چه انرژی هر ذرهٔ سازنده بیشتر باشد، انرژی درونی آن نیز بیشتر است. افزایش انرژی ذرات یک جسم معمولاً با گرم‌تر شدن آن جسم همراه است.

کار نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا، انرژی مکانیکی اجسام را کم کرده و انرژی درونی آن‌ها را زیاد می‌کند. این تغییرات باعث گرم‌تر شدن جسم می‌شوند اما از آن‌جایی که بیشتر وقت‌ها نمی‌توان از این گرما استفاده کرد، معمولاً به آن **انرژی تلف‌شده** یا **انرژی اتلافی** گفته می‌شود. به نیروهایی که انرژی درونی را افزایش می‌دهند هم **نیروهای اتلافی** می‌گویند. بنابراین در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$W_{\text{نیروهای اتلافی}} = W_f = E_۲ - E_۱$$

قانون پایستگی انرژی

در یک سامانهٔ منزوی (که نه از بیرون انرژی می‌گیرد و نه به بیرون انرژی می‌دهد)، مجموع کل انرژی‌ها پایسته است. انرژی از بین نمی‌رود و به وجود نمی‌آید بلکه از صورتی به صورت دیگر تبدیل می‌شود.

جمع‌بندی کار و انرژی‌ها

کار برایند نیروهای وارد بر جسم برابر است با تغییر انرژی جنبشی: $W_t = \Delta K$

کار نیروی وزن برابر است با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی: $W_{\text{وزن}} = -\Delta U_{\text{گرانشی}}$

کار نیروهای اتلافی برابر است با تغییر انرژی مکانیکی: $W_f = \Delta E$

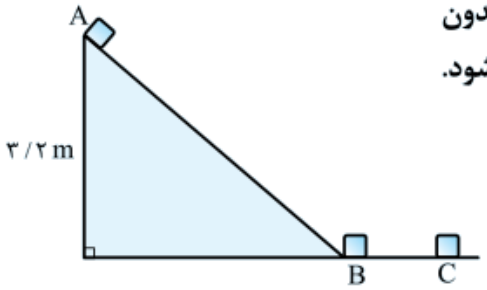
مثال **توپی به جرم $0/3\ kg$ با تندی $v_1 = 10\ m/s$ از نقطهٔ (۱) گذشته و در شرایط عادی تا نقطهٔ (۲) رفته است. اگر نیروهای اصطکاک و مقاومت هوا ۳۵ درصد از انرژی جنبشی توپ را در این مسیر تلف کرده باشند، تندی توپ در نقطهٔ (۲) چند متر بر ثانیه است؟**

مثال **مطابق شکل، مکعبی به جرم $1/5\ kg$ از حال سکون روی سطح شیبدار بدون اصطکاکی حرکت کرده و با تندی $8\ m/s$ به پایین سطح رسیده و در نقطهٔ C متوقف می‌شود.**

الف **کار برایند نیروها در مسیر AB چه‌قدر است؟**

ب **انرژی پتانسیل گرانشی سامانهٔ جسم ـ زمین در نقطهٔ A چند ژول است؟**

پ **اگر $BC = 10\ m$ باشد، کار نیروی اصطکاک در مسیر BC را به دست آورید.**



مثال **سکوی شیرجهٔ (دایو) استخر ورزشگاه شهید شیرودی تهران (امجدیهٔ سابق) در ارتفاع $10\ m$ از سطح آب در سال ۱۳۱۹ افتتاح شد. فرض کنید شما مهندس ساخت چنین استخری باشید. عمق آب را چنان تعیین کنید که حتی یک شناگر سنگین‌وزن با جرم $100\ kg$ اگر با تندی اولیهٔ $5\ m/s$ از روی سکو بپرد، با کف استخر برخورد نکند. (از مقاومت هوا صرف‌نظر کرده و مقاومت متوسط آب را $2125\ N$ در نظر بگیرید؛ $g = 10\ m/s^2$)**

هر وقت سرعت انجام کار (یا مصرف انرژی) برای ما مهم باشد، از کمیتی به نام **توان** استفاده می‌کنیم. توان متوسط (P_{av}) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{av} = \frac{W}{\Delta t}$$

در این رابطه، W کاری است که در بازهٔ زمانی Δt انجام شده است. یکای توان در SI، وات (W) است که هر وات برابر است با یک ژول بر ثانیه $(1W = 1J/s)$. چون یک وات توان بسیار ناچیزی است، گاهی از یکاهای بزرگ‌تری مانند کیلووات (kW) و مگاوات (MW) برای توان استفاده می‌شود. یکای قدیمی توان که امروزه نیز برای بیان توان موتور و وسایل نقلیه استفاده می‌شود، اسب بخار (hp)[1] است و داریم: $1hp = 746W$

از رابطهٔ توان پیدا است که هر چه کار بیشتری در زمان کوتاه‌تری انجام شود، توان بیشتر است.

نکته توان مانند کار، کمیتی اسکالر است.

نکته می‌توانیم با توجه به تعریف کار، رابطهٔ توان را به صورت مقابل بازنویسی کنیم: $P_{av} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{Fd}{\Delta t} \xrightarrow{v_{av} = \frac{d}{\Delta t}} P_{av} = F v_{av}$

در مسائلی که در آن‌ها با نیرو و تندی متوسط روبه‌رو هستیم، راحت‌تر است که از این رابطهٔ جدید استفاده کنیم.

نکته مقدار انرژی ورودی به سامانه در واحد زمان را **توان ورودی** و مقدار انرژی خارج‌شده از سامانه در واحد زمان را **توان خروجی** می‌نامند.

نکته گاهی وقت‌ها برای این‌که کمیتی را در واحد زمان بسنجیم، از کلمهٔ **آهنگ** استفاده می‌کنیم؛ مثلاً آهنگ مصرف انرژی یک دستگاه همان توان مصرفی دستگاه است.

مثال **آسانسوری با تندی ثابت، ۸ نفر را در ۲ دقیقه تا ارتفاع ۶۰ m بالا می‌برد. اگر جرم متوسط هر نفر را ۶۰ kg و جرم آسانسور را ۹۲۰ kg در نظر بگیریم، توان متوسط موتور آن چند وات است؟ $(g = 10\ m/s^2)$**

مثال **شاتل فضایی اولین بار در سال ۱۹۸۱ (۱۳۶۰هـ ش) به فضا پرتاب شد. هر موتور این شاتل نیروی جلوبرنده (پیشرانه)ای برابر ۱۲ MN ایجاد می‌کند. اگر شاتل در مدت ۱۰ دقیقه به اندازهٔ ۲۰۰۰ km در امتداد این نیرو حرکت کند، توان متوسط هر یک از موتورهای آن چند مگاوات و چند اسب بخار است؟**

مثال **موتور آبی در یک زمین کشاورزی مقداری آب را با آهنگ $0/6\ m^3/s$ از عمق ۱۰ متری بالا می‌آورد. اگر بازده موتور ۰/۸ باشد و با صرف‌نظر از انرژی جنبشی آب هنگام ورود به زمین کشاورزی، توان الکتریکی مصرفی موتور را حساب کنید. (هر متر مکعب آب، ۱۰۰۰ kg جرم دارد.)**