



وقتی در یک تصادف، به خودرو از پشت ضربه شدیدی وارد شود، به دلیل تفاوتی که در حرکت تنه و سر راننده رخ می‌دهد، به گردن راننده آسیبی وارد می‌شود که به آن آسیب تازیانه‌ای (whiplash injury) می‌گویند. در نبود ضربه گیر گردن ممکن است این آسیب جدی و جبران‌ناپذیر باشد. به کمک مفاهیم نیرو می‌توان دلیل این آسیب را توضیح داد.

### بخش‌ها

- ۱-۲ قوانین حرکت نیوتون
- ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص
- ۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون
- ۴-۲ نیروی گرانشی

در تمام فعالیت‌های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گوشی همراه، شنا کردن و دوچرخه‌سواری نمونه‌هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و... بدون اعمال نیرو انجام نمی‌شوند.

در فصل اول با کمیت‌های مکان، تندی، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، پرسشی مطرح نشد، مثلاً در چه صورت حرکت جسم با سرعت ثابت است؟ در چه صورت جسم دارای حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است؟ در چه صورت جسم ساکن می‌ماند؟ و...

وقتی جسمی را می‌کشیم یا آن را هل می‌دهیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم. نیرو، حاصل برهم‌کنش یا اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کمیتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۱-۲). معمولاً نیرو را با  $\vec{F}$  نشان می‌دهند<sup>۱</sup>. در رسم نیرو از یک پاره‌خط جهت‌دار با مقیاس مناسب استفاده می‌شود؛ مثلاً در شکل ۲-۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می‌کنید که با مقیاس مناسب رسم شده‌اند.

نیرو را به کمک نیروسنج اندازه‌گیری می‌کنیم و یکای آن، نیوتون است که با نماد  $N$  نشان داده می‌شود. اثر نیرو بر یک جسم به شکل‌های مختلف مانند شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می‌توان به‌طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به‌طور کلی در این فصل می‌خواهیم درباره نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند و قوانین حرکت بحث کنیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون درباره حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و یادآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده را گسترش می‌دهیم تا توانایی و درک شما در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید براساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.

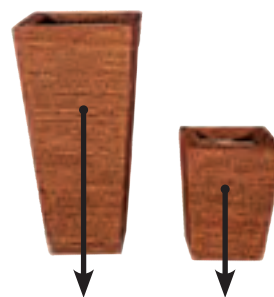
## ۱-۲ قوانین حرکت نیوتون

ایزاک نیوتون (۱۶۴۳-۱۷۲۷ م.) نخستین کسی بود که به رابطه میان نیرو و شتاب پی برد. این رابطه همراه با دیگر قانون‌های نیوتون، اساس مکانیک نیوتونی را تشکیل می‌دهند. در این بخش به بررسی سه قانون اصلی حرکت می‌پردازیم.

**قانون اول نیوتون:** در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به‌طور هم‌زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برابند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.



**شکل ۱-۲** هنگام وارد کردن نیرو به توپ، باید جهت و اندازه نیروی وارد بر توپ به گونه‌ای باشد که توپ به مکان مناسب و موردنظر بازیکنان برخورد کند.



**شکل ۲-۲** گاهی برای سادگی فرض می‌شود که همه جرم یک جسم در یک نقطه به نام مرکز جرم جسم متمرکز شده است و به‌جای آنکه نیرو به قسمت‌های مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می‌شود.

۱-  $F$  سرواژه انگلیسی Force به معنای نیرو است.

پوشش ۱-۲



در شکل روبه‌رو یک کشتی در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن‌اند. کدام نیروها اثر یکدیگر را خنثی کرده‌اند؟

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامه حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد، ولی گالیله با طراحی آزمایش‌هایی ذهنی نتیجه گرفت که در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک ادامه می‌یابد. نیوتون نظر گالیله را به صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد: «یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالص غیر صفری به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

پوشش ۲-۲

در فیلمی علمی - تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای تهی خارج از جو زمین و دور از هر سیاره و خورشید در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه حرکت کشتی فضایی کُند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

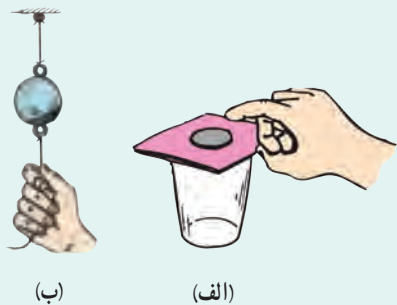
فعالیت ۱-۲

درباره آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جاده مستقیم حرکت می‌کند. اگر راننده ترمز کند و شما کمربند خود را نبسته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (متمایل شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، **لختی**<sup>۱</sup> گویند.

۱- Inertia

پرسش ۲-۳

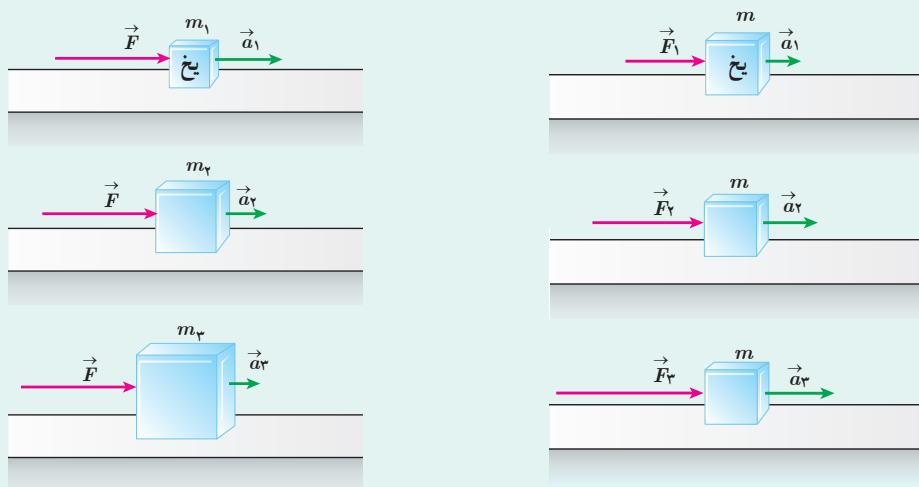


الف) چرا حرکت سریع مقوا در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟  
 ب) چرا در شکل ب، اگر به آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم نخ بالای گوی پاره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن پاره می‌شود؟

**قانون دوم نیوتون:** قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالص وارد بر آن صفر است. حال اگر نیروهای وارد بر جسم متوازن نباشند، یعنی نیروی خالصی بر جسم وارد شود، برای حرکت جسم چه اتفاقی می‌افتد؟ قانون دوم نیوتون به این پرسش پاسخ می‌دهد. همان‌طور که در علوم نهم دیدیم وقتی نیروی خالصی به جسمی وارد می‌شود، سرعت آن تغییر می‌کند و جسم تحت تأثیر آن نیرو، شتابی در جهت نیروی خالص پیدا می‌کند.

پرسش ۲-۴

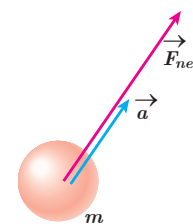
در شکل‌های زیر، قطعه یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. استنباط خود را از این شکل‌ها بیان کنید.



مشاهدات مختلف نشان می‌دهد هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگ‌تر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معین، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند:

هرگاه بر جسم نیروی خالصی وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد که این شتاب با نیروی خالص وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و در همان جهت نیروی خالص است و با جرم جسم



شکل ۳-۱۱ شتاب جسم ( $\vec{a}$ ) در جهت نیروی خالص وارد بر آن ( $\vec{F}_{net}$ ) است.

و یا

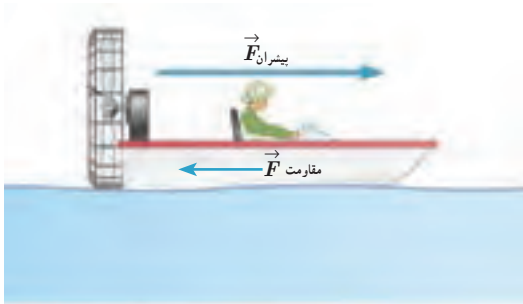
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

$$\vec{F}_{net} = m \vec{a} \quad (1-2) \quad \text{(قانون دوم نیوتون)}$$

یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی<sup>۱</sup> است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می دهد.

توجه: در رابطه ۱-۲،  $ma$  نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می شوند تا نیروی خالص ( $F_{net}$ ) وارد بر جسم به دست آید و آن را در سمت چپ معادله قرار می دهند. این نیروی خالص مساوی با حاصل ضرب جرم در شتاب ( $ma$ ) است.

### مثال ۱-۲



نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرنشیش  $400 \text{ kg}$  است، به گونه ای تنظیم می شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص  $800 \text{ N}$  به طرف جلو بر قایق وارد می کند. الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟ ب) اگر نیروی پیشران در یک لحظه  $1300 \text{ N}$  باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

پ) چقدر طول می کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به  $15 \text{ m/s}$  برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه جا می شود؟

پاسخ: الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب قایق استفاده می کنیم. قایق در یک مسیر مستقیم حرکت می کند،

می توان رابطه ۱-۲ را برای یک راستا به صورت  $a = \frac{F_{net}}{m}$  نوشت:

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 200 \text{ N/kg} = 200 \text{ m/s}^2$$

با توجه به اینکه جهت شتاب همواره در جهت نیروی خالص است، شتاب قایق به طرف جلو خواهد بود.

ب) نیروی پیشران و مقاومت در یک راستا هستند، بنابراین می توانیم بنویسیم:

$$F_{net} = F_{پیشران} - F_{مقاومت} \Rightarrow 800 \text{ N} = 1300 \text{ N} - F_{مقاومت}$$

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

پ) از رابطه سرعت - زمان و سرعت - جابه جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می کنیم.

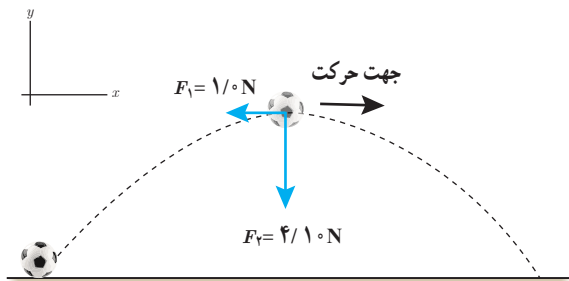
$$v = at + v_0 \Rightarrow 15 \text{ m/s} = (200 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7/5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(200 \text{ m/s}^2)} = 56/3 \text{ m}$$

به این ترتیب با داشتن نیروی خالص می توانیم کمیت های شتاب، سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه جایی را به دست آوریم.

۱-واژه  $net$  در زبان انگلیسی به معنای خالص است.

مثال ۲-۲



شکل روبه‌رو نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم  $420\text{ g}$  را در بالاترین نقطه مسیرش نشان می‌دهد که در آن نیروی مقاومت هوا  $\vec{F}_2$  و وزن توپ است. جهت و بزرگی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌شود.

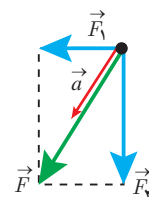
**پاسخ:** جهت شتاب در جهت نیروی خالص (برایند) است.

$$\vec{F}_2 = (-4/10\text{ N})\vec{j} \text{ و } \vec{F}_1 = (-1/10\text{ N})\vec{i}$$

$$\vec{F}_{net} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-1/10\text{ N})\vec{i} + (-4/10\text{ N})\vec{j}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} = \frac{(-1/10\text{ N})\vec{i} + (-4/10\text{ N})\vec{j}}{420 \times 10^{-3}\text{ kg}} = (-2/4\text{ N/kg})\vec{i} + (-9/8\text{ N/kg})\vec{j}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/4\text{ N/kg})^2 + (-9/8\text{ N/kg})^2} = 10\text{ N/kg} = 10\text{ m/s}^2$$



**قانون سوم نیوتون:** وقتی فتری را می‌کشید، فتر نیز شما را می‌کشد. در برخورد راکت با توپ تنیس، راکت به توپ نیرو وارد می‌کند و توپ نیز به راکت نیرو وارد می‌کند. اگر شما دیوار را هل دهید. دیوار نیز شما را هل می‌دهد. دو بار الکتریکی بدون آنکه با هم تماس داشته باشند به هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. همچنین دو قطب آهن‌ربا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲-۴). در این مثال‌ها نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است.

نیروها همواره به صورت جفت وجود دارند. اگر یکی از این نیروها را **کنش** بنامیم، نیروی دیگر **واکنش** نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطه کمی بین نیروهای کنش و واکنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

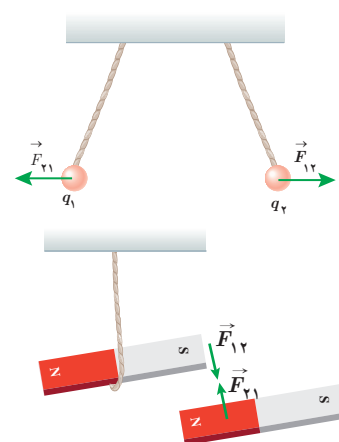
هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

بر اساس قانون سوم نیوتون، در تمام مثال‌های بالا، هر دو نیرو هم‌اندازه و هم‌راستا ولی در خلاف جهت یکدیگرند و می‌توانیم بنویسیم:

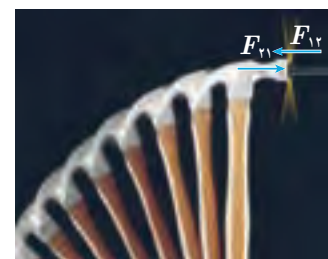
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} \quad (2-2) \quad \text{(قانون سوم نیوتون)}$$

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعه‌ای چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کند و متوقف می‌کند (شکل ۲-۵).

توجه کنید که نیروهای کنش و واکنش همواره به دو جسم وارد می‌شوند و هم‌نوع‌اند؛ مثلاً هر دو الکتریکی‌اند، یا هر دو مغناطیسی‌اند یا هر دو گرانشی‌اند و یا ...



شکل ۲-۴ نیروهای کنش و واکنش هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.



شکل ۲-۵ چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و میخ به چکش. این نیروها هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامه درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

مثال ۲-۳



دو شخص به جرم‌های  $۷۵/۰\text{kg}$  و  $۵۰/۰\text{kg}$  با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی  $۱۰۰/۰\text{N}$  شخص دوم را به طرف راست هل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟  
ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

**پاسخ:** از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند  $(\vec{F}_{12})$  با هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند  $(\vec{F}_{21})$ . با انتخاب جهت مثبت محور  $x$  به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{21} = F_{12} = ۱۰۰/۰\text{N}$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{(۱۰۰/۰\text{N}) \vec{i}}{۵۰/۰\text{kg}} = (۲/۰۰ \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \vec{i} = (۲/۰۰ \text{m/s}^2) \vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{-(۱۰۰/۰\text{N}) \vec{i}}{۷۵/۰\text{kg}} = -(۱/۳۳ \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \vec{i} = -(۱/۳۳ \text{m/s}^2) \vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

پرسش ۵-۲

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون  $(\vec{F}_{net} = m \vec{a})$  برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن: همان‌طور که در علوم هفتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

$$\text{شتاب} \times \text{جرم جسم} = \text{وزن جسم}$$

اگر جرم جسم را با  $m$ ، شتاب گرانشی را با  $g$  و وزن را با  $\vec{W}$  نشان دهیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی‌آید:

$$\vec{W} = m \vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (۳-۲)$$



شکل ۲-۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی  $(\vec{W})$  وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی  $(\vec{W}')$  وارد می‌کند.

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطه ۲-۳ به مقدار  $\vec{g}$  در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی  $60\text{ kg}$  باشد، در محلی که  $g = 9/8\text{ N/kg}$  است، وزن آن  $588\text{ N}$  و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع  $g = 9/76\text{ N/kg}$  است تقریباً  $586\text{ N}$  است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً  $9/8\text{ N/kg}$  است.

تمرین ۱-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم  $100\text{ گرم}$  را روی سطح زمین به دست آورید.  
 ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برابر با نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به دست آورید و با هم مقایسه کنید. ( $g_{\text{زمین}} = 9/8\text{ N/kg}$  ,  $g_{\text{ماه}} = 1/6\text{ N/kg}$  ,  $g_{\text{مریخ}} = 3/7\text{ N/kg}$ )

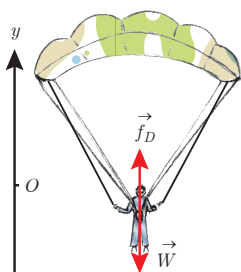
توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن ( $\vec{W}$ ) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چتر باز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید.

نیروی مقاومت شماره: وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه بر وزن جسم، نیروی دیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به طور کلی وقتی جسمی در یک شماره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شماره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شماره** می‌گویند و معمولاً آن را با  $\vec{f}_D$  نشان می‌دهند. نیروی مقاومت شماره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شماره بیشتر خواهد شد. همان طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، **نیروی مقاومت هوا** می‌گویند.

مثال ۴-۲

چتربازی به جرم  $60\text{ kg}$  مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به  $1140\text{ N}$  افزایش می‌یابد. شتاب چتر باز را در این لحظه به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی  $g$  را  $10\text{ N/kg}$  فرض کنید.

**پاسخ:** با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبه شتاب چتر باز در این حالت می‌توانیم بنویسیم:



$$f_D - W = ma \Rightarrow (1140\text{ N}) - (60\text{ kg})(10\frac{\text{N}}{\text{kg}}) = (60\text{ kg})a$$

$$\Rightarrow a = \frac{540\text{ N}}{60\text{ kg}} = 9\text{ m/s}^2$$

همان طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چتر باز در این حالت  $9\text{ m/s}^2$  و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به تدریج تندی چتر باز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز

۱- توجه کنید، نیروی مقاومت شماره با نیروی شناوری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

۲- D سرواژه Drag به معنای پسا (پس کشی) است.

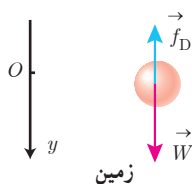


کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چتر باز متوازن شوند. پس از این چتر باز با تندی ثابتی موسوم به **تندی حدی**، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چتر باز نوعی حدود  $5 \text{ m/s}$  و برای قطرات باران حدود  $7 \text{ m/s}$  است.

### مثال ۲-۵

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ( $m_2 = 2m_1$ ) از بالای برجی به ارتفاع  $h$  به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟

**پاسخ:** بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر گوی برابر



با حاصل ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با  $f_D$  و وزن را با  $W$  نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور  $y$  را به طرف پایین انتخاب می‌کنیم:

$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با در نظر گرفتن مقاومت هوا، هر چه  $m$  بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است.

در نتیجه  $a_2 > a_1$  است.

طبق رابطه سرعت - جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:

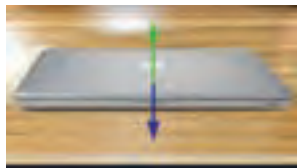
$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2ah \Rightarrow v = \sqrt{2ah} \Rightarrow v_2 > v_1$$

یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

### تمرین ۲-۲

اگر در مثال ۲-۵ از مقاومت هوا صرف نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

**نیروی عمودی سطح:** مطابق شکل ۲-۷، لپ‌تایی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لپ‌تاپ ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لپ‌تاپ وارد می‌شود، چه نیرویی سبب خنثی شدن آن و سکون جسم می‌شود؟



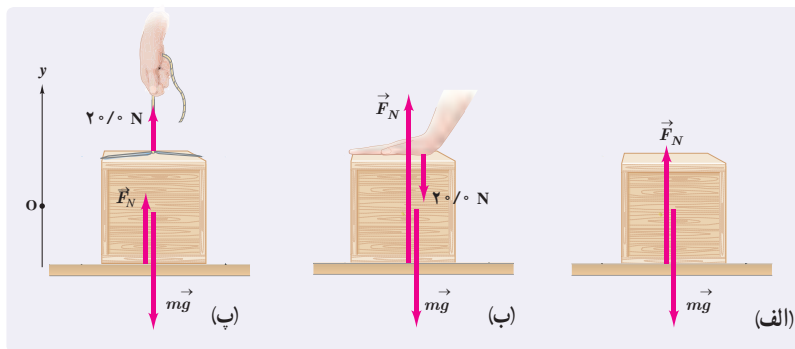
شکل ۲-۷ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لپ‌تاپ وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (تکیه‌گاه) می‌گویند و آن را با  $F_N$  نشان می‌دهند.

$$\vec{F}_{net} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

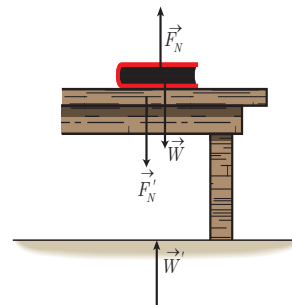
نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

تمرین ۲-۲



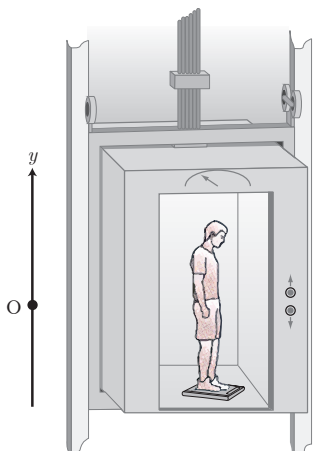
همانند شکل، جعبه‌ای به جرم  $4/0 \text{ kg}$  روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به دست آورید.

نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو  $F'_N$  به صورت عمودی و در خلاف جهت  $F_N$  از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲-۸). همچنین واکنش نیروی وزن ( $\vec{W}'$ ) نیرویی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت  $\vec{W}$  وارد می‌شود.



شکل ۲-۸ بر جسم نیروی عمودی سطح ( $F_N$ ) و وزن ( $\vec{W}$ ) وارد می‌شود.

مثال ۲-۶



شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد  $588 \text{ N}$  را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای  $2/0 \text{ m/s}^2$  دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین  $2/0 \text{ m/s}^2$  دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ( $g = 9/80 \text{ N/kg}$ )  
**پاسخ:** بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور  $y$  را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم:

$$F_N - W = ma = 0 \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروسنج نیروی وارد بر خودش یعنی  $F'_N$  که واکنش  $F_N$  است را نشان می‌دهد. پس نیروسنج اندازه  $F_N$  را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F'_N = 588 \text{ N} \Rightarrow F_N = F'_N = 588 \text{ N}, F_N = W = mg \Rightarrow 588 \text{ N} = m(9/80 \text{ N/kg}) \Rightarrow m = 60/0 \text{ kg}$$

ب)

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (60/0 \text{ kg})(9/80 \text{ N/kg}) + (60/0 \text{ kg})(2/0 \text{ N/kg})$$

$$F_N = 708 \text{ N}$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

(ب)

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N - mg = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = m(g+a)$$

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (60 \cdot \text{kg}) \left( 9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} - 2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 468 \text{ N}$$

یعنی در این حالت ترازو، عددی کوچک‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

(ت) وقتی کابل آسانسور پاره شود، آسانسور سقوط آزاد می‌کند و اندازه شتاب آن برابر  $g$  و شتاب رو به پایین است.

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = m(g-g) = 0$$

یعنی در سقوط آزاد، نیروی عمودی سطح صفر است. به عبارت دیگر ترازو عدد صفر را نشان می‌دهد.

## پوشش ۲-۶

در مثال ۲-۶، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنری نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

(الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

(ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

(پ) آسانسور در حالی که به طرف بالا حرکت می‌کند، متوقف شود.

(ت) آسانسور در حالی که به طرف پایین حرکت می‌کند، متوقف شود.

**نیروی اصطکاک:** وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم

حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن **نیروی اصطکاک** گویند.

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را هل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید،

در این حالت نیرویی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با

حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲-۹). این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک ایستایی** است

و آن را با  $f_s$  نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده

و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف

می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این

نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک جنبشی** است و آن را با  $f_k$  نشان می‌دهند.

نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و... بستگی دارد؛

مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زیره کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم

بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد

می‌شود (شکل ۲-۱۰). حتی سطوحی که بسیار هموار به نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی

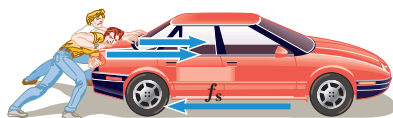
بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

نیروی اصطکاک عمدتاً به‌عنوان نیروی اتلافی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره

لازم است. نگه‌داشتن یک قلم در دست، نوشتن، راندن خودرو، قدم زدن و دویدن، ترمز کردن و...

بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن ناممکن است، زیرا کمترین جابه‌جایی

سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.



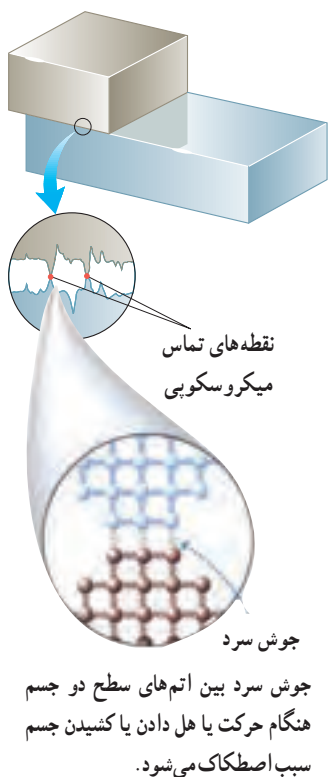
شکل ۲-۹ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به وجود آمده است.



نقطه‌های تماس

شکل ۲-۱۰

الف) بر اساس قانون سوم نیوتون و آنچه از اصطکاک آموختید، توضیح دهید راه رفتن با شروع از حالت سکون چگونه انجام می‌شود؟  
 ب) چرا راه رفتن روی یک سطح سُر مانند سطح یخ به‌سختی ممکن است؟



دیدگاه میکروسکوپی: در واقع، نیروی اصطکاک و نیروی عمودی سطح، جمع برداری نیروهای بی‌شماری است که طبیعت الکتریکی دارند و بین اتم‌های سطح یک جسم و اتم‌های سطح جسم دیگر عمل می‌کنند. اگر دو سطح فلزی کاملاً صیقل داده شده و تمیز روی هم گذاشته شوند، نمی‌توان به راحتی آنها را روی هم لغزاند. چون سطح آنها بسیار صاف است، بسیاری از اتم‌های یک سطح در تماس با بسیاری از اتم‌های سطح دیگراند و مطابق شکل انگار دو سطح با هم جوش خورده‌اند که اصطلاحاً به آن جوش سرد گویند. وقتی دو سطح معمولی روی هم قرار داده شوند، برخی نقاط با هم تماس پیدا می‌کنند. سطح میکروسکوپی تماس بسیار کوچک‌تر از سطح ماکروسکوپی ظاهری تماس است (حدود  $10^4$  بار کوچک‌تر). با وجود این بسیاری از نقاط تماس با یکدیگر جوش می‌خورند. این جوش‌ها وقتی یک نیرو بخواهد دو سطح را روی هم بلغزاند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کشیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظه شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.

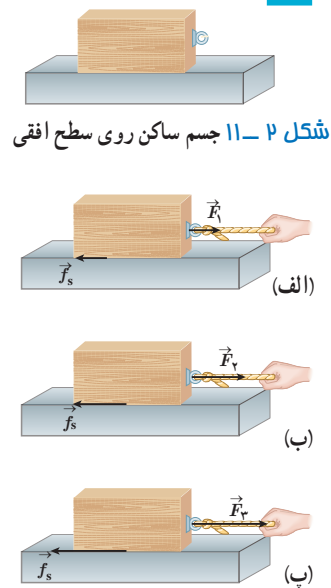
تجزیه و تحلیل

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم:

الف) اصطکاک ایستایی: جسمی مطابق شکل ۲-۱۱ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن ( $\vec{W}$ ) و نیروی عمودی سطح ( $\vec{F}_N$ ) در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی  $\vec{F}_1$  را به جسم وارد می‌کنیم به طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۲-۱۲ الف)، چون جسم ساکن است بنا به قانون دوم نیوتون باید نیروی خالص وارد بر آن صفر باشد. بنابراین در راستای افقی داریم:

$$F_1 - f_s = ma = 0 \Rightarrow f_s = F_1$$

اکنون فرض کنید اندازه نیروی  $\vec{F}_1$  را افزایش داده و به اندازه  $\vec{F}_2$  رسانده‌ایم (شکل ۲-۱۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازه  $\vec{F}_2$  شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به حالتی می‌رسیم که اگر اندازه آن برابر  $\vec{F}_3$  شود، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۲-۱۲ پ). به نیروی اصطکاک در این حالت **نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه** می‌گوییم. بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه را با  $f_{s,max}$  نشان می‌دهیم ( $f_{s,max} = F_3$ ). آزمایش نشان می‌دهد که بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی با اندازه نیروی عمودی سطح ( $F_N$ ) متناسب است.



شکل ۲-۱۲ با افزایش نیروی  $\vec{F}$ ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه معین می‌رسد.

$$f_{s,max} = \mu_s F_N \quad (\text{نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه}) \quad (۴-۲)$$

در این رابطه  $\mu_s$  ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. تجربه و آزمایش نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و... بستگی دارد.

توجه کنید که رابطه ۴-۲ اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانه حرکت می‌دهد. در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچک‌تر و یا مساوی  $f_{s,max}$  است:

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (۵-۲)$$

### تمرین ۲-۴

اگر در شکل ۲-۱۲، جرم جسم  $۴/۰ \text{ kg}$  و بزرگی نیروها  $F_۱ = ۴/۰ \text{ N}$ ،  $F_۲ = ۸/۰ \text{ N}$  و  $F_۳ = ۱۶/۰ \text{ N}$  باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟ ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

### آزمایش ۲-۱: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم



**وسایل لازم:** نیروسنج، قطعه چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط‌کش

#### شرح آزمایش:

۱- مکعب چوبی را از طرف وجه بزرگ آن، روی سطح افقی میز قرار دهید.

۲- نیروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳- نیروی دستتان را به آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانه لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (برای اینکه دقت شما افزایش یابد لازم است آزمایش را چند بار تکرار کنید).

۴- اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید.

۵- با اندازه‌گیری جرم مکعب چوبی و استفاده از رابطه ۴-۲ مقدار  $\mu_s$  را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

وزن قطعه:		مساحت سطح تماس قطعه با میز	شماره آزمایش
$\mu_s$	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ( $f_{s,max}$ )		

همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های به‌دست آمده را تفسیر کنید.

فعالیت ۲-۲

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد  $f_{s,max}$  متناسب با  $F_N$  است.



شکل ۲-۱۳ بر چوب‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی: وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازه نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازه نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \quad (۲-۶) \quad (\text{نیروی اصطکاک جنبشی})$$

در این رابطه  $\mu_k$  ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی  $\mu_k < \mu_s$ . جدول ۲-۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱ برخی از ضریب‌های اصطکاک ایستایی و جنبشی

جنس دو سطح تماس	$\mu_k$	$\mu_s$
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتون تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتون خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

فعالیت ۳-۲

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید:

- الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه بگیرید و با استفاده از آن  $\mu_k$  را به دست آورید.
- ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲-۷



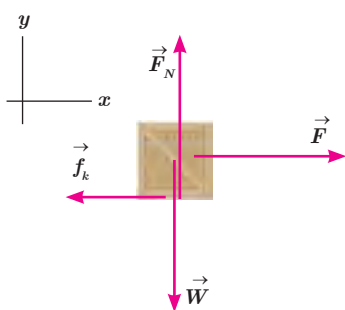
شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبه ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی  $309\text{ N}$  روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه  $0/400$  باشد،

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ ( $g = 9/80\text{ N/kg}$ )

پاسخ: الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برابری نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (75/0\text{ kg})(9/80\text{ N/kg}) = 735\text{ N}$$



با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم :

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.400 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

(ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل ضرب جرم در شتاب است.

$$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{309 \text{ N} - 294 \text{ N}}{75 \text{ kg}} = 0.2 \text{ m/s}^2$$

### تمرین ۲-۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین  $0.600$  و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



شکل ۲-۱۴ فنرهای به کار رفته در چرخ‌های خودرو

نیروی کشسانی فنر : همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲-۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۵ الف، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازه  $x$  بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲-۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدوده معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

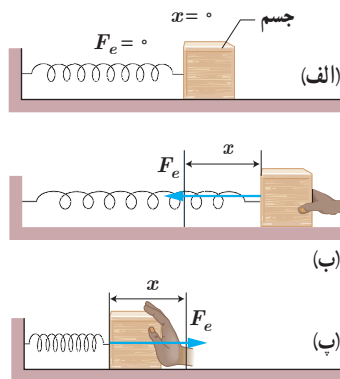
برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، نیروی کشسانی فنر با اندازه تغییر طول آن ( $x$ ) رابطه مستقیم دارد :

$$F_e = kx \quad (\text{نیروی کشسانی فنر}) \quad (2-7)$$

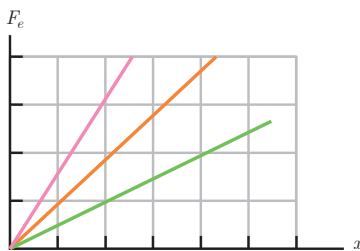
ضریب  $k$  در رابطه ۲-۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)،  $x$  بر حسب متر (m) و  $k$  بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۲-۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۷۰۳-۱۶۳۵ م.) که این رابطه را کشف کرد، **قانون هوک** می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر،  $k$  عددی کوچک (حدود  $100 \text{ N/m}$ ) و برای یک فنر سفت  $k$  عددی بزرگ (حدود  $10000 \text{ N/m}$ ) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با  $k$ های متفاوت در شکل ۲-۱۶ رسم شده است.

### فعالیت ۲-۴

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. الف) سختی آنها را مقایسه کنید. ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را به دست آورید.



شکل ۲-۱۵ الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطه تعادل است، ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند، و پ) فنر فشرده شده است، و نیروی کشسانی رو به نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند.



شکل ۲-۱۶ هر چه ثابت فنر بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

۱- زیرنویس  $e$  در نماد نیروی کشسانی فنر ( $F_e$ ) سرواژه elastic به معنی کشسان است.

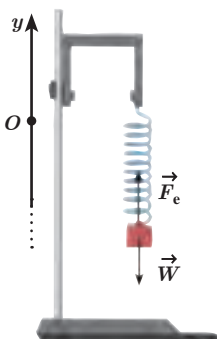
مثال ۸-۲

فتری به طول  $L_0 = 10 \text{ cm}$  را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه  $200 \text{ گرمی}$  وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به  $L = 12 \text{ cm}$  می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای  $300 \text{ گرمی}$  را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟

پاسخ: الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.



$$F_e - W = ma \Rightarrow F_e - W = 0 \text{ و } F_e = kx \Rightarrow kx = mg$$

$$k(12 \times 10^{-2} \text{ m} - 10 \times 10^{-2} \text{ m}) = (200 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k = 98 \text{ N/m}$$

ب)

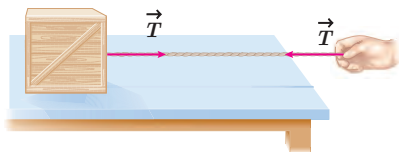
$$kx = mg \Rightarrow (98 \text{ N/m})x = (300 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$x = 0.03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3 \text{ cm} = L - 10 \text{ cm} \Rightarrow L = 13 \text{ cm}$$

**نیروی کشش طناب:** وقتی طناب (کابل، ریمان و...) متصل به جسمی را مانند شکل ۱۷-۲ می‌کشیم، طناب جسم را با نیرویی می‌کشد که جهت آن از جسم به سمت بیرون و در راستای طناب است. چون در این حالت طناب تحت کشش قرار دارد، به این نیرو، **نیروی کشش طناب** گفته می‌شود و آن را با  $\vec{T}$  نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی  $\vec{T}$  می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی  $\vec{T}$  وارد بر جسم است. مثلاً اگر بزرگی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب  $60 \text{ N}$  باشد، کشش طناب نیز  $60 \text{ N}$  است ( $T = 60 \text{ N}$ ). در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به‌عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جعبه) را با بزرگی نیروی یکسان  $T$  می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.

شکل ۱۷-۲ طناب جسم را با نیروی کشش  $\vec{T}$  می‌کشد.



**توجه:** در حل مسئله‌های دینامیک به کمک

قانون‌های نیوتون، معمولاً گام‌های مشخصی طی می‌شود. این گام‌ها که در حل مسائل می‌توان استفاده کرد، عبارت‌اند از:

۱- با مشخص کردن جسم مورد نظر، شکل ساده‌ای از آن را رسم و دستگاه محورهای مختصات را مشخص می‌کنیم.

۲- نیروهای وارد بر جسم از طرف اجسام دیگر را مشخص و رسم می‌کنیم (در این کتاب، این نیروها فقط در راستاهای افقی و قائم هستند و در جایی نیاز به تجزیه نیروها پیدا نمی‌کنیم).

۳- در صورت لزوم نیروهایی مانند وزن، اصطکاک، کشسانی فنر، کشش نخ و...

را محاسبه می‌کنیم.

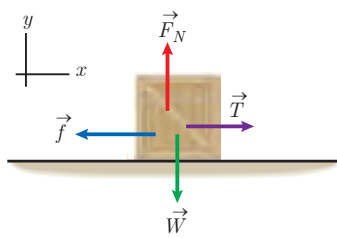
۴- قانون دوم نیوتون را بنا به نیاز در راستای قائم و افقی به کار می‌بریم. در این کتاب فقط به بررسی مسئله‌های تک‌جسمی می‌پردازیم.

مثال ۹-۲

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبه ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی  $310 \text{ N}$  می‌کشد. اگر جرم جعبه  $10 \text{ kg}$  و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به ترتیب  $0.30$  و  $0.25$  باشد، الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟







ب) اگر جعبه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.

پ) سرعت جعبه را  $6/0 \text{ s}$  پس از حرکت به دست آورید. ( $g = 9/80 \text{ m/s}^2$ )

**پاسخ:** الف) شکل ساده‌ای از جسم مورد نظر (جعبه) رسم و نیروهای وارد بر آن را مشخص می‌کنیم. چون جعبه در راستای قائم حرکت ندارد، می‌توانیم بنویسیم:

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W \Rightarrow F_N = mg = (10 \cdot \text{kg})(9/80 \text{ N/kg}) = 980 \text{ N}$$

برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید  $T > f_{s,\text{max}}$  باشد. پس ابتدا  $f_{s,\text{max}}$  را از معادله ۲-۴ به دست می‌آوریم:

$$f_{s,\text{max}} = \mu_s F_N = (0/300)(980 \text{ N}) = 294 \text{ N}$$

با توجه به اینکه  $T = 310 \text{ N} > 294 \text{ N}$  است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر جعبه اثر می‌کند و برابر است با:

$$f_k = \mu_k F_N = (0/250)(980 \text{ N}) = 245 \text{ N}$$

$$T - f_k = ma \Rightarrow 310 \text{ N} - 245 \text{ N} = (10 \cdot \text{kg})a \Rightarrow a = 0/65 \text{ m/s}^2$$

پ) چون شتاب جعبه ثابت است، از رابطه سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (0/65 \text{ m/s}^2)(6/0 \text{ s}) + (0/0 \text{ m/s}) \Rightarrow v = 3/9 \text{ m/s}$$

علامت مثبت نشان می‌دهد که سرعت نیز در جهت محور  $x$  است.

## تمرین ۲-۶



کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم  $16/0 \text{ kg}$  را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر شتاب رو به بالای سطل  $1/2 \text{ m/s}^2$  باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟

## مثال ۲-۱۰



در شکل روبه‌رو نردبانی به جرم  $20/0 \text{ kg}$  به دیوار قائم بدون اصطکاک تکیه داده شده است. ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای نردبان  $0/46$  است. در آستانه سُرخوردن نردبان،

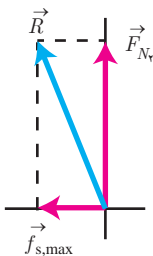
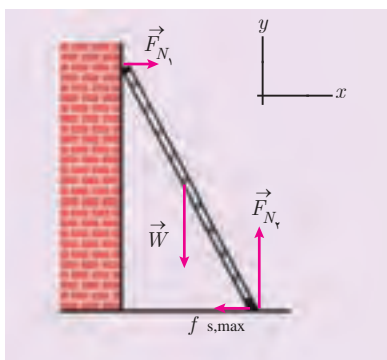
الف) زمین به نردبان چه نیرویی وارد می‌کند؟

ب) چه نیرویی از دیوار به نردبان وارد می‌شود؟

**پاسخ:** الف) نخست نیروهای وارد بر نردبان را رسم می‌کنیم که عبارت‌اند از:

نیروی عمودی سطح دیوار ( $F_{N_1}$ )، نیروی وزن ( $\vec{W}$ )، نیروی عمودی سطح زمین ( $F_{N_2}$ )

و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و نردبان ( $f_{s,\text{max}}$ ).



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم.

در آستانه حرکت، نردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{N_y} - W = 0 \Rightarrow F_{N_y} = W = mg = (20 / 0.01 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$$

$$f_{s,\max} = \mu_s F_{N_y} = (0.46) \times (196 \text{ N}) = 90.2 \text{ N}$$

از طرف زمین بر نردبان دو نیروی عمودی  $F_{N_y}$  و افقی  $f_{s,\max}$  وارد می‌شود. بنابراین برآیند این دو نیرو که آن را با  $\vec{R}$  نشان می‌دهیم، نیرویی است که سطح زمین بر نردبان وارد می‌کند:

$$\vec{R} = \vec{F}_{N_y} + \vec{f}_{s,\max}$$

که بزرگی آن برابر است با

$$R = \sqrt{F_{N_y}^2 + f_{s,\max}^2} = \sqrt{(196 \text{ N})^2 + (90.2 \text{ N})^2} = 216 \text{ N}$$

(ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر نردبان صفر است؛ پس:

$$F_{N_x} - f_{s,\max} = 0 \Rightarrow F_{N_x} = f_{s,\max} = 90.2 \text{ N}$$

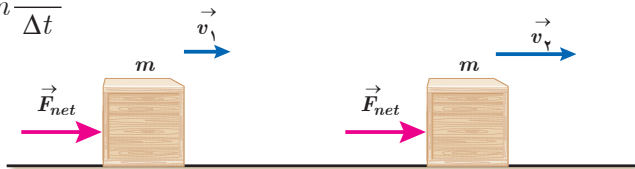
در نبود نیروی اصطکاک بین نردبان و دیوار، نیروی  $F_{N_x}$  همان نیروی وارد از دیوار به نردبان است.

## ۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون‌های نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهند. قانون دوم نیوتون را می‌توان به صورت دیگری نیز نوشت که در بسیاری از موارد مناسب‌تر است و برخی از پدیده‌های فیزیکی را به کمک آن می‌توان ساده‌تر توجیه و بررسی کرد.

فرض کنید سرعت جسمی به جرم  $m$  تحت تأثیر نیروی خالص ثابت  $\vec{F}_{net}$  در بازه زمانی  $\Delta t$  از  $\vec{v}_1$  به  $\vec{v}_2$  برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به صورت زیر درمی‌آید:

$$\vec{F}_{net} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



شکل ۲-۱۸ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت  $\vec{F}_{net}$  از  $\vec{v}_1$  به  $\vec{v}_2$  می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم ( $m$ ) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت ( $v$ ) قرار دهیم.

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$$

حاصل ضرب جرم جسم ( $m$ ) در سرعت آن ( $v$ )، تکانه جسم نامیده می‌شود و آن را با  $\vec{p}$  نشان

می‌دهیم.

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (\text{تکانه جسم}) \quad (۸-۲)$$

تکانه کمیته برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. یکای SI تکانه kg.m/s است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت:

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (\text{قانون دوم نیوتون برحسب تکانه برای نیروی ثابت}) \quad (۹-۲)$$

یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانه جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برابر با حاصل ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{net} \Delta t \quad (۱۰-۲)$$

### تمرین ۲-۲

نشان دهید بین اندازه تکانه ( $p$ ) و انرژی جنبشی ( $K$ ) جسمی به جرم  $m$ ، رابطه  $K = \frac{p^2}{2m}$  برقرار است.

### مثال ۲-۱۱

گلوله‌ای به جرم  $100\text{g}$  با سرعت  $\vec{v} = (50\text{m/s})\vec{i}$  در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به دست آورید.

**پاسخ:** الف) با استفاده از معادله ۸-۲، تکانه جسم را به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \vec{p} &= m\vec{v} = (0.1\text{kg})(50\text{m/s})\vec{i} \\ &= (5\text{kg}\cdot\text{m/s})\vec{i} \Rightarrow p = 5\text{kg}\cdot\text{m/s} \end{aligned}$$

ب) برای به دست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطه  $K = \frac{p^2}{2m}$  یا  $K = \frac{1}{2}mv^2$  استفاده کنیم. در اینجا از رابطه اول استفاده می‌کنیم:

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(5\text{kg}\cdot\text{m/s})^2}{2 \times 0.1\text{kg}} = 125\text{J}$$

در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشد و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازه‌های زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به کار برد و بنابراین رابطه (۹-۲) چنین می‌شود:

$$\vec{F}_{av} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (\text{نیروی خالص متوسط برحسب تکانه}) \quad (۱۱-۲)$$

این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجیه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.





شکل ۲-۲۰ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

می‌شود چیست (شکل ۲-۲۰)؟ زمین به همراه هفت سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی شناخت روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خالصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیرویی است که اجسام نزدیک به سطح زمین - مانند سیب - را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگر را به خود جذب می‌کند و این الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد:

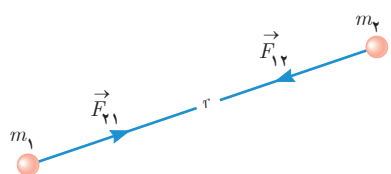
نیروی گرانشی میان دو ذره<sup>۱</sup> با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲-۲۱، جرم دو ذره  $m_1$  و  $m_2$  و فاصلهٔ آنها از یکدیگر  $r$  باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی  $F$  از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2-12) \quad (\text{نیروی گرانشی بین دو ذره})$$

در این رابطه،  $G$  ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$



شکل ۲-۲۱ نیروی گرانشی بین دو ذره جاذبه است و در امتداد خط واصل دو ذره وارد می‌شود. طبق قانون سوم نیوتون این دو یک جفت نیروی کنش - واکنش را تشکیل می‌دهند که:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

## فعالیت ۲-۵

ثابت گرانشی  $G$  را اولین بار هنری کاوندیش<sup>۲</sup> در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری  $G$  توسط هنری کاوندیش تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

## مثال ۲-۱۳

جرم زمین و ماه به ترتیب حدود  $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$  و  $7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$  و فاصلهٔ متوسط آنها از یکدیگر حدود  $3.84 \times 10^8 \text{ m}$  است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.

**پاسخ:** فاصلهٔ دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطهٔ ۲-۱۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_e M_m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^{20} \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

۱- اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصلهٔ آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به صورت ذره در نظر گرفت.

۲- Henry Cavendish

مثال ۲-۱۴

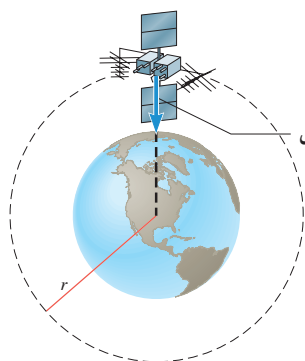
دو کرهٔ همگن به جرم‌های  $800 \text{ kg}$  و  $1200 \text{ kg}$  را در نظر بگیرید که فاصلهٔ مرکز آنها از یکدیگر  $100 \text{ m}$  است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

**پاسخ:** برای محاسبهٔ نیرویی که دو کرهٔ همگن به هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همهٔ جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد، بنابراین کره‌ها را به صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطهٔ ۲-۱۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6/67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(800 \text{ kg})(1200 \text{ kg})}{(100 \text{ m})^2} = 6/40 \times 10^{-7} \text{ N}$$

همان‌طور که محاسبهٔ این مثال نشان می‌دهد، نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲-۱۵



ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره  $200 \text{ kg}$  و فاصلهٔ آن از سطح زمین  $2600 \text{ km}$  باشد:

الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین چقدر است؟

ب) نمودار نیروی گرانشی وارد بر ماهواره را بر حسب فاصلهٔ آن از مرکز زمین رسم کنید.

( $R_e = 6400 \text{ km}$ ,  $M_e = 5/98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ,  $G = 6/67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ )

**پاسخ:** ماهواره را به صورت ذره و زمین را به صورت کره‌ای همگن که جرم آن در مرکزش قرار دارد در نظر می‌گیریم و به کمک رابطهٔ ۲-۱۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم.

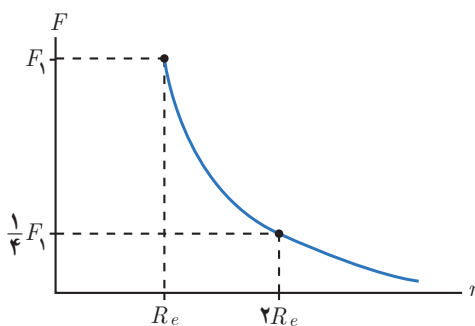
الف)

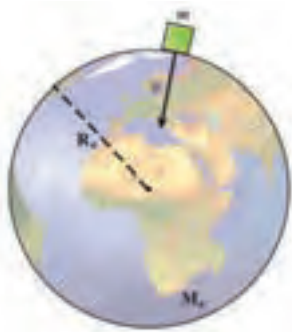
$$r = R_e + h = 6400 \text{ km} + 2600 \text{ km} = 9000 \text{ km} = 9/000 \times 10^6 \text{ m}$$

$$F = G \frac{M_e m}{r^2} = (6/67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5/98 \times 10^{24} \text{ kg})(200 \text{ kg})}{(9/000 \times 10^6 \text{ m})^2} = 985 \text{ N}$$

ب) بیشترین نیروی گرانشی بر ماهواره در سطح زمین به آن وارد می‌شود. هر چه فاصلهٔ ماهواره بیشتر شود، نیروی گرانشی با

وارون مربع فاصله کاهش می‌یابد. بنابراین نمودار آن به شکل زیر خواهد بود.





شکل ۲-۲۲ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

وزن و نیروی گرانشی: در بخش ۲-۲، در مورد وزن یک جسم مطالبی را آموختیم. در آنجا گفتیم وزن یک جسم روی زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند (شکل ۲-۲۲). اگر جرم جسم را با  $m$ ، جرم زمین را با  $M_e$  و شعاع زمین را با  $R_e$  نمایش دهیم، وزن جسم در سطح زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad \text{(وزن جسم در سطح زمین)} \quad (۱۳-۲)$$

### تمرین ۸-۲

نشان دهید که شتاب گرانشی در سطح زمین از رابطه  $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$  به دست می‌آید.

### مثال ۱۶-۲

ماهواره‌ای مخابراتی در ارتفاع  $۳۵۶۰۰$  کیلومتری سطح زمین به دور زمین می‌چرخد. شتاب گرانشی در این ارتفاع چقدر است؟ ( $M_e = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}$  و  $R_e = ۶۴۰۰ \text{ km}$ )

**پاسخ:** شتاب گرانشی در فاصله  $r$  از مرکز زمین از رابطه  $g = G \frac{M_e}{r^2}$  محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن  $r = R_e + h$  می‌توانیم بنویسیم:

$$g = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2) \frac{۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}}{(۶۴۰۰ \times ۱۰^۳ \text{ m} + ۳۵۶۰۰ \times ۱۰^۳ \text{ m})^2} = ۰/۲۲۶ \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار  $g$  در این فاصله بسیار ناچیز است.

### تمرین ۹-۲

تلسکوپ فضایی هابل در ارتفاع تقریبی  $۶۰۰$  کیلومتری از سطح زمین به دور زمین می‌چرخد.

(الف) شتاب گرانشی در این فاصله چقدر است؟

(ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟



الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟  
پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی  $20^\circ\text{N}$  جسم را هل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم  $20^\circ$  باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟



۱) در شکل روبه‌رو وقتی وزنه  $4^\circ\text{kg}$  را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر  $14^\circ\text{cm}$  می‌شود، و وقتی وزنه  $5^\circ\text{kg}$  را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر  $15^\circ\text{cm}$  می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۲) در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟  
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.

ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.  
پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.

ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.  
ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ج) تویی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۳) راننده خودرویی که با سرعت  $72^\circ\text{km/h}$  در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت  $20^\circ\text{m}$  متوقف می‌شود.

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

ب) از لحظه ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟

پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟

جرم خودرو را  $1200^\circ\text{kg}$  بگیرید.

## ۱-۲ و ۲-۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.

الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. وقتی در خودروی ساکنی نشسته‌اید و خودرو ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید. همچنین اگر در خودروی در حال حرکتی نشسته باشید، در توقف ناگهانی به جلو پرتاب می‌شوید.



الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسه هوا در کم شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۳. دانش‌آموزی به جرم  $50^\circ\text{kg}$  روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ( $g=9.8^\circ\text{N/kg}$ )

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.

پ) آسانسور با شتاب  $1/2^\circ\text{m/s}^2$  به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.

ت) آسانسور با شتاب  $1/2^\circ\text{m/s}^2$  به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۴. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی  $20^\circ\text{N}$  جسم

$90^\circ$  کیلوگرمی را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی

وقتی با نیروی  $30^\circ\text{N}$  جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه

حرکت قرار می‌گیرد.



ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟

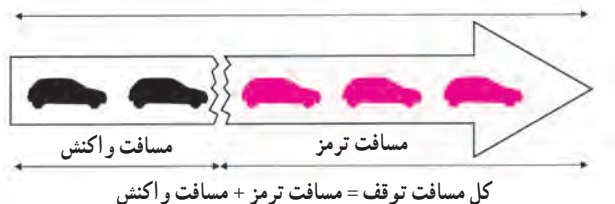
۱۱. وزنه‌ای به جرم  $2 \text{ kg}$  را به انتهای فنری به طول  $12 \text{ cm}$  که ثابت آن  $20 \text{ N/cm}$  است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.

الف) آسانسور ساکن است.  
ب) آسانسور با سرعت ثابت  $2 \text{ m/s}$  رو به پایین در حرکت است.

پ) آسانسور با شتاب ثابت  $2 \text{ m/s}^2$  از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

ت) آسانسور با شتاب ثابت  $2 \text{ m/s}^2$  از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد؛ مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

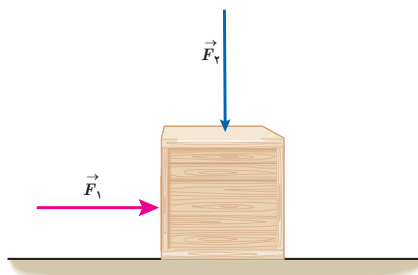
ب) زمان واکنش راننده‌ای  $0.6 \text{ s}$  است. در طی این زمان، خودرو مسافت  $18 \text{ m}$  را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از  $5 \text{ s}$  متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را  $1500 \text{ kg}$  فرض کنید.

۸. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظه پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۹. در شکل زیر، نیروی  $F_1$  به بزرگی  $20 \text{ N}$  بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم  $F_2$  که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه

ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه

پ) اندازه بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی

ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۱۰. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن  $5 \text{ kg}$  است، شتاب  $2 \text{ m/s}^2$  بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.

ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک  $0.2$  به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.

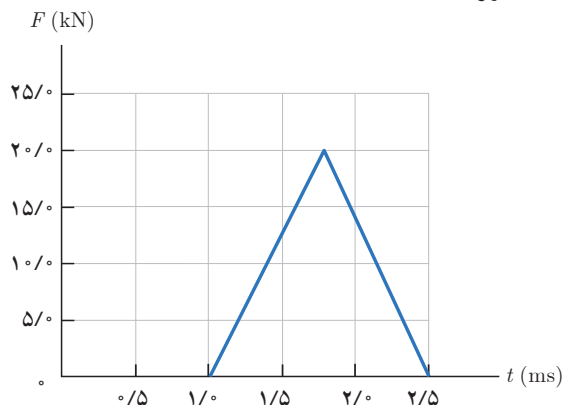
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.

ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۱. قطعه چوبی را با سرعت افقی  $10 \text{ m/s}$  روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح  $0.2$  است.

الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟

۱۷. شکل زیر، منحنی نیروی خالص بر حسب زمان را برای توپ بیسبالی که با چوب بیسبال به آن ضربه زده شده است، نشان می‌دهد. تغییر تکانه توپ و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را به دست آورید.



### ۲-۲ نیروی گرانشی

۱۸. دو جسم در فاصله  $2.0 \text{ m}$  از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک  $1.0 \times 10^{-8} \text{ N}$  جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام  $5.0 \text{ kg}$  باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۱۹. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟

ب) اگر جرم ماهواره‌ای  $250 \text{ kg}$  باشد، وزن آن در ارتفاع  $36000$  کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

$$(M_e = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg} \text{ و } R_e = 6400 \text{ km})$$

۲۰. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟

ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟

$$M_{\text{خورشید}} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg} \text{ و } M_{\text{ماه}} = 7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$$

$$\text{فاصله زمین تا خورشید} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$$

$$\text{فاصله زمین تا ماه} = 3.84 \times 10^5 \text{ km}$$

۲۱. الف) سفینه‌ای به جرم  $3.0 \times 10^4 \text{ kg}$  در وسط فاصله بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).

ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

۱۴. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم  $1500 \text{ kg}$  را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری  $220 \text{ N}$  و  $380 \text{ N}$  است.



الف) اگر سرعت خودرو ثابت باشد نیروی کشش طناب  $T$  چقدر است؟

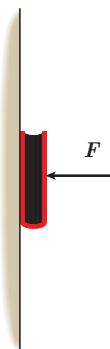
ب) اگر خودرو با شتاب ثابت  $2.0 \text{ m/s}^2$  به طرف راست کشیده شود، نیروی کشش طناب چقدر است؟

۱۵. کتابی را مانند شکل با نیروی عمودی  $F$  به دیوار قائمی فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

ب) اگر جرم کتاب  $2/5 \text{ kg}$  باشد، اندازه نیروی اصطکاک را به دست آورید.

پ) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم، آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیروهایی افزایش می‌یابد؟



### ۲-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

۱۷. تویی به جرم  $280 \text{ g}$  با تندی  $15.0 \text{ m/s}$  به‌طور افقی به بازیکنی نزدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی  $22.0 \text{ m/s}$  در جهت مخالف برگردد.

الف) اندازه تغییر تکانه توپ را محاسبه کنید.

ب) اگر مشت بازیکن  $0.060 \text{ s}$  با توپ در تماس باشد، اندازه نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.