

## فصل دوم

## مکانیک

چرا برخی ماشین‌های مسابقه در پایان مسیر حرکت چتر عقب خود را باز می‌کنند؟



نیروی اصطکاک



نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه



حرکت یکنواخت و حرکت شتاب‌دار

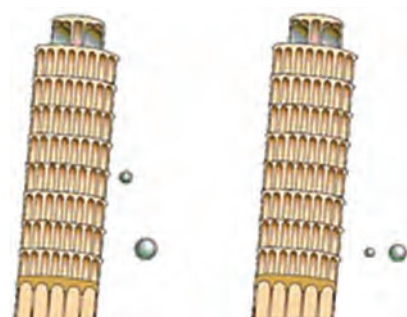


نیرو، شتاب و قوانین حرکت



حرکت، جابه‌جایی و سرعت

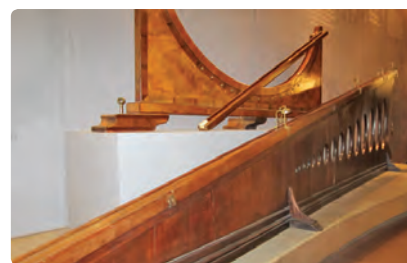
مکانیک یکی از قدیمی‌ترین و آشناترین شاخه‌های علم فیزیک است. این شاخه با اجسام در حال سکون یا در حال حرکت و همچنین شرایط سکون و حرکت آنها تحت تأثیر نیروها سروکار دارد. قوانین مکانیک به بررسی حرکت در تمام گستره جهان هستی، از الکترون‌ها در اتم گرفته تا سیارات در فضا و حتی کهکشان‌های دوردست می‌پردازد. مکانیک توضیح می‌دهد که چرا اجسام حرکت می‌کنند و یا اینکه جسم در وضعیت معینی چگونه حرکت خواهد کرد و این حرکت را چگونه می‌توان توصیف کرد. علم مکانیک را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: **سینماتیک و دینامیک**. سینماتیک به توصیف حرکت اجسام و مسیر آنها، بدون توجه به نیروهایی که این حرکت را ایجاد کرده‌اند می‌پردازد و با مفاهیم مکان، سرعت، شتاب، زمان و روابط بین آنها سروکار دارد. دینامیک به نیروهایی که موجب تغییر حرکت یا تغییر خواص دیگر از قبیل شکل و اندازه اجسام می‌شوند، می‌پردازد. این بخش از مکانیک ما را به مفاهیم نیرو و جرم و قوانین حاکم بر حرکت اجسام هدایت می‌کند. در زمان ارسطو فرایند فکری مربوط به مکانیک گسترش سریعی پیدا کرد. اما از قرن هفدهم به بعد بود که مکانیک توسط گالیله<sup>۱</sup>، هویگنس<sup>۲</sup> و نیوتن<sup>۳</sup> به درستی پایه‌گذاری شد. ارسطو معتقد بود که برخی حرکت‌ها در طبیعت اجسام وجود دارد، دود به خاطر سبکی بالا می‌رود و تخته سنگ‌های بزرگ به خاطر سنگینی سقوط می‌کنند، همچنین حرکت ستارگان در آسمان شب به طور طبیعی رخ می‌دهد. در مقابل حرکت طبیعی، برخی دیگر از حرکت‌ها اجباری است و به وسیله هل دادن و کشیدن اجسام رخ خواهد داد، یعنی اجسامی که حرکت غیر طبیعی دارند حتماً کشیده یا هل داده شده‌اند، ارسطو بر این باور بود که قوانین طبیعت را تنها می‌توان از طریق **استدلال منطقی** کشف کرد. ادعاهای ارسطو برای نزدیک به ۲۰۰۰ سال ادامه داشت، ادعای اول او این بود که اجسام سنگین همواره سریع‌تر از اجسام سبک حرکت می‌کنند و ادعای دوم برای اینکه حرکت جسم ادامه پیدا کند، باید نیروی خارج از جسم مداوم بر آن اثر کند. این ادعاهای ارسطو در قرن هفدهم میلادی توسط گالیله رد شدند، گالیله بر این باور بود که **آزمایش‌های تجربی** برای کشف قوانین طبیعت بر باورهای ذهنی و استدلال‌های منطقی برتری دارند. او به بالای برج مشهور و کج پیزا رفت و دو جسم با جرم‌های مختلف را رها کرد و نشان داد در غیاب مقاومت هوا آن دو با هم سقوط خواهند کرد (شکل ۱-۲). گالیله توانست ایده‌های انقلابی خود را به وسیله آزمایش‌های گوناگونی که با حرکت توپ روی سطح شیب‌دار با زاویه‌های مختلف انجام می‌داد به اثبات برساند، او از این آزمایش‌ها **چنین نتیجه گرفت که برای حرکت مداوم یک جسم لزومی به وارد کردن دایمی نیرو بر آن نیست**. در یک بیان ساده می‌توان نیرو را هل دادن یا کشیدن در نظر گرفت. گالیله نشان داد اگرچه برای شروع حرکت نیاز به وارد کردن نیرو وجود دارد ولی در غیاب اصطکاک، برای ادامه حرکت جسم نیازی به وارد کردن نیرو نیست (شکل ۲-۲).



از دیدگاه ارسطو

از دیدگاه گالیله

**شکل ۱-۲** گالیله با آزمایش نشان داد که در غیاب مقاومت هوا گلوله‌های کوچک سبک و سنگین با هم سقوط می‌کنند.



**شکل ۲-۲** نمونه‌ای از دستگاه‌هایی که گالیله برای آزمایش بر روی حرکت اجسام به کار می‌برد.

۱- Galileo Galilei

۲- Christian Huygens

۳- Isaac Newton



شما هم می‌توانید آزمایش گالیله را تجربه کنید. یک سیب و یک برگ کاغذ بردارید. بالای پله‌ها بایستید (یا هر جایی که از سطح زمین ارتفاع داشته باشد) سپس دو تجربه زیر را انجام دهید:

**(الف)** با دو دست برگه کاغذ و سیب را در یک ارتفاع مشخص بالای سرتان نگه داشته و هم‌زمان هر دو را رها کنید.

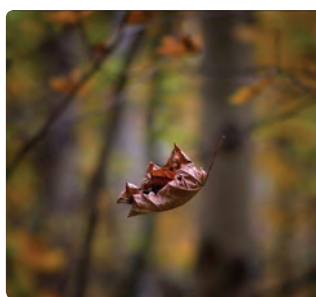
**(ب)** کاغذ را مچاله کنید و آن را هم‌زمان با سیب در یک ارتفاع مشخص بالای سرتان نگه داشته و هم‌زمان هر دو را رها کنید. آیا تفاوتی در دو تجربه مشاهده می‌کنید؟

در درس **علوم تجربی پایه نهم** با برخی از کمیت‌های مربوط به حرکت و همچنین قوانین حرکت آشنایی پیدا کرده‌اید. در این فصل ضمن آشنایی بیشتر با این کمیت‌ها با برخی از انواع حرکت نیز آشنا خواهید شد، همچنین با گستردگی بیشتری به بررسی قوانین حرکت و نیروها می‌پردازیم.



## ۲-۱ حرکت

خداوند متعال در دهه‌ها آیه از قرآن کریم به نشانه‌های رحمت خود از جمله حرکت اشیا در طبیعت اشاره کرده است.<sup>۱</sup> اگر به پیرامون خود نگاه کنید، حرکت را به گونه‌های مختلف در همه جا خواهید دید، مثل حرکت یک قطار تندرو روی خط ریل مستقیم، حرکت خمیده توپ بسکتبال در هنگام پرتاب، حرکت پیچیده یک برگ و حرکت چرخشی آب در هنگام خروج از آب‌پاش (شکل ۲-۳). برخی حرکت‌ها که در بالا به آنها اشاره شد پیچیده و برخی دیگر ساده هستند. بهتر است از حرکت‌های ساده‌تر شروع کنیم و با آنچه که در بررسی حرکت‌های ساده می‌آموزیم، می‌توانیم آموخته‌های خود را به موارد پیچیده‌تر نیز گسترش دهیم. برخی حرکت‌ها در طبیعت هم زیبا و هم نشانه‌هایی از خالق زیبایی‌ها هستند.



شکل ۲-۳ نمونه‌هایی از انواع حرکت

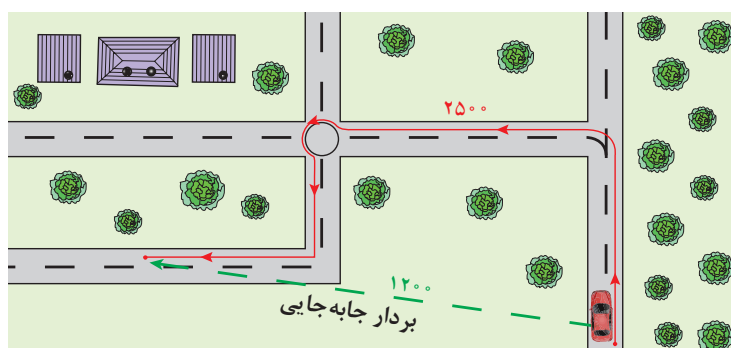
توضیح یک حرکت همواره به مکان و زمان وابسته است، برای توصیف و شناخت حرکت شما همواره باید بتوانید به این سؤال پاسخ دهید که جسم در یک لحظه معین در چه مکانی قرار دارد؟ سرعت و شتاب آن چقدر است؟ در این صورت است که می‌توانید حرکت آن را توصیف کنید، در ادامه درس **علوم تجربی پایه نهم**، در این فصل ضمن یادآوری کوتاه از مفاهیم مکان، سرعت و شتاب، شما را با نمودار مسیر حرکت، حرکت‌های یکنواخت و شتاب‌دار و قوانین حرکت و نیروها آشنا خواهیم کرد که بتوانید حرکت اجسام روی خط راست را بهتر بشناسید و آن را توصیف کنید.



۱- سوره مبارکه روم، آیه ۴۶؛ سوره مبارکه فاطر، آیه ۹.



**بردار مکان:** همان گونه که در درس علوم تجربی پایه نهم آموختید، موقعیت هر جسم را می توان در لحظه های مختلف حرکتش توسط بردار مکان نشان داد، برداری که از مبدأ مختصات به مکان جسم رسم شده است را بردار مکان جسم می نامیم. طول این بردار، فاصله جسم تا مبدأ را مشخص می کند. بردار جابه جایی: برداری که نقطه شروع حرکت هر جسم را به نقطه پایان حرکت آن وصل می کند، بردار جابه جایی آن جسم می گویند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ تفاوت بین مسافت و جابه جایی

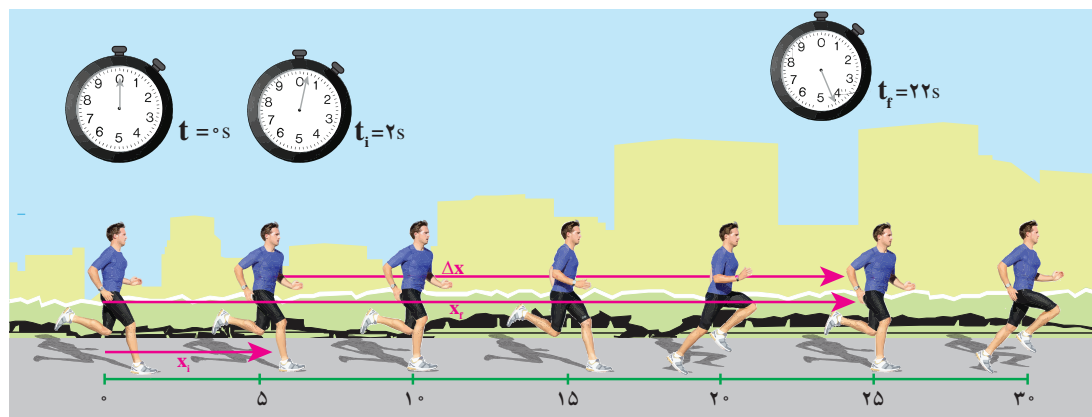
اگر مکان جسم در نقطه شروع حرکت را با نماد  $x_i$  و مکان جسم در انتهای حرکتش را با نماد  $x_f$  نمایش دهیم، برای اندازه جابه جایی روی خط راست خواهیم داشت<sup>۱</sup>:

$$\Delta x = x_f - x_i \quad (۱-۲)$$

زمانی را که جسم در شروع حرکتش قرار دارد  $t_i$  و زمانی را که جسم در پایان حرکتش قرار دارد  $t_f$  نام گذاری می کنیم، تفاضل این دو مقدار را یک **بازه زمانی** می نامیم و آن را با نماد  $\Delta t$  نمایش می دهیم، رابطه ریاضی بازه زمانی به صورت رابطه ۲-۲ تعریف می شود.

$$\Delta t = t_f - t_i \quad (۲-۲)$$

شکل ۲-۵ مسیر حرکت را برای دوندهای نشان می دهد که در مدت زمان ۲۰ ثانیه از مکان ۵ متری مبدأ تا مکان ۲۵ متری مبدأ جابه جا شده و اندازه بردار جابه جایی حرکت او ۲۰ متر است.



شکل ۲-۵ دونده در مکان ها و لحظه های مختلف نشان داده شده است

۱- از حرف اول کلمه های initial به معنی اولیه و final به معنی نهایی استفاده کرده ایم.



## ۲-۲ نمودار مسیر حرکت و مفهوم سرعت



شکل ۲-۶ نمودار مسیر حرکت برای ورزشکاری که در حال پرش است.

حرکت یک دونده در مسیر مستقیم، یک مثال ساده از حرکت روی خط راست است. یکی از راه‌ها برای نمایش دادن حرکت این دونده تهیه عکس‌هایی است که در بازه‌های زمانی مساوی، مکان دونده را مشخص می‌کند (همانند شکل‌های ۲-۶ و ۲-۷). فرض کنید دوربین را عمود بر جهت حرکت دونده، ثابت نگه داشته‌اید و در حین حرکت در مکان‌های مختلف از دونده عکس گرفته‌اید. شکل ۲-۷ عکس‌های گرفته شده از این دونده را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. شما در این عکس پنج تصویر پشت سر هم از این دونده را مشاهده می‌کنید که در بازه‌های زمانی مساوی گرفته شده‌اند. به این عکس، نمودار مسیر حرکت می‌گوییم.



شکل ۲-۷ نمودار مسیر حرکت یک دونده در بازه‌های زمانی مساوی

مکان دونده در هر لحظه را می‌توان با یک نقطه روی شکل مشخص کرد، می‌توانید قبل از گرفتن عکس روی زمین و در طول مسیر حرکت دونده وسیله اندازه‌گیری طول، مانند متر نواری قرار دهید، این متر نواری مکان جسم را پس از عکس‌برداری به شما نشان خواهد داد. با استفاده از نمودار مسیر حرکت شما توانسته‌اید مکان حرکت را اندازه بگیرید، آیا این اطلاعات برای به‌دست آوردن سرعت اجسام قابل استفاده است؟

با استفاده از نرم افزار Motion Shot، نمودار مسیر حرکت خود و یا هم‌کلاسی‌هایتان را تهیه کنید.

تجربه کنید



در درس علوم تجربی پایه نهم با مفهوم تندی متوسط و لحظه‌ای آشنا شده‌اید، در اینجا از کمیت سرعت نام می‌بریم، این کمیت جهت و اندازه تغییر مکان جسم نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در فصل ۱ اشاره کردید، سرعت کمیتی برداری است. به حاصل تقسیم جابه‌جایی به بازه زمانی که این جابه‌جایی اتفاق افتاده است **سرعت متوسط حرکت** می‌گوییم. سرعت متوسط را با  $\bar{v}$  نمایش داده و یکای اندازه‌گیری آن  $\frac{m}{s}$  (متر بر ثانیه) است. در این صورت اندازه سرعت متوسط را می‌توان توسط رابطه ۲-۳ به‌دست آورد:

$$\bar{v} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (۲-۳)$$

## ۳-۲ تعادل اجسام

در کتاب‌های علوم تجربی سال‌های گذشته با مفهوم نیرو آشنا شده‌اید. وقتی توپ را شوت یا آن را متوقف می‌کنید در حال وارد کردن نیرو به آن هستید. بلند کردن اجسام از روی زمین یا هل دادن آنها، حرکت کردن یک چرخ، بستن یک پیچ، سوراخ کردن قطعات همه نیازمند وارد کردن نیرو هستند (شکل ۲-۸). مفهوم نیرو معمولاً با هل دادن، کشیدن، خم کردن، برش دادن و تغییر سرعت همراه است.



شکل ۲-۸ نمونه‌هایی از وارد کردن نیرو به اجسام مختلف

نیرو کمیتی برداری است که با نماد  $\vec{F}$  نمایش داده می‌شود. یکای اندازه‌گیری آن  $N$  (نیوتن) است.

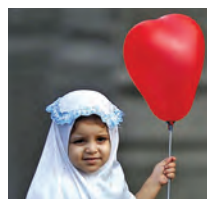
نکته



### اسحاق نیوتن

فیزیک‌دان، ریاضی‌دان، ستاره‌شناس، فیلسوف انگلیسی بوده است. وی در سال ۱۶۸۷ میلادی شاهکار خود «اصول ریاضی فلسفه طبیعی» را به نگارش درآورد. او مفهوم گرانش عمومی را مطرح ساخت و با تشریح قوانین حرکت اجسام، علم مکانیک کلاسیک را پایه گذاشت. از دیگر کارهای مهم او بنیان‌گذاری حساب دیفرانسیل و انتگرال است.

در این فصل هرگاه از کلمه نیرو استفاده می‌کنیم منظورمان برآیند نیروهای وارد بر جسم است. در بیشتر اوقات بیش از یک نیرو به جسم وارد می‌شود، به عنوان مثال هنگامی که یک توپ فوتبال را شوت می‌کنید، علاوه بر نیروی وارد شده از طرف پای شما، نیروهایی مانند وزن توپ، اصطکاک سطح زمین بازی و همچنین مقاومت هوا نیز بر توپ وارد می‌شوند، منظور از نیروی وارد شده بر این توپ همان برآیند نیروهایی است که بر توپ وارد می‌شده و باعث تغییر در وضعیت حرکتی توپ می‌شود. همان‌گونه که در علوم تجربی پایه نهم دیدید، اگر جسمی در حال تعادل باشد، برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹ برآیند نیروهای وارد بر بادکنک، هواپیما و کشتی صفر است.

به طور کلی هرگاه جسم ساکن باشد آن را در حال «تعادل استاتیکی» و هرگاه با سرعت ثابت در حال حرکت باشد آن را در حال «تعادل دینامیکی» می‌نامیم. در هر دو نوع تعادل، برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر است. در نتیجه شرط تعادل استاتیکی و دینامیکی به صورت زیر است:

$$\vec{F}_T = 0 \quad (۴-۲)$$

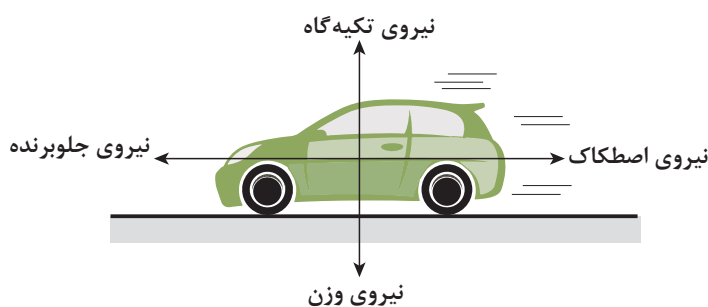
نماد  $T$  به کار رفته در رابطه ۴-۲ به معنی جمع برداری یا همان برآیند است. این رابطه بیان می‌کند که جمع برداری نیروهای وارد شده به جسم در حال تعادل، برابر صفر است.

سرعت یک کمیت برداری است، وقتی می‌گوییم سرعت جسم ثابت است، یعنی هم اندازه و هم جهت آن ثابت است.

نکته



شکل ۲-۱۰ صخره‌ای را نشان می‌دهد که در حال تعادل استاتیکی است، شکل ۲-۱۱ خودرویی را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت در حال حرکت است، این خودرو نیز در حال تعادل دینامیکی است.



شکل ۲-۱۱ تعادل دینامیکی خودرو



شکل ۲-۱۰ صخره در حال تعادل

اجسام تمایل دارند تعادل استاتیکی و یا دینامیکی خود را تا زمانی که نیرویی از بیرون به آنها وارد نشود، حفظ کنند. این گفته بیان قانون اول نیوتن درباره حرکت اجسام است.

### ۲-۳-۱ قانون اول نیوتن درباره حرکت اجسام:

این قانون که بیشتر به قانون لختی (اینرسی) مشهور است، در واقع بیان دیگری از نظر گالیله درباره حرکت اجسام است. هر جسمی حالت سکون خود را حفظ خواهد کرد و یا به حرکت با سرعت ثابت بر روی خط راست ادامه خواهد داد، مگر اینکه تحت تأثیر نیروی خارجی قرار گیرد (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲ تا زمانی که به جسم نیرویی وارد نشود به حرکت یکنواخت روی خط راست ادامه می‌دهد.

نکته کلیدی در این قانون مفهوم ادامه داشتن است. جسم اگر در حال سکون باشد همچنان تمایل دارد ساکن بماند. همچنین جسمی که در حال حرکت بر روی مسیری مستقیم است، تا زمانی که برآیند نیروهای خارجی وارد بر آن صفر باشد، به حرکت با سرعت ثابت در مسیر مستقیم ادامه خواهد داد، همان طور که کاوشگرهای فضایی در فضای میان ستارگان بدون تغییر در اندازه و جهت سرعت، حرکت می کنند.

این ویژگی اجسام را که در مقابل تغییر سرعت از خود مقاومت نشان می دهند، **لختی (اینرسی)** می نامند. همه اجسام دارای «لختی» هستند و مقدار این لختی به جرم جسم بستگی دارد. **هر اندازه جرم یک جسم بیشتر باشد، لختی آن نیز بیشتر خواهد بود**، به بیان ساده جرم معیاری برای مقاومت جسم در مقابل تغییر سرعت است.



تحقیقات نشان داده است که پستی سر صندلی های خودرو در هنگام تصادفات و برخوردهای ناگهانی، تا ۴۰ درصد از آسیب های وارده بر گردن و ستون فقرات سرنشینان به دلیل تغییر وضعیت های ناگهانی ناشی از لختی، می کاهد. در شکل مقابل فاصله مناسب پشت سر نشان داده شده است.

بیشتر بدانید



تصور کنید درون یک اتوبوس در حال توقف ایستاده اید، ناگهان اتوبوس شروع به حرکت می کند و شما به طرف عقب پرتاب می شوید. به نظر شما این اتفاق چه ارتباطی به قانون اول نیوتن دارد؟

فکر کنید



مطابق شکل سکه ای را روی یک تکه مقوا قرار دهید و آن را روی دهانه لیوان بگذارید، سعی کنید به مقوا ضربه بزنید. چه اتفاقی می افتد؟

تجربه کنید



وزنه ای به جرم ۲۵۰ گرم را مطابق شکل به وسیله نخ نازکی به سقف یا روی دستگاه پایه و گیره آویزان کنید. یک بار نخ را سریع به سمت پایین بکشید و بار دیگر نخ را به آرامی بکشید. در اجرای هر بار این آزمایش چه چیزی مشاهده می کنید؟ نتیجه هر حالت آزمایش را با دلیل توضیح دهید.

آزمایش کنید







شکل ۲-۱۳ حرکت قطار بین دو ایستگاه در یک مسیر مستقیم، حرکت یکنواخت است. این قطار در حال تعادل دینامیکی است.

۲-۳-۲ حرکت یکنواخت: همان گونه که اشاره شد، خودرو شکل ۲-۱۱ در حال تعادل دینامیکی است و حرکتش با سرعت ثابت انجام می‌گیرد، این گونه حرکت‌ها را **حرکت یکنواخت روی خط راست** می‌نامیم. در حرکت یکنواخت، اندازه و جهت بردار سرعت لحظه‌ای متحرک، در تمام لحظات یکسان است (شکل ۲-۱۳). **سرعت لحظه‌ای سرعت جسم در هر لحظه است** که آن را با نماد  $v$  نمایش می‌دهیم و یکای اندازه‌گیری آن  $\frac{m}{s}$  (متر بر ثانیه) است. در این نوع حرکت اندازه سرعت لحظه‌ای و اندازه سرعت متوسط باهم برابرند (چرا؟)، در نتیجه داریم:

$$\bar{v} = v \Rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (۵-۲)$$

در رابطه ۲-۵ اگر مکان را در لحظه صفر برابر با  $x_0$  و مکان متحرک را  $t$  ثانیه پس از شروع حرکت با  $x$  نمایش دهیم (شکل ۲-۱۴)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x = vt + x_0 \quad (۶-۲)$$

رابطه ۲-۶ را **معادله مکان - زمان** (حرکت) برای حرکت یکنواخت می‌نامیم.



شکل ۲-۱۴ نمودار مسیر حرکت یکنواخت

حرکت یکنواخت:

- ۱- فاصله متحرک از مبدأ مکان ( $x$ ) از رابطه  $x = vt + x_0$  به دست می‌آید.
- ۲- در این رابطه مکان بر حسب متر ( $m$ ) و سرعت بر حسب  $(\frac{m}{s})$  و زمان بر حسب ( $s$ ) جاگذاری می‌شود.

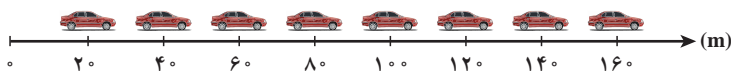
نکته



مثال



نمودار زیر، مسیر حرکت خودرویی است که با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است. اگر فاصله زمانی بین هر دو نقطه یک ثانیه باشد:



الف) معادله مکان - زمان حرکت را به دست آورید.

ب) با توجه به معادله مکان - زمان محاسبه کنید که خودرو چند ثانیه پس از شروع حرکت به اندازه ۲۰۰ متر جابه‌جا شده است.

**پاسخ:** با توجه به اطلاعات نمودار مسیر حرکت مکان اولیه خودرو ۲۰ متری مبدأ بوده است، و می توان سرعت متوسط (که برابر با سرعت لحظه ای می باشد) آن را محاسبه کرد:

$$\left. \begin{array}{l} t_i = 0 \text{ s}, x_i = 20 \text{ m} \\ t_f = 2 \text{ s}, x_f = 60 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow \bar{v} = v = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{60 \text{ m} - 20 \text{ m}}{2 \text{ s} - 0} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

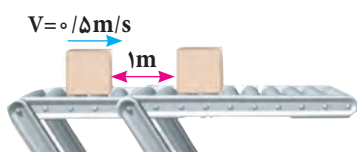
با توجه به معادله ۲-۶ خواهیم داشت:

$$\left. \begin{array}{l} x_0 = 20 \text{ m} \\ v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{array} \right\} \Rightarrow x = vt + x_0 \Rightarrow x = 20t + 20$$

(ب) با توجه به معادله ۱-۲ می توان نوشت:

$$\Delta x = x_f - x_i \Rightarrow 20 \text{ m} = x_f - 20 \text{ m} \Rightarrow x_f = 40 \text{ m}$$

$$x = vt + x_0 \Rightarrow 40 \text{ m} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} t + 20 \text{ m} \Rightarrow t = 1 \text{ s}$$

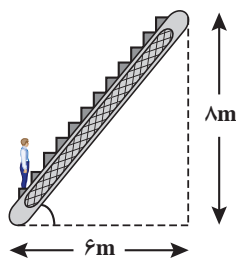


در یک کارخانه تولید قطعه های لوازم خانگی بسته های تولیدی روی تسمه نقاله مطابق شکل با سرعت ثابت ۰/۵ m/s در حال حرکت هستند. اگر فاصله بین هر دو بسته ۱ m باشد، فاصله زمانی برداشتن بسته ها چند ثانیه باید باشد تا بسته ای روی تسمه نقاله باقی نماند.

مطابق رابطه ۲-۵ خواهیم داشت:

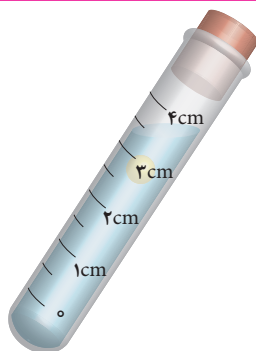
$$\left. \begin{array}{l} \Delta x = 1 \text{ m} \\ \bar{v} = v = 0.5 \text{ m/s} \end{array} \right\} \Rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{1 \text{ m}}{0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2 \text{ s}$$

مثال



فاصله دو طبقه فروشگاهی مطابق شکل روبه رو ۸ متر است. اگر شخص در مدت ۱۰ s فاصله این دو طبقه را با سرعت ثابت طی کند، تعیین کنید سرعت پلکان برقی چند متر بر ثانیه بوده است.

تمرین کنید



روی لوله آزمایشی به فواصل نیم سانتی متر برچسب بزنید، سپس آن را از آب پر کنید و درون آن یک قطره روغن ماشین بریزید، سر این لوله را با چوب پنبه یا درپوش پلاستیکی ببندید و با سروته کردن لوله، سعی کنید قطره روغن را در داخل لوله حرکت دهید، با استفاده از زمان سنج و اندازه های روی لوله، حرکت قطره روغن را در طول لوله بررسی کنید. آیا می توانید سرعت متوسط قطره روغن را محاسبه کنید؟ چگونه می توانید یکنواخت بودن حرکت روغن را با این آزمایش نشان دهید؟

آزمایش کنید



## ۲-۴ حرکت غیر یکنواخت اجسام



الف) دوندگان دوی سرعت پس از رسیدن به خط پایان سرعت خود را کاهش می‌دهند تا از حرکت بایستند.



ب) فضا پیما در حال بلند شدن از سطح زمین و تا لحظاتی پس از آن سرعتش را افزایش می‌دهد.

شکل ۲-۱۵ حرکت غیر یکنواخت

هرگاه برابری نیروهای وارد بر جسمی غیر صفر نباشد، حرکت آن یکنواخت نیست و سرعت جسم تغییر می‌کند. در شرایطی که جسم در مسیر مستقیم در حرکت باشد، سرعت می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد. حرکتی که با تغییر سرعت همراه باشد **غیر یکنواخت** می‌نامیم. حرکت خودرو بعد از ترمز، فضاپیما در حال بلند شدن از سطح زمین و توقف دوندگان دو سرعت در خط پایان نمونه‌هایی از حرکت‌های غیر یکنواخت هستند (شکل ۲-۱۵). در تمامی این حرکت‌ها وارد شدن نیرو به جسم باعث تغییر در سرعت آن می‌شود.

شما می‌توانید تفاوت بین حرکت یکنواخت و غیر یکنواخت را شروع و توقف حرکت یک آسانسور یا ترمز خودرو احساس کنید. برای اینکه تفاوت بین حرکت‌ها را بیشتر توضیح داده باشیم به شکل ۲-۱۶ دقت کنید. در این شکل به سه نوع حرکت اشاره شده است، شکل شامل عکس‌هایی است که در بازه‌های زمانی مساوی از دونده گرفته شده است در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم:



الف) در این شکل، فاصله بین عکس‌های مختلف و در لحظه‌های متفاوت ثابت باقی می‌ماند، پس دونده در حال دویدن با سرعت ثابت می‌باشد. حرکت او یکنواخت و برابری نیروهای وارده بر آن صفر است. دونده در این حالت دارای **تعادل دینامیکی** است.

ب) در این شکل، فاصله بین عکس‌ها در طول زمان در حال افزایش است. این به آن معناست که سرعت دونده در طول زمان افزایش یافته است. این حرکت را **غیر یکنواخت** و **تندشونده** می‌نامیم.

پ) در این شکل، فاصله بین عکس‌ها در طول زمان در حال کاهش است، به این معنا که سرعت دونده در طول زمان کاهش یافته است، این حرکت را **غیر یکنواخت** و **کندشونده** می‌نامیم.

از کتاب **علوم تجربی پایه نهم** به خاطر دارید که شتاب متوسط یک جسم تغییر سرعت جسم در یک بازه زمانی است، در نتیجه حرکت‌هایی نظیر شکل ۲-۱۶ ب و پ را می‌توان حرکت‌های شتاب‌دار نامید. شتاب متوسط این حرکت‌ها از تقسیم اندازه تغییرات سرعت به بازه زمانی آن تغییرات به دست می‌آید. شتاب متوسط



را با نماد  $\bar{a}$  نشان می‌دهیم و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۷-۲)$$

نکته



- ۱- نیرو باعث تغییر وضعیت حرکت جسم و بردار سرعت (اندازه و جهت) آن می‌شود.
- ۲- شتاب، کمیتی برداری است و یکای اندازه‌گیری آن متر بر مجذور ثانیه ( $\frac{m}{s^2}$ ) است.

تمرین کنید



یوزپلنگ ایرانی می‌تواند در مدت زمان ۲ ثانیه، سرعت خود را از صفر به ۹۶ کیلومتر بر ساعت برساند، در صورتی که یکی از سریع‌ترین خودروهای جهان می‌تواند همین افزایش سرعت را در مدت ۲/۵ ثانیه انجام دهد. شتاب متوسط این دو را با هم مقایسه کنید.

آیا تاکنون این سؤال را از خود پرسیده‌اید که برای انجام حرکت تندشونده و یا کندشونده نیروی برآیند باید در چه جهتی بر جسم وارد شود؟ به عنوان مثال در شکل ۲-۱۶-پ که حرکت جسم شتابدار است، نیروی برآیند وارد بر جسم به کدام جهت وارد شده است؟ به این منظور به شکل ۲-۱۷ دقت کنید.



۲-۱۷ حرکت‌های یکنواخت، تندشونده و کندشونده دوچرخه

اگر به طول بردارهای نیروی رسم شده در این شکل دقت کنید، متوجه خواهید شد که در شکل ۲-۱۷-الف اندازه نیروی جلو برنده با نیروی مقاوم زمین و هوا که با حرکت دوچرخه مخالفت می‌کنند، برابر است و در این حالت برآیند نیروهای وارد بر دوچرخه صفر بوده و حرکت آن یکنواخت است. در شکل ۲-۱۷-ب نیروها دیگر متوازن نیستند و برآیند نیروها در جهت حرکت است و همان‌طور که می‌بینید حرکت دوچرخه تندشونده است، در شکل ۲-۱۷-پ نیز برآیند نیروها صفر نیست ولی برآیند نیروها خلاف جهت حرکت دوچرخه است، و حرکت دوچرخه کندشونده است. برای اینکه به رابطه بین جهت نیرو و جهت شتاب جسم پی ببریم خوب است که قانون دوم نیوتن را معرفی کنیم.

**۲-۴-۱ قانون دوم نیوتن:** قانون دوم نیوتن چنین بیان می‌کند که:

اگر به جسمی نیروی خارجی وارد شود، شتابی می‌گیرد که اندازه آن با اندازه نیرو رابطه مستقیم و با جرم



جسم رابطه عکس دارد. در آن صورت خواهیم داشت:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_T}{m} \quad (۸-۲)$$

با توجه به قانون دوم نیوتن و رابطه ۷-۲ در حرکت شتاب‌دار، دو یکا برای کمیت شتاب به دست آورید.

تمرین کنید



نکته



مثال



بر طبق رابطه ۸-۲ می‌توان نتیجه گرفت که بردار شتاب همواره هم جهت با بردار نیروی برآیند وارد بر جسم است (چرا؟)

با توجه به شکل آغاز فصل اگر نیروی مقاوم برای هر دو چتر یکسان باشد، چه تفاوتی در شتاب کندشونده خودرو برای حالتی که یک چتر باز شود یا اینکه دو چتر باز شود وجود خواهد داشت؟  
**پاسخ:** جرم خودرو را  $m$  و نیروی وارد شده از طرف هر چتر بر اتومبیل  $F$  است در حالتی که یکی از چترها باز شود:

$$a_1 = \frac{F}{m}$$

در حالتی که هر دو چتر باز شود:

$$a_2 = \frac{2F}{m}$$

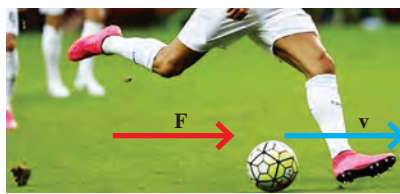
شتاب در حرکت کندشونده حالت دوم دو برابر شتاب در حالت اول است.

اکنون می‌توان به سؤال مطرح شده در قسمت قبل پاسخ داد که نیروی وارد شده بر جسم چه موقعی می‌تواند باعث حرکت تند شونده و چه موقعی باعث حرکت کند شونده اجسام شود:

هرگاه بردار نیروی برآیند در خلاف بردار سرعت جسم متحرکی باشد، سرعت آن را کاهش داده و حرکت آن کندشونده خواهد بود و هرگاه بردار نیروی برآیند هم جهت با بردار سرعت به جسمی وارد شود، حرکت تند شونده خواهد بود. به شوت کردن توپ در بازی فوتبال دقت کنید شکل ۲-۱۸-الف، توپ در حال حرکت رو به جلو است، و بازیکن نیز در همان جهت به آن نیرو وارد کرده و توپ در همان جهت شتاب می‌گیرد، حرکت او باعث افزایش اندازه سرعت توپ و تند شونده شدن حرکت آن می‌شود و در مقابل دروازه‌بان برای کنترل توپ، خلاف جهت حرکت توپ به آن نیرو وارد کرده و شتابی مخالف جهت حرکت توپ به آن می‌دهد، این کار باعث کاهش سرعت توپ و حرکت کند شونده و در نهایت توقف توپ خواهد شد (شکل ۲-۱۸-ب).



ب) متوقف کردن توپ توسط دروازه‌بان فوتبال یک حرکت کند شونده است.



الف) توپ فوتبال در لحظه شوت کردن توسط بازیکن حرکتش تندشونده است.

شکل ۲-۱۸ نمونه‌هایی از حرکت تندشونده و کندشونده



یکی از متداول ترین حرکت هایی که در طبیعت به صورت شتاب دار انجام می گیرد، حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است، هرگاه بردار برآیند نیروهای وارد بر یک جسم تغییر نکند، بردار شتاب نیز بدون تغییر باقی می ماند و حرکت با شتاب ثابت انجام خواهد گرفت. در این حالت سرعت به طور یکنواخت تغییر می کند، و مقدار شتاب در لحظه های مختلف حرکت یکسان است.

**شتاب لحظه ای همان شتاب جسم در یک لحظه معین است** که آن را با نماد  $a$  نمایش می دهیم. در حرکت شتاب ثابت روی خط راست، اندازه شتاب متوسط و شتاب لحظه ای باهم برابر هستند.

یعنی:

$$a = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (9-2)$$

اگر در رابطه ۹-۲ سرعت در لحظه شروع حرکت  $v_0$  و  $t$  ثانیه پس از شروع حرکت برابر با  $v$  باشد، آنگاه برای شتاب حرکت چنین می توان نوشت:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (10-2)$$

همچنین با کمی تغییر در رابطه ۱۰-۲ می توان **معادله سرعت - زمان** حرکت با شتاب ثابت را به شکل زیر نوشت:

$$v = at + v_0 \quad (11-2)$$



شکل روبه رو بازی چوگان ایرانی را نشان می دهد، اگر توپ چوگان حرکت خود را با سرعت  $4 \text{ m/s}$  و با شتاب ثابت  $10 \text{ m/s}^2$  آغاز کرده باشد، سرعت آن  $2 \text{ s}$  پس از شروع حرکت چقدر خواهد شد؟ برآیند نیروهای وارد بر این توپ  $127 \text{ g}$ ، چقدر است؟  
**پاسخ:**

$$v = v_0 + at$$

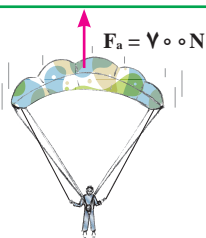
$$\left. \begin{array}{l} v_0 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ a = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{array} \right\} \Rightarrow v = v_0 + at \Rightarrow v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} + (10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(2\text{s}) = 24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = 127 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 127 \times 10^{-3} \text{ kg} = 1/27 \times 10^{-1} \text{ kg}$$

$$F = ma = 1/27 \times 10^{-1} \text{ kg} \times 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1/27 \frac{\text{kg.m}}{\text{s}^2} = 1/27 \text{ N}$$

مثال





جرم چتربازی به همراه تجهیزات برابر با  $80 \text{ kg}$  است، اگر نیروی مقاومت هوا در برابر حرکت چترباز در لحظه‌های اولیه سقوط برابر با  $700 \text{ N}$  باشد، شتاب تند شونده این چترباز را محاسبه کنید.

## ۲-۵ نیروهای کنش و واکنش



الف) حرکت قایق‌های پارویی در آب



ب) حرکت شناگران در آب

شکل ۲-۲۰ نمونه‌هایی از نیروهای کنش و واکنش

آیا تاکنون به حرکت قایق‌های پارویی درون آب دقت کرده‌اید؟ قایق سوار با پارو زدن به سمت عقب قایقش را به سمت جلو می‌راند و یا یک شناگر در حین شنا، آب را با دستان خود به عقب می‌راند در حالی که خود به سمت جلو حرکت می‌کند (شکل ۲-۲۰). در این نوع مثال‌ها و نمونه‌های مشابه با نیروهای کنش و واکنش سروکار داریم. با بررسی قانون سوم نیوتن می‌توانیم نیروهای کنش و واکنشی را که اجسام به همدیگر وارد می‌کنند بهتر بشناسیم و در بررسی حرکت از این قانون بهره ببریم.

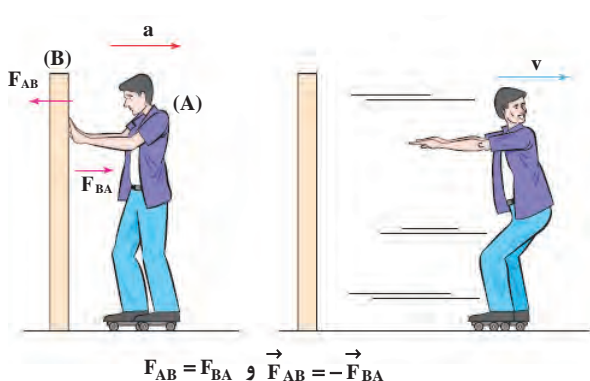
### ۲-۵-۱ قانون سوم نیوتن: هرگاه یک جسم نیرویی

به جسم دیگر وارد کند، آن جسم نیز نیرویی به همان اندازه ولی در خلاف جهت به جسم اول وارد خواهد کرد. وقتی روی کف اتاق قدم برمی‌دارید، با آن برهم کنش

انجام می‌دهید، شما به کف اتاق و کف اتاق به شما نیرو وارد می‌کند، این جفت نیرو به طور هم‌زمان اعمال می‌شوند. تائیرهای خودرو به کف خیابان نیرو وارد می‌کنند و کف خیابان هم به تائیر به همان اندازه اما در خلاف جهت، نیرو وارد می‌کند.

برای تشخیص نیروهای کنش و واکنش از همدیگر در ابتدا بر هم کنش اجسامی را که به هم نیرو وارد می‌کنند تشخیص می‌دهیم، مثلاً هرگاه با دست خود به دیوار نیرو وارد می‌کنید، این برهم کنش بین دست شما و دیوار است.

دست شما به عنوان جسم A نیروی کنش را به دیوار، وارد می‌کند و دیوار به عنوان جسم B، نیروی واکنش را به دست شما در جهت مخالف ولی به همان اندازه وارد خواهد کرد. در شکل ۲-۲۱ اسکیت باز نیرویی را به دیوار روبه‌روی خود وارد می‌کند، طبق قانون سوم نیوتن دیوار نیز همان نیرو را در جهت مخالف به اسکیت باز وارد خواهد کرد، نیروی وارد شده بر اسکیت باز به او شتاب می‌دهد، این کار باعث حرکت اسکیت باز به سمت عقب خواهد شد.



شکل ۲-۲۱ حرکت اسکیت باز به عقب بر اثر نیروی واکنش دیوار

نکته



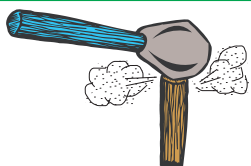
- ۱- انتخاب یک نیرو به عنوان کنش و دیگری به عنوان واکنش کاملاً اختیاری است.
- ۲- نیروهای کنش و واکنش به طور هم‌زمان به وجود می‌آیند و هم‌زمان نیز از بین می‌روند.
- ۳- نیروهای کنش و واکنش بر دو جسم مختلف اثر می‌کنند در نتیجه اثر یکدیگر را خنثی نمی‌کنند.

فکر کنید



چرا وقتی روی صندلی چرخ‌دار در پشت میز کار خود قرار دارید، با هل دادن میز کار، به سمت عقب حرکت می‌کنید؟

تمرین کنید



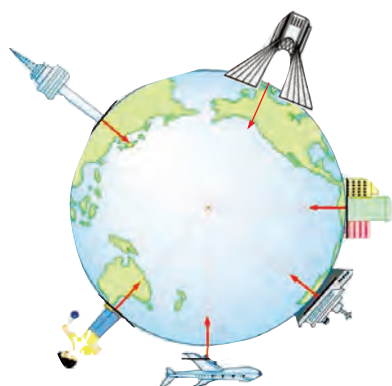
در شکل مقابل نیروهای کنش و واکنش را به صورت جداگانه رسم کنید.

فکر کنید



آیا هنگام شلیک توپ جنگی، نیروی وارد شده از طرف توپ جنگی به گلوله با نیروی وارد شده از طرف گلوله به توپ جنگی باهم برابرند؟ چرا شتاب حرکت توپ از شتاب حرکت گلوله کمتر است؟

## ۲-۶ معرفی چند نیرو



شکل ۲-۲۲ همه اجسام به سمت زمین جذب می‌شوند.

همان‌گونه که در ابتدای بحث گفته شد، نیرو نقش تعیین‌کننده‌ای در وضعیت حرکتی یک جسم دارد، به همین دلیل و در ادامه به معرفی برخی از مهم‌ترین نیروها می‌پردازیم.

۲-۶-۱ **نیروی گرانش و نیروی وزن:** به خوبی می‌دانیم که همه اجسام به سمت زمین جذب می‌شوند. نیروی جاذبه‌ای را که به وسیله زمین بر اشیاء وارد می‌شود «نیروی گرانشی» زمین می‌نامیم. این نیرو به سمت مرکز زمین و بر سطح زمین عمود است. **اندازه این نیرو را وزن جسم می‌نامیم** و آن را با نماد  $W$  نشان می‌دهیم. کره زمین اجسام را با شتاب ثابت به سمت مرکز خود جذب می‌کند،

مقدار این شتاب در نزدیکی سطح زمین تقریباً برابر  $\frac{9}{8} \frac{N}{kg}$  است، این شتاب را با نماد  $g$  نمایش می‌دهند (شکل ۲-۲۲).

با قرار دادن شتاب گرانشی  $g$  و نیروی وزن  $W$  در رابطه ۲-۸ خواهیم داشت:

$$a = \frac{F}{m} \Rightarrow$$

$$g = \frac{W}{m} \Rightarrow W = mg \quad (۲-۱۲)$$





شتاب گرانشی سیارات مختلف، به دلیل جرم و شعاع متفاوتی که دارند، متفاوت است برای مثال شتاب گرانشی در کره ماه تقریباً برابر با  $\frac{1}{6} \frac{N}{kg}$  است. وزن یک فضاورد با تجهیزات را در کره زمین و ماه با هم مقایسه کنید. جرم فضاورد به همراه تجهیزات برابر  $1/2 \times 10^2 \text{ kg}$  است.

$$W = mg = 1/2 \times 10^2 \text{ kg} \times 9/8 \frac{N}{kg} = 1/176 \times 10^3 \text{ N}$$

وزن فضاورد در کره زمین برابر است با:

$$W' = mg' = 1/2 \times 10^2 \text{ kg} \times 1/66 \frac{N}{kg} = 1/992 \times 10^2 \text{ N}$$

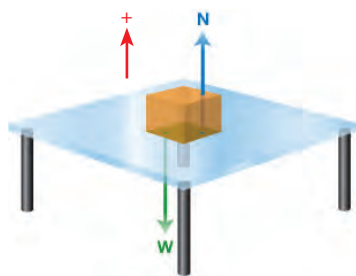
وزن فضاورد در کره ماه برابر است با:

$$\frac{W'}{W} = \frac{1/992 \times 10^2 \cancel{N}}{1/176 \times 10^3 \cancel{N}} \cong \frac{1}{6}$$

وزن فضاورد در کره ماه تقریباً یک ششم وزن آن در کره زمین است.



یک سندان آهنگری را که جرم آن تقریباً  $60 \text{ kg}$  است، در نظر بگیرید. اگر به این سندان بر روی کره زمین با پا ضربه بزنیم، درد بیشتری احساس می‌کنیم یا بر روی کره ماه؟ دلیل خود را با مشورت با دوستان به کلاس ارائه دهید.



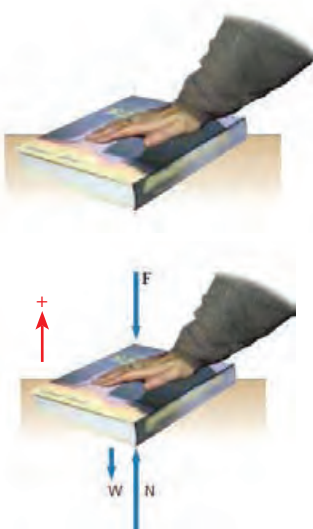
شکل ۲-۲۳ نیروی عمودی تکیه‌گاه

**۲-۶-۲ نیروی عمودی تکیه‌گاه:** جعبه‌ای را در نظر بگیرید که بدون حرکت روی میز قرار دارد، این جعبه در حال تعادل استاتیکی است. چه نیروهایی بر این جعبه اثر می‌گذارند؟ یکی از این نیروها به گرانش زمین مربوط است، یعنی همان نیروی وزن جعبه. اما چون جعبه در حال تعادل استاتیکی است نیروی دیگری به آن وارد می‌شود تا اثر نیروی وزن را خنثی کند. این نیرو را که میز به‌طور عمود بر جعبه وارد می‌کند، «نیروی عمودی تکیه‌گاه» می‌نامیم (شکل ۲-۲۳). در این صورت خواهیم داشت:

$$\vec{F}_T = 0 \Rightarrow \vec{N} + \vec{W} = 0 \quad (\text{برایند نیروهای وارد بر جعبه}) \quad (۱۳-۲)$$

$$N + (-W) = 0 \Rightarrow N = W = mg$$

در این حالت اندازه نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه باهم برابر هستند.



مطابق شکل کتاب روی میز قرار دارد و شخصی با دست خود به کتاب نیروی عمودی وارد می‌کند. نیروی عمودی تکیه‌گاه را در این حالت محاسبه کنید.

**پاسخ:** نیروهای وارد شده بر کتاب در شکل نمایش داده شده‌اند.  $F$  نیرویی است که دست شخص به طور عمودی بر کتاب وارد می‌کند.  $N$  نیروی عمودی‌ای است که تکیه‌گاه (میز) بر کتاب وارد می‌کند.  $W$  نیروی وزن کتاب است که از طرف زمین بر کتاب وارد می‌شود.

$$\vec{F}_T = 0 \Rightarrow \vec{N} + \vec{W} = 0$$

$$\Rightarrow N + (-F) + (-W) = 0 \Rightarrow N = F + W$$

در این حالت، اندازه نیروی عمودی تکیه‌گاه از نیروی گرانشی بیشتر است.

## کاربرد در صنعت و فناوری



هنگامی که روی ترازوی فنری ایستاده‌اید و می‌خواهید وزن خود را اندازه بگیرید، دو نیرو به شما وارد خواهد شد. یکی نیروی گرانشی زمین (نیروی وزن) است، و دیگری نیروی تکیه‌گاه است که ترازوی فنری به شما وارد خواهد کرد.

نیروی عمودی تکیه‌گاه ( $N$ ) را نیروی کنش فرض می‌کنیم و نیرویی که شما به ترازو وارد می‌کنید ( $N'$ )، نیروی واکنش خواهد بود. همین نیروی واکنش، فنر ترازو را فشرده می‌کند و ترازو اندازه نیروی عمودی تکیه‌گاه را که با نیروی وزن شما برابر است، نشان خواهد داد. به شرطی نیروی عمودی تکیه‌گاه با وزن شما برابر است که روی ترازوی فنری بی‌حرکت ایستاده باشید و ضمناً به جسم دیگری تکیه نکرده باشید.

روی یک ترازوی فنری ساکن بایستید، وزن خود را اندازه بگیرید. سپس ترازو را به کنار میز ببرید و یک بار در حالی که به میز به طور عمودی و به سمت پایین نیرو وارد می‌کنید وزن خود را اندازه بگیرید و بار دیگر در حالی که به لبه میز به سمت بالا نیرو وارد کرده‌اید وزن خود را اندازه بگیرید. تفاوتی مشاهده می‌کنید؟

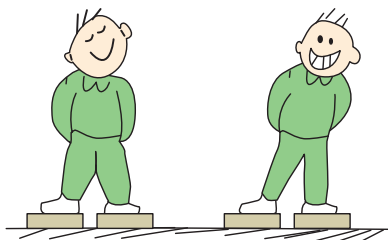
تجربه کنید



تحقیق کنید



آیا راهی وجود دارد که با آن بتوان با استفاده از خود ترازو، وزن ترازو را اندازه گرفت؟



دو ترازوی فنری مهیا کنید و پای راست خود را روی یکی از آنها و پای چپ خود را روی ترازوی دیگر، مطابق شکل، قرار دهید. ترازوها چه عددی را نشان می‌دهند؟ اگر بیشتر وزن خود را روی پای چپ بیندازید، چه تغییری در اعداد نمایش داده شده می‌بینید؟ دلیل مشاهدات خود را توضیح دهید.



شکل ۲-۲۴ قسمت‌هایی از فلز به دلیل اصطکاک هنگام برش ذوب و بریده می‌شوند.

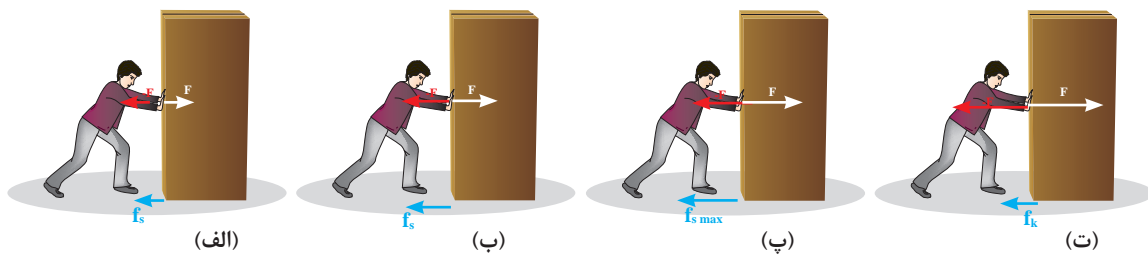


شکل ۲-۲۵ از نیروی اصطکاک برای ساختن آتش استفاده می‌شود.

**۲-۶-۳ نیروی اصطکاک:** هرگاه جسمی بخواهد روی سطحی حرکت کند، همواره سطح در مقابل حرکت آن، مقاومت نشان می‌دهد. به این مقاومت سطح در مقابل حرکت جسم «نیروی اصطکاک» گفته می‌شود. این نیرو همواره با سطح‌هایی که روی هم مالش داده می‌شوند موازی است، و نقش مهمی را در حرکت اجسام دارد. در واقع نیروهای اصطکاک هستند که به ما امکان حرکت می‌دهند و چرخ‌های خودروها با کمک همین نیرو لیز نمی‌خورند و خودرو حرکت می‌کند. در شکل ۲-۲۴، اصطکاک بین صفحه دستگاه برش و فلز به ایجاد گرمای شدید منجر می‌شود که سبب برش فلز می‌شود. همچنین از این نیرو می‌توان برای ایجاد آتش نیز استفاده نمود (شکل ۲-۲۵).

موقع هل دادن یک کمد سنگین روی کف اتاق، این نیرو را می‌توان حس کرد. شما برای حرکت دادن این کمد ابتدا نیرویی به آن وارد می‌کنید، این نیرو برای حرکت دادن کمد کافی نیست، چرا که به همان اندازه که شما برای هل دادن، نیرو به کمد وارد می‌کنید، کف اتاق نیروی اصطکاک را در جهت مخالف نیروی شما، به کمد وارد می‌کند و همچنان نیروی برابری وارد شده صفر بوده و کمد حرکت نمی‌کند. به این نیروی مقاوم، نیروی اصطکاک ایستایی می‌گوییم (شکل ۲-۲۶ الف). اما شما ناامید نمی‌شوید و

نیروی بیشتری را وارد می‌کنید، باز هم کمد حرکت نمی‌کند، این بار نیروی اصطکاک کف اتاق بیشتر می‌شود تا با نیروی شما هم اندازه گردد (شکل ۲-۲۶ ب). اما مقاومت سطح در مقابل حرکت کمد ادامه‌دار نیست، و سرانجام شما نیروی وارد شده را به حدی می‌رسانید که کمد در آستانه حرکت قرار گیرد، در این حالت کف اتاق بیشترین مقاومت خود را در مقابل حرکت نشان داده است. به این نیرو «نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه» یا «نیروی اصطکاک آستانه حرکت» می‌گوییم (شکل ۲-۲۶ پ). سرانجام با وارد کردن کمی نیروی بیشتر حرکت کمد در کف اتاق شروع می‌شود. اما هنوز هم هل دادن آن آسان نیست. اصطکاک در حال حرکت هم وجود دارد ولی دیگر به اندازه حالت بیشینه، بزرگ نیست. کمد به حرکت خود ادامه می‌دهد، نیروی اصطکاک وارد شده در این حالت به کمد را نیروی اصطکاک جنبشی می‌نامیم (شکل ۲-۲۶ ت).



شکل ۲-۲۶ مراحل مختلف به حرکت در آوردن کمد در کف اتاق با وجود نیروی اصطکاک<sup>۱</sup>

اندازه نیروی اصطکاک جنبشی و نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه با اندازه نیروی عمودی (تکیه‌گاه) متناسب‌اند. نیروی اصطکاک ایستایی را با نماد  $f_s$ ، نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه را با نماد  $f_{s \max}$  و نیروی اصطکاک جنبشی را با نماد  $f_k$  نمایش می‌دهیم. تجربه نشان می‌دهد:

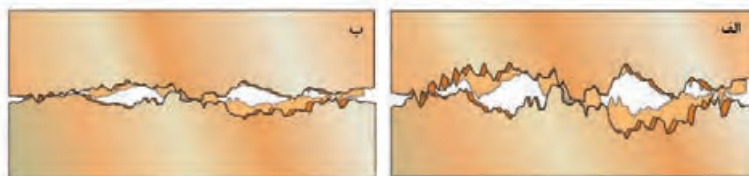
**الف)** جهت نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح خلاف جهت برآیند نیروی وارد بر جسم خواهد بود. **ب)** اندازه نیروی اصطکاک ایستایی برابر با اندازه نیرویی است که سعی دارد جسم را حرکت دهد و اندازه آن همواره از نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه کمتر است.

$$f_s \leq f_{s \max} \quad (۱۴-۲)$$

**ج)** اندازه نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه با اندازه نیروی عمودی تکیه‌گاه متناسب می‌شود. اندازه این نیرو از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f_{s \max} = \mu_s N \quad (۱۵-۲)$$

در رابطه ۱۵-۲ کمیت  $\mu_s$  همان ضریب اصطکاک ایستایی است و  $N$  اندازه نیروی تکیه‌گاه است. هر چه نیروی عمودی تکیه‌گاه بیشتر باشد، نیروی اصطکاک آستانه حرکت نیز بزرگ‌تر است (شکل ۲-۲۷).



شکل ۲-۲۷ این شکل تأثیر نیروی عمودی تکیه‌گاه بر نیروی اصطکاک را نشان می‌دهد. در شکل الف نیروی عمودی تکیه‌گاه کمتر از شکل ب است و سطح تماس در مقیاس ریز کمتر بوده و نیروی اصطکاک کمتر است.

**د)** اندازه نیروی اصطکاک جنبشی بین دو سطح نیز با اندازه نیروی عمودی تکیه‌گاه متناسب است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_k = \mu_k N \quad (۱۶-۲)$$

$\mu_k$  را ضریب اصطکاک جنبشی می‌نامیم.

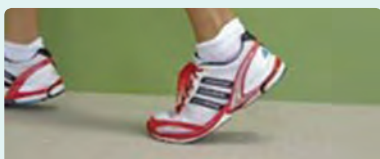
۱- به تغییر طول بردارها در هر شکل توجه کنید.



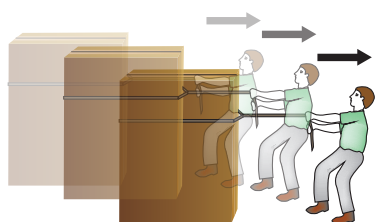
مقادیر  $\mu_s$  و  $\mu_k$  به ویژگی سطح‌هایی بستگی دارند که روی هم مالش داده می‌شوند و از مساحت سطح‌هایی که روی هم مالش داده می‌شوند مستقل هستند و در حالت مقدار  $\mu_k$  از  $\mu_s$  کوچک‌تر است.



یکای ضریب اصطکاک جنبشی و ایستایی را به‌دست آورید.



نیروی اصطکاک هنگام دویدن و قدم زدن چگونه است؟ در شکل، نیروهای وارد بر شخص را به هنگام راه رفتن رسم کنید.



اگر یک جعبهٔ چوبی به جرم ۱۲ کیلوگرم را با نیروی افقی ۳۰ نیوتن و با سرعت ثابت روی زمین بکشیم ضریب اصطکاک جنبشی بین جعبه و زمین چه اندازه خواهد بود؟  
**پاسخ:** همان‌طور که در متن مثال آمده است، جعبه با سرعت ثابت حرکت می‌کند، پس در حال تعادل دینامیکی است. و برآیند نیروهای وارد بر آن صفر خواهد بود.

$$F_{Ty} = N - W = N - mg = 0 \Rightarrow N = mg = 12 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 117.6 \times 10^3 \text{ N}$$

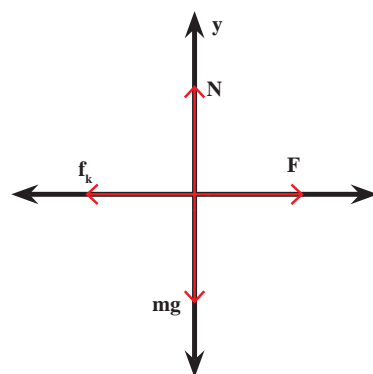
$$f_k = \mu_k N \quad (1)$$

$$F_{Tx} = F - f_k = 0 \Rightarrow F = f_k \quad (2)$$

$$1, 2 \Rightarrow F = \mu_k N \Rightarrow \mu_k = \frac{F}{N} = \frac{30}{117.6} = 0.25$$

برایند نیروها روی محور x ها:  $F_{Tx}$

برایند نیروها روی محور y ها:  $F_{Ty}$

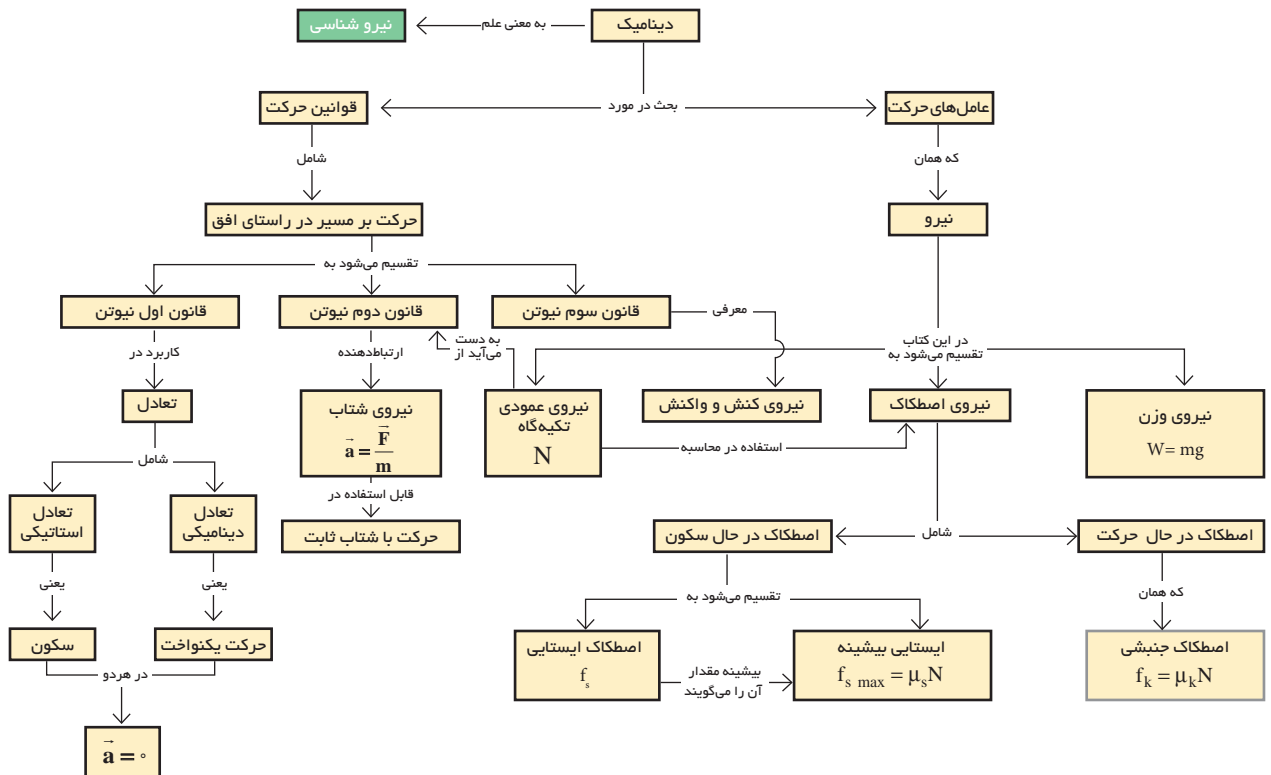
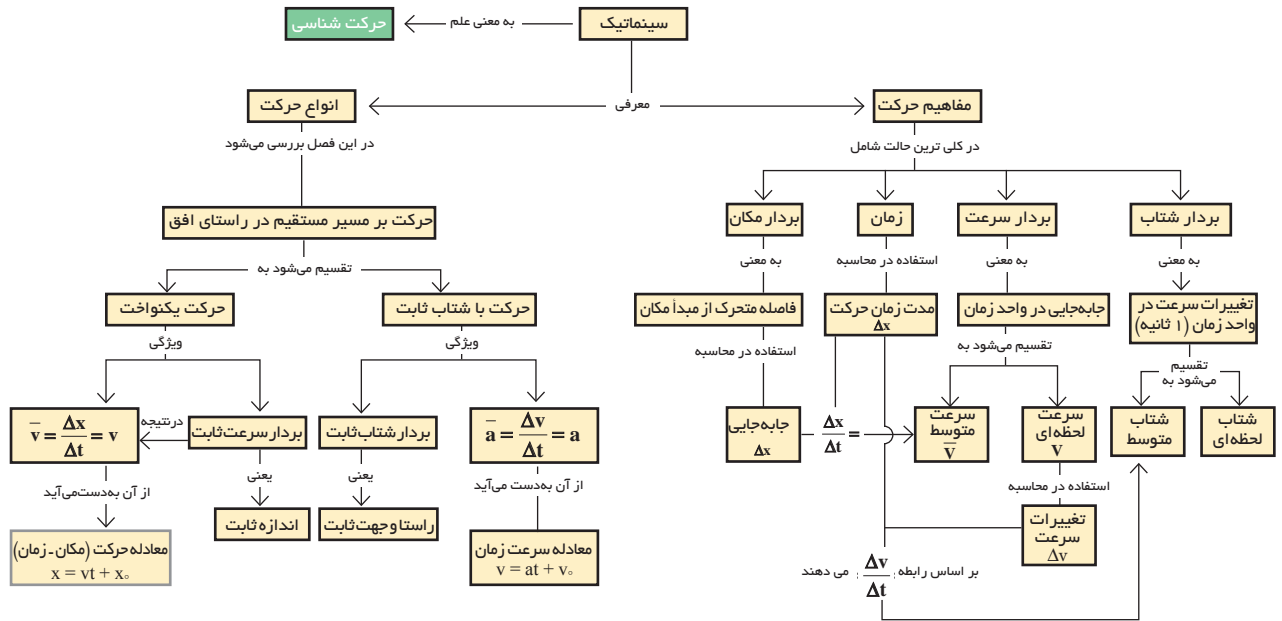


نمودار جسم آزاد

### نمودار جسم آزاد (Free body diagram)

نمودار جسم آزاد یا نمودار نیرو، نماد تصویری است که معمولاً برای تحلیل نیروهای وارد شده بر یک جسم، توسط فیزیک‌دان‌ها و مهندسان به کار می‌رود. در رسم نمودار جسم آزاد در یک مسئله، کافی است تمامی نیروهای خارجی وارد بر جسم را در یک دستگاه مختصات و با حفظ جهت و اندازه آنها رسم کنیم.





## چندپرسی

۱- هدف از رسم نمودار مسیر چیست؟ چگونه می‌توان از نمودار مسیر برای بررسی حرکت استفاده کرد؟

۲- چه تفاوتی بین کمیت‌های فیزیکی مکان، مسافت و جابه‌جایی وجود دارد؟

۳- حرکت یک چتر باز را در اثر نیروهای وارد بر آن در حالت‌های زیر توصیف کنید:

(الف) از لحظه پرش به بیرون از هواپیما تا قبل از باز کردن چتر

(ب) پس از باز کردن چتر

۴- شکل مقابل دو جعبه ساکن را نشان می‌دهد که روی میز قرار دارند. نیروهای وارد بر جعبه‌ها و میز را به طور جداگانه رسم کنید و سپس جسم‌ها را بر حسب نیروی عمودی تکیه‌گاه وارد بر آنها مرتب کنید.



۵- در شکل روبه‌رو صحنه برخورد دو خودرو را مشاهده می‌کنید، نیروی وارد شده از طرف خودروی A به B بیشتر است یا نیروی وارد شده از طرف خودرو B به A؟ علت پاسخ خود را شرح دهید.



۶- اسب درشکه را روی سطح افقی می‌کشد، و درشکه شتاب می‌گیرد، طبق قانون سوم نیوتن درشکه هم نیرویی برابر و در خلاف جهت به اسب وارد می‌کند. پس چرا درشکه شتاب می‌گیرد؟ آیا برابند نیروها در این حالت صفر نیست؟

## چندمسئله

۱- شما و دوستان هر کدام قصد دارید مسافت  $50 \text{ km}$  رانندگی کنید. شما با سرعت  $90 \text{ km/h}$  و دوستان با سرعت  $95 \text{ km/h}$  رانندگی می‌کنند. چه مدت دوست شما باید صبر کند تا شما نیز به پایان مسیر سفر خود برسید؟

۲- دوچرخه سواری با سرعت ثابت  $5 \text{ m/s}$  و از  $250 \text{ m}$  مبدأ مکان، شروع به حرکت می‌کند.

(الف) مکان دوچرخه را در پایان  $60 \text{ s}$  اول حرکت مشخص کنید.

(ب) جابه‌جایی از  $t_1 = 0$  تا  $t_2 = 60 \text{ s}$  چقدر بوده است؟

۳- شکل زیر قسمتی از مسیر حرکت یک خودرو را در جاده‌ای مستقیم با تقسیمات زمانی ۲s نشان می‌دهد. در چه لحظه‌ای این خودرو به  $220\text{ m}$  مبدأ می‌رسد؟ فاصله نقاط ۶۰ متر است.



۴- خودرویی به جرم  $873\text{ kg}$  از حالت سکون شروع به حرکت می‌کند و بعد از  $0.59\text{ s}$  سرعتش به  $\text{m/s}$   $26/3$  می‌رسد. شتاب حرکت خودرو ثابت است. بزرگی نیروی برآیند که در این مدت به خودرو وارد می‌شود چقدر است؟



۵- یک بالگرد به جرم  $4500\text{ kg}$  با شتاب  $2\text{ m/s}^2$  در حال بلند شدن از سطح زمین است. نیروی بالا برنده این بالگرد چقدر است؟ از مقاومت هوا صرف نظر کنید.

۶- جسمی به جرم  $50\text{ kg}$  بر روی سطح پوشیده از برف به صورت افقی کشیده می‌شود. اگر ضریب اصطکاک ایستایی  $0/3$  و ضریب اصطکاک جنبشی  $0/1$  باشد.

الف) اندازه نیروی وزن جسم چند نیوتن است؟

ب) چه اندازه نیرو لازم است تا جسم شروع به حرکت کند؟

پ) چه اندازه نیرو لازم است تا جسم با سرعت ثابت حرکت کند؟

ت) در هنگام حرکت، نیروی افقی وارد بر جسم چقدر باشد تا شتاب آن  $3\text{ m/s}^2$  شود؟

۷- در شکل زیر، دو ورزشکار قایقران را می‌بینید، که جرم یکی از آنها  $70\text{ kg}$  و جرم دیگر  $75\text{ kg}$  می‌باشد. قایقرانی که در جلو نشسته می‌تواند با پارو زدن به اندازه  $400\text{ N}$  و قایق رانی که در عقب قایق نشسته می‌تواند با پارو زدن  $420\text{ N}$  نیرو را برای جلو بردن قایق به آب وارد کند. اگر جرم این قایق کانو  $20\text{ kg}$  بوده و نیروی مقاومت آب در مقابل حرکت آن  $380\text{ N}$  باشد، شتاب اولیه این قایق را محاسبه کنید.



## پروژه پایانی



با استفاده از نرم‌افزار video point که در لوح فشرده همراه کتاب موجود است و آموخته‌های این فصل مقدار تقریبی ضریب اصطکاک بین لاستیک خودرو و کف خیابان را محاسبه کنید. برای این کار از دبیر خود کمک بگیرید.