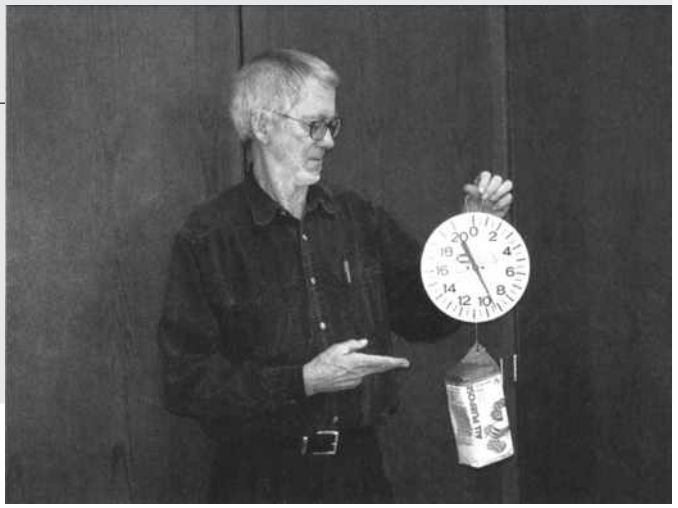
فصل ۲

قانون اول حرکت نیوتون ــ لختی



برل گری (*Burl Grey*)، که نخستین بار مرا با مفهوم کشش آشنا کرد، نشان می‌دهد بسته‌ای ۲ پوندی کشش ۹ نیوتونی تولید می‌کند.

بیش از ۲۰۰۰ سال قبل، دانشمندان یونان باستان با برخی از مفاهیم فیزیکی که امروزه مطالعه می‌کنیم آشنا بودند. آنها شناخت خوبی از ویژگی‌های نور داشتند، اما در مورد حرکت سردرگم بودند. یکی از نخستین کسانی که حرکت را به‌طور جدی بررسی کرد ارسطو، برجسته‌ترین فیلسوف ـ دانشمند عصر خود در یونان باستان، بود. ارسطو کوشید تا حرکت را با طبقه‌بندی توضیح دهد.

ارسطو و حرکت

ارسطو حرکت را به دوگروه اصلی حرکت طبیعی و حرکت قسری تقسیم کرد. ما هر یک از این دو نوع حرکت را نه به‌عنوان موضوع مطالعه بلکه فقط به‌صورت زمینه‌ای برای دیدگاه‌های کنونی حرکت به اختصار بررسی می‌کنیم.

ارسطو ادعا می‌کرد که حرکت طبیعی ناشی از «سرشت» هر جسم است و ناشی از ترکیب چهار عنصر (خاک، آب، باد، و آتش) موجود در جسم است. به‌نظر او، هر جسم موجود در عالم جایگاه مناسبی دارد که آن را همین «سرشت» تعیین می‌کند؛ هر آنچه در جایگاه مناسب خود نباشد «می‌کوشد» به آن برسد. تکه سفالی از جنس خاک رس چون از خاک است اگر تکیه‌گاهی نداشته باشد همانا به زمین (یا خاک) فرومی‌افتد. دودی که مانعی بر سر راهش نباشد، چون از جنس هواست، یقیناً بالا می‌رود؛ پری که آمیزه‌ای از خاک و هوا ولی بیشتر از خاک است یقیناً با سرعتی کمتر از سفال به زمین می‌افتد. او می‌گفت که اجسام سنگین‌تر سخت‌تر تلاش می‌کنند. بنابراین، استدلال ارسطو این بود که اجسام با سرعت متناسب با وزنشان فرومی‌افتند؛ هرچه جسم سنگین‌تر باشد، تندتر سقوط می‌کند.

ارسطو (۳۲۲-۳۸۴ قبل از میلاد)

ارسطو فیلسوف، دانشمند، و معلم یونانی پسر یکی از پزشکان پادشاه مقدونیه بود. او در ۱۷ سالگی وارد آکادمی افلاطون شد و در آنجا، تا هنگام درگذشت افلاطون، ۲۰ سال به‌کار و تحصیل پرداخت. سپس، مربی اسکندر کبیر جوان شد. هشت سال بعد، او خود مدرسه‌ای تأسیس کرد. هدف ارسطو سامان‌بخشی معلومات موجود بود، همان‌طورکه اقلیدس هندسه را سازمان‌داده بود. ارسطو مشاهده‌های مهمی انجام داد، نمونه‌هایی جمع‌آوری کرد، و تقریباً تمام دانش موجود در مورد جهان را گردآوری، خلاصه، و طبقه‌بندی کرد. رهیافت نظام‌مند او به صورت روشی در آمد که علم غرب بعدها از آن سربرآورد. دفتر یادداشت‌های حجیم او را پس از مرگش در غارهای نزدیک خانه‌اش نگه داشتند و سپس به کتابخانهٔ اسکندریه فروختند. در دوران تاریک قرون وسطی، فعالیت علمی در سراسر اروپا متوقف شد، و آثار ارسطو در مطالعات علمی که در امپراتوری‌های بیزانس و اسلامی تداوم یافت، فراموش و گم شد. در قرن‌های یازدهم و دوازدهم میلادی، کتاب‌های گوناگون او دوباره در اروپا مطرح و به زبان لاتین ترجمه شد. کلیسا، نیروی سیاسی و فرهنگی غالب در اروپای غربی آن روزگار، ابتدا آثار ارسطو را ممنوع ساخت، ولی سپس آنها را پذیرفت و وارد تعالیم مسیحی کرد.

حرکت طبیعی مانند حرکت تمام اجسام روی زمین، یا مستقیم و روبه بالا یا مستقیم و روبه پایین بود، یا مانند حرکت اجرام سماوی دایره‌ای بود. حرکت دایره‌ای برخلاف حرکت به بالا و پایین، آغاز و پایانی ندارد و بدون هیچ انحرافی تکرار می‌شود. ارسطو اعتقاد داشت که قاعده‌های متفاوتی در آسمان‌ها حکمفرماست، و ادعا می‌کرد اجرام سماوی کره‌های کاملی‌اند که از مادهٔ کامل و تغییرناپذیری ساخته شده‌اند که او آن را اثیر نامید.[۱] (تنها جسم سماوی که می‌شد تغییر آشکاری را بر چهره‌اش مشاهده کرد ماه بود. مسیحیان قرون وسطی، که هنوز تحت تأثیر تعلیمات ارسطو بودند، می‌گفتند که عیب‌های ماه ناشی از نزدیکی آن به زمین و آلوده شدنش توسط زمین فاسد است.)

حرکت قسری، گروه دیگر حرکت ارسطویی، ناشی از نیروهای فشاری یا کششی بود. حرکت قسری حرکت تحمیلی بود. شخصی که ارابه‌ای را هُل می‌دهد یا وزنه‌ای سنگین را بلند می‌کند، مانند کسی که سنگی را پرتاب می‌کند یا کسی که برندهٔ مسابقهٔ طناب‌کشی می‌شود حرکت را تحمیل می‌کند. باد حرکت را بر کشتی تحمیل می‌کند. سیلاب‌ها آن را به تخته‌سنگ‌ها و تنهٔ درختان تحمیل می‌کنند. نکتهٔ اساسی در مورد حرکت قسری علت خارجی آن بود که به‌اجسام منتقل می‌شد؛ آنها خود به‌خود و به واسطهٔ «سرشت» خود حرکت نمی‌کردند، بلکه فشارها و کشش‌ها آنها را به‌حرکت درمی‌آورد.

مفهوم حرکت قسری دشواری‌های خود را داشت، زیرا فشارها و کشش‌های بانی آن همواره نمایان نیستند. مثلاً، زه‌کمان پیکان را تا هنگام رها شدن از کمان به‌حرکت درمی‌آورد؛ پس از

۱. اثیر جوهر پنجم است، چهارتای دیگر خاک، آب، باد، و آتش است.

آن، توضیح حرکت بعدی پیکان ظاهراً به عامل محرک دیگری نیازدارد. بنابراین، ارسطو فرض کرد که شکافته شدن هوا، بر اثر حرکت پیکان، با هجوم هوا برای جلوگیری از تشکیل خلأ عامل محرکی را در پشت آن به‌وجود می‌آورد. پیکان به همان صورتی در هوا به‌پیش رانده می‌شود که قالب صابونی که از یک سرش به آن فشار وارد کرده‌اید در وان حمام به‌حرکت درمی‌آید.

باری، ارسطو در تدریس می‌گفت که تمام حرکت‌ها ناشی از سرشت جسم متحرک یا بر اثر فشار یا کشش مداوم است. اگر جسم در محل مناسب خود باشد، حرکت نمی‌کند مگر آنکه نیرویی به آن وارد شود. سوای اجرام سماوی، وضعیت عادی اشیا حالت سکون است.

اظهارات ارسطو دربارهٔ حرکت آغاز تفکر علمی بود، وگرچه وی این اظهارات را حرف آخر در این مورد نمی‌شمرد، پیروانش تقریباً ۲۰۰۰ سال دیدگاه‌های او را مسلم فرض می‌کردند. در تفکر باستانی، قرون وسطایی، و اوایل دورهٔ نوزایی سکون را بی‌چون و چرا حالت طبیعی اجسام می‌پنداشتند. چون تا قرن شانزدهم اغلب متفکران می‌پنداشتند زمین در جای مناسب خود قرار دارد و چون نیرویی که بتواند زمین را به‌حرکت درآورد باور نکردنی بود، به‌نظر آنان کاملاً روشن بود که زمین حرکت نمی‌کند.

خود را بیازمایید

آیا عقل سلیم حکم نمی‌کند که، طبق اعتقاد ارسطو، زمین در جای مناسب خود و نیروی لازم برای حرکت آن باورنکردنی باشد، همچنین زمین در این عالم ساکن باشد.

کوپرنیک و زمین متحرک

نیکولاس کوپرنیک
(۱۴۷۳-۱۵۴۳)

در این حال و هوای فکری بود که نیکولاس کوپرنیک[2]، اخترشناس لهستانی (۱۴۷۳-۱۵۴۳)، نظریهٔ زمین متحرک خود را تدوین کرد. کوپرنیک چنین استدلال کرد که ساده‌ترین راه توجیه حرکت‌های مشاهده شدهٔ خورشید، ماه، و سیاره‌ها در آسمان این فرض است که زمین (و دیگر سیاره‌ها) دور خورشید بگردند. او به دو دلیل سال‌ها کار کرد بدون آنکه اندیشه‌هایش را ابراز کند. اولین دلیل این بود که او از شکنجه می‌ترسید؛ نظریه‌ای تا این حد متفاوت با باور متداول بدون شک حمله به نظام رسمی تلقی می‌شد. دلیل دوم آن بود که خود او در مورد آن به‌شدت تردید داشت؛ او نمی‌توانست اندیشهٔ زمین متحرک را با اندیشه‌های متداول حرکت آشتی دهد.

2. Nicolaus Copernicus

سرانجام، در روزهای آخر عمر خویش، به اصرار دوستان نزدیکش، کتاب گردش افلاک آسمانی[3] را به چاپخانه فرستاد. اولین نسخهٔ این کار معروف در روز مرگ او ــ ۲۴ مه ۱۵۴۳ ــ به دستش رسید.

اغلب ما واکنش کلیسای قرون وسطی به اندیشهٔ حرکت زمین به گرد خورشید را می‌دانیم. چون دیدگاه‌های ارسطو به‌صورت بخش چشمگیری از تعالیم کلیسا درآمده بود، مخالفت با آنها تردید در کلیسا بود. برای بسیاری از رهبران کلیسا، اندیشهٔ زمین متحرک نه تنها اقتدار آنها بلکه شالوده‌های ایمان و تمدن را نیز تهدید می‌کرد. چه خوب چه بد، این اندیشهٔ جدید برداشت آنها از کیهان را زیرورو می‌کرد ــ گرچه کلیسا سرانجام آن را پذیرفت.

گالیله و برج کج

گالیله، برجسته‌ترین دانشمند اوایل قرن هفدهم، به دیدگاه زمین متحرک کوپرنیک اعتبار بخشید. او این کار را با بی‌اعتبار کردن نظریات ارسطو دربارهٔ حرکت انجام داد. گرچه او نخستین کسی نبود که مشکلات نظریات ارسطو را خاطرنشان می‌کرد، اما اولین کسی بود که با مشاهده و آزمایش دلایل قانع‌کننده‌ای در این مورد مطرح کرد.

گالیله فرضیهٔ سقوط اجسام ارسطو را به‌راحتی باطل کرد. می‌گویند که او اجسام با وزن‌های متفاوت را از بالای برج کج پیزا به زیر انداخت و سقوطشان را مقایسه کرد. گالیله، برخلاف اظهارات ارسطو، دریافت سنگی که وزنش دو برابر سنگ دیگر بود، دو برابر تندتر سقوط نمی‌کند. او دریافت، صرف‌نظر از تأثیر اندک مقاومت هوا، اجسام با وزن‌های متفاوت وقتی همزمان رها شوند، باهم فرومی‌افتند و به زمین برخورد می‌کنند. می‌گویند گالیله یک‌بار جمعیت انبوهی را جمع کرد تا شاهد انداختن دو جسم با وزن‌های متفاوت از فراز برج باشند. بنابراین حکایت، بسیاری از تماشاچیان این نمایش که دیدند اجسام باهم به زمین برخورد کردند گالیلهٔ جوان را مسخره کردند و همچنان به تعالیم ارسطویی معتقد ماندند.

شکل ۲-۱
آزمایش معروف گالیله.

پاسخ خود را وارسی کنید

نظریات ارسطو منطقی و با مشاهده‌های روزمره سازگارند. پس، اگر با فیزیک این کتاب آشنا نشوید، اظهارات ارسطو دربارهٔ حرکت معقول به‌نظر می‌رسد. اما با به‌دست آوردن اطلاعات جدید دربارهٔ قاعده‌های طبیعت، احتمالاً درمی‌یابید که عقل سلیم شما از تفکر ارسطویی فراتر می‌رود.

3. *De Revolutionibus*

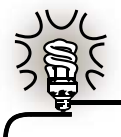
گالیلئو گالیله (۱۶۴۲-۱۵۶۴)

گالیله در همان سالی در پیزای ایتالیا به دنیا آمد که شکسپیر متولد شد و میکلانژ درگذشت. او در دانشگاه پیزا به تحصیل پزشکی پرداخت و سپس به ریاضی تغییر رشته داد. او در ابتدا به حرکت علاقه‌مند شد و سپس با معاصران خود، که به نظریات ارسطو در مورد سقوط اجسام معتقد بودند اختلاف نظر پیدا کرد. او پیزا را برای تدریس در دانشگاه پادوا ترک کرد و از مبلغان نظریهٔ جدید کوپرنیکی منظومهٔ شمسی شد. او از نخستین کسانی بود که موفق به ساخت تلسکوپ شد و اولین کسی بود که تلسکوپ را به طرف آسمان شب نشانه رفت و کوه‌هایی را روی ماه و قمرهایی را در اطراف مشتری کشف کرد. از آنجا که او یافته‌های خود را به جای زبان لاتین، که از دانشمند سرشناسی چون او انتظار می‌رفت، به زبان ایتالیایی منتشر می‌کرد، و به واسطهٔ نوآوری‌های جدید صنعت چاپ، اندیشه‌هایش خوانندگان بسیار یافت. دیری نگذشت که با کلیسا درگیر شد و به او هشدار دادند که تدریس نکند، و دیدگاه‌های کوپرنیکی را دنبال نکند. او تقریباً ۱۵ سال دیدگاه‌های خود را علنی نکرد، و سپس گستاخانه مشاهدات و نتیجه‌گیری‌های خود را، که برخلاف تعالیم کلیسا بودند، منتشر کرد. پیامد این کار محاکمه‌ای بود که در آن گناهکار شناخته و مجبور شد کشف‌های خود را انکار کند. در این زمان، او که پیرمردی با تن و روانی درهم شکسته بود محکوم شد برای همیشه در خانهٔ خود تحت نظر باشد. با وجود این، او مطالعات خود در مورد حرکت را تکمیل کرد، و نوشته‌هایش به صورت قاچاقی از ایتالیا خارج و در هلند منتشر شد. او قبلاً، با نگریستن مستقیم به خورشید با تلسکوپ به چشم‌های خود آن‌قدر صدمه زده بود، که به کورشدنش در ۷۴ سالگی انجامید. وی چهار سال پس از آن درگذشت.

گالیله و سطح‌های شیب‌دار

ارسطو ناظر زیرک طبیعت بود، بیشتر به مسئله‌های اطراف خود می‌پرداخت تا موارد مجردی که در محیط رخ نمی‌داد. در حرکت همواره محیط مقاومی چون هوا یا آب دخیل است. به اعتقاد او، خلأ ناممکن بود و در نتیجه توجه چندانی به حرکت در نبودِ محیط برهم‌کنش‌کننده نداشت. بدین دلیل است که ارسطو معتقد بود جسم به فشار یا کشش برای تداوم حرکت خود نیاز دارد، و گالیله وقتی منکر این اصل اساسی شد که گفت، اگر مانعی بر سر راه حرکت جسم متحرک وجود نداشته باشد، جسم همواره به حرکت خود در خط راست ادامه می‌دهد و هیچ فشار، کشش، یا نیروی دیگری لازم نیست.

گالیله این فرضیه را با حرکت اجسام متفاوت روی سطح‌های شیب‌دار با زاویه‌های متفاوت آزمایش کرد. او متوجه شد که گوی‌ها هنگام غلتیدن روبه پایین روی سطح‌های شیب‌دار سرعت می‌گیرند، در حالی‌که هنگام غلتیدن روبه بالا سرعتشان کم می‌شود. او، با توجه به این موضوع، استدلال کرد که سرعت گوی‌هایی که روی صفحهٔ افقی می‌غلتند نه افزایش می‌یابد و نه کاهش. گوی سرانجام نه به سبب «سرشت» خود بلکه به واسطهٔ اصطکاک متوقف می‌شود. گالیله این نظر را با مشاهدهٔ حرکت روی سطح‌های هموارتر تأیید کرد. وقتی اصطکاک کمتر بود، حرکت



دل‌مشغولی گالیله بیشتر چگونگیِ حرکت اجسام بود تا چراییِ حرکت آنها. او نشان داد بهترین آزمون دانش آزمایش است نه منطق.

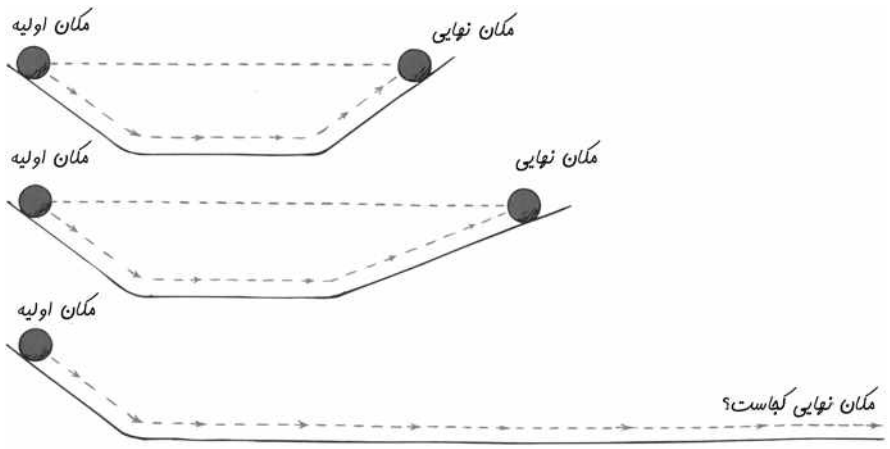
جرقه‌ها

اجسام مدتی طولانی‌تر تداوم داشت؛ با اصطکاک کمتر، حرکت به‌سرعت ثابت نزدیک می‌شد. او استدلال کرد که در نبود اصطکاک یا دیگر نیروهای مخالف حرکت، جسمی که به‌صورت افقی حرکت می‌کند به حرکت همیشگی خود ادامه خواهد داد.

این ادعا را آزمایش متفاوت و روش استدلال دیگری تأیید می‌کرد. گالیله دو سطح شیب‌دار خود را مقابل هم قرار داد. او مشاهده کرد گویی که از حال سکون از بالای سطح شیب‌دار رها شود به پایین می‌غلتد و از سطح شیب‌دار مقابل بالا می‌رود تا تقریباً به ارتفاع اولیهٔ خود برسد. او استدلال کرد که فقط اصطکاک مانع بالا رفتن آن تا ارتفاع اولیه می‌شود، زیرا گوی روی سطح‌های هموارتر بیشتر به ارتفاع اولیه نزدیک می‌شد. سپس شیب سطح روبه بالا را کم کرد. باز هم گوی تا همان ارتفاع بالا رفت، اما اکنون باید مسافت بیشتری را طی می‌کرد. کم کردن بیشتر زاویه نتایج مشابهی به‌دست داد. سپس، این پرسش را مطرح کرد: «اگر سطح افقی طویلی داشته باشیم، گوی چه مسافتی را باید طی کند تا به همان ارتفاع برسد؟» پاسخ بدیهی این بود: «برای همیشه ــ زیرا هرگز به ارتفاع اولیه نخواهد رسید.»[۴]

گالیله این را به‌صورت دیگری هم تحلیل کرد. چون حرکت روبه پایین گوی از سطح اول در تمام موارد یکسان است، سرعت آن هنگام آغاز بالا رفتن از سطح دوم یکی است. اگر گوی از سطحی با شیب زیاد بالا برود، سرعت خود را زود از دست می‌دهد. گوی روی سطح با شیب کمتر سرعت خود را کُندتر از دست می‌دهد و مدت طولانی‌تری می‌غلتد. هرچه شیب روبه بالا کمتر باشد، آهنگ کاهش سرعت کُندتر خواهد بود. در حالت حدی که شیبی وجود ندارد ــ یعنی، وقتی سطح افقی است ــ سرعت گوی نباید کاهش یابد. گوی در نبود نیروهای

شکل ۲-۲
حرکت گوی‌ها روی سطح‌های متفاوت.



شکل ۲-۳
گویی که از سطح شیب‌دار طرف چپ پایین می‌غلتد مستعد بالا رفتن تا همان ارتفاع روی سطح شیب‌دار طرف راست است. اگر زاویهٔ شیب سطح طرف راست کاهش یابد، گوی باید مسافت بیشتری را بپیماید.

۴. برگرفته از کتاب گفتگو دربارهٔ دو علم جدید گالیله.

کُندکننده حرکتی همیشگی و بدون کُندشدن دارد. این ویژگی مقاومت جسم در برابر تغییر حرکت را لختی می‌نامیم.

مفهوم لختی گالیله نظریهٔ حرکت ارسطو را بی‌اعتبار ساخت. ارسطو متوجه لختی نشد، زیرا نمی‌توانست حرکت بدون اصطکاک را مجسم کند. طبق تجربهٔ او، تمام انواع حرکت در معرض مقاومت قرار داشتند، و این واقعیت اساس نظریهٔ حرکت او را تشکیل می‌داد. ناتوانی ارسطو در تشخیص سرشت اصطکاک ــ یعنی، نیرویی مثل هر نیروی دیگر ــ مانع پیشرفت فیزیک به‌مدت ۲۰۰۰ سال، تا زمان گالیله، شد. یک کاربرد مفهوم لختی گالیله نشان می‌دهد هیچ نیرویی برای حرکت روبه جلو کرهٔ زمین وجود ندارد. راه برای ایزاک نیوتون باز شد تا نگرش جدیدی از عالم به وجود آورد.

خود را بیازمایید

آیا درست است بگوییم لختی دلیل استمرار حرکت اجسام هنگامی است که دیگر نیرویی به آنها وارد نمی‌شود؟

در سال ۱۶۴۲، چند ماه پس از درگذشت گالیله، ایزاک نیوتون متولد شد. نیوتون در ۲۳ سالگی، قانون‌های معروف حرکت خود را مطرح کرد، که سبب شکست کامل دیدگاه‌های ارسطویی شد که تقریباً دوهزارسال بر تفکر بهترین ذهن‌ها حکمفرما بود. در این فصل، اولین قانون نیوتون را بررسی می‌کنیم. این قانون بازتعریف مفهوم لختی است که گالیله قبلاً بیان کرده بود. (سه قانون حرکت نیوتون ابتدا در یکی از مهم‌ترین کتاب‌های همهٔ دوران‌ها، پرینکیپیا[5] (اصول) نیوتون، منتشر شد.)

قانون اول حرکت نیوتون

گالیله با بیان این مطلب که، در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک استمرار می‌یابد، این نظر ارسطو را که جسم متحرک باید با نیروی ثابت به پیش رانده شود کاملاً دگرگون ساخت. گالیله این مقاومت اجسام در برابر تغییر حرکت را لختی نامید. نیوتون نظر گالیله را بهبود بخشید و آن را به‌صورت قانون اول خود درآورد، که نام **قانون لختی** شایستهٔ آن است. جملهٔ زیر از پرینکیپیای نیوتون (که از زبان اصلی لاتین ترجمه شده) برگرفته شده است:

> **حالت سکون یا حرکت یکنواخت در خط راست هر جسم تداوم می‌یابد، مگر آنکه تحت تأثیر نیروهایی که بر آن وارد می‌شود مجبور به تغییر آن حالت شود.**

فیزیک‌سرا

قانون لختی نیوتون
ترفند قدیمی رومیزی
رول کاغذ توالت
لختی گوی
لختی استوانه
لختی سندان

5. *Principia*

شکل ۲-۴
مثال‌های لختی.

واژهٔ مهم در این قانون تداوم می‌یابد است: هر جسم کاری را که در حال انجام دادن است ادامه می‌دهد مگر آنکه نیرویی بر آن وارد شود. اگر در حال سکون باشد، به حالت سکون خود ادامه می‌دهد.

این موضوع وقتی به‌خوبی نشان داده می‌شود که یک رومیزی ماهرانه از زیر بشقاب‌های موجود روی میزی کشیده شود و بشقاب‌ها در حالت اولیهٔ خود بمانند. این ویژگی مقاومت اجسام در برابر تغییر حرکت را **لختی** می‌نامند.

اگر جسمی در حرکت باشد، بدون چرخش یا تغییر سرعت به حرکت خود ادامه می‌دهد. این موضوع در کاوشگرهای فضایی نمایان است که دائماً در فضای خارج جو حرکت می‌کنند. تغییرات حرکت باید برخلاف تمایل جسم به حفظ وضعیت حرکت خود به آن تحمیل شود. در نبود نیروهای خالص، معمولاً جسم به‌طور نامحدود در خط راست حرکت می‌کند.

پاسخ خود را وارسی کنید

به‌معنی دقیق، نه. ما دلیل استمرار حرکت اجسام را وقتی نیرویی به آنها وارد نمی‌شود نمی‌دانیم. این ویژگی اجسام مادی را که رفتاری این‌چنین پیش‌بینی‌پذیر دارند لختی می‌نامیم. می‌توانیم چیزهای بسیاری را بفهمیم و برای آنها برچسب و نام داریم. چیزهای بسیاری هم وجود دارند که آنها را نمی‌فهمیم، و برای آنها هم برچسب و نام داریم. آموزش از نام‌ها و برچسب‌ها تشکیل نشده است، بلکه یادگیری آن است که چه پدیده‌هایی را درک می‌کنیم و کدام را درک نمی‌کنیم.

ایزاک نیوتون (۱۷۲۷-۱۶۴۲)

ایزاک نیوتون در روز کریسمس سال ۱۶۴۲ پیش از موعد متولد شد، و به زحمت جان سالم به در بُرد. او در همان سالی متولد شد که گالیله درگذشت. زادگاه او خانه‌ای واقع در مزرعهٔ مادرش در وولستورپ (Woolsthorpe)، واقع در لینکُن‌شر (Linconshire)، انگلستان بود. پدرش چند ماه پیش از تولد او درگذشته بود، و او تحت سرپرستی مادر و مادربزرگ خود بزرگ شد. در کودکی، هیچ نشانهٔ خاصی از تیزهوشی در او نبود، و در چهارده‌ونیم سالگی او را از مدرسه درآوردند تا در مزرعهٔ مادرش کار کند. در مزرعه کاملاً ناموفق بود، زیرا ترجیح می‌داد کتاب‌هایی را بخواند که از داروفروش همسایه قرض می‌کرد. یکی از عموهایش، که توان بالقوهٔ علمی را در او تشخیص داد، به او کمک کرد تا در دانشگاه کمبریج تحصیل کند. او ۵ سال در آنجا بود، و بدون هیچ امتیاز خاصی فارغ‌التحصیل شد.

طاعون سراسر انگلستان را فراگرفت، و نیوتون ــ این بار برای ادامهٔ مطالعات خود ــ به مزرعهٔ مادرش بازگشت. او در مزرعه و در ۲۳ و ۲۴ سالگی، پایه‌های کاری را گذاشت که او را جاودان ساخت. مشاهدهٔ سیبی که از درخت به زمین افتاد موجب شد فرض کند نیروی گرانی تا ماه و فراتر از آن نیز گسترش یافته است، و قانون گرانش عمومی را تدوین و از آن برای اسرار حرکت سیاره‌ها و کشندهای اقیانوس که قرن‌ها قدمت داشتند استفاده کرد؛ او حسابان را ابداع کرد، که ابزار ریاضی بسیار مهمی در علم است؛ کارهای گالیله را توسعه داد و سه قانون بنیادی حرکت را تدوین کرد؛ و نظریه‌ای در مورد سرشت نور تنظیم کرد، و به کمک منشورها، نشان داد که نور سفید از رنگ‌های رنگین‌کمان تشکیل شده است. این آزمایش‌های با منشور بود که در ابتدا او را مشهور ساخت.

نیوتون با فروکش کردن طاعون به کمبریج بازگشت و طولی نکشید که اعتبار خود را به عنوان ریاضی‌دان تراز اول تثبیت کرد. استاد ریاضی‌اش به نفع او استعفا کرد، و نیوتون استاد کرسی ریاضیات لوکاس (Lucasian Professor) شد. او این مقام را ۲۸ سال حفظ کرد. در سال ۱۶۷۲ به عضویت انجمن سلطنتی انتخاب شد، و در آنجا اولین تلسکوپ بازتابی جهان را به نمایش گذاشت. هنوز می‌توان آن را که در کتابخانهٔ انجمن سلطنتی لندن نگه‌داری می‌شود با این نوشته مشاهده کرد: «اولین تلسکوپ بازتابی، اختراع سِر ایزاک نیوتون، که با دست‌های خود او ساخته شده است.»

اما، در ۴۲ سالگی بود که نیوتون شروع به نوشتن بزرگ‌ترین کتاب علمی‌ای که تاکنون نوشته شده است یعنی اصول ریاضی فلسفهٔ طبیعی (*Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*) نمود. این کتاب را به زبان لاتین نوشت و آن را طی ۱۸ ماه تکمیل کرد. کتاب در سال ۱۶۸۷ چاپ شد، اما نسخهٔ انگلیسی آن تا سال ۱۷۲۹، دو سال پس از درگذشت او، به چاپ نرسید. وقتی از نیوتون پرسیدند چگونه توانسته است به این کشف‌های فراوان نایل شود، پاسخ داد که او راه‌حل مسئله‌های خود را با جرقه‌های ناگهانی به دست نیاورده است، بلکه با تفکر مداوم و طولانی و سخت موفق به کشف آنها شده است.

وقتی نیوتون در ۴۶ سالگی به عضویت مجلس انتخاب شد، فعالیت او تا اندازه‌ای از علم منحرف شد. وی ۲ سال در نشست‌های مجلس شرکت می‌کرد ولی هرگز نطقی ایراد نکرد. یک روز از جای خود برخاست و مجلس ساکت شد تا سخنان این مرد بزرگ را بشنود. «نطق» نیوتون بسیار مختصر بود؛ او فقط خواست که پنجره را به علت کوران ببندند.

انحراف دیگر نیوتون از کارهای علمی هنگامی رخ داد که به سمت سرپرست، و سپس ریاست ضرابخانه منصوب شد. نیوتون از سمت استادی خود استعفا داد و، با وجود نگرانی جاعلان که کارشان در آن زمان رونق داشت، تلاش‌های خود را صرف بهبود کارهای ضرابخانه کرد. او همچنان عضو انجمن سلطنتی بود و به ریاست آن برگزیده شد، بعد از آن، تا زنده بود هر سال به این سمت انتخاب می‌شد. در ۶۲ سالگی کتاب اپتیک (*Opticks*) را نوشت، که حاصل کار او در مورد نور بود. نه سال بعد ویراست دوم پرینکیپیا را منتشر کرد.

گرچه موی نیوتون در ۳۰ سالگی خاکستری شد، اما در تمام عمر او پرپشت، بلند، و مجعد باقی ماند، و برخلاف معاصرانش، از کلاه‌گیس استفاده نمی‌کرد. او مردی متواضع، و به انتقاد بسیار حساس بود، و هرگز ازدواج نکرد. وی تا کهنسالی از سلامت جسم و روح برخوردار بود. در ۸۰ سالگی، هنوز تمام دندان‌های خود را داشت، بینایی و شنوایی او هنوز کاملاً تیز، و ذهنش کاملاً هُشیار بود. هموطنانش وی را در زمان حیاتش بزرگ‌ترین دانشمند همهٔ دوران می‌دانستند. در سال ۱۷۰۵، ملکه آن (Queen Anne) به او عنوان سِر اعطا کرد. نیوتون در ۸۵ سالگی درگذشت و در کنار شاهان و قهرمانان انگلستان در صومعه وست‌مینیستر (Westminister) به خاک سپرده شد.

نیوتون نشان داد که عالم طبق قانون‌های طبیعی کار می‌کند و بی‌نظم و ناپایدار نیست ــ شناختی که سبب امیدواری و الهام دانشمندان، نویسندگان، هنرمندان، فیلسوفان و مردمی از هر طبقه و سرآغاز عصر خرد شد. افکار و بصیرت‌های ایزاک نیوتون جهان را کاملاً تغییر داد و وضعیت زندگی بشر را بهبود بخشید.

خود را بیازمایید

یک دیسک هاکی که در حال سُرخوردن روی یخ است سرانجام متوقف می‌شود. ارسطو این رفتار را چگونه تفسیر می‌کرد؟ گالیله و نیوتون آن را چگونه توجیه می‌کردند؟ شما آن را چگونه تفسیر می‌کنید؟ (پیش از خواندن پاسخ زیر فکر کنید!)

نیروی خالص

تغییر در حرکت ناشی از یک نیرو یا ترکیبی از آنهاست (در فصل بعد تغییر حرکت را شتاب خواهیم خواند). **نیرو**، به ساده‌ترین شکل، به صورت فشار یا کشش است. منبع آن می‌تواند گرانشی، الکتریکی، مغناطیسی، یا صرفاً تلاش عضلانی باشد. وقتی بیش از یک نیرو بر جسمی وارد شود، **نیروی خالص** را درنظر می‌گیریم. مثلاً، اگر شما و دوستتان جسمی را با نیروهای مساوی در یک جهت بکشید، نیروها با هم ترکیب می‌شوند و نیروی خالصی دوبرابر نیروی شما تولید می‌کنند. اگر هر یک از شما با نیروهای مساوی جسمی را در جهت‌های مخالف بکشید، نیروی خالص صفر می‌شود. نیروهای مساوی و در جهت‌های مخالف اثر هم را خنثی می‌سازند. یکی از نیروها را می‌توان منفی نیروی دیگر در نظر گرفت، و جمع جبری آن دو صفر می‌شود، که نیروی خالص حاصل را صفر می‌سازد.

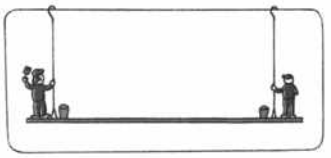
شکل ۲-۵ نشان می‌دهد که نیروها چگونه با هم ترکیب می‌شوند و نیروی خالصی را تولید می‌کنند. جفت نیروی ۵ پوندی در یک جهت نیروی خالص ۱۰ پوندی را به‌وجود می‌آورند. اگر ۱۰ پوند نیرو به‌طرف راست و ۵ پوند به‌طرف چپ وارد شود، نیروی خالص ۵ پوند به‌طرف راست وارد می‌شود. نیروها با پیکان نشان داده شده‌اند. کمیتی چون نیرو را که هم اندازه دارد و هم جهت کمیت برداری می‌نامند. کمیت‌های برداری را می‌توان با پیکان‌هایی نشان داد که طول و جهت آنها اندازه و جهت آن کمیت را نشان می‌دهد (در فصل ۴ بیشتر دربارهٔ بردارها خواهیم گفت).

پاسخ خود را وارسی کنید

ارسطو احتمالاً می‌گوید که دیسک از این‌رو متوقف می‌شود که در جستجوی حالت مناسب و طبیعی خود، یا همان حالت سکون، است. گالیله و نیوتون احتمالاً می‌گویند که، وقتی دیسک شروع به حرکت کرد حرکتش تداوم می‌یابد. آنچه مانع از استمرار حرکت آن می‌شود سرشت یا حالت سکون مناسب آن نیست، بلکه اصطکاکی است که دیسک با آن روبه‌رو می‌شود. این اصطکاک در مقایسه با اصطکاک بین دیسک و کف چوبی کوچک است، بدین دلیل دیسک روی یخ مسافت بیشتری را طی می‌کند. آخرین پرسش را فقط خودتان می‌توانید پاسخ دهید.

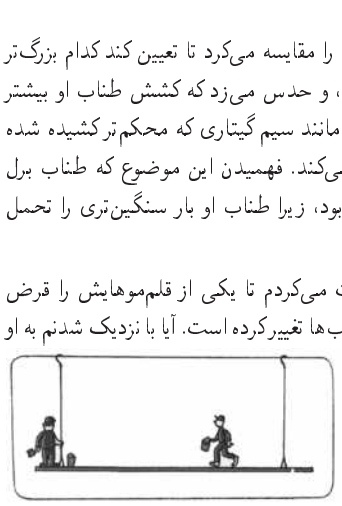
مقالهٔ شخصی

وقتی در دبیرستان بودم، مشاورم توصیه کرد که در کلاس‌های علوم و ریاضی ثبت‌نام نکنم و در عوض تلاش خود را صرف پرورش استعداد هنری خود سازم. این توصیه را پذیرفتم. من به کشیدن داستان‌های مصور فکاهی و مشت‌زنی علاقه‌مند بودم، که در هیچ‌کدام موفقیت چندانی به دست نیاوردم. پس از خدمت در ارتش، سعی کردم بخت خود را در نقاشی دیواری امتحان کنم، و زمستان‌های سخت بوستون مرا به جنوب و به میامی گرم در فلوریدا راند. در آنجا، در ۲۶ سالگی، به نقاشی تابلوهای آگهی شهری پرداختم و مرشد فکری خود، برل گری، را ملاقات کردم. برل گری، مثل من، هیچ‌وقت در دبیرستان فیزیک نخوانده بود. اما به‌طور کلی به علوم علاقهٔ زیادی داشت، و با پرسش‌های بسیاری که هنگام نقاشی مطرح می‌کرد علاقه‌اش را با من قسمت می‌کرد.



به‌خاطر دارم برل از من دربارهٔ کشش طناب‌های نگهدارندهٔ چوب‌بستی که روی آن می‌ایستادیم سؤال می‌کرد. چوب‌بست صرفاً تخته‌چوب افقی سنگین آویزان از دو طناب بود. برل طناب نزدیک خود را می‌کشید و از من می‌خواست که همین کار را با طناب نزدیک خودم انجام دهم. او کشش دو طناب را مقایسه می‌کرد تا تعیین کند کدام بزرگ‌تر است. برل از من سنگین‌تر بود، و حدس می‌زد که کشش طناب او بیشتر است. طناب با کشش بیشتر، مانند سیم گیتاری که محکم‌تر کشیده شده باشد، صدای بیشتری تولید می‌کند. فهمیدن این موضوع که طناب برل صدای بیشتری دارد منطقی بود، زیرا طناب او بار سنگین‌تری را تحمل می‌کرد.

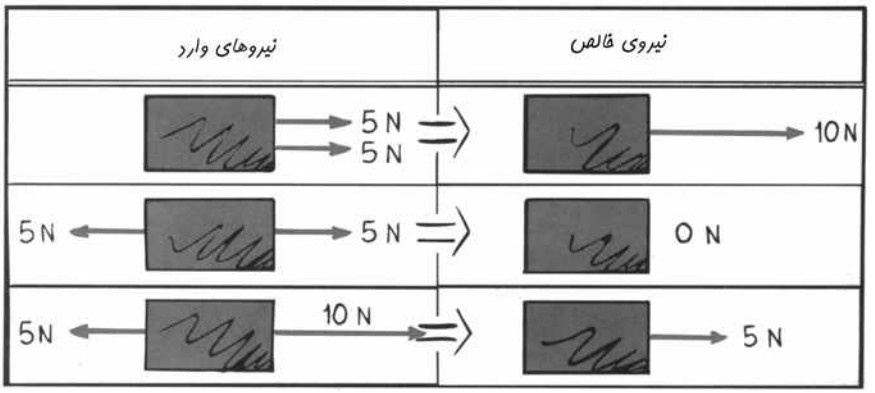
وقتی به‌سوی برل حرکت می‌کردم تا یکی از قلم‌موهایش را قرض کنم، از من پرسید که کشش طناب‌ها تغییر کرده است. آیا با نزدیک شدنم به او کشش طنابش زیاد شده بود؟ به این نتیجه رسیدیم که باید چنین باشد، زیرا در این هنگام طناب برل بار سنگین‌تری را تحمل می‌کرد. اما طناب من چطور؟ آیا کشش آن کاهش می‌یافت؟ به این نتیجه رسیدیم که بله، زیرا مقدار کمتری از کل بار را تحمل می‌کرد. در آن زمان نمی‌دانستم که دربارهٔ فیزیک بحث می‌کنم.



برل و من برای تأیید استدلال خود (مثل فیزیک‌دانان) اغراق می‌کردیم. اگر هر دو در یک انتهای چوب‌بست می‌ایستادیم و به طرف بیرون خم می‌شدیم، به‌راحتی می‌شد مجسم کرد که انتهای دیگر تخته

فیزیک‌سرا

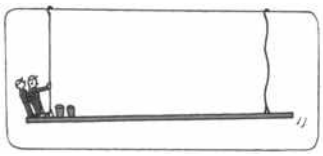
تعریف یک نیوتون



شکل ۲-۵
نیروی خالص.

قاعدهٔ تعادل

اگر نخی را دور بستهٔ شکری ۲ پوندی ببندید و آن را به ترازویی بی‌وزن آویزان کنید (شکل ۲-۶) ترازو پایین می‌آید تا ۲ پوند را نشان دهد. فنر کشیده‌شده تحت تأثیر «نیروی کششی» موسوم به

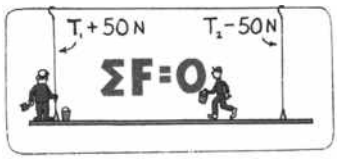


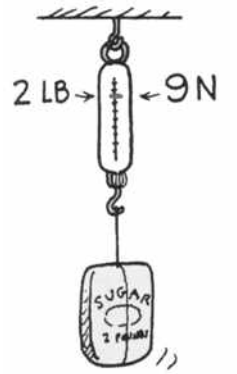
مثل سر الاکلنگ بالا می‌رود ــ و طناب مقابل شُل می‌شود. در این صورت کشش در طناب وجود نخواهد داشت. سپس استدلال می‌کردیم که کشش طناب من با حرکت به سوی برل به تدریج کم می‌شود. طرح این‌گونه پرسش‌ها و تلاش برای پاسخ دادن به آنها سرگرم‌کننده بود.

پرسشی که نمی‌توانستیم به آن پاسخ دهیم این بود که آیا کم شدن کشش طناب من هنگام دور شدنم از آن دقیقاً با افزایش کشش طناب برل جبران می‌شود. مثلاً، با کاهش ۵۰ نیوتون از کشش طناب من، آیا کشش طناب برل ۵۰ نیوتون افزایش می‌یافت؟ (در آن موقع از پوند استفاده می‌کردیم، اما در اینجا از یکای علمی نیرو، نیوتون، استفاده می‌کنیم ــ به‌اختصار N.) آیا افزایش حاصل درست ۵۰ N بود؟ و اگر چنین بود، آیا این تصادفی مهم بود؟ پاسخ را تا یک سال بعد که انگیزش برل سبب شد نقاشی تمام وقت را ترک کنم و برای یادگیری بیشتر علوم به کالج بروم نمی‌دانستم. [برای همیشه به برل برای انگیزشی که در من به‌وجود آورد مدیونم. زیرا وقتی تحصیلات رسمی خود را ادامه دادم، این کار توأم با اشتیاق بود. ۴۰ سال از برل خبری نداشتم تا آنکه جیسن وچتر، یکی از دانشجویانم در کاوش‌سرای سان‌فرانسیسکو که کارآگاه خصوصی بود، در سال ۱۹۹۸ او را یافت و دوباره با هم تماس گرفتیم و دوستی ما از سرگرفته شد، و بار دیگر گفتگوهای پرشور خود را از سر گرفتیم.]

در کالج، یاد گرفتم که هر جسم ساکن، مانند چوب‌بست نقاشی دیواری که روی آن بودیم، را در حال تعادل می‌نامند. یعنی، برایند تمام نیروهای وارد بر آن صفر می‌شود. بنابراین مجموع نیروهای رو به بالایی که طناب‌های حمال تأمین می‌کنند برابر وزن ما به‌اضافهٔ وزن تخته‌چوب است. کاهش ۵۰ N در یکی با افزایش ۵۰ N در دیگری همراه خواهد بود.

من این داستان واقعی را گفتم تا به این نکته اشاره کنم که وقتی قاعده‌ای برای هدایت تفکرمان وجود داشته باشد، طرز فکرمان بسیار متفاوت می‌شود. اکنون هرگاه به جسم بی‌حرکتی نگاه می‌کنم، می‌دانم که نیروهای وارد بر آن اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. وقتی قاعده‌های طبیعت را بدانیم، به صورت دیگری به آن نگاه می‌کنیم. بدون قاعده‌های فیزیک، خرافاتی می‌شویم و نیروهای جادویی را در جایی می‌بینیم که اصلاً وجود ندارد. شگفت آنکه قاعده‌هایی اندک هر چیز را به‌صورتی جالب و کاملاً ساده به دیگر چیزها مربوط می‌سازد. فیزیک به مطالعهٔ قاعده‌های طبیعت می‌پردازد.





شکل ۲-۶
کشش روبه بالای نخ به اندازهٔ وزن بسته است، به طوری که نیروی خالص وارد بر بسته صفر است.

کشش قرار دارد. همین ترازو در آزمایشگاه علوم احتمالاً طوری مدرج شده است که همین نیرو را ۹ N نشان دهد. هم پوند و هم نیوتون یکای وزن‌اند که بدین‌ترتیب یکای نیرو نیز هستند. بستهٔ شکر با نیروی گرانشی ۲ پوند ــ یا هم‌ارز آن، ۹ نیوتون ــ جذب زمین می‌شود. اگر دو برابر این مقدار شکر را از ترازو بیاویزید، قرائت آن ۱۸ نیوتون می‌شود.

توجه کنید که دو نیرو بر بستهٔ شکر وارد می‌شود ــ نیروی کشش بالاسو و نیروی وزن پایین‌سو. دو نیروی وارد بر بسته مساوی و در جهت مخالف‌اند و اثر یکدیگر را خنثی می‌سازند. در نتیجه بسته ساکن باقی می‌ماند. طبق قانون اول نیوتون، هیچ نیروی خالصی بر بسته وارد نمی‌شود. می‌توان از زاویهٔ دیگری قانون اول نیوتون را دید که تعادل مکانیکی است.

وقتی نیروی خالص وارد بر جسمی صفر است، می‌گوییم آن جسم در **تعادل مکانیکی** است.[۶] با نمادگذاری ریاضی، قاعدهٔ تعادل عبارت است از

$$\sum \boldsymbol{F} = 0$$

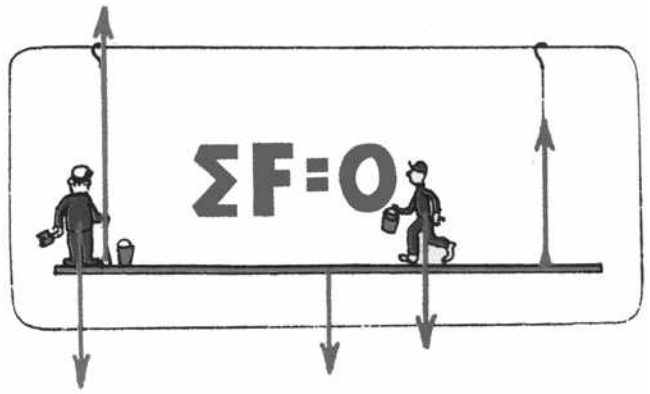
۶. در فصل ۸ خواهیم دید، که شرط دیگر تعادل مکانیکی آن است که گشتاور خالص برابر صفر باشد.

نماد $\sum$ نشانهٔ «جمع برداری» است و F «نیروها» را نشان می‌دهد.

برای جسم آویزان در حال سکون، مثل بستهٔ شکر، این قاعده بیان می‌کند که نیروهای بالاسوی وارد بر جسم باید با نیروهای پایین‌سویی که بر جسم وارد می‌شوند متوازن شده باشد تا جمع برداری صفر شود. (در کمیت‌های برداری جهت در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اگر نیروهای بالاسو + باشند، نیروهای پایین‌سو − می‌شوند، و هنگام جمع زدن درواقع از هم کم می‌شوند.)

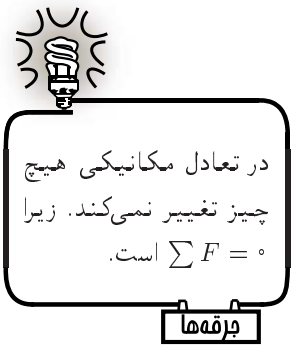
در شکل ۲-۷، نیروهای دخیل در چوب‌بست نقاشی‌های دیواری برل و هیوئیت را می‌بینیم. مجموع کشش‌های بالاسو برابر مجموع وزن آنها و وزن چوب‌بست است.

توجه کنید که چگونه اندازه‌های دو بردار بالاسو با اندازهٔ سه بردار پایین‌سو برابر می‌شود. نیروی خالص وارد بر چوب‌بست صفر است، در نتیجه می‌گوییم چوب‌بست در تعادل مکانیکی است.



شکل ۲-۷

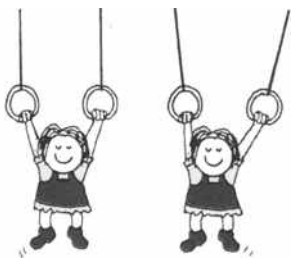
مجموع بردارهای بالاسو برابر مجموع بردارهای پایین‌سوست. $\sum F = 0$ و چوب‌بست در تعادل است.



در تعادل مکانیکی هیچ چیز تغییر نمی‌کند. زیرا $\sum F = 0$ است.

جرقه‌ها

خود را بیازمایید



ژیمناستی را در نظر بگیرید که از دارحلقه آویزان است.

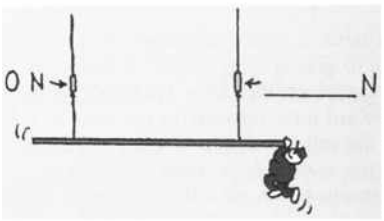
۱. اگر طوری آویزان شود که وزنش به‌طور مساوی بین دو حلقه تقسیم شود، قرائت ترازوهای واقع در طناب‌های حامل چه رابطه‌ای با وزن او دارند؟

۲. فرض کنید او طوری آویزان شود که دارحلقهٔ طرف چپ مقداری اندکی بیشتر از وزنش را تحمل کند. قرائت ترازوی طرف راست چگونه می‌شود؟

تمرین فیزیک

۱. وقتی برل به‌تنهایی در وسط چوب‌بست ایستاده است، ترازوی سمت چپ ۵۰۰ N را نشان می‌دهد. جای قرائت ترازوی طرف راست را پرکنید. وزن کل برل و چوب‌بست باید _____ N باشد.

۲. برل از سمت چپ فاصله می‌گیرد. قرائت ترازوی طرف راست را پر کنید.



۳. برل به صورت احمقانه‌ای از انتهای راست چوب‌بست آویزان می‌شود. قرائت ترازوی طرف راست را پر کنید.

نیروی تکیه‌گاه

کتابی را در نظر بگیرید که روی میزی قرار دارد. این کتاب در حالت تعادل است. چه نیروهایی بر این کتاب وارد می‌شوند؟ یک نیروی ناشی از گرانی ــ وزن کتاب ــ است. چون کتاب در حال تعادل است، باید نیروی دیگری نیز برکتاب وارد شود تا نیروی خالص صفر را تولید

پاسخ خود را وارسی کنید

(آیا پیش از آنکه پاسخ‌های معقولی را در ذهن خود تدوین کنید، این را می‌خوانید؟ اگر چنین است، آیا با نگاه کردن به نرمش دیگران ورزش می‌کنید؟ فکر کردن را تمرین کنید: وقتی با پرسش‌های «خود را بیازمایید» بسیاری در این کتاب روبه‌رو می‌شوید، پیش از وارسی پاسخ آنها فکر کنید!)

۱. قرائت هر ترازو نصف وزن او خواهد بود. مجموع قرائت دو ترازو برابر وزن او خواهد بود.

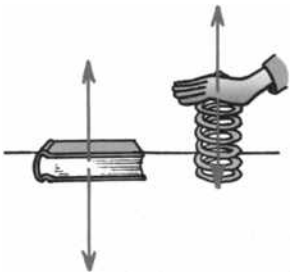
۲. وقتی دارحلقهٔ سمت چپ بخش بیشتری از وزنش را تحمل کند، قرائت ترازوی طرف راست به کمتر از نصف وزنش کاهش می‌یابد. بدون توجه به آنکه چگونه آویزان شود، مجموع قرائت دو ترازو برابر وزن او می‌شود. مثلاً، اگر یک ترازو دوسوم وزن او را نشان دهد، ترازوی دیگر یک‌سوم وزن او را نشان خواهد داد. متوجه شدید؟

پاسخ تمرین فیزیک

آیا پاسخ‌های شما نشان‌دهندهٔ قاعدهٔ تعادل است؟ در پرسش ۱، طناب طرف راست باید تحت کشش ۵۰۰ N باشد، زیرا برل در وسط قرار دارد و هر دو طناب به یک اندازه وزن او را تحمل می‌کنند. چون مجموع کشش‌های رو به بالا ۱۰۰۰ N است، پس مجموع وزن برل و داربست باید ۱۰۰۰ N باشد. نیروهای کشش بالاسو را ۱۰۰۰ N+ می‌نامیم. در این صورت، وزن‌های پایین‌سو ۱۰۰۰ N− خواهند بود. وقتی ۱۰۰۰ N+ و ۱۰۰۰ N− را با هم جمع کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟ پاسخ این است که مجموع آنها برابر صفر می‌شود. پس، می‌بینیم که $\sum F = 0$ است.

برای پرسش ۲، آیا پاسخ صحیح ۸۳۰ N را به‌دست آورده‌اید؟ استدلال: از پرسش ۱ می‌دانیم که مجموع کشش‌های طناب برابر ۱۰۰۰ N است، و چون طناب طرف چپ دارای کشش ۱۷۰ N است، پس طناب دیگر باید تفاوت ۱۰۰۰ N − ۱۷۰ N = ۸۳۰ N را تحمل کند. متوجه شدید؟ اگر متوجه شدید، خوب است. اگر نه، دربارهٔ آن با دوستان خود بحث کنید تا آن را بفهمید. سپس بیشتر بخوانید.

پاسخ پرسش ۳، ۱۰۰۰ N است. آیا درک می‌کنید که این $\sum F = 0$ را نشان می‌دهد؟



شکل ۲-۸

(چپ) میز نیروی بالاسویی برابر نیروی پایین‌سوی گرانی بر کتاب وارد می‌کند.

(راست) فنر نیروی بالاسویی به دست شما وارد می‌کند که برابر نیروی پایین‌سویی است که دست شما بر فنر وارد می‌کند.

کند ــ یعنی نیرویی بالاسو و در جهت مخالف گرانی. این نیروی بالاسو را میز وارد می‌کند که آن را نیروی تکیه‌گاه می‌نامیم. این نیروی تکیه‌گاه بالاسو، که اغلب نیروی قائم خوانده می‌شود، باید برابر وزن کتاب باشد.[۷] اگر نیروی بالاسو را مثبت بنامیم، نیروی وزن پایین‌سو منفی است و مجموع این دو نیرو صفر می‌شود. نیروی خالص وارد بر کتاب صفر است. راه دیگر گفتن این مطلب $\sum F = 0$ است.

برای درک بهتر این مطلب که میز کتاب را به بالا می‌راند، آن را با مورد متراکم کردن فنر مقایسه کنید (شکل ۲-۸). اگر فنر را پایین برانید، می‌توانید حس کنید که فنر دست شما را بالا می‌راند. به همین ترتیب، کتابی که روی میز قرار دارد اتم‌های میز را، که رفتاری چون فنرهای میکروسکوپی دارند، متراکم می‌کند، وزن کتاب اتم‌ها را به طرف پایین فشار می‌دهد، و آنها کتاب را به بالا می‌فشارند. بدین ترتیب، اتم‌های متراکم‌شده نیروی تکیه‌گاه را تولید می‌کنند.

وقتی روی ترازوی حمام گام می‌نهید، دو نیرو بر ترازو وارد می‌شود. یکی فشار پایین‌سوی شما بر ترازوست ــ که از کشش گرانی بر شما حاصل می‌شود ــ و دیگری نیروی بالاسوی تکیه‌گاه کف حمام. این نیروها ساز و کاری (در واقع، یک فنر) را در ترازو فشار می‌دهند که برای نشان دادن اندازهٔ نیروی تکیه‌گاه مدرج شده است (شکل ۲-۹). این نیروی تکیه‌گاه است که وزن شما

۷. این نیرو با زاویهٔ قائمه به سطح وارد می‌شود. وقتی می‌گوییم «عمود بر» منظورمان «با زاویه‌های قائمه» است، بدین سبب این نیرو را نیروی قائم می‌نامند.