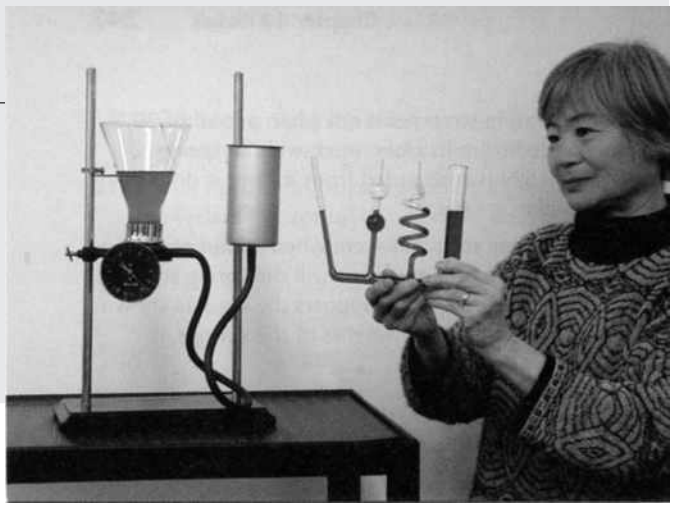
فصل ۱۳

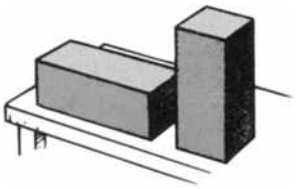
مایع‌ها



چینگ باردین (*Tsing Bardin*) بستگی فشار آب به عمق را نشان می‌دهد.

مولکول‌های تشکیل‌دهندهٔ هر مایع، مانند مولکول‌های هر جسم جامد، مقید به مکان ثابت نیستند، بلکه می‌توانند روی هم بلغزند. در حالی‌که جامد شکل خود را حفظ می‌کند، مایع شکل ظرف را به خود می‌گیرد. مولکول‌های یک جسم مایع به هم نزدیک‌اند و به شدت در برابر نیروهای تراکمی مقاومت می‌کنند. متراکم کردن مایع‌ها، مانند جامدها، دشوار است. گازها، به طوری که در فصل بعد خواهیم دید، به راحتی متراکم می‌شوند. هم مایع‌ها و هم گازها می‌توانند جریان پیدا کنند، بنابراین آنها را شاره می‌نامند.

فشار



شکل ۱۳-۱
اگرچه وزن هر دو قطعه یکسان است، قطعهٔ قائم فشار بیشتری به میز وارد می‌سازد.

مایع موجود در یک ظرف نیروهایی به دیواره‌های آن وارد می‌کند. برای بحث دربارهٔ برهم‌کنش مایع و دیواره‌ها بهتر است مفهوم **فشار** را مطرح کنیم. فشار، نیرو تقسیم بر سطحی است که نیرو به آن وارد می‌شود.[۱]

$$\text{فشار} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح}}$$

برای تشخیص تفاوت فشار و نیرو، دو قطعهٔ شکل ۱۳-۱ را در نظر بگیرید. قطعه‌ها یکسان‌اند، ولی یکی از آنها روی انتها و دیگری روی پهلویش قرار گرفته است. وزن هر دو قطعه یکی است و در نتیجه نیروی یکسانی به سطح وارد می‌کنند (اگر آنها را روی ترازوی خانگی بگذارید، هر دو یک عدد را نشان می‌دهند)، ولی قطعهٔ قائم فشار بیشتری به سطح وارد می‌کند. اگر قطعه را کج کنید به طوری که فقط روی یک گوشه قرار گیرد، فشار باز هم بیشتر می‌شود.

۱. فشار را می‌توان برحسب یکای نیرو تقسیم بر هر یکای سطح اندازه گرفت. یکای استاندارد بین‌المللی (SI) فشار، نیوتون بر مترمربع، به افتخار عالم الهیات و دانشمند قرن هفدهم، بلز پاسکال (Blaise Pascal)، پاسکال (Pa) نامیده می‌شود. فشار ۱ Pa بسیار کوچک و تقریباً برابر فشاری است که اسکناس صدتومانی بر میز وارد می‌سازد. دانشمندان معمولاً از کیلو پاسکال (۱ kPa = ۱۰۰۰ Pa) استفاده می‌کنند.

فشار در مایع

شکل ۱۳-۲
کار این برج چیزی بیش از ذخیرهٔ آب است. عمق آب بالای سطح زمین فشار آب زیاد و مطمئنی را در اختیار خانه‌های بسیاری می‌گذارد.

وقتی زیر آب شنا می‌کنید، می‌توانید فشار وارد بر پردهٔ گوشهایتان را حس کنید. هرچه در عمق بیشتر شنا کنید، فشار بیشتر خواهد بود. فشاری که حس می‌کنید ناشی از وزن آبی است که بالاتر از شما قرار دارد. هر چه در عمق بیشتری شنا کنید، فشار بیشتر می‌شود. فشاری که یک مایع وارد می‌کند به عمق آن بستگی دارد.

فشار مایع به چگالی آن هم بستگی دارد. اگر در مایعی چگال‌تر از آب فرورویم، فشار متناظر بیشتر خواهد بود. فشار ناشی از یک مایع درست حاصل‌ضرب چگالی وزنی در ارتفاع است:[۲]

$$\text{فشار مایع} = \text{چگالی وزنی} \times \text{عمق}$$

شکل ۱۳-۳
بستگی فشار مایع به عمق، به سبب قلب بزرگ و دستگاه پیچیدهٔ دریچه‌ها و رگ‌های خونی کشسان و جاذب در مغز زرافه، مشکلی برایش به وجود نمی‌آورد. بدون این ساختارها، زرافه هنگام بلند کردن ناگهانی سرش غش می‌کرد، و هنگام پایین آوردن آن دچار خونریزی مغزی می‌شد.

۲. این از تعریف‌های فشار و چگالی وزنی به دست آمده است. سطحی را در ته ظرف مایعی در نظر بگیرید. وزن ستون مایع مستقیماً بالای این سطح فشار تولید می‌کند. طبق تعریف داریم:

$$\text{چگالی وزنی} = \frac{\text{وزن}}{\text{حجم}}$$

می‌توان وزن مایع را به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{وزن} = \text{چگالی وزنی} \times \text{حجم}$$

که حجم ستون صرفاً سطح ضرب در عمق است. سپس به‌دست می‌آوریم:

$$\text{فشار} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح}} = \frac{\text{وزن}}{\text{سطح}} = \frac{\text{چگالی وزن} \times \text{حجم}}{\text{سطح}}$$

$$= \frac{\text{چگالی وزنی} \times (\text{عمق} \times \cancel{\text{سطح}})}{\cancel{\text{سطح}}} = \text{چگالی وزنی} \times \text{عمق}$$

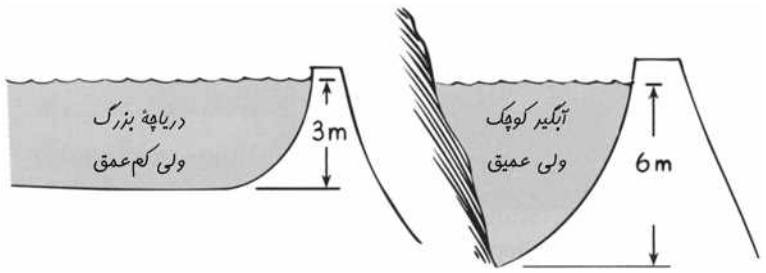
برای فشار کل، فشار جو بالای سطح مایع را به آن اضافه می‌کنیم.

به‌بیان ساده، فشاری که مایع به دیواره‌ها و کف ظرف وارد می‌کند به چگالی و عمق مایع بستگی دارد. اگر فشار جو را نادیده بگیریم، در عمق دوبرابر، فشار مایع به ته ظرف دوبرابر می‌شود؛ و در عمق سه‌برابر، فشار به ته ظرف سه‌برابر می‌شود. یا، اگر مایع دو یا سه بار چگال‌تر باشد، فشار نظیر آن در عمق معین دو یا سه‌برابر می‌شود. مایع‌ها عملاً تراکم‌ناپذیرند ــ یعنی حجم‌شان در اثر فشار تقریباً تغییر نمی‌کند (حجم آب برای هر اتمسفر افزایش فشار فقط به اندازهٔ ۵۰ میلیونیم مقدار اولیه تغییر می‌کند). پس، به‌استثنای تغییر مختصر ناشی از فشار، چگالی یک مایع معین در تمام عمق‌ها یکسان است.[۳]

اگر دستتان را روی سطحی بفشارید، و یک نفر دیگر نیز دست شما را در همان جهت بفشارد، فشار وارد بر سطح بیشتر از حالتی است که فقط شما سطح را می‌فشارید. فشار جو بر سطح مایع نیز چنین است. پس، فشار کل مایع برابر عمق × چگالی وزنی به اضافهٔ فشار جو است. وقتی این وجه تمایز مهم باشد، از اصطلاح فشار کل استفاده می‌کنیم. در غیر این صورت، بحث ما دربارهٔ فشار مایع فقط به فشار بدون توجه به فشار همیشگی جو مربوط می‌شود. (در فصل بعد چیزهای بیشتری دربارهٔ فشار جو یاد می‌گیرید.)

مهم است توجه کنیم که فشار به مقدار مایع موجود بستگی ندارد. در اینجا حجم اهمیت ندارد ــ عمق مهم است. فشار متوسط آب بر یک سد به عمق میانگین آب بستگی دارد نه حجم آب پشت سد. مثلاً، دریاچهٔ کم‌عمق شکل ۱۳-۴ فقط نصف فشار متوسط آبگیر عمیق را وارد می‌سازد.

اگر شما یک متر زیر سطح آب استخری کوچک یا در همان عمق در وسط دریاچه‌ای بزرگ قرار داشته باشید، فشار یکسانی احساس می‌کنید. همین موضوع برای ماهی هم صادق



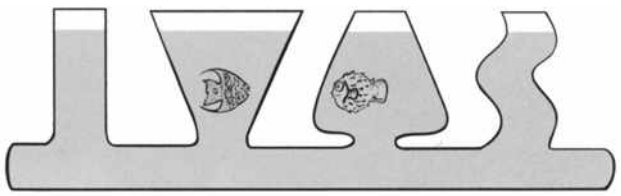
شکل ۱۳-۴
فشار آب متوسط وارد به سد به عمق میانگین آب بستگی دارد نه به حجم آب پشت آن. دریاچهٔ بزرگِ کم‌عمق فقط فشاری نصف فشار متوسط آبگیر کوچک عمیق وارد می‌سازد.

۳. چگالی آب شیرین $1000\ kg/m^3$ است. چون وزن (mg)، $1000\ kg$ برابر $1000 \times 9.8 = 9800\ N$ است، چگالی وزنی آب $9800\ N/m^3$ نیوتون بر متر مکعب ($9800\ N/m^3$) می‌شود. فشار آب زیر سطح یک دریاچه صرفاً حاصل‌ضرب چگالی در عمق برحسب متر است. مثلاً، فشار آب در عمق ۱ متری، $9800\ N/m^2$ و در عمق ۱۰ متری، $98,000\ N/m^2$ است. در دستگاه یکاهای SI، فشار برحسب پاسکال اندازه‌گیری می‌شود، پس این فشارها به ترتیب $9800\ Pa$، و $98,000\ Pa$ می‌شود؛ یا برحسب کیلوپاسکال به ترتیب داریم $9.8\ kPa$ و $98\ kPa$. برای به‌دست آوردن فشار کل، فشار جو $101.3\ kPa$ را به هر مورد بیفزایید.

جرقه‌ها

زمین تنها سیارهٔ منظومهٔ شمسی با سطح عمدتاً پوشیده از مایع ــ اقیانوس‌هایش ــ است. اگر زمین اندکی به خورشید نزدیک‌تر بود، اقیانوس‌ها تبخیر می‌شدند. اگر زمین اندکی از خورشید دورتر بود، بیشتر سطح آن، نه فقط در قطب‌ها، به یخ جامد تبدیل می‌شد. خیلی خوب است که زمین در جایی قرار دارد که هست.

فیزیک‌سرا
سد



شکل ۱۳-۵
فشار مایع در هر عمق زیر سطح مایع، بدون توجه به شکل ظرف، یکسان است. فشار مایع برابر است با چگالی جرمی × عمق (به‌اضافهٔ فشار جو بالای مایع).

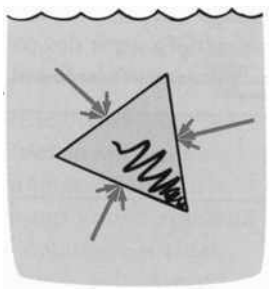
است. ظرف‌های مرتبط شکل ۱۳-۵ را ببینید. اگر دُم ماهی قرمزی را بگیریم و سرش را چند سانتی‌متر زیر سطح آب فرو کنیم، فشار وارد بر سر ماهی در هر یک از ظرف‌ها یکسان خواهد بود. اگر ماهی تا ته ظرف شنا کند، فشار بیشتر می‌شود، ولی فرقی نمی‌کند که ماهی درکدام ظرف است. همهٔ ظرف‌ها تا عمق یکسان پر شده‌اند، بنابراین فشار آب در ته هر ظرف، بدون توجه به شکل یا حجمش، یکسان است. اگر فشار آب در ته یک ظرف از فشار آب در ته ظرف باریک‌تر مجاور آن بیشتر بود، فشار بیشتر باعث می‌شد آب از پهلو به حرکت درآید و ظرف باریک‌تر را تا ارتفاع بیشتر پر کند یا فشار در ته دو ظرف برابر شود. ولی این اتفاق نمی‌افتد. فشار تابع عمق است نه حجم، بنابراین متوجه می‌شویم که چرا آب سطح خود را می‌جوید.

این واقعیت را که آب سطح خود را می‌جوید، می‌توان با پُرکردن شیلنگ آبی و نگه‌داشتن دو انتهای آن در یک سطح نشان داد. سطح‌های آب یکسان خواهد بود. اگر یک سر آن را بالاتر از سر دیگر ببریم، آب از سر پایین‌تر جاری می‌شود، گرچه باید بخشی از مسیرش را «سربالا» طی کند. بعضی از رومیان باستان این واقعیت را نمی‌دانستند، زیرا برای اطمینان از جریان دائمی آب در مسیری اندکی سرازیر آبرسان‌های تودرتویی با طاق‌های قوسی بلند و مسیرهای انحرافی

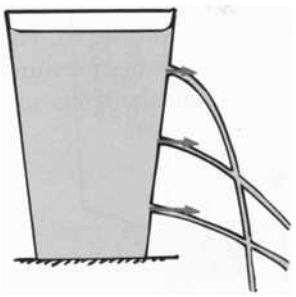
شکل ۱۳-۶
آبرسان‌های رومی این اطمینان را به وجود می‌آوردند که آب در مسیری اندکی سرازیر از مخزن به شهر جریان می‌یابد.

نوعی شبکهٔ لوله‌کشی باستانی که در زمان ساختن آبرسان‌ها در روم به‌وجود آمد نشان می‌دهد همهٔ رومیان آن زمان گمان می‌کردند آب نمی‌تواند سربالا برود.

جرقه‌ها



شکل ۱۳-۷
نیروهای ناشی از فشار مایع بر یک سطح با هم جمع می‌شوند و نیروی خالصی را به‌وجود می‌آورند که بر سطح عمود است.



شکل ۱۳-۸
بردارهای نیرو عمود بر سطح داخلی ظرف اثر می‌کنند و با زیاد شدن عمق افزایش می‌یابند.

می‌ساختند تا آب از مخزن به شهر برسد. اگر لوله‌ها در زمین گذاشته می‌شد و پَربند طبیعی سرزمین را حفظ می‌کرد، بعضی جاها آب باید سربالا می‌رفت، و رومیان در این مورد تردید داشتند. آزمایش دقیق هنوز متداول نبود؛ بنابراین، رومیان با نیروی کار فراوان بردگان آبرسان‌های تودرتوی بیخودی ساختند.

یک واقعیت در مورد فشار مایع که به‌صورت تجربی تعیین شده آن است که فشار به‌طور مساوی در همهٔ جهت‌ها وارد می‌شود. مثلاً، اگر در آب فرورویم، بدون توجه به چگونگی خم‌کردن سرمان فشار یکسانی را برگوش‌های خود احساس می‌کنیم. چون مایع می‌تواند جریان یابد، فشار فقط روبه پایین نیست. با دیدن اینکه آب از روزنهٔ دیوارهٔ قوطی قائم فوران می‌کند می‌فهمیم فشار به دیواره‌های ظرف وارد می‌شود. همین‌طور وقتی می‌کوشیم بادکنکی را زیر سطح آب ببریم، متوجه می‌شویم که فشار به‌طرف بالا نیز وجود دارد. بدون شک فشار آب کف قایق را به‌طرف بالا می‌راند.

وقتی مایع سطحی را می‌فشارد، نیروی خالصی عمود بر سطح وجود دارد. گرچه فشار جهت معینی ندارد، اما نیرو دارد. قطعهٔ مثلثی شکل **۱۳-۷** را در نظر بگیرید. توجه خود را فقط به نقطه‌های وسط هر سطح معطوف کنید. آب از چندین جهت به هر نقطه فشار می‌آورد، که تنها تعدادی از آنها نشان داده شده است. مؤلفه‌های نیرو که بر سطح عمود نیستند یکدیگر را خنثی می‌کنند، فقط یک نیروی خالص عمود بر سطح باقی می‌ماند.

از این‌رو آبی که از سوراخ سطل فوران می‌کند ابتدا در جهت عمود بر سطحی خارج می‌شود که سوراخ در آن قرار دارد. سپس به‌واسطهٔ گرانی به‌طرف پایین خم می‌شود. نیروی وارد از شاره بر یک سطح هموار همیشه بر آن سطح عمود است.[۴]

شناوری

هر کسی که تاکنون جسم سنگین غوطه‌وری را از آب بیرون آورده باشد با نیروی شناوری که سبک شدن ظاهری اجسام غوطه‌ور در یک مایع است آشنایی دارد. مثلاً، بلند کردن سنگ‌های بزرگ از کف رودخانه، تا زمانی‌که سنگ زیر آب باشد، نسبتاً راحت است. اما وقتی از سطح آب بالاتر بیاید، نیروی لازم برای بلند کردن آن بسیار زیاد می‌شود. زیرا وقتی سنگ غوطه‌ور است، آب نیروی بالاسویی به آن وارد می‌کند که درست خلاف جهت کشش گرانی است. این نیروی بالاسو را **نیروی شناوری** می‌نامند، که پیامد افزایش فشار با عمق است. در شکل **۱۳-۹** مشخص

۴. سرعت خروج مایع از سوراخ $\sqrt{2gh}$ است، که h عمق زیر سطح آزاد است. جالب است که این سرعت آب (یا هر چیز دیگر) همان سرعت سقوط آزاد از فاصلهٔ عمودی h است.

فیزیک‌سرا
نیروی شناوری

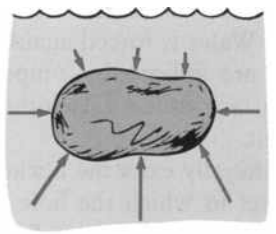
جستجوی آب با عصای جادو

روال جستجوی آب با عصای جادو را، که به دوران باستان در اروپا و افریقا برمی‌گردد، مهاجران اولیه از طریق اقیانوس اطلس به امریکا بردند. در این کار از یک چوب دوشاخه، یا میله، یا ابزار مشابه دیگر برای تعیین محل آب‌های زیرزمینی، مواد معدنی، یا گنج‌های پنهان استفاده می‌شود. در روش کلاسیک این کار، در هر دست که کف آن به طرف بالاست چوب دوشاخه‌ای را محکم می‌گیرند. نوک تیز چوب با زاویهٔ حدود 45° به طرف بالاست. جوینده در ناحیهٔ مورد بررسی جلو و عقب می‌رود، و وقتی از روی مخزن آب (یا هر چیز دیگری که مورد جستجوست) بگذرد، ظاهراً چوب به طرف پایین می‌چرخد. بعضی جویندگان جاذبه‌ای چنان شدید را گزارش داده‌اند که باعث تاول زدن دست‌هایشان شده است. برخی مدعی قدرت‌های خاصی شده‌اند که آنها را قادر به «دیدن» زیرخاک و سنگ کرده است، و برخی واسطه‌هایی هستند که وقتی اوضاع مساعد باشد به حالت خلسه می‌روند. گرچه اغلب جستجوهای با عصای جادویی در محل واقعی صورت می‌گیرد، ولی برخی جویندگان مدعی یافتن آب صرفاً با عبور چوب از روی نقشه‌اند.

چون حفر چاه فرایندی پرهزینه است، اجرت جویندگان معمولاً منطقی به‌نظر می‌رسد. این شیوهٔ کار متداول است و هزاران جویندهٔ فعال در ایالات متحد وجود دارند. علت آن نتیجه‌بخش بودن این کار است. جوینده به‌ندرت موفق نمی‌شود ــ نه به‌واسطهٔ توانمندی خاص، بلکه آب زیرزمینی تقریباً در محدودهٔ ۱۰۰ متری هر نقطه زیر زمین وجود دارد.

اگر سوراخی را در زمین حفر کنید، درمی‌یابید که رطوبت خاک با عمق تغییر می‌کند. در نزدیکی سطح، منفذها و فضاهای خالی اغلب پر از هواست. در عمق بیشتر، منفذها از آب اشباع شده‌اند. مرز بالای این منطقهٔ پر از آب را سفرهٔ آب می‌نامند. این مرز معمولاً با پَربند توپوگرافی سطح بالا و پایین می‌رود. هر جا دریاچه‌ای طبیعی یا آبگیری می‌بینید مکانی را مشاهده می‌کنید که در آن سفرهٔ آبی به بالاتر از سطح زمین گسترش یافته است.

آب‌شناسان عمق، مقدار، و کیفیت آب زیر سفرهٔ آبی را به‌کمک روش‌های آب‌شناسی بررسی می‌کنند ــ که جستجوی آب با عصای جادو جزء آنها نیست. یافته‌های بررسی زمین‌شناختی ایالات متحد نشان می‌دهد که این روش در گروه شبه‌علم قرار می‌گیرد. همان‌طور که در فصل ۱ گفتیم، آزمون واقعی جویندهٔ آب، یافتن محلی است که در آن آب پیدا نمی‌شود.

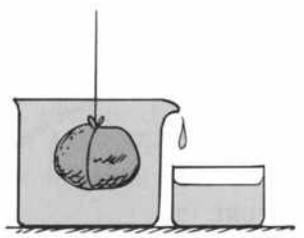


شکل ۱۳-۹

فشار بیشتر به زیر یک جسم غوطه‌ور نیروی شناوری بالاسویی به وجود می‌آورد.

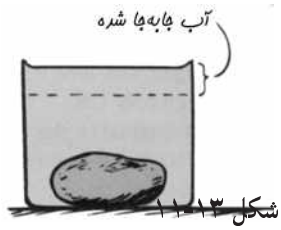
است که چرا نیروی شناوری بالاسوست. نیروهای ناشی از فشار آب به تمام نقطه‌های سنگ در جهت عمود بر سطح، که با بردارها نشان داده شده‌اند، وارد می‌شوند. بردارهای نیروی وارد به کناره‌ها در عمق‌های یکسان یکدیگر را خنثی می‌کنند، بنابراین هیچ نیروی شناوری افقی وجود ندارد. اما بردارهای نیرو در جهت عمود خنثی نمی‌شوند. فشار وارد به زیر سنگ به‌علت عمق بیشتر آن بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین نیروی بالاسوی وارد به زیر سنگ بزرگ‌تر از نیروی پایین‌سوی وارد به‌بالای آن است، که نیروی بالاسوی خالصی ــ نیروی شناوری ــ تولید می‌کند.

درک شناوری به شناخت عبارت «حجم آب جابه‌جا شده» نیاز دارد. اگر سنگی را در ظرف پر از آبی قرار دهید، مقداری آب از آن بیرون می‌ریزد (شکل ۱۳-۱۰). سنگ آب را جابه‌جا



شکل ۱۳-۱۰

وقتی سنگی غوطه‌ور شود، آبی را جابه‌جا می‌کند که حجم آن برابر حجم سنگ است.



شکل ۱۳-۱۱ افزایش سطح آب به همان اندازه‌ای است که با ریختن آب برابر با حجم سنگ در ظرف حاصل می‌شود.

می‌کند. اندکی تأمل نشان می‌دهد که حجم سنگ ــ یعنی، مقدار فضایی که اشغال کرده است ــ با حجم آب جابه‌جاشده برابر است. اگر جسمی را در ظرف حاوی مقداری آب قرار دهید، سطح آب بالا می‌آید (شکل ۱۳-۱۱). اما چقدر؟ درست به همان اندازهٔ حجم آبی که جسم غوطه‌ور بیرون ریخته بود. این روش خوبی برای تعیین حجم اجسام با شکل نامنظم است: جسم کاملاً غوطه‌ور همواره برابر حجمِ خود مایع جابه‌جا می‌کند.

خود را بیازمایید

برای تهیهٔ نوعی غذا به مقدار معینی کره نیاز داریم. چطور می‌توان آن را با روش جابه‌جایی با استفاده از پیمانهٔ آشپزخانه تعیین کرد؟

اصل ارشمیدس[1]

رابطهٔ شناوری و مایع جابه‌جاشده را اولین بار ارشمیدس، دانشمند یونانی قرن سوم میلادی، کشف کرد. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

به جسم شناور نیروی بالاسویی برابر وزن شاره‌ای وارد می‌شود که جسم جابه‌جا می‌کند.

این رابطه را **اصل ارشمیدس** می‌نامند. این رابطه در مورد مایع‌ها و گازها که هر دو شاره‌اند صدق می‌کند. اگر جسم غوطه‌ور ۱ کیلوگرم شاره را جابه‌جا کند، نیروی شناوریِ وارد بر آن برابر است با وزن ۱ کیلوگرم.[6] منظور از غوطه‌ور کاملاً یا تا اندازه‌ای فرو رفته است. اگر ظرف ۱ لیتری سربسته‌ای را تا نیمه در آب فروبریم، نیم لیتر آب را جابه‌جا می‌کند و با نیروی هم‌ارز وزنِ نیم‌لیتر آب ــ بدون توجه به محتوای ظرف ــ بالا رانده می‌شود. اگر آن را کاملاً غوطه‌ور کنیم

اگر پای خود را در آب فرو برید، شناور می‌شود. اگر به درون آب بپرید و فرو بروید و غوطه‌وری شما کامل باشد، در آب غرق می‌شوید.

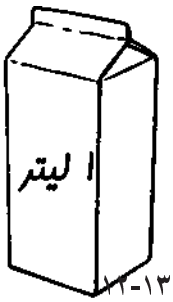
جرقه‌ها

پاسخ خود را وارسی کنید

قبل از اضافه کردن کره مقداری آب در پیمانه بریزید. سطح آب را از قسمت مدرج پیمانه یادداشت کنید. سپس کره را اضافه کرده و به بالا رفتن سطح آب توجه کنید. چون کره شناور می‌شود، آن را زیر سطح آب فروبرید. با کم کردن قرائت سطح پایین آب از قرائت سطح بالای آن، حجم کره به دست می‌آید.

5. Archimedes

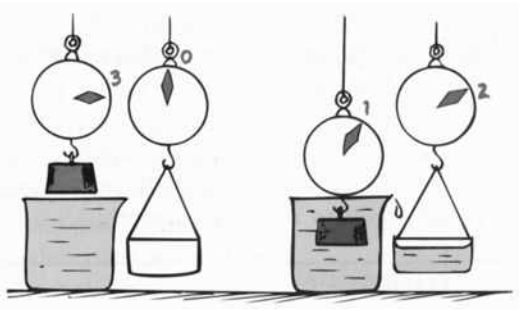
۶. شاید در آزمایشگاه راحت‌تر باشد که نیروی شناوری را برحسب کیلوگرم بیان کنید، گرچه کیلوگرم یکای جرم است نه نیرو. بنابراین، به بیان دقیق‌تر، نیروی شناوری برابر وزن ۱ kg است، یعنی ۹٫۸ N. یا می‌توان گفت نیروی شناوری ۱ وزن کیلوگرم است، نه صرفاً ۱ kg.



شکل ۱۳-۱۲
یک لیتر آب حجم $1000\ cm^3$ را اشغال می‌کند، دارای جرم $1\ kg$، و وزن $9/8\ N$ است. پس می‌توان چگالی آن را به صورت $1\ kg/L$ و چگالی وزنی آن را به صورت $9/8\ N/L$ بیان کرد. (آب دریا اندکی چگال‌تر است، حدود $10/0\ N/L$)

(در آب فرو کنیم)، با نیروی هم‌ارز یک لیتر کامل آب (۱ کیلوگرم جرم) بالا رانده می‌شود. اگر ظرف کاملاً غوطه‌ور شود و متراکم نشود، در هر عمق با نیروی بالاسویی برابر وزن یک کیلوگرم آب بالا رانده می‌شود. زیرا، در هر عمق، ظرف نمی‌تواند آبی بیش از حجم خود را جابه‌جا کند. و وزن این آب جابه‌جاشده (و نه وزن جسم غوطه‌ور!) برابر نیروی شناوری است.

اگر جسم ۳۰ کیلوگرمی هنگام غوطه‌وری ۲۰ کیلوگرم شاره را جابه‌جا کند، وزن ظاهری آن برابر وزن ۱۰ کیلوگرم می‌شود (۹۸ نیوتون). توجه کنید که در شکل ۱۳-۱۳، قطعهٔ ۳ کیلوگرمی وقتی غوطه‌ور شود دارای وزن ظاهری برابر وزنهٔ ۱ کیلوگرمی می‌شود. وزن ظاهری جسم غوطه‌ور برابر وزن معمولی آن در هوا منهای نیروی شناوری است.



شکل ۱۳-۱۳
وزن اجسام در هوا بیشتر از وزن آنها در آب است. وزن قطعهٔ ۳ نیوتونی که در آب فرو رفته باشد فقط $1\ N$ به‌نظر می‌رسد. این وزن «گمشده» برابر وزن آب جابه‌جاشده، $2\ N$ و برابر نیروی شناوری است.

فیزیک‌سرا
اصل ارشمیدس

خود را بیازمایید

۱. آیا اصل ارشمیدس بیان می‌کند که اگر جسم غوطه‌ور مایعی به وزن $10\ N$ را جابه‌جا کند، نیروی شناوری وارد بر جسم $10\ N$ است؟

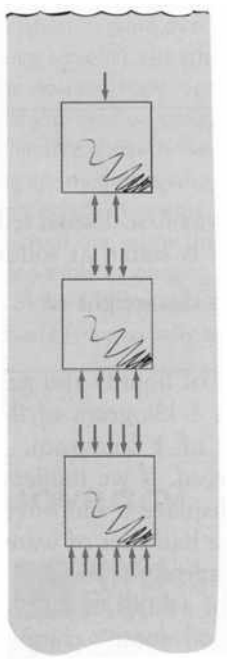
۲. ظرف ۱ لیتری کاملاً پر از سرب وزنی برابر $11/3\ kg$ دارد و در آب غوطه‌ور است. نیروی شناوری وارد بر آن چقدر است؟

۳. سنگی به دریاچه‌ای عمیق انداخته می‌شود. با فرو رفتن هر چه بیشتر آن در آب، نیروی شناوری وارد بر آن زیاد می‌شود یا کم؟

۴. چون نیروی شناوری نیروی خالصی است که شاره بر جسم وارد می‌کند، و همان‌طور که در فصل ۴ دیدیم، نیروی خالص شتاب تولید می‌کند، پس چرا جسم غوطه‌ور شتاب نمی‌گیرد؟

شاید معلم شما اصل ارشمیدس را به‌کمک مثالی عددی جمع‌بندی کند تا نشان دهد اختلاف نیروی بالاسو و پایین‌سوی ناشی از اختلاف فشارهای مشابه بر مکعب غوطه‌ور، به‌لحاظ عددی با وزن مایع جابه‌جاشده یکسان است. فرقی نمی‌کند که مکعب در چه عمقی قرار گرفته

باشد، زیرا فشارها با افزایش عمق زیاد می‌شوند، اختلاف فشار بالاسو به زیر مکعب و فشار پایین‌سو به بالای مکعب در هر عمقی یکسان است (شکل ۱۳-۱۴). شکل جسم غوطه‌ور هر چه باشد، نیروی شناوری برابر وزن شارهٔ جابه‌جاشده است.



شکل ۱۳-۱۴
تفاوت نیروی بالاسو و پایین‌سو که بر قطعهٔ غوطه‌ور وارد می‌شود در همهٔ عمق‌ها یکسان است.

چه چیزی باعث فرورفتن یا شناور ماندن جسم می‌شود؟

مهم است به‌یاد داشته باشیم که نیروی وارد بر جسم زیر آب تابع حجم آن است. اجسام کوچک آب کمی را جابه‌جا می‌کنند و نیروهای شناوریِ کمی به آنها وارد می‌شود. اجسام بزرگ آب زیادی جابه‌جا می‌کنند و نیروهای شناوری وارد بر آنها بزرگ‌تر است. حجم جسم زیر آب ــ نه وزن آن ــ نیروی شناوری را مشخص می‌کند. نیروی شناوری برابر وزن حجم شارهٔ جابه‌جاشده است. (سوءتفاهم در این مورد منشأ سردرگمی افراد دربارهٔ شناوری است.)

با این همه، وزن جسم در شناور ماندن آن نقش دارد. اینکه جسمی در مایعی غرق شود یا شناور بماند به‌اندازهٔ نیروی شناوری در مقایسه با وزن جسم بستگی دارد. این نیز تابع چگالی جسم است. این سه قاعدهٔ ساده را در نظر بگیرید:

۱. جسم چگال‌تر از شاره‌ای که در آن غوطه‌ور است غرق می‌شود.

پاسخ خود را وارسی کنید

۱. آری. به‌عبارت دیگر، جسم غوطه‌ور ۱۰ N از شاره را کنار می‌زند. شارهٔ جابه‌جاشده با وارد کردن نیروی ۱۰ N بر جسم به آن واکنش نشان می‌دهد.

۲. نیروی شناوری برابر وزن ۱ لیتر آب جابه‌جاشده است. جرم ۱ L آب ۱ kg و وزن آن ۹٫۸ N است. بنابراین نیروی شناوری وارد بر آن ۹٫۸ N است. (ربطی به ۱۱٫۳ kg سرب ندارد؛ ۱ L از هر چیز غوطه‌ور در آب ۱ L را جابه‌جا می‌کند و با نیروی ۹٫۸ N، وزن ۱ kg، به‌بالا رانده می‌شود.)

۳. نیروی شناوری با فرورفتن سنگ تغییر نمی‌کند، زیرا سنگ در هر عمق حجم آب یکسانی را جابه‌جا خواهد کرد.

۴. جسم غوطه‌ور در آب در صورتی شتاب می‌گیرد که نیروی شناوری را نیروهای دیگر وارد بر آن ــ نیروی گرانی و مقاومت شاره ــ متوازن نسازند. نیروی خالص وارد بر جسم غوطه‌ور در نتیجهٔ نیروی خالصی است که شاره وارد می‌کند (نیروی شناوری)، وزن جسم، و اگر جسم غوطه‌ور حرکت کند، نیروی اصطکاک شاره.

۲. جسم با چگالی کمتر از شاره‌ای که در آن غوطه‌ور است شناور می‌ماند.

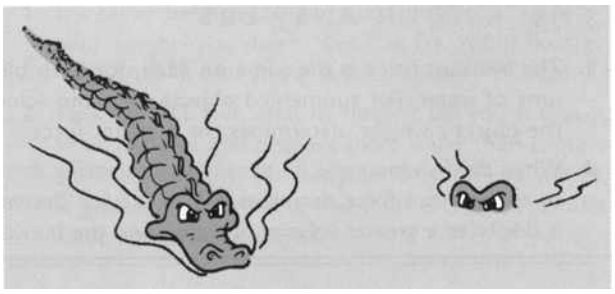
۳. جسم با چگالی برابرِ شاره‌ای که در آن غوطه‌ور است نه غرق می‌شود و نه شناور می‌ماند.

قاعدهٔ ۱ به قدر کافی منطقی به‌نظر می‌رسد، زیرا اجسام چگال‌تر از آب، بدون توجه به عمق آب، به ته آن فرومی‌روند. غواصان با ماسک اکسیژن در آب‌های عمیق گاهی با قطعه چوب غرق در آبی روبه‌رو می‌شوند که روی کف اقیانوس در پرواز است (با چگالی برابر با چگالی آب در آن عمق)، اما هرگز با سنگ‌های در پرواز روبه‌رو نمی‌شوند!

از قاعده‌های ۱ و ۲ چه نتیجه‌ای می‌توان دربارهٔ افرادی گرفت که هر چه بکوشند نمی‌توانند شناور بمانند؟ آنها صرفاً بسیار چگال‌اند! برای راحت‌تر شناور شدن باید چگالی‌تان را کم کنید. فرمول $\frac{\text{وزن}}{\text{حجم}}$ = چگالی وزنی، می‌گوید که یا باید وزنتان را کم کنید یا حجم خود را زیاد کنید. پوشیدن جلیقهٔ نجات حجم شما را در حالی زیاد می‌کند که وزن چندانی به شما اضافه نمی‌شود. پس چگالی کلی شما کم می‌شود.

قاعدهٔ ۳ در مورد ماهی‌ها به‌کار می‌رود، که نه غرق می‌شوند و نه شناور می‌مانند. چگالی ماهی معمولاً در حدود چگالی آب است. ماهی می‌تواند با انبساط و انقباض کیسهٔ هوای موجود در بدنش چگالی خود را تنظیم کند. ماهی می‌تواند با افزایش حجمش (که باعث کاهش چگالی‌اش می‌شود) به بالا و با کاهش حجمش (که باعث افزایش چگالی‌اش می‌شود) به پایین حرکت کند.

در زیردریایی برای رسیدن به چگالی مطلوب وزن تغییر می‌کند نه حجم. آب وارد مخزن‌های تعادل آن می‌شود یا از آنها بیرون می‌ریزد. همین‌طور، چگالی کل تمساح با بلعیدن سنگ افزایش می‌یابد. در شکم تمساح‌های بزرگ ۴ تا ۵ کیلوگرم سنگ پیدا شده است. به‌واسطهٔ این چگالی بیشتر، تمساح در عمق بیشتر آب شنا می‌کند و کمتر در معرض شکار شدن قرار می‌گیرد (شکل ۱۳-۱۵).



شکل ۱۳-۱۵
(چپ) تمساحی در آب به طرف شما می‌آید. (راست) تمساحی که سنگ بلعیده در آب به طرف شما می‌آید.

از هر ده نفری که نمی‌توانند شناور بمانند نُه نفر مردند. اغلب مردان عضلانی‌تر و چگال‌تر از زنان‌اند. همچنین، قوطی‌های سودای رژیمی شناور می‌ماند، در حالی‌که قوطی‌های سودای معمولی در آب فرو می‌رود. از این موضوع چه نتیجه‌ای دربارهٔ چگالی‌های نسبی آنها می‌گیرید؟

جرقه‌ها

خود را بیازمایید

۱. دو قطعهٔ جامد هم‌اندازه در آب فرو می‌روند. یکی سرب است دیگری آلومینیم. نیروی شناوری وارد بر کدام‌یک بزرگ‌تر است؟

۲. اگر ماهی خود را چگال‌تر کند، فرو می‌رود، اگر چگالی خود را کم کند، بالا می‌آید. با توجه به نیروی شناوری، چرا چنین است؟

شناورسازی

فیزیک‌سرا
شناوری

انسان‌های اولیه قایق‌های خود را از چوب می‌ساختند. آیا فکر کشتی آهنی به ذهنشان خطور می‌کرد؟ نمی‌دانیم. اندیشهٔ شناور ساختن آهن شاید عجیب به نظر می‌رسید. امروز درک اینکه کشتی آهنی چگونه می‌تواند شناور بماند آسان است.

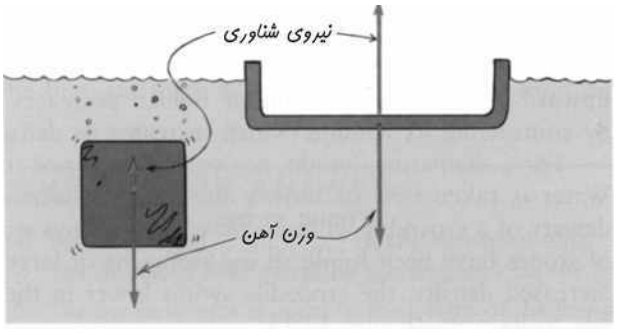
قطعه‌ای ۱ تنی از آهن صلب را در نظر بگیرید. چون آهن تقریباً هشت بار چگال‌تر از آب است، هنگام فرورفتن در آب فقط $\frac{۱}{۸}$ تُن آب را جابه‌جا می‌کند، که برای شناور ماندن آن کافی نیست. فرض کنید این قطعه آهن را به شکل کاسه درآوریم (شکل ۱۳-۱۶). وزن آن ۱ تُن است. اما اگر آن را در آب بگذاریم، حجم آبی که جابه‌جا می‌کند بیش از هنگامی است که به صورت قطعه بود. هر چه این کاسهٔ آهنی بیشتر فروبرود، آب بیشتری جابه‌جا می‌کند و نیروی شناوری بیشتری بر آن وارد می‌شود. وقتی نیروی شناوری برابر ۱ تُن شود، دیگر فرونمی‌رود.

فقط در مورد خاص شناوری نیروی شناوری وارد بر یک جسم با وزن آن برابر می‌شود.

جرقه‌ها

وقتی هر کشتی آبی برابر وزن خودش جابه‌جا کند، شناور می‌ماند. این را گاهی **اصل شناوری** می‌نامند:

جسم شناور هم وزن خودش شاره جابه‌جا می‌کند.

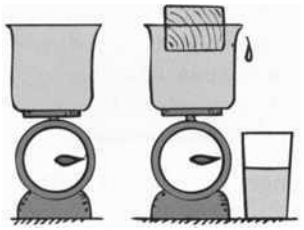


شکل ۱۳-۱۶
قطعهٔ آهن فرو می‌رود، در حالی‌که همان مقدار آهن که به شکل کاسه درآمده است شناور می‌ماند.

هر کشتی، هر زیردریایی، و هر کشتی هوایی باید طوری طراحی شود که وزن شاره‌ای که جابه‌جا می‌کند برابر وزن خودش باشد. بنابراین، یک کشتی ۱۰,۰۰۰ تُنی باید آن‌قدر پهن ساخته شود که قبل از فرورفتن خیلی زیاد در آب ۱۰,۰۰۰ تُن آب را جابه‌جا کند. همین موضوع برای کشتی‌ها در هوا هم صادق است. یک کشتی هوایی به وزن ۱۰۰ تُن حداقل ۱۰۰ تُن هوا را جابه‌جا می‌کند. اگر بالا برود، هوای بیشتری را جابه‌جا خواهد کرد؛ اگر هوای کمتری را جابه‌جا کند، سقوط می‌کند. اگر هوا را درست به‌اندازهٔ وزن خودش جابه‌جا کند، در ارتفاع ثابت پرواز می‌کند.

شکل ۱۳-۱۷
وزن جسم شناور برابر وزن آبی است که بخش فرورفتهٔ آن جابه‌جا می‌کند.

به‌ازای حجم معین شارهٔ جابه‌جاشده، شارهٔ چگال‌تر نیروی شناوری بیشتری از شارهٔ با چگالی کمتر وارد می‌کند. بنابراین، کشتی در آب شور در ارتفاعی بیش از آب شیرین شناور می‌ماند چون آب شور اندکی چگال‌تر است. همین‌طور، یک تکه آهن توپر، گرچه در آب فرومی‌رود، در جیوه شناور می‌ماند.



شکل ۱۳-۱۸
جسم شناور برابر وزن خودش شاره جابه‌جا می‌کند.

پاسخ خود را وارسی کنید

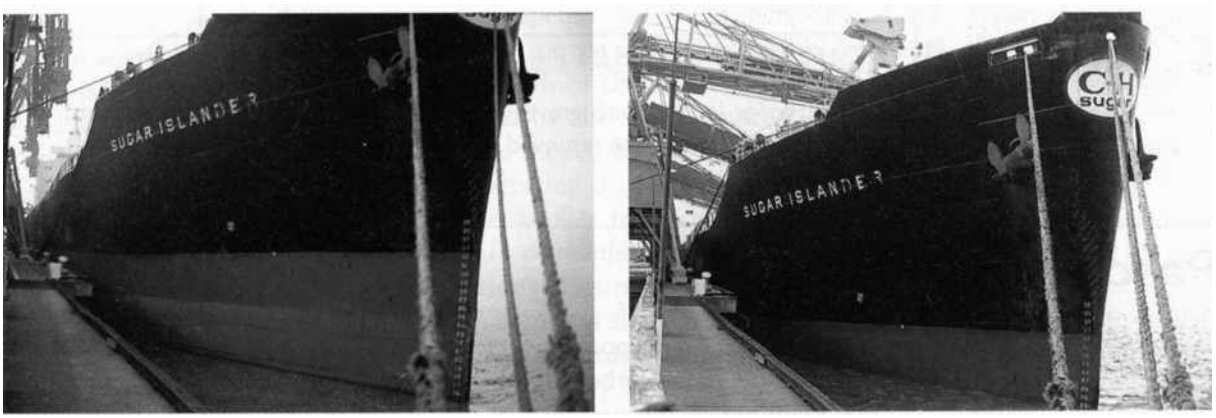
۱. نیروی شناوری وارد بر هر یک از آنها یکسان است، زیرا هر دو حجم آب یکسانی را جابه‌جا می‌کنند. برای اجسام زیر آب، فقط حجم آب جابه‌جاشده، نه وزن جسم، نیروی شناوری را تعیین می‌کند.

۲. وقتی ماهی با کاهش حجم چگالی خود را زیاد می‌کند، آب کمتری جابه‌جا می‌کند، پس نیروی شناوری کاهش می‌یابد. وقتی ماهی با انبساط چگالی خود را کم می‌کند، حجم آب بیشتری را جابه‌جا می‌کند، و نیروی شناوری افزایش می‌یابد.

خود را بیازمایید

۱. چرا شناور شدن در آب شور راحت‌تر از آب شیرین است؟

۲. ناخدای کشتی وسیلهٔ نجاتی پر از ساچمه‌های سربی به شما می‌دهد. او در پاسخ به نگاه شکاک شما می‌گوید اگر به دریا بیفتید، نیروی شناوری وارد بر شما بزرگ‌تر از نیرویی خواهد بود که بر دوستان شما با وسیله‌های نجات پر از پلی‌استیرن وارد می‌شود. آیا راست می‌گوید؟



شکل ۱۳-۱۹

یک کشتی خالی و پر از بار. وزن بار آن در مقایسه با وزن آب اضافیِ جابه‌جاشده چیست؟

پاسخ خود را وارسی کنید

۱. از این‌رو ساده‌تر است که برای جابه‌جا کردن وزنتان مقدار کمتری از بدنتان غوطه‌ور می‌شود ــ چندان زیاد «فرو نمی‌روید». در جیوه (با چگالی $۱۳/۶ \frac{g}{cm^۳}$) حتی در ارتفاع بالاتر شناور می‌مانید، و در الکل (با چگالی $۰/۸ \frac{g}{cm^۳}$) کاملاً فرو می‌روید.

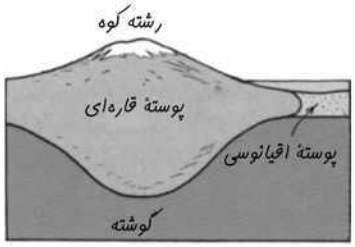
۲. راست می‌گوید. اما چیزی که به شما نمی‌گوید این است که غرق می‌شوید! وسیلهٔ نجات شما غوطه‌ور می‌شود و آب بیشتری از وسیلهٔ نجات دوستانتان را که در سطح شناورند جابه‌جا می‌کند. گرچه نیروی شناوری وارد بر شما بزرگ‌تر خواهد بود، اضافه وزنتان از آن زیادتر است! شناور ماندن یا غرق شدن شما بستگی به آن دارد که نیروی شناوری برابر وزنتان باشد یا نه.

کوه‌های شناور

کوه یخ شناورِ بالای سطح اقیانوس تقریباً ۱۰٪ کل آن است. چون چگالی یخ ۰٫۹ چگالی آب است، پس ۹۰٪ آن زیر آب می‌رود. همین‌طور، فقط نوک کوه شناور برگوشتهٔ نیمه‌مایع زمین نمایان است، زیرا چگالی پوستهٔ قاره‌ای زمین ۰٫۸۵ چگالی گوشتهٔ شناور بر آن است؛ در نتیجه ۸۵٪ کوه زیر سطح زمین قرار دارد. بنابراین، کوه‌ها نیز مانند کوه‌های یخ در عمقی خیلی بیش از ارتفاع خود فرورفته‌اند.

این موضوع از لحاظ گرانشی هم جالب است: از فصل ۹، می‌دانیم که میدان گرانشی در سطح زمین به علت چگالی‌های متفاوت سنگ‌های زیر آن اندکی تغییر می‌کند (که اطلاعات گرانبهایی را در اختیار زمین‌شناسان و جویندگان نفت می‌گذارد)، و گرانش در نوک کوه به علت فاصلهٔ زیادترش از مرکز زمین کمتر است. با ترکیب این اطلاعات می‌بینیم که چون ته کوه در اعماق گوشتهٔ زمین فرورفته است، فاصلهٔ نوک کوه تا گوشتهٔ چگال‌تر زیادتر می‌شود. این «گاف» بزرگ‌تر سبب کاهش بیشتر گرانش در قلهٔ کوه می‌شود.

واقعیت جالب توجه دیگری دربارهٔ کوه‌ها آن است که اگر بتوانید قلهٔ کوه یخی را بتراشید، کوه یخ سبک‌تر می‌شود و تقریباً تا ارتفاع پیش از تراشیده شدن بالا می‌آید. همین‌طور، وقتی کوه‌ها ساییده شوند، سبک‌تر می‌شوند و با فشار وارد از زیر تا ارتفاع اولیهٔ خود بالا می‌آیند. پس، وقتی یک کیلومتر از کوه بر اثر فرسایش از بین برود، ۸۵٪ یک کیلومتر از زیر بالا می‌آید. بدین‌سبب است که مدت بسیار زیادی طول می‌کشد تا کوه‌ها ساییده شوند.



شکل ۱۳-۲۰

پوستهٔ قاره‌ای در منطقهٔ عمیق‌تر زیر کوه‌ها قرار دارد.

خود را بیازمایید

قایق باریِ پر از شنی در رودخانه به پل کوتاهی نزدیک می‌شود که نمی‌تواند کاملاً از زیر آن رد شود. باید از آن شن کم کرد یا به آن شن اضافه کرد؟

اصل پاسکال

یکی از مهم‌ترین واقعیت‌ها دربارهٔ فشار شاره آن است که فشار وارد بر بخشی از شاره بدون ضعیف شدن به دیگر بخش‌های آن منتقل می‌شود. مثلاً، اگر فشار آب شهر در ایستگاه تلمبه‌زنی ۱۰ واحد فشار افزایش یابد، فشار در همهٔ لوله‌های متصل به این دستگاه ۱۰ واحد فشار زیاد می‌شود (البته اگر آب ساکن فرض شود). این قاعده **اصل پاسکال** نامیده می‌شود:

پاسخ خود را وارسی کنید

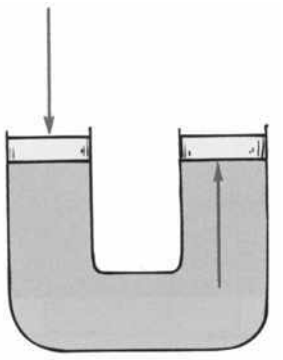
ها، ها، ها! فکر می‌کنید هیوئیت به همهٔ پرسش‌های «خود را بیازمایید» پاسخ خواهد داد؟ آموزش صحیح مطرح کردن پرسش‌های خوب است، نه پاسخ دادن به همهٔ آنها. پاسخ این یکی به عهدهٔ خود شماست!

تغییر فشار در هر نقطه از شارهٔ محصور و ساکن بدون ضعیف شدن به تمام نقطه‌های آن منتقل می‌شود.

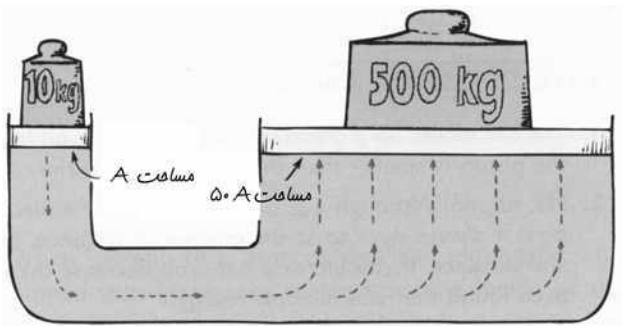
این اصل را بلز پاسکال در قرن هفدهم (که در سن ۱۸ سالگی معلول شد و تا زمان مرگش در ۳۹ سالگی معلول ماند) کشف کرد، که یکای فشار در SI به افتخار او پاسکال ($1\,Pa = 1\,N/m^2$) نام‌گذاری شده است.

لولهٔ U شکلی را از آب پر کنید، و مطابق شکل ۱۳-۲۱ پیستونی بر هر سر آن بگذارید. فشار وارد بر پیستون طرف چپ با عبور از سراسر مایع به پیستون طرف راست، منتقل می‌شود. (این پیستون‌ها صرفاً «توپی‌هایی»اند که می‌توانند آزادانه اما تنگ و چسبان در لوله بلغزند.) فشاری که پیستون طرف چپ به آب وارد می‌کند درست برابر فشاری است که آب به پیستون طرف راست وارد می‌سازد. این چیز مهمی نیست، اما فرض کنید که لولهٔ طرف راست پهن‌تر باشد و از پیستونی با مساحت بیشتر استفاده کنیم: نتیجه تحسین‌برانگیز خواهد بود. در شکل ۱۳-۲۲ مساحت پیستون طرف راست ۵۰ برابر پیستون طرف چپ است (مثلاً اگر سطح مقطع پیستون طرف چپ ۱۰۰ سانتی‌مترمربع باشد، سطح مقطع پیستون طرف راست ۵۰۰۰ سانتی‌مترمربع خواهد بود). فرض کنید باری ۱۰ کیلوگرمی روی پیستون طرف چپ گذاشته شود. در این‌صورت، فشار اضافی (تقریباً $1\,N/cm^2$) ناشی از وزن این بار به سراسر مایع و به پیستون بزرگ‌تر منتقل می‌شود. پس، پیستون بزرگ‌تر باری ۵۰۰ کیلوگرمی ــ ۵۰ برابر بار روی پیستون کوچک‌تر ــ را تحمل می‌کند!

این نکته‌ای مهم است که می‌توان درباره‌اش صحبت کرد، چون با استفاده از این ابزار می‌توان نیرو را چند برابر کرد. یک نیوتون ورودی ۵۰ نیوتون خروجی تولید می‌کند. با افزایش بیشتر سطح پیستون بزرگ‌تر (یا کاهش سطح پیستون کوچک‌تر)، می‌توان نیرو را، اصولاً، به هر میزان دلخواه چند برابر کرد. اصل پاسکال، اساس کار پرس هیدرولیکی را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱۳-۲۱
نیروی وارد بر پیستون طرف چپ فشار مایع را زیاد می‌کند و به پیستون طرف راست منتقل می‌شود.



شکل ۱۳-۲۲
بار ۱۰ kg روی پیستون طرف چپ ۵۰۰ kg بار را روی پیستون طرف راست نگه می‌دارد.

جرقه‌ها

شهرت علمیِ بلز پاسکال، عالم الهیات و دانشمند قرن هفدهم، در حوزهٔ هیدرولیک چشم‌انداز فنی آن را بیش از آنچه تصور می‌کرد تغییر داد. شهرت او در الهیات به‌واسطهٔ اظهارات بسیاری است که یکی از آنها (که به قرن‌ها تجربهٔ بشری برمی‌گردد) بدین صورت است: «بشر هرگز مثل وقتی که از روی اعتقاد مذهبی مرتکب شرارت شود این کار را مشتاقانه و کامل انجام نمی‌دهد.»