

## فصل دوم

### دینامیک و حرکت دایره‌ای

۲-۱- قوانین حرکت نیوتون

۲-۲- معرفی برخی از نیروهای خاص

۲-۳- تکانه و قانون دوم نیوتون

۲-۴- حرکت دایره‌ای یکنواخت

۲-۵- نیروی گرانشی

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

## پیامدها

- دانش آموزان با درک مفاهیم این فصل :
- اثر نیرو بر یک جسم را می شناسند.
  - با مرکز جرم جسم آشنا می شوند.
  - قوانین حرکت نیوتون را می شناسند.
  - با حالت متوازن بودن نیروها آشنا می شوند.
  - با ویژگی لختی یک جسم آشنا می شوند.
  - با رابطه نیرو و شتاب آشنا می شوند.
  - با برخی از نیروها مانند وزن، مقاومت شاره، نیروی عمودی سطح، نیروی کشش نخ، نیروی اصطکاک و کشسانی آشنا می شوند.
  - نیروهای وارد بر یک جسم را رسم کرده و نیروی خالص وارد بر جسم را محاسبه می کنند.
  - با کمک قانون دوم نیوتون، شتاب یک جسم را محاسبه می کنند.
  - با تکانه و قانون دوم نیوتون بر حسب تکانه آشنا می شوند.
  - با کمک نمودار نیرو - زمان، تغییر تکانه یک جسم را تعیین می کنند.
  - با حرکت دایره ای یکنواخت و نیروی مرکزگرا و شتاب مرکزگرا آشنا می شوند.
  - با نیروی گرانشی و قانون گرانش آشنا می شوند.
  - وزن را براساس نیروی گرانش می شناسند.
  - شتاب گرانشی یک جسم را در اطراف زمین تعیین می کنند.

## چه شناختی مطلوب است؟

- اثر نیرو را که به صورت شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می دهد را می توان به مفهوم سرعت ربط داد و آن را به صورت خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.
- مفهوم متوازن بودن نیروهای وارد بر جسم را درک کند و بداند وقتی نیروهای وارد بر جسم متوازن اند، تغییری در سرعت جسم ایجاد نمی شود.
- براساس قانون اول نیوتون حالت سکون و سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند و یک جسم حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) بر آن وارد شود.
- مفهوم لختی و نقش کمربند ایمنی را درک کند و به ایمنی خود و دیگران اهمیت دهد.
- شتاب همواره در جهت نیروی خالص وارد بر جسم است نه در جهت حرکت جسم.
- $\vec{ma}$  نیرو نیست بلکه نیروی خالص وارد بر جسم برابر با حاصل ضرب جرم جسم در شتاب آن است.

- به کمک قانون دوم نیوتون می‌توان شتاب یک جسم را به دست آورد و سپس به کمک روابط حرکت می‌توان، سرعت، جابه‌جایی و ... را تعیین کرد.
- نیروی کنش و واکنش هم‌نوع، هم‌اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند و ممکن است منجر به اثرات متفاوتی شوند.
- نیروی کنش و واکنش ممکن است منجر به شتاب‌های متفاوتی بر جسم‌های اثرگذار شوند.
- با تشخیص نیروهای وارد بر جسم، نیروی خالص وارد بر جسم را تعیین کرده و از قانون دوم نیوتون شتاب جسم را تعیین کند.
- بر یک سیب هنگام آویزان بودن از درخت، هنگام سقوط و هنگام برخورد با زمین نیروی گرانشی (وزن) وارد می‌شود.
- نمودار تندی برحسب زمان یک چتر باز، بستگی به زمان بازکردن چتر، به شکل‌های متفاوتی رسم می‌شود.
- با در نظر گرفتن مقاومت هوا، دو جسم هم‌اندازه ولی با جرم‌های متفاوت، با شتاب‌های متفاوت سقوط می‌کنند. اما اگر از مقاومت هوا صرف‌نظر شود، شتاب سقوط همه اجسام یکسان خواهد بود.
- نیروی عمودی سطح، ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است.
- ترازوی فنری در آسانسور که شخص روی آن ایستاده است، در حالت‌های مختلف حرکت آسانسور، اعداد متفاوتی را برحسب نیوتون نشان می‌دهد.
- نیروی اصطکاک جنبشی و ایستایی را از هم تمیز می‌دهد و بسته به شرایط مسئله و براساس نیروهای وارد بر جسم، حرکت جسم را تحلیل و شتاب آن را تعیین می‌کند.
- آزمایش‌هایی برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی طراحی می‌کند.
- در نمودار نیروی کشسانی برحسب تغییر طول فنر، شیب نمودار برابر با ثابت فنر است و هرچه فنر سخت‌تر باشد، شیب نمودار بیشتر است.
- نیروی سطح از برابند نیروی عمودی سطح و نیروی اصطکاک که عمود بر هم هستند، تعیین می‌شود.
- از روی نمودار نیرو-زمان، تغییر تکانه یک جسم و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را تعیین کند.
- در حرکت دایره‌ای یکنواخت، با دانستن دوره حرکت و شعاع دایره، تندی و شتاب مرکزگرا را تعیین می‌کند.
- نیروی مرکزگرا، نوع جدیدی از نیرو نیست؛ مثلاً در حرکت ماهواره‌ها به دور زمین، نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، نیروی مرکزگرا را تأمین می‌کند.
- در حرکت خودرو در یک میدان، نیروی اصطکاک ایستایی بین لاستیک‌ها و سطح، نیروی مرکزگرای لازم برای دور زدن خودرو را تأمین می‌کند.
- منشأ نیروی مرکزگرایی که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود و نیرویی که سبب سقوط سیب از درخت به طرف زمین می‌شود، یکی است.
- نیروی گرانشی بین دو ذره، از یک رابطه نسبتاً ساده تعیین می‌شود و نیروی گرانشی همواره ربایشی است و مقدار آن برای حالتی که جرم یکی از اجسام یا هر دو جسم زیاد باشد، قابل ملاحظه است.
- دوره و فاصله مدار همگام با زمین را تعیین کند.
- وزن و شتاب گرانشی را برحسب نیروی گرانشی تعیین کند.

## چه پرسش‌هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شود؟

- اگر بر جسمی نیرویی وارد نشود یا نیروهای وارد بر جسم متوازن باشد، حرکت جسم چگونه است؟
- شتاب یک جسم در چه جهتی است؟
- آیا نیروی کنش و واکنش اثر هم را خنثی می‌کنند؟
- آیا نیروی کنش و واکنش منجر به شتاب‌های یکسانی می‌شوند؟
- آیا وزن یک جسم در زمین و ماه یکسان است؟ جرم آن چگونه؟
- حرکت یک چتر باز چگونه است؟ نمودار تندی – زمان آن چگونه است؟ و در چه حالتی به تندی حدی می‌رسد؟
- اگر دو جسم هم‌اندازه با جرم‌های متفاوت را از ارتفاعی رها کنیم، شتاب سقوط کدام یک بیشتر است؟ اگر از مقاومت هوا صرف نظر شود شتاب سقوط آنها چگونه است؟
- شخصی روی ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در چه حالت‌هایی، عددی که ترازو نشان می‌دهد، یکسان است؟
- ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را چگونه تعیین می‌کنند؟ (با آزمایش)
- وقتی بر جسمی چند نیرو اثر می‌کند، شتاب آن را چگونه تعیین می‌کنند؟
- چگونه می‌توان ثابت فنر را تعیین کرد؟ (با آزمایش)
- چگونه می‌توان از روی تغییر تکانه، نیروی خالص متوسط وارد بر جسم را تعیین کرد؟
- چگونه می‌توان به کمک شعاع و دوره حرکت یک جسم، تندی و شتاب مرکزگرای آن را تعیین کرد؟
- چگونه با مشخصه rpm می‌توان دوره یک جسم را تعیین کرد؟
- ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیرویی به دور زمین می‌چرخند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد، حرکت آنها چگونه خواهد بود؟ دوره ماهواره و تندی آن چگونه تعیین می‌شود؟
- وزن یک جسم و شتاب آن را در ارتفاع مشخصی از سطح زمین چگونه تعیین می‌کنند؟

## در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

### دانشی

با مفاهیم نیرو، مرکز جرم، متوازن بودن نیروها، لختی، قانون اول نیوتون، نیروی خالص، قانون دوم نیوتون، نیروهای کنش و واکنش، قانون سوم نیوتون، وزن، نیروی مقاومت شاره، نیروی مقاومت هوا، تندی حدی، نیروی عمودی سطح، نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک، نیروی کشسانی فنر، قانون هوک، نیروی کشش طناب، تکانه، رابطه تکانه با قانون دوم نیوتون، رابطه تکانه با انرژی جنبشی، حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب و نیروی مرکزگرا در حرکت دایره‌ای یکنواخت، نیروی گرانشی، قانون گرانش عمومی، مدار همگام با زمین، وزن و نیروی گرانشی و شتاب گرانشی آشنا می‌شوند.

### مهارتی

تعیین تغییرات حرکت یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، محاسبه شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، تعیین جهت شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، محاسبه وزن جسم، محاسبه نیروی عمودی سطح و نیروی سطح، محاسبه

نیروی اصطکاک، محاسبه نیروی کشسانی، تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی به کمک آزمایش، تعیین ثابت فنر به کمک آزمایشگاه، تعیین نیروی اصطکاک به کمک آزمایش، تحقیق بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک به مساحت سطح تماس دو جسم، محاسبه ثابت فنر از روی نمودار نیروی کشسانی- تغییر طول، تعیین مساحت زیر نمودار نیروی خالص- زمان، تعیین دوره و تندی و شتاب مرکزگرا، محاسبه نیروی گرانش بین دو جسم، تعیین فاصله مدار همگام با زمین، محاسبه وزن و شتاب گرانشی یک جسم در یک ارتفاع مشخص از سطح زمین یا روی سطح سیارات دیگر.

## بودجه‌بندی پیشنهادی

براساس حجم و تعداد مفاهیم موجود در این فصل می‌توان ۲۰/۵ درصد از زمان آموزش کل کتاب را به آموزش این فصل اختصاص داد.

تصویر ابتدای هر فصل برای ایجاد انگیزه و سؤال استفاده می‌شود. معمولاً این تصویر یک کاربرد امروزی از موضوع فصل را ارائه می‌دهد. در متن زیر تصویر، چندین مطلب و سؤال ارائه شده است.

۱ چگونه یک ماهواره در زمان‌هایی طولانی می‌تواند بدون سوخت به دور زمین بچرخد؟

۲ نیروی مرکزگرایی لازم برای چرخش ماهواره چگونه تأمین می‌شود؟

۳ اگر نیروی مرکزگرا وجود نداشت حرکت ماهواره چگونه بود؟

۴ نیروی گرانشی وارد بر ماهواره چگونه به دست می‌آید؟

۵ زمان یک دور چرخش ماهواره چگونه محاسبه می‌شود؟

۶ تندی یک ماهواره در یک مدار چگونه محاسبه می‌شود؟

در پایان این فصل دانش‌آموزان به دانش و توانایی لازم برای پاسخ دادن به این سؤالات خواهند رسید.



**پیشگفتار**

۱- قوانین حرکت نیوتون  
۲- معرفی برخی از تئوری‌های خاص  
۳- نکته و قانون دوم نیوتون  
۴- حرکت دایره‌ای یکسان  
۵- نیروی گرانشی

**دینامیک و حرکت دایره‌ای**

۲ فصل

امروزه تعداد زیادی ماهواره در مدارهای به دور زمین می‌چرخند. بدون آنکه چرخش آنها به سوخت نیاز داشته باشند. این مدارها ظاهراً دایره‌ای اند و زمین در مرکز آنها قرار دارد. آیا می‌تواند ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیروی در مدار خود باقی می‌مانند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد حرکت آنها چگونه خواهد شد؟ با مطالعه این فصل می‌توانید به این نوع پرسش‌ها پاسخ دهید و حتی می‌توانید زمان یک دور چرخش و تندی ماهواره را در یک مدار تعیین کنید.

این فصل در ۵ بخش ارائه شده است. تا قبل از آموزش بخش ۲، یعنی معرفی برخی از نیروهای خاص، هر مثال یا تمرینی که به دانش آموز داده می شود باید نیروهای وارد بر جسم رسم شده باشد، زیرا هنوز دانش آموزان توانایی لازم برای رسم نیروها را ندارند.

دانش آموزان در علوم ششم ابتدایی، دو فصل در مورد نیرو خوانده اند. همچنین در علوم نهم یک فصل در مورد نیرو و یک فصل در مورد ماشین ها خوانده اند. در فصل نیرو و ماشین های نهم با اثرات نیرو (شروع به حرکت، توقف حرکت، تند و کند شدن حرکت، تغییر جهت حرکت و تغییر شکل) آشنا شدند.

با توجه به آنچه در فصل ۱ این کتاب در مورد سرعت خوانده اند این اثرات را می توانند به صورت خلاصه بیان کنند. یعنی اثر نیروی وارد بر یک جسم می تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود. در این صفحه از کتاب سعی می شود پلی بین آنچه دانش آموزان پیش از این در مورد نیرو خوانده اند و مطالب جدیدتر برقرار کنیم. به همین دلیل این صفحه از اهمیت زیادی برخوردار است و سبب یادآوری مطالب سال های گذشته در مورد نیرو می شود؛ مثلاً: نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است یا نیرو، حاصل بر هم کش دو جسم بر یکدیگر است یا وقتی جسمی را هل می دهیم یا می کشیم بر آن نیرو وارد می کنیم. در حاشیه کتاب مرکز جرم جسم معرفی شده است که به دانش آموزان کمک می کند تا بفهمند چرا معمولاً نیروی وارد بر جسم را از مرکز جرم جسم می کشیم.

## ۱-۲- قوانین حرکت نیوتون

در این صفحه همچنین به بردار بودن نیرو و وسیله ای که با آن می توان نیرو را اندازه گیری کرد، اشاره شده است. توجه کنید در این کتاب سعی شده است از آخرین استانداردهای آموزش فیزیک در انتخاب تعاریف، قوانین، اصل ها، نمادگذاری ها و... استفاده شود. علت متفاوت بودن برخی قوانین یا تعاریف آورده شده در این کتاب با کتاب های قبلی، همین استانداردهای جدید است؛ مثلاً نمادگذاری نیروی عمودی سطح در کتاب های جدید به صورت  $F_N$ ، نیروی مقاومت شاره و هوا به صورت  $F_D$ ، نیروی کشسانی  $F_e$ ، نیروی خالص  $F_{net}$  و... است.

تحقیقات آموزشی نشان می دهد قبل از آنکه وارد بحث قوانین حرکت شویم بهتر است حالتی که بر یک جسم هم زمان چند نیرو اثر می کنند و این نیروها اثر همدیگر را خنثی می کنند به عبارت دیگر نیروها متوازن اند، بحث شود. در مورد حالت نیروهای متوازن در علوم نهم به اندازه کافی دانش آموزان مطالبی را خوانده اند: کافی است در اینجا فقط یادآوری هایی صورت گیرد.

شکل ۱-۱



در تمام حالت های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گونی، همراه نشستن و دوچرخه سواری نمونه هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و... بدون اعمال نیرو انجام نمی شوند.

در فصل اول با کشتی های ماکان، تند، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، برشی 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 می ماند؟ و...

وقتی جسمی را می کشیم یا آن را هل می دهیم، به آن نیرو وارد می کنیم. نیرو، حاصل برهم کنش با اثر مطلق دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کینتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۱-۲). معمولاً نیرو را با  $F$  نشان می دهند. در رسم نیرو از یک پاره خط جهت دار با مقیاس مناسب استفاده می شود، مثلاً در شکل ۱-۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می کنید که با مقیاس مناسب رسم شده اند.

نیرو را به کمک تروسنج اندازه گیری می کنیم و بکای آن، نیوتون است که با نماد  $N$  نشان داده می شود. اثر نیرو بر یک جسم به شکل های 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 می دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می توان به طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به طور کلی در این فصل می خواهیم درباره نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند، قوانین حرکت و حرکت را به بحث بکشیم. 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 می دهیم تا توانایی درک شتاب در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید بر اساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.



شکل ۱-۲ کای رای ماکان فرض می شود که تمام یک جسم بر یک نقطه متمرکز جرم متمرکز است و بهای آنکه نیرو به فستهای مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می شود.

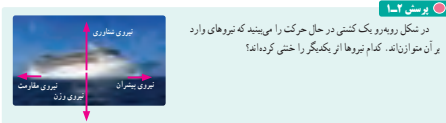
### ۱-۲-۱ قوانین حرکت نیوتون

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

**قانون اول نیوتون:** در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به طور هم زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برایش نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۳-۱-۲-۱ نیروهای کششی  $F_{کششی}$  متعادل می شود.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای



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 غیرصفری به آن وارد نشده». 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.

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

دربارۀ 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 کمرتند خود را پشته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (مثالی شود). 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» گویند.

## پاسخ پرسش ۱-۲

این پرسش برای یادآوری حالت متوازن در نیروهاست؛ چون نیروها هم راستا و عمود بر هم هستند، پاسخ به آن بسیار ساده است. نیروی شناوری اثر نیروی وزن را و نیروی مقاومت اثر نیروی پیشران را خنثی می‌کند.

تعریف ارائه شده برای قانون اول نیوتون براساس استانداردهای جدید ارائه شده است. بهتر است همکاران محترم در ارائه تعاریف، اصل‌ها، نظریه‌ها و قانون‌های فیزیکی کاملاً به کتاب‌درسی پایبند باشند تا خدای نکرده حقی از دانش‌آموزان در آزمون‌های رسمی مانند امتحانات نهایی و کنکور ضایع نشود.

در آموزش قانون اول نیوتون به نقش اساسی گالیله در این قانون اشاره شود. این نقش آن قدر مهم است که در برخی از کتاب‌های دنیا به قانون اول حرکت نیوتون قانون گالیله نیز می‌گویند. آزمایش‌های فکری - عملی گالیله نقش بسیار جدی برای رسیدن به این قانون داشتند. از قانون اول نیوتون نتیجه می‌گیریم: از نظر فیزیک، حالت سکون و حالت با سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند.

## پاسخ پرسش ۲-۲

هدف از این پرسش گسترش آموخته‌های دانش‌آموزان به دنیای واقعی آنهاست. دانش‌آموزان حتی وقتی یک کارتون را می‌بینند، باید با نگاهی علمی آن را تجزیه و تحلیل کنند و بتوانند تشخیص دهند که آنچه می‌بینند واقعی باشد یا نه؟ در صورت این پرسش به «فضای تهی خارج از جو» و همچنین «دور از هر سیاره و خورشید» اشاره شده است، با توجه به این مطالب باید دانش‌آموز نتیجه بگیرد که نیروی مقاومت هوا که بخواهد در خلاف جهت حرکت بر سفینه وارد شود، وجود ندارد. همچنین دور بودن از هر سیاره و خورشید معادل (تقریبی) صفر بودن نیروی گرانشی وارد بر سفینه است. پس این سفینه با خاموش شدن موتورش، به راه خودش با همان سرعت هنگام خاموش شدن موتور ادامه می‌دهد، زیرا بر سفینه نیرویی وارد نمی‌شود.



## پرسش ۱-۱



در شکل رویه‌رو 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 غیرصفری به آن وارد نشود». 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.

## پرسش ۲-۱

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

## نکات 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 ایستاده بایستید و تماشا کنید خود را ایستاده، ممکن است به جلو برتاب شوید (شمالی شوید). با اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان ترمز به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود می‌خورید. 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' گویند.

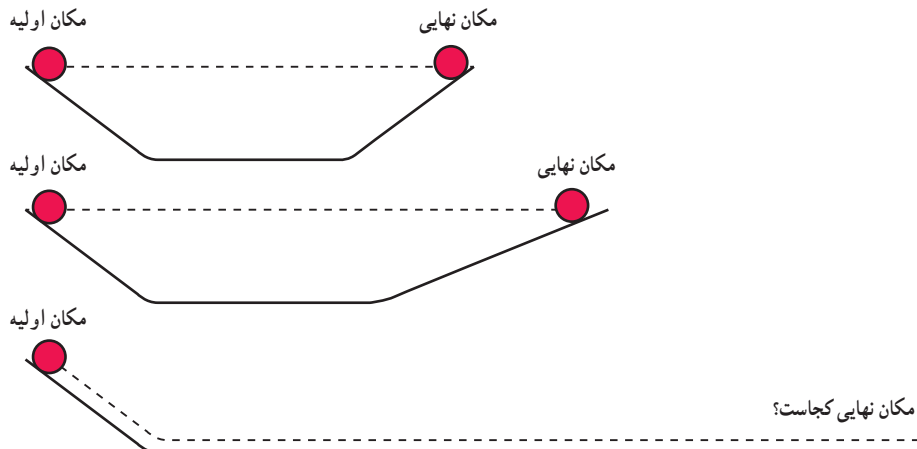
۱-۱۰۱۱۱۱۱۱

## پاسخ فعالیت ۱-۲

این آزمایش ذهنی، کمک زیادی کرد تا نیوتون قانون اول را بیان کند. دانستنی زیر کمک می‌کند تا در مورد آنچه دانش آموزان قرار است تحقیق کنند، بیشتر بدانیم.

گالیله طبق شکل‌های زیر، گوی‌ها را در ارتفاع معینی روی سطح شیب‌دار صافی قرار داد و آنها را رها کرد تا به پایین بلغزند و از سطح شیب‌دار روبه‌روی بالا روند. او تا حد امکان سطوح تماس را صاف و صیقلی کرد. وی دریافت که گوی تا نزدیکی همان ارتفاع روی سطح شیب‌دار مقابل بالا می‌رود. گالیله شیب‌های مختلفی را برای سطح شیب‌دار دوم اختیار کرد و همان نتیجه را به دست آورد. بدیهی است که هر چه شیب سطح شیب‌دار دوم کمتر باشد، جسم برای رسیدن به همان ارتفاع مسافت بیشتری را روی سطح شیب‌دار می‌پیماید. وی استدلال کرد که اگر بتوان از اصطکاک صرف‌نظر کرد، جسم روی سطح شیب‌دار دوم تا همان ارتفاع اولیه بالا می‌رود. حال اگر شیب سطح دوم صفر شود یعنی سطح افقی باشد جسم باید برای همیشه روی آن با سرعت ثابت حرکت کند.

گالیله از این آزمایش فکری - عملی نتیجه گرفت که برای حرکت یکنواخت جسم روی خط راست نیازی به وارد کردن نیرو به جسم نیست.



## دانستنی در مورد لختی

جرم یک جسم معیاری از مقدار لختی جسم در برابر تغییر حرکت است. هر چه جرم یک جسم بیشتر باشد، بر اثر اعمال نیروی ثابت و معین شتاب کمتری می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم یکای جرم جسم در  $SI$ ، کیلوگرم (kg) است و جرم کمیته نرده‌ای که از قواعد حساب معمولی پیروی می‌کند.

پاراگراف آخر این صفحه (صفحه ۳۱ کتاب درسی) از اهمیت خاصی برخوردار است. این بحث را می‌توان کمی گسترش داد و به اهداف نگرشی در مورد بستن کمربند ایمنی و نقش آن در کاهش خسارت‌های جانی ناشی از تصادفات اشاره کرد. در پایان این بحث دانش‌آموزان به این نتیجه برسند که بستن کمربند ایمنی یک انتخاب نیست بلکه یک ضرورت است. برای لختی مثال خیلی مرسوم ظرف شُس است که سس آن بسیار کم شده است و آن را با سرعت زیاد به طرف پائین حرکت داده و ناگهان آن را متوقف می‌کنیم و محتویات داخل ظرف به علت لختی به طرف دهانه ظرف سس حرکت می‌کنند. یا کشاورزان و کارگران با ضربه زدن به انتهای دسته بیل یا کلنگ به زمین سبب سفت شدن بیل به دسته یا کلنگ می‌شوند.

## پاسخ پرسش ۳-۲

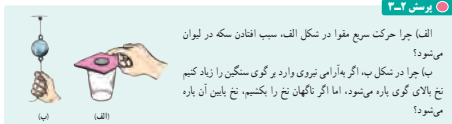
هدف این پرسش ارائه چند مثال از پدیده لختی است.

(الف) سکه تمایل دارد حالت سکون خود را براساس لختی حفظ کند. بنابراین وقتی وقتی مقوا سریع کشیده می‌شود (تغییر تکانه وارد به سکه نیز کم بوده  $F\Delta t = \Delta P$ ) سکه در لیوان می‌افتد.

(ب) کشش نخ در بالای گوی هم‌اندازه با وزن گوی و نیرویی است که دست وارد می‌کند اما کشش نخ در پایین گوی هم‌اندازه با نیرویی است که دست وارد می‌کند. پس در حالت معمولی کشش در بالای گوی بیشتر از پایین گوی است. حال فرض کنید ناگهان نخ را با نیروی زیادی بکشیم، قبل از آنکه تأثیر نیروی دست به علت وجود گوی به نخ بالای گوی برسد، قسمت پایین نخ این کشش را پیدا می‌کند و اگر این نیرو بیشتر از حدی باشد که نخ می‌تواند تحمل کند، نخ از پایین پاره می‌شود. بنابراین نقش لختی گوی را در این مثال می‌توان ملاحظه کرد.

فیزيكا ۳۳

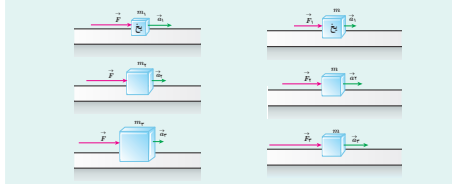
## پرسش ۳-۲



**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 ۴-۱

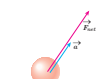
در شکل‌های زیر، قطعه‌های راوی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. استنباط خود را از این شکل‌ها بیان کنید.



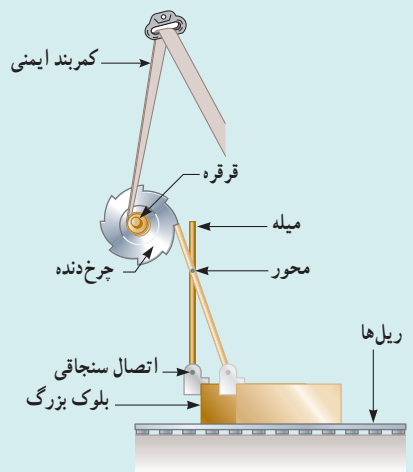
مشاهدات مختلف نشان می‌دهد، هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگ‌تر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معین، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

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 ۳۴-۱ شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر آن (F) است.



آرایش مکانیکی برای کمر بند ایمنی خودرو

**کاربرد لختی در طراحی و ساخت دستگاه کمر بند ایمنی**

می‌توان از لختی برای توصیف عملکرد یک نوع از سازوکار کمر بندهای ایمنی خودروها استفاده کرد. در صورت وقوع تصادف، هدف کمر بند ایمنی محکم نگه داشتن مسافر در جای خود نسبت به خودرو است تا مانع از جراحت جدی شود. شکل رویه‌رو نشان می‌دهد کمر بندی که از روی شانه گذرد چگونه کار می‌کند. در شرایط عادی، چرخ دنده آزادانه می‌چرخد تا با حرکت مسافر کمر بند دور قرقره پیچ بخورد یا باز شود. هنگام تصادف خودرو با شتاب زیاد متوقف می‌شود. بلوک بزرگ زیر صندلی به واسطه لختی، به حرکت رو به جلو در امتداد ریل‌ها ادامه می‌دهد. اتصال سنجاقی بین این بلوک و میل به باعث می‌شود که میل دور مرکزش بچرخد و چرخ دنده را درگیر کند. در این مرحله، چرخ دنده در جای خود قفل شده و کمر بند دیگر باز نمی‌شود.

تا اینجا در مورد حالت‌هایی بحث شد که نیروهای وارد بر جسم متوازن بوده‌اند. از اینجا به بعد به حالت‌هایی می‌پردازیم که نیروهای وارد بر جسم متوازن نیستند و بر جسم نیروی خالصی وارد می‌شود. توجه داریم دانش‌آموزان در علوم نهم با قانون دوم نیوتون آشنا شده‌اند. در اینجا به کمک پرسش ۲-۴ می‌توان فرصتی دوباره به دانش‌آموزان داد تا خودشان بتوانند قانون دوم را کشف کنند.

### پاسخ پرسش ۲-۴

از این شکل‌ها می‌توان استنباط کرد که: ۱- در همه حالت‌ها که بر جسم نیرو وارد شده، جسم نیز شتاب پیدا کرده است. ۲- در همه حالت‌ها، شتاب در جهت نیروی وارد بر جسم است. ۳- از شکل‌های ستون اول نتیجه می‌گیریم که وقتی جرم ثابت است، با افزایش نیرو، شتاب نیز به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند. ۴- از شکل‌های ستون دوم نتیجه می‌گیریم که وقتی نیرو ثابت است؛ با افزایش جرم، شتاب جسم کاهش پیدا می‌کند.

با جمع‌بندی این نتایج می‌توان دانش‌آموزان را به بیان قانون دوم نیوتون راهنمایی کرد. توجه شود که قانون دوم نیوتون براساس نیروی خالص بیان شده است نه براساس نیروی برآیند (هر چند این دو معادل یکدیگر هستند اما نیروی خالص برای دانش‌آموزان قابل فهم‌تر است).

تورک ۳۳

**پرسش ۲-۴**

الف) چرا حرکت سریع متوازی در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟  
 ب) چرا در شکل ب، اگر به آرامی نیرو وارد بر گوی سبکین را زیاد کنیم، نخ بالای گوی باره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن باره می‌شود؟

**قانون دوم نیوتون:** قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالصی 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، قطعه‌ها 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:

**قانون دوم نیوتون:** شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر آن (F) است.

۴۲

فصل ۱۸: دینامیک و حرکت دایره‌ای

نسبت وارون دارد.

و یا:

(۱۳-۲)  $\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$  (قانون دوم نیوتون)

توجه: در رابطه ۱۳-۲،  $\vec{F}_{\text{net}}$  نیروی خالص است. به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی خالص  $800\text{ N}$  به طرف جلو بر فانی وارد می‌کند. (الف) شتاب این فانی چقدر و در چه جهتی است؟ (ب) اگر نیروی پشتران در یک لحظه  $1200\text{ N}$  باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

نیروی موتور یک فانی موتوری که جرم آن با سرشتیش  $400\text{ kg}$  است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی خالص  $800\text{ N}$  به طرف جلو بر فانی وارد می‌کند. (الف) شتاب این فانی چقدر و در چه جهتی است؟ (ب) اگر نیروی پشتران در یک لحظه  $1200\text{ N}$  باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

با چقدر طول می‌کشد تا سرعت فانی از حالت سکون به  $150\text{ m/s}$  برسد؟ در این مدت فانی چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ: (الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب فانی استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه فانی در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند، می‌توان رابطه ۱۳-۲ را برای یک راستا به صورت  $a = \frac{F_{\text{net}}}{m}$  نوشت:

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

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

پس با نیروی پشتران و مقاومت در یک راستا هستند، بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{\text{net}} = F_{\text{پشتران}} - F_{\text{مقاومت}} \Rightarrow 800\text{ N} = 1200\text{ N} - F_{\text{مقاومت}}$$

$$F_{\text{مقاومت}} = 1200\text{ N} - 800\text{ N} = 400\text{ N}$$

(ب) از رابطه سرعت - زمان و سرعت - جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می‌کنیم.

$$v = at + v_i \Rightarrow 150\text{ m/s} = (2\text{ m/s}^2)t + 0\text{ m/s} \Rightarrow t = 75\text{ s}$$

$$v^2 = v_i^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_i^2}{2a} = \frac{(150\text{ m/s})^2 - (0\text{ m/s})^2}{2(2\text{ m/s}^2)} = 5625\text{ m}$$

به این ترتیب با داشتن نیروی خالص می‌توانیم کمیت‌های شتاب، سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را بدست آوریم.

(۱۳-۲) در زمان نگه‌داری به معنی خالص است.

در این کتاب سعی شده است؛ هر رابطه شماره داری داده می‌شود در جلوی رابطه توضیحی در مورد آن رابطه بیاید.

توجهی که در سمت چپ این صفحه آمده است مربوط به کج فهمی رایج بین دانش‌آموزان است. بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند  $m\vec{a}$  نیرو است.

بهتر است بعد از آموزش قانون دوم و حل چند مثال، این کج فهمی را برای دانش‌آموزان باز کرده و توضیح لازم را به آنها ارائه دهیم.

می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم یکای نیوتون را برحسب یکاهای بنیادی جرم، طول و زمان بنویسند.

$$1\text{ N} = (1\text{ kg})(1\text{ m/s}^2) \Rightarrow 1\text{ N} \equiv 1\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$$

### توجه

در این بخش چون هنوز دانش‌آموزان با نیروهای مختلف آشنا نیستند باید در مثال‌ها نیروهای وارد بر جسم را به دانش‌آموزان بدهیم. بعد از آموزش بخش بعدی (معرفی برخی از نیروهای خاص)، می‌توان از دانش‌آموزان خواست نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنند.

### مثال ۱۳-۲

در این مثال نیروهای وارد بر قایق در راستای افقی، رسم شده است. فقط از دانش‌آموزان می‌خواهیم شتاب را براساس این نیروها به دست آورند. ضمناً در قسمت پ از دانش‌آموزان خواستیم که سرعت و جابه‌جایی را به دست آورند. یعنی در اولین مثال محاسباتی این فصل بین نیرو و حرکت ارتباط را برقرار می‌کند و از دانش‌آموزان خواسته می‌شود براساس شتاب به دست آمده، سرعت و جابه‌جایی را محاسبه کنند. به عبارت دیگر با داشتن نیروی خالص می‌توانیم علاوه بر کمیت شتاب، کمیت‌های سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را نیز به دست آوریم.

### توجه

نیرو باعث تغییر حرکت می‌شود. حرکت حتی در نبود نیروها هم صورت می‌گیرد. اما نیروی خالص سبب تغییر حرکت می‌شود.

### توجه

قانون دوم نیوتون معادله‌ای برداری است. در استفاده از قانون دوم نیوتون نیروی خالص را به دست آورده و آن را تقسیم بر جرم جسم می‌کنیم. تک تک نیروها را به صورت نرده‌ای با هم جمع نمی‌کنیم.

شکل روبرو نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم ۰.۴۲ کیلوگرم را در بالاترین نقطه مسیرش نشان می‌دهد که در آن  $\vec{F}_1$  نیروی مقاومت هوا و  $\vec{F}_2$  وزن توپ است. جهت وزنی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌نمود.

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

قانون سوم نیوتون: وقتی قری را می‌کنید، قری نیز شما را می‌کند. در برخورد راکت با توپ تیس، 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 آهن‌ریا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲-۳). در این مثال‌ها نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است.

**واکنش نامیده می‌شود.** قانون سوم نیوتون رابطه‌ای 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 نیروی 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:

(۲-۳)  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21}$  (قانون سوم نیوتون)

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعاتی 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 ۲-۴).

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

(۱- بررسی حالت‌های که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم هستند خارج از رفته‌اند و در کتاب آشنایان و بهاء مورد ارزشی قرار گیرد.)

بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند جهت نیروی خالص و شتاب حرکت با جهت حرکت یکی است. این مثال این کج فهمی رایج بین دانش‌آموزان را می‌تواند اصلاح کند.

بهتر است توجه دانش‌آموزان را به جهت حرکت، جهت نیروی خالص و جهت شتاب جلب کنیم.

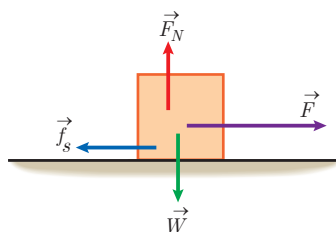
همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، نیروهای وارد بر توپ توسط مؤلف داده شده است. البته بعد از معرفی نیروهای خاص، دانش‌آموزان خودشان می‌توانند این نیروها را رسم کنند.

تصویرهای داده شده در شکل ۲-۴ نیروهای کنش و واکنش را برای حالت غیرتماسی نشان می‌دهد، اما شکل ۲-۵ نیروی کنش و واکنش را برای نیروهای تماسی رسم کرده است.

دانش‌آموزان در علوم نهم با قانون سوم نیوتون آشنا شده‌اند، اما در اینجا انتظار می‌رود به شکل گسترده‌تر و عمیق‌تر با این قانون آشنا شوند.

نظر دانش‌آموزان را باید به این نکته کتاب جلب کرد که نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی می‌شوند؛ مثلاً هنگام قدم زدن پای جلویی ما زمین را به عقب هل می‌دهد و زمین ما را به جلو هل می‌دهد. یا هنگام دوچرخه‌سواری، چرخ عقبی (در اثر اصطکاک بین چرخ و زمین) زمین را به عقب هل می‌دهد و زمین چرخ را به جلو هل می‌دهد و ...

برای ۲ سطر آخر این صفحه که در مورد «همنوع بودن نیروی کنش و واکنش» بحث می‌کند، می‌توان مثال‌های زیادی آورد. مثلاً در شکل زیر نیروی عمودی سطح نمی‌تواند واکنش وزن باشد، زیرا نیروی عمودی از نوع الکترومغناطیسی است، اما وزن از نوع نیروی گرانشی است. یا نیروی کنش و واکنش بر یک جسم وارد شده‌اند، پس نمی‌توانند این دو کنش و واکنش یکدیگر باشند.

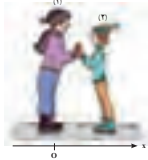


## توجه مهم

در زیرنویس صفحه ۳۴ کتاب درسی نوشته شده است که: «بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامه درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد». از این زیرنویس نتیجه می‌شود که کلیه مسئله‌هایی که برای تجزیه و تحلیل آنها نیاز به تجزیه نیروها وجود دارد، خارج از برنامه درسی محسوب می‌شود و همچنین تمام حالت‌هایی که برای به دست آوردن نیروی خالص باید از رابطه  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$  استفاده شود (به جز حالت‌هایی که زاویه  $\alpha$  برابر صفر یا  $90^\circ$  یا  $180^\circ$  است) خارج از برنامه کتاب درسی محسوب می‌شود.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

## مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های  $75/0 \text{ kg}$  و  $50/0 \text{ kg}$  با کفش‌های چرخ‌دار در یک سطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی  $100/0 \text{ N}$  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 نیروی که شخص اول به دوم وارد می‌کند ( $F_{12}$ )، هم‌اندازه و در خلاف جهت نیروی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند ( $F_{21}$ ). با انتخاب جهت مثبت محور  $x$  به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100/0 \text{ N} \\ \vec{a}_2 &= \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{50/0 \text{ kg}} = (2/0 \text{ m/s}^2) \hat{i} \\ \vec{a}_1 &= \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{75/0 \text{ kg}} = -(1/33 \text{ m/s}^2) \hat{i} \end{aligned}$$

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

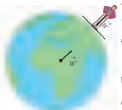
## پرسش ۳-۲

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

## ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

با به قانون دوم نیوتون ( $\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$ ) 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 خواندید وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۲). 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:



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

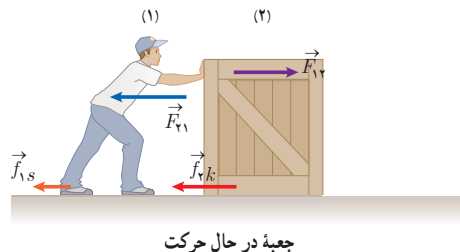
$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (2-2)$$

۳۵

یک کج فهمی رایج در بین دانش‌آموزان این است که فکر می‌کنند چون نیروی کنش و واکنش هم‌اندازه (نه برابر یا یکسان) هستند، بنابراین این نیروها همواره منجر به شتاب‌هایی هم‌اندازه می‌شوند. حل مثال ۳-۲ و تحلیل آن منجر به اصلاح این کج فهمی می‌شود.

## پاسخ پرسش ۵-۲

شخص (۱) به جسم (۲) نیروی  $\vec{F}_{12}$  را وارد می‌کند و جسم به شخص نیروی هم‌اندازه اما در خلاف جهت  $\vec{F}_{21}$  را وارد می‌کند. این دو نیرو (کنش و واکنش) به دو جسم متفاوت وارد می‌شود بنابراین، این دو نیرو همدیگر را خنثی نمی‌کنند. وقتی  $F_{12} > f_{1k}$  باشد، جعبه به طرف راست شتاب می‌گیرد. توجه داریم به شخص در راستای افقی دو نیروی اصطکاک  $f_{1s}$  و  $F_{21}$  وارد می‌شود و برای آنکه شخص بتواند جعبه را هل دهد باید:  $F_{12} \leq f_{1s\text{max}}$  باشد.



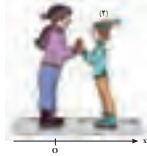
جعبه در حال حرکت

(ب) با توجه به اینکه جرم خودروی سواری کمتر از جرم کامیون است، بنابراین با نیرویی هم اندازه، شتاب خودروی سواری بیشتر از کامیون است.

در بخش معرفی برخی نیروها از دانش سال‌های پیش دانش‌آموزان و آنچه در دو فصل قبلی خوانده‌اند استفاده می‌کنیم (بالاخص قانون دوم نیوتون).

فصل ۲، دینامیک و حرکت دایره‌ای

### مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های  $75\text{ kg}$  و  $50\text{ kg}$  با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی  $100\text{ N}$  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  $(\vec{F}_{12})$  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:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100\text{ N} \\ a_2 &= \frac{F_{12}}{m} = \frac{(100\text{ N})\hat{i}}{50\text{ kg}} = (2\text{ m/s}^2)\hat{i} \\ a_1 &= \frac{F_{21}}{m} = \frac{-(100\text{ N})\hat{i}}{75\text{ kg}} = -(1.33\text{ m/s}^2)\hat{i}\end{aligned}$$

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

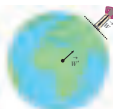
### پرسش ۳-۱

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

### ۲-۳ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون  $(\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a})$  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 نیروهای را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن: همان‌طور که در علوم هتم خوانیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۳). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین 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:



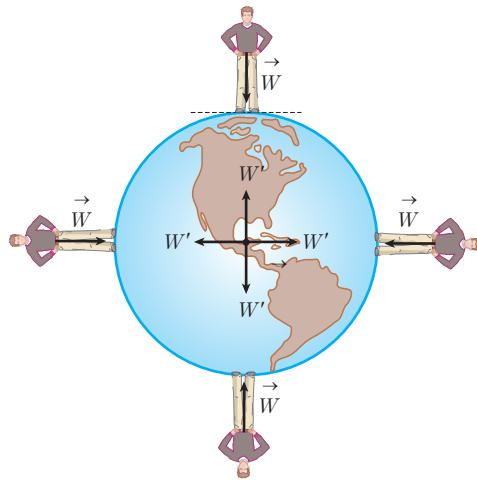
شکل ۲-۳: وزن جسم نیروی گرانشی است که از طرف زمین وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی  $(\vec{W})$  وارد می‌کند.

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

$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (2-3)$$

## ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

دانش‌آموزان با نیروی وزن کاملاً آشنا هستند. کج فهمی رایج در مورد شکل ۲-۳ آن است که اگر آدمک را زیر کره بکشیم بسیاری از دانش‌آموزان وزن را به طرف پایین کره رسم می‌کنند. پیشنهاد می‌شود چند آدمک در مکان‌های مختلف روی کره رسم شود و از دانش‌آموزان بخواهیم وزن و واکنش آن را رسم کنند (مانند شکل).



## پرسش پیشنهادی

سببی از درخت آویزان است. در اثر باد سبب از درخت جدا شده و به طرف زمین سقوط می‌کند و سرانجام با زمین برخورد کرده و متوقف می‌شود. در کدام حالت نیروی وزن بر سبب وارد می‌شود؟  
پاسخ: در تمام حالت‌های ذکر شده (وقتی از درخت آویزان است، وقتی سقوط می‌کند، در مدت زمان برخورد با زمین و هنگامی که روی زمین ساکن قرار می‌گیرد) بر سبب نیروی وزن وارد می‌شود.



در این پارگراف (پاراگراف اول) به ثابت بودن جرم و متغیر بودن وزن یک جسم اشاره می‌شود. مثلاً؛ شتاب گرانشی در قطب بیشترین مقدار و در استوا کمترین مقدار است. بنابراین جرم جسم در قطب و استوا با هم برابرند اما اندازه وزن آن در قطب بیشتر از اندازه وزن آن در استوا است.

## پاسخ تمرین ۱-۲

در این تمرین وزن یک جسم روی یک سیاره دلخواه تعریف شده است. براساس این تعریف از دانش آموزان می‌خواهد وزن قطعه طلای  $10^\circ$  گرمی را در سطح زمین، ماه و مریخ به دست آورده و با هم مقایسه نمایند.

$$W_{\text{زمین}} = mg_{\text{زمین}} = (0/10^\circ \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 0/98 \text{ N} \quad (\text{الف})$$

$$W_{\text{ماه}} = mg_{\text{ماه}} = (0/10^\circ \text{ kg})(1/6 \text{ N/kg}) = 0/16 \text{ N} \quad (\text{ب})$$

$$W_{\text{مریخ}} = mg_{\text{مریخ}} = (0/10^\circ \text{ kg})(3/7 \text{ N/kg}) = 0/37 \text{ N} \quad (\text{پ})$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، چون شتاب گرانشی در سطح زمین بیشتر از مریخ و ماه است، وزن قطعه طلا نیز بیشتر است:

$$W_{\text{زمین}} > W_{\text{مریخ}} > W_{\text{ماه}}$$

$$\frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{ماه}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{ماه}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{ماه}}} = 6/2 \quad \text{یا} \quad \frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{مریخ}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{مریخ}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{مریخ}}} = 2/6$$

نیروی مقاومت شاره (از جمله هوا) در بسیاری از مسئله‌های دینامیک قابل صرف‌نظر کردن نیست و بدون در نظر گرفتن آن نمی‌توان مسئله را حل کرد. نیروی مقاومت شاره را می‌توان با یک ساده‌سازی این‌گونه توضیح داد؛ وقتی جسمی در یک شاره حرکت می‌کند با ذرات شاره برخورد می‌کند و در نتیجه از طرف ذرات شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم بر آن وارد می‌شود. هرچه ابعاد جسم (سطح مقطع جسم) بزرگ‌تر باشد با تعداد بیشتری ذره برخورد می‌کند. همچنین هر چه سرعت جسم بیشتر باشد، ذرات تکانه بیشتری را به جسم وارد می‌کنند. بنابراین نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد.

**مثال ۴-۲:** در مثال ۲-۴ توجه داریم که وقتی چتر باز چترش را باز می‌کند، نیروی مقاومت هوا حدود ۲ برابر وزن چتر باز می‌شود. پس در این‌گونه مثال‌ها که نیروی مقاومت شاره تا این حد بزرگ است، صرف‌نظر کردن از آن، عملاً حل مسئله را به بیراهه می‌کشاند و حتماً باید این نیرو در نظر گرفته شود. نکته مهم دیگر آن است که معمولاً نیروی مقاومت شاره متغیر است (البته در حالتی که جسم مانند چتر باز به تندی حدى می‌رسد این نیرو می‌تواند ثابت و هم‌اندازه با وزن باشد) بنابراین شتاب را باید در

فیزیک ۳

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی هواره به طرف زمین (مركز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطه ۳-۲ به مقدار  $g$  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  $546 \text{ N}$  است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً  $9/8 \text{ N/kg}$  است.

### تمرین ۳-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم  $10^\circ$  گرم را روی سطح زمین به دست آورید.  
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره بر روی 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 ( $W$ ) بر آن وارد می‌شود. مثلاً یک چتر باز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه ۳-۲ به دست می‌آید.

نیروی مقاومت شاره: 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 شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شاره** می‌گویند و معمولاً آن را با  $F_D$  نشان می‌دهند. نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، **نیروی مقاومت هوا** می‌گویند.

### مثال ۴-۲

چتربازی به جرم  $60 \text{ kg}$  یعنی  $588 \text{ N}$  از یک کوش آزاد، چترش را باز می‌کند. تا کمان نیروی مقاومت هوا به  $1120 \text{ N}$  افزایش می‌یابد. شتاب چتر باز را در این لحظه به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی  $g$  را  $9/8 \text{ N/kg}$  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:

$$F_D - W = ma \Rightarrow (1120 \text{ N}) - (588 \text{ N}) = (60 \text{ kg})a \Rightarrow a = \frac{532 \text{ N}}{60 \text{ kg}} = 8/87 \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چتر باز در این حالت  $8/87 \text{ m/s}^2$  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

کاهش می‌دهد. نیروی مقاومت شاره، با نیروی کششی که از زنجیر به آن آویخته می‌شود، متوازن است.  
D-۱-۲ نیروی مقاومت شاره (این کسب) است.

۲۶

همان لحظه‌ای که نیروی مقاومت هوا داده شده است، محاسبه کرد. در سطر دوم این مثال نوشته شده است: «حرکت چتر باز را تحلیل کنید» بنابراین در آزمون‌های رسمی نیز می‌توان پرسش‌هایی را مطرح کرد که از دانش آموز خواسته شود، حرکت یک جسم را براساس داده‌های مسئله تحلیل کند.

در انتهای مثال تندی حدی و شرایطی که به تندی حدی می‌رسیم توضیح داده شده است. با اینکه این مفهوم در پاسخ مثال آمده است، می‌تواند در آزمون‌های رسمی یا غیررسمی مورد پرسش قرار گیرد.

## پرسش‌های پیشنهادی

جرم قطره بارانی که به تندی حدی خود رسیده برابر  $g = 5^\circ/^\circ$  است. نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت قطره باران چند میلی نیوتون است؟ ( $g = 9/8 \text{ N/kg}$ )

پاسخ: در حالتی که نیروهای وارد بر قطره باران متوازن شده باشند، قطره باران به تندی حدی می‌رسد. بنابراین در این حالت نیروی وزن رو به پایین با نیروی مقاومت هوای روبه بالا هم اندازه هستند:

$$f_D = mg = (5^\circ/^\circ \times 10^{-4} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 4/9 \times 10^{-4} \text{ N} = 0/49 \text{ mN}$$

فصل ۱۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

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 ثابت موسوم به **تندی حدی**، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چتر باز نوعی حدود  $50 \text{ m/s}$  و برای قطرات باران حدود  $7 \text{ m/s}$  است.

### مثال ۵-۲

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یک دو برابر دیگری است ( $m_1 = 2m_2$ ) از بالای برجی به ارتفاع  $h$  بطور هم‌زمان رها می‌کنیم. فرض کنید که 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 حاصل‌ضرب 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 به‌طرف 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:

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

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

### تمرین ۲-۲

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

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

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 لایه‌تاب وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (کنک‌گاف) می‌گویند و آن را با  $F_N$  نشان می‌دهند. شکل ۷-۲ نیروی عمودی سطح را بر لایه‌تاب نشان می‌دهد.

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح استخوانی یا یک تکیه قرار دهیم تغییر شکل سطح با تکیه به‌خوبی 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 فیریک ۱ آن آشنا شدیم.

**مثال ۵-۲:** از این منظر بسیار مهم است که با در نظر گرفتن مقاومت هوا، شتاب جسم‌ها متفاوت با  $g$  بوده و براساس اینکه مقدار جرم چقدر است، حتی شتاب جسم‌های مختلف با هم فرق می‌کند. در این مثال جهت محور رو به پایین انتخاب شده تا تحلیل مسئله ساده‌تر شود. ضمناً دانش آموز متوجه می‌شود که نباید حتماً محور حرکت را رو به بالا انتخاب کند (البته در تمام قسمت‌های فصل اول و بخش‌های دیگر فصل دوم جهت محور روبه بالا انتخاب شده است). در شرایط داده شده برای این مسئله ( $m_1 = 2m_2$  و  $f_{D2} = f_{D1}$ ) جسم سنگین‌تر با شتاب بیشتری حرکت می‌کند پس با تندی بیشتری به زمین برخورد می‌کند و زمان حرکت آن نیز کمتر است.

## پاسخ تمرین ۲-۲

هدف از طرح این تمرین آن است که بلافاصله دانش آموز با شرایطی که از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود و شتاب جسم‌ها مستقل از مقدار جرمشان برابر  $g$  می‌شود و با تندی یکسانی به زمین برخورد می‌کنند این شرایط در بحث سقوط آزاد فصل ۱ آموزش داده شده است.

فصل ۲: حرکت و دینامیک

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن همان‌دازه شده و نیروهای وارد بر چتران متوازن شوند. پس از این چتران با تندی ثابتی موسوم به **تندی حدی** به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چتران نوعی حدود  $51 \text{ m/s}$  و برای فطرات باران حدود  $91 \text{ m/s}$  است.

### مثال ۵-۲

دو گوی همان‌دازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ( $m_1 = 2m_2$ ) 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 حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با  $f_D$  و وزن را با  $W$  نشان می‌دهیم و برای بررسی سادتر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور  $y$  را به‌طرف 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 بیشتر حرکت بیشتر است.

در نتیجه  $a_1 > a_2$  است.

طبق رابطه سرعت-جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2a_1h \Rightarrow v = \sqrt{2a_1h} \Rightarrow v_1 > v_2$$

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

### تمرین ۲-۲

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



فصل ۲: حرکت و دینامیک

میزان‌اند

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

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 لیبانی وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (نیکه‌گاه) می‌گویند و آن را با  $F_N$  نشان می‌دهند.

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

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح افقی با یک سنگ قرار دهیم تغییر شکل سطح با سنگ به خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر صاف 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.

**نیروی عمودی سطح:** می‌توان مثال ۵-۲ را با مقدار جرم‌های مشخص،  $F_D$  مشخص و... ارائه کرد تا دانش‌آموزان شتاب، تندی، زمان سقوط و... را محاسبه کنند.

دانش‌آموزان اغلب نمی‌دانند چرا نیروی عمودی سطح به وجود می‌آید. می‌توان از دانش‌آموزان خواست استدلال کنند چرا چنین نیرویی باید وجود داشته باشد.

توجه داریم به دست آوردن اندازه نیروی عمودی سطح ( $F_N$ ) با قانون دوم نیوتون امکان‌پذیر است و برای به دست آوردن آن، رابطه مستقلی وجود ندارد.

در شکل ۲-۷ می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر لب‌تاپ و واکنش آنها را مشخص کنند.

### پاسخ تمرین ۲-۲

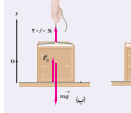
یک جعبه با جرم مشخص بر روی سطح قرار دارد اما بسته به اینکه  $F$  چگونه بر جعبه وارد می‌شود (اثر می‌کند) نیروهای عمودی سطح متفاوتی به دست می‌آید. در این شکل‌ها نیز می‌توان از دانش‌آموزان خواست نیروهای واکنش را رسم کنند.

توجه داشته باشیم که  $\vec{W}'$  را همانند شکل ۲-۸ می‌توانیم روی زمین رسم کنیم (به جای آنکه از مرکز زمین رسم کنیم).

توجه به مکان‌های  $\vec{F}_N$  و  $\vec{W}'$  در شکل ۲-۸ بسیار آموزنده است: شاید رسم یک میز که تلویزیونی روی آن قرار دارد و اینکه از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر تلویزیون و واکنش آنها را رسم کنند، مفید باشد. حتی می‌توانیم جرم تلویزیون را بدسیم و از دانش‌آموزان بخواهیم مقادیر  $F_N$ ،  $F_N'$ ،  $W$  و  $W'$  را به دست آورند.

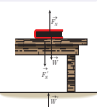
فیزیک ۲

### تمرین ۲-۲



همانند شکل، جعبه‌ای به جرم  $2 \text{ kg}$  روی میز افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

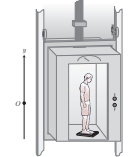
نیروی عمودی نیکه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود. بنابراین واکنش این نیرو  $F_N'$  به‌صورت عمودی و در خلاف جهت  $F_N$  از طرف جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۸). همچنین واکنش نیروی وزن ( $W'$ ) نیروی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت  $W$  وارد می‌شود.



فصل ۲: حرکت و دینامیک

وزن (W) را از زمین می‌شود.

### مثال ۶-۲



شخصی درون آسانسور ساکن، روی یک ترازوی فنی ایستاده است. در این حالت ترازو عدد  $50 \text{ kg}$  را نشان می‌دهد. (الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ (ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالا  $2 \text{ m/s}^2$  دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (ج) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین  $2 \text{ m/s}^2$  دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (د) اگر ترازو آسانسور پارک شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ( $g = 9.8 \text{ N/kg}$ )  
**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 نیروی وزن وارد بر خودش حتی  $F_N$  که واکنش  $F_N$  است را نشان می‌دهد. پس نیروی عمودی اندازه  $F_N$  در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F_N = 50 \text{ kg} \Rightarrow F_N = F_N' = 50 \text{ kg} \Rightarrow F_N = W = mg \Rightarrow 50 \text{ kg} = m(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow m = 50 / 9.8 \text{ kg}$$

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = (50 / 9.8 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) + (50 / 9.8 \text{ kg})(2 \text{ m/s}^2)$$

$$F_N = 50 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ N/kg}$$

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

**تمرین ۲-۲**

همانند شکل، جسمی به جرم  $2/0\text{ kg}$  روی میز افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست 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 ۲-۲). همچنین واکنش نیروی وزن ( $W$ ) نیروی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت  $W$  وارد می‌شود.

**مثال ۲-۲**

شخصی درون آسانسور ساکن، روی یک ترازوی فنی ایستاده است. در این حالت ترازو عدد  $55\text{ kg}$  را نشان می‌دهد. (الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ (ب) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین  $2/0\text{ m/s}^2$  دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (ج) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین  $2/0\text{ m/s}^2$  دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (د) اگر ترازو آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ( $g = 9/8\text{ N/kg}$ )

**پاسخ :** بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور 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 :

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

توجه داریم نیروی عمودی وارد بر خودش یعنی  $F_N$  که واکنش  $F_N$  را نشان می‌دهد. پس نویسیم اندازه  $F_N$  را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F_N = \Delta m N \Rightarrow F_N = \Delta m N, F_N = W = mg \Rightarrow \Delta m N = m(g - a) \Rightarrow m = 55\text{ kg}$$

(ب)

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = (55\text{ kg})(9/8\text{ N/kg}) + (55\text{ kg})(2/0\text{ N/kg})$$

$$F_N = 640\text{ N}$$

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

**مثال ۲-۶ :** معمولاً بعد از آموزش  $F_N$  یکی از مثال‌های کاربردی مربوط به نیروی عمودی سطح، عددهای متفاوتی است که شخصی روی ترازوی فنی در آسانسور ایستاده و ترازو نشان می‌دهد. توجه داریم وقتی شخصی روی ترازوی فنی یا نیروسنج می‌ایستد، ترازوی فنی نیرویی که به خودش وارد می‌شود یعنی  $F'_N$  (واکنش  $F_N$ ) را نشان می‌دهد؛ چون  $F'_N = F_N$  است بنابراین می‌توانیم بگوییم مقدار  $F_N$  را نشان می‌دهد.

توجه به بند «ت» مثال که در آن شرایط خاصی را بیان می‌کند، از اهمیت زیادی برخوردار است.

## پاسخ پرسش ۲-۶ :

الف)  $F_N - mg = ma, a > 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N > mg$

ب)  $F_N - mg = ma, a < 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N < mg$

پ)  $F_N - mg = ma, a < 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N < mg$

ت)  $F_N - mg = ma, a > 0 \Rightarrow F_N = mg + ma \Rightarrow F_N > mg$

می‌توان به پرسش ۲-۶ دو بند دیگر نیز اضافه کرد؛

ث) آسانسور با سرعت ثابت حرکت کند :

ج) آسانسور ساکن  $F_N - mg = 0 \Rightarrow F_N = mg$

باشد  $F_N - mg = 0 \Rightarrow F_N = mg$

**نیروی اصطکاک :** بسیاری از دانش‌آموزان تصور می‌کنند وقتی جسمی ساکن روی یک سطح افقی قرار دارد (بدون آنکه هل داده شود یا کشیده شود) بین جسم و سطح اصطکاک وجود دارد. با بحث و گفت‌وگو می‌توان این کج فهمی را اصلاح کرد؛ مثلاً یک میز را روی سطح افقی در نظر بگیرند و از دانش‌آموزان خواسته شود که بگویند بین میز و زمین اصطکاک وجود دارد یا نه؟ اگر وجود دارد جهت نیروی اصطکاک را مشخص کنند و براساس

**پرسش ۲-۴**

در مثال ۲-۴، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی که ترازوی فنی نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

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

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

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

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

**پرسش ۲-۵**

نیروی اصطکاک : وقتی لایه‌ای 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 دهیم، و نتوانیم آن را به حرکت درآوریم، در این حالت نیروی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲-۳). این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک ایست است و آن را با  $F_f$  نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننداش زیر کوره و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیروی 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 زرد کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت نامواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲-۴). حتی سطحی که بسیار هموار به نظر می‌آید، نامواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارد که سبب اصطکاک می‌شود.

نیروی اصطکاک عموماً به عنوان نیروی ایست شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است، نگهداشتن یک قلم در دست، نوشتن، زدن و پاره کردن و ... بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن ناممکن است، زیرا کشتی جابه‌جایی سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.

**شکل ۲-۳**

**شکل ۲-۴**

قانون دوم شتاب میز را تعیین کنند. با این گونه سؤال‌ها مشخص می‌شود که نیروی اصطکاک فقط در حالت‌ها وجود دارد که جسمی روی جسم دیگر حرکت کند یا اینکه ساکن باشد اما تحت کشش یا رانش باشد، و نیروی اصطکاک به دو دسته نیروی اصطکاک ایستایی و جنبشی تقسیم‌بندی می‌شود (در این کتاب).

اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را می‌توان از شرایط متوازن بودن نیروها به دست آورد. برای نیروی اصطکاک ایستایی رابطه مشخصی وجود ندارد اما نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه از رابطه ۲-۴ ( $f_{s,max} = \mu_s F_N$ ) به دست می‌آید و نیروی اصطکاک جنبشی از رابطه ۲-۶ ( $f_k = \mu_k F_N$ ) محاسبه می‌شود.

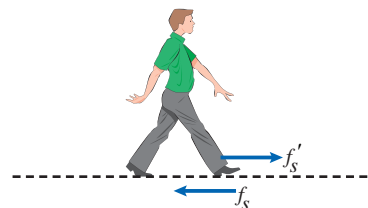
می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم، بگویند نیروی اصطکاک بین دو جسم به چه عواملی بستگی دارد؟ احتمالاً دانش‌آموزان به جنس دو جسم، زبری و نرمی آنها، رطوبت، دما و ... اشاره می‌کنند.

این بحث را می‌توان به آرامی به سمت بحث میکروسکوپی در مورد نیروی اصطکاک کشاند. اغلب دانش‌آموزان تصور نادرستی از مضر بودن نیروی اصطکاک دارند. پاراگراف آخر این صفحه به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا به نقش مثبت نیروی اصطکاک در زندگی پی ببرند.

هدف از پرسش ۷-۲ درگیر کردن دانش‌آموزان به نقش مثبت اصطکاک در راه رفتن انسان، خودروها و ... است.

### پاسخ پرسش ۷-۲

هنگام راه رفتن، پا زمین را به عقب هل می‌دهد این برهم کنش به علت اصطکاک بین پا و زمین اتفاق می‌افتد. طبق قانون سوم نیوتون زمین نیز پا را به طرف جلو هل می‌دهد که سبب حرکت و راه رفتن می‌شود. اگر سطح زمین سُر و بدون اصطکاک باشد، نیروی اصطکاک که پا به زمین وارد می‌کند و نیروی اصطکاک که زمین به پا وارد می‌کند بسیار ناچیز است و راه رفتن به سختی ممکن خواهد بود و حتی ممکن است نتوانیم راه برویم.



خوب است بدانیم «دیدگاه میکروسکوپی» می‌تواند به درک بیشتر نیروی اصطکاک کمک کند. اشاره به طبیعت الکتریکی نیروی اصطکاک، اشاره به جوش سرد، سطح میکروسکوپی تماس و نسبت  $10^4$  بار کوچک‌تر بودن آن نسبت به سطح ظاهری تماس و اشاره به تشکیل و پاره شدن جوش‌ها در هنگام حرکت جسم، موارد مهمی هستند که می‌توان به آنها پرداخت.

فازیک ۳۰ پرسش ۷-۲

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 شریک مانند سطح یخ به سختی 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 فزای کاملاً صاف داشته باشند و نیروی هم‌گذاشته 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 قویاً 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 (معموداً  $10^{-4}$  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.

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم:

الف) اصطکاک ایستایی: جسمی مطابق شکل ۱۱-۲ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن ( $W$ ) و نیروی عمودی سطح ( $F_N$ ) در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی  $F_1$  را به جسم وارد می‌کنیم به‌طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۱۱-۲ الف). چون جسم ساکن است 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  $F_1$  را افزایش داده و به اندازه  $F_2$  رسانده‌ایم (شکل ۱۱-۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازه  $F_2$  شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به جایی می‌رسیم که اگر اندازه آن برابر  $F_3$  شود، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۱۱-۲ ج). به نیروی اصطکاک در این حالت نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه می‌گوییم.

شکل ۱۱-۲ ج: با افزایش نیروی  $F_1$ ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

ب) اصطکاک جنبشی: فرض کنید اندازه نیروی  $F_1$  را افزایش داده و به اندازه  $F_4$  رسانده‌ایم (شکل ۱۱-۲ د). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش یافته و برابر اندازه  $F_4$  شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به جایی می‌رسیم که اگر اندازه آن برابر  $F_5$  شود، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۱۱-۲ ه). به نیروی اصطکاک در این حالت نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه می‌گوییم.

شکل ۱۱-۲ د: با افزایش نیروی  $F_1$ ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

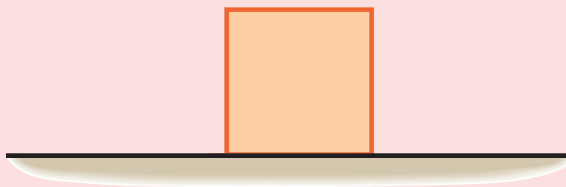
شکل ۱۱-۲ ه: با افزایش نیروی  $F_1$ ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

شکل ۱۱-۲ و: با افزایش نیروی  $F_1$ ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

پرداختن به نیروی اصطکاک ایستایی به کمک شکل‌های ۱۱-۲ و ۱۲-۲، کمک زیادی به فهم نیروی اصطکاک می‌کند. تمرکز ابتدایی آموزش روی شکل ۱۱-۲ است که جسم روی سطح افقی ساکن بوده و تحت تأثیر کشش یا هل دادن قرار ندارد. دانش‌آموز باید در این حالت بفهمد که بین جسم و سطح، نیروی اصطکاکی وجود ندارد. ادامه مفهوم اصطکاک ایستایی را می‌توان با شکل‌های ۱۲-۲ توضیح داد. رسم همه نیروهای وارد بر جسم در شکل‌های ۱۱-۲ و ۱۲-۲ می‌تواند به یادگیری این بحث کمک کند.

### مثال پیشنهادی

قطعه‌ای روی یک سطح افقی هموار ساکن است. الف) بزرگی نیروی اصطکاک وارد از سطح بر قطعه چقدر است؟ ب) اکنون نیروی افقی  $6^\circ\text{N}$  را به قطعه به موازات سطح وارد می‌کنیم ولی قطعه حرکت نمی‌کند. بزرگی نیروی اصطکاک وارد بر سطح چقدر است؟ پ) اگر نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه وارد بر قطعه  $12^\circ\text{N}$  باشد، آیا قطعه در صورتی که نیروی افقی  $10^\circ\text{N}$  بر آن وارد شود حرکت می‌کند؟ در این حالت نیروی اصطکاک چقدر است؟ ت) اگر نیروی  $15^\circ\text{N}$  بر قطعه وارد شود، قطعه حرکت خواهد کرد؟



پاسخ: الف)  $F_{\text{ا}} - f_{\text{ا}} = ma = 0, F_{\text{ا}} = 0 \rightarrow f_{\text{ا}} = 0$

ب)  $F_{\text{ب}} - f_{\text{ب}} = ma = 0 \rightarrow f_{\text{ب}} = F_{\text{ب}} = 6^\circ\text{N}$

پ) خیر زیرا  $F_{\text{پ}} < f_{\text{s,max}}$  است.

$F_{\text{پ}} - f_{\text{پ}} = ma = 0 \rightarrow f_{\text{پ}} = F_{\text{پ}} = 10^\circ\text{N}$

ت) بله زیرا  $F_{\text{ت}} > f_{\text{s,max}}$  است.

## توجه

- ۱ رابطه‌های ۲-۴ ( $f_{s,\max} = \mu_s F_N$ ) و ۲-۵ ( $f_k = \mu_k F_N$ ) معادله‌های برداری نیستند. جهت‌های  $\vec{f}_k$  و  $\vec{f}_s$  موازی سطح و در خلاف جهت نیروی است که جسم را می‌کشد یا هل می‌دهد و نیروی  $\vec{F}_N$  عمود بر سطح است.
- ۲ ضرایب  $\mu_s$  و  $\mu_k$  بدون بُعد (یکا) هستند و باید به صورت آزمایشگاهی تعیین شوند. مقدار آنها به ویژگی‌های معینی از جسم و سطح بستگی دارد؛ مثلاً مقدار  $\mu_s$  میان تخم مرغ و تفلون ۰/۰۴ است ولی مقدار آن میان کفش‌های صخره‌نورد و صخره ۱/۲ است.
- ۳ در این کتاب فرض می‌شود که مقدار  $\mu_k$  به تندی‌ای که جسم روی سطح می‌لغزد بستگی ندارد.
- ۴ در معادله ۲-۵ ( $f_s \leq \mu_s F_N$ ) علامت مساوی فقط وقتی به کار می‌رود که سطوح در آستانه‌رها شدن و سر خوردن هستند. در دام متداول استفاده از  $f_s = \mu_s F_N$  در هر وضعیت ایستا قرار نگیریم.

فصل ۱۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

## (۲-۴) (نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه)

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N$$

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

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (2-5)$$

## تمرین ۲-۳

اگر در شکل ۱۲-۲، جرم جسم  $kg/۴$  و بزرگی نیروها  $F_1 = ۴/۰ N$ ،  $F_2 = ۸/۰ N$  و  $F_3 = ۱۲/۰ N$  باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟ ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۱۲-۱: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم  
وسایل لازم: نیروسنج، قطعه چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط کش  
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 دستان را به‌آرامی 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 (ارای 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 ۲-۴ مقدار  $\mu_s$  را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

شماره آزمایش	مساحت سطح تماس قطعه با میز	وزن قطعه: عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (نیروی)	$\mu_s$

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

پاسخ تمرین ۲-۴  
(الف)

$$F_3 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_3 = ۴/۰ N$$

$$F_2 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_2 = ۸/۰ N$$

$$F_2 - f_{s,\max} = ma = 0 \rightarrow f_{s,\max} = F_2 = ۱۲ N$$

(ب)

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N \rightarrow \mu_s = \frac{f_{s,\max}}{F_N}, F_N = mg = (۴/۰ N)(۹/۸ N/kg) = ۳۹/۲ N \rightarrow \mu_s = \frac{۱۲/۰ N}{۳۹/۲ N} = ۰/۳۰$$

در انجام این آزمایش (۱۲-۱) به یکنواخت بودن سطوح مکعب توجه شود. تکرار آزمایش و میانگین‌گیری توصیه می‌شود. در آزمون پایانی (نهایی) فیزیک ۳، یکی از سؤالات به «طراحی آزمایش» اختصاص می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود روی کلیه آزمایش‌ها و طراحی آزمایش‌ها کار شود.

## دانستنی؛ نمودار نیروی اصطکاک بر حسب نیروی کشنده

شکل‌های زیر نشان می‌دهد وقتی بزرگی نیروی وارد شده به جسم را افزایش می‌دهیم بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی افزایش می‌یابد و قطعه ساکن باقی می‌ماند. ولی وقتی نیروی وارد شده به بزرگی معینی می‌رسد، قطعه از قید تماس تنگاتنگ به سطح میز کنده می‌شود و به سمت چپ شتاب می‌گیرد. نیروی اصطکاکی که از آن پس با حرکت مخالفت می‌کند، نیروی اصطکاک جنبشی است.

