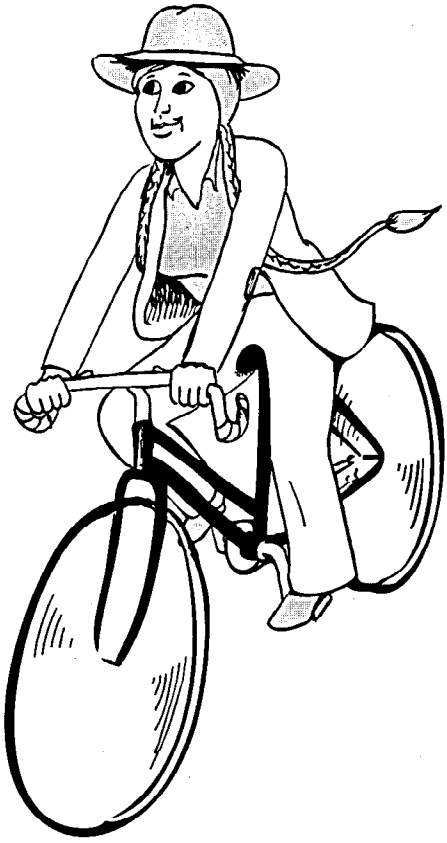
مجسم کنید

دوچرخه‌سواری مسافتی را با دوچرخه طی می‌کند. این دوچرخه‌سوار ساعت اول پنج کیلومتر، سه ساعت بعد هر ساعت چهار کیلومتر و دو ساعت آخر هر ساعت هفت کیلومتر طی می‌کند. در مجموع چند کیلومتر طی کرده است.

الف) پنج کیلومتر
ب) دوازده کیلومتر
ج) چهارده کیلومتر
د) سی و یک کیلومتر



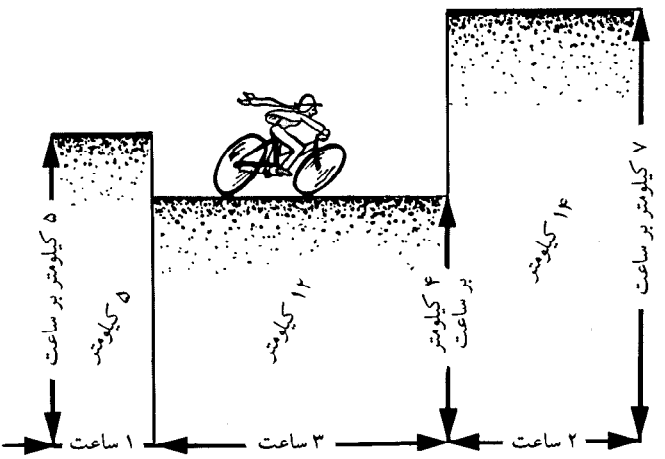
* **پاسخ:** (د) پاسخ درست است. می‌دانید که مسافت برابر است با سرعت ضربدر زمان. سرعت چگونه است؟ سرعت در جریان این مسافرت تغییر می‌کند. بنابراین مسیر طی شده را می‌توان به چند قسمت تقسیم کرد. یک ساعت ضربدر پنج کیلومتر می‌شود پنج کیلومتر، سه ساعت در چهار کیلومتر، دوازده کیلومتر و دو ساعت در هفت کیلومتر می‌شود چهارده کیلومتر. سپس این قسمتهای مختلف را باهم جمع کنید. پنج به‌اضافهٔ دوازده به‌اضافهٔ چهارده می‌شود سی و یک که همان جواب قسمت (د) است.

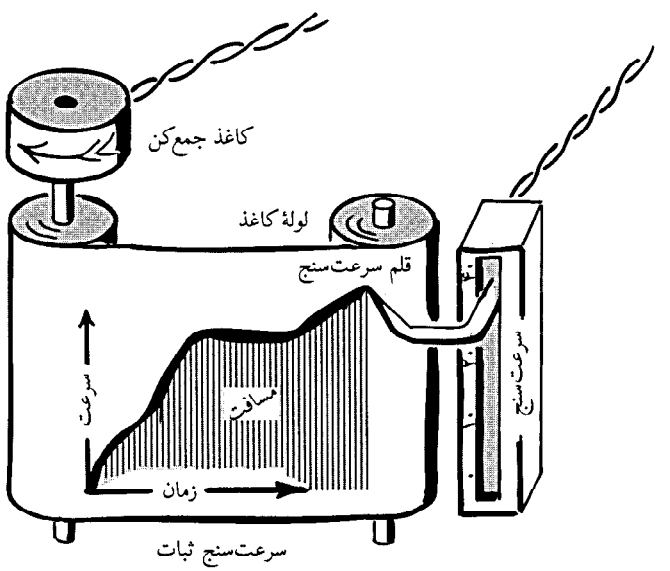
اما موضوع این نیست. این فقط مقداری حساب است و حساب هم کور است. آیا می‌توانید آنچه را انجام داده‌اید مجسم کنید؟ بله، با استفاده از هندسه. هندسه چشم دارد، "می‌بیند."

نموداری رسم کنید که نشاندهندهٔ مسیر دوچرخه‌سواری است. دوچرخه‌سوار برای مدت یکساعت با سرعت پنج کیلومتر در ساعت می‌راند. سپس سرعت را به چهار کیلومتر در ساعت کاهش می‌دهد و در همان حالت سه ساعت رکاب می‌زند. آنگاه سرعتش را تا هفت کیلومتر در ساعت می‌افزاید و دو ساعت به پیش می‌راند و سرانجام توقف می‌کند. اکنون نمودار را به سه مستطیل تقسیم کنید. هر مستطیل نشاندهندهٔ یک قسمت از مسیر است. طول مستطیل اول ۵ کیلومتر بر ساعت و عرض آن یک ساعت است. مساحت این مستطیل چقدر است؟ طول را در عرض ضرب کنید (یعنی ۵ کیلومتر بر ساعت ضربدر یک ساعت) می‌شود ۵ کیلومتر.

مساحت این مستطیل برابر فاصله‌ای است که دوچرخه‌سوار در قسمت اول طی کرده است. به‌همین ترتیب مساحت مستطیل دوم برابر است با ۴ کیلومتر بر ساعت ضربدر سه ساعت که می‌شود ۱۲ کیلومتر. بنابراین مساحت هر مستطیل برابر است با مسافتی که دوچرخه‌سوار در آن قسمت طی کرده است.

این روش بهترین راه برای تجسم مسافت طی شده است. سرعت‌سنج ثباتی را در نظر بگیرید که نمودار سرعت برحسب زمان را رسم می‌کند. مساحت کل زیر منحنی سرعت برابر است با کل مسافت طی شده توسط دوچرخه‌سوار.





حساب انتگرال

با توجه به نمودار به سؤالهای زیر پاسخ دهید.

۱. دو ساعت پس از شروع حرکت، سرعت متحرک چقدر است؟

الف) صفر کیلومتر بر ساعت

ب) ۱۰ کیلومتر بر ساعت

ج) ۲۰ کیلومتر بر ساعت

د) ۳۰ کیلومتر بر ساعت

ه) ۴۰ کیلومتر بر ساعت

۲. کل مسافت طی شده در این حرکت چقدر است؟

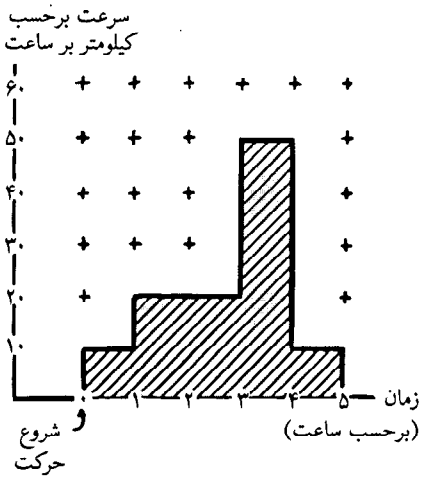
الف) ۴۰ کیلومتر

ب) ۸۰ کیلومتر

ج) ۱۱۰ کیلومتر

د) ۱۲۰ کیلومتر

ه) ۲۱۰ کیلومتر



پاسخ: (ج) پاسخ درست سؤال اول است. منحنی نمودار سرعت در بالای ساعت ۲، سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهد. پاسخ سؤال دوم هم (ج) است. زیرخط (یا منحنی) سرعت به چند مربع مستطیل کوچک تقسیم می‌شود. یک ضلع (عرض) هر مربع ۱ ساعت و ضلع دیگرش (ارتفاع) ۱۰ کیلومتر بر ساعت است. این گفته به این معناست که مساحت هر مربع کوچک ۱۰ کیلومتر است. اکنون تعداد مربعهای زیر منحنی را بشمارید. می‌شود ۱۱ مربع. یازده ضربدر ده کیلومتر می‌شود ۱۱۰ کیلومتر. بنابراین، مساحت کل زیر نمودار ۱۱۰ کیلومتر است و این برابر مسافتی است که متحرک در این حرکت طی کرده است. اما مساحت مربع چگونه می‌تواند نمایندهٔ فاصله برحسب کیلومتر باشد؟ این کجا و آن کجا؟ مگر نه اینکه مساحت برحسب کیلومتر مربع است؟ مساحت هر مربع در صورتی نشاندهندهٔ کیلومتر مربع است که هم‌عرض آن و هم‌ارتفاع آن برحسب کیلومتر باشد. اما اگر عرض مربع برحسب ساعت و ارتفاع آن برحسب کیلومتر بر ساعت باشد مساحت آن برحسب کیلومتر خواهد بود.

روشی که در اینجا برای پیدا کردن مسافت طی شده استفاده شد روش حساب انتگرال نام دارد. منظور از انتگرال، جمع کردن قسمتهای بسیار کوچکی است که تعدادشان خیلی زیاد است. حساب[1]

1. calculus

قسمتها یا لایه‌های بسیار کوچکی است که مجموعه را تشکیل می‌دهند. معادل انگلیسی این نام از مواد کانی گرفته شده است که لایه‌های جرم (یا سنگ) روی دندان را تشکیل می‌دهد. دندانپزشک هنگام جرم‌گیری دندان این سنگ را با وسایل مخصوصی می‌کند و سنگ تکه‌تکه کنده می‌شود. هرکدام از آن تکه‌ها یک لایه است.

اتومبیل مسابقه

اتومبیل مسابقه‌ای از حالت سکون شروع به حرکت می‌کند و پس از ۱۰ ثانیه سرعت آن به ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد. مسافت طی شده در این ۱۰ ثانیه چقدر است؟

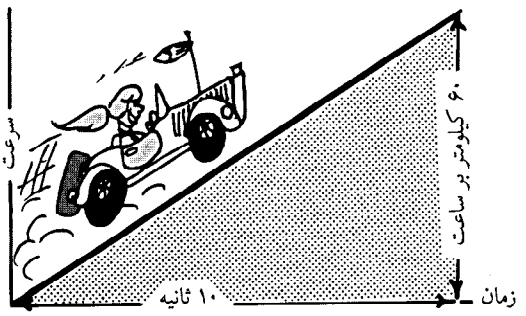
الف) ۱٫۶۰ کیلومتر

ب) ۱٫۱۲ کیلومتر

ج) ۱٫۱۰ کیلومتر

د) ۱٫۲ کیلومتر

ه) ۶۰ کیلومتر

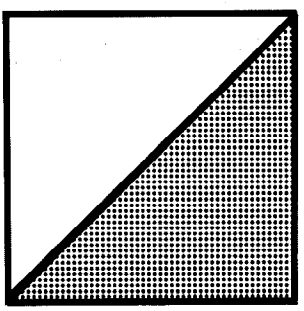


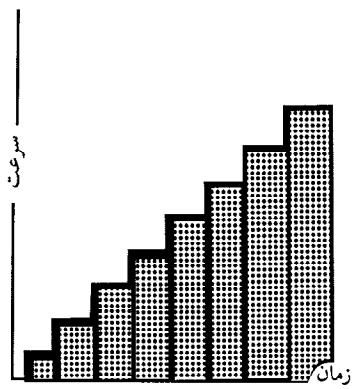
* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. ابتدا مدت زمان را به ساعت تبدیل می‌کنیم: ده ثانیه برحسب ساعت می‌شود ۱٫۳۶۰.

مساحت مثلث زیر خط سرعت برابر است با قاعده ضربدر نصف ارتفاع. ارتفاع برابر ۶۰ کیلومتر بر ساعت و قاعده برابر ۱٫۳۶۰ ساعت است. کل مسافت طی شده برابر است با

$$۱٫۲ \times ۶۰\ \text{km/h} \times ۱٫۳۶۰\ \text{h} = ۱٫۱۲\ \text{km}$$

اگر بخواهید می‌توانید مثلث را متشکل از پله‌هایی با عرض ثابت بدانید. هر پله یک لایه است.





اتومبیل بدون سرعت‌سنج

اتومبیل مسابقهٔ دیگری طوری مستعمل شده است که حتی سرعت‌سنج هم ندارد. این اتومبیل با حداکثر شتاب به حرکت درمی‌آید و ۱۰ ثانیه پس از شروع حرکت ۱٫۱۰ کیلومتر جلو می‌رود. حداکثر سرعت این اتومبیل در این مدت چقدر بوده است؟

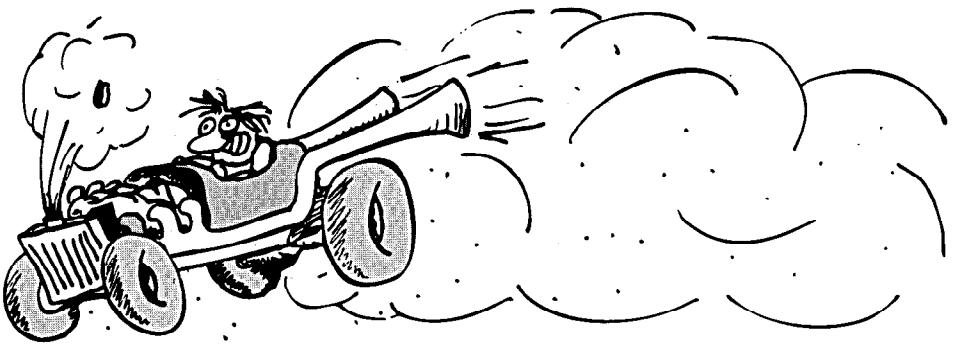
الف) ۶ کیلومتر بر ساعت

ب) ۵۲ کیلومتر بر ساعت

ج) ۶۰ کیلومتر بر ساعت

د) ۶۲ کیلومتر بر ساعت

ه) ۷۲ کیلومتر بر ساعت



* **پاسخ:** (ه) پاسخ درست است. این مسئله تقریباً همان مسئلهٔ اتومبیل مسابقه است.

راه حل کلی این نوع مسائل به‌صورت زیر است

$$\text{مسافت} = (\text{زمان}) \times (\text{بیشینه سرعت}) \times (۱٫۲)$$

بنابراین در این حالت داریم

$$۱٫۲ \times (x\ \text{km/h}) \times (۱٫۳۶۰\ \text{h}) = ۱٫۱۰\ \text{km}$$

دوطرف این معادله را بر ۱٫۳۶۰ h تقسیم کنید.

$$\frac{۱٫۲ \times (x\ \text{km/h}) \times (۱٫۳۶۰\ \text{h})}{۱٫۳۶۰\ \text{h}} = \frac{۱٫۱۰\ \text{km}}{۱٫۳۶۰\ \text{h}}$$

و بالاخره

$$x\ \text{km/h} = ۲ \times ۳۶\ \text{km/h}$$

$$x = ۷۲\ \text{km/h}$$

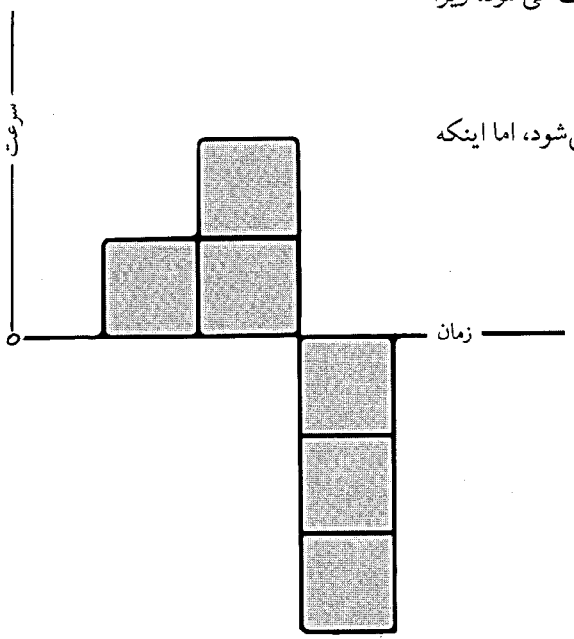
نه‌چندان دور

با توجه به نمودار سرعت بگویید که متحرک در چه فاصله‌ای از نقطهٔ شروع حرکت متوقف می‌شود؟

الف) نمی‌توان گفت متحرک کجا متوقف می‌شود، زیرا نمودار مقیاس عددی ندارد.

ب) در همان نقطهٔ شروع می‌ایستد.

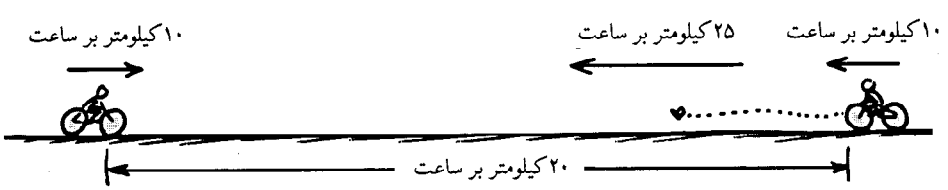
ج) در نقطهٔ شروع حرکت متوقف نمی‌شود، اما اینکه کجا متوقف می‌شود معلوم نیست.



* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. منظور از سرعت کمتر از صفر چیست؟ منظور این است که متحرک به عقب برمی‌گردد. در نمودار، سه مربع بالاتر از صفر و سه مربع پایینتر از صفر دیده می‌شود. یعنی همان مسافتی را که متحرک جلو رفته به عقب برگشته است. بنابراین مسافرت دو سره است و در همان نقطهٔ شروع به پایان می‌رسد. شما می‌توانید بدون توجه به اینکه متحرک با چه سرعتی حرکت می‌کرده یا چه مدت در راه بوده است به همین نتیجه برسید! وقتی چیزهای مشابه را باهم مقایسه می‌کنیم واحد مقایسه چندان اهمیت ندارد.

دوچرخه‌ها و زنبور عسل

دو دوچرخه‌سوار با سرعت یکنواخت ۱۰ کیلومتر بر ساعت به طرف همدیگر حرکت می‌کنند. در لحظه‌ای که فاصلهٔ میان آنها ۲۰ کیلومتر است زنبور عسلی از چرخ جلو یکی از آنها، با سرعت یکنواخت ۲۵ کیلومتر بر ساعت، مستقیماً به طرف چرخ دوچرخهٔ دیگر پرواز می‌کند. زنبور به‌محض تماس با چرخ دوچرخه، بی‌درنگ برمی‌گردد و با همان سرعت به سوی دوچرخهٔ اول پرواز می‌کند و



این حرکت رفت و برگشتی را آنقدر تکرار می‌کند تا دوچرخه‌ها باهم برخورد کنند و زنبور بینوا لای چرخهای آنها له شود. این زنبور از لحظهٔ جدا شدن از چرخ دوچرخهٔ اول تا زمان پیش آمدن آن حادثهٔ ناگوار چند کیلومتر پرواز کرده است؟ (این مسئله، بسته به اینکه از چه راهی آن را حل کنید می‌تواند خیلی راحت یا خیلی مشکل باشد.)

الف) ۲۰ کیلومتر

ب) ۲۵ کیلومتر

ج) ۵۰ کیلومتر

د) بیشتر از ۵۰ کیلومتر

ه) این مسئله را با این معلومات نمی‌توان حل کرد.

* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. کل مسافتی که زنبور طی می‌کند ۲۵ کیلومتر است. ساده‌ترین راه حل این مسئله منظور کردن زمان حرکت است. دوچرخه‌ها پس از یک ساعت باهم برخورد می‌کنند زیرا هرکدام با سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت در حرکت‌اند و فاصلهٔ میان آنها هم ۲۰ کیلومتر است. بنابراین، زنبور پروازهای رفت و برگشتش را در مدت یک ساعت انجام می‌دهد. چون سرعت زنبور ۲۵ کیلومتر بر ساعت است کل مسافتی که طی می‌کند ۲۵ کیلومتر است. در اینجا هم عامل زمان یک عامل بسیار مهم در حل مسائل سرعت است!

گُرگی

دکتر تهرانی[1] با سگ شکاریش برای مدت یک ربع ساعت به گردش می‌رود. دکتر می‌خواهد گرگی را در این مدت تمرین بدهد. بنابراین هربار یک چوب‌دستی را به طرفی می‌اندازد و گرگی آن را برایش برمی‌گرداند. برای اینکه گرگی در طول گردش، بیشترین مدت ممکن را در حال دویدن باشد، دکتر باید چوب‌دستی را در کدام جهت پرت کند؟

الف) به طرف جلو

ب) به طرف عقب

۱. در متن اصلی، اسم دکتر Pisani و اسم سگ Sam است. من در موارد دیگر نیز اسامی خاص خارجی را با اسامی ایرانی جایگزین کرده‌ام. م.

ج) به طرفین
د) در همهٔ جهات، زیرا همهٔ جهات از این لحاظ یکسان‌اند.

* **پاسخ:** (د) پاسخ درست است. در اینجا نیز زمان عامل تعیین کننده است. تهرانی می‌خواهد که گرگی مدت ۱۵ دقیقه در حال دو باشد بدون توجه به اینکه چوب را به کدام طرف پرت کند. اما اگر مسئله بیشترین مدت زمان دویدن را به‌ازای هربار پرت کردن می‌خواست آن‌وقت (ب) پاسخ درست سؤال بود، یعنی به سمت عقب. زیرا در آن صورت گرگی مجبور بود مسافت اضافی‌ای را که دکتر هنگام رفتن او به دنبال چوب‌دستی طی کرده بود نیز بدود. درحالی که مسئله صرفاً این را می‌خواهد که گرگی در آن مدت در حال دو باقی بماند. گول‌زنک بود؟ نه! شاید، اما نکتهٔ مهم در این مسائل این است که شما سؤالی را پاسخ بدهید که منظور اصلی سؤال کننده بوده است. به‌عبارت دیگر، شما باید ابتدا منظور مسئله را خوب درک کنید و سپس به آن پاسخ بدهید. متأسفانه بسیاری از دانش‌آموزان در ورقه‌های امتحان غالباً سؤالهایی را پاسخ می‌دهند که اصلاً از آنها پرسیده نشده است. شما دقت کنید هنگام امتحان از این اشتباهها نکنید.

سرعت روی سرعت

اتوبوس واحد خیابان فردوسی با سرعت ۳۶۰ سانتیمتر بر ثانیه به میدان فردوسی نزدیک می‌شود. یکی از مسافران اتوبوس با سرعت ۹۰ سانتیمتر بر ثانیه نسبت به صندلیها و اشیای داخل اتوبوس به طرف جلو حرکت می‌کند. این شخص ساندویچی در دست دارد که با سرعت ۵ سانتیمتر بر ثانیه آن را فرو می‌دهد. مورچه‌ای روی ساندویچ از طرف نزدیک به دهان با سرعت ۲٫۵ سانتیمتر بر ثانیه به طرف انتهای دیگر

ساندویچ در حرکت است. اکنون سؤال این است که مورچه با چه سرعتی به میدان فردوسی نزدیک می‌شود؟

الف) صفر سانتیمتر بر ثانیه

ب) ۲۵۰ سانتیمتر بر ثانیه

ج) ۴۲۵ سانتیمتر بر ثانیه

د) ۴۴۷/۵ سانتیمتر بر ثانیه

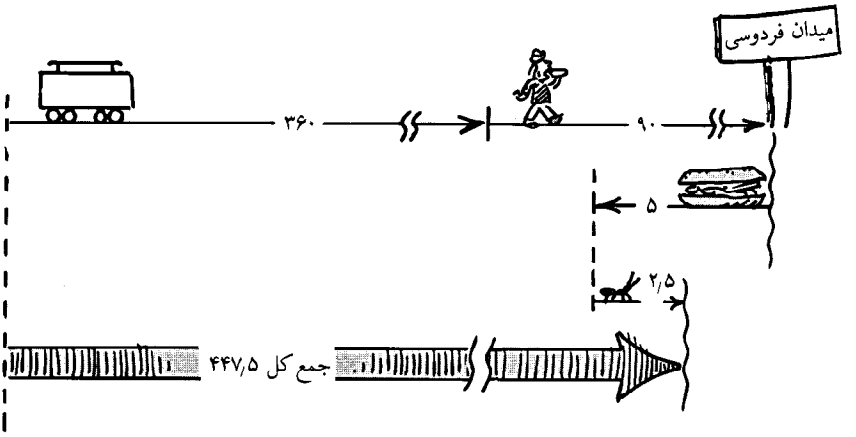
آیا می‌توانید جوابهای بالا را از سانتیمتر بر ثانیه به کیلومتر بر ساعت تبدیل کنید؟ (برای این کار محاسبهٔ ریاضی لازم نیست.)

الف) بله

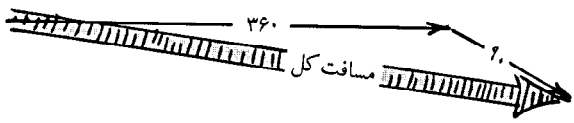
ب) خیر

اگر جواب شما بله است آن‌وقت چگونه می‌توانید از مسافتی که مورچه در یک ساعت طی می‌کند صحبت کنید، درحالی که مورچهٔ بینوا ظرف چند ثانیه همراه با ساندویچ از هضم رابع شخص مسافر هم می‌گذرد؟

* **پاسخ:** (د) پاسخ درست سؤال اول است. می‌توانید مسئله را به‌صورت زیر تصویر کنید. سرعت اتوبوس واحد را با سرعت مسافر جمع کنید (هردو رو به جلو حرکت می‌کنند). سرعت فرو دادن ساندویچ (که در جهت عکس است) را از مجموع آنها کم کنید و سپس سرعت مورچه را (که به طرف میدان فردوسی است) به حاصل جمع بیفزایید.

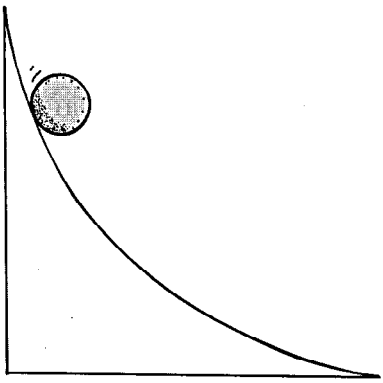


همین روش را می‌توان برای جمع کردن سرعتهایی که در یک راستا نیستند نیز به‌کار برد. به‌عنوان مثال، اگر مسافر با زاویه نسبت به اتوبوس واحد حرکت می‌کرد (صرف‌نظر از سرعت ساندویچ و مورچه) شکل مسئله به‌صورت دیگر بود.



(الف) پاسخ درست سؤال دوم است. توجه داشته باشید که وقتی از کیلومتر بر ساعت صحبت به میان می‌آورید منظورتان را در قالب جملهٔ شرطی بیان می‌کنید. شما نمی‌گویید چقدر خواهد رفت بلکه می‌گویید اگر می‌توانست یک ساعت راه برود چقدر می‌رفت.

سرعت شتاب نیست



گلوله‌ای از سرازیری تپهٔ مقابل پایین می‌آید.

الف) سرعت آن افزایش و شتاب آن کاهش می‌یابد

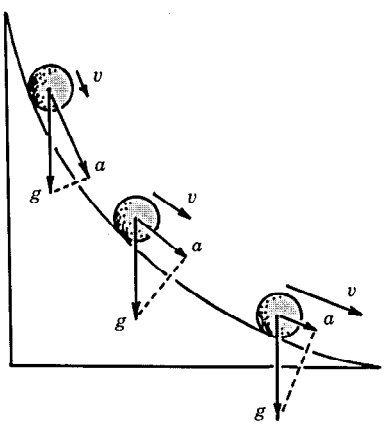
ب) سرعت آن کاهش و شتاب آن افزایش می‌یابد

ج) هردو افزایش می‌یابند

د) هردو ثابت باقی می‌مانند

هـ) هردو کاهش می‌یابند

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. سرعت گلوله، ضمن پایین غلتیدن از سرازیری تپه، افزایش می‌یابد اما شتاب آن به شیب تپه بستگی دارد. شتاب در بالای تپه بیشترین مقدار را دارد زیرا شیب تپه در آنجا حداکثر است و همچنان که گلوله به پایین می‌غلتد شیب کم می‌شود و شتاب کاهش می‌یابد. پس، با این حساب، شتاب درضمن افزایش سرعت کاهش می‌یابد. از این مثال برای درک اختلاف میان شتاب و سرعت استفاده کنید و همیشه آن را به‌خاطر بسپارید.

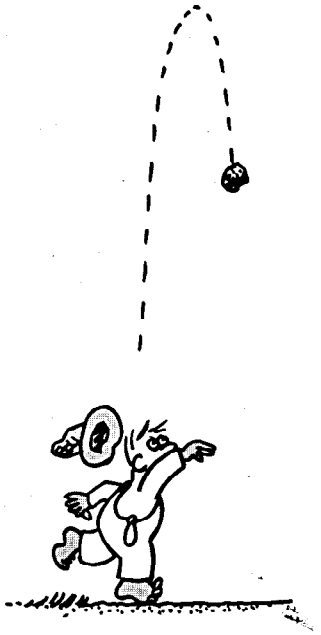


در نمودار روبه‌رو شتاب گلوله را با a، موازی با سطح و به‌صورت مؤلفه‌ای از g، شتاب سقوط آزاد یا شتاب "شیب" قائم، نشان داده‌ایم. هرچه شیب تندتر باشد شتاب a بیشتر به شتاب g نزدیک می‌شود. به‌عبارت دیگر، هرچه تندی شیب کمتر باشد شتاب به صفر (یعنی شتابی که گلوله هنگام رسیدن به سطح افق خواهد داشت) نزدیکتر می‌شود. بعداً از دو مؤلفهٔ برداری روی نمودار صحبت خواهیم کرد.

دقیقتر گفته باشیم، توصیف ما از شتاب در اینجا

کامل نیست، زیرا گلوله، به‌جای مسیر مستقیم، در یک مسیر خمیده حرکت می‌کند. حرکت خمیده خط شامل اثر دیگری است که بحث آن را به بعد موکول می‌کنیم.

شتاب در اوج



سنگی در امتداد قائم به طرف بالا پرت و سرعت آن در نقطهٔ اوج برای یک لحظه صفر می‌شود. شتاب سنگ در آن لحظه چقدر است؟

الف) صفر

ب) ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه

ج) بزرگتر از صفر، کوچکتر از ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه

* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. هرچند سرعت سنگ برای یک آن صفر می‌شود، اما هنوز آهنگ تغییر خود را حفظ کرده است. برای روشن شدن مطلب، حرکت سنگ را یک لحظه قبل یا یک لحظه بعد از صفر شدن سرعت در نظر بگیرید. یک آن قبل یا بعد از لحظهٔ سرعت ـ صفر، سنگ در حال حرکت است. به‌عنوان مثال، یک ثانیه قبل یا بعد از رسیدن به اوج، سرعت سنگ ۹۸۱ سانتیمتر بر ثانیه است. بنابراین هنگام عبور از لحظهٔ سرعت ـ صفر، همچون هنگام گذشتن از سایر مقادیر سرعت، آهنگ تغییر سرعت همچنان حفظ می‌شود. اگر مقاومت هوا قابل چشم‌پوشی باشد، این آهنگ تغییر ۹۸۱ سانتیمتر بر مجذور ثانیه است.

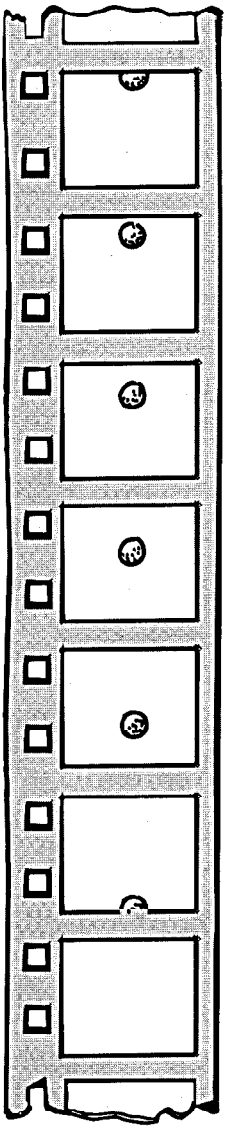
از دیدگاه دیگر، طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر هر جسم به آن جسم شتاب می‌دهد. نیروی گرانش در تمام نقاط مسیر بر سنگ اثر می‌کند و شتاب ثابتی در تمام نقاط مسیر (از جمله در نقطهٔ اوج) به آن می‌دهد. از همهٔ اینها گذشته، اگر سنگ در نقطهٔ اوج به حالت سکون برسد و شتاب هم نداشته باشد برای همیشه در همان نقطه جا خوش خواهد کرد.

برگشت زمان

فیلمی گلولهٔ در حال سقوط آزادی را نشان می‌دهد که با شتاب به طرف پایین سقوط می‌کند. حال اگر فیلم را به عقب برگردانیم شتاب گلوله:

الف) به سمت بالاست

ب) بازهم به سمت پایین است



* **پاسخ:** عجب! (ب) پاسخ درست است. اگر فیلم را به عقب برگردانیم گلوله در آن به طرف بالا می‌رود اما هنوز شتاب آن به سمت پایین است. اگر برگشتن فیلم را در مغز خود مجسم کنید متوجه خواهید شد که گلوله ابتدا به سمت بالا می‌رود و رفته‌رفته سرعت آن کم می‌شود؛ درست مثل اینکه آن را به طرف بالا پرت کرده باشید. واضح است که سرعت روبه‌بالا افزاینده نیست بنابراین شتاب این سرعت نمی‌تواند به سمت بالا باشد. اما چون سرعت، به‌هرحال، تغییر می‌کند شتابی در کار هست و کاهش سرعت به طرف بالا معادل شتاب روبه پایین است.

این مثال نشاندهندهٔ آهنگهای تغییر است. اگر زمان را معکوس کنیم آهنگ تغییر همه‌چیز معکوس خواهد شد، یعنی اگر قبلاً آهنگ تغییر چیزی افزاینده بوده است کاهنده خواهد شد. اما اگر زمان معکوس شود آهنگِ تغییرِ آهنگِ تغییر، معکوس نخواهد شد. شتاب عبارت است از آهنگ تغییر سرعت، و سرعت به‌نوبه خود عبارت است از آهنگ تغییرِ مکان، بنابراین شتاب، آهنگِ تغییرِ آهنگِ تغییر است و به‌همین دلیل معکوس نخواهد شد. دربارهٔ آهنگِ تغییرِ آهنگِ تغییر آهنگ تغییر چه می‌توان گفت؟ آیا این نیز با معکوس شدن زمان معکوس می‌شود؟ بله، معکوس می‌شود. اما آهنگِ تغییرِ آهنگِ تغییرِ آهنگ تغییر آهنگِ تغییر چطور؟ آیا این یکی نیز با معکوس شدن زمان معکوس می‌شود؟ اتفاقاً این عبارتهای طولانی آهنگ تغییر... را می‌توان با نمادهایی نشان داد و به این ترتیب در عبارت نویسی صرفه‌جویی کرد.

اگر X را نماد مکان جسم بدانیم، $\dot{X}$ آهنگ تغییر مکان یا سرعت جسم، $\ddot{X}$ شتاب جسم، $\dddot{X}$ آهنگ تغییر شتاب است که تکان نامیده می‌شود و $\ddddot{X}$ آهنگ تغییر تکان است که شاید شما همت کنید نام خوبی برای آن پیدا کنید.

سقوط سنگها

هر قطعه سنگی چندین بار از یک ریگ سنگینتر است، یعنی نیروی گرانش وارد بر سنگ چندین برابر نیروی گرانش وارد بر ریگ است. با وجود این، اگر سنگ و ریگ را همزمان از یک ارتفاع رها کنیم با شتاب یکسان سقوط خواهند کرد (با چشم‌پوشی از مقاومت هوا). دلیل اینکه شتاب سنگ از ریگ بیشتر نیست مربوط می‌شود به

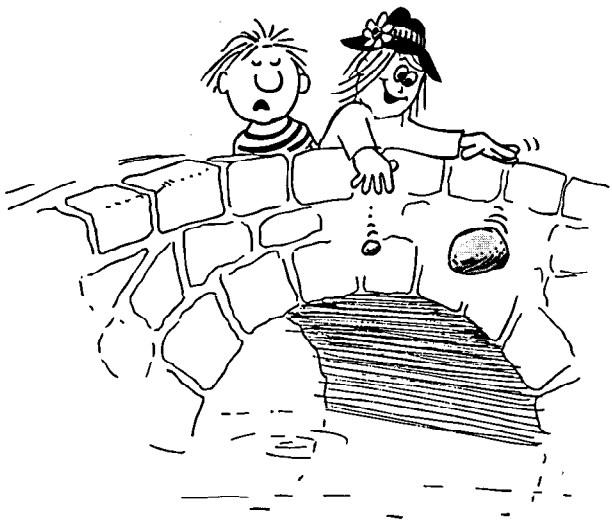
الف) انرژی

ب) وزن

ج) لختی

د) مساحت سطح

ه) هیچ‌کدام



پاسخ: (ج) پاسخ درست است. بلی به لختی مربوط می‌شود. اگر شتاب فقط با نیرو متناسب بود نیروی گرانی (ثقل) بزرگتری که به سنگ وارد می‌شد شتابی به

آن می‌داد که از شتاب ریگ بیشتر بود. اما شتاب هر جسم به جرم (لختی) آن نیز بستگی دارد. جرم در برابر شتاب مقاومت می‌کند. به‌ازای یک نیروی معین، هرچه جرم بزرگتر باشد شتاب حاصل کمتر است. این بیان همان قانون دوم نیوتون است که بنا به آن شتاب با برایند نیروهای وارد بر جسم به‌طور مستقیم و با جرم آن به‌طور معکوس متناسب است.

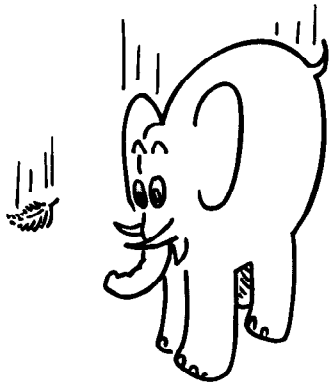
$$a = \frac{F}{m}$$

تنها نیروی وارد بر جسم در حال سقوط آزاد نیروی گرانی (یا وزن آن) است و وزن هم با جرم متناسب است (وزن دو کیلوگرم شکر دو برابر وزن یک کیلوگرم شکر است). سنگی که وزنش صد برابر وزن یک ریگ باشد جرمش هم صد برابر جرم ریگ است. این سنگ را گرانی با نیرویی صد برابر بزرگتر از نیروی وارد بر ریگ می‌کشد اما لختی یا بیمیلی آن در برابر تغییرات حرکت نیز صد برابر لختی یا بیمیلی ریگ است.

بنابراین، مشاهده می‌کنیم که نسبت نیرو به جرم (یا شتاب) برای تمام اجسامی که سقوط آزاد می‌کنند یکسان (و برابر $۹۸۱\ cm/s^۲$) است! هنگامی که مقاومت هوا قابل چشم‌پوشی نیست (مسئلهٔ بعد) شتاب سقوط آزاد کمتر از $۹۸۱\ cm/s^۲$ است. اگر نیروی مقاومت هوا با وزن جسم سقوط کننده برابر شود نیروی خالص وارد بر جسم و در نتیجه شتاب آن صفر می‌شود.

فیل و پر

یک فیل و یک پر از روی درخت بلندی هم‌زمان سقوط می‌کنند. نیروی مقاومت هوا بر روی کدام‌یک بیشتر است؟



الف) فیل
ب) پر
ج) نیروی مقاومت هوا بر هردو یکسان است.

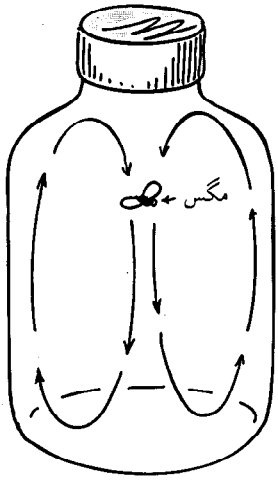
پاسخ: (الف) پاسخ درست است. توجه کنید که اگرچه اثرهای مقاومت هوا بر روی پر محسوستر است اما نیروی واقعی مقاومت هوا در برابر فیل چندین برابر بزرگتر است از نیروی مقاومت هوا در برابر پر. همچنین فیل سنگین در هوا تندتر سقوط می‌کند و مقاومت هوا در برابر آن بازهم بیشتر می‌شود. پر خیلی سبک است (در حدود گرم) و قبل از آنکه نیروی مقاومت هوا با وزنش برابر شود سرعتش چندان زیاد نمی‌شود. پس از آن پر به سرعت حد می‌رسد. از این لحظه به بعد شتاب صفر می‌شود و هم سرعت و هم نیروی مقاومت هوا تا پایان مدت سقوط ثابت باقی می‌مانند. از طرف دیگر، نیروی مقاومت هوا در برابر فیل مثلاً تا ۲۰ نیوتون افزایش می‌یابد. این نیرو نسبت به نیروی مقاومت هوا در مقابل پر خیلی زیاد است اما در مقایسه با وزن یک فیل بینوای ۲ تنی که با سرعت فزاینده به طرف زمین سقوط می‌کند قابل چشم‌پوشی است.

اگر شما به این پرسش پاسخ درست نداده‌اید احتمالاً به این دلیل بوده است که منظور اصلی پرسش را متوجه نشده‌اید. به‌عبارت دیگر، به پرسشی که باید پاسخ نداده‌اید. دقت کنید که میان آنچه درباره‌اش پرسیده می‌شود و اثر آن باید تمایز قائل بشوید. از این نوع پرسشها فراوان مطرح شده است، بنابراین خیلی مواظب باشید.

شیشهٔ مگس

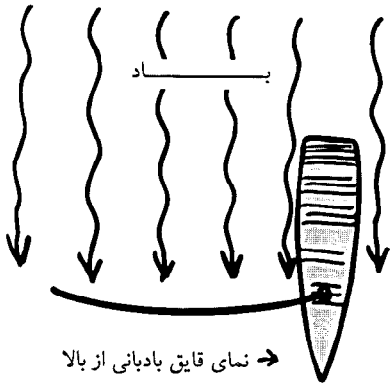
یک دسته مگس را در شیشهٔ در بسته‌ای قرار داده‌ایم. شیشهٔ مگس را روی ترازو می‌گذاریم. ترازو موقعی وزن بیشتری را نشان می‌دهد که مگسها:
الف) در ته ظرف نشسته باشند
ب) در فضای داخل ظرف در حال پرواز باشند
ج) ... وزن شیشه در هردو حالت یکسان است

پاسخ: (ج) پاسخ درست است. وقتی مگسها از ته شیشه بلند می‌شوند یا بر آن فرود می‌آیند ممکن است



وزن آن اندکی تغییر کند. اما اگر در داخل شیشهٔ دربسته در حال پرواز باقی بمانند یا در ته آن نشسته باشند وزن شیشه تغییر نمی‌کند. وزن شیشه بستگی دارد به جرم داخل آنکه تغییر نمی‌کند. اما چگونه وزن یک مگس در حال پرواز به ته شیشه منتقل می‌شود؟ به‌وسیلهٔ جریان هوا، مخصوصاً جریانهای رو به پایینی که بال مگسها تولید می‌کنند. اما آن جریانهای رو به پایین باید به طرف بالا هم برگردند. آیا ممکن است نیروی جریانهای هوا بر ته ظرف با همین نیرو بر در ظرف برابر باشد؟ خیر. اثر این جریانها بر ته ظرف بیشتر است زیرا سرعت آنها از سرعت جریانهای سربالا بیشتر است. چه چیز سبب کند شدن سرعت جریانهای هوا می‌شود؟ اصطکاک. اگر اصطکاک نبود، مگس نمی‌توانست پرواز کند.

همراه باد



همه قایق‌سواری را دوست دارند، مخصوصاً وقتی که باد می‌وزد. فرض کنید در قایقی با بادبان کاملاً برافراشته نشسته‌اید و مستقیماً در جهت وزش باد حرکت می‌کنید. سرعت باد ۳۰ km/h است و کاملاً عمود بر بادبان می‌وزد. بیشینهٔ (ماکزیمم) سرعتی که قایق به‌دست می‌آورد عبارت است از

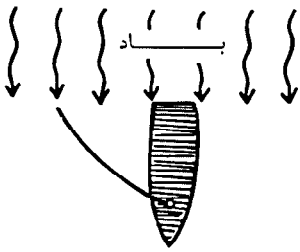
الف) ۳۰ km/h

ب) بین ۳۰ km/h و ۶۰ km/h

ج) ... در این مورد هیچ حد نظریی برای سرعت نمی‌توان در نظر گرفت

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. درصورتی که اصطکاک آب در مقابل حرکت قایق صفر باشد، بیشینهٔ سرعتی که قایق می‌تواند به دست بیاورد همان سرعت باد است و هیچگاه تندتر از باد حرکت نخواهد کرد. چرا؟ زیرا اگر قایق با سرعت باد حرکت کند باد دیگر به بادبان آن فشار وارد نمی‌کند. در این حالت، همچون روزهایی که باد نمی‌وزد، بادبان شکم می‌دهد. هنگامی که قایق با سرعت باد حرکت می‌کند، نسبت به بادبان بادی وجود نخواهد داشت.

بازهم همراه باد

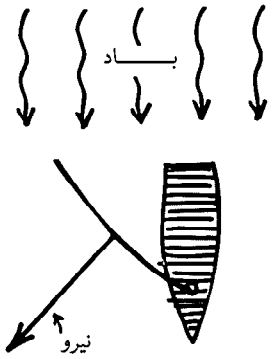


فرض کنید بازهم در قایق نشسته‌اید و مستقیماً در جهت وزش باد حرکت می‌کنید، اما این بار بادبان را از یک طرف به داخل می‌کشید، به‌گونه‌ای که زاویهٔ آن با امتداد بدنهٔ قایق ۹۰ درجه نباشد. آیا با این کار سرعت قایق

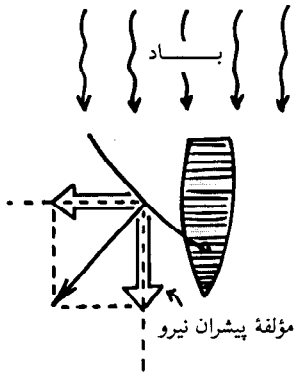
الف) کم می‌شود

ب) زیاد می‌شود

ج) تغییر نمی‌کند

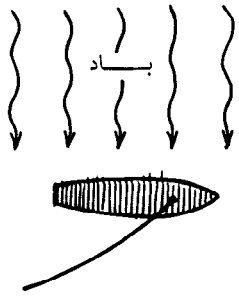


پاسخ: (الف) پاسخ درست پرسش است، به دو دلیل. اولاً به خاطر موقعیت بادبان، زیرا باد کمتری با آن برخورد می‌کند. ثانیاً به این دلیل که راستای نیروی برخورد باد با راستای حرکت قایق یکی نیست. می‌دانیم که هرگاه شاره‌ای، اعم از گاز یا مایع، با سطح هموار برخورد کند، نیروی برخورد بر آن سطح هموار عمود است. بنابراین بردار نمایندهٔ این نیرو، همچنان که در شکل می‌بینید، بر سطح عمود است. این بردار نه‌تنها از بردار بیشینهٔ سرعت باد که در پرسش قبل مطرح شد کوچکتر است بلکه تنها کسری از آن در جهت حرکت قایق اثر می‌کند. همین مؤلفه از سرعت باد است که قایق را به پیش می‌راند (مؤلفهٔ جانبی فقط در جهت واژگون شدن قایق عمل می‌کند و هیچ‌گونه سهمی درحرکت روبه‌جلو ندارد). بنابراین بازهم قایق بر اثر نیروی باد به پیش می‌رود اما این نیرو با نیروی مسئلهٔ پیش برابر نیست. هرچه بادبان بیشتر به داخل کشیده شود از بزرگی بردار نیرو کاسته و مؤلفهٔ پیش‌برندهٔ قایق کوچکتر می‌شود. وقتی بادبان کاملاً به داخل کشیده می‌شود و در امتداد بدنهٔ کشتی قرار می‌گیرد، هیچ نیرویی از طرف باد برآن وارد نمی‌شود و نیروی پیشران در این حالت صفر است.



عمود بر جهت وزش باد

فرض کنید زاویهٔ بادبان با امتداد بدنهٔ قایق برابر زاویهٔ نظیر در مسئلهٔ پیش است و شما، به‌جای اینکه مستقیماً در جهت وزش باد حرکت کنید، سمتگیری قایق را چنان انتخاب می‌کنید که عمود بر راستای

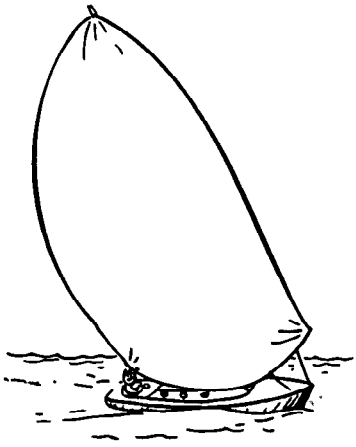


وزش باد حرکت کند. آیا سرعت شما نسبت به حالت قبل

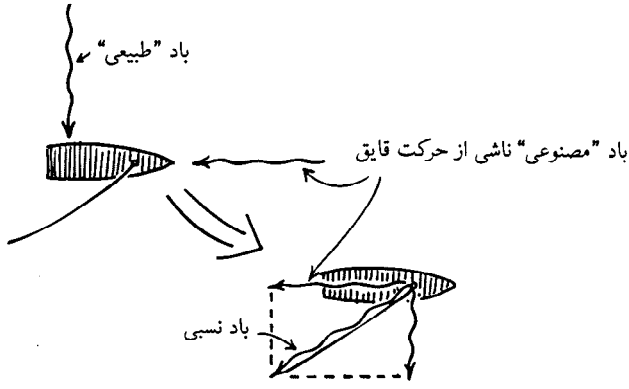
الف) بیشتر می‌شود

ب) کمتر می‌شود

ج) فرق نمی‌کند



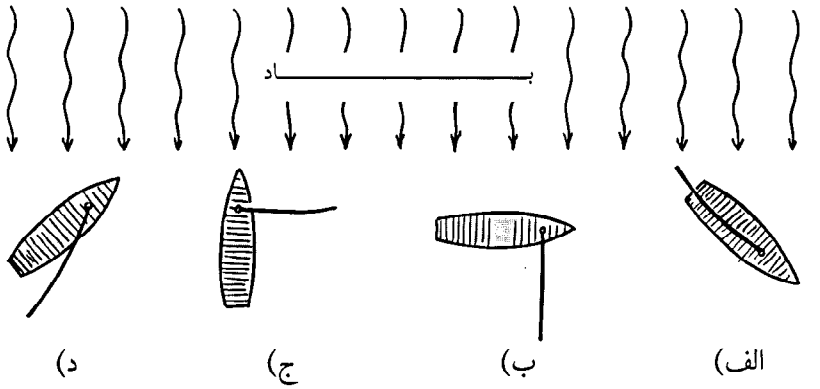
* **پاسخ:** (الف) پاسخ درست پرسش است. همانند پرسش پیش بردار نیروی عمود بر سطح بادبان را می‌توان به دو مؤلفه تجزیه کرد. یکی در راستایی که قایق حرکت می‌کند (مؤلفهٔ پیشران قایق) و دیگری عمود بر حرکت قایق که اثری در پیش رفتن آن ندارد. حال اگر بردار نیروی اصلی (نیروی باد بر بادبان) در این حالت از بردار نیروی حالت قبل بزرگتر نبود، سرعت قایق با سرعت آن در مسئلهٔ قبل برابر بود: اما بردار نیرو در این حالت بزرگتر است. چرا؟ زیرا بادبان به سرعت باد نمی‌رسد و بنابراین مثل حالت قبل شکم نمی‌دهد. حتی هنگامی که قایق با سرعت باد حرکت می‌کند بازهم باد به بادبان فشار می‌آورد. این امر سبب می‌شود که قایق در این حالت از باد تندتر حرکت کند. هنگامی قایق به سرعت نهایی می‌رسد که "باد نسبی" (برایند باد "طبیعی" و "باد مصنوعی" ناشی از حرکت قایق) در امتداد بادبان بوزد و هیچ اثری برآن نداشته باشد. وقتی زاویهٔ باد نسبی با زاویهٔ بادبان نسبت به امتداد بدنهٔ قایق برابر باشد باد به بادبان فشار نمی‌آورد.



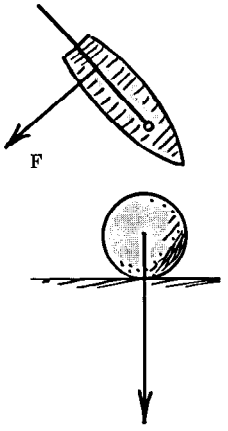
وقتی زاویهٔ باد نسبی برابر زاویهٔ بادبان است باد به بادبان فشار نمی‌آورد

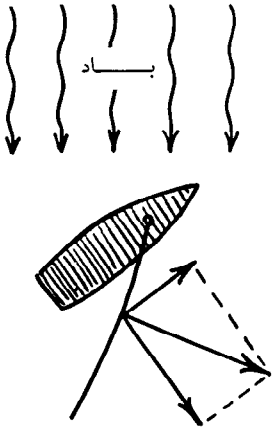
در خلاف جهت باد

برای اینکه بتوانید این مسئله را حل کنید باید سه مسئله قبل را فهمیده باشید. در چهار قایق زیر به سمتگیری بادبانها نسبت به باد و امتداد بدنهٔ قایق توجه کنید. سرعت کدام‌یک از این قایقها از بقیه بیشتر است؟



* **پاسخ:** (د) پاسخ درست پرسش است. این تنها قایقی است که در جهت روبه‌جلو حرکت می‌کند. سمتگیری قایق (الف) طوری است که بردار نیرو بر راستایی که قایق می‌تواند در آن راستا آزادانه حرکت کند عمود است. این نیروی کاملاً جانبی نه در راستای روبه‌جلو و نه در راستای روبه‌عقب مؤلفه‌ای ندارد. اثر این نیرو در سوق دادن قایق به جلو مانند اثر نیروی روبه‌پایین گرانی بر توپی است که روی سطح افق می‌غلتد. قایق (ب) روی هم‌رفته برخوردی با باد ندارد زیرا باد از کنار بادبان می‌گذرد و با آن برخورد نمی‌کند. بادبان قایق (ج) با همهٔ باد برخورد می‌کند اما جهت وزش باد خلاف جهت حرکت آن است. وضع قایق (د) چندان با قایق پرسش "عمود بر جهت وزش باد" تفاوت نمی‌کند. از روی شکل مشاهده می‌شود که بردار نیرو مؤلفه‌ای در جهت روبه‌جلو دارد. این مؤلفه قایق را با زاویهٔ مشخص شده به طرف باد و در جهت خلاف آن به پیش می‌راند. این قایق می‌تواند تندتر از قایق "عمود بر جهت وزش باد" پیش برود، زیرا هرچه قایق تندتر حرکت می‌کند اثر نیروی





باد بر آن بیشتر است. بنابراین، بیشینهٔ سرعت قایق معمولاً در زاویه‌ای خلاف جهت باد به‌دست می‌آید! قایق نمی‌تواند مستقیماً خلاف جهت باد پیش برود، بنابراین برای رسیدن به محلی که برای رفتن به‌سوی آن باید خلاف جهت وزش باد مستقیماً پیش برود، به‌طور زیگزاگ به عقب و به جلو حرکت می‌کند. این حرکت را در قایقرانی به اصطلاح "باد عوض کردن" می‌گویند.

مرد پرزور

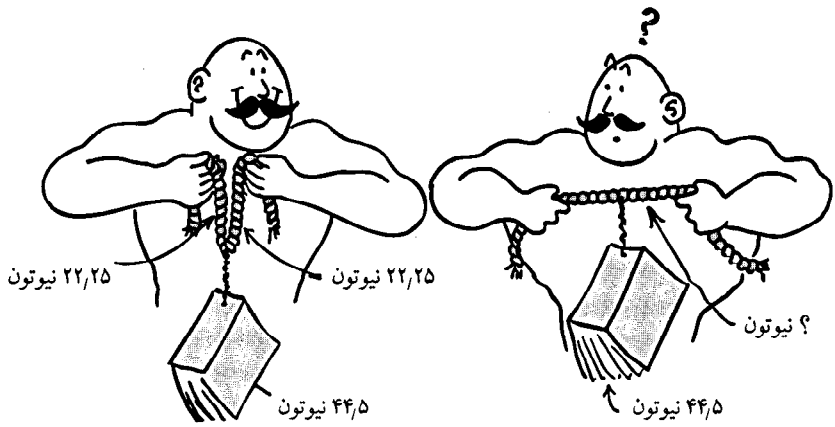
مرد پرزوری یک کتاب راهنمای تلفن ۴۴٫۵ نیوتونی را با دو رشته طناب به‌طور قائم نگه داشته است. کشش هر رشته طناب برابر ۲۲٫۲۵ نیوتون است. اگر این مرد کتاب را طوری نگه دارد که مطابق شکل طناب به حالت افقی دربیاید، کشش هر رشته از طناب چقدر است؟

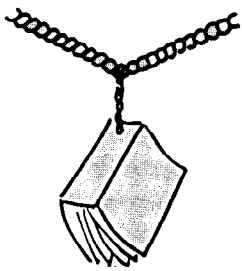
الف) در حدود ۲۲٫۲۵ نیوتون

ب) در حدود ۴۴٫۵ نیوتون

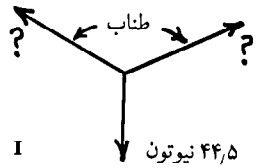
ج) در حدود ۸۹ نیوتون

د) بیشتر از یک میلیون نیوتون

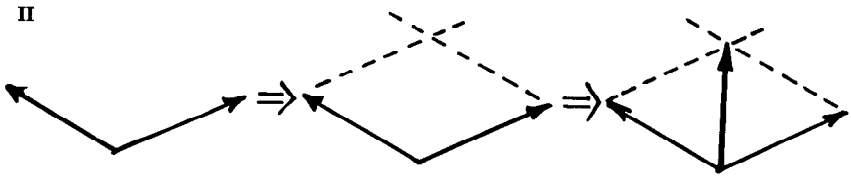




* **پاسخ:** (د) پاسخ درست پرسش است. کتابی را در نظر بگیرید که به وسیلهٔ طنابی با زاویهٔ مشخص نگه داشته شده است. همهٔ نیروهای وارد بر کتاب را با بردار نمایش می‌دهیم. بردار ۴۴٫۵ نیوتونی نمایندهٔ وزن کتاب است و جهت آن مستقیماً به طرف مرکز زمین است. طول این بردار را مقیاس ۴۴٫۵ نیوتون در نظر می‌گیریم. طول بقیهٔ بردارهایی که کتاب را نگه داشته‌اند نسبت به این مقیاس چقدر است؟ اندازهٔ این بردارها نسبت به بردار مقیاس ۴۴٫۵ نیوتونی، کششهای وارد بر طناب را به‌دست می‌دهد.

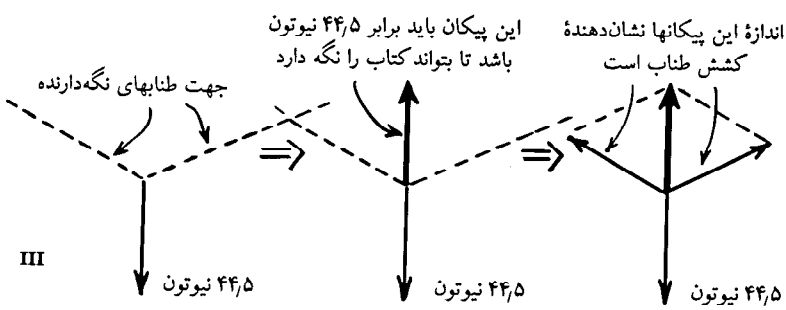


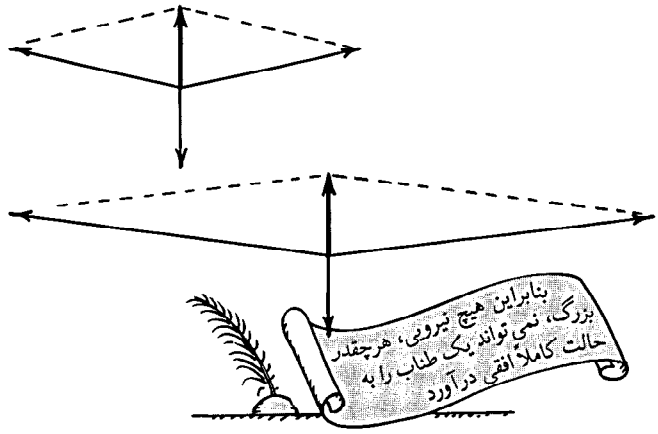
هرگاه دو نیرو باهم اثر کنند اثر مجموع آنها را می‌توانیم با روش زیر تعیین کنیم: ابتدا دو نیرو را با دو بردار نمایش می‌دهیم (شکل II). سپس روی این دو بردار متوازی‌الاضلاع خط‌چین را کامل می‌کنیم. بعد از آن قطر متوازی‌الاضلاع را رسم می‌کنیم. قطر متوازی‌الاضلاع نمایندهٔ برایند (مجموع) دو نیروست.



بعضیها فکر می‌کنند که هرچه طول طنابی که با آن جسمی را می‌کشیم بلندتر باشد بردار نیروی مربوط را نیز باید بلندتر رسم کنیم. این گفته درست نیست. طول بردار نیرو فقط به مقدار یا اندازهٔ بزرگی نیرو بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، طول بردار نیرو بستگی دارد به اینکه شما چقدر جسم را محکم می‌کشید و هیچ‌ربطی به طول طناب ندارد.

اثر کلی کشش بر روی طنابها باید طوری باشد که یک کتاب ۴۴٫۵ نیوتونی را نگه دارد. به تعبیر دیگر، اثر کلی کشش بر روی طنابها باید یک نیروی ۴۴٫۵ نیوتونی روبه بالا باشد. طنابها برای تولید این نیروی ۴۴٫۵ نیوتونی روبه بالا چه مقدار باید نیرو اعمال کنند؟ برای پیدا کردن این نیرو ابتدا دو خط را در امتداد طنابها به‌صورت خط‌چین رسم کنید (شکل III) و سپس نیروی ۴۴٫۵ نیوتونی روبه بالا را که طنابها باید تولید کنند بکشید (پیکان پررنگ). آنگاه از رأس این پیکان پررنگ دو خط نقطه‌چین را طوری رسم کنید که با طنابها یک متوازی‌الاضلاع تشکیل بدهند. هرکجا خطهای نقطه‌چین امتداد طنابها را قطع کرد، پیکان نیروها را در همانجا رسم کنید. بردارهای نیرویی که از این طریق روی طنابها به‌دست می‌آید نمایندهٔ نیروهایی است که طنابها اعمال می‌کنند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، طول هرکدام از این بردارها از طول بردار ۴۴٫۵ نیوتونی بلندتر است، بنابراین هرکدام به‌تنهایی از ۴۴٫۵ نیوتون بیشترند.

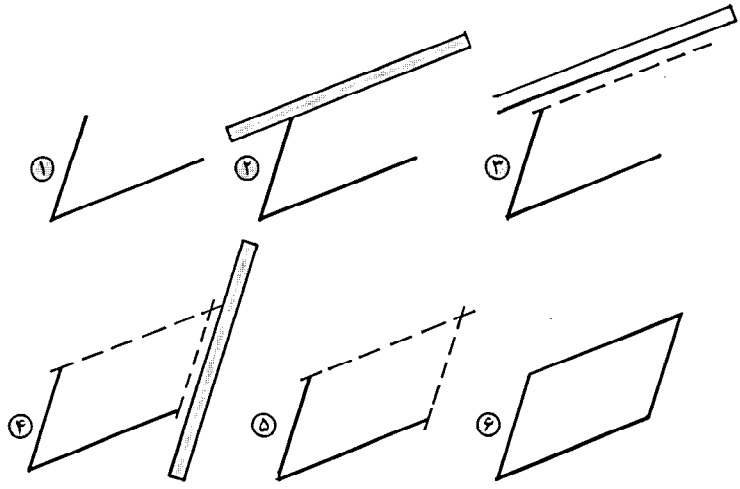




اکنون می‌توانید مقدار بزرگی این نیروها را با مقایسهٔ طول آنها با طول بردار ۴۴٫۵ نیوتونی تخمین بزنید، زیرا اگر نمودار را با دقت رسم کرده باشید، بردار ۴۴٫۵ نیوتونی می‌تواند مقیاس بسیار دقیقی باشد.

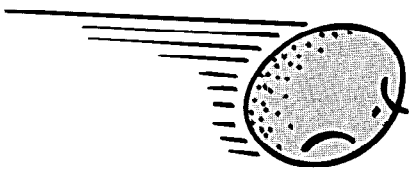
اما مرد پرقدرت ما نمی‌تواند کتاب را طوری نگه دارد که طناب به حالت کاملاً افقی کشیده شود. از روی شکل دیده می‌شود که هرچه طناب افقیتر باشد کشش آن بیشتر می‌شود، زیرا هرچه زاویهٔ میان دو قسمت طناب بزرگتر باشد متوازی‌الاضلاع درازتر می‌شود. در واقع، هرچه طنابها بیشتر به حالت افقی نزدیک شوند کشش لازم برای یک نیروی برایند ۴۴٫۵ نیوتونی به بینهایت نزدیک می‌شود. مُحال است کسی بتواند این طنابها را کاملاً به‌حالت افقی درآورد... هرکاری بکنیم بالاخره یک کمی خمیدگی در آنها باقی می‌ماند. بنابراین پاسخ "بیش از یک میلیون نیوتون" به حقیقت نزدیکتر است.

در زیر نحوهٔ رسم متوازی‌الاضلاع در شش مرحله از ۱ تا ۶ آمده است (لطفاً دقت کنید).



تکانه (اندازه حرکت)

تکانه عبارت است از لختی در حرکت و برابر است با حاصل‌ضرب جرم جسم در سرعت آن. به‌عنوان مثال، اگر سرعت گلولهٔ توپ دو برابر شود، تکانهٔ آن نیز دو برابر خواهد شد. یا اگر جرم گلوله دو برابر شود بازهم تکانهٔ آن‌دو برابر می‌شود. اما فرض کنید که جرم گلولهٔ توپ به طریقی دو برابر می‌شود و سرعت آن نیز دو برابر، در این صورت تکانهٔ آن



الف) تغییر نمی‌کند

ب) دو برابر می‌شود

ج) چهار برابر می‌شود

د) هیچ‌کدام

* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. این پاسخ با توجه به تعریف تکانه راحت به دست می‌آید: جرم ضربدر سرعت. دو برابر جرم ضربدر دو برابر سرعت می‌شود چهار برابر. هر جسمی در اثر ضربه تکانه به‌دست می‌آورد. ضربه عبارت است از "نیرو ضربدر زمانی که این نیرو طی آن عمل می‌کند".

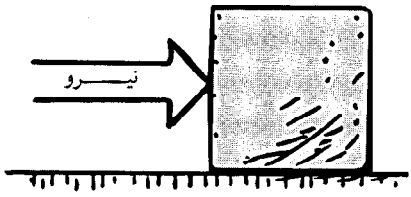
پس می‌توانیم بنویسیم

تغییرات تکانه = ضربه

و یا

$$Ft = \Delta mv$$

به‌حرکت درآوردن



مفاهیم ضربه و تکانه را اندکی بیشتر توضیح می‌دهیم. یک قطعه یخ را روی یک دریاچهٔ یخ‌زدهٔ بدون اصطکاک در نظر بگیرید. فرض کنید یک نیروی پیوسته بر این قطعه یخ اثر می‌کند. این نیرو یخ را به‌حرکت درمی‌آورد و به آن شتاب می‌دهد. پس از آنکه نیرو برای مدتی اثر کرد سرعت قطعه یخ تا مقدار معینی افزایش پیدا می‌کند. در این حالت اگر نیرو و جرم را ثابت نگه داریم و زمان اثر نیرو را دو برابر کنیم آیا سرعت یخ

الف) بدون تغییر می‌ماند

ب) دو برابر می‌شود

ج) سه برابر می‌شود

د) چهار برابر می‌شود

هـ) نصف می‌شود

سپس اگر نیرو و زمان اثر آن را ثابت نگه داریم اما جرم قطعه یخ را دو برابر کنیم آیا سرعت یخ

الف) بدون تغییر می‌ماند

ب) دو برابر می‌شود

ج) نصف می‌شود

د) چهار برابر می‌شود

هـ) $\frac{1}{4}$ برابر می‌شود

این‌بار فرض کنید که نیرو دو برابر می‌شود درحالی که جرم و زمان اثر نیرو تغییر نمی‌کنند. آیا سرعت قطعه یخ

الف) تغییر نمی‌کند

ب) دو برابر می‌شود

ج) نصف می‌شود

د) چهار برابر می‌شود

هـ) $\frac{1}{4}$ برابر می‌شود

سرانجام فرض کنید نیرو، جرم و زمان اثر نیرو همه ثابت‌اند، اما نیروی گرانی دو برابر می‌شود، مثل اینکه آزمایش در سیارهٔ دیگری انجام شده است. آیا سرعت قطعه یخ

الف) بدون تغییر می‌ماند

ب) دو برابر می‌شود

ج) نصف می‌شود

د) چهار برابر می‌شود

ه) $\frac{1}{4}$ برابر می‌شود

پاسخ: (ب) پاسخ درست پرسش اول است. نیرو در هر لحظه که به یخ وارد شود مقداری سرعت آن را افزایش می‌دهد. اگر زمان اثر نیرو را دو برابر کنید سرعت آن را نیز دو برابر کرده‌اید

(ج) پاسخ درست پرسش دوم است. به‌حرکت درآوردن دو قطعه یخ از یک قطعه یخ مشکلتر است. قطعه‌ای با دو برابر جرم یک قطعه یخ، معادل دو قطعهٔ اولیه است. حرکت دادن قطعه یخی که جرمش دو برابر شده است دو برابر مشکلتر است. بنابراین سرعت آن نصف می‌شود. توجه کنید که این قضیه هیچ ربطی به گرانی ندارد. حتی اگر قطعه یخ در فضای تهی از گرانی هم قرار داشته باشد در آنجا نیز برای تغییر حرکت آن نیرو لازم است. به‌همین دلیل است که فضاپیماها حتی در فضاهای دوردست نیز باید مجهز به موتور باشند تا بتوانند سرعت خود را تغییر دهند. وزن قطعه یخ ممکن است در فضا صفر باشد اما تمامی جرم یا لختی آن سر جای خودش باقی است (لختی مترادف جرم است)، یعنی هنوز هم در برابر سرعت مقاومت می‌کند.

(ب) پاسخ درست پرسش سوم است. نیرو سرعت را تغییر می‌دهد. اگر نیرو وجود نداشته باشد، تغییر سرعت هم وجود ندارد. اگر نیرو کم باشد تغییر سرعت کم و اگر نیرو زیاد باشد تغییر سرعت زیاد است. "هرچه پول بیشتر بدهید آش بیشتری می‌خورید". اگر نیرو دو برابر شود تغییرات سرعت هم دو برابر است، به‌عبارت دیگر شتاب دو برابر می‌شود.

(الف) پاسخ درست پرسش آخر است. با افزایش گرانی وزن قطعه یخ افزایش می‌یابد نه جرم یا لختی آن. در اینجا لختی قطعه یخ مؤثر است. اکنون اگر اصطکاک را به‌حساب بیاوریم وزن وارد عمل می‌شود. زیرا وزن اصطکاک را کنترل می‌کند، اما لغزیدن یخ بر روی یخ که در این پرسش مورد نظر است اصطکاک ندارد.

همهٔ این داستان را می‌توان در همان رابطهٔ کوچک چند صفحهٔ پیش[1] خلاصه کرد. بنابراین رابطه،

---

۱. معادله‌ها، رابطه‌های بسیار خلاصه و سودمندی هستند که وجود آنها برای فیزیکدانان ضروری است. اما غالباً خوب از آنها استفاده نمی‌شود. این معادله‌ها به‌جای اینکه وسیله‌ای باشند برای درک مفاهیم فیزیک خود هدف یادگیری واقع می‌شوند. قبل از ←

تغییرات سرعت مساوی است با نیرو ضربدر زمان تقسیم بر جرم، یعنی

$$\Delta v = \frac{Ft}{m}$$

که نوعی بازنویسی رابطهٔ ضربه = تغییرات تکانه ($Ft = \Delta mv$) است که در پرسش پیش آن را به‌طور خیلی خلاصه مطالعه کردیم.

نکتهٔ دیگر: تغییر حرکت لزوماً به معنی افزایش سرعت نیست، کاهش سرعت هم تغییر حرکت است. در صورتی که جهت نیرو عکس شود، افزایش سرعت را می‌توان کاهش سرعت در نظر گرفت. وانگهی، تغییرات سرعت می‌تواند تغییرات جانبی باشد، به‌شرط آنکه نیروی وارد بر قطعه یخ به‌طور جانبی اثر کند. چنین تغییری حتی مقدار سرعت را هم تغییر نمی‌دهد بلکه تنها جهت آن را تغییر می‌دهد!

و آخرین نکته: اگر زیاد دقیق نباشیم می‌توانیم "بردار سرعت" و "مقدار سرعت" را به‌جای هم به‌کار ببریم. اما دقیقتر این است که بگوییم مقدار سرعت معیار سرعت است بدون توجه به جهت آن و بردار سرعت اصطلاحی است برای مقدار سرعت با توجه به جهت آن. بنابراین سرعت می‌تواند تغییر بکند درحالی که مقدار سرعت ثابت است، مثل گلوله‌ای که در انتهای نخی در یک مسیر دایره‌ای می‌چرخد (در هر لحظه راستای سرعت تغییر می‌کند درحالی که سرعت‌سنج یک عدد را برای مقدار آن نشان می‌دهد).

بنابراین، تغییر سرعت شامل تغییر در مقدار سرعت یا در راستای حرکت است، درحالی که تغییر مقدار سرعت فقط تغییر در مقدار سرعت است. به‌همین دلیل فیزیکدانان شتاب را آهنگ زمانی تغییرات سرعت تعریف می‌کنند نه تغییرات مقدار سرعت.

تندباد

نیرویی که یک تندباد با سرعت ۱۸۰ km/h به خانه‌ای وارد می‌کند

الف) برابر

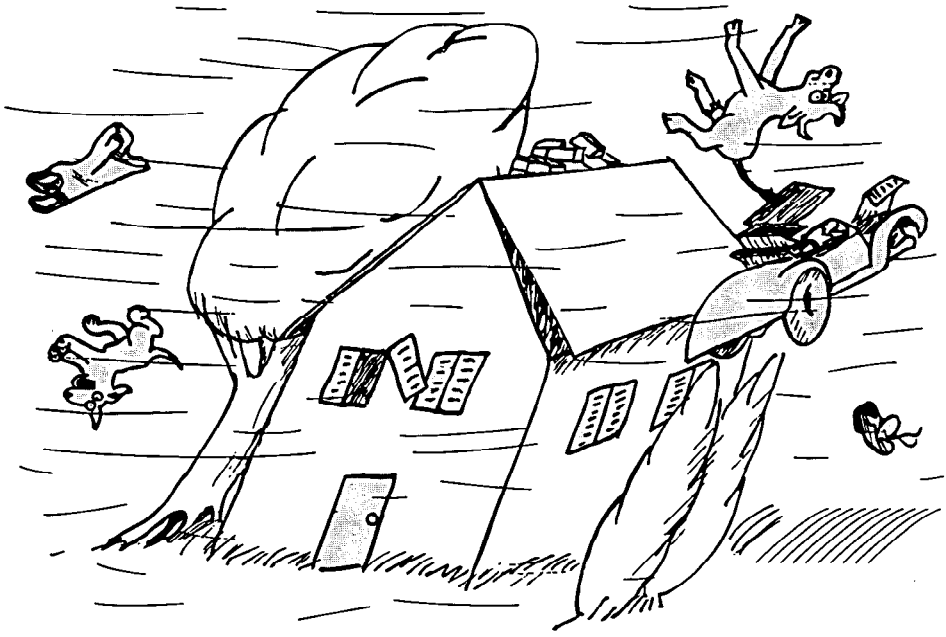
ب) دو برابر

ج) سه برابر

د) چهار برابر

نیرویی است که یک تندباد با سرعت ۹۰ km/h به همان خانه وارد می‌کند.

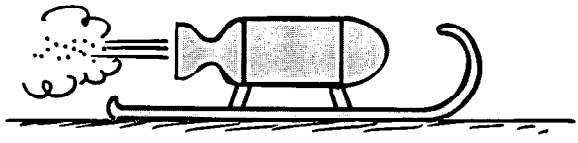
← آنکه مفهوم نمادهای موجود در هر معادله را یاد بگیرید هیچگاه سعی نکنید آن را به‌خاطر بسپارید. فقط پس از ادراک مفهوم نمادهاست که معادله‌ها واقعاً معنا پیدا می‌کنند.



* **پاسخ:** (د) پاسخ درست است. اگر سرعت باد دو برابر شود جرم هوایی که در هر ثانیه با خانه برخورد می‌کند نیز دو برابر می‌شود. اما مقدار سرعت نیز دو برابر می‌شود. دو برابر جرم و دو برابر سرعت به معنای چهار برابر کردن تکانه‌ای است که در هر ثانیه با خانه برخورد می‌کند. نیروی وارد برخانه با تکانه‌ای که در هرثانیه با آن برخورد می‌کند متناسب است. بنابراین اگر مقدار سرعت باد دو برابر شود نیرو چهار برابر می‌شود. اگر مقدار سرعت باد سه برابر شود چطور؟ نیرو نه برابر می‌شود.

سورتمه موشکی

سورتمهٔ کوچکی به وزن یک نیوتون بر روی یخ بدون اصطکاک با یک موتور موشک اسباب‌بازی به حرکت درمی‌آید. بعد از آنکه سوخت موشک تمام شد سورتمه با سرعت یک متر بر ثانیه بر روی یخ لیز می‌خورد. موتور چه نیرویی بر سورتمه اعمال کرده است؟



الف) یک نیوتون

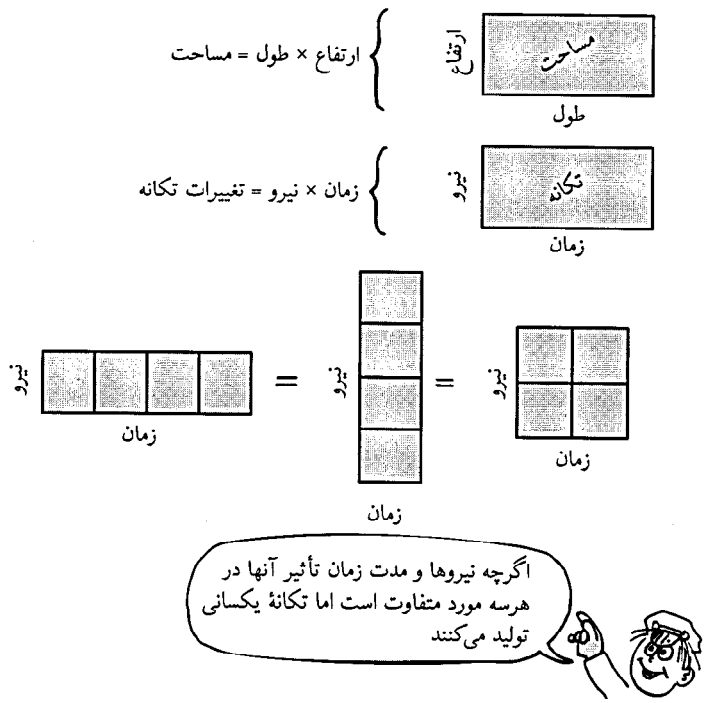
ب) ۴ نیوتون

ج) ۱۶نیوتون

د) ۳۲ نیوتون

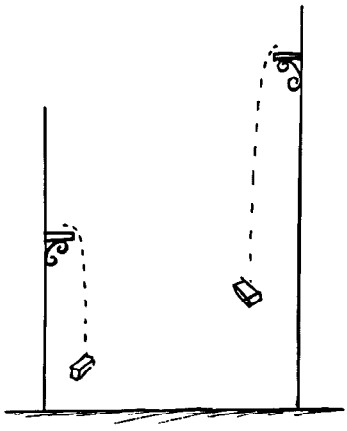
ه) با این معلومات نمی‌توان به مسئله پاسخ داد

* **پاسخ:** (ه) پاسخ درست پرسش است. درست است، با این معلومات نمی‌توانید به پرسش پاسخ بدهید! موتور این موشک می‌توانسته است نیروی کمی را در مدت زمان زیادی یا نیروی زیادی را در مدت کوتاهی اعمال کند. اما شما در این مسئله نمی‌توانید بگویید کدام‌یک از دو حالت بوده است. مثل این است که ازکسی بپرسیم طول مستطیلی که مساحت آن ۱۲ سانتیمتر مربع است چقدر است؟ ممکن است طول مستطیل ۱۲ و عرض آن ۱، یا طول آن ۶ و عرض آن ۲، یا طول آن ۴ و عرض آن ۳ بوده باشد. در سورتمه نیز تکانه مثل مساحت مستطیل، نیروی وارد برآن متناظر با طول و زمان تأثیر نیرو متناظر با عرض مستطیل است.



انرژی جنبشی

دیدیم که نیرو ضربدر زمانی که نیرو اثر می‌کند برابر است با تغییر تکانهٔ جسمی که نیرو بر آن اثر کرده است: ضربه = تغییرات تکانه ($\Delta mv = Ft$). اکنون می‌توانیم یک مفهوم مهم دیگر را در فیزیک که به اصل کار–انرژی معروف است مطالعه کنیم. کار انجام شده (نیرو × فاصله‌ای که نیرو در طول آن اثر می‌کند) روی یک جسم انرژی آن را افزایش می‌دهد. مثلاً، کار می‌تواند انرژی موقعیت جسم (انرژی پتانسیل گرانشی = وزن × ارتفاع) را افزایش دهد، و این انرژی به نوبهٔ خود می‌تواند به انرژی حرکتی که به انرژی جنبشی معروف است تبدیل شود. این قانون را برای حل مسئلهٔ زیر به‌کار ببرید:



یک آجر را تا یک ارتفاع معین بالا می‌بریم و سپس آن را رها می‌کنیم. سپس آجر دیگری (مشابه با آجر اولی) را تا ارتفاعی دو برابر ارتفاع اولی بالا می‌بریم و آن را نیز از آن ارتفاع رها می‌کنیم. وقتی آجر دوم با زمین برخورد می‌کند انرژی جنبشی آن

الف) نصف

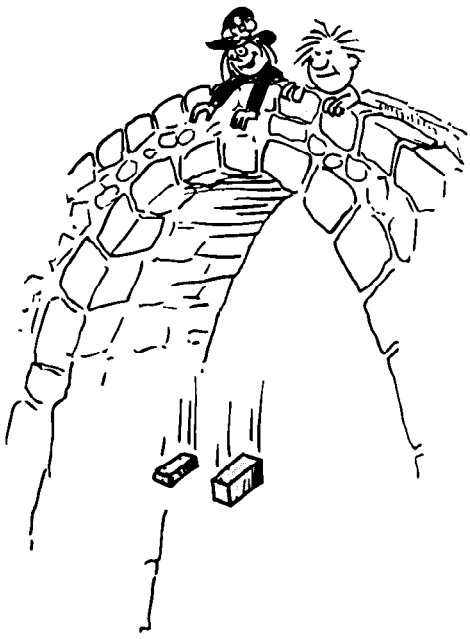
ب) برابر

ج) دو برابر

د) چهار برابر انرژی جنبشی آجر اول است

* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. برای بلند کردن جسمی تا ارتفاعی که دو برابر یک ارتفاع دیگر است دو برابر کار لازم است و تمام کاری که برای بالاتر بردن آجر صرف می‌شود هنگام سقوط به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

بازهم انرژی جنبشی



آجری از ارتفاع معینی رها می‌شود و سقوط می‌کند. سپس آجر دیگری که وزن آن‌دو برابر وزن آجر اولی است از همان ارتفاع به‌سوی زمین رها می‌شود. انرژی جنبشی آجر دوم هنگام برخورد با زمین

الف) نصف

ب) برابر

ج) دو برابر

د) چهار برابر انرژی جنبشی آجر اول است

* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. بالا بردن آجر دوم مثل بالا بردن دو آجر از نوع اول است و بنابراین دو برابر کار لازم دارد. همهٔ این کار هنگام سقوط به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

در دادگاه

وکیلی هنگام آماده کردن پرونده‌هایش برای دادگاه با مورد زیر برخورد می‌کند.[1] کسی شکایت کرده که یک گلدان به وزن ۴٫۵ نیوتون از فاصلهٔ ۳۰ سانتیمتری بر روی سرش افتاده است. وکیل می‌خواهد نیروی ضربهٔ وارد بر سر موکلش را محاسبه کند. به‌نظر شما این نیرو چقدر است؟

الف) ۴٫۵ نیوتون

ب) ۱۸ نیوتون

ج) ۷۲ نیوتون

د) ۱۴۴ نیوتون

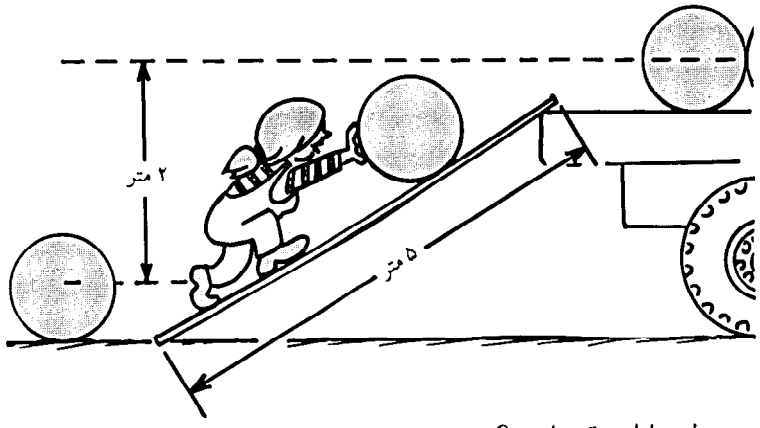
ه) از روی این معلومات نمی‌توان به سؤال وکیل پاسخ داد.

پاسخ: (ه) پاسخ درست است. حل این‌جور مسائل برای دانشجویان رشتهٔ فیزیک مثل "آب خوردن" است، اما محال است بدون دانستن میزان فرورفتن جمجمه (از جمله گردن، گلدان، مو و کلاه) کسی بتواند به آن پاسخ بدهد. اگر گلدان روی چیزی بیفتد که میزان فرورفتن آن زیاد است، مثل بالش، نیروی ضربهٔ آن خیلی ناچیز است. اگر روی یک چیز خیلی سفت بیفتد، می‌شکند! اگر روی چیزی بیفتد که اصلاً فرو نرود نیروی ضربه بینهایت بزرگ است! فرض کنید میزان فرورفتن کلهٔ موکل قاضی ما ۳ سانتیمتر باشد، آنگاه تمام انرژی گلدان در حال سقوط (یعنی ۳۰ سانتیمتر – ۴٫۵ نیوتون) باید در طول این ۳ سانتیمتر مصرف شود و به حال سکون درآید. کار نیروی ۴٫۵ نیوتون در طول ۳۰ سانتیمتر با کار نیروی ۴۵ نیوتون در طول ۳ سانتیمتر برابر است. (ضمناً خاصیت کلاههای سخت یا ضربه‌گیر در سخت بودن آنها نیست، بلکه در این است که میزان فرو رفتن آنها زیاد است. شاید در سیارهٔ دیگر و به زبانی دیگر آنها را "کلاههای فرورو" بنامند).

بارگیری

شخصی بشکه‌ای به وزن ۱۰۰ نیوتون را با استفاده از یک سطح شیبدار روی کامیون می‌گذارد. اگر ارتفاع کف کامیون تا سطح زمین ۲ متر و طول سطح شیبدار ۵ متر باشد نیروی لازم برای بالا بردن

۱. این پرسش را قبلاً پدرم از من پرسیده بود. م.



بشکه از روی سطح مایل چقدر است؟

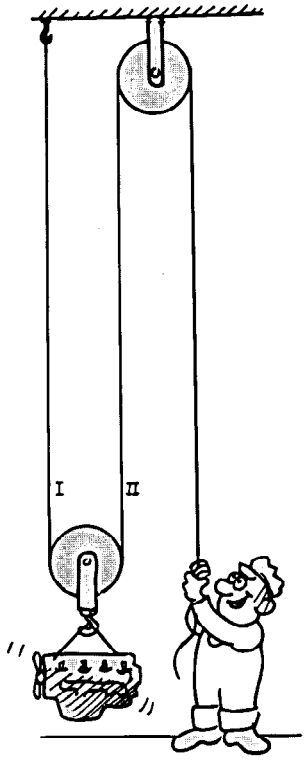
الف) ۲۰۰ نیوتون

ب) ۱۰۰ نیوتون

ج) ۴۰ نیوتون

د) ۲۰ نیوتون

ه) نمی‌توان به این پرسش پاسخ داد

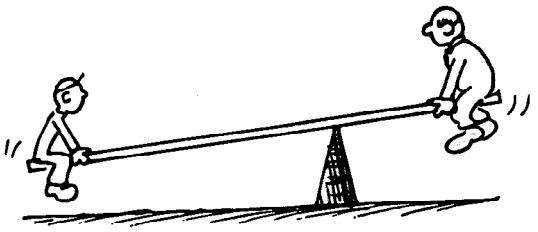


پاسخ: (ج) پاسخ درست است. بشکهٔ ۱۰۰ نیوتونی ۲ متر بالا برده می‌شود و انرژی آن $۱۰۰ \times ۲ = ۲۰۰ N \cdot m$ افزایش می‌یابد. همین مقدار انرژی باید صرف بالا بردن بشکه از روی سطح شیبدار بشود. بنابراین نیروی لازم برای بالا بردن بشکه از روی سطح مایل ۴۰ نیوتون است: به سه نکتهٔ زیر توجه کنید.

۱. اکثر کتابها این مسئله را با استفاده از روشهای برداری حل می‌کنند. برای آشنا شدن با راه حلهای برداری به کتابهای دیگر رجوع کنید. مطالعهٔ رویدادها از دیدگاههای مختلف بسیار مهم است و چقدر جالب است که این دیدگاههای مختلف به نتیجهٔ یکسان منجر شوند.

۲. اگر نمی‌توانیم سیب و پرتقال یا سانتیمتر و نیوتون را باهم جمع کنیم چگونه می‌توانیم آنها را درهم ضرب کنیم؟

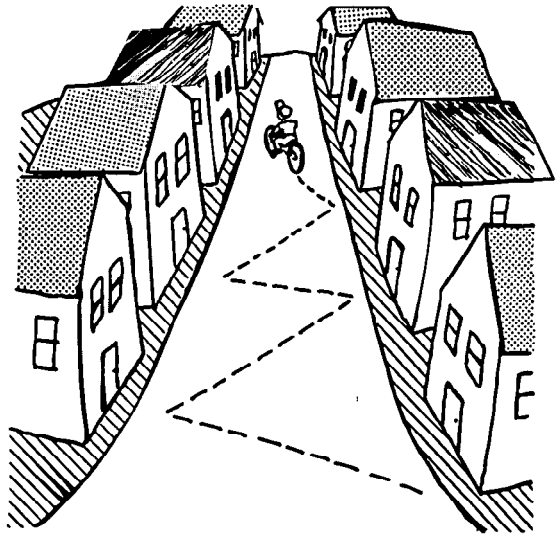
۳. اصول سطح مایل یا شیبدار اساساً همان اصولی است که در اهرم، الاکلنگ و انواع قرقره‌های ساده و مرکب



به‌کار می‌رود. در هـر مورد نیـروی لازم برای انجام یک کار معین با افزایش فاصله‌ای که نیرو در طول آن اثر می‌کند کاهش می‌یابد. نیروی لازم برای بالا بردن یک بشکه از روی سطح شیبداری به طول ۶ متر فقط نصف نیرویی است که بشکه را مستقیماً ۳ متر بالا می‌برد. اگر در الاکلنگ، طرف مرد یک سانتیمتر بالا برود و همزمان با آن طرف بچه ۳ سانتیمتر پایین بیاید وزن بچه فقط یک سوم وزن مرد است. همین‌طور، چنانچه مکانیک برای یک متر بلند کردن موتور به کمک قرقره‌ای دو متر طناب را بکشد (یک متر از طناب I و یک متر از طناب II) نیروی لازم فقط نصف نیروی وزن موتور خواهد بود.

دوچرخه‌سواری در سربالایی

فرض کنید طول این شیب کاملاً تند ۳۰۰ متر است و شما در امتداد مسیر شکسته به طرف بالا دوچرخه‌سواری می‌کنید. اگر طول مسیر شکسته ۶۰۰ متر باشد متوسط نیروی وارد از طرف شما برابر است با



الف) $\frac{1}{4}$

ب) $\frac{1}{3}$

ج) $\frac{1}{2}$

د) متوسط نیرویی که در صورت مستقیم بالا رفتن وارد می‌کردید.

انرژی مصرف شده در امتداد مسیر شکسته برابر است با

الف) $\frac{1}{4}$

ب) $\frac{1}{3}$

ج) $\frac{1}{2}$

د) تمام انرژیی که درصورت مستقیم بالا رفتن صرف می‌کردید.

پاسخ: (ج) پاسخ درست پرسش اول و (د) پاسخ درست پرسش دوم است. انرژی لازم برای بالا رفتن از تمامی مسیرهای ممکن یکسان است. اگر این انرژی در برخی مسیرها بیشتر از مسیرهای دیگر باشد شما از مسیری بالا می‌روید که کمتر از بقیه انرژی لازم دارد و از مسیری برمی‌گردید که بیشتر از همه انرژی می‌خواهد و بنابراین بیش از آنچه انرژی صرف کنید به دست می‌آورد؛ چقدر خوب بود این موضوع حقیقت داشت.

انرژی (و در این مورد کار) برابر است با نیرو ضربدر فاصله. انرژی لازم برای بالا رفتن از هردو مسیر یکسان است اما فاصله یکسان نیست. بنابراین، اگر فاصله دو برابر شود نیرو نصف می‌شود.

لوکوموتیو بخار

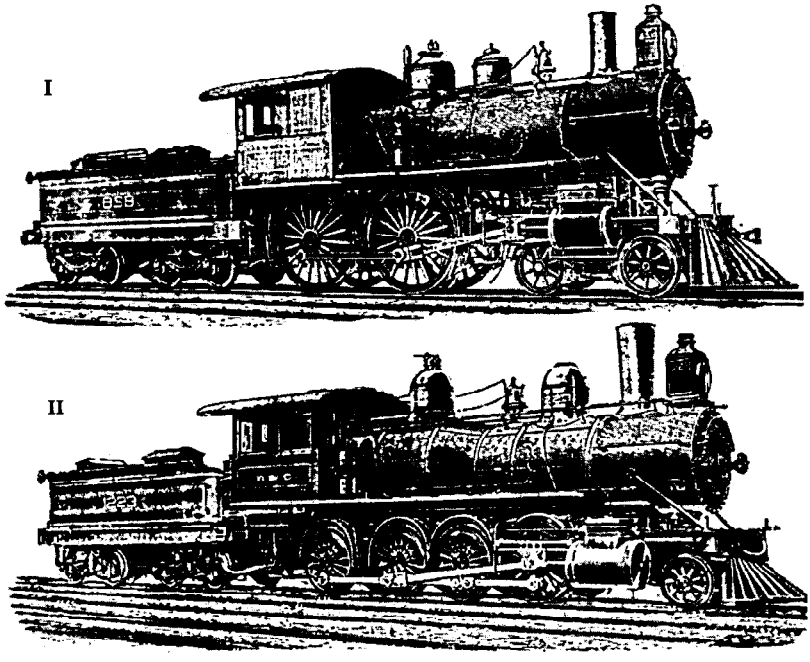
لوکوموتیوهای قطارهای مسافربری با لوکوموتیوهای قطارهای باری فرق دارند: قطارهای مسافربری تندتر از قطارهای باری حرکت می‌کنند. با توجه به اندازهٔ چرخهای لوکوموتیوهای I و II پاسخ درست را از میان چهار پاسخ زیر انتخاب کنید.

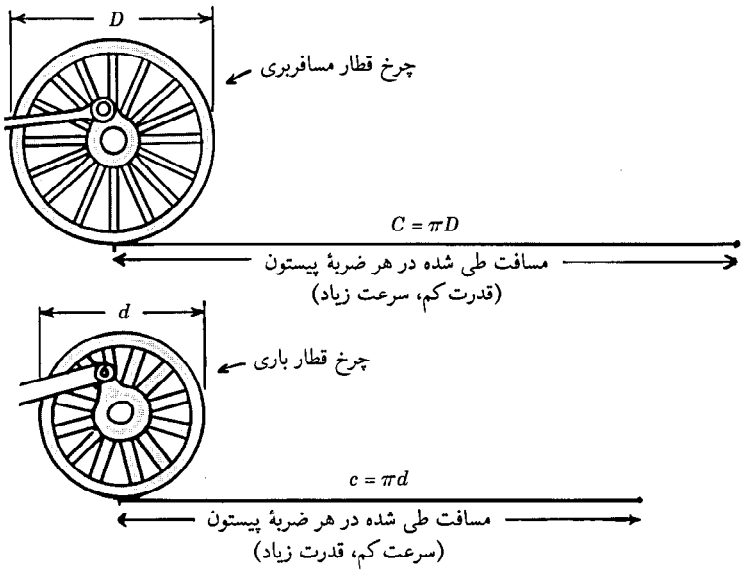
الف) لوکوموتیو I مخصوص قطارهای باری و لوکوموتیو II مخصوص قطارهای مسافربری است.

ب) لوکوموتیو I مخصوص قطارهای مسافربری و لوکوموتیو II مخصوص قطارهای باری است.

ج) هردو لوکوموتیو مخصوص قطارهای باری هستند

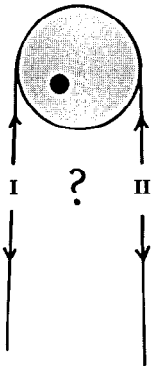
د) هردو لوکوموتیو مخصوص قطارهای مسافربری هستند





پاسخ: (ب) پاسخ درست است. قطر چرخهای قطارهای مسافربری از قطر چرخهای قطارهای باری بزرگتر است. به‌دلیل بزرگ بودن طول محیط چرخ، هر ضربهٔ پیستون مسافت زیادی لوکوموتیو را به پیش می‌راند. بنابراین، حتی با یکسان بودن آهنگ ضربات پیستونها، قطار مسافربری تندتر حرکت می‌کند. تعداد ضربات پیستون و مصرف بخار در هر کیلومتر برای قطارهای مسافربری از قطارهای باری کمتر است. برعکس، مصرف بخار و انرژی قطارهای باری بیشتر است. مانند کامیونهای باری بزرگ که با دندهٔ سنگین حرکت می‌کنند، انرژی لازم برای پیش بردن لوکوموتیوهای باری در یک فاصلهٔ معین بیشتر است از انرژی لازم برای پیش بردن قطارهای سبکتر و تندتر مسافربری در همان فاصله.

ضمناً بیشتر لوکوموتیوهایی که این روزها در فیلمها می‌بینید لوکوموتیوهای باری هستند، زیرا تعداد این لوکوموتیوها خیلی بیشتر از لوکوموتیوهای مسافربری است.

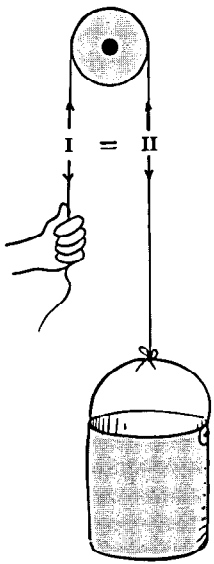


قرقرهٔ دیوانه

محور قرقره‌های معمولی در مرکز آنها قرار دارد و، اگر از اثرهای اصطکاک صرف‌نظر شود، کشش طنابها در دو طرف قرقره یکسان است. اما فرض کنید که محور قرقره، مانند حالت زیر، در مرکز آن نیست. در این حالت کشش طناب در دو طرف قرقره

الف) یکسان است

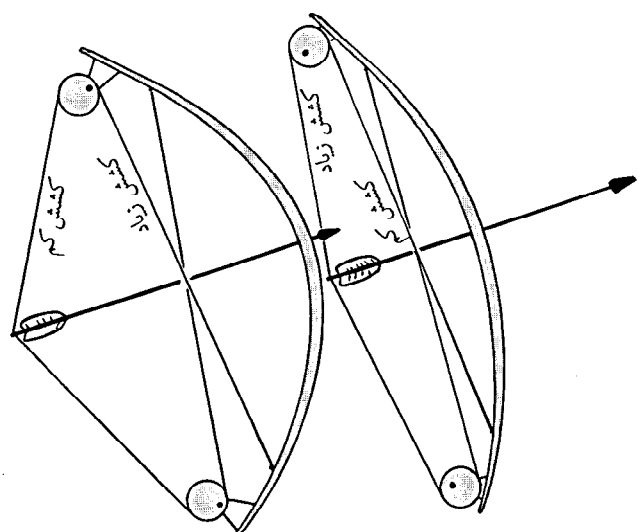
ب) متفاوت است

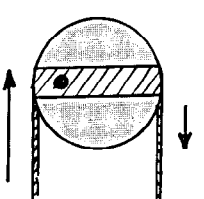


* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. چرا؟ زیرا قرقرهٔ دیوانه یک اهرم سادهٔ تغییر شکل یافته است.

قرقرهٔ دیوانه را قرقرهٔ خارج از مرکز می‌گویند. مشاهده می‌کنید که به کمک قرقرهٔ دیوانه می‌توان با کششی اندک کمان مرکبی را در حالت کشیده نگه داشت. همچنین مشاهده می‌کنید که، برخلاف کمانهای معمولی، کشش طنابهای کمان مرکب هنگام رها کردن تیر افزایش می‌یابد.

ضمناً، مهندسان مکانیک نامی برای این نوع ساز و کار اهرمی متغیر پیدا کرده‌اند. آنها این ساز و کار را کنش اهرمی می‌نامند. بسیاری از کلیدهای برقی بر این اساس کار می‌کنند و آنها را کلیدهای اهرمی می‌گویند.





کیسهٔ آب

وزن ۲۸ لیتر آب دریا در حدود ۲۸۵ نیوتون است. فرض کنید شما ۲۸ لیتر آب دریا را در یک کیسهٔ پلاستیکی می‌ریزید و در آن را محکم می‌بندید، به‌گونه‌ای که هیچ حباب هوایی در داخل آن موجود نباشد. سپس به کمک یک طناب کیسهٔ آب را به دریا می‌اندازید. هنگامی که کیسه کاملاً غوطه‌ور شد چه مقدار نیرو باید به طناب وارد کنید تا بتواند کیسه را نگه دارد

الف) صفر نیوتون

ب) ۱۴۲٫۵ نیوتون

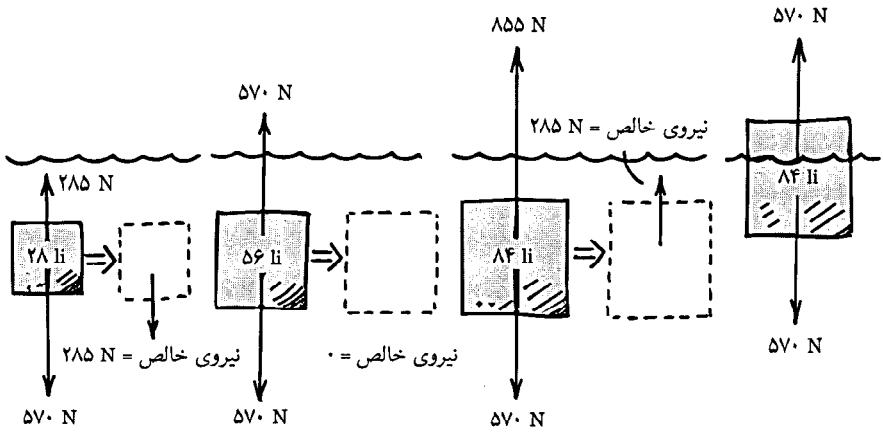
ج) ۲۸۵ نیوتون

د) ۵۷۰ نیوتون

ه) باید آن را به طرف پایین فشار دهید، زیرا کیسهٔ آب به طرف بالا برمی‌گردد.

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. اگر یک کیسه آب داشته باشید که در داخل آب دیگری کاملاً غوطه‌ور است، کیسهٔ آب نه بالا می‌رود و نه پایین، بلکه در یک‌جا به حال سکون باقی می‌ماند و شکل کیسه هیچ تأثیری در این موضوع ندارد. وزن آب داخل کیسه دقیقاً برابر است با نیروی بالابری آب اطراف آن. این گفته به این معناست که نیروی بالابری وارد بر هر ۲۸ لیتر آب دریا باید با وزن این جسم ۲۸۵ نیوتونی برابر باشد و مکعبی نبودن شکل کیسه هیچ تأثیری در آن ندارد.

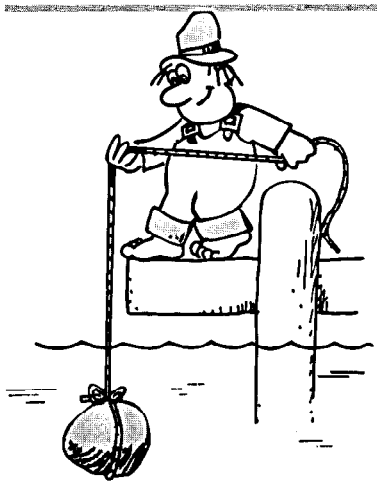
این مسئله را بیشتر توضیح می‌دهیم. فرض کنید جسمی دارید که حجم آن ۲۸ لیتر اما وزن آن ۵۷۰ نیوتون است، یعنی چگالی آن دو برابر چگالی آب دریاست. برای آب اطراف اجسام، اهمیتی ندارد که چه در داخل آنهاست. همین‌قدر که حجم جسم ۲۸ لیتر باشد، نیروی بالابری وارد بر آن برابر است با وزن ۲۸ لیتر آب دریا (۲۸۵ N). بنابراین، آب دریا ۲۸۵ N از وزن جسم را تحمل می‌کند و شما هم باید ۲۸۵ N باقیمانده را نگه دارید. آیا می‌توان گفت که وزن ظاهری هر جسم ۵۷۰ نیوتونی در آب ۲۸۵ نیوتون است؟ نه، فقط درصورتی وزن ظاهری این جسم ۲۸۵ N است که حجم آن ۲۸ لیتر باشد. به‌عنوان مثال، اگر حجم جسم ۵۶ لیتر باشد وزن ظاهری آن برابر صفر است. برای پیدا کردن وزن ظاهری جسم غوطه‌ور باید وزن آب جابه‌جا شده توسط جسم را از وزن اصلی آن کم کنیم. مثلاً، فرض کنید حجم یک جسم ۵۷۰ نیوتونی ۸۴ لیتر است. وزن ظاهری آن برابر است با ۵۷۰ نیوتون منهای



۳×۲۸۵ N که می‌شود منهای ۲۸۵ N. یعنی نیروی بالابری، ۲۸۵ N از وزن جسم بیشتر است. بنابراین، جسم به سطح آب برمی‌گردد و آن‌قدر بالا می‌رود که قسمتی از آن روی سطح آب بایستد. چه مقدار از جسم روی سطح آب می‌ایستد؟ ۲۸ لیتر آن از سطح آب بالا می‌آید و ۵۶ لیتر توی آب باقی می‌ماند. ۵۶ لیتر آب، ۵۷۰N وزن دارد و بنابراین نیروی وارد بر قسمتی از جسم که توی آب است برابر ۵۷۰ نیوتون است و این مقدار هم دقیقاً با وزن جسم برابر است. در نتیجه نیروی بالابری روی جسم غوطه‌ور در آب برابر است با وزن حجم آب جابه‌جا شده به‌وسیلهٔ جسم. در حالت خاصی که جسم شناور می‌ماند نیروی بالابری با وزن جسم برابر است.

این پاسخ نسبتاً طولانی مروری بود بر اصل ارشمیدس. در پرسشهای بعد بازهم به این موضوع برمی‌گردیم.

سنگ در داخل آب

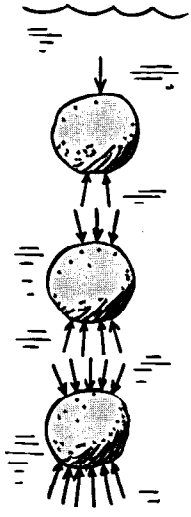


یک سنگ ۲۵ کیلوگرمی را با طناب در داخل آب بیندازید. هنگامی که سنگ کاملاً در آب غوطه‌ور می‌شود می‌توانید آن را با نیرویی کمتر از ۲۵ کیلوگرم نگه دارید. اگر سنگ را بیشتر در داخل آب فرو ببرید آیا نیروی لازم برای نگه داشتن آن

الف) کمتر می‌شود؟

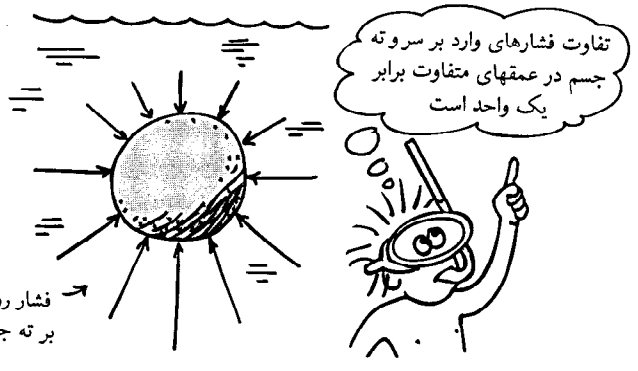
ب) تغییر نمی‌کند؟

ج) بیشتر می‌شود؟



پاسخ: (ب) پاسخ درست است. نیروی بالابری وارد بر سنگ غوطه‌ور برابر است با وزن آب جابه‌جا شده به‌وسیلهٔ آن. بنابراین، هنگامی که سنگ توی آب است نیروی لازم برای نگه داشتن آن کمتر می‌شود. هرچه سنگ را توی آب پایینتر ببریم، حجم و در نتیجه وزن آب جابه‌جا شده به‌وسیلهٔ آن تغییر نمی‌کند. زیرا چگالی آب، نزدیک به سطح و در اعماق، یکسان است و می‌توان گفت که آب عملاً تراکم ناپذیر است. از این‌رو نیروی بالابری با عمق تغییر نمی‌کند و در نتیجه نیروی لازم برای نگه داشتن سنگ توی آب، اعم از اینکه سنگ نزدیک به سطح آب باشد یا در اعماق، یکسان است

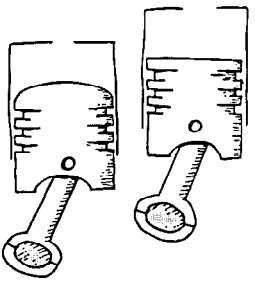
از طرف دیگر، فشار آب با عمق افزایش می‌یابد و به‌همین دلیل است که به‌اجسام غوطه‌ور نیروی بالابری وارد می‌شود. ته اجسام غوطه‌ور همواره نسبت به سر آنها در عمق بیشتری قرار دارد و بنابراین فشار روبه بالای وارد بر ته، از فشار رو به پایین وارد بر سر جسم غوطه‌ور بیشتر است. اما این امر باعث نمی‌شود که نیروی بالابری وارد بر جسم غوطه‌ور با عمق افزایش یابد، زیرا چنانچه در شکل هم دیده می‌شود اختلاف میان فشارهای وارد بر سر و ته جسم در تمام اعماق یکسان است. (در حالت غیر عادی که در آن جسم غوطه‌ور به ته ظرف می‌رسد، و میان آن و کف ظرف هیچ لایهٔ آبی وجود ندارد، نیروی بالابری صفر است).



سر پیستون

آیا با شکل دادن به سر پیستون (مانند پیستون موتور اتومبیل) می‌توان نیروی روبه‌پایین وارد بر آن را افزایش داد؟

الف) نیروی روبه پایین وارد بر سرگنبدی شکل از نیروی وارد بر سر تخت بیشتر است زیرا مساحت سطح گنبدی از مساحت تخت بیشتر است



ب) نیروی روبه پایین وارد بر سرتخت پیستون از نیروی وارد بر سر گنبدی شکل بیشتر است زیرا تمام فشاری که بر سر تخت وارد می‌شود مستقیماً به پایین منتقل می‌شود

ج) اگر قطر و فشار وارد بر سیلندرها یکی باشد، نیروی روبه‌پایین وارد بر پیستونها نیز برابر است

پاسخ: (ج) پاسخ درست است. نیروی وارد بر سطح گنبدی از نیروی وارد بر سطح تخت بیشتر است، زیرا مساحت سطح گنبدی از مساحت سطح تخت بیشتر است. اما تمام نیروی وارد بر سطح گنبدی مستقیماً روبه پایین وارد نمی‌شود، قسمتی از آن نیروی جانبی است. مقدار نیروی جانبی آنقدر است که برآیند نیروهای روبه پایین با نیروی وارد بر سطح تخت دقیقاً برابر می‌شود. از کجا بدانیم که این گفته صحت دارد؟

صحت این گفته را می‌توان از طریق رسم هندسی یا با انداختن یک پیستون دوسر در داخل یک سیلندر بزرگ تایرگونه تحقیق کرد. یک‌سر پیستون، تخت و سر دیگر آن گنبدی شکل است. اگر نیروی وارد بر یک سرپیستون از سر دیگر بیشتر باشد پیستون برای همیشه با یک نیروی دائمی در داخل سیلندر تایرگونه به حرکت خود ادامه می‌دهد. با این کار یک موتور بزرگ درست می‌شود که بشر در آرزوی ساختن آن به‌سر می‌برد.

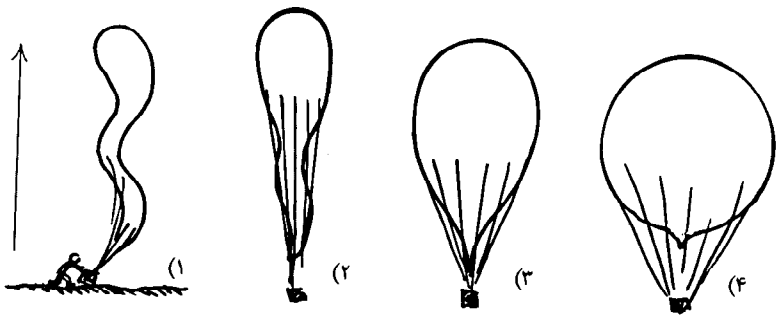
انبساط بالون

ازکیسه‌های خیلی بزرگ هوا به‌عنوان بالونهای هواسنج در ارتفاعات بالا استفاده می‌کنند. در سطح زمین فقط مقدار خیلی کمی هلیوم در بالون می‌ریزند، درست همان مقدارکه برای بالا بردن آن لازم است. همچنانکه بالون اوج می‌گیرد چگالی کم می‌شود و باعث می‌شود که گاز هلیوم رفته‌رفته منبسط و بالون بزرگتر شود. با بزرگتر شدن بالون، نیروی بالابری آن

الف) افزایش می‌یابد

ب) کاهش می‌یابد

ج) تغییر نمی‌کند

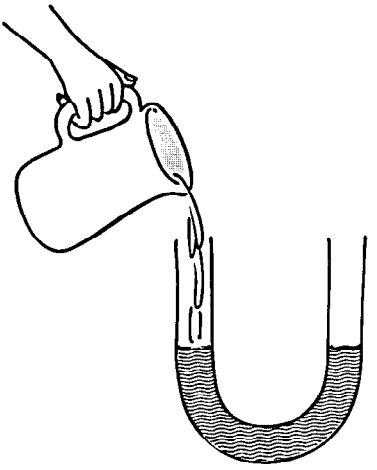


* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. نیروی بالابری ثابت می‌ماند. دلیل اینکه بالون ضمن اوج گرفتن منبسط می‌شود، کم شدن فشار هوا در ارتفاعات است. هنگامی که فشار جو، مثلاً، تا نصف مقدار آن بر روی زمین کاهش می‌یابد بالون به اندازهٔ دو برابر مقدار اول آن بزرگ می‌شود. کاهش فشار جو به نصف مقدار اولیه به این معنی است که چگالی هوای اطراف به نصف چگالی هوای روی زمین رسیده است. نیروی بالابری به وزن هوای جابه‌جا شده بستگی دارد، و وزن دو برابر حجم در نصف چگالی با مقدار آن در روی زمین یکسان است. چون حجم بالون و چگالی هوا به دو طریق کاملاً مخالف به فشار جو بستگی پیدا می‌کنند، نیروی بالابری ضمن انبساط بالون تغییری نمی‌کند.

آیا دما در این داستان دخالت می‌کند؟ معمولاً در ارتفاعات بالا هوا سردتر و همین سرما موجب انقباض بالون و کاهش حجم هوای جابه‌جا شده می‌شود. اما جالب توجه اینجاست که این کاهش حجم وزن هوای جابه‌جابه شده را تغییر نمی‌دهد. چرا؟ زیرا کم شدن دما چگالی هوا را نیز افزایش می‌دهد. ۱۰ درصد کاهش حجم با ۱۰ درصد افزایش چگالی همراه است، به‌گونه‌ای که وزن هوای جابه‌جا شده و در نتیجه نیروی بالابری بدون تغییر باقی می‌ماند.

اما جنس بالون نیز در این قضیه مؤثر است. نیروی بالابری در ارتفاعات خیلی زیاد که در آن بالون تا آخرین حد ممکن منبسط می‌شود کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بالون ضمن اوج گرفتن به‌جایی می‌رسد که دیگر نمی‌تواند بیشتر از آن انبساط پیدا کند. در نتیجه حجم هوای جابه‌جا شده کاهش می‌یابد. از این لحظه به‌بعد هرچه بالون (که دیگر منبسط نمی‌شود) بیشتر اوج می‌گیرد چگالی هوا، و در نتیجه نیروی بالابری کم می‌شود و به‌جایی می‌رسد که با وزن بالون برابر می‌شود. هنگامی که وزن بالون با نیروی بالابری برابر شد بالون به نقطهٔ اوج خود رسیده است.

آزمایش سطح آب

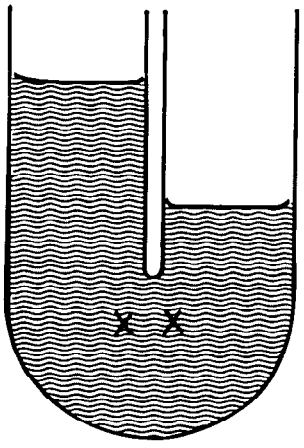


معمولاً می‌گویند آب سطح خود را باز می‌یابد. این گفته را می‌توان با ریختن آب در ظرفی به شکل U و مشاهدهٔ اینکه آب در هردو شاخه در یک سطح می‌ایستد به بهترین وجه نمایش داد. اما چرا آب سطح خود را باز می‌یابد؟ دلیل آن بیشتر مربوط می‌شود به

الف) فشار جو روی دو سطح

ب) بستگی فشار آب به عمق

ج) چگالی آب

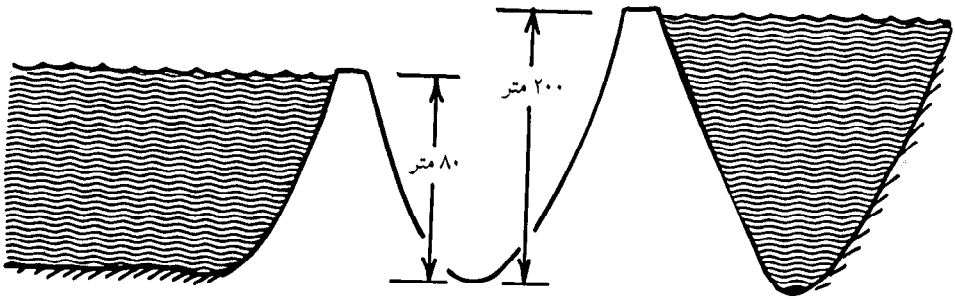


پاسخ: (ب) پاسخ درست است. آب هم در خلأ و هم در هوای باز سطح خود را باز می‌یابد. بنابراین، فشار جو نقش چندانی ندارد. فشار در داخل مایع به چگالی مایع و به عمق آن بستگی دارد. (فشار به چسبندگی یا ویسکوزیتهٔ آب هم بستگی دارد، اما در اینجا آن را منظور نمی‌کنیم زیرا هر حرکتی در آب حرکت لحظه‌ای است). چون چگالی مایع در هریک از دو شاخهٔ U، بدون توجه به مقدار آب در هر طرف، یکسان است، تنها عامل اصلی در هم‌سطح بودن آب در هردو شاخه عمق آب است.

دو نقطهٔ مشخص شده با X را در روی شکل در نظر بگیرید. اگر آب در حال سکون باشد، فشار در این دو نقطه مساوی است، زیرا در غیر این‌صورت آب از ناحیهٔ با فشار بیشتر به ناحیهٔ با فشار کمتر جاری می‌شود و جریان آب تا برابر شدن فشار ادامه می‌یابد. اما چون فشار به عمق آب بستگی دارد، فشار یکسان می‌باید ناشی از عمق یکسان باشد. بنابراین، وزن آب بالای هر X (یا در هر ستون) باید با وزن آب بالای X دیگر برابر باشد (که در این شکل صادق نیست). بنابراین، اینکه آب سطح خود را باز می‌یابد بی‌دلیل نیست. در پرسش بعد نیز به این موضوع می‌پردازیم.

سد بزرگ، سد کوچک

قسمت پایین سدها را ضخیمتر و محکمتر از قسمت بالای آنها می‌سازند، زیرا فشار آب با عمق افزایش می‌یابد. حجم آب پشت سدها چه تأثیری برروی آنها دارد؟ ارتفاع سد لتیان ۸۰ متر و مقدار آب جمع



شده در پشت آن خیلی زیاد است. ارتفاع سد دز ۲۰۰ متر و مقدار آب جمع شده در پشت آن نسبتاً کم است. کدام‌یک باید محکمتر باشد؟

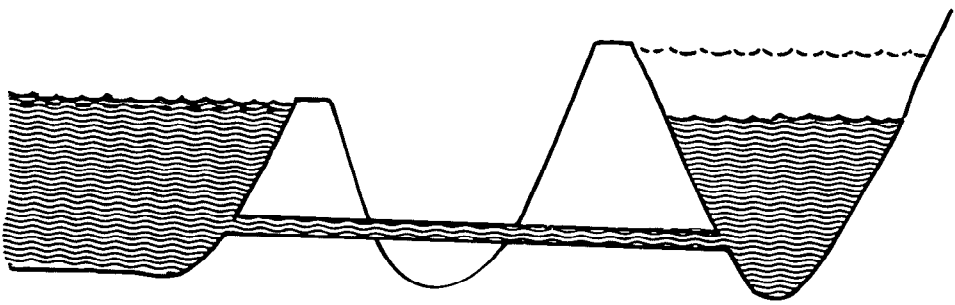
الف) سد دز باید محکمتر باشد

ب) سد لتیان باید محکمتر باشد

ج) هردو باید به یک اندازه محکم باشند

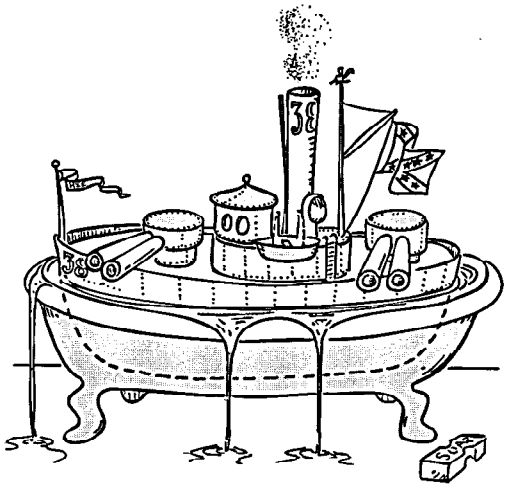
* **پاسخ:** (الف) پاسخ درست است. استحکام سد باید طوری باشد که بتواند فشار آب پشت آن را تحمل کند. فشار آب پشت سد فقط به عمق آب بستگی دارد نه به حجم آن. بنابراین هرچه عمق آب بیشتر باشد فشار آن بر سد بیشتر است و این فشار لزوماً به مقدار آب بستگی ندارد.

برای اینکه مسئلهٔ "آزمایش سطح آب" را بهتر درک کنید در تصور خود این دو سد را با لوله‌ای، مطابق شکل، به‌هم وصل کنید.



آب از طریق لوله و از ناحیهٔ با فشار بیشتر به سمت ناحیهٔ با فشار کمتر جریان می‌یابد و تا زمانی که فشارها یکسان شوند جریان آب ادامه دارد. هنگامی که سطح آب در دو سد یکسان شد فشار آب در دو انتهای لوله و در پشت سدها یکسان می‌شود. فشار آب به عمق بستگی دارد نه به حجم.

ناو جنگی در وان حمام

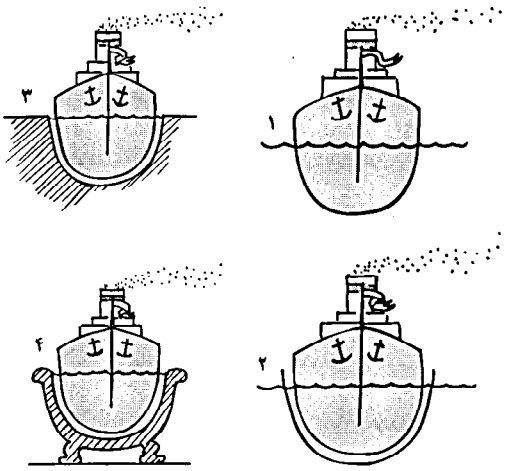


آیا ناو جنگی می‌تواند در وان حمام شناور شود؟[1] البته به این شرط که وان خیلی بزرگ باشد یا ناو خیلی کوچک. در هر حالت، تنها مقدار کمی آب در اطراف و در زیر کشتی وجود دارد. در حالت خاص فرض کنید که وزن کشتی ۱۰۰ تن (یک کشتی بسیار کوچک) و وزن آب داخل وان ۴۵ کیلوگرم است. آیا کشتی شناور می‌شود یا به ته آب می‌رود؟

الف) اگر به اندازهٔ کافی آب در اطراف آن وجود داشته باشد شناور می‌ماند

ب) کشتی به ته آب می‌رود زیرا وزن آن از وزن آب خیلی بیشتر است

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. راههای مختلفی برای اثبات درستی این پاسخ وجود دارد. این راه را که در اینجا توصیف می‌شود یک دانشجو پیشنهاد کرده است. فرض کنید یک کشتی در اقیانوس شناور است (شکل ۱). سپس یک کیسهٔ پلاستیکی بسیار بزرگ را به دور کشتی بکشید (این کار در واقع با یک تانکر نفت انجام شد) (شکل ۲). بعد از آن فرض کنید که تمام آب اقیانوس، به‌جز آب داخل کیسه، یخ می‌بندد (شکل ۳). سرانجام یک وان بزرگ از یخ جامد به‌صورت شکل ۴ از یخ ببرید.



این پرسش خطر اندیشیدن تنها روی واژه‌ها را، به‌جای رسم شکل و پرداختن به ایده‌ها، مجسم می‌کند. اگر شما فقط روی واژه‌ها تأمل کنید می‌توانید چنین استدلال کنید: برای اینکه کشتی شناور بماند باید همسنگ وزن خودش از آب را

---

۱. این سؤال فیزیک مورد علاقهٔ پدرم بود. - اپشتین

جابه‌جا کند. وزن کشتی ۱۰۰ تن است اما در مقابل فقط ۴۵ کیلوگرم آب موجود است. پس کشتی نمی‌تواند شناور شود. اما اگر همین ایده را به تصویر بکشید متوجه خواهید شد که جابه‌جایی به آن حجمی از آب اشاره دارد که با حجم کشتی از ته آن تا سطح آب (که در واقع خالی است) برابر است. این حجم است که اگر از آب پر باشد برابر با ۱۰۰ تن می‌شود.

تنها به پرسشها یا واژه‌ها تکیه نکنید! سعی کنید مفاهیم آنها را به‌طریق هندسی رسم و سپس همراه با تصویر تا آنجا که در توان دارید فکر کنید.

قایق در وان حمام

کدام‌یک سنگینترند؟

الف) وان پر از آب

ب) وان پر از آب با قایق شناور در آن

ج) وزن هردو یکسان است

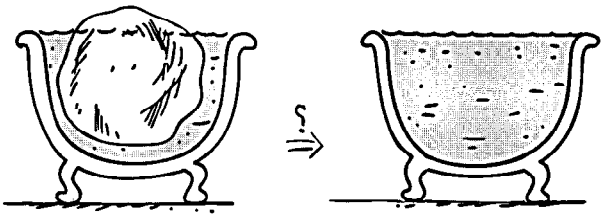
حمام آب سرد

در این وان پر از آب سرد یک قطعه یخ شناور است. وقتی یخ ذوب می‌شود آب در داخل وان

الف) پایین می‌رود

ب) سرریز می‌شود

ج) بازهم لبالب پر می‌شود، اما نمی‌ریزد



* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است.

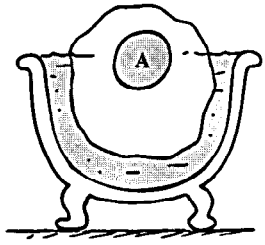
وزن آب جابه‌جا شده به‌وسیلهٔ یخ دقیقاً برابر است با وزن یخ. هنگامی که قطعه یخ ذوب می‌شود حجم آن کاهش می‌یابد و به داخل مایع برمی‌گردد. آب حاصل از ذوب یخ دقیقاً جای خالی جابه‌جا شده را پر می‌کند.

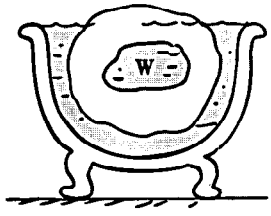
ضمناً حجم قسمتی از یخ که بالای آب است باید دقیقاً برابر باشد با افزایش حجم آبی که منجمد می‌شود و به‌صورت یخ انبساط پیدا می‌کند.

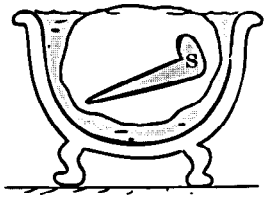
سه قطعه یخ

این از آن سؤالهایی است که حتی بچه‌های تیزهوش را هم‌گیر می‌اندازد.

سه قطعه یخ در سه وان پر از آب شناورند. در قطعه یخ A یک حباب بزرگ هوا، در قطعه یخ W مقداری آب و در قطعه یخ S یک میخ بزرگ وجود دارد. هنگامی که هرسه قطعه یخ ذوب می‌شوند چه اتفاقی می‌افتد؟







الف) تنها در S آب سرریز می‌شود

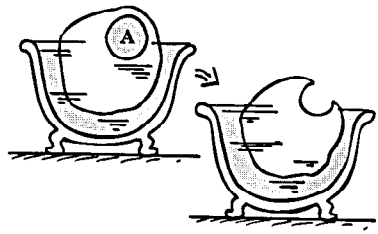
ب) در S آب پایین می‌رود و در A و W آب لبالب می‌شود

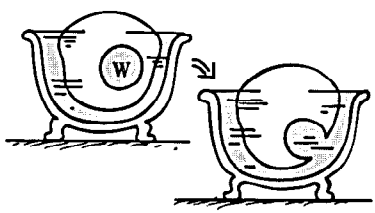
ج) در A آب لبالب می‌شود، و در W و در S سرریز می‌شود

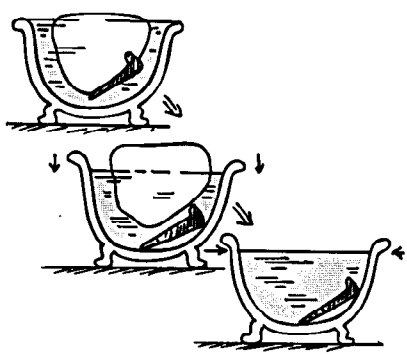
د) آب در هرسه ظرف سرریز می‌شود

ه) آب در هرسه ظرف لبالب می‌شود

* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. ابتدا مسئلهٔ حمام آب سرد را به‌یاد بیاورید. قطعه یخی که در وان پر از آب شناور است ذوب می‌شود و آب داخل وان بازهم، بدون آنکه سرزیر شود، لبالب می‌ماند. اکنون در تخیل خود حباب هـوا را به نیمهٔ بالای یخ منتـقل کنید. این‌کار







هیچ تأثیری روی یخ و در نتیجه روی جابه‌جایی حاصل از آن ندارد. در این حالت کاری کنید که حباب هوا خارج شود. جای حباب به‌صورت یک حفره باقی می‌ماند. وزن یخ تغییر نمی‌کند و به‌صورت یک قطعه "یخ معمولی" بدون حباب هوا درمی‌آید.

سپس قطعه یخی را که مقداری آب در آن است در نظر بگیرید. بازهم در تخیل خود آب را به قسمت پایین یخ منتقل کنید. این‌کار هیچ‌گونه تأثیری روی وزن یخ یا جابه‌جایی حاصل از آن ندارد. در این حالت آب را خارج کنید. جای آب به‌صورت یک حفرهٔ کوچک باقی می‌ماند. وزن یخ تغییر نمی‌کند و به‌صورت یک قطعه "یخ معمولی" بدون آب درمی‌آید. بنابراین این دو قطعه "یخ معمولی" ذوب می‌شوند و سطح آب داخل وان را نه بالا می‌برند نه پایین.

اکنون در تخیل خود میخ داخل قطعه یخ سوم را به ته آن منتقل کنید. هیچ تغییری در وزن یخ یا جابه‌جایی حاصل از آن ایجاد نمی‌شود. در این حالت میخ را از یخ جدا کنید. میخ به ته وان می‌رود اما جابه‌جایی حاصل از آن کاهش یا افزایش پیدا نمی‌کند.

با وجود این، یخ مقداری از وزن خود را از دست می‌دهد و مثل یک قایق بدون بار به روی آب می‌آید. با روی آب آمدن یخ، سطح آب در داخل وان پایین می‌رود. در این حالت، قطعه یخ به یک قطعه یخ "معمولی" تبدیل می‌شود و پس از ذوب شدن تغییری در سطح جدید آب ایجاد نمی‌کند: سطح آب همان‌قدر پایینتر از لبه قرار می‌گیرد که قبل از ذوب یخ قرار گرفته بود.

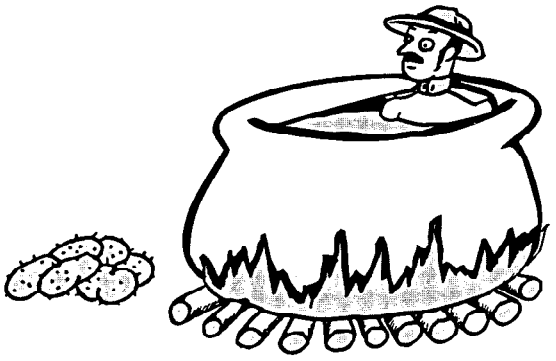
جوش آمدن

برای پختن مقداری سیب‌زمینی ناچارید یک دیگ آب سرد را بجوشانید. برای اینکه این کار با صرف کمترین انرژی انجام دهید باید

الف) شعله را تا به آخر زیاد کنید

ب) شعله را تا حد ممکن کم کنید

ج) شعله را روی یک مقدار متوسط بگذارید



* **پاسخ:** (الف) پاسخ درست است. اگر شعله را تا آنجا که امکان دارد کم کنید هیچگاه نمی‌توانید آب را به‌جوش بیاورید. گرمای شعله به دیگ آب منتقل می‌شود. قسمتی از این گرما در دیگ باقی می‌ماند و قسمتی هم به‌صورت تابش گرمایی، بخار داغ و هوای داغ از آن دور می‌شود. مقدار گرمایی که در دیگ باقی می‌ماند سرانجام آب را به‌جوش می‌آورد، و مقداری که از آن دور می‌شود در واقع گرمای تلف شده است. هرچه آب دیرتر به جوش بیاید، گرمای بیشتری از دیگ به محیط اطراف منتقل می‌شود. هرچه گرما بیشتر منتقل شود انرژی بیشتری تلف شده است.

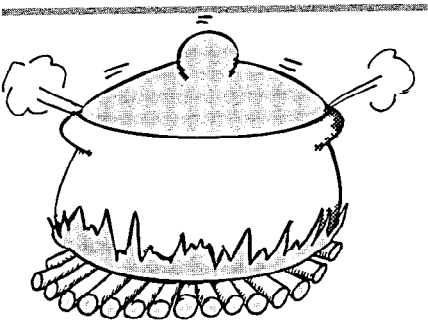
این گفته در مورد موشکی که به هوا پرتاب می‌شود نیز صادق است. موتور موشک باید با تمام نیرو روشن شود تا بتواند در حداقل زمان ممکن حداکثر تکانهٔ ممکن را به موشک بدهد. چرا؟ زیرا موشک نیز، مثل دیگ که پیوسته گرما از دست می‌داد، بر اثرگرانی (ثقل) مدام تکانه از دست می‌دهد. اگر موتور با حداقل نیرو روشن شود موشک همهٔ انرژیش را صرف باقی ماندن در هوا می‌کند و هرگز اوج نمی‌گیرد. به‌عبارت دیگر، موشک در همان نزدیکیهای سطح زمین پرسه می‌زند.

جوشیدن

فرض کنید اکنون آب به جوش آمده است. برای اینکه سیب‌زمینیها با صرف کمترین انرژی بپزند باید

الف) شعله را روی حداکثر مقدار ممکن بگذارید

ب) شعله را طوری پایین بکشید که فقط آب را در حال جوش نگه دارد



* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. دمای آب، چه به شدت بجوشد و چه به‌آرامی، ۱۰۰ است و آنچه در پختن سیب‌زمینیها مؤثر است همین دماست. اگر در این حالت شعله را روی حداکثر مقدار ممکن بگذارید انرژی زیادی تلف می‌شود. پس آن را پایین بکشید. اما آیا آن همه گرمای اضافی که باعث جوشیدن شدید آب می‌شود کمی آب را داغتر نمی‌کند؟ نه. می‌توانید دماسنج را در آبی که به شدت می‌جوشد و آبی که به‌آرامی می‌جوشد بگذارید و درستی این گفته را تحقیق کنید. اگر دماسنج در اختیار ندارید یک مسابقهٔ سیب‌زمینی‌پزی میان آبی که به شدت می‌جوشد و آبی که به‌آرامی می‌جوشد برگزار کنید. اگر انرژی اضافی آبی که به شدت می‌جوشد صرف پختن سیب‌زمینی نمی‌شود، پس صرف چه چیزی می‌شود؟ انرژی اضافی به‌صورت بخار از دیگ خارج می‌شود. اگر در دیگ را روی آن بگذاریم آیا در انرژی و زمان لازم برای پختن سیب‌زمینیها صرفه‌جویی می‌کنیم؟ بله، در هردو مورد صرفه‌جویی می‌کنیم. زمان و انرژی لازم برای جوشیدن آب سرد کاهش می‌یابد و در نتیجه در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. اما پس از جوشیدن آب در مدت زمان لازم برای پختن سیب‌زمینیها تأثیری نمی‌کند.

سرد نگه داشتن

احتمالاً یخچال بیشتر از کلیهٔ وسایل برقی منزل (به استثنای آبگرم‌کن و کولر) برق مصرف می‌کند. فرض کنید که شما یک پاکت شیر را از یخچال برمی‌دارید و مقداری از آن را می‌خورید. از لحاظ مصرف برق آیا بهتر است که

الف) فوراً آن را به داخل یخچال برگردانید

ب) تا آنجا که ممکن است آن را دیرتر برگردانید

* **پاسخ:** (الف) پاسخ درست است. هرچه شیر را مدت زمان بیشتری بیرون از یخچال نگه دارید بیشتر گرم می‌شود. هرچه شیر گرمتر باشد یخچال باید مدت بیشتری کار کند تا دوباره آن را سرد کند. هرچه یخچال بیشتر کار کند انرژی بیشتری مصرف می‌کند.

خاموش کنم یا نه؟

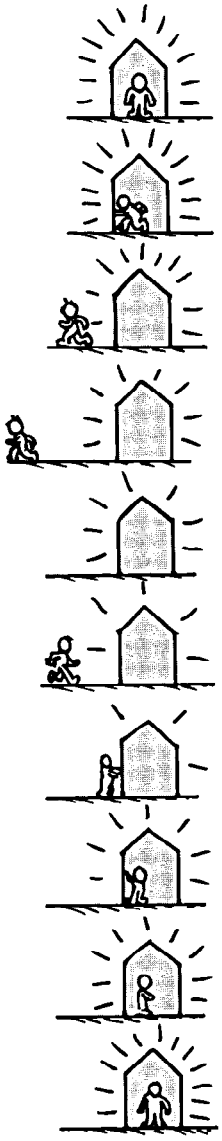
فرض کنید در یک روز سرد زمستانی به قصد خرید از منزل خارج می‌شوید و حدود یک ربع ساعت بعد برمی‌گردید. برای صرفه‌جویی در مصرف برق

الف) بهتر است بخاری را روشن بگذارید تا هنگام برگشتن برق بیشتری برای دوباره گرم کردن منزل مصرف نکنید

ب) بهتر است آن را روی درجهٔ ۱۰ بگذارید اما آن را خاموش نکنید

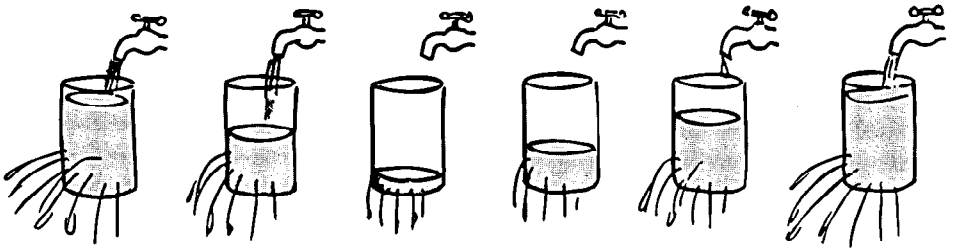
ج) بهتر است آن را خاموش کنید

د) ... از لحاظ مصرف برق تفاوت نمی‌کند که آن را روشن بگذارید یا خاموش کنید



پاسخ: (ج) پاسخ درست است. وقتی هوای بیرون سرد است، خانهٔ شما پیوسته گرما از دست می‌دهد. اگر چنین نبود کافی بود که شما یک بار خانه را گرم کنید تا برای همیشه گرم باقی بماند. بخاری باید تمام گرمای تلف شده را جبران کند. چقدر گرما تلف می‌شود؟ بستگی دارد به عایق-بندی گرمایی خانه و سردی هوای بیرون. هرچه تفاوت دمای داخل و خارج خانه بیشتر باشد آهنگ سرد شدن بیشتر است (این همان قانون سرد شدن نیوتون است که به‌صورت "آهنگ سرد شدن متناسب است با ΔT" بیان می‌شود). هرگاه هنگام ترک خانه بخاری را روشن بگذارید گرمای بیشتری نسبت به حالتی که بخاری را خاموش می‌کنید تلف می‌شود. هرچه خانه نسبت به بیرون گرمتر باشد گرما تندتر تلف می‌شود. البته اگر اختلاف دما وجود نداشته باشد نه گرما تلف می‌شود و نه احتیاجی به گرم کردن خانه وجود دارد.

می‌توانیم خانه را مثل یک سطل سوراخ - سوراخ آب در نظر بگیریم که در آن سطح آب داخل سطل مثل میزان دمای داخل خانه است. هرچه سطح آب در داخل سطل بالا باشد فشار در محل سوراخها بیشتر است و آب تندتر از آنها خارج می‌شود. بنابراین، اگر بخواهیم سطح آب همچنان بالا باشد باید مقدار بیشتری آب در داخل سطل بریزیم. در صورتی که، اگر سطح آب پایین باشد به این مقدار برای جبران آب از دست رفته نیاز نیست. بنابراین، می‌بینیم اگر "سطح آب را پایین نگه داریم" مقدار بیشتری آب صرفه‌جویی کرده‌ایم. آیا اگر بگذاریم همهٔ آب خارج شود، حتی برای مدت کوتاهی، مقدار بیشتری آب صرفه‌جویی نکرده‌ایم؟ با اندکی تفکر معلوم می‌شود که مقدار آبی که برای پر کردن مجدد سطل لازم است خیلی کمتر از مقدار آبی است که برای ثابت نگه داشتن سطح آب باید در آن ریخته شود.



هنگامی که سطل خالی یا تقریباً خالی است، به سرعت پر می‌شود زیرا مقدار آبی که در آن ریخته می‌شود از مقدار آبی که از آن خارج می‌شود بیشتر است. اگر آب ورودی و خروجی باهم برابر باشند سطح آب ثابت می‌ماند.

بنابراین، همان‌طور که مقدار آب لازم برای دوباره پرکردن سطل از مقدار آبی که برای ثابت نگه داشتن سطح آن لازم است خیلی کمتر است، به همان ترتیب نیز مقدار گرمای لازم برای دوباره گرم کردن خانه از مقدار گرمایی که لازم است تا دمای خانه بیشتر از دمای بیرون باقی بماند خیلی کمتر است.

پس، هنگام خارج شدن از منزل برای صرفه‌جویی در مصرف برق چراغها (درصورتی که به آنها نیاز ندارید) و بخاری را خاموش کنید

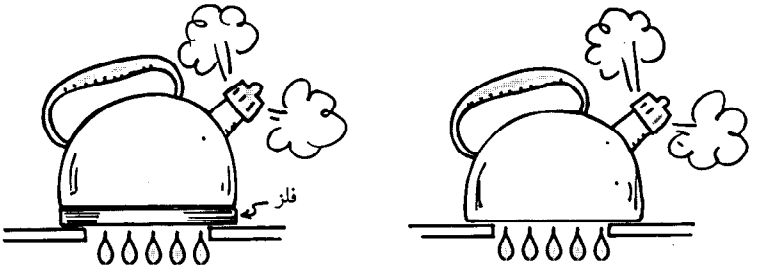
کتری سوت‌زن

یک کتری را مستقیماً روی شعلهٔ اجاق می‌گذاریم و کتری دیگری را روی یک قطعهٔ سنگین فلزی که مستقیماً روی شعلهٔ اجاق است قرار می‌دهیم. وقتی هردو کتری سوت زدن را آغاز کردند شعله را خاموش می‌کنیم

الف) کتری که مستقیماً روی اجاق به جوش آمده است به سوت زدن ادامه می‌دهد و کتری روی فلز فوراً از سوت زدن باز می‌ایستد

ب) کتری که روی فلز به جوش آمده است برای مدتی به سوت زدن ادامه می‌دهد و کتری روی شعله فوراً از سوت زدن باز می‌ایستد

ج) هردو تقریباً همزمان از سوت زدن باز می‌ایستند



پاسخ: (ب) پاسخ درست است. هر دانشجوی "خوب" فیزیک که فکر می‌کند چون ظرفیت گرمایی فلز از ظرفیت گرمایی آب کمتر است، پس فلز نسبت به آب گرمای کمتری به دست می‌دهد با خواندن این پرسش ممکن است به اشتباه بیفتد. نکتهٔ اساسی در این پرسش این است که فلز از آب داخل کتری داغتر است. زیرا اگر داغتر نباشد گرما از آن به کتری منتقل نمی‌شود. بنابراین فلزی برای مدتی بعد از خاموش کردن شعله هم از آن داغتر می‌ماند و طی این مدت کتری به سوت زدن ادامه می‌دهد. اگر فلز نباشد با خاموش کردن شعله منبع گرمایی دیگری وجود ندارد و کتری هم فوراً از سوت زدن باز می‌ایستد.

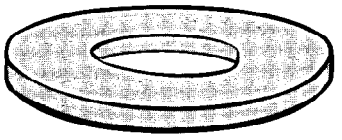
هیچ هم منبسط می‌شود

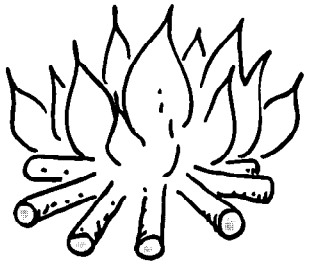
یک دیسک آهنی را که سوراخی در وسط آن است به‌قدری گرم می‌کنیم تا آهن یک درصد منبسط شود. در این حالت قطر سوراخ هم

الف) افزایش می‌یابد

ب) کاهش می‌یابد

ج) تغییر نمی‌کند



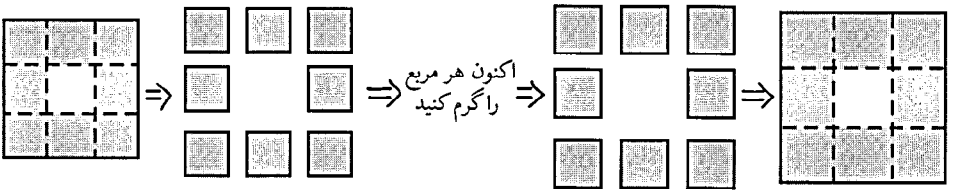


پاسخ: (الف) پاسخ درست است. سوراخ هیچ است، اما همین هیچ هم بی‌برو برگرد منبسط می‌شود. برای درک این موضوع فرض کنید ابتدا یک عکس از حلقه می‌گیریم و سپس عکس را یک درصد بزرگ می‌کنیم. همه‌جای عکس، حتی سوراخ، به‌همین نسبت بزرگ می‌شود.

به طریق دیگر هم می‌توانیم این موضوع را توضیح بدهیم. حلقه را باز کنید و آن را به‌صورت یک میله درآورید. اگر میله را گرم کنید ضخیمتر و هم‌چنین بلندتر می‌شود. اگر پس از گرم شدن، میله را دوباره به‌صورت حلقه درآورید می‌بینید که هم محیط داخلی و هم ضخامت آن بزرگتر شده است.

اگر یک سوراخ مربعی را در یک قطعه فلز به شکل مربع در نظر بگیریم به‌راحتی معلوم می‌شود که این سوراخ بر اثر انبساط بزرگتر می‌شود. قطعه فلز را ابتدا، مطابق شکل، به چند مربع تقسیم و آنها را گرم کنید. پس از انبساط دوباره مربعها را به‌هم بچسبانید. معلوم می‌شود که سوراخ خالی نیز متناسب با بقیهٔ اجزای مربع منبسط شده است.

آهنگران، با استفاده از همین پدیده، زهوارهای فلزی را به دور چرخهای چوبی‌ای می‌گذاشتند که اندکی از زهوارها بزرگتر بودند. برای این‌کار ابتدا زهوارها را گرم می‌کردند و آنها را پس از منبسط شدن به‌راحتی به دور چرخ می‌کشیدند. زهوار پس از سرد شدن کاملاً کیپ می‌شد و احتیاج به هیچ چفت و



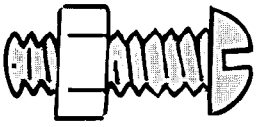
بستی هم نداشت.

هر وقت دیدید درهای فلزی ظرفها باز نمی‌شود آنها را زیر آب داغ یا به‌طور لحظه‌ای روی شعله اجاق بگیرید. با این کار، در فلزی، محیط داخلی و همه جای در و ظرف منبسط می‌شود. در نتیجه در به‌راحتی باز می‌شود.

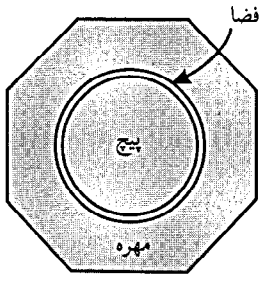
مهرهٔ محکم

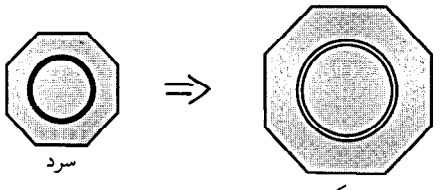
مهره‌ای خیلی محکم به یک پیچ سفت شده است و حرکت نمی‌کند. از کدام راه بهتر می‌توانیم مهره را آزاد کنیم؟

الف) سرد کردن
ب) گرم کردن
ج) هردو
د) هیچ‌کدام



* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. یک بار دیگر "هیچ هم منبسط می‌شود" را مرور کنید. پیچ و مهره کاملاً به‌هم چسبیده‌اند. یک فضای بسیار کوچک میان آنها وجود دارد. در مهره‌های بسیار محکم احتمالاً این فضا فوق‌العاده کوچک است. چگونه می‌توانیم این فضا را بزرگ کنیم؟ با گرما؛ گرما همه‌چیز را بزرگ و منبسط می‌کند: مهره بر اثر گرما منبسط می‌شود، پیچ هم منبسط می‌شود، و مهمتر از همه فضای میان آنها نیز منبسط می‌شود. بنابراین، برای شل شدن مهره آن را گرم کنید، اگرچه پیچ هم در اثر گرما منبسط می‌شود.





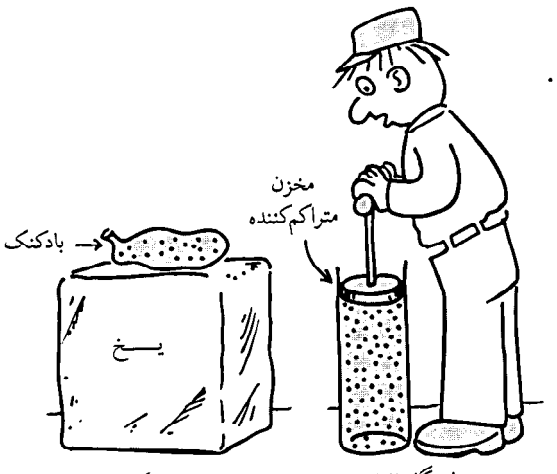
حجم و دما

اگر حجم اشغال شده توسط مقداری هوا کاهش یابد دمای آن

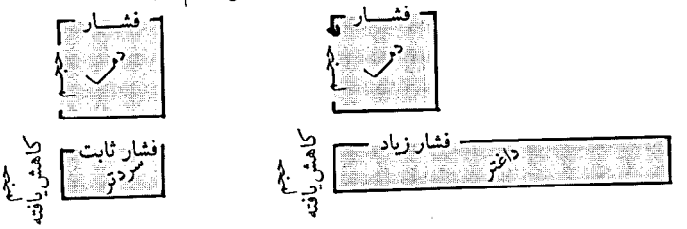
الف) افزایش می‌یابد

ب) کاهش می‌یابد

ج) نمی‌توان گفت...



دو راه برای کاهش حجم گاز



پاسخ: (ج) پاسخ درست است. هنگام حل این مسئله ممکن است منظرهٔ بادکنکی که در یخچال قرار دارد در نظر مجسم شود. در این مورد کاهش حجم بادکنک با کاهش دما همراه است. اما اگر حجم گاز را با تلمبه کم کنیم کاهش حجم با افزایش دما همراه خواهد بود. تغییر دمای هوا فقط به تغییر حجم آن بستگی ندارد، بلکه به تغییر فشار هم بستگی دارد. دمای هوا هم تابع حجم است و هم تابع فشار. دانستن یکی به‌تنهایی کافی نیست. اگر حجم و فشار کم شوند دما هم کم می‌شود، یا اگر حجم کم شود و فشار تغییر نکند بازهم دما کم می‌شود. اما اگر حجم اندکی کاهش یابد و در مقابل فشار خیلی زیاد شود دما افزایش می‌یابد. منظور از "کاهش اندک" و "افزایش خیلی زیاد" چیست؟ اگر حجم به نصف مقدار اولیه‌اش کاهش یابد و فشار دو برابر شود دما تغییر نمی‌کند. اما اگر فشار بیشتر از دو برابر افزایش یابد دما افزایش و اگر کمتر از دو برابر افزایش یابد دما کاهش می‌یابد. دما متناسب است با حاصل‌ضرب فشار و حجم

$$T \sim PV$$

مصرف بی‌جهت

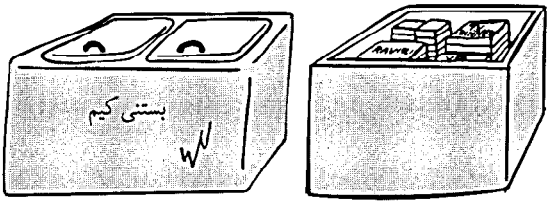
در سوپرمارکتها بیشتر از هرجای دیگر برق بی‌جهت مصرف می‌شود. معمولاً مواد غذایی را در یخچالهای مختلف (که در زیر دیده می‌شوند) نگهداری می‌کنند. کدام یخچال بیشتر از بقیه برق مصرف می‌کند؟ کدام یخچال کمتر از بقیه برق مصرف می‌کند؟

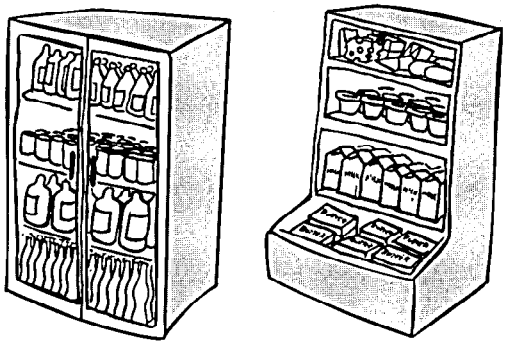
الف) یخچال خوابیده با درکشویی

ب) یخچال خوابیده بدون در

ج) یخچال ایستاده با در

د) یخچال ایستاده بدون در





* **پاسخ:** (د) بیشتر و (الف) کمتر از بقیه برق مصرف می‌کند. هوای سرد از هوای گرم چگالتر است و بنابراین به طرف کف اتاق پایین می‌آید. هنگامی که در یخچال ایستاده را باز می‌کنید هوای سرد از پایین خارج می‌شود و هوای گرم بیرون جای آن را می‌گیرد. اگر یخچال ایستاده در نداشته باشد، هوای سرد به‌طور پیوسته از یخچال خارج و هوای گرم جانشین آن می‌شود. آیا تاکنون متوجه شده‌اید که در سوپرمارکتها چگونه هوای سرد از یخچالهای ایستادهٔ در باز خارج می‌شود و با پای شما برخورد می‌کند؟ این موضوع انرژی یخچال را به هدر می‌دهد و شما هزینهٔ آن را می‌پردازید. بهترین یخچال آن است که در آن از بالا باز می‌شود. در این یخچالها هوای سرد نمی‌تواند خارج شود و چون درهم دارند هوای سرد با هوای گرم بیرون تماس پیدا نمی‌کند.

هوای سرد از هوای گرم چگالتر است. البته، این گفته درصورتی درست است که فشار هوا در هر دو یکسان (مثلاً برابر فشار جو) باشد. اگر هوای داغ تحت فشاری بیشتر از فشار هوای سرد باشد ممکن است از هوای سرد هم چگالتر شود. شما باید هنگام گفتن عباراتی چون "هوای سرد چگالتر از هوای گرم است" خیلی دقیق و محتاط باشید.

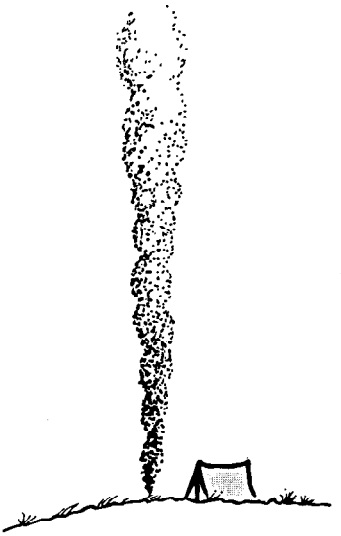
وارونی

فرض کنید که در کنار یک دریاچهٔ کوهستانی چادر زده‌اید و مشغول آماده کردن صبحانه هستید. دود حاصل از آتش صبحانه مقداری بالا می‌رود و سپس در یک لایهٔ افقی روی دریاچه می‌ایستد. بعد از خوردن صبحانه تا ارتفاعات دیگری به کوهنوردی ادامه می‌دهید. هوا در آن ارتفاعات احتمالاً

الف) سردتر است

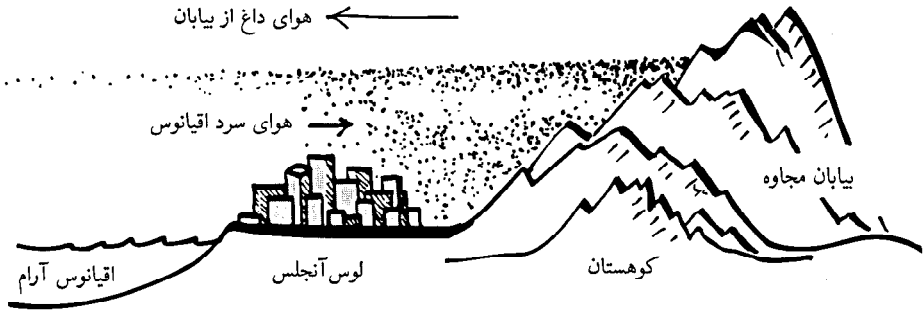
ب) گرمتر است

* **پاسخ:** (ب) پاسخ درست است. آنچه باعث می‌شود لایهٔ افقی دود در آن ارتفاع تشکیل شود وارونی نام دارد. هوای نزدیک به دریاچه سرد است. این سردی یا به خاطر مجاورت با آب سرد دریاچه است، یا اینکه هوای سرد در طول شب به ته دره پایین آمده است. می‌دانیم که هوای سرد از هوای گرم چگالتر است، بنابراین هوای سرد در پایین و هوای گرم در بالا قرار می‌گیرد و دود هم همین موضوع را نمایش می‌دهد. هوای داغ دودآلود از داخل هوای سرد آنقدر بالا می‌رود تا با هوای گرم بالاتر برخورد کند. اگر هوای گرم از هوای دودآلود بالا رونده گرمتر باشد، دود دیگر بالا نمی‌رود، بلکه در زیر هوای گرمتر پخش می‌شود. بنابراین، اگر شما بعد از صبحانه به کوهنوردی ادامه بدهید با هوای گرم برخورد می‌کنید.



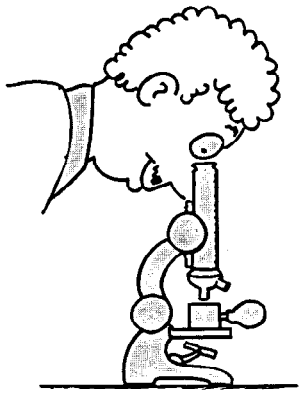
معمولاً وقتی آتش روشن می‌کنید دود آن بالاتر و بالاتر می‌رود. این گفته به این معناست که هوا در بالا سردتر و سردتر می‌شود. البته هوا همواره از دود سردتر است. اگر هوا در بالا، برخلاف معمول، گرمتر باشد وارونی ایجاد می‌شود.

گاهی در دره‌های ساحلی نزدیک به اقیانوسهای سرد وارونی مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، در لوس آنجلس هوای



سرد اقیانوس آرام زیر هوای داغ بیابان مجاوه قرار می‌گیرد. مخلوط دود و مه لوس‌آنجلس در زیر این وارونی به دام می‌افتد؟ اغلب یک لایهٔ زرد رنگ، مثل لایهٔ دود روی دریاچه، بالای شهر دیده می‌شود. به‌همین دلیل است که لایهٔ زرد رنگ نیز روی انتهای جنوبی خلیج سانفرانسیسکو به چشم می‌خورد.

میکروفشار



دود از تعداد بسیار زیادی خاکستر ریز درست شده است. اگر می‌توانستیم فشار هوا را در جای بسیار کوچکی، چون محل یک خاکستر دود، اندازه بگیریم احتمالاً به این نتیجه می‌رسیدیم که

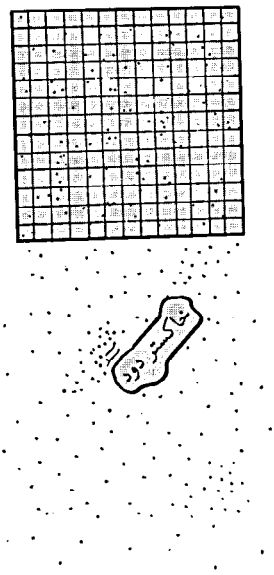
الف) فشار در هر لحظه از یک محل به محل دیگر تغییر می‌کند.
یعنی قسمتهای مختلف اتاق فشارهای متفاوت دارند

ب) فشار در هر نقطه از یک لحظه تا لحظهٔ دیگر تغییر می‌کند.
یعنی فشار با زمان تغییر می‌کند

ج) هم (الف) و هم (ب)

د) فشار هوای داخل اتاق، به استثنای مواردی که شرایط جوی متغیر است، همواره ثابت است و از یک لحظه تا لحظهٔ دیگر و یا از یک نقطه تا نقطهٔ دیگر (حتی در یک حجم بسیار کوچک) تغییر نمی‌کند

※ **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. مولکولهای هوا به‌طور کتره‌ای (نامنظم) در فضا می‌پخشند. بنابراین، نمی‌توان انتظار داشت که در هر حجم کوچکی از فضا به تعداد یکسان مولکول وجود داشته باشد. همان‌طور که مولکولها در اطراف حرکت می‌کنند گاه‌به‌گاه از یک محل تا محل دیگر "گروهی" از آنها به‌هم می‌پیوندند و دسته‌جمعی به حرکت درمی‌آیند. در یک حجم بزرگ از فضا اثر این "گروه"های کوچک چندان محسوس نیست، اما در حجمهای کوچک افت و خیزهای واقعی در فشار تولید می‌کنند. فرض کنید فشار هوا در طرف چپ یک خاکستر کوچک دود ناگهان افزایش یابد و خاکستر را به



طرف راست فشـار دهد. بعداً این خاکستر ضربه‌های دیگری را جهتـهای دیگری دریافت می‌کند، زیرا گفتیم که مولکولهای هوا به‌طور کتره‌ای می‌پخشند و باهم برخورد می‌کنند.

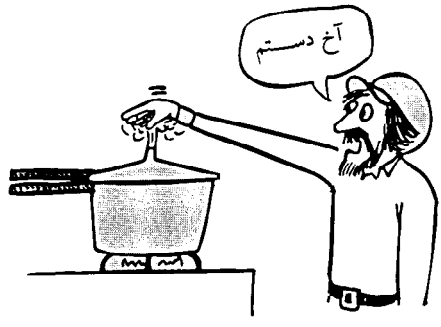
اگر دود سـیگار را در یـک جعبـهٔ شیـشه‌ای فـوت و بـا میکروسکوپ از بیرون به آن نگاه کنید مشاهده می‌کنید که ذرات دود تلوتلوخوران یک مسـیر زیگزاگی را در فضـا طی می‌کننـد. مولکولهای هوا، که با قویترین میکروسکوپها هم دیده نمی‌شوند، در اطراف پرسه می‌زنند و با ذرات "درشت" خاکستر برخورد می‌کنند و آنها را به "رقص" وا می‌دارند. این رقص را به افتخار رابرت براون، که اولین‌بار آن را کشـف کرد، حرکت براونی می‌گویند. در واقع، ضربه‌های منفرد اثر چندانی روی ذرات دود ندارند، ولی هنگامی که ضربه‌های وارد شده از یک طرف بیشتر از طرف دیگر باشد اثر ضربه محسوس است.

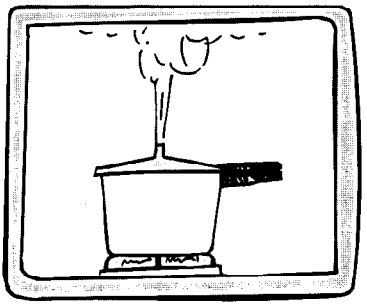
آخ!

این معلم فیزیک وقتی دستش را از فاصلهٔ نزدیک روی بخار خارج شده از دیگ زودپز می‌گیرد دستش به شدت می‌سوزد. اما اگر دستش را چند سانتیمتر بالاتر بگیرد بخار سردی احساس می‌کند. دلیل این موضوع این است که بخار در آن فاصلهٔ کوتاه منبسط و سرد می‌شود. این نتیجه‌گیری

الف) درست است

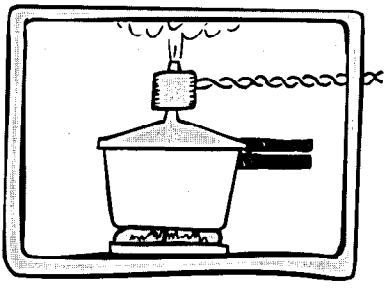
ب) غلط است





پاسخ: (ب) پاسخ درست است. همچنانکه در حجم و دما توضیح داده شده لزوماً هر انبساطی در گاز با سرد شدن همراه نیست. اما آیا گاز در فاصلهٔ چند سانتیمتری میان زودپز و دست معلم منبسط می‌شود؟ نه. فشار گاز در این فاصله همان فشار جو است و بنابراین هر مقداری که باید منبسط شود قبل از خارج شدن منبسط شده است. پس چرا بخار آب در فاصلهٔ چند سانتیمتر بالاتر از زودپز سرد می‌شود؟ زیرا با هوای سرد مخلوط می‌شود و ضمناً باید به آن بخار گفته شود نه بخار آب، زیرا دمای بخار آب در فشار جو لااقل باید ۱۰۰°C باشد.

آیا این گفته به این معناست که اگر هوا وجود نداشته باشد بخار آب پس از خارج شدن از زودپز هم هیچگاه سرد نمی‌شود؟ بلی. اگر تمامی هوای یک اتاق کاملاً مسدود را از آن خارج و سپس بخار آب خارج شده از زودپز را وارد آن کنیم، بخار آب سرد نمی‌شود. این پدیده را انبساط آزاد می‌گویند. درصورتی بخار آب سرد می‌شود که مولکولهای آن در برخورد با ذرات دیگر مقداری از انرژی جنبشی خود را از دست بدهند. اما اگر اتاق کاملاً مسدود (و عایق‌بندی) باشد مولکولهای بخار انرژی از دست نمی‌دهند.

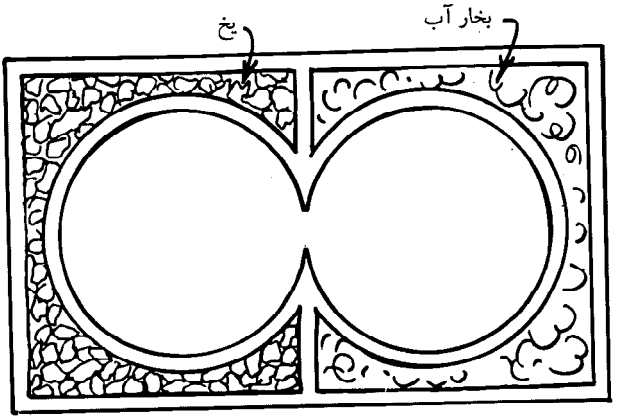


فرض کنید یک توربین بخار اسباب‌بازی یا ماشین بخار دارید و کاری می‌کنید که بخار آب خارج شده از زودپز از داخل توربین بگذرد. آیا بخار آب هنگام عبور از زودپز از داخل توربین سرد می‌شود؟ بلی، به‌شرط آنکه انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین از اتاق مسدود خارج شود. اگر انرژی تولید شده صرف گرم کردن بخاری داخل اتاق مسدود شود چه اتفاقی می‌افتد؟ این بخاری دوباره بخار آب سرد شده را تا دمای اولیه‌اش گرم می‌کند. دقیقاً تا دمای اولیه‌اش یا تقریباً؟ دقیقاً.

هوای رقیق

دو ظرف هوا از طریق سوراخ بسیار کوچکی باهم ارتباط دارند. داخل ظرفها مقدار بسیار کمی هوای رقیق وجود دارد. تعداد مولکولهای هوا آنقدر کم است که احتمال برخورد آنها با دیواره‌های ظرف خیلی بیشتر از احتمال برخورد آنها با یکدیگر است. یکی از ظرفها در داخل یخ و دیگری در داخل بخار آب است. به‌عبارت دیگر، دمای یکی از ظرفها صفر درجه و دمای دیگری صد درجه است

الف) فشار هوا در داخل دو ظرف، بدون توجه به اختلاف دمای آنها، سرانجام برابر می‌شود



ب) فشار هوا در داخل ظرف سرد بیشتر از فشار هوا در داخل ظرف گرم است
ج) فشار هوا در داخل ظرف سرد کمتر از فشار هوا در داخل ظرف گرم است

* **پاسخ:** (ج) پاسخ درست است. عقل سلیم حکم می‌کند که فشار ظرفها، درصورتی که باهم ارتباط داشته باشند، باهم برابر شود. اما عقل سلیم مبتنی بر تجربیات ماست و تجربیات معمولی ما در این مورد مبتنی بر هوای چگال است؛ یعنی هوایی که در آن مولکولها چنان تنگ هم قرار گرفته‌اند که بیشتر با یکدیگر برخورد می‌کنند تا با دیواره‌ها. بیایید باهم سری به دنیای مولکولها بزنیم تا ببینیم در آنجا چه خبر است.

مولکولهای داخل ظرف داغ تندتر از مولکولهای داخل ظرف سرد حرکت می‌کنند. بعضی مولکولهای ظرف داغ از طریق سوراخ به ظرف سرد می‌روند و بعضی، در جهت عکس، از ظرف سرد به داخل ظرف داغ کوچ می‌کنند. تعداد مولکولهایی که از این طریق مهاجرت می‌کنند، در این مدت زمان معین، باید باهم برابر باشد، زیرا در غیر این‌صورت، پس از مدتی همهٔ مولکولها در داخل یکی از دو ظرف جمع می‌شوند. بنابراین، آهنگ برخورد مولکولها با دیواره در دو ظرف باید یکسان باشد. با این حال مولکولهای داخل ظرف داغ تندتر حرکت می‌کنند. چون فشار هوا به آهنگ برخورد مولکولها با واحد سطح ضربدر تکانهٔ مولکولها بستگی دارد، بنابراین باید فشار هوا در ظرف داغ، بدون توجه به سوراخ، از فشار هوا در ظرف سرد بیشتر باشد.

در این‌صورت، تجربیات معمولی خود را که بنابر آن فشار در دو ظرف مرتبط، بدون توجه به اختلاف دمای آنها، پس از مدتی باهم برابر می‌شود چگونه توجیه کنیم؟ فشار وقتی در دو ظرف مرتبط باهم برابر می‌شود که هوا به اندازهٔ کافی چگال باشد و مولکولها به دفعات زیاد باهم برخورد کنند. در این صورت فرض اینکه "مولکولها به‌ندرت باهم برخورد می‌کنند" دیگر نمی‌تواند یک فرض معتبر باشد.

اگر اثر برخورد مولکولها با یکدیگر و با دیوارها را در نظر بگیریم آنگاه باید رسانایی گرمایی میان مولکولها را نیز به‌حساب آوریم. در این حالت، دما و سرعت تمامی مولکولهای مجاور سوراخ در

دو ظرف تقریباً برابر می‌شود. بنابراین، مولکولهای نزدیک به سوراخ در ظرف داغ کمی سردتر از مولکولهای دورتر و مولکولهای نزدیک به سوراخ در ظرف سرد کمی داغتر از مولکولهای دورتر می‌شوند. وقتی مولکولهای سرد و کند نزدیک به سوراخ در ظرف داغ با مولکولهای داغ و تند داخل همین ظرف برخورد می‌کنند به عقب برمی‌گردند. بعضی از این مولکولها طوری به عقب برمی‌گردند که وارد ظرف سرد می‌شوند. این فرایند فشار داخل ظرف گرم را کاهش و فشار داخل ظرف سرد را افزایش می‌دهد. اگر گاز به اندازهٔ کافی چگال باشد سرانجام فشار در دو ظرف یکسان می‌شود.