

## فصل سوم

### نیرو و قانون‌های نیوتون



**راهنمای تدریس:** پیش از شروع فصل، توجه دانش‌آموزان را به تصویر شروع فصل و همچنین پرسشی که در کنار آن مطرح شده جلب کنید. انتظار می‌رود دانش‌آموزان با توجه به آشنایی با مفهوم نیرو و ویژگی‌های آن بتوانند پیکان‌های رسم شده‌ی روی شکل را با مفهوم نیرو مرتبط سازند و با توجه به یادگیری کمیت‌های برداری فصل اول، جهت متفاوت آن‌ها را نیز به برداری بودن این کمیت نسبت دهند.

### ادامه‌ی راهنمای تدریس: پیش از شروع بخش ۱-۳،

سعی کنید با ذهنیت و تصور دانش آموزان از مفهوم نیرو آشنا شوید. مفهوم نیرو، یکی از مفاهیمی است که دانش آموزان در دوره‌های ابتدایی و راهنمایی با آن آشنا شده‌اند و حتی در محاورات روزمره نیز از این واژه استفاده می‌کنند. متأسفانه بارها مشاهده شده است که اغلب دانش آموزان نه تنها قادر به ارائه‌ی درک صحیحی از مفهوم نیرو نیستند بلکه این مفهوم را با مفاهیم دیگری چون فشار، انرژی و کار اشتباه می‌گیرند. به نظر می‌رسد آشنایی با پیش فرض‌ها و پیش ذهنیت‌های دانش آموزان درخصوص این مفهوم می‌تواند نقطه‌ی شروع آموزش شما را تعیین کند.

در این قسمت همچنین مناسب است که توجه دانش آموزان را به تفاوت دو مبحث اصلی مکانیک، یعنی سینماتیک (بررسی حرکت) و دینامیک (بررسی علل حرکت) جلب نمایید.

### ۱-۳ اثرهای نیرو

#### راهنمای تدریس: امروزه بسیاری از متخصصان

آموزش فیزیک و علوم معتقدند آموزش مفاهیم انتزاعی به طور مستقیم کارساز نیست. این گروه از متخصصان می‌گویند مفاهیم انتزاعی را باید از طریق مصداق‌های آن مفاهیم آموزش داد تا دانش آموزان پس از آشنایی با این مصداق‌ها بتوانند تعریفی از مفهوم انتزاعی را در ذهن خود ایجاد کنند.

یکی از این مفاهیم انتزاعی، مفهوم نیرو است. شاید تصور شود که راحت‌ترین کار برای آموزش مفهوم نیرو این باشد که آنرا در قالب یک جمله یا عبارت تعریف کنیم، و سپس قوانین نیرو و مسئله‌های مرتبط با آن بررسی گردد.



جسم این هواپیمای نظامی درجه پرواز می‌تواند تا ۲۷۵ مایل باشد.

### نیرو و قانون‌های نیوتون

در فصل دوم درباره‌ی حرکت اجسام به کمک کمیت‌هایی مانند مکان، جابه‌جایی، سرعت متوسط، سرعت و شتاب تا حدود زیادی صحبت کردیم ولی درباره‌ی این که چگونه جسمی به حرکت در می‌آید یا نوع حرکت آن چگونه تغییر می‌کند، بحثی به میان نیامد. در این فصل به بحث درباره‌ی علل حرکت خواهیم پرداخت و برای این منظور مفهوم‌های جرم و نیرو را معرفی می‌کنیم. نیوتون نخستین دانشمندی بود که پس از گالیله، به تفصیل و با روش علمی به بررسی حرکت اجسام و علل آن پرداخت. قانون‌های حرکت که بخش اساسی و مهم این فصل را تشکیل می‌دهند به نام قانون‌های نیوتون نام‌گذاری شده‌اند.

### ۱-۳ اثرهای نیرو

نیرو، یکی از مفهوم‌های مهم برای بررسی علل حرکت جسم است. در کتاب‌های علوم دوره‌ی ابتدایی و راهنمایی تا حدودی با این مفهوم آشنا شده‌اید. برای شناخت و درک بهتر مفهوم نیرو به معرفی اثرهای نیرو بر یک جسم می‌پردازیم. شکل ۱-۳ اثرهای مختلف نیرو را بر یک جسم نشان می‌دهد. به عبارت «ممکن است» در هر جمله توجه کنید زیرا اعمال نیرو به یک جسم «ممکن است» سبب تغییر مورد نظر شود.



شکل ۱-۳ اثرهای نیرو به شکل‌های بسیار مختلفی همچون هل دادن، کشیدن، بیجا کردن و فشار آوردن وجود دارد.

۱- وارد کردن نیرو به جسم، ممکن است باعث شروع حرکت آن شود.

۲- وارد کردن نیرو به جسم، ممکن است باعث تغییر جهت آن شود.

۳- وارد کردن نیرو به جسم، ممکن است باعث تغییر شکل آن شود.

۴- وارد کردن نیرو به جسم، ممکن است باعث توقف حرکت آن شود.

واقعیت این است که این روش نمی‌تواند درک صحیحی از مفهوم نیرو در ذهن دانش‌آموزان ایجاد نماید. به همین جهت در این کتاب مفهوم نیرو به کمک اثرهای نیرو آموزش داده شده است. انتظار می‌رود دانش‌آموزان پس از آشنایی با اثرهای نیرو، خودشان بتوانند درک درستی از این مفهوم در ذهنشان ایجاد کنند.

توصیه می‌شود هنگام شروع بخش ۱-۳، توجه دانش‌آموزان را به صفحه‌ی ۴۸ کتاب درسی جلب نمایید و از آن‌ها بخواهید که دقیقاً به این شکل‌ها توجه کنند و پس از بحث در گروه‌های مربوط، برداشت خود را از مفهوم نیرو بیان کنند.

در توضیح همه‌ی این شکل‌ها، عبارت «ممکن است» تکرار می‌شود. این عبارت مهمی است که باید به آن توجه شود زیرا وارد کردن نیرو به یک جسم «ممکن است» به تغییرات ذکر شده منجر نشود!

### فعالیت ۱-۳



شکل ۱

#### ورزش فوتبال: در این ورزش، بازیکن با شوت کردن توپ به

آن نیرو وارد می‌کند و توپ را به حرکت در می‌آورد. همچنین بازیکن می‌تواند توپ در حال حرکتی را با پای خود نگه دارد یا جهت حرکت و همچنین بزرگی سرعت آن را تغییر دهد (شکل ۱). دروازه‌بان نیز با ضربه‌ی مشت خود تلاش می‌کند جهت حرکت توپ را برخلاف دروازه هدایت کند یا با پنجه‌ی خود آن را مهار کند.

در ورزش‌های دیگر نیز باید به همین ترتیب عمل نمود.

#### پرسش ۱-۳

وارد کردن نیرو به یک جسم ممکن است:

- باعث شروع حرکت آن شود.
- باعث تغییر جهت حرکت آن شود.
- باعث سریع‌تر شدن حرکت آن شود.
- باعث کند شدن حرکت آن شود.
- باعث تغییر شکل آن شود.
- باعث توقف حرکت آن شود.

## ویژگی‌های نیرو

### راهنمای تدریس: در این قسمت ابتدا به جمع‌بندی

مفهوم نیرو به صورت زیر پردازید:

**نیرو** در زبان روزمره عبارت است از هل دادن یا کشیدن و در تعریفی بهتر عبارت است از برهم کنش بین دو جسم، یا بین یک جسم و محیط اطراف آن. به همین دلیل است که همواره از نیرویی که یک جسم بر جسم دیگر وارد می‌کند سخن می‌گوییم. هنگامی که اتومبیلی را که در برف گیر کرده است هل می‌دهید نیرویی به اتومبیل وارد می‌کنید، یک کابل فولادی به تیرآهنی که در یک محوطه‌ی ساختمانی بالا کشیده می‌شود نیرو وارد می‌کند و مثال‌های دیگر.

پس از آن ویژگی مهم نیرو را که کمیّتی برداری است، معرفی کنید. همان‌گونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، نیرو می‌تواند یک جسم را در جهت‌های مختلف بکشد یا هل دهد.

به یکای نیرو، یعنی نیوتون،  $N$ ، اشاره کنید و همچنین ابزار اندازه‌گیری نیرو.

در این قسمت همچنین می‌توانید به تماسی بودن یا غیر تماسی بودن (نیروهای بلند برد) نیز اشاره‌ای داشته باشید. در شکل ۲، که در آن هل دادن یا کشیدن جسم با دست منظور بوده است، نیرو را نیروی تماسی می‌نامیم. علاوه بر نیروهای تماسی،

نیروهای غیر تماسی یا نیروهای بلند بردی نیز وجود دارند که عمل می‌کنند، حتی وقتی اجسام توسط فضای خالی از یکدیگر جدا شده باشند. نیروی بین دو آهن‌ربا نمونه‌ای از یک نیروی بلند برد است، همین‌طور نیروی گرانش زمین که در ادامه‌ی همین فصل دانش‌آموزان با آن آشنا خواهند شد.

علاوه بر شکل ۳-۴ کتاب درسی که دانش‌آموزان را با بزرگی برخی از نیروهای نوعی آشنا می‌کند در جدول ۱ نیز بزرگی‌های نوعی چند نیروی دیگر آمده است. این که دانش‌آموزان به درک درستی از بزرگی برخی از نیروهای مختلف قادر باشند اهمیت دارد.

#### فعالیت ۳-۱

سه ورزش متفاوت را انتخاب کنید. برای هر ورزش وضعیتی را توصیف کنید که نیرو وارد شده است و توضیح دهید که این نیرو چه کرده است.

#### پرسش ۳-۱

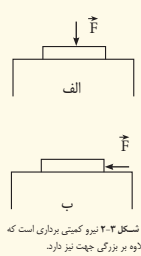
با توجه به شکل ۳-۱، پنج حالت متفاوت را که «ممکن است» با وارد کردن نیرو به یک جسم رخ دهد، نام ببرید.

#### ویژگی‌های نیرو

نیرو کمیّتی برداری و دارای اندازه و جهت است. برای مثال اگر کتابی را که در اختیار دارید روی میز قرار دهید و از بالا به آن نیرو وارد کنید، هر اندازه هم که اندازه‌ی نیرو را افزایش دهید کتاب حرکتی نخواهد کرد (شکل ۳-۲ الف) در صورتی که اگر جهت نیرو را تغییر دهید یا آن را به طور مایل یا افقی به کتاب وارد کنید، بسته به بزرگی نیرو، ممکن است کتاب حرکت کند (شکل ۳-۲ ب). این تجربه‌ی ساده نشان‌دهنده‌ی برداری بودن نیروست. بزرگی یا اندازه‌ی نیرو را به کمک نیروسنج اندازه می‌گیریم. شکل ۳-۳ یک نیروسنج را نشان می‌دهد که بر حسب یکای نیرو، یعنی نیوتون، درجه‌بندی شده است. نیوتون را با نماد  $N$  نشان می‌دهند. برای آن که تصویری از اندازه‌ی یک نیرو به دست آورید به مثال‌های شکل ۳-۳ توجه کنید.

#### ۳-۲ قانون‌های حرکت نیوتون

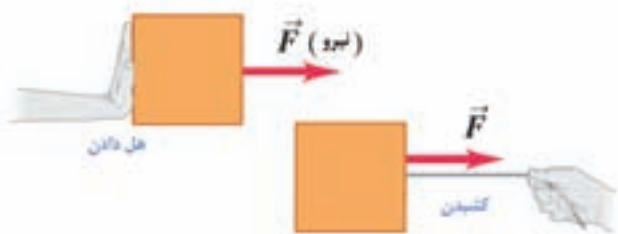
بررسی حرکت اجسام و یافتن علل آن از قرن‌ها پیش ذهن بشر را به خود مشغول کرده بود به طوری که توضیح ارسطویی حرکت که با بسیاری از مشاهددهای مبتنی بر حس سازگار بود برای مدت ۲۰ قرن مورد پذیرش عام بود. گالیله با انجام آزمایش و تمهید ذهنی نتیجه‌های آزمایش نخستین کسی بود که در برداشت ارسطو از علل حرکت تردید کرد و بی‌نیازی حرکت یکنواخت اجسام به نیرو را ارائه داد. نیوتون، دانشمند انگلیسی پس از بررسی‌های دقیق درباره‌ی حرکت اجسام و با اطلاع از نظریه‌ی دانشمندان قبل از خود سه قانون درباره‌ی حرکت اجسام ارائه کرد.



شکل ۳-۲ نیرو کمیّتی برداری است که علاوه بر بزرگی جهت نیز دارد.



شکل ۳-۳ درجه‌بندی روی نیروسنج بزرگی نیرو را نشان می‌دهد.



شکل ۲

جدول ۱ - بزرگی‌های نوعی نیرو

نوع نیرو	بزرگی
نیروی گرانش خورشید بر زمین	$3/5 \times 10^{23} \text{ N}$
پیشرانه‌ی سفینه‌ی فضایی هنگام پرتاب	$3/1 \times 10^7 \text{ N}$
وزن یک نهنگ آبی رنگ بزرگ	$1/9 \times 10^6 \text{ N}$
بیشینه‌ی نیروی کشش یک لوکوموتیو	$8/9 \times 10^5 \text{ N}$
وزن یک ورزشکار ۱۱۰ کیلوگرمی	$1/1 \times 10^3 \text{ N}$
وزن یک سیب متوسط	$1 \text{ N}$
وزن کوچک‌ترین تخم حشره	$2 \times 10^{-6} \text{ N}$
ربایش الکتریکی بین پروتون و الکترون در اتم هیدروژن	$8/2 \times 10^{-8} \text{ N}$
وزن یک باکتری بسیار کوچک	$1 \times 10^{-18} \text{ N}$
وزن اتم هیدروژن	$1/6 \times 10^{-26} \text{ N}$
وزن الکترون	$8/9 \times 10^{-30} \text{ N}$
ربایش گرانشی بین پروتون و الکترون در اتم هیدروژن	$3/6 \times 10^{-47} \text{ N}$

۲-۳ قانون‌های حرکت نیوتون

راهنمای تدریس: در این فصل تبیین قانون‌های نیوتون

مورد نظر است و برخی از کاربردهای آن‌ها را در فصل بعد خواهیم دید. به این منظور اشاره‌ای کوتاه به تاریخچه‌ی شکل‌گیری این قانون‌ها می‌تواند برای دانش‌آموزان جذاب باشد و بستر مناسبی را برای ارائه قانون‌های نیوتون دربار‌ه‌ی حرکت فراهم نماید.

این قانون‌ها، نخستین بار به روشنی توسط ایزاک نیوتون بیان شد و در سال ۱۶۸۷ در کتاب «اصول ریاضی فلسفه‌ی طبیعی» نوشته‌ی نیوتون به چاپ رسید. این قانون‌ها حاصل استنتاج‌های ریاضی نیستند، بلکه موضوعاتی هستند که فیزیک‌دانان از آزمایش‌های پُر شماری دربار‌ه‌ی چگونگی حرکت اجسام آموخته‌اند.

شکل ۳-۳ همه‌سا تقریباً تصویری از اندازه‌ی کمیت‌هایی مانند طول، جرم و زمان داریم. این شکل‌ها به ما کمک می‌کند تا تصویری از بزرگی یک نیرو نیز به دست آوریم.

یک پرنده برای برداشتن یک کرم از روی زمین، نیروی حدود  $1 \text{ N}$  لازم دارد.

وزن یک سیب یا اندازه متوسط  $1 \text{ N}$  است. اگر شما یک سیب یا اندازه متوسط را در دست خود نگه دارید، نیروی برابر  $1 \text{ N}$  به طرف پایین روی دست خود احساس می‌کنید.

اسکی روی سرلشی نیاز خیلی کمی به نیرو دارد اما روی سطح زمین ممکن است به نیروی حدود  $400 \text{ N}$  نیاز باشد.

برای کشیدن کش یک تیرکمان به نیروی حدود  $50 \text{ N}$  نیاز دارید.

یک ورزشکار در حین وزنه برداری، وزنه‌ای برابر با  $1000 \text{ N}$  را بالا می‌برد.

وقتی دری را هل می‌دهید تا باز شود، نیروی حدود  $10 \text{ N}$  وارد می‌کنید.

موتور یک ماشین، نیروی پیش‌رانی حدود  $7000 \text{ N}$  باید تولید کند.

موتور یک هواپیما ممکن است نیروی پیش‌رانی حدود  $80000 \text{ N}$  تولید کند.

نیوتون از نظرات و مشاهد‌های بسیاری از دانشمندان پیش از خود استفاده کرد، از جمله کپرنیک، براهه، کپلر و به ویژه گالیلئو گالیله که در همان سال تولد نیوتون در گذشت. این قانون‌ها به واقع بنیادی‌اند، زیرا آن‌ها را نمی‌توان از اصول دیگر نتیجه‌گیری کرد؛ یا به کمک اصول دیگر آن‌ها را به اثبات رساند. قانون‌های نیوتون شالوده‌ی **مکانیک کلاسیک‌اند** (که **مکانیک نیوتونی** نیز نامیده می‌شود) و با استفاده از آن‌ها می‌توان بیش‌تر انواع آشنای حرکت را درک کرد. قانون‌های نیوتون تنها در وضعیت‌هایی که شامل تند‌ی‌های فوق‌العاده زیاد (نزدیک به تند‌ی نور) یا اندازه‌های بسیار کوچک (همانند درون اتم) هستند نیاز به اصلاح دارند.

تبیین قانون‌های نیوتون بسیار ساده است، با وجود این، درک و کار کردن با آن‌ها، برای بسیاری از دانش‌آموزان مشکل است. دلیل این امر آن است که پیش از این که دانش‌آموزان به مطالعه‌ی فیزیک بپردازند سال‌های زیادی قدم زده‌اند، توپ پرتاب کرده‌اند، جعبه هل داده‌اند و ده‌ها کار مشابه که جملگی شامل حرکت بوده‌اند، انجام داده‌اند. به همین دلیل نظراتی را براساس عقل سلیم درباره‌ی حرکت و عوامل ایجادکننده‌ی آن به دست آورده‌اند. ولی بسیاری از این نظرات مبتنی بر عقل سلیم قابلیت تحلیل منطقی را ندارند. بخش بزرگی از کار ما در این فصل و در بقیه‌ی مراحل فیزیک، آن است که به دانش‌آموزان کمک کنیم تا تشخیص دهند که چگونه بعضی اوقات این نظرات براساس عقل سلیم آن‌ها را گمراه می‌کنند. هم‌چنین به آن‌ها کمک کنیم درک خود از دنیای فیزیکی را به گونه‌ای تنظیم کنند که با نتیجه‌ی آزمایش‌ها سازگار باشد.

## قانون اول نیوتون

### راهنمای تدریس: پیش از مطرح ساختن قانون اول

نیوتون می‌توانید در ابتدا اشاره‌ای به مطالب زیر داشته باشید:

برخی از ویژگی‌های نیرو را مطرح کرده‌ایم، ولی تا به حال چیزی درباره‌ی این که نیروها چگونه بر حرکت اثر می‌گذارند نگفته‌ایم.

در ابتدا بررسی می‌کنیم اگر نیروی خالص وارد بر جسمی صفر باشد چه اتفاقی می‌افتد. تقریباً بدون شک موافقید که اگر جسمی ساکن باشد و هیچ نیروی خالصی بر آن عمل نکند (یعنی هل دادن یا کشیدن خالصی وجود نداشته باشد) آن جسم، ساکن باقی خواهد ماند.

ولی اگر نیروی خالص غیر صفر بر جسمی که در حرکت

است عمل کند چه می‌شود؟

**فصل سوم، نیرو و قانون‌های نیوتون**

**قانون اول نیوتون**

قانون اول نیوتون به صورت زیر بیان می‌شود:

اگر هیچ نیرویی به جسم وارد نشود، آن جسم به حرکت یکنواخت خود در راستای خط مستقیم ادامه می‌دهد. همچنین اگر جسم در ابتدا ساکن باشد، در حال سکون باقی می‌ماند.



هرچند در آزمایشگاه نمی‌توان شرایطی را فراهم کرد که هیچ نیرویی به جسم وارد نشود، اما امروزه بشر این قانون را در فرستادن سفته‌های فضایی به خارج از زمین تا حدودی آزموده است. هرگاه سفته‌ای به اندازه‌ی کافی از زمین دور شود، می‌تواند با موتور خاموش و با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه دهد.

گاهی در مورد قانون اول نیوتون تمبیری به صورت «اگر بر جسمی هیچ نیرویی وارد نشود، جسم مایل است وضعیت حرکت خود را حفظ کند» نیز به کار می‌رود. به عبارت دیگر هر جسم، چه در حال سکون باشد و چه در حال حرکت یکنواخت روی خط راست، در صورتی که هیچ نیرویی به آن وارد نشود در همان وضعیت حرکت می‌ماند. این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را در نبود نیرو حفظ کنند، لغتی نام دارد. از این‌رو قانون اول نیوتون، قانون لغتی نیز نامیده می‌شود.

**پرسش ۳-۱**

وقتی در ماشین ساکنی نشست‌ایم و ماشین ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به عقب هل داده می‌شویم. همچنین اگر در ماشین در حال حرکت نشست‌ایم، هنگام توقف ناگهانی، به جلو پرتاب می‌شویم. این دو وضعیت را به کمک قانون اول نیوتون بررسی کنید.

**فعالیت ۳-۱**

کارتی را روی لیوانی قرار دهید. یک سکه را روی کارت، وسط لیوان بگذارید و با ضربه‌ی انگشت آن را به سرعت به حرکت در آورید (شکل ۳-۳). نتیجه‌ی آزمایش را به کمک قانون اول نیوتون شرح دهید.



شکل ۳-۳ ضربه‌ی سریع انگشت به کارت، کارت را از زیر سکه پرتاب می‌کند و سکه درون لیوان می‌افتد.

**بیش‌تر بدانید**

- آزمایش فکری کالیله وقانون اول نیوتون

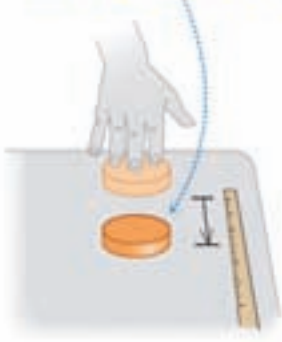
**تجربه‌سازی**

- قانون اول نیوتون

۳۴



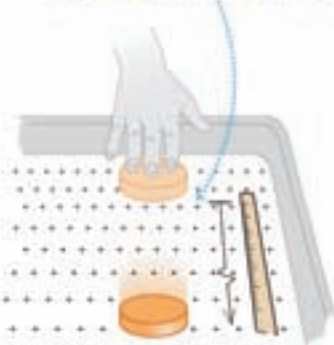
الف) میز: قرص در فاصله‌ی کوتاه می‌ایستد.



ب) میز: قرص در فاصله‌ی بیش‌تری می‌لغزد.



پ) میز هوا: قرص با فاصله‌ی بیش‌تری می‌لغزد.



شکل ۳- هر چه سطح صاف‌تر باشد، قرص پس از آن که یک سرعت آغازی به آن داده شود، مسافت بیش‌تری را می‌لغزد. روی میز هوایی (پ) نیروی اصطکاک در عمل صفر است، در نتیجه قرص با سرعت تقریباً ثابت به حرکت ادامه می‌دهد.

برای آن که ببینیم در این مورد چه روی می‌دهد فرض کنید یک قرص حاکی را با وارد کردن نیروی افقی با دستتان روی سطح افقی میزی بلغزانید (شکل ۳-الف). پس از آن که دست از هل دادن بردارید، قرص برای همیشه به حرکت خود ادامه نمی‌دهد، بلکه سرعت آن به تدریج کم می‌شود و می‌ایستد. برای آن که حرکت قرص تداوم داشته باشد باید همچنان آن را هل دهید (یعنی به آن نیرو وارد کنید). بنابراین ممکن است براساس عقل سلیم به این نتیجه برسید که اجسام در حال حرکت به طور طبیعی به سکون در می‌آیند و استمرار حرکت آن‌ها مستلزم نیرو است.

اینک فرض کنید که قرص را روی سطح یخی همواری هل دهید (شکل ۳-ب). پس از آن که دست از هل دادن بردارید، قرص پیش از آن که بایستد، فاصله‌ی بسیار زیادتری خواهد لغزید. اگر قرص را روی یک میز هوایی که در آن قرص روی لایه‌ی نازکی از هوا شناور می‌ماند قرار دهید، قرص باز هم فاصله‌ی بیش‌تری را می‌پیماید (شکل ۳-پ). در هر مورد آنچه سرعت قرص را کاهش می‌دهد اصطکاک است؛ یعنی بر هم کنش بین سطح پایینی قرص و سطحی که قرص روی آن می‌لغزد.

هر سطح نیروی اصطکاک‌ی به قرص وارد می‌کند که در مقابل حرکت قرص مقاومت می‌کند. تفاوت این سه مورد در بزرگی نیروی اصطکاک است. یخ اصطکاک کم‌تری از سطح میز وارد می‌کند؛ در نتیجه قرص مسافت بیش‌تری را می‌پیماید.

مولکول‌های گاز میز هوایی کم‌ترین اصطکاک را وارد می‌کنند. اگر می‌توانستیم اصطکاک را به طور کامل حذف کنیم، حرکت قرص هرگز کند نمی‌شد و هنگامی که قرص شروع به حرکت می‌کرد دیگر هیچ نیروی برای تداوم حرکت آن لازم نبود. بنابراین، نظر عقل سلیم که برای پایداری حرکت به یک نیرو نیاز است نادرست است.

تجربه‌ها، نظیر آن‌هایی که هم اکنون توصیف کردیم، نشان می‌دهند هرگاه نیروی خالصی بر جسم عمل نکند آن جسم یا ساکن می‌ماند یا با سرعت ثابت بر یک خط راست حرکت می‌کند.

همین که جسمی را به حرکت در آوریم، هیچ نیروی خالصی برای استمرار حرکت آن لازم نیست. اکنون این مشاهده را قانون اول نیوتون درباره‌ی حرکت می‌نامیم:

قانون اول نیوتون درباره‌ی حرکت: جسمی که هیچ نیروی خالصی بر آن عمل نمی‌کند با سرعت ثابت (که ممکن است صفر باشد) و شتاب صفر حرکت می‌کند.

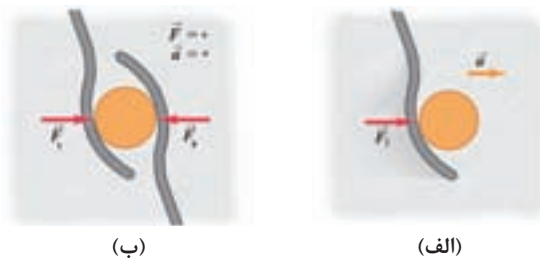
تمایل یک جسم به ادامه‌ی حرکت، پس از آن که به حرکت درآمده باشد، از خاصیتی که آن را **لختی** می‌نامند نتیجه می‌شود. هنگامی که سعی می‌کنید سس گوجه‌فرنگی را با تکان دادن از بطری خارج کنید از لختی استفاده می‌کنید. اقدم اولیه با حرکت دادن بطری (و سس داخل آن) به جلو شروع می‌شود. سپس، هنگامی که بطری را به سرعت به عقب می‌کشید، سس می‌خواهد هم چنان به حرکت رو به جلوی خود ادامه دهد و شما امیدوارید که به این ترتیب سس را روی غذای خود ببینید.

تمایل جسم ساکن به ساکن ماندن نیز ناشی از لختی است. شاید این را دیده باشید که یک رومیزی را از زیر ظرف‌های چینی روی آن به سرعت بیرون می‌کشند، بدون آن که چیزی بشکند. نیروی وارد بر ظرف‌ها به قدر کافی بزرگ نیست که بتواند در مدت زمان کوتاهی که رومیزی کشیده می‌شود، حرکت قابل ملاحظه‌ای به ظرف‌ها بدهد. توجه به این نکته مهم است که آنچه در قانون اول نیوتون اهمیت دارد نیروی خالص است. برای مثال فرض کنید یک قرص هاکی روی سطحی افقی با اصطکاک ناچیز مانند میز هوا یا لایه‌ای از یخ مرطوب ساکن باشد. اگر قرص از آغاز در حال سکون باشد و تک نیروی افقی  $\vec{F}_1$  بر آن وارد شود (شکل ۴-الف) شروع به حرکت می‌کند. اما اگر قرص از آغاز در حال حرکت باشد، نیروی وارد شده، بسته به جهتی که دارد، سرعت قرص، جهت حرکت آن یا هر دوی آن‌ها را تغییر می‌دهد. در این مورد نیروی خالص برابر با  $\vec{F}_1$  است و صفر نیست.

اینک فرض کنید که نیروی دومی مانند  $\vec{F}_2$  را که بزرگی آن برابر با بزرگی  $\vec{F}_1$  ولی در جهت خلاف آن است اعمال کنیم (شکل ۴-ب) این دو نیرو منفی یک دیگرند،  $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$  و جمع برداری آن‌ها صفر است:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_1 + (-\vec{F}_1) = \vec{0}$$

باز هم در می‌یابیم که اگر جسمی از آغاز در حال سکون باشد ساکن می‌ماند و اگر از آغاز در حرکت باشد با سرعت ثابت و در همان جهت به حرکت خود ادامه می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که در قانون اول نیوتون صفر بودن نیروی خالص با نبود نیرو در کل معادل است.



شکل ۴-الف) قرص هاکی در جهت نیروی خالص اعمال شده شتاب می‌گیرد.

ب) هنگامی که نیروی خالص صفر باشد، شتاب صفر بوده و قرص در تعادل است.



پرسش ۱-۳

برای پاسخ به این پرسش باید دانش آموزان به مفهوم لختی توجه کنند و به کمک این مفهوم توضیح دهند که وقتی اتومبیل به طور ناگهانی متوقف می‌شود به دلیل لختی همچنان به طرف جلو حرکت می‌کنیم و هنگام شروع حرکت نیز، همچنان می‌خواهیم ساکن بمانیم.

فعالیت ۲-۳

این فعالیت از جمله فعالیت‌های ساده‌ای است که به کمک آن می‌توان ویژگی لختی یک جسم را نمایش داد. وقتی ضربه‌ی سریعی به کارت زده می‌شود به دلیل لختی سکه، با عبور کارت از زیر آن به داخل لیوان سقوط می‌کند.

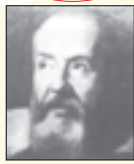
قانون دوم نیوتون

راهنمای تدریس: تدریس را مانند کتاب درسی از قانون

اول شروع کنید. قانون اول می‌گوید هرگاه نیروی خالص وارد بر جسمی صفر باشد، آن جسم با سرعت ثابت و شتاب صفر حرکت می‌کند. اما هرگاه نیروی خالص صفر نباشد چه اتفاقی می‌افتد؟ پس از طرح این پرسش به دانش آموزان فرصت دهید تا به طور گروهی روی پاسخ این پرسش با یکدیگر بحث کنند و نظرات خود را مطرح نمایند. پس از آن به کمک نیروسنج می‌توانید آزمایش زیر را انجام دهید:

با استفاده از نیروسنج فری‌ای که پیش از این توصیف شد، نیروی افقی ثابتی را بر قرصی که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارد اعمال می‌کنیم (شکل ۵-الف). اگر بزرگی نیروی خالص را تغییر دهیم شتاب به همان نسبت تغییر می‌کند. دو برابر کردن نیروی خالص شتاب را دو برابر می‌کند (شکل ۵-ب)، نصف کردن نیروی خالص شتاب را نصف

می‌کند (شکل ۵-پ) و نظایر آن‌ها. بسیاری از چنین آزمایش‌هایی نشان می‌دهند که برای هر جسم معین، بزرگی شتاب به طور مستقیم با بزرگی نیروی خالص وارد بر جسم متناسب است.



گالیلو گالیله (۱۶۴۲-۱۶۴۲) در دانشگاه پیزا به تحصیل پزشکی پرداخت و سپس به ریاضی تغییر رشته داد او ابتدا به حرکت علاقمند شد و سپس با معاصران خود که به نظریه‌های ارسطو در مورد سقوط آزاد معتقد بودند، اختلاف نظر پیدا کرد. سپس برای تدریس ریاضی در دانشگاه پادوا شد و از سال‌ها نظریه‌ی جدید کوپرنیکی منظومه شمسی شد. گالیله اولین کسی بود که تلسکوپ دست‌ساز خود را به طرف آسمان شب نشانه رفت و کوه‌هایی را روی ماه و قمرهای زحل اطراف مشتری کشف کرد. با کشفش آندیشه‌های گالیله، دیری نگذشت که گالیله با او درگیر شد و به او هشدار دادند که تدریس نکند و دیدگاه‌های کوپرنیکی را دنبال نکند. گالیله نزدیک به ۱۵ سال دیدگاه‌های خود را مخفی نگه‌داشت، اما پس از انتشار آن‌ها توسط گالیله، محاکمه و زندان‌نشانی شد و مجبور به اعتراف گردید تا کشف‌های خود را انکار کند. در این زمان، او که پیرمردی با تن و روانی درهم شکسته بود، محکوم شد برای همیشه در خانه‌ی خود تحت نظر باشد.

گالیله گالیله (۱۶۴۲-۱۶۴۲) در دانشگاه پیزا به تحصیل پزشکی پرداخت و سپس به ریاضی تغییر رشته داد او ابتدا به حرکت علاقمند شد و سپس با معاصران خود که به نظریه‌های ارسطو در مورد سقوط آزاد معتقد بودند، اختلاف نظر پیدا کرد. سپس برای تدریس ریاضی در دانشگاه پادوا شد و از سال‌ها نظریه‌ی جدید کوپرنیکی منظومه شمسی شد. گالیله اولین کسی بود که تلسکوپ دست‌ساز خود را به طرف آسمان شب نشانه رفت و کوه‌هایی را روی ماه و قمرهای زحل اطراف مشتری کشف کرد. با کشفش آندیشه‌های گالیله، دیری نگذشت که گالیله با او درگیر شد و به او هشدار دادند که تدریس نکند و دیدگاه‌های کوپرنیکی را دنبال نکند. گالیله نزدیک به ۱۵ سال دیدگاه‌های خود را مخفی نگه‌داشت، اما پس از انتشار آن‌ها توسط گالیله، محاکمه و زندان‌نشانی شد و مجبور به اعتراف گردید تا کشف‌های خود را انکار کند. در این زمان، او که پیرمردی با تن و روانی درهم شکسته بود، محکوم شد برای همیشه در خانه‌ی خود تحت نظر باشد.

گالیله گالیله (۱۶۴۲-۱۶۴۲) در دانشگاه پیزا به تحصیل پزشکی پرداخت و سپس به ریاضی تغییر رشته داد او ابتدا به حرکت علاقمند شد و سپس با معاصران خود که به نظریه‌های ارسطو در مورد سقوط آزاد معتقد بودند، اختلاف نظر پیدا کرد. سپس برای تدریس ریاضی در دانشگاه پادوا شد و از سال‌ها نظریه‌ی جدید کوپرنیکی منظومه شمسی شد. گالیله اولین کسی بود که تلسکوپ دست‌ساز خود را به طرف آسمان شب نشانه رفت و کوه‌هایی را روی ماه و قمرهای زحل اطراف مشتری کشف کرد. با کشفش آندیشه‌های گالیله، دیری نگذشت که گالیله با او درگیر شد و به او هشدار دادند که تدریس نکند و دیدگاه‌های کوپرنیکی را دنبال نکند. گالیله نزدیک به ۱۵ سال دیدگاه‌های خود را مخفی نگه‌داشت، اما پس از انتشار آن‌ها توسط گالیله، محاکمه و زندان‌نشانی شد و مجبور به اعتراف گردید تا کشف‌های خود را انکار کند. در این زمان، او که پیرمردی با تن و روانی درهم شکسته بود، محکوم شد برای همیشه در خانه‌ی خود تحت نظر باشد.



شیمه‌سازی  
قانون دوم نیوتون

قانون دوم نیوتون

بنا بر قانون اول، اگر بر جسمی هیچ نیروی وارد نشود، جسم یا ساکن می‌ماند یا حرکت یکنواخت بر خط راست خواهد داشت. نتیجه‌ی آشکار قانون اول این است که اگر بر جسم نیرو وارد شود، جسم ساکن نمی‌ماند و حرکت یکنواخت بر خط راست نیز نخواهد داشت. در این صورت وارد کردن نیرو بر جسم به آن شتاب می‌دهد. قانون دوم نیوتون رابطه‌ی شتاب جسم را با نیرویی که به آن وارد می‌شود، بیان می‌کند.

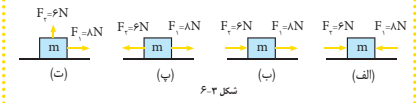
قانون دوم نیوتون به صورت زیر بیان می‌شود:  
شتاب جسمی به جرم  $m$  که نیروی  $\vec{F}$  بر آن وارد می‌شود، هم‌جهت و متناسب با نیروی وارد بر آن است و با جرم جسم نسبت عکس دارد. این بیان را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

رابطه‌ی بالا را به صورت  $\vec{F} = m\vec{a}$  نیز می‌توان نوشت. در این رابطه،  $\vec{F}$  برآیند همه‌ی نیروهای است که به جسم به جرم  $m$  وارد می‌شود و به آن شتاب  $\vec{a}$  می‌دهد. یکای نیرو، نیوتون (N) را نیز می‌توان از این رابطه تعریف کرد. اگر در رابطه‌ی  $\vec{F} = m\vec{a}$ ، جرم بر حسب کیلوگرم و شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه قرار داده شود، نیرو بر حسب  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$  خواهد شد که آن را نیوتون می‌نامیم. بنابراین «یک نیوتون، نیرویی است که اگر به جسمی به جرم  $1\text{kg}$  وارد شود، به آن شتابی برابر  $1\text{m}/\text{s}^2$  بدهد.»

مثال ۳-۱

نیروهای وارد شده به جسمی به جرم  $m = 2\text{kg}$  در چهار وضعیت متفاوت مطابق شکل ۶-۲ است. بزرگی شتاب جسم را در هر حالت به دست آورید. توجه کنید که نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  در راستای افق (محور x) به جسم وارد شده‌اند و تنها در شکل ۶-۲ نیروی  $F_3$  در راستای قائم (محور y) است.



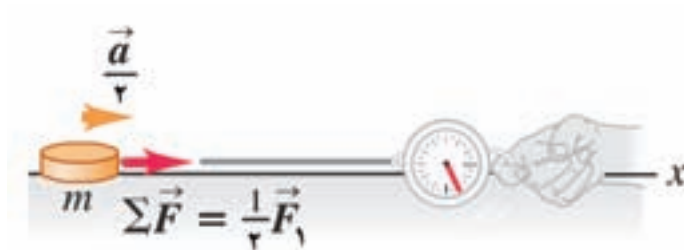
حل: ابتدا برآیند نیروهای وارد شده به جسم را در هر حالت پیدا می‌کنیم و سپس با استفاده از قانون دوم نیوتون شتاب جسم را به دست می‌آوریم. (سمت راست را جهت مثبت محور x فرض می‌کنیم).



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵ - برای جسمی با جرم معلوم  $m$ ، بزرگی شتاب به طور مستقیم با بزرگی نیروی خالص وارد بر آن متناسب است.

پس از انجام آزمایش، قانون دوم نیوتون را مطابق آنچه در کتاب درسی آمده است یا به صورت زیر مطرح کنید:

**قانون دوم نیوتون درباره‌ی حرکت:** اگر نیروی خارجی خالصی بر جسمی اثر کند آن جسم شتاب می‌گیرد. جهت شتاب همان جهت نیروی خالص است. جرم جسم ضرب در شتاب آن برابر است با بردار نیروی خالص. بر حسب نمادها

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (\text{قانون دوم نیوتون درباره‌ی حرکت})$$

به عبارت دیگر شتاب یک جسم در همان جهت نیروی خالص وارد بر آن است و با نیروی خالص تقسیم بر جرم جسم برابر است:

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

قانون دوم نیوتون یک قانون بنیادی طبیعت یعنی رابطه‌ی اساسی بین نیرو و حرکت است.



شکل ۶- طراحی موتورسیکلت‌های با عملکرد بالا به طور بنیادی به قانون دوم نیوتون بستگی دارد. طراح به منظور بیشینه کردن شتاب رو به جلو، موتورسیکلت‌ها را تا آنجا که ممکن است سبک می‌سازد (یعنی جرم را کمینه می‌کند) و از قوی‌ترین موتورهای ممکن استفاده می‌کند (در نتیجه نیروی رو به جلو را بیشینه می‌کند).

معادله‌ی  $\vec{F} = m\vec{a}$  کاربردهای عملی فراوانی دارد (شکل ۶). آن را در تمام دوران زندگی خود برای اندازه‌گیری شتاب بدنمان به کار می‌بریم. در گوش داخلی ما یاخته‌های میکروسکوپی مو بزرگی و جهت نیرویی را که باید بر غشاهای کوچک وارد کنند تا آنها با بقیه‌ی بدن شما شتاب بگیرند تشخیص می‌دهند. بنابر قانون دوم نیوتون، شتاب غشاها و در نتیجه شتاب بدن ما به طور کلی با این نیرو متناسب است و همان جهت را دارد. به این ترتیب ما می‌توانیم بزرگی و جهت شتاب خود را، حتی هنگامی که چشمانمان بسته است، احساس کنیم.

### تمرین ۱-۳

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$۱۰\text{ N} = m(۲\text{ m/s}^2) \Rightarrow m = ۵\text{ kg}$$



### جرم و نیرو

نتایجی که به دست آوردیم بیانگر آن است که برای یک جسم معین، نسبت بزرگی نیروی خالص  $|\vec{F}|$  به بزرگی شتاب  $a = |\vec{a}|$  بدون توجه به بزرگی نیروی خالص، ثابت است. این نسبت را جرم لختی یا به سادگی جرم می‌نامند و آن را با  $m$  نشان می‌دهند. یعنی:

$$m = \frac{|\vec{F}|}{a} \quad \text{یا} \quad |\vec{F}| = ma \quad \text{یا} \quad a = \frac{|\vec{F}|}{m}$$

جرم معیاری کمی از لختی است که درباره‌ی آن بحث کردیم. آخرین معادله از معادله‌های بالا نشان می‌دهد که هر چه جرم جسم بزرگ‌تر باشد، جسم در مقابل شتاب یافتن بیش‌تر مقاومت می‌کند. هنگامی که در بازار، میوه‌ای را با دست خود بالا و پایین می‌برید تا سنگینی آن را تخمین بزنید، در واقع نیرویی اعمال می‌کنید تا ببینید که میوه در پاسخ چه قدر به نیرو به بالا و پایین شتاب می‌گیرد. اگر نیرو شتاب زیادی ایجاد کند، میوه دارای جرم کوچکی است. اگر همین نیرو تنها یک شتاب جزئی به میوه بدهد جرم آن زیاد است. به همین ترتیب، اگر به توپ تنیس روی میز ضربه بزنید و سپس با همان نیرو به یک توپ بسکتبال ضربه وارد کنید، مشاهده خواهید کرد که توپ بسکتبال شتاب بسیار کم‌تری پیدا می‌کند، زیرا جرم بزرگ‌تری دارد.

## قانون سوم نیوتون

### راهنمای تدریس: در این قانون دانش آموزان به این

درک خواهند رسید که نیرویی که بر جسمی اثر می‌کند، همواره نتیجه‌ی برهم کنش آن جسم با جسمی دیگر است. در نتیجه نیروها همواره به صورت زوج عمل می‌کنند. هرگز نمی‌توانیم دستگیره‌ی دری را بکشیم بدون آن که دستگیره هم ما را بکشد. هنگامی که توپ فوتبالی را شوت می‌کنیم، نیروی رو به جلویی که پای ما به توپ وارد می‌کند، توپ را در مسیرش پرتاب می‌کند، ولی توپ نیز به پای ما نیرو وارد می‌کند. اگر به سنگ بزرگی لگد بزیم دردی که احساس می‌کنیم ناشی از نیرویی است که سنگ به پای ما وارد کرده است.

در هر یک از مثال‌هایی که برای دانش آموزان خواهید زد در می‌یابند نیرویی که ما بر جسم وارد می‌کنیم، در خلاف جهت نیرویی است که جسم به ما وارد می‌کند. افزون بر این،

#### نمط سوم نیرو و قانون‌های نیوتون

در وضعیت (الف) داریم

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \Rightarrow \vec{F} = -\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-AN) + (\phi N) = -\gamma N$$

$$F = ma \Rightarrow (-\gamma N) = (\gamma kg) a \Rightarrow a = -1 \text{ m/s}^2$$

علامت منفی نشان می‌دهد جسم شتابی به بزرگی  $1 \text{ m/s}^2$  و در جهت مخالف محور  $x$  به دست می‌آورد.

در وضعیت (ب) داریم

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \Rightarrow \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (\phi N) + (\phi N) = 1\gamma N$$

$$F = ma \Rightarrow 1\gamma N = (\gamma kg) a \Rightarrow a = \gamma \text{ m/s}^2$$

در وضعیت (پ) داریم

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \Rightarrow \vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 = (\phi N) + (-\phi N) = 0$$

$$F = ma \Rightarrow 0 = (\gamma kg) a \Rightarrow a = 0 \text{ m/s}^2$$

در وضعیت (ت) نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  بر یک‌دیگر عمودند و با توجه به چگونگی به دست آوردن برابری بردارهای عمود بر هم از فصل اول داریم

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \Rightarrow F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(\phi N)^2 + (\phi N)^2} = \sqrt{2} \phi N = 1.41 \phi N$$

$$F = ma \Rightarrow 1.41 \phi N = (\gamma kg) a \Rightarrow a = 0.707 \phi \text{ m/s}^2$$

#### تمرین ۳-۱

بزرگی برابری نیروهای وارد بر جسمی برابر  $1 \text{ N}$  است. اگر جسم شتابی برابر  $2 \text{ m/s}^2$  گرفته باشد، جرم آن چقدر است؟

#### قانون سوم نیوتون

قانون اول نیوتون، وضعیت جسم را در نبود نیرو و قانون دوم، وضعیت آن را وقتی تحت تأثیر نیرو است، توصیف می‌کند. اما این قانون‌ها، مشخص نمی‌کنند که نیروی وارد بر جسم از کجا به آن وارد می‌شود. همان‌طور که تجربه‌های روزانه نشان می‌دهد همواره یک جسم به جسم دیگر نیرو وارد می‌کند. بازیکن فوتبال، با پا به توپ ضربه می‌زند. یعنی پا به توپ نیرو وارد می‌کند. شخصی که جسمی را روی زمین می‌کشد، به آن نیرو وارد می‌کند. نیوتون با بیان قانون سوم، در ۱۶۸۷ به عضویت لجن سلفتنی انتخاب شد. در اینجا اولین تلسکوپ بازتابی جهان را به مشخص کرد که نیروی وارد بر یک جسم از طرف جسم دیگر است و افزون بر آن معلوم کرد که وارد کردن نیرو، یک جاذبه نیست و همواره عملی دو جاذبه است.

قانون سوم نیوتون به صورت زیر بیان می‌شود:

اگر جسم (۱) بر جسم (۲) نیرو وارد کند، جسم (۲) نیز متقابلاً نیرویی بر جسم (۱) وارد می‌کند. اگر نیرویی را که جسم (۱) بر جسم (۲) وارد می‌کند،  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  نامیم، این دو نیرو همان‌اندازه، هم‌راستا و در دو سوی مخالف یک‌دیگرند. یعنی  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$



ایزاک نیوتون (۱۶۴۳-۱۷۲۷) دانشمند انگلیسی در همان سالی متولد شد که کالیله درگذشت. پسرش چند ماه پیش از تولد او درگذشته بود و او تحت سرپرستی مادر و مادرسزگ خود رشد کرد. در کودکی، هیچ نشانه‌ای از تیزهوشی در او نبود و پس از ۵ سال تحصیل در دانشگاه کمبریج بدون هیچ ویژگی خاصی فارغ‌التحصیل شد. به زمره‌ی طلسمون در سراسر انگلستان به زمره‌ی مدارس بزرگت و در زمره (۱۶۴۳-۱۶۴۴) پایه‌های کاری را گذاشت که او را جلدان ساخت. قانون گرانش عمومی را تدوین کرد. حسابان را (که ابزار ریاضی بسیار مهمی است) ابداع کرد. کارهای کالیله را توسعه داد و سه قانون بنیادی حرکت را تدوین کرد. نظریه‌ی متسور نشان داد که نور سفید از رنگ‌های رنگین کمان تشکیل شده است. نیوتون در ۲۸ سالگی استاد کرسی ریاضیات لوکاس شد و در ۱۶۸۷ به عضویت لجن سلفتنی انتخاب شد. در اینجا اولین تلسکوپ بازتابی جهان را به نمایش گذاشت. پدر ۳۳ سالگی کتاب ارزشمند اصول ریاضی فلسفه‌ی طبیعی را پس از نزدیک به ۲ سال کار تألیف کرد.



آزمایشگاه مجازی  
نیرو در یک بند

دانش آموزان باید به این نکته نیز توجه کنند که آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هرگاه دو جسم برهم کنش کنند، دو نیرویی که آن‌ها بر یکدیگر وارد می‌کنند، همواره دارای بزرگی یک‌سان و در خلاف جهت یکدیگرند. این واقعیت قانون سوم نیوتون درباره‌ی حرکت نامیده شده است:

**قانون سوم نیوتون درباره‌ی حرکت:** اگر جسم  $A$  نیرویی بر جسم  $B$  وارد کند (یک کنش)، آن‌گاه جسم  $B$  نیز نیرویی بر جسم  $A$  وارد می‌کند (یک واکنش). این دو نیرو دارای بزرگی یک‌سان بود. ولی در خلاف جهت یکدیگرند. این دو نیرو بر دو جسم مختلف وارد می‌شوند.

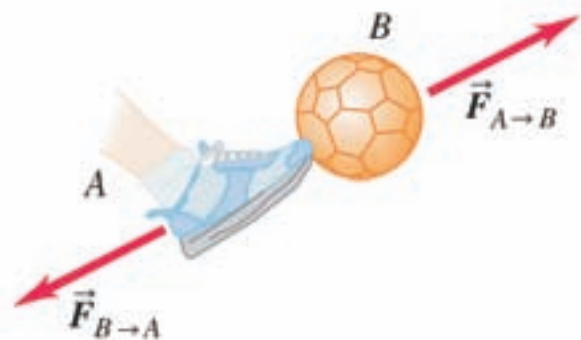
برای مثال می‌توانید شکل ۷ را روی تابلو رسم کنید و نشان دهید که نیروها همواره به صورت زوج عمل می‌کنند. در این شکل  $\vec{F}_{A \rightarrow B}$  نیرویی است که جسم  $A$  (زیرنویس اول) بر جسم  $B$  (زیرنویس دوم) وارد می‌کند و  $\vec{F}_{B \rightarrow A}$  نیرویی است که جسم  $B$  (زیرنویس اول) بر جسم  $A$  (زیرنویس دوم) وارد می‌کند. بیان ریاضی قانون سوم نیوتون به قرار زیر است:

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A} \quad (\text{قانون سوم نیوتون درباره‌ی حرکت})$$

مهم نیست که یک جسم بی‌جان باشد (مثل توپ فوتبال در شکل ۷) و دیگری جاندار (مثل شوت کننده‌ی توپ). آن‌ها الزاماً نیروهایی بر یکدیگر وارد می‌کنند که تابع معادله‌ی بالا باشد. در بیان قانون سوم نیوتون «کنش» و

«واکنش» دو نیروی مخالف یکدیگرند ( $\vec{F}_{B \rightarrow A}$  و  $\vec{F}_{A \rightarrow B}$  در شکل ۷)؛ بعضی اوقات آن‌ها را یک زوج کنش-واکنش می‌نامیم.

این نحوه نامیدن دلیلی بر داشتن رابطه‌ی علت و معلولی نیست. هر یک از نیروها را می‌توانیم به عنوان «کنش» و دیگری را به عنوان «واکنش» در نظر بگیریم. اغلب به سادگی می‌گوییم که این نیروها «مساوی و مخالف‌اند»، به این معنا که بزرگی یکسان دارند، ولی جهت آن‌ها مخالف یکدیگر است.



شکل ۷- اگر جسم A نیروی  $\vec{F}_{A \rightarrow B}$  را بر جسم B وارد کند، آن‌گاه جسم B نیز نیروی  $\vec{F}_{B \rightarrow A}$  را بر جسم A وارد می‌کند که از نظر بزرگی با آن مساوی بوده و در خلاف جهت آن است:  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$

در شکل ۷، نیروهای کنش و واکنش نیروهای تماسی‌ای هستند که هنگامی که دو جسم یکدیگر را لمس می‌کنند حضور دارند. ولی قانون سوم نیوتون در مورد نیروهای بلند-بردی (که مستلزم تماس فیزیکی نیستند، مثل نیروی ربایش گرانشی) نیز برقرار است. برای مثال، توپ تنیس روی میز نیرویی به طرف بالای گرانشی بر زمین وارد می‌کند که بزرگی آن با بزرگی نیروی به طرف پایین گرانشی که زمین بر توپ وارد می‌کند برابر است. هنگامی که توپ را رها می‌کنید توپ و زمین هر دو به طرف یکدیگر شتاب می‌گیرند. نیروی خالص وارد بر هر یک از دو جسم بزرگی یکسان دارند، ولی شتاب زمین به دلیل جرم خیلی زیادش به گونه‌ای میکروسکوپی کوچک است، با این وجود زمین حرکت می‌کند!

در پایان توجه دانش‌آموزان را به هشدار زیر نیز جلب کنید:

**هشدار:** دو نیروی یک زوج کنش-واکنش بر جسم‌های مختلف اثر می‌کنند.

تأکید می‌کنیم دو نیرویی که در قانون سوم نیوتون توصیف می‌شوند بر اجسام مختلف وارد می‌گردند. این مطلب در مسائلی که با قانون اول یا دوم نیوتون سروکار دارند و شامل نیروهایی می‌شوند که بر یک جسم اثر می‌کنند مهم است. برای مثال، نیروی خالصی که بر توپ فوتبال شکل ۷ وارد می‌شود با جمع برداری وزن توپ و نیروی  $\vec{F}_{A \rightarrow B}$  که توسط شوت زدن وارد می‌شود برابر است. نیروی  $\vec{F}_{B \rightarrow A}$  را در این میان به حساب نمی‌آوریم، زیرا این نیرو روی شوت زدن اثر می‌کند، نه روی توپ.

### تمرین ۳-۳

برای توصیف دلیل حرکتِ شخص، دانش آموزان باید قادر باشند از قوانین دوم و سوم نیوتون به درستی استفاده کنند. بنا بر قانون سوم نیوتون، با خروج گاز کربن دی‌اکسید از کپسول، نیرویی به طرف چپ به شخص وارد می‌شود. این نیرو، با توجه به قانون دوم نیوتون،  $\vec{F} = m\vec{a}$ ، شتابی در جهت نیرو به شخص می‌دهد.

### پرسش پیشنهادی

در حال راندن اتومبیل خود در یک جاده‌ی روستایی هستید که پشه‌ای به شدت به شیشه‌ی جلوی اتومبیل شما برخورد می‌کند. بزرگی کدام یک از دو نیرویی که اتومبیل بر پشه وارد می‌کند یا پشه بر اتومبیل وارد می‌کند، بیش‌تر است؟ یا این که بزرگی‌ها برابرند؟ اگر بزرگی‌ها متفاوت باشند چگونه آن را با قانون سوم نیوتون وفق می‌دهید؟ اگر نیروها برابرند چرا پشه له می‌شود، در حالی که اتومبیل صدمه‌ای نمی‌بیند؟

### ۳-۳ قانون‌های نیرو

در این قسمت دانش آموزان، علاوه بر آشنایی با قانون‌های نیرو (شامل قانون گرانش نیوتون)، با برخی از انواع نیرو (شامل نیروی وزن، نیروی عمومی سطح و نیروی اصطکاک) آشنا خواهند شد. افزون بر این، خواهند دید که هر قانون نیرو، رابطه‌ای را به دست می‌دهد که به کمک آن می‌توانیم بزرگی نیرو را محاسبه کنیم.

### قانون گرانش نیوتون

**راهنمای تدریس:** ابتدا می‌توانید توجه دانش آموزان را به پرسش‌هایی جلب کنید که مردم درباره‌ی آسمان شب می‌پرسیدند. چرا ماه به زمین نمی‌افتد؟ چرا سیاره‌ها در آسمان حرکت می‌کنند؟ چرا زمین به جای آن که در مداری گرد خورشید بماند به درون فضا پرواز نمی‌کند؟ در ادامه‌ی این

اگر یکی از این دو نیرو را کنش (عمل) بنامیم، نیروی دیگر واکنش (عکس‌العمل) نامیده می‌شود (شکل ۳-۲). لازم است توجه کنید که تفاوتی ندارد که کدام نیرو را کنش و کدام یک را واکنش بنامیم. مفهوم اساسی قانون سوم نیوتون این است که نیروی تک در طبیعت وجود ندارد.



در اینجا می‌توانیم با توجه به اثرها و ویژگی‌های نیرو که در ابتدای این فصل با آن آشنا شدیم این موضوع را نیز اضافه کنیم که نیروی متقابل دو جسم بر یکدیگر یا بر هم کنش آن‌ها با یکدیگر است.

**پرسش ۳-۳**

شکل ۳-۳ شخصی را نشان می‌دهد که با پوشیدن کنش‌های چرخ‌دار (اسکیت)، کپسولی دارای گاز کربن دی‌اکسید را به پشت خود بسته و شیر آن را باز کرده است. با استفاده از قانون‌های نیوتون توضیح دهید چرا شخص حرکت می‌کند.

**۳-۳ قانون‌های نیرو**

همان‌طور که دیدیم بنا بر قانون دوم نیوتون، شتاب جسمی به جرم  $m$  متناسب با برابند نیروهای وارد بر آن از طرف تمام اجسام دیگر است. در نتیجه برای به دست آوردن شتاب یک جسم باید چگونگی بر هم کنش اجسام دیگر را روی آن معین کرد. قانون‌های نیرو رابطه‌ای را که بنا بر آن بر هم کنش صورت می‌گیرد، معین می‌کنند.

**قانون گرانش نیوتون:** کشف قانون گرانش نیوتون، بعد از قانون‌های حرکت، یکی دیگر از کارهای بزرگ نیوتون است. به کمک این قانون می‌توان وزن اجسام، قانون‌های مربوط به حرکت سیاره‌ها به دور خورشید، حرکت ماهواره‌ها به دور زمین و پدیده‌هایی نظیر جزر و مد را توجیه کرد. دو جسم به جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$  مطابق شکل ۳-۳ در صورتی که فاصله‌ی مرکزهای این دو جسم از یکدیگر برابر  $r$  و ابعاد دو جسم در مقایسه با  $r$  خیلی کوچک باشد، در این صورت آن‌ها را به صورت یک ذره در نظر می‌گیریم. با این نگاه می‌توان خورشید و زمین، یا زمین و ماه را نسبت به یکدیگر ذره در نظر گرفت.

بنا بر نظریه‌ی گرانش نیوتون، هر دو ذره به جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$  به یکدیگر نیروی ربایشی وارد می‌کنند. این نیرو در راستای خطی است که آن دو ذره را به هم وصل می‌کند. اندازه‌ی نیرویی که به یکی از دو جرم وارد می‌شود، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

شکل ۳-۳ نیرویی که هر جسم به جسم دیگر وارد می‌کند. این نیروها همواره هم‌اندازه، هم‌راستا و در سوی مخالف یکدیگرند.



شکل ۳-۳

**تشبیه‌سازی**  
قانون سوم نیوتون

**بیش‌تر بدانید**  
کنش و واکنش بر جرم‌های متفاوت  
مقاوت  
مغایب  
مغایب سه قانون نیوتون

**از ماینسگاه مجازی**  
نیروی گرانش



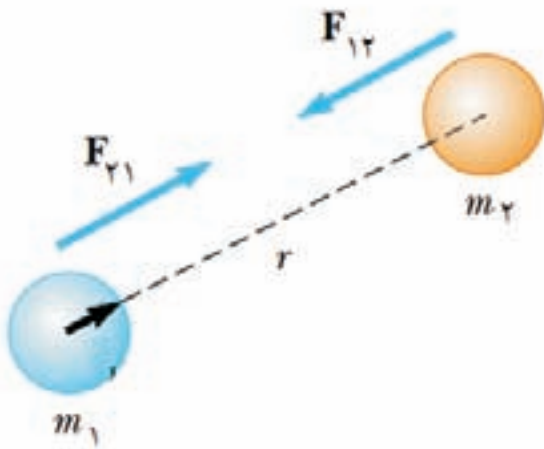
بخش دانش‌آموزان خواهند دید که بررسی گرانش و قانون مربوط به آن، پاسخ این پرسش‌ها و بسیاری پرسش‌های مرتبط دیگر را فراهم می‌کند.

به دانش‌آموزان یادآور شوید که نیوتون در حین بررسی حرکت سیاره‌ها و ماه، سرشت بنیادی ربایش گرانشی بین هر دو جسمی را کشف کرد. او قانون گرانش را در سال ۱۶۸۷ میلادی همراه با سه قانون خود درباره‌ی حرکت به چاپ رساند.

پس از آن، قانون گرانش نیوتون را برای هر دو ذره‌ی مادی موجود در جهان، که جرم آن‌ها به ترتیب  $m_1$  و  $m_2$  و به فاصله‌ی  $r$  از یکدیگر واقع‌اند (شکل ۸)، به صورت رابطه‌ی زیر بیان کنید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

پس از آن می‌توانید فعالیت بعد را مطرح کنید تا دانش‌آموزان جاهای خالی را در آن کامل کنند.



شکل ۸

### فعالیت پیشنهادی

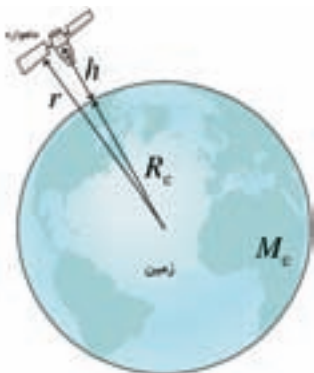
قانون گرانش می‌گوید نیروی گرانشی بین دو ذره با ..... فاصله‌ی  $r$ ، کاهش می‌یابد. اگر فاصله دو برابر شود، نیرو ..... می‌شود. همچنین اگر فاصله نصف شود، نیرو ..... می‌شود.

برخی از نکاتی که دانش‌آموزان باید هنگام کار با قانون گرانش به آن توجه داشته باشند به شرح زیر است:

- ۱- ثابت گرانش  $G$  را با شتاب ناشی از گرانش  $g$ ، اشتباه نگیرند.
- ۲- نیروهای گرانشی همواره در راستای خطی عمل می‌کنند که دو ذره را به هم اتصال می‌دهند.
- ۳- نیروهای گرانشی یک زوج کنش-واکنش تشکیل می‌دهند. این دو نیروی برهم کنش، حتی هنگامی که جرم ذره‌ها مختلف باشند بزرگی مساوی دارند.

### تمرین پیشنهادی

ماهواره‌ای به جرم  $200 \text{ kg}$  در مداری به فاصله‌ی  $400$  کیلومتر، دور زمین می‌چرخد (شکل ۹). بزرگی نیروی گرانشی وارد به ماهواره چقدر است؟ جرم زمین را  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$  و شعاع آن را  $6400 \text{ km}$  بپذیرید.



شکل ۹



## تعیین مقدار G

برای تعیین مقدار ثابت گرانشی G باید نیروی گرانشی بین دو جسم با جرم‌های معلوم  $m_1$  و  $m_2$  را در فاصله‌ی معلوم r از یکدیگر اندازه بگیریم. این نیرو برای جسم‌هایی که به قدر کافی کوچک باشند و می‌توان آن‌ها را به آزمایشگاه برد بی‌نهایت کوچک است، ولی می‌توان آن را با وسیله‌ای به نام ترازوی پیچشی، که سر هنری کاوندیش از آن در سال ۱۷۹۸ میلادی برای تعیین G استفاده کرد، اندازه گرفت.

نوع جدیدی از ترازوی پیچشی کاوندیش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میله‌ی سبک و صلبی به شکل T وارون، توسط تار بسیار نازک قائمی از جنس کوارتز نگه داشته شده است.

دو گوی کوچک، هر یک به جرم  $m_1$ ، در دو انتهای بازوی افقی T نصب شده‌اند. هنگامی که دو گوی بزرگ، هر یک به جرم  $m_2$  را به مکان‌های نشان داده شده می‌آوریم، نیروهای گرانشی رباینده T را به اندازه‌ی زاویه‌ی کوچکی می‌چرخانند. برای اندازه‌گیری این زاویه باریکه‌ای از نور را به آینه‌ای که به T بسته شده است می‌تابانیم. نور بازتابیده به قسمت درجه‌بندی شده‌ای برخورد می‌کند و با چرخش T نور بازتابیده روی درجه‌بندی حرکت می‌کند.

پس از درجه‌بندی کردن ترازوی کاوندیش می‌توانیم نیروهای گرانشی را اندازه بگیریم و سپس G را تعیین کنیم. مقداری که در حال حاضر برای G (برحسب یکاهای SI) پذیرفته شده برابر است با:

$$G = 6.6742(10) \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2$$

مقدار G با سه رقم بامعنا برابر است با

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m} / \text{s}^2 \text{ از آنجا که } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2$$

یکای G را می‌توان (برحسب یکاهای بنیادی SI) به صورت  $\text{m}^3 / (\text{kg.s}^2)$  نیز بیان کرد.



شکل ۱۰



## چرا نیروهای گرانشی مهم‌اند؟

نیروهای گرانشی بین جسم‌هایی با اندازه‌های لوازم خانگی ناچیزند، ولی بین جسم‌هایی در اندازه‌ی ستاره‌ها بسیار عظیم‌اند. در واقع در مقیاس سیاره‌ها، ستاره‌ها و کهکشان‌ها، گرانش مهم‌ترین نیروهاست (شکل ۱۱). این نیرو موجب نگه داشتن زمین گرد خود و نگه داشتن سیاره‌ها در مدارشان به گرد خورشید می‌شود. ربایش گرانشی متقابل بین



شکل ۱۱

بخش‌های مختلف خورشید موجب می‌شود که ماده در هسته‌ی خورشید تا چگالی‌ها و دماهای بسیار زیاد فشرده شود و امکان وقوع واکنش‌های هسته‌ای را در آنجا فراهم سازد. این واکنش‌ها تولید کننده‌ی انرژی خارج شده از خورشیدند که امکان وجود حیات روی زمین و خواندن این کتاب برای شما را فراهم آورده است.

نیروی گرانشی در مقیاس کیهانی بسیار مهم است. زیرا این نیرو از فاصله، بدون هیچ تماس مستقیمی در بین جسم‌ها، عمل می‌کند. نیروهای الکتریکی و مغناطیسی نیز

همین ویژگی قابل توجه را دارند، ولی در مقیاس‌های نجومی اهمیت کمتری دارند، زیرا توده‌های بزرگ ماده از نظر الکتریکی خنثا هستند؛ یعنی از بارهای مثبت و منفی به مقدار مساوی دارند. در نتیجه نیروهای الکتریکی و مغناطیسی بین ستاره‌ها یا سیاره‌ها بسیار کوچک یا صفرند.

برهم کنش‌های قوی و ضعیف نیز از فاصله عمل می‌کنند. ولی اثر آن‌ها در فاصله‌هایی خیلی بیش‌تر از قطر یک هسته‌ی اتمی (حدود  $10^{-14}m$ ) ناچیز است.

یک راه مفید برای توصیف نیروهایی که از فاصله عمل می‌کنند بیان آن‌ها بر حسب میدان است. یک جسم در تمام نقطه‌ها در فضای اطراف خود یک آشفتگی یا میدان ایجاد می‌کند و نیرویی که بر جسم دوم در یک نقطه

خاص وارد می‌شود، پاسخ آن به میدان جسم اول در آن نقطه است. به هر نیرویی که از فاصله عمل می‌کند یک میدان وابسته است. در نتیجه از میدان‌های گرانشی، میدان‌های الکتریکی، میدان‌های مغناطیسی و نظایر آن‌ها یاد می‌کنیم. برای مطالعه‌ی گرانش در این فصل به مفهوم میدان نیاز نداریم. بنابراین، در نتیجه در اینجا بیش از این درباره‌ی آن بحث نمی‌کنیم. ولی در فصل‌های بعد در خواهیم یافت که مفهوم میدان برای توصیف برهم کنش‌های الکتریکی و مغناطیسی ابزاری توانمند است.

## وزن

### راهنمای تدریس: وزن را به صورت نیروی ربایش

گرانشی زمین که به هر جسمی وارد می‌شود تعریف می‌کنند. با توجه به آشنایی دانش‌آموزان با این مفهوم، می‌توانید در ابتدای تدریس از دانش‌آموزان بخواهید که تعریف یا برداشت

فصل سوم/ نیرو و قانون‌های نیوتون

در این رابطه  $G$  ثابت جهانی گرانش نام دارد و مقدار آن در SI برابر است با  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$

**مثال ۳-۱**

جرم زمین و خورشید به ترتیب برابر  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$  و  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  است. اگر فاصله‌ی متوسط زمین تا خورشید  $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$  باشد، نیروی گرانشی وارد از خورشید بر زمین چقدر است؟

**حل:** چون فاصله‌ی زمین از خورشید نسبت به شعاع‌های زمین و خورشید بسیار بزرگ‌تر است، زمین و خورشید را می‌توان مانند دو ذره در نظر گرفت (شکل ۳-۹). بنا بر این قانون گرانش نیوتون داریم

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{(6 \times 10^{24} \text{ kg})(2 \times 10^{30} \text{ kg})}{(1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 3.75 \times 10^{22} \text{ N}$$

**وزن:** نمونه‌ی بارز نیروی گرانش، وزن اجسام روی زمین است که همان نیروی گرانش کره‌ی زمین است که بر آن‌ها وارد می‌شود.

اگر شعاع کره‌ی زمین را با  $R_E$  و جرم آن را با  $M_E$  نشان دهیم، نیروی گرانشی‌ای که بر جسمی به جرم  $m$  در روی کره‌ی زمین (و اطراف زمین) وارد می‌شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$W = G \frac{M_E m}{R_E^2}$$

این نیرو که در راستای شعاع کره‌ی زمین و در نتیجه عمود بر سطح آن است همان نیروی وزن جسمی به جرم  $m$  است که با حرف  $W$  نشان داده می‌شود (شکل ۳-۱۰).

شکل ۳-۹: نیروی گرانشی وارد از طرف زمین بر جسم است.  $W$  واکنش این نیرو است که از طرف جسم بر زمین وارد می‌شود.

شکل ۳-۱۰: وزن جسم  $W$ ، نیروی گرانشی وارد از طرف زمین بر جسم است.  $W$  واکنش این نیرو است که از طرف جسم بر زمین وارد می‌شود.

شکل ۳-۹

۵۷

خود را از مفهوم وزن ارائه نمایند. سپس به جمع‌بندی موضوع پردازید.

پس از بیان رابطه‌ی  $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$ ، توجه دانش‌آموزان را به اهمیت این رابطه جلب کنید. تمام کمیت‌های این رابطه به جز  $M_e$ ، قابل اندازه‌گیری هستند. در نتیجه از این رابطه می‌توانیم جرم زمین را حساب کنیم.

### تمرین پیشنهادی

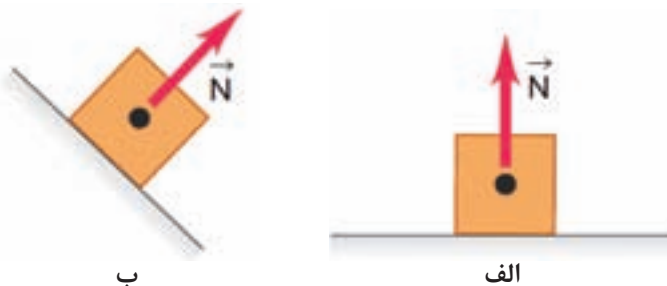
یک کاوشگر بدون سرنشین به سطح سیاره‌ی مریخ که دارای شعاع و جرم  $M_M = 6/42 \times 10^{23} \text{ kg}$  است، فرستاده شده است (شکل ۱۲). وزن این کاوشگر را در سطح مریخ محاسبه کنید (راهنمایی: ابتدا  $g$  را در سطح مریخ پیدا کنید).



شکل ۱۲

### نیروی عمودی سطح

**راهنمای تدریس:** نیروی عمودی سطح به طور ساده‌ای در کتاب درسی آمده است. افزون بر آنچه در کتاب اشاره شده است، توجه دانش‌آموزان را به این نکته جلب کنید که نیروی عمودی توسط هر سطحی که با جسم در تماس باشد، بر جسم وارد می‌شود (شکل ۱۳ الف). همچنین صفت عمودی به این معناست که این نیرو همواره، صرف نظر از زاویه‌ی سطح، بر سطح تماس عمود است (شکل ۱۳ ب).



شکل ۱۳ - نیروی عمودی سطح  $\vec{N}$ . هنگامی که جسمی روی سطحی ساکن باشد یا آن را هل دهد، سطح نیز جسم را در جهت عمود بر سطح هل می‌دهد.

همواره جرم وزن را به‌دقت اندازه‌گیری کنید. در زندگی روزمره اغلب نگاه‌های SI برای جرم و وزن را با هم به کار می‌برند. عبارات‌های نادرستی مانند «این جسم ۴ kg وزن دارد» تقریباً جهانی‌اند. منظور از بیان این عبارت آن است که جرم جبهه که احتمالاً به طور غیر مستقیم با وزن کردن آن تعیین شده است ۴ kg است. مراقب باشید که از این استفاده‌ی سهل‌انگانه در کارهای خود اجتناب کنید. در نگاه‌های SI وزن را (که یک نیرو است) بر حسب نیوتون اندازه می‌گیرند در حالی که جرم بر حسب کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شود.

پیش‌تر بدانید  
تقریباً ی گرایش بیشترین به زبان ساده  
سیاحت‌ها

از آنجا که هنگام سقوط آزاد جسم در نزدیکی سطح زمین شتاب  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  است، نیروی وارد بر جسم هنگام سقوط آزاد  $F = mg$  است. از طرفی هنگام سقوط آزاد جسم، تنها نیروی وزن بر جسم وارد می‌شود. یعنی

$$F = W = mg$$

$$g = G \frac{M_e}{R_e^2}$$

یعنی شتاب جاذبه‌ی گرانشی زمین در نزدیکی سطح زمین به جرم اجسامی که به طرف زمین سقوط می‌کنند، بستگی ندارد.

#### مثال ۳-۳

شتاب گرانش را در سطح ماه به دست آورید و آن را با شتاب گرانش در سطح زمین مقایسه کنید. جرم ماه  $M_m = 7.3 \times 10^{22} \text{ kg}$  و شعاع آن  $R_m = 1.74 \times 10^6 \text{ m}$  است.

حل: برای به دست آوردن شتاب گرانش در سطح ماه داریم

$$g_m = G \frac{M_m}{R_m^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(7.3 \times 10^{22} \text{ kg})}{(1.74 \times 10^6 \text{ m})^2} \approx 1.6 \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که دیده می‌شود بزرگی شتاب گرانش در سطح ماه تقریباً  $\frac{1}{6}$  بزرگی شتاب گرانش در سطح زمین است. یعنی وزن یک جسم در سطح ماه ۶ برابر کوچک‌تر از وزن آن در سطح زمین است.

**نیروی عمودی سطح:** وقتی روی تشک ایستاده‌اید، با این که کره‌ی زمین شما را رو به پایین می‌کشد، ولی سر جای خود ساکن می‌مانید. دلیلش این است که تشک بر اثر وزن شما به سمت پایین تغییر شکل می‌یابد و شما را به سمت بالا هل می‌دهد. به همین ترتیب، اگر روی کف اتاق بایستید کف تغییر شکل می‌دهد (هرچند به میزان بسیار ناچیز) و به شما نیروی رو به بالای وارد می‌کند. نیروی وارد از تشک یا کف اتاق روی شما **نیروی عمودی سطح**  $\vec{N}$  است. شکل ۱۱-۳ الف قطعه‌ای به جرم  $m$  را نشان می‌دهد که سطح میزی را به پایین می‌فشارد و بر اثر نیروی گرانشی  $\vec{W}$  وارد بر قطعه، آن سطح را اندکی تغییر شکل می‌دهد (این تغییر شکل ممکن است بسیار بسیار کم و مشاهده‌ی آن نیاز به ابزارهای خاصی داشته باشد). میز با نیروی عمودی  $\vec{N}$ ، نیرویی رو به بالا بر قطعه وارد می‌کند. شکل ۱۱-۳ ب نیروهای وارد بر قطعه را نشان می‌دهد. چون قطعه روی میز ساکن است باید  $\vec{N} = \vec{W}$  یا  $\vec{N} = m\vec{g}$  باشد.

تمرین پیشنهادی



شکل ۱۴

هر یک از نیروهای نشان داده شده در شکل ۱۴ را توصیف کنید و مشخص نمایید کدام یک کنش و واکنش یکدیگرند.

پرسش پیشنهادی



شکل ۱۵

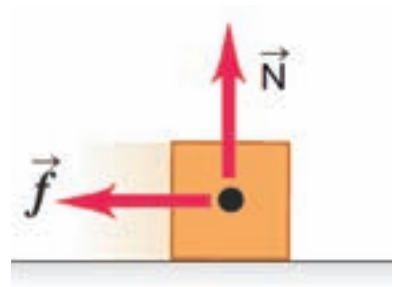
کتابی به جرم  $m$  روی میزی قرار دارد. شخصی با کف دست خود کتاب را روی میز می‌فشارد (شکل ۱۵). آیا در این وضعیت نیروی عمودی سطح بزرگ‌تر، کوچک‌تر، یا برابر با نیروی وزن کتاب  $mg$  است؟ توضیح دهید.

نیروی اصطکاک

**راهنمای تدریس:** در این کتاب تنها آشنایی با نیروی

اصطکاک و توجه به سودمندی‌ها و آثار زیان بار آن مورد توجه بوده است. دانش‌آموزان باید به این درک برسند که هرگاه جسمی را بکشیم یا هل دهیم، نیروی اصطکاک در امتداد سطح و مخالف جهت حرکت جسم وارد می‌شود (شکل ۱۶). به این ترتیب می‌توان گفت نیروی اصطکاک موازی با سطح است و در جهتی که با لغزیدن جسم مخالف است، عمل می‌کند.

شکل ۱۶- یک سطح علاوه بر نیروی عمودی  $\vec{N}$ ، ممکن است یک نیروی اصطکاک  $\vec{f}$  نیز که موازی سطح است بر جسم وارد کند.



فصل سوم / نیرو و قانون‌های نیوتون

**جهت لغزش**

شکل ۱۲-۳ نیروی اصطکاک  $\vec{f}$  با لغزش جسم روی سطح مخالفت می‌کند.

این کوهسور به اصطکاک زیادی بین دست‌هایش و قطاب نیازمند است. در غیر این صورت سر می‌خورد.

اصطکاک بین دهانه‌های آبرداشت و میله باعث می‌شود که میله بدون لغزش نگه داشته شود.

شکل ۱۲-۳

شکل ۱۱-۳ الف- بر قطعه‌ای که روی میزی ساکن است لغزش بر نیروی وزن  $\vec{W}$ ، نیروی عمودی سطح  $\vec{N}$  از طرف میز به آن وارد می‌شود. ب- توجه کنید نیروهای  $\vec{N}$  و  $\vec{W}$  واکنش یکدیگر نیستند.

**مثال ۳-۴**

بنا بر قانون سوم نیوتون، نیروهای عکس‌العمل (واکنش)  $\vec{N}$  و  $\vec{W}$  را که بر قطعه‌ی شکل ۱۱-۳ وارد شده است پیدا کنید.

**پاسخ:** نیروی واکنش وزن  $\vec{W}$  به مرکز زمین (شکل ۱۲-۳ الف) و نیروی واکنش  $\vec{N}$  به سطح میز (شکل ۱۱-۳ ب) وارد می‌شود. توجه کنید که نیروی کنش  $\vec{N}$  به قطعه و نیروی واکنش آن  $\vec{N}$  به میز وارد شده است.

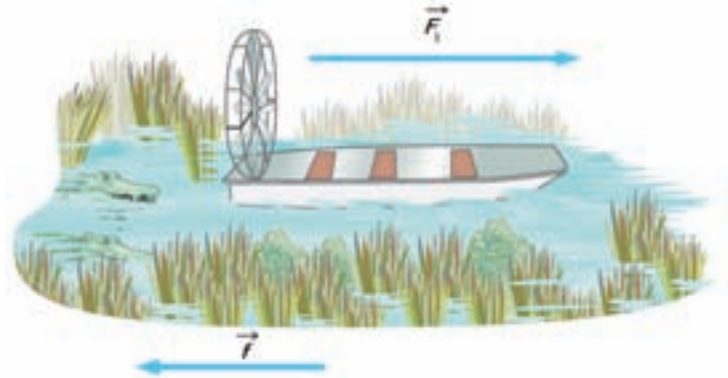
شکل ۱۲-۳

**نیروی اصطکاک:** اگر جسمی را روی سطحی بلغزانیم یا تلاش کنیم که بلغزانیم، حرکت با مقاومت روبه‌رو خواهد شد. همچنین اگر اُتومبیلی را که در مسیر مستقیم در حال حرکت است از دنده خلاص کنیم، حتی بدون گرفتن ترمز پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. مقاومت در برابر حرکت ناشی از نیروی اصطکاک  $\vec{f}$  یا به طور ساده اصطکاک است. هرگاه جسم را بکشیم یا هل دهیم این نیرو در امتداد سطح و مخالف با جهت حرکت جسم است (شکل ۱۲-۳).

۵۹

## تمرین پیشنهادی

شکل ۱۷ یک قایق باری به جرم کل  $400\text{ kg}$  را نشان می‌دهد که پروانه‌ی آن نیروی جلو بر افقی  $F$  با بزرگی  $2000\text{ N}$  را ایجاد می‌کند. اگر نیروی اصطکاک در برابر حرکت قایق  $1200\text{ N}$  باشد:  
الف) شتاب قایق را پیدا کنید.  
ب) اگر قایق از حال سکون حرکت کرده باشد، پس از چه مدت، بزرگی سرعت آن به  $8\text{ m/s}$  می‌رسد؟



شکل ۱۷

## فعالیت ۳-۳

با توجه به آثار هم مفید و هم زیان بار نیروی اصطکاک، که در کتاب درسی به صورت تصویری ارائه شده است، انتظار می‌رود دانش‌آموزان بتوانند از نبود نیروی اصطکاک در یک دنیای فرضی داستان جذابی ارائه دهند. در این فعالیت قدرت تخیلی دانش‌آموزان پرورش می‌یابد.

اصطکاک می‌تواند سودمند باشد. در بعضی موارد، نیروی اصطکاک می‌تواند خیلی سودمند باشد. برای افزایش اصطکاک بین دو سطح، باید سطح‌ها ناهموار و خشک باشند، به طوری که آن‌ها به یکدیگر محکم گیر کنند (شکل ۱۴-۳).

اصطکاک می‌تواند زیان‌بار باشد. در بعضی موارد مایل هستیم که اصطکاک تا حد ممکن کوچک باشد (شکل ۱۵-۳). بنابراین زیاد بودن اصطکاک ممکن است اختلال ایجاد کند.

برای کاهش اصطکاک بین دو سطح، باید سطح‌ها را تا حد ممکن هموار و یک ماده‌ی روان‌کننده مانند روغن اضافه کنیم (شکل ۱۶-۳). اصطکاک بین دو سطح باعث تولید گرما می‌شود و این موضوع سبب می‌شود که یکی از دو سطح یا هر دو آن‌ها ساییده شوند. یک ماده‌ی روان‌کننده به کاهش گرما و ساییدگی کمک می‌کند. این موضوع، دلیلی بر اهمیت روغن کاری ماشین آلات است.



شکل ۱۴-۳

وقتی ماهی شنا می‌کند، بین بدنش و آب اصطکاک وجود دارد. برای کم نگه داشتن اصطکاک، ماهی حالتی هموار و کم مقاومت در برابر آب دارد.

شکل ۱۵-۳

این حلقه گیر کرده است، اصطکاک بین حلقه و انگشت زیاد است.



شکل ۱۶-۳

### فعالیت ۳-۳

تصور کنید یک روز صبح بیدار می‌شوید و کشف می‌کنید که دیگر نیروی اصطکاک در دنیا وجود ندارد. داستان کوتاهی بنویسید و زندگی را در دنیای بدون اصطکاک شرح دهید.

### ملاحظه‌ی آزاد

نگاهی دقیق‌تر به نیروی اصطکاک

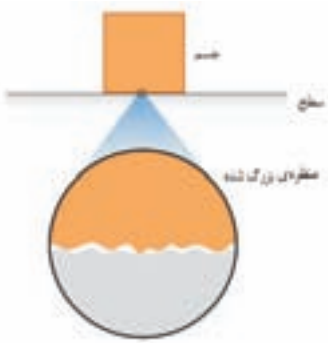
شکل ۱۷-۳ الف جسمی را نشان می‌دهد که روی سطح افقی ساکن است. نیروی وزن  $\vec{W}$  و نیروی عمودی سطح  $\vec{N}$  بر آن اثر می‌کنند و جسم به حال سکون است. در شکل ۱۷-۳ ب نیروی افقی و کوچک  $\vec{F}$  به‌گونه‌ای بر جسم وارد شده است که جسم ساکن بماند. بنا بر قانون دوم نیوتون چون جسم در این حالت ساکن است، باید بر ایند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. بنابراین، باید یک نیروی افقی مانند  $\vec{f}$  به جسم وارد شود تا با بخشی کردن نیروی  $\vec{F}$  مانع حرکت و شتاب گرفتن جسم شود. در این حالت چون جسم در حال سکون است نیروی  $\vec{f}$  را نیروی اصطکاک در حال سکون یا نیروی اصطکاک ایستایی می‌نامند.

در شکل ۱۷-۳ پ نیروی افقی  $\vec{F}$  بیشتر شده است. به طوری که باز هم جسم در حال سکون است. همان‌طور که دیده می‌شود نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش یافته است. زیرا بنا بر قانون دوم نیوتون بر ایند نیروهای وارد بر جسم در این حالت باید صفر باشد.

در شکل ۱۷-۳ ت با هم نیروی افقی  $\vec{F}$  افزایش یافته است. در این حالت نیروی اصطکاک ایستایی به مقدار بیشینه‌ی خود یعنی  $f_{max}$  رسیده است. به نیروی اصطکاک در این حالت نیروی اصطکاک در آستانه‌ی حرکت گفته می‌شود. زیرا به محض این‌که  $\vec{F}$  از  $f_{max}$  بیشتر



**ادامه‌ی راهنمای تدریس:** در پایان این قسمت توجه دانش‌آموزان را به این نکته مهم جلب کنید که اصطکاک از تماس متقابل ناهمواری‌ها در سطوحی ناشی می‌شود که روی هم می‌لغزند. حتی سطوحی که کاملاً صاف به نظر می‌آیند، در مقیاس میکروسکوپی ناهموارند (شکل ۱۸).



شکل ۱۸

پرسش پیشنهادی

استفاده از لاستیک‌هایی با سطح پهن در برخی اتومبیل‌ها، چه تأثیری در افزایش یا کاهش اصطکاک دارد (شکل ۱۹)؟



شکل ۱۹

**پاسخ:** هیچ تأثیری ندارد. لاستیک‌های پهنی که زیر بعضی اتومبیل‌ها می‌بینید، اصطکاک‌های بیشتری از لاستیک‌های باریک‌تر ایجاد نمی‌کنند. لاستیک‌های پهن‌تر، فقط وزن اتومبیل را روی سطح بیشتری پخش می‌کنند و از گرم شدن و ساییدگی آن‌ها می‌کاهند. به همین ترتیب، اصطکاک بین زمین و کامیون چهار چرخ یا هجده چرخ یکسان است! چرخ‌های بیشتر بار را در مساحت بیشتری پخش و به این ترتیب فشار را بر هر چرخ کم می‌کنند. همچنین تعداد چرخ‌ها در فاصله‌ی توقف هنگام ترمز تأثیری ندارد. اما تعداد چرخ‌ها تأثیر شدیدی در سایش لاستیک‌ها دارد.

**فصل سوم / نیرو و قانون‌های نیوتون**

شود شروع به حرکت می‌کند. تجربه نشان می‌دهد بزرگی نیروی اصطکاک در آستانه‌ی حرکت از رابطه  $f_{\text{اصطکاک}} = \mu N$  به دست می‌آید که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. توجه کنید این رابطه تنها برای حالتی که جسم در آستانه‌ی حرکت باشد به کار می‌رود. بنابراین نیروی اصطکاک ایستایی همواره از  $\mu N$  کوچکتر و مقدار بیشینه آن برابر  $\mu N$  است. یعنی داریم:

$$f \leq \mu N$$

در شکل ۱۷-۳ نیروی افقی  $\vec{F}$  که اندازه‌ی آن بزرگتر از نیروی اصطکاک در آستانه‌ی حرکت است به جسم وارد شده است. در نتیجه جسم با شتاب  $\vec{a}$  شروع به حرکت می‌کند. در هنگام حرکت جسم نیز نیروی اصطکاک به جسم وارد می‌شود که آن را نیروی اصطکاک جنبشی می‌نامند و با  $\vec{f}$  نمایش می‌دهند. تجربه نشان می‌دهد که بزرگی نیروی اصطکاک جنبشی از رابطه  $f = \mu_k N$  به دست می‌آید که در آن  $\mu_k$  ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

پس از اینکه جسم شروع به حرکت کرد می‌توانیم اندازه‌ی نیروی افقی  $\vec{F}$  را کم کنیم به طوری که هرگاه اندازه‌ی نیروی  $\vec{F}$  با اندازه‌ی  $f$  برابر شود، حرکت جسم با سرعت ثابت خواهد بود. (شکل ۱۷-۳ ج)

ضریب اصطکاک ایستایی  $\mu_s$  و ضریب اصطکاک جنبشی  $\mu_k$  به عوامل مختلفی از جمله جسم‌های در تماس، میزان میثقی بودن سطح در تماس، دما و میزان آلودگی سطح‌ها بستگی دارد. همچنین ضریب اصطکاک ایستایی از ضریب اصطکاک جنبشی کوچکتر است، یعنی  $\mu_s > \mu_k$ .

**بیشت تر بدانید**

ابو منصور الباقی: عبدالرحمن خازنی، ریاضیدان و دانشمند حوزه‌ی علم الجیل (مکاتیک) و یکی از ستاره‌های قرون ۱۰ و ۱۱ هجری قمری ایرانی است. درباره‌ی تاریخ تولد و فوت این دانشمند بزرگ اطلاع دقیقی در دست نیست ولی گفته می‌شود که وفات او بعد از سال ۵۲۰ هجری قمری اتفاق افتاده است. او در مرو می‌زیست و در همین شهر به کتب علم برداشت و با چند سیار در جوهری دانش پسرقت کرد.

چنان که در عهد ملک شاه سلجوقی در شهر مرو از ریاضی دانسان و منجمان بزرگ به ششمار می‌رفت، وی کتاب مشهور خود در نجوم و زین مشتر سنجر را در روزگار پادشاهی سلطان سنجر تنویر کرد و بنا بر رسوم آن زمان کتاب را به نام سنجر زین مشتر سنجر نام گذاری نمود اما در مقابل چیزی از سلطان پذیرفت. از خازنی کتاب‌های زیر را می‌شناسیم:

- زین مشتر سنجر یکی از آثار مهم نجوم دوردی اسلامی
- رساله فی آلات الجیهه الرصدیه
- رساله الامتیار در نجوم نظری
- میزان الحکمه، یکی از مهم ترین آثار مربوط به دانش مکانیک دوره اسلامی

شکل ۱۷-۳

## سرعت حدی

### راهنمای تدریس: در این قسمت دانش آموزان، با

توجه به وضعیت حرکت اتومبیل که شرح کامل آن در کتاب درسی آمده است، در خواهند یافت که اصطکاک منحصر به اجسام جامدی نیست که روی هم می لغزند. اصطکاک در شاره‌ها (مایع‌ها و گازها) نیز وجود دارد. اصطکاک متداول در شاره مقاومت هوا (یا کشش هوا) در برابر جسمی است که در هوا حرکت می کند. ممکن است دانش آموزان اشاره کنند هنگامی که راه می رویم متوجه مقاومت هوا نمی شویم. لازم است در پاسخ به پرسش این دانش آموزان، اشاره کنید که در سرعت‌های بیش تر، مثلاً هنگام دوچرخه سواری یا اسکی در سرازیری متوجه آن خواهید شد. مقاومت هوا با افزایش بزرگی سرعت زیاد می شود.

**سرعت حدی:** وقتی راننده‌ای پدال گاز اتومبیل ساکنی را فشار می دهد، اتومبیل شتاب می گیرد. در این حالت تنها نیروی اصطکاک ناشی از سطح تماس لاستیک‌ها با جاده، با حرکت اتومبیل مخالفت می کند و نیروی مقاومت هوا وجود ندارد (شکل ۳-۱۸).

شکل ۳-۱۸: در این حالت نیروی پیش‌ران اتومبیل خیلی بزرگتر از نیروی اصطکاک است و در نتیجه اتومبیل شتاب زیادی می گیرد.

نیروی رو به جلوی اتومبیل بزرگتر است. نیروهای اصطکاک کوچکند.

با افزایش سرعت اتومبیل، نیروهای اصطکاک ناشی از مقاومت هوا نیز افزایش می یابند (شکل ۳-۱۹).

شکل ۳-۱۹: اختلاف نیروی پیش‌ران با نیروهای اصطکاک خیلی زیاد نیست و در نتیجه شتاب اتومبیل کمتر شده است.

نیروی رو به جلوی اتومبیل مانند قبل است. نیروهای اصطکاک ناشی از مقاومت هوا افزایش می یابند.

سرانجام بزرگی نیروهای اصطکاک به بزرگی نیروهای پیش‌ران موتور می شوند و سرعت اتومبیل به بیشینه‌ای ثابتی می رسد که سرعت حدی اتومبیل نامیده می شود (شکل ۳-۲۰). برای حرکت سریع‌تر از این سرعت، باید موتور اتومبیل را با موتور دیگری که نیروی پیش‌ران بزرگتری تولید می کند، جایگزین کنیم یا از اتومبیلی که مقاومت کمتری در برابر هوا دارد استفاده کنیم.

نیروی رو به جلوی اتومبیل همان است. نیروهای اصطکاک برابر نیروی همان است.

اتومبیلی که مقاومت آن در برابر هوا کمتر است راحت‌تر حرکت می کند، زیرا طراحی اتومبیل به گونه‌ای است که مقاومت هوا در حین حرکت آن کاهش یافته است (شکل ۳-۲۱).

اتومبیلی که مقاومت آن در برابر هوا کمتر است، قبل از آن که نیروهای اصطکاک آن با نیروی پیش‌ران برابر شوند، می تواند به سرعت بیشتری برسد.

شکل ۳-۲۱: سرعت حدی این اتومبیل می تواند بزرگتر باشد.

نیروهای اصطکاک کاشی یافته اند زیرا مقاومت اتومبیل در برابر هوا کمتر است.

شکل ۳-۲۲: نمودار سرعت-زمان اتومبیلی را نشان می دهد که از حال سکون، شتاب گرفته است. با افزایش سرعت اتومبیل، شیب نمودار کمتر شده است. این نشان می دهد که نیروهای اصطکاک با افزایش یافته اند و شتاب اتومبیل در حال کاهش است.

**۳-۴ اندازه حرکت (تکانه)**

اندازه حرکت یا تکانه در گفتگوی روزمره دارای معنی‌های مختلفی است اما در فیزیک فقط دارای یک معنی دقیق است. اندازه حرکت یک کمیت برداری است که آن را با نماد  $\vec{p}$  نشان می دهند و برابر است با

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

شکل ۳-۲۲: نمودار سرعت  $v(t)$  در برابر زمان  $t$  که نشان می دهد که سرعت اتومبیل به یک مقدار ثابت می رسد.



شکل ۲۰

هر چند در کتاب، سرعت حدی برای حالت خاصی که یک جسم روی سطح زمین حرکت می کند بیان شده است، ولی در حالت‌های دیگر، مانند وقتی که جسمی از ارتفاع معینی به طرف زمین در حال حرکت است نیز به وجود خواهد آمد. شکل ۲۰ کیسه‌ای را در حال سقوط نشان می دهد که پس از برابر شدن نیروی وزن آن با مقاومت هوا به سرعت حدی خود می رسد و پس از آن با این سرعت حدی به طرف زمین به حرکت خود ادامه می دهد. دانش آموزان باید توجه کنند که وقتی مقاومت هوا با وزن کیسه برابر می شود، شتاب آن صفر است!



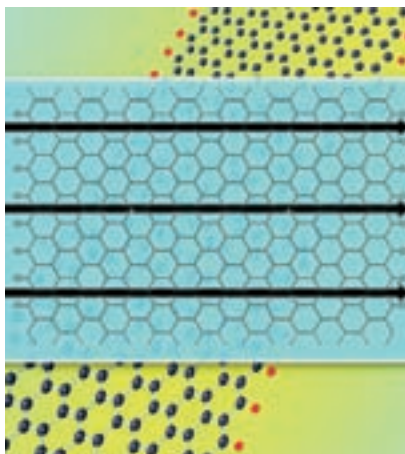
## نیروهای بنیادی در طبیعت

تاکنون درباره‌ی چندین نوع نیرو بحث کرده‌ایم، از آن جمله وزن، کشش، اصطکاک، مقاومت شاره و نیروی عمودی. اما دقیقاً چند نوع نیرو وجود دارد؟ درک کنونی ما این است که همه‌ی نیروها نمودهایی هستند از تنها چهار دسته‌ی متمایز از نیروها یا برهم کنش‌های بنیادی بین ذره‌ها. با دو دسته از این نیروها در تجربه‌های روزمره روز آشنا هستیم. دو دسته‌ی دیگر به برهم کنش‌های بین ذره‌های زیر اتمی مربوط می شوند که آن‌ها را با حواس غیر مسلح نمی توانیم مشاهده کنیم.

شکل ۲۱- نمونه‌هایی از برهم کنش‌های بنیادی در طبیعت، (الف) زمین و ماه توسط نیروهای گرانشی گرد یکدیگر و در مدار نگه داشته شده‌اند. (ب) این مولکول پلاسمید باکتریایی DNA توسط نیروهای الکترومغناطیسی بین اتم‌های آن گرد هم نگه داشته شده است. (پ) خورشید به این دلیل می‌درخشد که نیروهای قوی بین ذره‌های هسته‌ای درون مغز آن موجب رها شدن انرژی می‌شوند. (ت) هنگامی که با انفجار یک ستاره‌ی با جرم زیاد یک ابر نواختر پدید می‌آید شارشی از انرژی توسط برهم کنش‌های ضعیف بین ذره‌های هسته‌ای ستاره رها می‌شود.



(الف) نیروهای گرانشی سیاره‌ی ما را گرد هم نگه داشته است.



(ب) نیروهای الکترومغناطیسی مولکول‌ها را به گرد هم نگه می‌دارد.

**برهم کنش‌های گرانشی** شامل نیروی آشنای وزن شماسست که از ربایش گرانشی‌ای که زمین بر شما وارد می‌کند ناشی می‌شود. ربایش گرانشی متقابل بین بخش‌های مختلف زمین بر یکدیگر، عاملی است که سیاره‌ی ما را گرد هم نگه داشته است (شکل ۲۱-الف). نیوتون دریافت که ربایش گرانشی خورشید بر زمین، زمین را در مدار تقریباً دایره‌ای آن به گرد خورشید نگه می‌دارد.

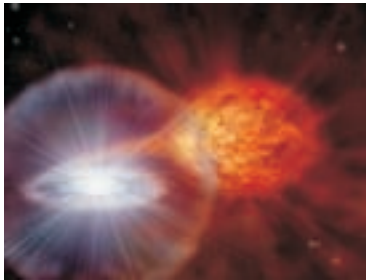
دسته‌ی آشنای دوم از نیروها، یعنی **برهم کنش‌های الکترومغناطیسی** شامل نیروهای الکتریکی و مغناطیسی‌اند. اگر شانه‌ای را درون موهای خود بکشید، شانه بار الکتریکی پیدا می‌کند؛ حال، می‌توانید با نیروی الکتریکی‌ای که توسط این بار وارد می‌شود، تکه‌های کوچک کاغذ را بلند کنید. همه‌ی اتم‌ها بار الکتریکی مثبت و منفی دارند. در نتیجه اتم‌ها و مولکول‌ها می‌توانند بر یکدیگر نیروی الکتریکی وارد کنند (شکل ۲۱-ب). نیروهای تماسی شامل نیروی عمودی، اصطکاک و مقاومت شاره ترکیبی از همه‌ی نیروهایی هستند که بر اتم‌های یک جسم توسط اتم‌های محیط اطراف آن وارد می‌شوند. نیروهای مغناطیسی مانند نیروی بین آهن‌رباها یا نیروی بین یک آهن‌ربا و یک قطعه‌ی آهن در واقع از حرکت بارهای الکتریکی ناشی می‌شوند. برای مثال، یک آهن‌ربای الکتریکی به این دلیل موجب برهم کنش‌های مغناطیسی می‌شود که بارهای الکتریکی درون سیم‌های آن حرکت می‌کنند.

نیروهای گرانشی در مقیاس اتمی یا مولکولی نقشی ندارند، زیرا نیروهای الکتریکی فوق‌العاده قوی‌ترند. رانش الکتریکی بین دو پروتون حدود  $10^{35}$  بار قوی‌تر از ربایش گرانشی بین آن‌هاست. اما معمولاً در جسم‌هایی با اندازه‌های نجومی، بارهای مثبت و منفی تقریباً به یک اندازه حضور دارند و برهم کنش‌های الکتریکی حاصل از آن‌ها تقریباً یکدیگر را حذف می‌کنند. بنابراین برهم کنش‌های گرانشی در حرکت سیاره‌ها و در ساختار داخلی ستاره‌ها تأثیر برتر را دارند.

دو دسته‌ی دیگر برهم کنش‌ها کم‌تر آشنا هستند. **برهم کنش قوی** مسئول نگه داشتن هسته‌ی یک اتم است. هسته‌ها شامل نوترون‌های از نظر الکتریکی خنثا و پروتون‌های با بار مثبت‌اند. نیروی الکتریکی بین پروتون‌های



(پ) نیروهای قوی با رها کردن انرژی به خورشید توان می‌دهند.



(ت) نیروهای ضعیف در انفجار ستاره‌ها نقش دارند.

باردار سعی در هل دادن آن‌ها به دور از یکدیگر دارد. نیروی ربایشی قوی بین ذره‌های هسته‌ای با این رانش مقابله می‌کند و هسته را پایدار می‌سازد. در این زمینه برهم کنش قوی را نیروی هسته‌ای قوی نیز می‌نامند. این نیرو برد بسیار کوتاه‌تری از برهم کنش‌های الکتریکی دارد، ولی در گستره‌ی برد خود بسیار قوی‌تر است. برهم کنش قوی در واکنش‌های گرما هسته‌ای که در مغز خورشید صورت می‌گیرند و گرما و نور خورشید را تولید می‌کنند نقش اساسی دارد. (شکل ۲۱- پ)

سرانجام **برهم کنش ضعیف** است. برد این برهم کنش آن قدر کوتاه است که این نیرو تنها در مقیاس هسته‌ای یا کوچک‌تر نقش دارد. برهم کنش ضعیف مسئول صورت متداولی از پرتوزایی به نام «واپاشی بتا» است که در آن یک نوترون در یک هسته‌ی پرتوزا با بیرون اندازی یک الکترون و یک ذره‌ی تقریباً بدون جرم به نام

پادنوترینو به یک پروتون تبدیل می‌شود. برهم کنش ضعیف بین پادنوترینو و ماده‌ی معمولی آن قدر ناچیز است که یک پادنوترینو می‌تواند به سادگی در یک دیوار سربی به ضخامت یک میلیون کیلومتر نفوذ کند! با این همه هنگامی که یک ستاره‌ی غول‌آسا انفجار فاجعه‌آمیزی پیدا می‌کند که آن را ابرنواختر می‌نامند، بیشترین انرژی از طریق برهم کنش ضعیف آزاد می‌شود (شکل ۲۱- ت).

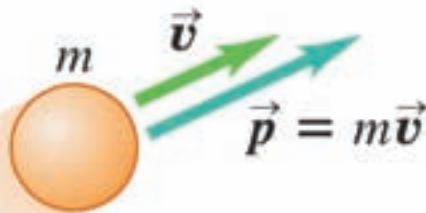
فیزیک‌دانان در سال ۱۹۶۰/۱۳۳۹ نظریه‌ای را گسترش دادند که برهم کنش‌های الکترومغناطیسی و ضعیف را به صورت جنبه‌هایی از یک تک برهم کنش الکتروضعیف توصیف می‌کرد. این نظریه هر آزمون تجربی را که در مورد آن اعمال شده با موفقیت گذرانده است.

فیزیک‌دانان با جسارتی که از موفقیت این نظریه به دست آوردند. اقدام‌های مشابهی برای توصیف برهم کنش‌های قوی، الکترومغناطیسی و ضعیف برحسب یک تک نظریه‌ی وحدت بزرگ یا (GUT) انجام داده‌اند و قدم‌هایی در جهت وحدت احتمالی تمام برهم کنش‌ها در یک نظریه‌ی همه چیز یا (TOE) قدم‌هایی برداشته‌اند. چنین نظریه‌هایی هنوز در حال گمانه‌زنی است و پرسش‌های بی‌پاسخ فراوانی در این زمینه‌ی بسیار فعال از پژوهش‌های جاری وجود دارد.

### ۳-۴ اندازه حرکت (تکانه)

**راهنمای تدریس:** برای شروع بحث تکانه، می‌توانید

این پرسش را در کلاس درس به بحث بگذارید: «چرا متوقف کردن یک کامیون سنگین از متوقف کردن اتومبیل کوچکی که با همان سرعت حرکت می‌کند، دشوارتر است؟» پس از شنیدن اظهارات دانش‌آموزان به جمع‌بندی پاسخ‌ها پردازید و مفهوم تکانه را به صورت حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن تعریف کنید. رسم شکل ۲۲ روی تابلو می‌تواند برداری بودن تکانه‌ی یک جسم و همچنین هم‌جهت بودن بردار تکانه با بردار سرعت جسم را به خوبی نشان دهد.



شکل ۲۲

### پرسش پیشنهادی

چرا موتورهای یک نفت‌کش غول‌پیکر را معمولاً در فاصله‌ی ۲۵ کیلومتری بندر خاموش می‌کنند؟ (شکل ۲۳) (راهنمایی: به مفهوم تکانه توجه شود.)



شکل ۲۳

#### فصل سوم / نیرو و قانون‌های نیوتون

که در آن  $m$  جرم ذره و  $\vec{v}$  سرعت آن است. چون  $m$  همیشه عددی مثبت است، رابطه‌ی تکانه نشان می‌دهد که  $\vec{v}$  و  $\vec{p}$  هم‌جهت‌اند. یکای اندازه حرکت در SI، کیلوگرم-متر بر ثانیه است. (kg.m/s)

#### مثال ۳-۱

ذره‌ای به جرم  $1\text{mg}$  و با سرعت ثابت  $10\text{m/s}$  در امتداد محور  $x$  در حرکت است. اندازه حرکت (تکانه‌ی) این ذره چقدر است؟  
حل: جرم ذره در SI برابر است با:

$$m = 1\text{mg} = 1 \times 10^{-3} \text{g} = 1 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \text{kg} = 10^{-6} \text{kg}$$

چون ذره در امتداد محور  $x$  در حرکت است، راستای اندازه حرکت آن نیز در همین امتداد است. بنابراین بزرگی اندازه حرکت ذره برابر است با:

$$p = mv = (10^{-6} \text{kg})(10 \text{m/s}) = 10^{-5} \text{kg.m/s}$$

**قانون دوم نیوتون بر حسب اندازه حرکت:** بنا بر قانون دوم نیوتون داریم

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

اگر برایندهای وارد بر جسم ثابت باشد، شتاب حرکت جسم نیز ثابت خواهد بود. در این صورت می‌توان نوشت

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \frac{(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t}$$

رابطه‌ی بالا را به صورت زیر می‌توان نوشت

$$\vec{F} = \frac{m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1}{\Delta t} = \frac{\vec{p}_2 - \vec{p}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

رابطه‌ی  $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$  بیان قانون دوم نیوتون بر حسب اندازه حرکت نامیده می‌شود. به این ترتیب قانون دوم نیوتون را به صورت زیر نیز می‌توان بیان کرد

برایندهای وارد بر جسم برابر است با آنگاه تغییر اندازه حرکت جسم

#### تمرین ۲

#### مثال ۳-۲

گلوله‌ای به جرم  $20\text{g}$  با سرعت  $50\text{m/s}$  در امتداد افق به دیواری برخورد می‌کند و در همان امتداد در دیوار فرو می‌رود. اگر گلوله پس از برخورد با دیوار به مدت  $0.05\text{s}$  تا ثبات در دیوار بماند، نیروی متوسط وارد بر گلوله از طرف دیوار چقدر است؟

حل: سرعت جسم پیش از برخورد به دیوار  $v_1 = 50\text{m/s}$  و پس از فرو رفتن در دیوار و متوقف شدن برابر  $v_2 = 0$  است. بنابراین تغییر سرعت گلوله در مدت  $\Delta t = 0.05\text{s}$  برابر  $\Delta v = v_2 - v_1 = 0 - 50 = -50\text{m/s}$  است. بنابراین نیروی متوسط وارد بر گلوله برابر است با

$$\vec{F} = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = (0.02\text{kg}) \frac{(-50\text{m/s})}{0.05\text{s}} = -20\text{N}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که نیرو در خلاف جهت حرکت گلوله به آن وارد شده است. به همین جهت گلوله پس از مدت کوتاهی متوقف شده است.

#### بیشتر بدانید

- افزایش تکانه‌ی یک جسم
- کاهش تکانه‌ی یک جسم

#### فعالیت عملی

- مقایسه‌ی تکانه‌ی چند جسم مختلف

#### مطالعه‌ی آزاد

قانون پایستگی اندازه حرکت در صورتی‌که هیچ نیرویی به ذره یا جسمی وارد نشود یا برایندهای خارجی وارد بر ذره صفر باشد، شتاب جسم نیز صفر خواهد بود و ذره با سرعت ثابت حرکت خواهد کرد. پس در این شرایط می‌توان گفت اندازه حرکت ذره ثابت می‌ماند. یعنی

$$\vec{F} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = 0 \Rightarrow \Delta \vec{p} = 0 \Rightarrow \vec{p}_2 = \vec{p}_1$$

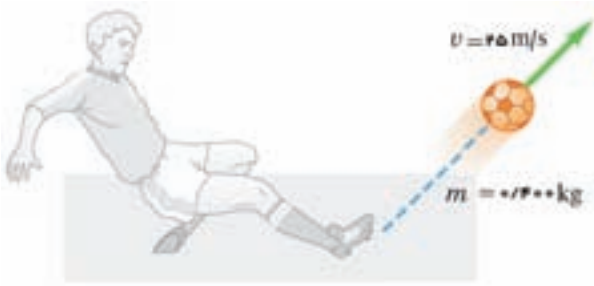
حال فرض کنید به جای ذره، سامانه‌ای شامل مجموعه‌ای از ذره‌ها در اختیار داشته‌ایم و اگر هیچ نیرویی از بیرون به این سامانه وارد نشود یا برایندهای خارجی وارد بر این سامانه صفر باشد (یعنی سامانه منزوی باشد) و همچنین هیچ ذره‌ای وارد سامانه یا از آن خارج نشود (یعنی سامانه بسته باشد). در این صورت برای این سامانه نیز نتیجه می‌گیریم اندازه حرکت کل سامانه نمی‌تواند تغییر کند. این نتیجه قانون پایستگی اندازه‌ی حرکت نامیده می‌شود که آن را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_2 \text{ (سامانه‌ی بسته منزوی)}$$

به عبارت دیگر این معادله حاکی از آن است که برای سامانه‌ی بسته منزوی داریم اندازه‌ی حرکت کل در لحظه‌ی بعدی  $t_2$  اندازه‌ی حرکت کل در لحظه‌ی اولی  $t_1$  توجه، اندازه‌ی حرکت را نباید با انرژی اشتباه گرفت. ممکن است در یک سامانه‌ی بسته منزوی اندازه‌ی حرکت پایسته باشد ولی انرژی پایسته نباشد.



### تمرین پیشنهادی



شکل ۲۴

یک بازیکن فوتبال، توپی را با سرعت  $25 \text{ m/s}$  شوت می کند (شکل ۲۴). تکانه‌ی توپ را محاسبه کنید.

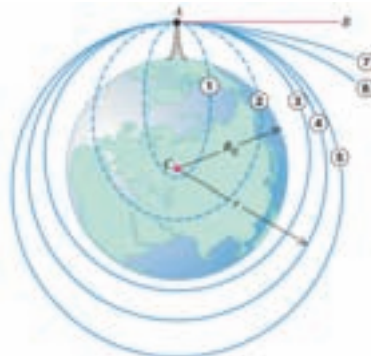
### تمرین پیشنهادی

الف) بزرگی تکانه‌ی یک کامیون  $20$  تنی را که بزرگی سرعت آن  $8 \text{ m/s}$  است، محاسبه کنید.  
ب) بزرگی سرعت یک وانت  $2$  تنی چقدر باید باشد تا همان تکانه‌ی قسمت (الف) را داشته باشد؟



شکل ۲۵ - تلسکوپ فضایی هابل به طول  $13/2 \text{ m}$  و جرم  $11000 \text{ kg}$  از جمله بزرگ‌ترین ماهواره‌هایی است که در مدار قرار گرفته‌اند.

پرتابه‌ای از A به سوی B پرتاب شده است. مسیره‌ای ۱ تا ۷ اثر افزایش تندی آغازی را نشان می‌دهند.



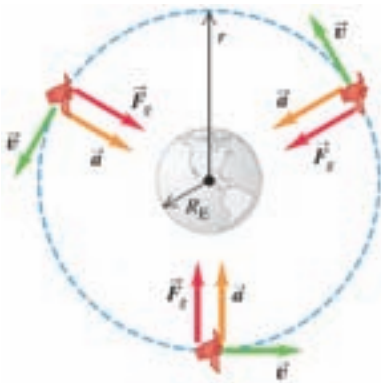
شکل ۲۶ - مسیره‌ای پرتابه‌ای که از ارتفاع زیادی پرتاب شده است (با نادیده گرفتن مقاومت هوا). اگر زمین یک جرم نقطه‌ای در C می‌بود، مدارهای ۱ و ۲ به گونه‌ای که نشان داده شده است کامل می‌شدند. (این توضیح براساس توضیحی است که در کتاب پرنسیپای ایزاک نیوتون آمده است.)

### حرکت ماهواره‌ها

ماهواره‌های مصنوعی که زمین را دور می‌زنند بخش آشنایی از فناوری جدیدند (شکل ۲۵). ولی آن‌ها چگونه در مدار خود می‌مانند و چه چیزی ویژگی‌های مدار آن‌ها را تعیین می‌کند؟ برای پاسخ دادن، می‌توانیم قوانین نیوتون و قانون گرانش را به کار ببریم.

پرتابه‌ای را از نقطه‌ی A در جهت AB مماس بر سطح زمین پرتاب می‌کنیم (شکل ۲۶). مسیره‌ای ۱ تا ۷ اثر افزایش تندی آغازی را نشان می‌دهند. در مسیره‌ای ۳ تا ۵ پرتابه به زمین برخورد نمی‌کند و یک ماهواره می‌شود. اگر هیچ نیروی کُند کننده‌ای وجود نداشته باشد، تندی پرتابه، هنگامی که به نقطه‌ی A باز می‌گردد، با تندی آغازی آن برابر است و پرتابه حرکت خود را به طور نامتناهی تکرار می‌کند. مسیره‌ای ۱ تا ۵ روی خودشان بسته می‌شوند و مدارهای بسته نام دارند. تمام مدارهای بسته یا بیضی‌اند یا پاره‌ای از یک بیضی؛ مسیره ۴ یک دایره است که مورد خاصی از بیضی است. مسیره‌ای ۶ و ۷ مدارهای بازند. پرتابه روی این مسیره‌ها هرگز به نقطه‌ی شروع خود باز نمی‌گردد، بلکه به تدریج از زمین دور می‌شود.





شکل ۲۷- نیروی  $\vec{F}_g$  ناشی از ربایش گرانشی زمین شتاب مرکزگرایی را فراهم می‌کند که ماهواره را در مدار نگه می‌دارد. ماهواره در مداری دایره‌ای است. شتاب آن  $\vec{a}$  همواره بر سرعت آن  $\vec{v}$  عمود است. در نتیجه تندی آن  $v$  ثابت است.

## ماهواره‌ها: مدارهای دایره‌ای

یک مدار دایره‌ای مانند مسیر ۴ در شکل ۲۶ ساده‌ترین مورد است. این مدار مورد مهمی نیز هست، زیرا مدار بسیاری از ماهواره‌های مصنوعی نزدیک به دایره‌اند. مدار سیاره‌ها، گرد خورشید نیز این چنین‌اند. تنها نیرویی که در یک مدار دایره‌ای گرد زمین بر یک ماهواره وارد می‌شود، ربایش گرانشی زمین است که سمت‌گیری آن به سوی مرکز زمین و در نتیجه به سوی مرکز مدار است (شکل ۲۷) این به آن معناست که ماهواره در حرکت دایره‌ای، یکنواخت بوده و تندی آن ثابت است. ماهواره به سوی زمین سقوط نمی‌کند، بلکه پیوسته به گرد زمین در حال سقوط است. تندی ماهواره در مداری دایره‌ای درست به اندازه‌ای است که فاصله‌ی ماهواره تا زمین را ثابت نگه دارد.



## نیوتون، آیزاک

نیوتون فرزند یک خانواده‌ی خرده مالک در جنوب غربی لینکلن شایر بود. اجدادش هیچ کدام خواندن بلد نبودند. از ثروت دائماً زیاد شونده‌ی این خانواده معلوم می‌شود که افرادشان کم استعداد نبودند. پدر نیوتون، که نام او هم آیزاک بود، در اکتبر ۱۶۴۲، دو ماه پیش از آن که تنها فرزندش به دنیا بیاید، درگذشت. وقتی مادرش دوباره ازدواج کرد، نیوتون به پدر بزرگ و مادر بزرگ مادری‌اش در وولستورپ سپرده شد. در خانواده‌ی مادری‌اش، تعلیم و تربیت فرزندان مرسوم بود. در

نتیجه، پس از آموزش ابتدایی در یک مدرسه‌ی روزانه‌ی محلی، در سال ۱۶۵۵ وارد یک دبیرستانی در گرانتام شد. شروع دبیرستان نیوتون در زمانی بود که مادرش، در این سال‌ها سه فرزند دیگر هم داشت (برادر و خواهرهای ناتنی نیوتون)، بار دیگر بیوه شد. وی در ژوئن سال ۱۶۶۱ در دانشگاه کمبریج، در کالج ترینیتی، که کالج دایی‌اش بود، ثبت نام کرد.

از یادداشت‌هایی که نوشته و نگه داشته بود، اطلاعات خوبی از تحصیل دانشگاهی‌اش داریم. مثلاً این که در سال ۱۶۶۴ با فلسفه‌ی طبیعی جدید رنه دکارت، پیتر گاسندی، و دیگران آشنا شد. اعمال نفوذ یک دوست و صاحب‌منصب لینکلن شایری باعث شد که کالج ترینیتی در آوریل سال ۱۶۶۴ به او بورس تحصیلی بدهد و در ۱۶۶۸ پس از گرفتن

فوق لیسانس او را استخدام کند. تأثیر آیزاک بارو باعث شد که در سال ۱۶۶۹ سمت استادی کرسی لوکازی ریاضیات در کالج ترینیتی به وی اعطا شود. در طول ۲۷ سال بعد، ترینیتی خانه‌ی نیوتون بود و تمام دستاوردهای علمی‌اش از همین سال‌های کمبریج سرچشمه گرفته است.

دوره‌ی ۱۶۶۵ تا ۱۶۶۶ را سال سرنوشت‌ساز نیوتون نامیده‌اند. این دوره، پیش از هر چیز، دوره‌ی بزرگ‌ترین دستاوردهای ریاضی او بود و به مقاله‌ای که در اکتبر ۱۶۶۶ نوشت منجر شد. مقاله‌ای که نخستین ارائه‌ی چیزی بود که خودش آن را روش فلوکسی می‌نامید و امروزه حسابان نامیده می‌شود. از آن زمان تا به امروز، حسابان به صورت ابزار اصلی فیزیک نوین در آمده است.

نیوتون در سال سرنوشت، همچنان که فلسفه‌ی طبیعی جدید را دنبال می‌کرد، شروع به کاری کرد که به دگرگون‌سازی فیزیک انجامید. وی به علم مکانیک روی آورد و در قوانین برخورد و دینامیک حرکت دایره‌ای دست به کند و کاو زد. با جاگذاری قانون سوم یوهانس کپلر در فرمولی که برای نیروی وارد بر سیاره در منظومه‌ی شمسی با عکس مجذور فاصله‌ی سیاره تا خورشید متناسب است، نیروی وارد بر ماه را هم با نیروی گرانش زمین در سطح زمین مقایسه کرد و دید که تقریباً مثل عکس مجذور فاصله [از مرکز زمین] تغییر می‌کند. دیگر کسی به این افسانه که به این ترتیب نیوتون در ۱۶۶۶ گرانش عمومی را کشف کرد اعتنایی ندارد. نیروی شعاعی‌ای که نیوتون در این هنگام در نظر داشت، مرکز گریز بود نه مرکز گرا. در مقایسه با کاری که نیوتون بیست سال بعد ارائه داد، این کار اولیه‌اش در مکانیک نسبتاً خام شمرده می‌شود. در عین حال، وی آن را در پیشرفت کارش نقطه‌ی مهمی دانست.

در اپتیک، کارهای اولیه‌اش قطعی‌تر بوده است. حدود سال ۱۶۶۵ به مسئله‌ی رنگ علاقه‌مند شد. به این ایده‌ی نو گرایش پیدا کرد که نور خورشید خالص و ساده نیست، بلکه چند رنگ است و پدیده‌های رنگی هم محصول تجزیه‌ی این مخلوط چند گن به مؤلفه‌های آن است. به کمک منشور، فریزهای رنگی اطراف اجسام را دیده بود. اگر بپذیریم که پرتوهای نور هم در شکست‌پذیری و هم در احساس رنگی که بر می‌انگیزند با هم فرق دارند، آن وقت نظر نیوتون این پدیده را توضیح می‌دهد.

ابتدا ایده‌اش را با آزمایش ساده‌ای با منشور آزمود و بعد به آزمایش کامل‌تری پرداخت. با ایجاد سوراخ کوچکی در پرده‌ی اتاق خود، باریکه‌ی نازکی از نور در اتاق تاریک به دست آورد و آن را پس از شکسته شدن در منشور بر دیواری که تقریباً هفت متر دورتر بود، انداخت. همان‌طور که انتظار داشت، طیف پهن شده‌ای دید که بزرگی‌اش تقریباً پنج برابر پهنای اولیه‌اش بود.

نیوتون در ادامه‌ی کارش آزمایش‌های بیشتری با منشور انجام داد، که از میان آن‌ها دو آزمایش بسیار مهم‌اند. وقتی باریکه‌ی واگرا را از سوراخ تخته‌ای گذراند و باریکه‌ی تک رنگی را به منشور دومی تاباند، دید که این باریکه به همان اندازه که در منشور اول شکسته بود می‌شکند اما دیگر به رنگ‌های بیشتری تجزیه نمی‌شود. در آزمایش

دوم، طیف واگرا را به عدسی‌ای تاباند و آن را بر پرده‌ای متمرکز کرد و دید که نقطه‌ی حاصل سفید و هم رنگ نور خورشید است. ولی وقتی پرده را دورتر می‌برد، همان توالی رنگ‌ها، البته با ترتیب معکوس، ظاهر می‌شدند.

تا سال ۱۶۶۹ نتایج نظریه‌اش را در نخستین مجموعه از درس‌های کرسی لوکازی گنجانده. برای حذف ابیراهی رنگی در تلسکوپ شکستی، تلسکوپ بازتابی را اختراع کرد و تقریباً در همین زمان نخستین تلسکوپ بازتابی را ساخت. در سال ۱۶۷۲ یادداشت کوتاهی در نشریه‌ی فلسفی «انجمن سلطنتی» (Philosophical Transaction) نوشت و حدود ۳۰ سال بعد محتوای این درس‌ها را در کتاب اول اپتیک خود (۱۷۰۳) بازنویسی کرد.

برای آن که نظریه‌اش کامل باشد، می‌بایست رنگ اجسام جامد را هم توضیح دهد. نیوتون متقاعد شده بود که بازتاب افتراقی هم می‌تواند نور خورشید را به مؤلفه‌هایش تجزیه کند. برای پژوهش در این زمینه راهی یافت: استفاده از لایه‌های نازک شفاف.

وی با فشار دادن عدسی‌ای با شعاع خمش مشخص بر شیشه‌ای تخت و تاباندن نور به آن، بین عدسی و شیشه نقشی از حلقه‌های رنگی یافت که از لایه‌ی هوای بین عدسی و شیشه‌ی تخت بازتابیده می‌شوند و هنوز هم به نام حلقه‌های نیوتون شناخته می‌شوند. با سنجش قطر حلقه‌ها، توانست به کمک هندسه‌ی حلقه‌ها ضخامت لایه‌ی هوای مربوط به هر حلقه و هر رنگی را حساب کند که این نخستین موفقیت ریاضی فیزیک در سنجش کمیت‌هایی به این کوچکی بود. این کار تحقیقی را در سال ۱۷۰۳ به صورت کتاب دوم اپتیک چاپ و منتشر کرد.

کار نیوتون در اپتیک به اندازه‌ی کارهایش در مکانیک و کیهان‌شناسی تعیین‌کننده‌ی مسیر آینده نبود. در اوایل قرن نوزدهم، پیش از آن که اپتیک پیشرفت کند، نظریه‌ی موجی جای نظریه‌ی ذره‌ای نیوتون را گرفت و جزئیات توضیح نیوتون درباره‌ی رنگ اجسام جامد باقی نماند. با این حال، گام بزرگی به پیش برداشته شد: چند گن بودن نور برای همیشه به تثبیت رسید- چیزی که در قرن نوزدهم تبدیل به چند گنی تابش الکترومغناطیسی شد و سنجش حلقه‌های نیوتون برای نخستین بار دوره‌ای بودن پدیده‌ی اپتیکی را نشان داد؛ هر چند که نیوتون این دوره‌ای بودن را از ویژگی‌های خود نور نمی‌دانست.

در حدود سال ۱۶۷۰ توجه نیوتون از مواردی که به نام او می‌شناسیم منحرف شد و به کیمیاگری و الهیات تمایل یافت و تقریباً پانزده سال از عمرش را به این‌ها اختصاص داد. کیمیاگری را با توجه بسیاری دنبال می‌کرد، که البته کارش در پیشرفت شیمی تأثیری نداشت. مطالعاتش در الهیات، که آن‌ها را بسیار سرّی نگه می‌داشت، باعث شد که به الوهیت مسیح و آموزه‌ی تثلیث شک کند.

در اوت ۱۶۸۴، ملاقات ادموند هالی با وی و طرح سؤالی در مورد دینامیک مدارها، دوباره نیوتون را به فیزیک برگرداند. کندو کاو دامنه‌داری که مسئله‌ی هالی پیش آورده بود به شاهکار سال ۱۶۸۷ نیوتون منجر شد: کتاب مبانی

ریاضی فلسفه‌ی طبیعی، یا پرنیکیا (Principia Mathematica).

نیوتون در پرنیکیا به علم مکانیک بازگشت. این اثر با مجموعه‌ای درباره‌ی دینامیک شروع می‌شود که شامل سه قانون حرکت است و هنوز هم به عنوان پایه‌های فیزیک جدید تدریس می‌شوند.

در کتاب اول، با کاربرد این قانون‌ها در مورد مسئله‌ی حرکت مداری برای نخستین بار به دینامیک مداری موفقیت‌آمیزی می‌رسد. با برعکس کردن نیروی مرکز‌گریز، که خود وی و دیگر دانش پیشه‌ها به حرکت‌های دایره‌ای نسبت می‌دادند، مفهوم نیروی مرکز‌گرا را مطرح کرد و نشان داد که حرکت مداری به دو عنصر اساسی فرو کاسته می‌شود: حرکتی لخت که بر اثر نیروی مرکز‌گرا دائماً خمیده می‌شود، نیرویی که باید به اندازه‌ی کافی قوی باشد تا جسم در مداری بسته قرار گیرد. هر وقت نیروی مرکز‌گرا حرکت لخت جسمی را از مسیر مستقیم منحرف کند، قانون مساحت‌های یوهانس کپلر درست است.

حرکت مداری روی بیضی، با نیروی مرکز‌گرا به سمت یکی از کانون‌های بیضی، نیازمند نیرویی متناسب با عکس مجذور فاصله است. در هر منظومه‌ای از قمرها که به دور مرکزی در گردش باشند و با نیروهایی متناسب با عکس مجذور فاصله به طرف مرکز جذب شوند، قانون سوم کپلر معتبر است (قانون ارتباط بین دوره‌های گردش و شعاع‌های مداری).

کتاب دوم، حرکت در محیط‌های مادی و حرکت محیط‌های مادی را بررسی می‌کند. پس از آن در کتاب سوم، نتایج به دست آمده از کتاب اول در مورد پدیده‌های رصد شده در آسمان به کار می‌روند.

نیوتون نشان می‌دهد که در هر سه منظومه‌ی شناخته شده - منظومه‌ی شمسی، منظومه‌های قمرهای مشتری و منظومه‌های قمرهای زحل یا کیوان - قانون سوم کپلر درست است و از این جا نتیجه می‌گیریم که در هر سه‌ی این منظومه‌ها با نیرویی متناسب با عکس مجذور فاصله، که به سمت جسم مرکزی است، روبه‌رو می‌شویم. به همین ترتیب، نیروی جاذبه‌ای به سمت زمین باید ماه را در مداری به دور زمین نگه داشته باشد.

نیوتون شتاب مرکز‌گرای وارد بر ماه را، که از مدار رصد شده‌اش به دست می‌آید، با شتاب گرانی در سطح زمین، که از آزمایش با آونگ به دست آمده بود، مقایسه می‌کند و نتیجه می‌گیرد که نیروی متناسب با عکس مجذور فاصله در کیهان نیز همان نیرویی است که باعث می‌شود اجسام به سمت زمین بیفتند، و در گزاره‌ی شماره‌ی ۷ از کتاب سوم است که قانون گرانش عمومی را بیان می‌کند.

در بقیه‌ی کتاب سوم به کمک گرانش عمومی مجموعه‌ای از پدیده‌های شناخته شده را با دقت کمی بررسی می‌کند. پدیده‌هایی که در استخراج قانون گرانش نقشی نداشتند: اختلال‌های مدار ماه، کشندها، حرکت مخروطی محور زمین که به حرکت تقدیمی اعتدالین منجر می‌شود و بالأخره به دنباله‌دارها می‌پردازد و نشان می‌دهد جسم‌هایی سیاره گونه‌اند که به دور خورشید می‌گردند.

در ویراست دوم به بعد پرینکیپیا، نیوتن مدار دنباله‌دار بزرگ ۱۶۸۱-۱۶۸۲ را به صورت یک بیضی کشیده معرفی می‌کند- در حالی که در ویراست نخست آن را سهمی انگاشته بود.

پرینکیپای نیوتون، بلافاصله در انگلستان به عنوان یک شاهکار شناخته شد. شهرت تازه باعث شد که نیوتون در سال ۱۶۶۹ از کمبریج به لندن بیاید. در آن‌جا، ابتدا سرپرست و سپس رئیس ضراب‌خانه، و بعد از سال ۱۷۰۳ رئیس انجمن سلطنتی شد. این‌ها سمت‌هایی بود که تا زمان مرگ آن‌ها را بر عهده داشت.

کتاب او در اروپا با مخالفت طرفداران فلسفه‌ی طبیعی دکارت مواجه شد. با این حال، این اثر در آن‌جا هم تا پیش از میانه‌ی قرن هجدهم با پیروزی روبه‌رو شد. پرینکیپای نیوتون تا پیش از قرن بیستم بر تمامی تحولات علم فیزیک فرمانروایی داشت و حتی پس از آن هم پیشرفت‌هایی مثل نسبیت و مکانیک کوانتومی تنها به این دلیل امکان شکل‌گیری پیدا کردند که فیزیک نیوتونی راه را برای آن‌ها هموار کرده بود.



## راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

### پرسش‌های مفهومی

- ۱- انتظار می‌رود دانش‌آموزان به جرم کم و نیروی زیاد موتور این اتومبیل ویژه اشاره کنند و با توجه به قانون دوم نیوتون،  $F = ma$ ، نتیجه بگیرند که این اتومبیل می‌تواند شتاب بزرگی ایجاد کند.

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

بزرگ ← F  
کوچک ← m

- ۲- اگر مقاومت هوا را نادیده بگیریم تنها نیروی وزن در حین حرکت توپ به آن وارد می‌شود (شکل ۲۸).  
اگر مقاومت هوا را در نظر بگیریم، علاوه بر نیروی وزن، نیروی مقاومت هوا نیز بر خلاف جهت حرکت توپ به آن وارد می‌شود. چه توپ به طرف بالا در حرکت باشد (شکل ۲۹) و چه توپ به طرف پایین در حرکت باشد (شکل ۳۰).

فصل سوم / نیرو و قانون های نیوتون

### پرسش‌های مفهومی

۱- یک اتومبیل ویژه‌ی مسابقه، موتور پر قدرتی دارد اما از مواد بسیار سبک و مستحکمی ساخته شده است. ویژگی‌های این اتومبیل را بر پایه‌ی رابطه‌ی  $F=ma$  توضیح دهید.

۲- توپی را به هوا پرتاب می‌کنیم. شکلی رسم کنید و نیرو(های) وارد به توپ را در حالی که بالا می‌رود نشان دهید.

۳- هرگاه بادکنکی را باد کنیم و سپس آن را رها کنیم مشاهده می‌شود که در حالی که هوای درون بادکنک تخلیه می‌شود بادکنک بر خلاف جهت خروج هوا حرکت می‌کند. در شکل ۲۳-۳ حرکت موشک با یک بادکنک مقایسه شده است. به کمک قانون‌های نیوتون حرکت هر یک را شرح دهید. به جهت خروج هوا از بادکنک یا گازهای داغ از موشک توجه کنید.

۴- مطابق شکل ۲۴-۳ نیروهای A، B، C، D، E و F به اتومبیل وارد شده‌اند.

(الف) با انتخاب یکی از نیروهای A تا E جمله‌های زیر را کامل کنید.  
نیروی ..... نیرویی است که رو به جلو از طرف موتور به اتومبیل وارد می‌شود.  
نیروی ..... نیرویی است که رو به عقب از طرف مقاومت هوا به اتومبیل وارد می‌شود.  
(ب) اندازه‌ی نیروهای A و E می‌تواند تغییر کند. مقدار نیروی A با نیروی B، (ا در حالت‌هایی که در جدول زیر داده شده است، با هم مقایسه کنید.

مقایسه‌ی نیروها	نیروی A کوچک‌تر	نیروی A مساوی	نیروی A بزرگ‌تر
نوع حرکت اتومبیل	نیروی E است	از نیروی E است	نیروی E است
ساکن است			
شتابدار تندشونده			
سرعت ثابت			
شتابدار کندشونده			

(پ) در چه زمانی نیروی E مساوی صفر است؟  
(ت) اتومبیل مشکلی پیدا می‌کند و در هر ثانیه یک قطره روغن از آن روی جاده می‌ریزد. در نمودار زیر قطره‌های روغن ریخته شده از اتومبیل هنگام حرکت روی جاده نشان داده شده است.

W      X      Y      Z

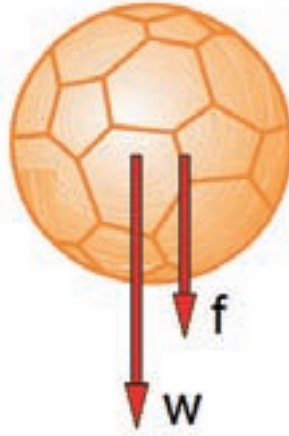
نوع حرکت اتومبیل را در نقطه‌های زیر توضیح دهید.

شکل ۲۳-۳  
شکل ۲۴-۳  
شکل ۲۵





شکل ۳۰



شکل ۲۹



شکل ۲۸

برخی از دانش‌آموزان تصور می‌کنند برای حرکت توپ همواره یک نیرو لازم است (تصور ارسطویی از حرکت) و به همین جهت هنگام رسم نیروهای وارد به توپ در حین حرکت، نیروی دست خود را نیز، که به طرف بالا در لحظه‌ی پرتاب وارد شده، رسم می‌کنند.

۳- انتظار می‌رود دانش‌آموزان با توجه به درکی که از قانون سوم نیوتون به دست آورده‌اند، نیروهای کنش و واکنش را در این فرآیند (حرکت بادکنک یا موشک) مشخص کنند و پس از آن، با توجه به قانون دوم نیوتون، دلیل شتاب گرفتن بادکنک یا موشک را توضیح دهند.

خروج گازها (نیروی کنش) سبب نیروی واکنشی می‌شود که به بادکنک یا موشک وارد می‌شود. این نیروی واکنش سبب شتاب گرفتن این اجسام (به دلیل قانون دوم نیوتون  $\vec{F} = m\vec{a}$ ) می‌شود.

۴- الف) E، A

(ب)

نیروی A بزرگ‌تر از نیروی E است	نیروی A مساوی نیروی E است	نیروی A کوچک‌تر از نیروی E است	مقایسه‌ی نیروها / نوع حرکت اتومبیل
			ساکن است
✓			شتابدار تند شونده
	✓		سرعت ثابت
		✓	شتابدار کند شونده

پ) در حالتی که اتومبیل ساکن است.

ت) از  $w$  تا  $x$  فاصله‌ی قطره‌ها کم شده است، یعنی حرکت آن شتابدار کند شونده است. از  $x$  تا  $y$  فاصله‌ی قطره‌ها مساوی است، یعنی حرکت آن یکنواخت است. از  $y$  تا  $z$  فاصله‌ی قطره‌ها به مرور افزایش یافته است، یعنی حرکت آن تند شونده است.

۵- الف) انتظار می‌رود دانش آموزان، علاوه بر تجربه‌ی شخصی، از مطالب مطرح شده در صفحه‌های ۵۷ و ۵۸ کتاب درسی بتوانند برای پاسخ دادن خود بهره گیرند.

ب) شکل ۳-۱۴ یا موارد دیگر نظیر آن.

پ) شکل ۳-۱۵ یا موارد دیگر نظیر آن.

ت) برای افزایش اصطکاک بین دو سطح می‌توان سطوح را تا حد ممکن خشن و ناهموار کرد. سطوحی نیز که بسیار هموار و صاف باشند نسبت به یکدیگر دارای اصطکاک زیادند (مثلاً دو شیشه).

برای کاهش اصطکاک بین دو سطح، باید سطوح را تا حد ممکن هموار کنیم و یک ماده‌ی روان کننده مانند روغن به آن بیفزاییم.

۶- با باز شدن چتر، نیروی مقاومت هوا افزایش می‌یابد و در نتیجه شتاب و سرعت سقوط چتر باز کاهش چشم‌گیری می‌یابد. به این ترتیب هنگام برخورد به زمین، چون سرعت آن به حد کافی کاهش یافته، با توجه به رابطه‌ی  $\vec{p} = m\vec{v}$ ، تکانه‌ی آن نیز کاسته شده است. معمولاً سرعت برخورد چتر باز در حین برخورد به زمین حدود ۵ تا ۷ متر بر ثانیه است (مانند پریدن از ارتفاعی حدود ۲ متر!).

۲- بیست

- از نقطه‌ی  $X$  تا  $W$
- از نقطه‌ی  $X$  تا  $Y$
- از نقطه‌ی  $Y$  تا  $Z$

۵- الف) اصطکاک چیست و چه می‌کند؟  
 ب) دو وضعیت را بیان کنید که در آن‌جا وجود اصطکاک اهمیت دارد.  
 پ) دو وضعیت را بیان کنید که کم کردن اصطکاک تا حد ممکن مهم است.  
 ت) دو راه برای افزایش و دو راه برای کاهش اصطکاک بین دو سطح بیان کنید.

۶- چتر بازی از هواپیمایی بیرون می‌برد. پس از مدت کوتاهی چتر او باز می‌شود. توضیح دهید باز شدن چتر چگونه باعث کاهش اندازه حرکت چتر باز می‌شود به طوری که سرانجام به سلامت به زمین می‌رسد.

**مسئله‌ها**

۱- در مکان خاصی وزن جسمی به جرم  $1\text{kg}$  برابر با  $1\text{N}$  است. وزن جرم‌های زیر در آن‌جا چقدر است؟  
 الف)  $10\text{kg}$   
 ب)  $5\text{g}$

۲- نیروهای وارد بر جسمی به جرم  $2\text{kg}$  که در امتداد افق در حرکت است مطابق شکل ۲۵-۳ است. شتاب جسم چقدر است؟

۳- جسمی به جرم  $500\text{g}$  روی سطح افقی بدون اصطکاک با نیروی ثابت  $F$  روی خط راست کشیده می‌شود و در مدت  $2\text{s}$  مسافت  $Am$  را می‌پیماید. الف) شتاب حرکت جسم چقدر است؟  
 ب) مقدار نیروی  $F$  را حساب کنید.

۴- دوچرخه سواری جاده‌ای صاف از حالت سکون و با شتاب ثابت شروع به حرکت می‌کند (شکل ۲۶-۳) و در مدت  $10\text{s}$  سرعت او به  $5\text{m/s}$  می‌رسد. کمیت‌های زیر را حساب کنید.  
 الف) شتاب حرکت دوچرخه‌سوار.  
 ب) سرعت متوسط دوچرخه‌سوار در مدت  $10\text{s}$ .  
 پ) مسافت پیموده‌شده در مدت  $10\text{s}$ .  
 سرانجام، باین که دوچرخه‌سوار شدیداً رکاب می‌زند، سرعتش پس از رسیدن به مقداری بیشینه، زیاد نشده و شتاب حرکت او صفر می‌شود.

شکل ۲۵-۳

شکل ۲۶-۳

## مسئله‌ها

۱- با توجه به رابطه‌ی بین وزن و جرم داریم:

$$W = mg \Rightarrow 1\text{ N} = (1\text{ kg})g \Rightarrow g = 1\text{ N/kg}$$

یعنی مقدار شتاب گرانش در محل مورد نظر  $1\text{ N/kg}$  است. به این ترتیب داریم:

$$\text{الف) } 0.1\text{ kg} \times 1\text{ N/kg} = 0.1\text{ N}$$

$$\text{ب) } 5\text{ kg} \times 1\text{ N/kg} = 5\text{ N}$$

$$\text{پ) } 5 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 1\text{ N/kg} = 5 \times 10^{-3}\text{ N}$$

۲- چون هر دو نیرو موازی و در یک جهت وارد شده‌اند داریم:

$$F = 8\text{ N} + 13\text{ N} = 21\text{ N} \text{ جسم برآیند وارد بر جسم}$$

با توجه به قانون دوم نیوتون، داریم:

$$F = ma \Rightarrow 21\text{ N} = (2\text{ kg})a \Rightarrow a = 10.5\text{ m/s}^2$$

۳- الف) چون نیروی وارد شده به جسم ثابت است، شتاب حرکت آن نیز ثابت است. این موضوع در حل این مسئله یک نکته‌ی کلیدی است که انتظار می‌رود دانش‌آموزان به آن توجه کنند. پس از آن می‌توان از روابط مربوط به حرکت شتاب ثابت برای حل مسئله استفاده نمود.

اگر مبدأ مکان را محلی در نظر بگیریم که جسم شروع به حرکت می‌کند،  $x_0 = 0$ ، داریم:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

$$(8\text{ m}) = \frac{1}{2}a(2\text{ s})^2 + 0 + 0 \Rightarrow a = 4\text{ m/s}^2$$

$$F = ma \Rightarrow (0.5\text{ kg})(4\text{ m/s}^2) = 2\text{ N} \quad \text{ب)}$$

توجه دانش‌آموزان را به تبدیل یکاها و همچنین نوشتن یکاها در حین محاسبات جلب نماید. همواره اهمیت این موضوع را به دانش‌آموزان گوشزد نمایید.

۴- در صورت این مسئله، عبارت «با شتاب ثابت» جا افتاده است. ابتدا این موضوع را به دانش‌آموزان تذکر دهید

و سپس از آن‌ها بخواهید که مسئله را حل نمایند.

$$v = at + v_0 \Rightarrow 5\text{ m/s} = a(10\text{ s}) + 0 \Rightarrow a = 0.5\text{ m/s}^2 \quad \text{الف)}$$

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0 + 5\text{ m/s}}{2} = 2.5\text{ m/s} \quad \text{ب)}$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t = \frac{1}{2}(0.5\text{ m/s}^2)(10\text{ s})^2 + 0 = 25\text{ m} \quad \text{پ)}$$

ت) سرعت حدی

ث) وقتی دو چرخه سوار به سرعت حدی می‌رسد، دو نیرو به دو چرخه وارد می‌شود:

یکی نیروی روبه جلوی ناشی از رکاب زدن دو چرخه سوار است و دیگری نیروی روبه عقب که به دلیل مقاومت هوا و اصطکاک بین چرخ‌ها و سطح زمین است.

۵- الف) در این قسمت دانش آموزان باید توجه کنند که سرعت نهایی آدمک را صفر منظور نمایند. به این ترتیب داریم:

$$v^2 - v_0^2 = 2a \Delta x \Rightarrow 0 - (35 \text{ m/s})^2 = 2a(0.6 \text{ m})$$

$$a = -1020 \text{ m/s}^2$$

ب) به دلیل لختی، آدمک می‌خواهد به جلو پرتاب شود ولی کمر بند نیرویی برخلاف جهت حرکت او وارد می‌کند. بزرگی این نیرو برابر است با:

$$F = ma = (55 \text{ kg})(1020 \text{ m/s}^2) = 56100 \text{ N}$$

۶- الف) انتظار می‌رود دانش آموزان به تغییرات سرعت نسبت به زمان توجه کنند.

در قسمت AB: حرکت یکنواخت بوده است.

در قسمت BC: حرکت شتابدار تند شونده بوده است.

در قسمت CD: حرکت شتابدار کند شونده بوده است.

ب) ابتدا شتاب متوسط حرکت را باید به دست آوریم:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - 10 \text{ m/s}}{15 \text{ s} - 10 \text{ s}} = -2 \text{ m/s}^2$$

۷- الف) منظور شتاب متوسط دو چرخه سوار است که برای پیدا کردن آن داریم:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(v \text{ m/s}) - (5 \text{ m/s})}{5 \text{ s}} = 0.4 \text{ m/s}^2$$

ب)

$$30 \text{ N} - R = ma$$

فصل سوم: نیرو و قانون های نیوتن

ت) سرعت پیشینه‌ی دوچرخه‌سوار چه نامیده می‌شود؟  
 ت) این رویداد را بر حسب نیروهای وارد بر دوچرخه‌سوار توضیح دهید.

۵- برای آزمایش کمر بند ایمنی یک اتومبیل، آدمکی را به جرم  $55 \text{ kg}$  انتخاب می‌کنند و با کمر بند ایمنی روی صندلی می‌نشانند (شکل ۳-۲۷). پیش از آن که اتومبیل به یک دیوار آجری برخورد کند، سرعت آن  $35 \text{ m/s}$  است. در این موقعیت کمر بند ایمنی به آدمک اجازه می‌دهد تنها مسافتی برابر  $60 \text{ cm}$  با حرکت شتابدار و با شتاب ثابت روی صندلی به طرف جلو حرکت کند.

الف) شتاب کندشونده‌ی آدمک را به دست آورید.  
 ب) مقدار نیرویی را که کمر بند ایمنی به آدمک وارد می‌کند حساب کنید.

۶- شخصی با یک سورتمه از سطح شیب‌داری پایین می‌آید. جرم کل شخص و سورتمه برابر با  $100 \text{ kg}$  است. زمان و سرعت او همزمان با وسیله‌ای (زمان-سرعت-سرعت) که به سورتمه متصل است اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده در نقطه‌های C, B, A و D در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است.



نقطه	زمان سنج	سرعت سنج
A	0	0
B	6	2
C	10	10
D	15	0

شکل ۳-۲۸  
 الف) در هر بخش، نوع حرکت سورتمه را توضیح دهید.  
 ب) متوسط نیروی وارد شده به سورتمه را در فاصله‌ی CD حساب کنید.

$$30\text{ N} - R = (80\text{ kg}) (0.4\text{ m/s}^2)$$

$$R = 30\text{ N} - 32\text{ N} = -2\text{ N}$$

۸- الف) این نیرو از نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره

تأمین می‌شود.

ب) با توجه به رابطه‌ی  $F = G \frac{mM_e}{R^2}$ ، با افزایش جرم ماهواره  $m$ ، بزرگی نیروی مرکز‌گرایی لازم برای تداوم

حرکت ماهواره به دور زمین نیز افزایش می‌یابد.

پ)

$$F = G \frac{mM_e}{R^2}$$

$$= (6.67 \times 10^{-11}\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(400\text{ kg})(6 \times 10^{24}\text{ kg})}{(6400 + 600)^2 \times 10^6} = 326\text{ N}$$

۷- سرعت دوچرخه‌سواری برابر با  $5\text{ m/s}$  است. در مدت  $5$  ثانیه سرعت او به  $5\text{ m/s}$  افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۳-۲

شبیه‌سازی حرکت ماهواره (در ارتباط با مسئله ۸)

الف) شتاب دوچرخه‌سوار چقدر است؟  
ب) در شکل ۳-۲ جرم دوچرخه‌سوار با دوچرخه‌اش  $80\text{ kg}$  است. نیرویی که از طرف چاده رو به جلو به دوچرخه وارد می‌شود برابر با  $30\text{ N}$  است. اگر شتاب دوچرخه‌سوار برابر با مقدار قسمت الف) باشد، نیروی مقاومت باد  $R$  را به دست آورید.

۸- شکل ۳-۳ مسیر ماهواره‌ای را به دور زمین نشان می‌دهد.  
الف) برای این که ماهواره در مسیر دایره‌ای دور زمین حرکت کند، لازم است نیرویی به طرف زمین به ماهواره وارد شود. به این نیرو که جهت آن به طرف مرکز زمین است، نیروی مرکز‌گرایی نیز گفته می‌شود. توضیح دهید برای حرکت ماهواره در مداری اطراف زمین، این نیروی مرکز‌گرایی از کجا تأمین می‌شود.  
ب) اگر جرم ماهواره بیش‌تر شود نیروی مرکز‌گرایی لازم چه تغییری می‌کند؟  
پ) اگر ماهواره در مداری به فاصله‌ی  $600$  کیلومتری سطح زمین در حرکت باشد و جرم ماهواره  $400\text{ kg}$  باشد، بزرگی نیروی مرکز‌گرایی وارد شده به ماهواره چقدر است؟ جرم زمین  $6 \times 10^{24}\text{ kg}$  و شعاع آن  $6400\text{ km}$  است. (فرض کنید همه‌ی جرم زمین در مرکز آن متمرکز باشد)



مسیر دایره‌ای ماهواره زمین

شکل ۳-۳

## میان فصل

### مدل‌ها و نظریه‌ها

واژه‌های «مدل» و «نظریه» را در فیزیک به شکل‌های گوناگونی به کار می‌برند. مثلاً اتم بور مدلی است که هم در پایه‌گذاری نظریه‌ی اتمی و هم در پیدایش نظریه‌ی کوانتومی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نظریه‌ی الکترومغناطیسی نور بخشی از نظریه‌ی میدان‌های کلاسیک است. نظریه‌ی موجی نور و مدل‌های موجی و ذره‌ای نور را هم داریم. نظریه‌ی فعلی ربایش گرانشی از نظریه‌ی نسبیت عام می‌آید، که یکی از مدل‌های سیاه چاله‌ی شوارتس شیلد است. نظریه‌ی نسبیت عام را اغلب تعمیم نظریه‌ی نسبیت خاص می‌گیرند. هر یک از این کاربردهای مدل و نظریه، در ساختار مفهومی فیزیک سهم دارند. در این جا شرحی از این ساختار مفهومی می‌آید که بیشتر این کاربردها را سازمان‌دهی می‌کند.

فیزیک در بسیاری از موارد، با عنوان غیر رسمی الگو و سرمشق (پارادایم) در گسترده‌ترین سطح و در زمینه‌های گوناگون فعالیت دارد و این الگو یک سنت عام پژوهشی است. چنین سنتی در واقع یک دیدگاه جهانی کامل است و تقید به شکل‌های خاص از نظم و انواع بنیادی توضیح را شامل می‌شود.

در رده‌ی بعدی ساختار درون الگو یا پارادایم با یک یا چند چارچوب نظری روبه‌رو می‌شویم. هر چارچوب نظری براساس رهیافت ریاضی خاصی به مجموعه‌ی معینی از ویژگی‌های فیزیکی استوار است. مثلاً دو چارچوب نظری‌ای که در بیشتر قرن بیستم در فیزیک غالب بوده‌اند، عبارت‌اند از چارچوب فضا-زمان (متناظر با نظریه‌ی نسبیت عام) و چارچوب متناظر با نظریه‌ی کوانتومی.

در چارچوب فضا-زمان، اجسام فیزیکی را با میدان‌های هندسی (اسکالر، برداری و تانسوری) روی خمینه‌ای چهار بعدی مشخص می‌کنند. نقطه‌های این خمینه‌ی چارچوبی مکان [و زمان] رویدادهای آرمانی است و این خمینه یک ساختار متریک هم دارد.

در چارچوب نظریه‌ی کوانتومی، حالت هر سیستم فیزیکی را با برداری در فضای هیلبرت مختلط بی‌نهایت بعدی مشخص می‌کنند.



مشاهده پذیرها عملگرهایی در این فضا هستند و تحول سیستم با معادله‌ی شرودینگر داده می‌شود. این که تاکنون این دو چارچوب نظری فراگیر فیزیک آشتی‌ناپذیر مانده‌اند، یکی از معماهای بزرگ فیزیک معاصر است. هر چارچوب نظری شامل نظریه‌هایی خاص است. نظریه‌ی امروزی نیوتونی، نظریه‌ی فضا-زمان با فرض تجزیه‌ی انحصاری فضا-زمان به یک فضای اقلیدسی سه بعدی و یک زمان یک بعدی است و میدان‌های متناظر با اجسام فیزیکی هم روی این فضا-زمان تعریف می‌شوند.

از دید تاریخی، نظریه‌های نیوتون مکانیک و گرانش، که هنوز در بسیاری از کتاب‌های درسی مطرح‌اند، جزو سنتز نیوتونی قرار می‌گیرند. نظام یا سنتز نیوتونی پارادایمی است که فیزیک را از قرن هفده تا قرن نوزده هدایت می‌کرد. نظریه‌ی نسبیت خاص فرض می‌کند تجزیه‌ی فضا-زمان به بخش‌های فضایی تخت منحصر به فرد نیست (نسبیت همزمانی سراسری). نظریه‌ی نسبیت عام، میدان اجسام فیزیکی را از طریق معادلات میدان انیشتین به ساختار متریک خود فضا-زمان مربوط می‌کند و به این ترتیب هیچ هندسه‌ی سراسری خاصی را فرض نمی‌گیرد.

مدل‌های هر نظریه، نتیجه‌ی خاص کردن اجزای آن نظریه‌اند. مثلاً یک مدل از نظریه‌ی ذره‌ای امروزی نیوتون ممکن است یک دسته مسیر ذره را در فضا-زمان نیوتونی مشخص کند. مدل‌های نسبیت عام، اغلب با جواب‌هایی از معادلات میدان انیشتین مشخص می‌شوند و با سیستم‌های فیزیکی خاصی متناظرند. مدل شوارتس شیلد با فضا-زمان نسبیتی خاصی مشخص می‌شود که با یک جرم کروی متقارن و منزوی متناظر است. در واقع، این یک نوع مدل است. یک مدل شوارتس شیلد کاملاً معین که با یک جرم معین متناظر است.

در چنین مدلی، ویژگی‌هایی مثل مسیرهای نور معین‌اند و می‌شود آن‌ها را با نتایج سنجش‌هایی روی سیستم‌های فیزیکی واقعی (مثل منظومه‌ی شمسی یا یکی از نامزدهای اخترشناسی سیاه چاله‌ها) مقایسه کرد. به همین ترتیب، در مکانیک کوانتومی هم مدل‌ها را اغلب با جواب‌های معادله‌ی شرودینگر مشخص می‌کنند. مثلاً می‌شود از مدل کوانتومی ذره‌ای با جرم و بار مشخص، که در میدان الکترومغناطیسی‌ای با آرایشی خاص پراکنده می‌شود، حرف زد. یا می‌توان مدل کوانتومی نوسانگر هماهنگ یک بعدی با جرم و بسامد معینی را در نظر گرفت.

براساس این توصیف ساختار فیزیک، نقطه‌ی حساس توصیف فیزیکی (و بخش عمده‌ی آزمون نظریه‌ها) در پیوند مدل‌ها با ویژگی‌های سیستم‌های واقعی قابل شناسایی است. مثلاً این ادعا را در نظر بگیرید که خورشید و عطارد یا تیر (با دقت خوبی) یک سیستم دو ذره‌ای نیوتونی می‌سازند. کمترین ادعا این است که مکان و سرعت تیر نسبت به خورشید، بسیار شبیه به چیزی است که در یک مدل دو ذره‌ای خاص نیوتونی دیده می‌شود.

اما اگر فرض کنیم مدل، واقعاً این سیستم را توضیح می‌دهد، در این صورت باید ویژگی‌های دیگر این مدل را هم متناظر با ویژگی‌های سیستم تیر-خورشید بگیریم. مثلاً می‌شود از نیروی مرکزی‌ای اسم برد که آن‌ها بین ذره‌ها مبادله می‌شود، و ذره‌ها براساس قانون دوم نیوتون به آن پاسخ می‌دهند. اما بعضی از ویژگی‌های این مدل کاملاً با ویژگی‌های

سیستم تیر- خورشید متفاوت‌اند: ویژگی جرم نقطه‌ای ذره‌ها و نبود ذره‌های دیگر بر هم کنش دار. انتظار می‌رود با استفاده از مدل‌هایی که شباهتشان به سیستم واقعی بیشتر است (اجسام گسترده و اجسام دیگر بر هم کنش دار)، دقت برازش مشخصه‌های مداری با نتایج متناظر در مدل بهتر شود. فرایند بهتر شدن برازش داده‌ها با نظریه، یکی از بخش‌های کلیدی آزمون نظریه است. به علت شکست این نوع مدل‌های نیوتونی (در برازش نتایج نظری با جابه‌جایی حضيض تیر) نظریه‌ی نسبیت عام و این ادعا که هندسه‌ی فضا-زمان بیرون از خورشید یک مدل خاص شوراتس شیلد است، به شدت تقویت شد.

البته هنوز هم در بسیاری از محاسبات منظومه‌ی شمسی، مدل‌های نیوتونی را به کار می‌برند. هر چند می‌دانیم در طبیعت نیرویی نیست که آن‌ا منتشر شود. مدل‌ها را اغلب به عنوان مدل‌های محاسباتی به این شکل به کار می‌برند. گاهی هم مدل‌ها را برای کاوش ویژگی‌هایی از سیستم‌های واقعی به کار می‌برند که به خوبی شناخته شده نیستند و به دنبال شباهت‌های عمیق توصیفی می‌گردند. به چنین مدل‌هایی مدل‌های اکتشافی می‌گویند. حتی اگر بینش توصیفی مهمی به دست نیاید، روابطی صوری در درون مدل راهنمایی هستند که رابطه‌ی متناظر در سیستم‌های فیزیکی را جست‌وجو می‌کنند.

به طور کلی، فرضیه‌ی نظری در فیزیک ادعا می‌کند که سیستم فیزیکی از جهاتی و با دقت خاصی شبیه به مدل نظری است. برای منظورهای عملی توصیف و آزمون، هر نظریه مجموعه‌ی کاملی از مدل‌ها یا مجموعه‌ای از مدل‌ها و همراه با فرضیه‌هایی است که مدل‌ها را به سیستم‌های فیزیکی واقعی مربوط می‌کنند.



## ابن هیثم، ابوعلی حسن بن حسن بصری

تولد: عراق ۳۴۴ شمسی (۳۵۴ ق)

وفات: قاهره، مصر، ۴۱۹ شمسی (۴۳۰ قمری)

حوزه‌ی فعالیت: نجوم، ریاضیات

### زندگی‌نامه

ابن هیثم دانشمندی خلاق و پویا بود که آثارش توجه بیش‌تری را می‌طلبد. او مثال بارزی از یک فیزیکدان بزرگ جهان اسلام است که در عصر طلایی علوم اسلامی زندگی می‌کرد. کتاب ماندگارش، نورشناسی (المناظر) در

پیشرفت علوم در اروپای قرون وسطی بسیار موثر بود، همان‌طور که برای بسیاری از دانشمندان غربی هم اثر محرکی محسوب می‌شد.

ابن هیثم (معروف به الحسن) در بصره متولد شد. هرچند او زندگینامه‌ای برای خود نوشته است، ولی این اثر بیش‌تر به رشد و پیشرفت فکریش مربوط می‌شود تا زندگی خصوصی او. از زندگی خصوصی او اطلاع کمی در دست است.

او به دلیل تیزهوشی ریاضیات و دانش وسیعی که داشت، مدعی شده بود که می‌تواند با تعبیه ساختمانی مناسب روی رود نیل جریان آب آن رود را تنظیم کند و به این ترتیب، خلیفه الحاکم (بامر الله) را تحت تأثیر این ادعا قرار داد. ولی این کار چنان عظیم بود که سرانجام آن‌را رها کرد. ابن هیثم تصمیم گرفت که به خلیفه حقیقت را بگوید و با وجود آن که خلیفه او را به یک سمت اداری گماشته بود، چون خود را از خشم خلیفه در امان نمی‌دید، تظاهر به دیوانگی کرد و از این رو تا زمان مرگ خلیفه خانه‌نشین شد. پس از مرگ خلیفه، او از دیوانه‌نمایی دست برداشت و در نزدیکی دانشگاه الازهر که یک مرکز بزرگ علمی بود، اقامت گزید و باقی عمر خود را به تألیف و رونویسی متون علمی و تدریس سپری کرد.

ابن هیثم دانشمندی کلی‌نگر بود. متأسفانه نوشته‌های او درباره‌ی منطق، اخلاق، شعر، موسیقی، الهیات و ارسطوشناسی دیگر موجود نیست و فقط آثاری از او در دسترس است که درباره‌ی نورشناسی، ستاره‌شناسی، و ریاضیات است. کتاب «المنظر» او شامل هفت مقاله‌ی عمیق و گسترده است. این اثر یک پژوهش وسیع و استادانه مبتنی بر اصول ریاضی و تجربی در بررسی خواص و عملکرد و ماهیت نور، رنگ، مفاهیم نورشناسی و از جمله بینایی است. این اثر مفاهیم علمی نوینی را در حوزه‌ی تجربه‌های علمی مطرح ساخت. هدف ابن هیثم در این اثر، بررسی علم نورشناسی و بینایی به روشی تازه و نظام‌مند، بدون کمک گرفتن‌های غیر ضروری از عقاید گذشتگان و پایه‌ریزی آن بر اصول جدید بود.

نقطه‌ی آغاز کتاب «المنظر» بررسی دقیق و موشکافانه‌ی تجربی و نظری انتشار راست خط نور همراه با نظریه‌ی قدیمی هزار سال پیش بینایی بطلمیوس بود که به نظر او نادرست می‌آمد، با این باور که انتقال نور و مسأله‌ی بینایی تابعی از کارکرد چشم است. بنا بر نظریه‌ی بطلمیوس، گسیل پرتوها از چشم و برخورد آن‌ها به یک شیء منجر به دیدن آن شیء می‌شود. در صورتی که در نظریه‌ی بینایی ابن هیثم، به روشنی بیا می‌شود که دیدن یک شیء بر اثر پرتوهای بازتابیده از آن و ورود آن‌ها به چشم رخ می‌دهد. این نظریه بعدها به وسیله‌ی هنرمندان اروپایی به عنوان اساس مطالعه‌ی پرسپکتیو مورد استفاده قرار گرفت. نظریه‌ی مهم دیگری که در پیشرفت نورشناسی بسیار مؤثر بود، آشنایی با مفهوم پرتو نور است که در مقاله‌ی چهارم «المنظر» مطرح شده است. شرط اساسی برای نظریه‌ی بینایی ابن هیثم داشتن دانش دقیق از کارکرد چشم است. وی با طرح هندسی به نسبت دقیقی از ساختمان چشم توانست

نظریه‌ی بینایی خود را به خوبی مطرح سازد و شکل یک شیء قابل دیدن را در چشم ارائه دهد. ابن هیثم به این ترتیب، مهارت خود را هم در طب و هم در فیزیک با توصیف کار چشم و کارکرد اجزای اصلی تشکیل دهنده‌ی آن، و این که چگونه بخش‌های مختلف آن در فرآیند بینایی به هم مربوط هستند و با هم سازگاری دارند، به نمایش گذارد. ابن هیثم برای توضیح بازتاب و شکست نور، یک نظریه‌ی مکانیکی ارائه داد. وی توضیح داده است که پدیده‌ی بازتاب نور به ماهیت ذاتی جسم بازتاب دهنده بستگی دارد و آن وجود یک «نیروی رانش» یا «نیروی مقاومت» در خود جسم است. توانایی یک سطح در بازتاب نور، به میزان پیوستگی سطح ماده و صاف بودن آن بستگی دارد. ابن هیثم با در نظر گرفتن اثر برخورد و تأثیر حرکت یک جسم سنگین با سطحی با سختی‌های مختلف، به یک شبیه‌سازی در زمینه‌ی بازتاب نور دست یافت. می‌دانیم که یک نیروی مایل را می‌توان به مؤلفه‌های قائم و افقی در نقطه‌ی برخورد تجزیه کرد. مؤلفه قائم ثابت می‌ماند. در حالی که مؤلفه افقی روی سطح تصویر می‌شود. بنابراین «زایه‌ی فرود با زاویه‌ی بازتاب برابر می‌شود.» و به این ترتیب، ابن هیثم اولین قانون بازتاب را بنا نهاد و این قانون را به طریق تجربی نیز اثبات کرد.

ابن هیثم برای پدیده‌ی شکست نیز از شبیه‌سازی استفاده کرد. برای این منظور، یک توجیه ریاضی را با آزمایش دقیقی ارائه داد. و نتیجه گرفت، نور هنگام انتشار ساده‌ترین مسیر را طی می‌کند و به سمت خط عمود متمایل می‌شود. بدون در نظر گرفتن گامی به سوی قانون اسنل - دکارت، ابن هیثم معتقد بود که نور در حرکت خود، قادر به تغییر سرعت نیز هست. او این برداشت را از گونه‌ای شبیه‌سازی مکانیکی نتیجه گرفت و دریافت که این حرکت فرودی، ترکیبی از دو حرکت است. او این برداشت را از گونه‌ای شبیه‌سازی مکانیکی نتیجه گرفت و دریافت که این حرکت فرودی، ترکیبی از دو مؤلفه‌ی عمود بر هم است که می‌توان با روش متوازی الاضلاع آن را تجزیه کرد. این نظریه برای بیش‌تر پژوهشگران و نویسندگان قرن سیزدهم تا هفدهم (میلادی) نوعی ابهام درباره‌ی نورشناسی به وجود آورد.

کتاب المناظر مهم‌ترین نوشته‌ی قابل توجه در تاریخ نورشناسی از زمان «اُپتیکا»ی بطلمیوس در قرن دوم میلادی است. «المناظر» تا اوایل قرن سیزدهم (میلادی) ناشناخته مانده یا فراموش شده بود تا این که ترجمه‌ی لاتینی آن با عنوان «پرسپکتیوا» ارائه شد و تأثیر عظیمی بر دانشمندان و متفکران اروپایی گذاشت.

علاوه بر «المناظر»، آثار دیگر ابن هیثم - هرچند که کوچک هستند - ولی نبوغ و تفکر وسیع او را در زمینه‌ی نورشناسی نشان می‌دهند. پژوهش‌های او در زمینه‌های نظری بازتاب نور و آینه‌های کروی، مقدمه‌ی کشف ابیراهی‌های کروی شد. او در این پژوهش‌ها، آینه‌های سوزاننده‌ی شلجمی را کشف کرد که برای پژوهش‌های بسیار مؤثر بودند، چون تمام پرتوهای بازتابیده در یک نقطه متمرکز می‌شدند. ابن هیثم با مطالعه‌ی مسیر پرتوهای موازی از درون یک شیشه‌ی کروی، کوشید تا فاصله‌ی کانونی را به دست آورد و از آن‌جا دوباره به ابیراهی کروی پرداخت. او تمایز بین سایه و نیم‌سایه را بازگو کرد و برای توصیف تاریکخانه‌ای شبیه به تاریکخانه‌ی دوربین عکاسی، دستگاهی ساخت که

آرایش عدسی‌ها و آینه‌ها روی آن نمایان بود.

نبوغ ابن هیثم در توصیف نظریه شکست، او را قادر ساخت تا پدیده‌های دیگر شکست نور را در جوّ مورد بررسی قرار دهد. برای مثال، وقتی نور از ستاره‌ای در دور دست به طور عمود وارد جوّ می‌شود، تفاوت بین جهت حقیقی و ظاهری آن ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. اما وقتی ستاره به افق نزدیک می‌شود، این تفاوت افزایش می‌یابد. این استدلال او را به این مسأله هدایت کرد که دریابد به هنگام شفق، وقتی غروب پایان می‌پذیرد، خورشید نوزده درجه زیر افق است. ظاهر بیضی شکل خورشید در هنگام غروب و تغییر ظاهری در قطره‌های ماه و خورشید در افق، همگی به وسیله‌ی ابن هیثم توضیح داده شده است.