

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فیزیک (۱)

رشته ریاضی و فیزیک

پایه دهم

دوره دوم متوسطه

۱۳۹۵



وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب:	فیزیک (۱) پایه دهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۰۲۰۹
پدیدآورنده:	سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:	دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:	شورای برنامه‌ریزی و تألیف گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی (برنامه‌ریزی درسی و تألیف) -
مدیریت آماده‌سازی هنری:	سید اکبر میرجعفری و کاظم بهنیا (ویراستار ادبی)
شناسه افزوده آماده‌سازی:	اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
نشانی سازمان:	لیدانیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (طراح گرافیک و صفحه‌آرا) - فاطمه رئیس‌یان فیروزآباد، کبری اجابتی، سیف‌الله بیگ محمد دلیوند، شاداب ارشادی، زینت بهشتی شیرازی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)
ناشر:	تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹ وبگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir
چاپخانه:	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹
سال انتشار و نوبت چاپ:	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص» چاپ اول ۱۳۹۵

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۲۵۳۹-۵
ISBN: 978-964-05-2539-5



جوان‌ها قدر جوانیشان را
بدانند و آن را در علم و
تقوی و سازندگی خودشان
صرف کنند که اشخاصی
امین و صالح بشوند.
مملکت ما با اشخاص امین
می‌تواند مستقل باشد.
امام خمینی
«قدس سرّه الشریف»

کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکس‌برداری، نقاشی، تهیه فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع، بدون کسب مجوز ممنوع است و متخلفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

- ۱-۱ فیزیک : دانش بنیادی ۲
- ۲-۱ مدل سازی در فیزیک ۵
- ۳-۱ اندازه گیری و کمیت های فیزیکی ۶
- ۴-۱ اندازه گیری و دستگاه بین المللی یکاها ۷
- ۵-۱ اندازه گیری : خطا و دقت ۱۴
- ۶-۱ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک ۱۹
- ۷-۱ چگالی ۲۲
- پرسش ها و مسئله های فصل ۱ ۲۵



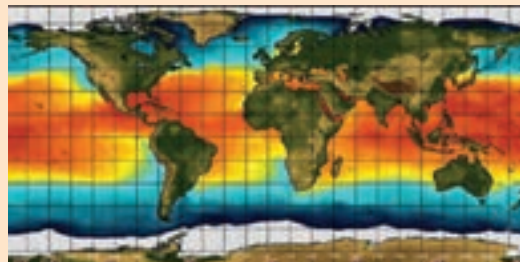
- ۱-۲ انرژی جنبشی ۳۰
- ۲-۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت ۳۱
- ۳-۲ کار و انرژی جنبشی ۳۷
- ۴-۲ کار و انرژی پتانسیل ۴۱
- ۵-۲ پایداری انرژی مکانیکی ۴۷
- ۶-۲ کار و انرژی درونی ۴۹
- ۷-۲ توان ۵۱
- پرسش ها و مسئله های فصل ۲ ۵۶



- ۱-۳ حالت های ماده ۶۲
- ۲-۳ ویژگی های فیزیکی مواد در مقیاس نانو ۶۶
- ۳-۳ نیروهای بین مولکولی ۶۸
- ۴-۳ فشار در شاره ها ۷۲
- ۵-۳ شناوری و اصل ارشمیدس ۸۰
- ۶-۳ شاره در حرکت و اصل برنولی ۸۵
- پرسش ها و مسئله های فصل ۳ ۹۰



- ۱-۴ دما و دماسنجی ۹۶
- ۲-۴ انبساط گرمایی ۹۹
- ۳-۴ گرما ۱۰۸
- ۴-۴ تغییر حالت‌های ماده ۱۱۶
- ۵-۴ روش‌های انتقال گرما ۱۲۵
- ۶-۴ قوانین گازها ۱۳۴
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ ۱۴۱



- ۱-۵ معادلهٔ حالت ۱۴۶
- ۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستوار ۱۴۷
- ۳-۵ تبادل انرژی ۱۴۷
- ۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک ۱۴۸
- ۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی ۱۵۰
- ۶-۵ چرخهٔ ترمودینامیکی ۱۶۱
- ۷-۵ ماشین‌های گرمایی ۱۶۲
- ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی) ۱۶۹
- ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها ۱۷۱
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵ ۱۷۵



خرد هر کجا کنی آرد پدید به نام خدا سازد آن را کلید

الف) سخنی با دانش آموزان عزیز

کتاب فیزیک ۱ نخستین کتاب فیزیک در دوره دوم متوسطه است که برای پایه دهم دوره نظری تألیف و چاپ شده است. این کتاب در ادامه تغییر برنامه درسی آموزش علوم تجربی در دوره اول متوسطه است. درس فیزیک برای رشته های علوم تجربی و ریاضی و فیزیک در سه پایه دهم، یازدهم و دوازدهم ارائه خواهد شد. برای ارتباط مؤثرتر با برنامه درسی این کتاب و تحقق اهداف آن، توجه به مواردی که در ادامه می آید توصیه می شود.

مسیر آموزش و یادگیری: دانش آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، وقتی شوق انگیز و لذت بخش است که با تلاش و جدیت شما برای پیمودن آن همراه شود. پیش از همه، باید به توانایی های خود باور و اعتماد داشته باشید. مفاهیمی که در هر سال تحصیلی می خوانید، با سطح درک و فهم شما است و برای بهبود و ارتقای زندگی فردی، اجتماعی و حرفه ای شما مفیدند. در فرایند آموزش، جدی و پر تلاش باشید و تا جایی که امکان دارد، به طور فعال و با انگیزه در این فرایند مشارکت جویید. اگر امروز نتوانید دانش، مهارت و نگرش خود را بهبود ببخشید، ممکن است فردا دیر باشد! برای تعامل مؤثر و سازنده با دنیای پر شتاب و در حال تغییر امروز، راهی جز «کسب خرد» ندارید و این خرد به تدریج و به تبع باور، تلاش و مشارکت شما در فرایند آموزش به دست می آید.

خرد رهنما و خرد رهگشای خرد دست گیرد به هر دو سرای

یادگیری را بیاموزیم: هر یک از شما شیوه های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری ویژه خود را دارید و بهتر است بر همین اساس روشی مناسب برای یادگیری خود بیابید و متناسب با آن برنامه ریزی کنید. شاید مهم ترین کاری که می توانید انجام دهید، آن باشد که برای خود زمان های مطالعه با برنامه زمان بندی منظم و کافی در محیطی خالی از عوامل های برهم زننده تمرکز، در نظر بگیرید. روشن است که باید وقت بیشتری را صرف جنبه هایی کنید که یادگیری آن برای شما دشوارتر است. اگر با شنیدن و انجام آزمایش مطالب درسی را می آموزید، حضور فعال در کلاس های درس بسیار مهم است. اگر با توضیح دادن آنها را می آموزید، آنگاه علاوه بر حضور فعال در کلاس های درس، کار کردن با دانش آموزان دیگر نیز برای شما بسیار راه گشا است. اگر حل کردن مسئله برای شما دشوار است وقت بیشتری را صرف یادگیری روش حل مسئله ها کنید. با توجه به آنچه گفته شد، اکنون به پرسش های زیر پاسخ دهید:

آیا من توانایی به کار بردن مفهوم های ریاضی را در فیزیک دارم؟ اگر پاسخ شما منفی است، به کتاب های ریاضیات پایه هفتم تا دهم خود مراجعه کنید و افزون بر اینها از معلم خود نیز راهنمایی های لازم را بخواهید. آسان ترین فعالیت ها در فیزیک برای من کدام ها بوده اند؟ نخست این فعالیت ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتماد به نفس در شما کمک می کند. آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم، مطلب را بهتر می فهمم یا پس از آن؟ آیا زمانی که صرف مطالعه فیزیک می کنم کافی است؟ برای من بهترین ساعت روز برای مطالعه فیزیک کدام است؟ زمان خاصی از روز را برگزینید و آن را تغییر ندهید. آیا در جای آرامی که بتوانم تمرکز خود را حفظ کنم، کار می کنم؟

کار گروهی: دانشمندان و مهندسان به ندرت در انزوا کار می کنند؛ بلکه بیشتر با یکدیگر همکاری دارند. در آموزش مدرسه ای نیز اگر با دیگر دوستانتان کار کنید، هم فیزیک بیشتر می آموزید و هم از این یادگیری بیشتر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان به این همکاری گروهی و مشارکت در یادگیری در کلاس های درس توجه ویژه ای دارند.

یادداشت برداری در کلاس درس: یک مؤلفه بسیار مهم در فرایند یادگیری هر درس، حضور فعال در کلاس آن درس و یادداشت برداری است. در کلاس فیزیک، معلم در فرایند آموزش فعالیت هایی را انجام می دهد که شما را یاری می کند تا درک خوبی از مفاهیم فیزیکی و کاربردهای آنها پیدا کنید. اگر نتوانستید در یکی از جلسه های کلاسی شرکت کنید، از یکی از اعضای گروه یا هم کلاسی های خود بخواهید که شما را در جریان آنچه گذشته است، قرار دهد.

چه موقع فیزیک را فهمیده ایم؟ برخی از دانش آموزان هنگام خواندن درس فیزیک، خود را در این اندیشه می یابند که «من مفهوم ها را می دانم، اما نمی توانم مسئله ها را حل کنم.» حال آنکه در فیزیک، درک واقعی یک مفهوم یا اصل، با توانایی در به کار بردن آن اصل در مسئله های مختلف مرتبط است. فراگیری چگونگی حل مسئله ها اهمیت اساسی دارد؛ شما فیزیک را خوب فرا نگرفته اید؛ مگر آن که بتوانید آنچه را فرا گرفته اید، در موقعیت های مناسب به کار برید.

مسئله های فیزیک را چگونه حل کنیم؟ برای حل انواع مختلف مسئله های فیزیک به روش های متفاوتی نیاز داریم. صرف نظر از نوع مسئله ای که در دست دارید، گام های کلیدی مسلمی وجود دارند که باید همواره آنها را مراعات کنید.

• گام اول: شناسایی مفهوم‌های مرتبط: نخست تشخیص دهید که چه مفهوم‌های فیزیکی به مسئله مربوط‌اند، اگرچه در این مرحله هیچ محاسبه‌ای وجود ندارد؛ اما گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه‌حل مسئله همین مرحله است. در این مرحله باید متغیر هدف مسئله – یعنی کمیتی را که سعی در یافتن مقدار آن دارید – شناسایی کنید. این کمیت می‌تواند انرژی جنبشی یک توپ در حال حرکت، فشار هوا در بالای یک قله کوه یا دمای تعادل یک جسم باشد.

• گام دوم: آمادگی برای حل مسئله: براساس مفهوم‌هایی که در گام اول برگزیده‌اید، معادله‌هایی را که برای حل مسئله نیاز دارید، بنویسید و تصمیم بگیرید که آنها را چگونه به کار خواهید برد. اگر لازم می‌دانید طرح و مدلی از وضعیتی رسم کنید که توسط مسئله توصیف شده است.

• گام سوم: اجرای راه حل: در این مرحله ریاضیات مسئله را انجام دهید. پیش از آن که دست به کار محاسبه‌ها شوید، فهرستی از همه متغیرهای معلوم و مجهول تهیه کنید. سپس معادله‌ها را حل کنید و مجهول‌ها را به دست آورید.

• گام چهارم: ارزیابی پاسخ: هدف شما از حل مسئله فیزیک تنها به دست آوردن یک عدد یا یک فرمول نیست؛ هدف آن است که درک و شناخت بهتری حاصل شود. به این معنا که باید پاسخ را بیازمایید و دریابید که به شما چه می‌گوید. فراموش نکنید که از خود بپرسید «آیا این پاسخ با معناست؟» اگر مجهول شما مقدار افزایش طول یک میله هنگام انبساط است، پاسخ شما باید کسری از طول میله باشد؛ در غیر این صورت حتماً چیزی در فرایند حل مسئله شما نادرست بوده است. بازگردید و روش کار خود را امتحان و راه‌حل را اصلاح کنید.

(ب) سخنی با دبیران ارجمند

اهداف برنامه آموزش فیزیک در دوره متوسطه دوم، مطابق با برنامه درسی ملی در چهار عرصه ارتباط با خالق، شناخت خود، خلق و خلقت تعریف شده و در جهت تقویت پنج عنصر تفکر و عقل، ایمان، علم، عمل و اخلاق پیش خواهد رفت. بر این اساس مهم‌ترین شایستگی‌های مدنظر حوزه علوم تجربی که در درس فیزیک باید در دانش آموز تحقق یابد، عبارت‌اند از:

- نظام‌مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی به عنوان نشانه‌های الهی کشف و گزارش کند و نتایج آن را برای حل مسائل حال و آینده در ابعاد فردی و اجتماعی در قالب ایده یا ابزار ارائه دهد / به کار گیرد.
- با ارزیابی رفتارهای متفاوت در ارتباط با خود و دیگران در موقعیت‌های گوناگون زندگی، رفتارهای سالم را انتخاب کند/ گزارش کند/ به کار گیرد.
- با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به کارگیری این علم را در حل مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توانمندی‌های علوم تجربی را در حل این مسائل گزارش کند.
- با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره‌گیری از علم تجربی، بتواند اندیشه‌هایی مبتنی بر تجارب شخصی، برای مشارکت در فعالیت‌های علمی ارائه دهد و در این فعالیت‌ها با حفظ ارزش‌ها و اخلاق علمی مشارکت کند.

شیوه‌های آموزش. تجربه نشان می‌دهد که درک ایده‌های نهفته در بیشتر مفاهیم فیزیک و کاربرد آنها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان امکان‌پذیر است. آنچه در این راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درهای درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همه دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز یا بسته کند. بنابراین می‌توان گفت شیوه آموزش کارآمد کلید موفقیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

قدردانی

گروه فیزیک لازم می‌داند از اتحادیه دبیران فیزیک ایران و انجمن‌های وابسته، دبیرخانه راهبردی فیزیک، کمیته معلمان فیزیک و همکارانی که به طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند.

مؤلفان

مرداد ماه ۱۳۹۵

فیزیک و اندازه‌گیری

فصل ۱



یکی از وجوه مشترک فیزیک و معماری، اندازه‌گیری است. معماران هنرمند ایرانی از صدها سال پیش با بهره‌گیری از روش‌ها و فنون اندازه‌گیری، اثرهای بدیع و ماندگاری به یادگار گذاشته‌اند.

اگر به دنبال رد پای فیزیک در زندگی خود باشید، کجا را باید جست‌وجو کنید؟ درست حدس زدید! لازم نیست جای خیلی دوری بروید؛ زیرا فیزیک با زندگی روزانه ما عجین شده است. وسایل برقی، خودروها، گوشی‌های تلفن همراه و بسیاری از وسایل و ابزارهای ساخته‌شده اطراف ما، با بهره‌گیری از اصول و قانون‌های فیزیکی ساخته شده‌اند. فیزیک‌دانان، گستره وسیعی از پدیده‌ها را بررسی می‌کنند. این گستره، اندازه‌های خیلی کوچک (مانند اتم‌ها و ذرات سازنده آنها) تا اندازه‌های خیلی بزرگ (مانند کهکشان‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده آنها) را در بر می‌گیرد. در این فصل، پس از آشنایی با فیزیک و نظریه‌های فیزیکی، به اهمیت مدل‌سازی در فیزیک پی خواهید برد. با کمیت‌های فیزیکی، دستگاه بین‌المللی یکاها، چگونگی تبدیل یکاها، خطا و دقت در اندازه‌گیری و همچنین با فرایند تخمین مرتبه بزرگی در حل برخی از مسائل فیزیکی آشنا خواهید شد. در پایان فصل، نگاهی به چگالی و کاربردهای آن خواهد شد.

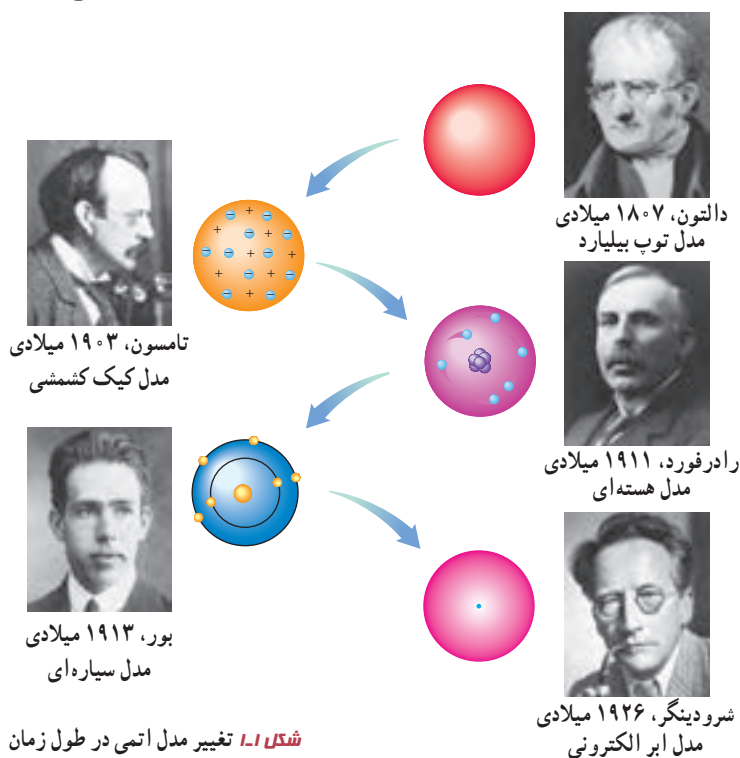
۱-۱ فیزیک: دانش بنیادی

مطالعه و یادگیری فیزیک به این دلیل اهمیت دارد که فیزیک یکی از بنیادی‌ترین دانش‌ها و شالودهٔ تمامی مهندسی‌ها و فناوری‌هایی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در زندگی ما نقش دارند. فیزیک‌دانان، پدیده‌های گوناگون طبیعت را مشاهده می‌کنند و می‌کوشند الگوها و نظم‌های خاصی میان این پدیده‌ها بیابند. دانشمندان فیزیک برای توصیف و توضیح پدیده‌های مورد بررسی، اغلب از قانون، مدل و نظریهٔ فیزیکی استفاده می‌کنند. از آنجا که فیزیک، علمی تجربی است، لازم است این قوانین، مدل‌ها و نظریه‌های فیزیکی توسط آزمایش مورد آزمون قرار گیرند.

مدل‌ها و نظریه‌های فیزیکی در طول زمان همواره معتبر نیستند و ممکن است دستخوش تغییر شوند. به بیان دیگر همواره این امکان وجود دارد که نتایج آزمایش‌های جدید منجر به بازنگری مدل یا نظریه‌ای شود و حتی ممکن است نظریه‌ای جدید جایگزین آن شود. مثلاً در دهه‌های آغازین قرن گذشته، نظریهٔ اتمی با توجه به مشاهدات و کسب اطلاعات جدید در خصوص رفتار اتم‌ها، بارها اصلاح شد (شکل ۱-۱).



آزمایش و مشاهده در فیزیک، اهمیت زیادی دارد؛ اما آنچه بیش از همه در پیشبرد و تکامل علم فیزیک نقش ایفا کرده و می‌کند، تفکر نقادانه و اندیشه‌ورزی فعال فیزیک‌دانان نسبت به پدیده‌هایی است که با آنها مواجه می‌شوند.



ویژگی آزمون‌پذیری و اصلاح نظریه‌های فیزیکی، نقطهٔ قوت دانش فیزیک است و نقش مهمی در فرایند پیشرفت دانش و تکامل شناخت ما از جهان پیرامون داشته است. دانشمندان برای بیان قانون‌های فیزیکی، اغلب از گزاره‌های کلی و در عین حال مختصر استفاده می‌کنند. قانون‌های فیزیکی، معمولاً رابطهٔ بین برخی از کمیت‌های فیزیکی را توصیف می‌کنند و در دامنهٔ وسیعی از پدیده‌های گوناگون طبیعت معتبرند (مانند قانون‌های نیوتون که در علوم نهم با آنها آشنا شدید). برای توصیف دامنهٔ محدودتری از پدیده‌های فیزیکی، که عمومیت کمتری دارند، اغلب از اصطلاح اصل استفاده می‌شود (مانند اصل پاسکال که برای شاره‌های ساکن و محصور معتبر است و در علوم نهم با آن آشنا شدید).

واژه فیزیک، ریشه در یونان باستان دارد و به معنای شناخت طبیعت است. تا آنجا که تاریخ مدون علم نشان می‌دهد، فیلسوفان آسیای صغیر در سده هفتم قبل از میلاد مسیح نخستین کسانی بودند که پرسش‌هایی درباره طبیعت مطرح ساختند. اندیشه‌های علمی این فیلسوفان در سده پنجم قبل از میلاد در یونان و پس از آن در مناطقی مانند مقدونیه، سوریه، مصر و به‌ویژه در شهر اسکندریه پیگیری شد. کارهای ارشمیدس و برخی دیگر از دانشمندان یونان باستان به همین دوره مربوط می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده توسط تاریخ‌نگاران علم نشان می‌دهد روش ارشمیدس به روش‌های علمی امروزه نزدیک بوده است. پس از ظهور و گسترش اسلام، دانشمندان مسلمان و به‌خصوص ایرانی مانند ابوریحان بیرونی، ابن هیشم، خواجه نصیرالدین طوسی، ابن سینا و بسیاری دیگر در زمینه‌های نجوم، نورشناسی و مکانیک، دانش فیزیک را گسترش دادند که بعدها بخشی از این نتایج پایه‌ای برای کارهای گالیله و دیگران شد.



خواجه نصیرالدین طوسی
(۱۲۷۴-۱۲۰۱ م)



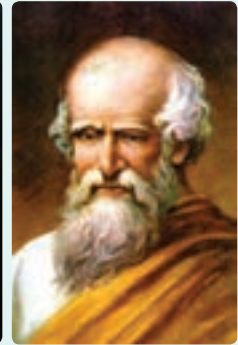
ابوعلی سینا
(۱۰۳۷-۹۸۰ م)



ابوریحان بیرونی
(۱۰۴۸-۹۷۳ م)



ابن هیشم
(۱۰۴۰-۹۶۵ م)



ارشمیدس
(۲۸۷ تا ۲۱۲ قبل از میلاد)



برج کج پیزا واقع در فلورانس ایتالیا



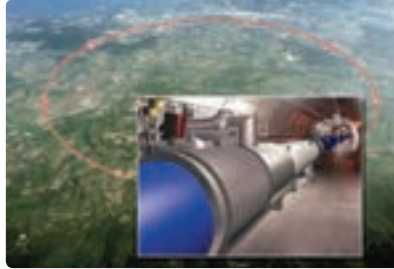
گالیلهو گالیله
(۱۶۴۲-۱۵۶۴ م)

در کتاب‌های تاریخ علم، روایت کرده‌اند که گالیله جسم‌های سبک و سنگین را از بالای برج کج پیزا رها کرد تا دریابد که آیا زمان سقوط آنها یکسان است یا متفاوت. گالیله تشخیص داد که تنها یک بررسی تجربی می‌تواند به این پرسش پاسخ دهد. وی با تعمق زیاد روی نتیجه آزمایش‌های خود، گام بلندی به سوی این اصل برداشت که شتاب جسم در حال سقوط، مستقل از جرم آن است.

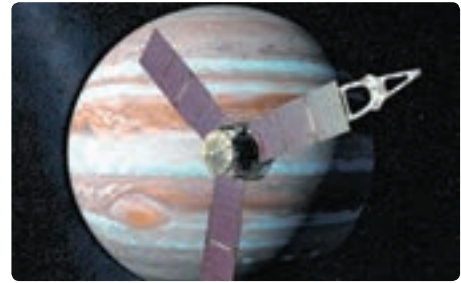
فیزیک، پایه و اساس تمامی مهندسی‌ها و فناوری‌هاست. هیچ مهندسی نمی‌توانست بدون آنکه نخست قانون‌های اساسی فیزیک را درک کند، یک تلویزیون با صفحه تخت، یک فضاپیما، میان‌سیاره‌ای، یک لامپ کم مصرف LED یا حتی یک ابزار ساده طراحی کند. شکل ۱-۲ الف تاج، بخش بسیار کوچکی از دستاوردهای دانش و فناوری‌های نوین را نشان می‌دهند که فیزیک، شالوده تمامی آنهاست.



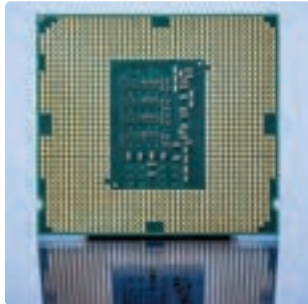
(ب)



(ب)



(الف)



(ج)



(ث)



(ت)

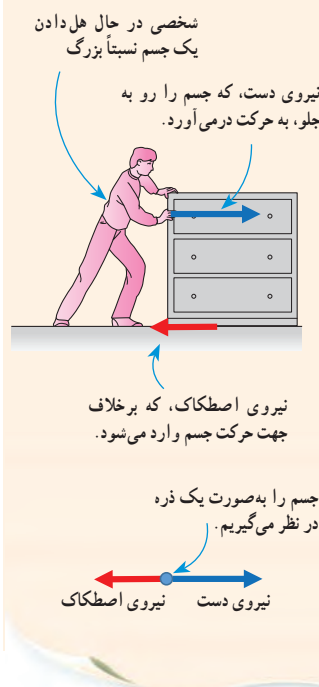
شکل ۱-۲ (الف) جُونو (Juno)، کاوشگری که ناسا به سوی مشتری (برجیس)، بزرگ‌ترین سیاره منظومه شمسی پرتاب کرد و پس از پنج سال، در اوایل تابستان ۱۳۹۵ به مداری نزدیک این سیاره رسید. این مدارگرد که به ابزارهای پیشرفته‌ای مجهز شده، اطلاعاتی دربارهٔ جو مشتری، ویژگی‌های مغناطیسی و گرانشی و همچنین چگونگی شکل‌گیری این سیاره به زمین ارسال می‌کند. (ب) شتاب‌دهنده ذرات زیر اتمی در تونلی به طول ۲۷ کیلومتر که در عمق ۱۷۵ متری زمین و در مرز کشورهای فرانسه و سوئیس ساخته شده است. در این مرکز پژوهشی بیش از ۳۰۰۰ دانشمند و فیزیک‌دان مشغول به کارند. بزرگ‌ترین دستاورد این آزمایشگاه تاکنون، کشف ذرهٔ بوزون هیگز است که خبر تأیید آن در تابستان ۱۳۹۱ اعلام شد. (پ) سامانه مکان‌یابی جهانی (GPS) مکان اجسام را با دقت قابل ملاحظه‌ای روی زمین پیدا می‌کند. بخشی از دقت این سامانه، به این دلیل حاصل می‌شود که GPS بر اساس نظریهٔ نسبیت اینشتین کار می‌کند. (ت) ترابری مگ‌لو (maglev)، یکی از دستاوردهای فیزیک اَبَررساناست. این وسیلهٔ نقلیه موسوم به قطار مغناطیسی حامل پیچه‌های ابررسانا در زیر خود است. همین امر سبب می‌شود تا قطار چند سانتی‌متر بالاتر از ریل به‌صورت شناور درآید و با تندی‌ای فراتر از ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت حرکت کند. (ث) این عکس نمای بزرگ‌شده از یک حشره را نشان می‌دهد که با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده است. در این نوع میکروسکوپ‌ها، به جای نور مرئی، از باریکه‌ای از الکترون‌ها برای تصویربرداری استفاده می‌شود. (ج) پردازنده یا واحد پردازش مرکزی (CPU) متشکل از صدها میلیون تا چندین میلیارد ترانزیستور بسیار کوچک و ظریف است که در یک محفظهٔ سرامیکی جای گرفته‌اند. این شکل یکی از پردازنده‌های نسل جدید را نشان می‌دهد که فراتر از یک میلیارد ترانزیستور ۲۲ نانومتری در آن به‌کار رفته است.^۱

فعالیت ۱-۱

افزون بر فهرست بالا، شما نیز به اتفاق اعضای گروه خود، فهرست دیگری از کاربردهای فیزیک در فناوری تهیه کنید که نقش مهمی در زندگی ما دارند. (این فهرست را می‌توانید به‌صورت پوستر، پاورپوینت، فیلم‌های کوتاه و ... تهیه و ارائه کنید.)

۱- مطالب آمده در زیرنویس شکل ۱-۲ جزء ارزشیابی نیست.

مکانیک، یکی از شاخه‌های فیزیک است که در آن به بررسی حرکت اجسام و نیروهای وارد شده به آنها می‌پردازد. شکل زیر، مثالی ساده از کاربرد مدل‌سازی در مکانیک است. در فصل دوم، از این مدل‌سازی استفاده زیادی خواهیم کرد.



پدیده‌هایی مانند پرتاب توپ، افتادن برگ درخت، تشکیل رنگین کمان، آذرخش و ... ممکن است برای ما عادی شده باشند؛ ولی بررسی و تحلیل آنها در فیزیک معمولاً با پیچیدگی‌هایی همراه است. به همین دلیل فیزیک‌دانان برای بررسی پدیده‌ها، از مدل‌سازی استفاده می‌کنند. مدل‌سازی در فیزیک فرایندی است که طی آن یک پدیده فیزیکی، آن قدر ساده و آرمانی می‌شود تا امکان بررسی و تحلیل آن فراهم شود.

برای شناخت بهتر فرایند مدل‌سازی در فیزیک، فرض کنید بخواهیم حرکت یک توپ پرتاب شده را بررسی کنیم (شکل ۳-۱ الف). ممکن است در نگاه اول، بررسی و تحلیل حرکت توپ، ساده به نظر برسد، ولی واقعیت برخلاف این است. توپ، یک کره کامل نیست (درزها و برجستگی‌هایی روی توپ وجود دارد) و در حین حرکت به دور خود می‌چرخد، باد و مقاومت هوا بر حرکت آن اثر می‌گذارد. وزن توپ با تغییر فاصله آن از مرکز زمین تغییر می‌کند. اگر بخواهیم تمام این موارد را هنگام بررسی و تحلیل حرکت توپ در نظر بگیریم، تحلیل ما پیچیده خواهد شد.

با مدل‌سازی حرکت توپ، می‌توانیم تا حدود زیادی این پیچیدگی‌ها را کاهش دهیم و بررسی و تحلیل حرکت توپ را به طور ساده، امکان‌پذیر سازیم. با چشم پوشیدن از اندازه و شکل توپ، آن را به صورت یک جسم نقطه‌ای یا ذره در نظر می‌گیریم. همچنین با فرض اینکه توپ در خلأ حرکت می‌کند، از مقاومت هوا و اثر وزش باد صرف‌نظر می‌کنیم. سرانجام فرض می‌کنیم با تغییر فاصله توپ از مرکز زمین، وزن آن ثابت می‌ماند (شکل ۳-۱ ب). اینک مسئله ما به قدر کافی ساده شده است و می‌توانیم حرکت آن را بررسی و تحلیل کنیم.

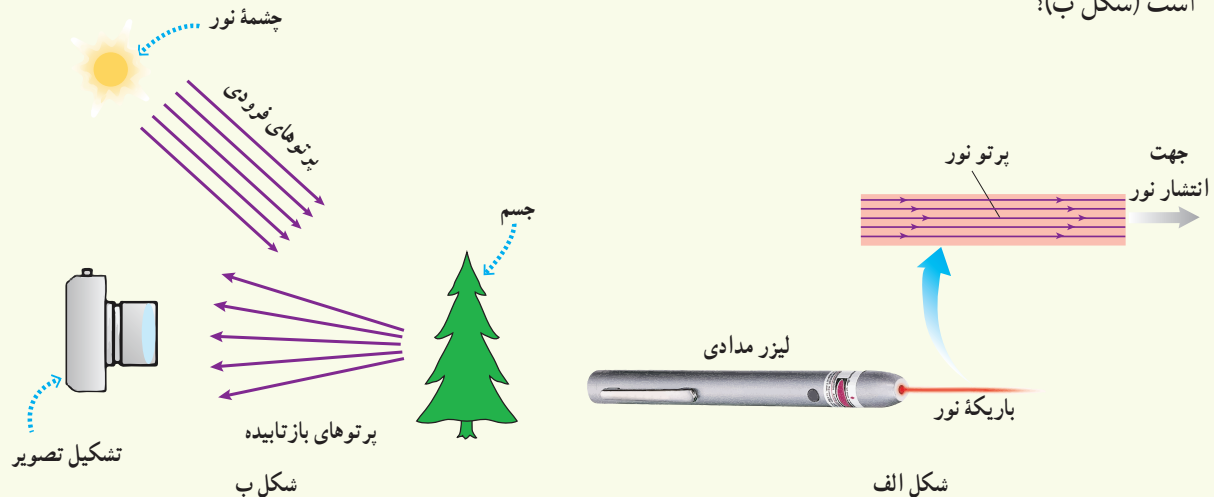
توجه: هنگام مدل‌سازی یک پدیده فیزیکی، باید اثرهای جزئی‌تر را نادیده بگیریم نه اثرهای مهم و تعیین‌کننده را. برای مثال، اگر به جای مقاومت هوا، نیروی جاذبه زمین را نادیده می‌گرفتیم، آن گاه مدل ما پیش‌بینی می‌کرد که وقتی تویی به بالا پرتاب شود در یک خط مستقیم بالا می‌رود!



شکل ۳-۱ استفاده از یک مدل آرمانی برای ساده‌سازی تحلیل حرکت یک توپ بسکتبال در هوا

پوشش ۱-۱

شکل الف براساس آنچه در علوم سال هشتم در زمینه نورشناسی خواندید آمده است. اجزای این شکل را توضیح دهید و بگویید که در آن، چه چیزی مدل سازی شده است. این مدل سازی چگونه در تشکیل تصویر در یک دوربین عکاسی به کار رفته است (شکل ب)؟

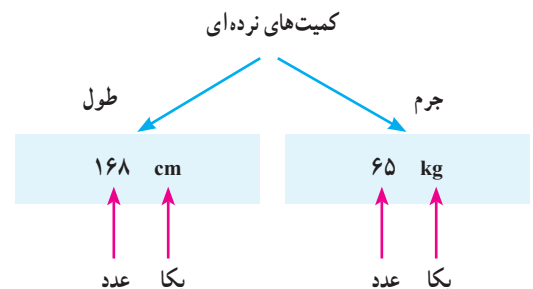


۳-۱ اندازه گیری و کمیت های فیزیکی

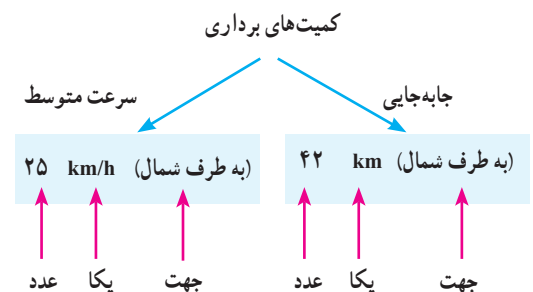
همان طور که پیش از این گفتیم فیزیک علمی تجربی است و هدف آن بررسی پدیده های فیزیکی در جهان پیرامون است. اساس تجربه و آزمایش، اندازه گیری است و برای بیان نتایج اندازه گیری، به طور معمول از عدد و یکای مناسب آن استفاده می کنیم. در فیزیک به هر چیزی که بتوان آن را اندازه گرفت، مانند طول، جرم، تندی، نیرو و زمان سقوط یک جسم، کمیت فیزیکی گفته می شود.

برای بیان برخی از کمیت های فیزیکی، تنها از یک عدد و یکای مناسب آن استفاده می شود. این گونه کمیت ها، **کمیت نرده ای (اسکالر)** نامیده می شوند. برای مثال، وقتی می گوئیم جرم و طول قد شخصی به ترتیب، 65 kg و 168 cm است، از دو کمیت فیزیکی نرده ای برای توصیف این شخص استفاده کرده ایم (شکل ۱-۴).

برای بیان برخی دیگر از کمیت های فیزیکی، افزون بر یک عدد و یکای مناسب آن، لازم است به جهت آن نیز اشاره کنیم. این دسته از کمیت ها را، **کمیت برداری** می نامند. با برخی از این کمیت ها مانند جابه جایی، سرعت، شتاب و نیرو در علوم سال نهم آشنا شدید. برای مثال، وقتی می گوئیم جابه جایی دوچرخه سواری 42 km به طرف شمال و سرعت متوسط آن 25 km/h به طرف شمال است، از دو کمیت برداری برای توصیف حرکت این دوچرخه سوار استفاده کرده ایم (شکل ۱-۵). برای نوشتن کمیت های برداری، مانند نیرو $\vec{F}$ و شتاب $\vec{a}$ ، از علامت پیکان بالای نماد آن کمیت استفاده می کنیم. اگر علامت پیکان بالای یک کمیت برداری نباشد، مانند F و a ، تنها اندازه آن کمیت برداری (شامل عدد و یکا) بیان شده است.



شکل ۱-۴ هر کمیت نرده ای را باید با عدد و یکای مناسب آن بیان کنیم. بیان یک کمیت فیزیکی، بدون ذکر یکای آن، معنایی ندارد!



شکل ۱-۵ هر کمیت برداری را باید با عدد، یکای مناسب و جهت آن بیان کنیم. بیان یک کمیت فیزیکی برداری بدون ذکر یکا و جهت آن، معنایی ندارد!

۴-۱ اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها

جدول ۱-۱ کمیت‌های اصلی و یکای آنها		
کمیت	نام یکا	نماد یکا
طول	متر	m
جرم	کیلوگرم	kg
زمان	ثانیه	s
دما	کلوین	K
مقدار ماده	مول	mol
جریان الکتریکی	آمپر	A
شدت روشنایی	کندِلا (شمع)	cd

جدول ۲-۱ چند مثال از یکاهای فرعی که در فصل‌های این کتاب استفاده شده‌اند		
کمیت	یکای SI	یکای فرعی
تندی و سرعت	m/s	m/s
نیرو	نیوتون (N)	kg m/s ²
فشار	پاسکال (Pa)	kg/ms ²
انرژی	ژول (J)	kg m ² /s ²
توان	وات (W)	kg m ² /s ²
گرمای ویژه	J/kg K	m ² /s ² K

برای انجام اندازه‌گیری‌های درست و قابل اطمینان به یکاهای اندازه‌گیری‌ای نیاز داریم که **تغییر نکنند** و دارای **قابلیت بازتولید** در مکان‌های مختلف باشند. دستگاه یکاهایی که امروزه بیشتر مهندسان و دانشمندان علوم در سراسر جهان به کار می‌برند را اغلب دستگاه متریک می‌نامند، ولی این دستگاه یکاها از سال ۱۹۶۰ میلادی، به‌طور رسمی، دستگاه بین‌المللی (SI) نامیده شده است.^۱

در سال ۱۹۷۱ میلادی، مجمع عمومی اوزان و مقیاس‌ها، هفت کمیت را به‌عنوان کمیت اصلی انتخاب کرد که اساس دستگاه بین‌المللی یکاها را تشکیل می‌دهند (جدول ۱-۱). یکای این کمیت‌ها را یکاهای اصلی می‌نامند. سایر یکاهای دیگر را که برحسب یکاهای اصلی بیان می‌شوند، یکاهای فرعی می‌نامند. تعداد کمیت‌های فیزیکی، آن‌چنان زیاد است که تعیین یکای مستقل برای همه آنها در عمل ناممکن است. خوشبختانه، بسیاری از کمیت‌های فیزیکی مستقل از یکدیگر نیستند و توسط رابطه‌ها و تعریف‌های فیزیکی به یکدیگر وابسته‌اند. این وابستگی به ما کمک می‌کند تا لازم نباشد برای همه کمیت‌های فیزیکی، یکای مستقل تعریف کنیم. برای مثال، همان‌طور که در علوم سال نهم دیدید، تندی متوسط به‌صورت نسبت مسافت به زمان تعریف می‌شود. اگر مسافت را که از جنس طول است، با یکای متر (m) و زمان را با یکای ثانیه (s) بیان کنیم، آن‌گاه یکای تندی متوسط در SI، متر بر ثانیه (m/s) خواهد شد. به این ترتیب، یکای فرعی متر بر ثانیه (m/s)، با یکاهای اصلی طول (m) و زمان (s) مرتبط می‌شود. در جدول ۲-۱ نمونه‌هایی از یکاهای فرعی

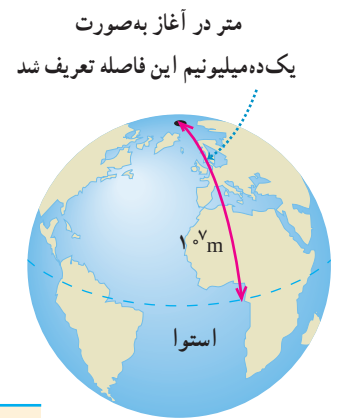
آمده است که در این کتاب از آنها استفاده می‌کنیم. همان‌طور که در این جدول نیز دیده می‌شود برای برخی از یکاهای کاربرد فرعی، نامی مخصوص قرار داده‌اند، مثلاً یکای نیرو (kgm/s²) را نیوتون (N) نامیده‌اند. در این صورت گفته می‌شود: یکای SI نیرو، نیوتون است. معرفی این یکاهای خاص در SI، ضمن احترام به فعالیت‌های علمی دانشمندان گذشته، سبب سهولت در گفتار و نوشتار نیز می‌شود.

خوب است بدانید

در اواسط قرن نوزدهم نیاز به یک دستگاه مقیاس جهانی کاملاً آشکار شد. در سال ۱۸۷۵ میلادی، کنفرانسی بین‌المللی در پاریس در زمینه سنجش تشکیل شد و ۱۷ دولت قرارداد کنوانسیون متر را امضا کردند. امضاکنندگان تصمیم گرفتند که یک مؤسسه علمی دائمی به نام دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها تأسیس کنند. ایران نیز کنوانسیون متر را در سال ۱۳۵۴ امضا کرد و به عضویت این دفتر درآمد. مرکز اندازه‌شناسی سازمان ملی استاندارد ایران به‌عنوان نقطه اتصال کشور به دستگاه اندازه‌گیری جهانی، وظیفه ارتباط با این سازمان جهانی را دارد.

۱- SI سرحرف عبارت فرانسوی (Système International) به معنای دستگاه بین‌المللی است.

طول: به لحاظ تاریخی، در اواخر قرن هجدهم، یکای طول (متر) به صورت یک ده میلیونیم فاصله استوا تا قطب شمال تعریف شد (شکل ۱-۶). تا سال ۱۹۶۰ میلادی، فاصله میان دو خط نازک حک شده در نزدیکی دو سر میله‌ای از جنس پلاتین - ایریدیوم، وقتی میله در دمای صفر درجه سلسیوس قرار داشت، برابر یک متر تعریف شده بود. بنابر آخرین توافق جهانی مجمع عمومی وزن‌ها و مقیاس‌ها در سال ۱۹۸۳ میلادی، یک متر برابر مسافتی تعریف شد که نور در مدت زمان $\frac{1}{299792458}$ ثانیه در خلأ طی می‌کند. این تعریف، تخصصی است و برای اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق به کار می‌رود^۱. در جدول ۱-۳ مقادیر تقریبی برخی طول‌ها آمده است.



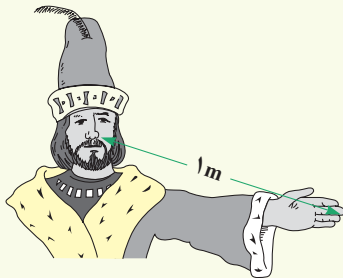
شکل ۱-۷ اولین تعریف متر در سال ۱۷۹۱ میلادی

جدول ۱-۳ مقادیر تقریبی برخی طول‌های اندازه‌گیری شده

جسم	طول (m)	جسم	طول (m)
فاصله منظومه شمسی تا نزدیک‌ترین کهکشان	10^{22}	طول زمین فوتبال	9×10^1
فاصله منظومه شمسی تا نزدیک‌ترین ستاره	4×10^{16}	طول بدن نوعی مگس	5×10^{-2}
یک سال نوری	9×10^{15}	اندازه ذرات کوچک گرد و خاک	1×10^{-4}
شعاع مدار میانگین زمین به دور خورشید	$1/50 \times 10^{11}$	اندازه سلول‌های بیشتر موجودات زنده	1×10^{-5}
فاصله میانگین ماه از زمین	$3/84 \times 10^8$	قطر اتم هیدروژن	1×10^{-10}
شعاع میانگین زمین	$6/40 \times 10^6$	قطر هسته اتم هیدروژن	$1/75 \times 10^{-14}$
فاصله ماهواره‌های مخابراتی از زمین	$3/6 \times 10^7$	قطر پروتون	1×10^{-15}

پوشش ۱-۲

اگر مطابق شکل روبه‌رو، یکای طول را به صورت فاصله نوک بینی تا نوک انگشتان دست کشیده شده بگیریم، چه مزایا و چه معایبی دارد؟



فعالیت ۱-۲



ذرع و فرسنگ از جمله یکاهای قدیمی ایرانی برای طول است. هر ذرع 10^4 سانتی‌متر و هر فرسنگ 6000 ذرع است^۲. قشم، بزرگ‌ترین جزیره خلیج فارس است که مساحت آن از بیش از بیست کشور جهان بزرگ‌تر است. طول این جزیره حدود 120 کیلومتر برآورد شده است. این طول را بر حسب ذرع و فرسنگ بیان کنید.

۱- نیازی به حفظ کردن این تعریف تخصصی نیست.

۲- به خاطر سپردن یکاهای قدیمی و غیر SI در فعالیت‌ها و مسئله‌های این فصل برای دانش‌آموزان ضرورتی ندارد و نباید مورد ارزشیابی قرار بگیرند.

تمرین ۱-۱

الف) یکای نجومی^۱ برابر میانگین فاصله زمین تا خورشید است ($1\text{AU} \approx 1.5 \times 10^{11}\text{m}$). فاصله زمین (منظومه شمسی) تا نزدیک‌ترین ستاره بعد از خورشید، بر حسب یکای نجومی چقدر است؟
 ب) مسافتی را که نور در مدت یک سال در خلأ می‌پیماید یک سال نوری می‌نامند و آن را با نماد ly نمایش می‌دهند.^۲
 کوازارها^۳ دورترین اجرام شناخته‌شده از منظومه شمسی هستند و به عبارتی در دورترین محل قابل مشاهده کیهان قرار دارند. فاصله کوازارها از منظومه شمسی 1.0×10^{26} متر برآورد شده است. این فاصله را بر حسب سال نوری بیان کنید. تندی نور را در خلأ^۴ 3.0×10^8 متر بر ثانیه بگیرید.



جرم: یکای جرم در SI، کیلوگرم (kg) نامیده می‌شود و به صورت جرم استوانه‌ای فلزی از جنس آلیاژ پلاتین-ایریدیوم تعریف شده است. جرم این استوانه که به دقت درون دو حباب شیشه‌ای جای گرفته، کیلوگرم استاندارد بین‌المللی است که در موزه سِور فرانسه نگهداری می‌شود.^۴ نسخه‌های کاملاً مشابهی از این نمونه ساخته و برای کشورهای دیگر ارسال شده است (شکل ۱-۷).
 در علوم سال هفتم با ابزارهای اندازه‌گیری جرم آشنا شدید. مقادیر تقریبی برخی جرم‌ها در جدول ۱-۴ آمده است.

جدول ۱-۴ مقادیر تقریبی برخی جرم‌های اندازه‌گیری شده			
جسم	جرم (kg)	جسم	جرم (kg)
عالم قابل مشاهده	1×10^{52}	انسان	7×10^1
کهکشان راه شیری	7×10^{41}	قورباغه	1×10^{-1}
خورشید	2×10^{30}	پشه	1×10^{-5}
زمین	6×10^{24}	باکتری	1×10^{-15}
ماه	$7/34 \times 10^{22}$	اتم هیدروژن	$1/67 \times 10^{-27}$
کوسه	1×10^3	الکترون	$9/11 \times 10^{-31}$

شکل ۱-۷ استاندارد ملی کیلوگرم که نسخه دقیقی از استاندارد بین‌المللی سِور فرانسه است. این نمونه، در مرکز اندازه‌شناسی در سازمان ملی استاندارد ایران نگهداری می‌شود.

فعالیت ۳-۱

خروار، من تبریز، سیر، مثقال، نخود و گندم از جمله یکاهای قدیمی ایرانی برای اندازه‌گیری جرم است. این یکاها به صورت زیر به یکدیگر مرتبط اند:

$$1 \text{ خروار} = 100 \text{ من تبریز}$$

$$1 \text{ من تبریز} = 40 \text{ سیر} = 640 \text{ مثقال}$$

$$1 \text{ مثقال} = 24 \text{ نخود} = 96 \text{ گندم}$$

با توجه به اینکه هر مثقال معادل $4/86$ گرم است، هر کدام از این یکاها را بر حسب گرم و کیلوگرم بیان کنید.

^۱— Astronomical Unit

^۲— light year

^۳— Quasars

^۴— یک استاندارد اتمی برای جرم می‌توانست بنیادی تر باشد ولی در حال حاضر نمی‌توانیم جرم را در مقیاس اتمی با دقتی همانند مقیاس ماکروسکوپی اندازه بگیریم.

زمان: در طول سال‌های ۱۲۶۸ تا ۱۳۴۶ ه.ش، یکای زمان، ثانیه (s) به صورت $\frac{1}{86400}$ میانگین روز خورشیدی تعریف می‌شد^۱. استاندارد کنونی زمان که از سال ۱۳۴۶ ه.ش به کار گرفته شد بر اساس دقت بسیار زیاد ساعت‌های اتمی تعریف شده است که در کتاب‌های پیشرفته تر فیزیک می‌توانید با آن آشنا شوید^۲.

در بسیاری موارد نیاز به اندازه‌گیری مدت زمان بین شروع و پایان یک رویداد داریم. این مدت زمان را بازه زمانی می‌نامیم. مقادیر تقریبی برخی بازه‌های زمانی در جدول ۱-۵ آمده است.

بازه زمانی	ثانیه
سن عالم	5×10^{17}
سن زمین	$1/43 \times 10^{17}$
میانگین عمر یک انسان	2×10^9
یک سال	$3/15 \times 10^7$
یک روز	$8/6 \times 10^4$
زمان بین دو ضربان عادی قلب	8×10^{-1}

فعالیت ۱-۴

در خصوص چگونگی اندازه‌گیری زمان از دوران باستان تا عصر حاضر مطالبی را به طور مستند تهیه کنید^۳.

مطالب تهیه‌شده را با توجه به مهارت و علاقه‌مندی افراد گروه خود، به یکی از شکل‌های روزنامه دیواری، پاورپوینت، قطعه فیلم کوتاه و... به کلاس درس ارائه دهید.

خوب است بدانید

چندین هزار سال از توجه جوامع بشری به ضرورت اندازه‌گیری و کاربرد آن در زندگی روزمره می‌گذرد. ایجاد تقویم، تعیین زمان، اندازه‌گیری فاصله، مساحت، ساخت وزنه و پیمانه تنها نمونه‌ای از شواهدی هستند که نقش اندازه‌گیری را در زندگی انسان‌های دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. اولین قانون اندازه‌گیری در ایران، سال ۱۳۰۴ ه.ش به تصویب رسید. با تصویب این قانون دستگاه متریک به عنوان دستگاه رسمی اندازه‌گیری در کشور تعیین شد. اجرای قانون اندازه‌گیری در کشور به عهده مرکز اندازه‌شناسی سازمان ملی استاندارد ایران است. این مرکز شامل بخش‌هایی مربوط به اندازه‌گیری‌های مکانیکی، فیزیکی و الکتریکی است.

تبدیل یکاها: اغلب در حل مسئله‌های فیزیک، لازم است یکای کمیتی را تغییر دهیم. برای مثال، ممکن است لازم باشد کیلوگرم (kg) را به میکروگرم (μg)، یا متر بر ثانیه (m/s) را به کیلومتر بر ساعت (km/h) تبدیل کنیم. این کار با روش تبدیل زنجیره‌ای انجام می‌شود. در این روش، اندازه کمیت را در یک ضریب تبدیل (نسبتی از یکاها که برابر عدد یک است) ضرب می‌کنیم. برای مثال، چون ۱ m برابر 10^3 cm است، داریم:

$$\frac{1\text{ m}}{10^3\text{ cm}} = 1 \quad \text{و} \quad \frac{10^3\text{ cm}}{1\text{ m}} = 1$$

بنابراین، هر دو کسر بالا را که برابر یک هستند می‌توان به عنوان ضریب تبدیل به کار برد (ذکر یکاها در صورت و مخرج کسر الزامی است). از آنجا که ضرب کردن هر کمیت در عدد یک، اندازه آن کمیت

۱- یک روز خورشیدی، زمانی بین ظاهر شدن‌های متوالی خورشید در بالاترین نقطه آسمان در هر روز است.

۲- ساعت‌های اتمی پس از چندین میلیون سال، تنها یک ثانیه جلو یا عقب می‌افتند!

۳- خوب است نگاهی به سایت موزه علوم و فناوری www.irstm.ir نیز داشته باشید.

را تغییر نمی‌دهد، هرگاه ضریب تبدیلی را مناسب بدانیم می‌توان از آن استفاده کرد. برای مثال، یکای cm را در ۸۵cm، به صورت زیر به یکای m تبدیل می‌کنیم:

$$85 \text{ cm} = (85 \text{ cm})(1) = (85 \text{ cm}) \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 0.85 \text{ m}$$

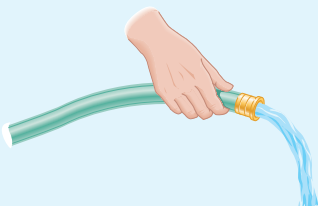
ضریب تبدیل ←

همچنین در مثالی دیگر، تبدیل یکای کمیت ۳۶km/h را بر حسب یکای m/s به صورت زیر انجام

می‌دهیم:

$$36 \text{ km/h} = \left(36 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) (1)(1) = \left(36 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) = 10 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۲



در فیزیک، تغییر هر کمیت را نسبت به زمان، معمولاً آهنگ آن کمیت می‌نامیم. از شلنگ شکل روبه‌رو، آب با آهنگ $125 \text{ cm}^3/\text{s}$ خارج می‌شود. این آهنگ را به روش تبدیل زنجیره‌ای، بر حسب یکای لیتر بر دقیقه (L/min) بنویسید. (هر لیتر معادل 1000 سانتی‌متر مکعب است.)

سازگاری یکاها: هر کمیت فیزیکی را با نماد مشخصی نشان می‌دهیم. برای مثال اندازه شتاب

را با a و جرم را با m نشان می‌دهیم. همچنین برای بیان ارتباط بین کمیت‌های فیزیکی، از روابط و معادله‌ها استفاده می‌کنیم. یکی از این رابطه‌های فیزیکی، قانون دوم نیوتون، $F = ma$ ، است که در علوم سال نهم با آن آشنا شدید. هنگام استفاده از این رابطه و جایگذاری اندازه هر کمیت در آن، باید به سازگاری یکاها در دو طرف رابطه توجه کنیم. اگر بخواهیم حاصل دو طرف رابطه بر حسب یکاهای SI بیان شود باید یکای کمیت‌های داده شده را نیز به یکاهای SI تبدیل کنیم. برای مثال، اگر جرم جسمی 325 g و شتاب آن $1/75 \text{ m/s}^2$ باشد، برای سازگاری یکاها در دو طرف معادله، باید یکای جرم جسم را به کیلوگرم تبدیل کنیم. در این صورت مقدار حاصل را می‌توان بر حسب یکای نیوتون بیان کرد.

$$F = ma = (0.325 \text{ kg})(1/75 \text{ m/s}^2) = 0.0043 \text{ N}$$

یکای دو طرف معادله با هم سازگار است.
(جدول ۱-۲ را ببینید.)

پیشوندهای یکاها: هرگاه در اندازه‌گیری‌ها با اندازه‌های بسیار بزرگ‌تر یا بسیار کوچک‌تر از

یکای اصلی آن کمیت مواجه شویم، از پیشوندهایی استفاده می‌کنیم که در جدول ۱-۶ فهرست شده‌اند. همان‌طور که از ضرایب تبدیل جدول پیداست هر پیشوند، توان معینی از 10 را نشان می‌دهد که به صورت یک عامل ضرب به کار می‌رود (به بزرگ و کوچک بودن حروف نمادها توجه کنید). یعنی وقتی پیشوندی به یکایی افزوده می‌شود، آن یکا در ضریب مربوطه ضرب می‌شود، مثلاً یک میکرومتر ($1 \mu\text{m}$) که به آن میکرون نیز می‌گویند برابر 10^{-6} m است یا سه مگاوات ($3 \times 10^6 \text{ W}$) برابر $3 \times 10^6 \text{ W}$ است.

جدول ۱-۶ پیشوندهای یکاها

ضریب	پیشوند	نماد	ضریب	پیشوند	نماد
10^{24}	یوتا	Y	10^{-24}	یوکتو	y
10^{21}	زِتا	Z	10^{-21}	زِبتو	z
10^{18}	اِگزا	E	10^{-18}	اَتو	a
10^{15}	پِتا	P	10^{-15}	فِمتو	f
10^{12}	تِرا	T	10^{-12}	پیکو	p
10^9	گیگا (جیگا)	G	10^{-9}	نانو	n
10^6	مِگا	M	10^{-6}	میکرو	μ
10^3	کیلو	k	10^{-3}	میلی	m
10^2	هکتو	h	10^{-2}	سانتی	c
10^1	دِکا	da	10^{-1}	دِسی	d

پیشوندهایی که کاربرد بیشتری دارند و بهتر است آنها را به خاطر بسپارید با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

نمادگذاری علمی: در پاره‌ای از اندازه‌گیری‌ها با مقدارهای

خیلی بزرگ یا خیلی کوچک سرو کار داریم؛ مثلاً برای نوشتن جرم زمین برحسب کیلوگرم باید تعداد ۲۲ صفر را بعد از عدد ۵۹۸ بنویسیم. یا برای نوشتن جرم یک الکترون برحسب کیلوگرم باید بعد از ممیز، ۳۰ عدد صفر قرار دهیم و پس از آن عدد ۹۱۰۹ را بنویسیم.

بدیهی است نوشتن چنین عددهایی به صورت اعشاری یا با صفرهای زیاد، علاوه بر دشواری در خواندن و نوشتن، احتمال اشتباه را نیز افزایش می‌دهد. از این رو، با استفاده از روشی که آن را نمادگذاری علمی می‌نامند، نوشتن و محاسبه مقدارهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک ساده‌تر می‌شود.

اندازه هر کمیت فیزیکی، که به صورت نمادگذاری علمی بیان می‌شود، باید شامل سه قسمت باشد. قسمت‌های اول و دوم، در برگیرنده حاصل ضرب عددی از ۱ تا 10^1 در توان صحیحی از 10^0 است و در قسمت سوم، یکای آن کمیت نوشته می‌شود. برای آشنایی بیشتر با نمادگذاری علمی، به مثال‌های جدول ۱-۷ توجه کنید.

جدول ۱-۷ بیان اندازه چند کمیت به صورت نمادگذاری علمی

نمونه	اندازه کمیت (شامل عدد و یکا)	بیان به صورت نمادگذاری علمی
حجم بنزین مصرفی در ایران در سال ۱۳۹۴	260000000000 L	$2/60 \times 10^{11} \text{ L}$
تندی نور در هوا	300000000 m/s	$3/00 \times 10^8 \text{ m/s}$
طول کل خطوط انتقال نفت خام، گاز و سایر فراورده‌های سوختی در ایران	38900000 m	$3/89 \times 10^7 \text{ m}$
حجم یک بشکه نفت	159 L	$1/59 \times 10^2 \text{ L}$
قطر موی انسان	$0/00000801 \text{ m}$	$8/01 \times 10^{-6} \text{ m}$
قطر اتم هیدروژن	$0/00000000106 \text{ m}$	$1/06 \times 10^{-10} \text{ m}$

مثال ۱-۱

مقدار بار الکتریکی الکترون $۱.۶ \times 10^{-19} \mu C$ است. مقدار این بار را برحسب کولن و با نمادگذاری علمی بنویسید.

پاسخ: با توجه به جدول ۱-۶، پیشوند میکرو (μ) برابر 10^{-6} است. به این ترتیب داریم:

$$۱.۶ \times 10^{-19} \mu C = ۱.۶ \times 10^{-25} C = ۱/۶ \times 10^{-19} C$$

پرسش ۳-۱

کدام گزینه جرم یک زنبور عسل ($۱۵ \times 10^{-۵} \text{ kg}$) را به صورت نمادگذاری علمی درست بیان می‌کند؟

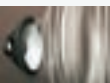
$$۱۵ \times 10^{-۵} \text{ kg} \quad \square$$

$$۱/۵ \times 10^{-۴} \text{ kg} \quad \square$$

$$۰/۱۵ \times 10^{-۳} \text{ kg} \quad \square$$

تمرین ۳-۱

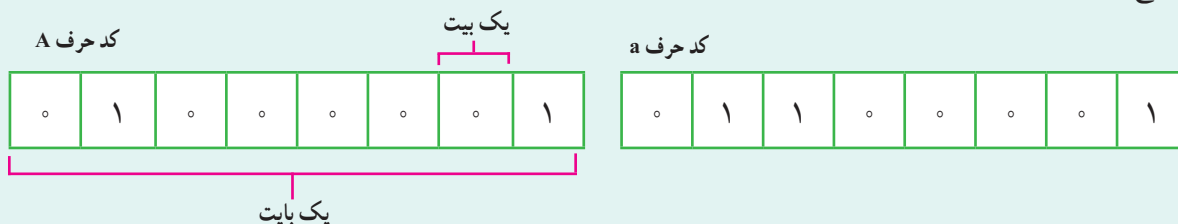
با توجه به پیشوندهای یکاهای SI و نمادگذاری علمی جدول زیر را کامل کنید.

	قطر میانگین یک گلبول (گویچه) قرمز	$۷/۰ \times 10^{-۶} \text{ m}$	 mm	 μm
	قطر هسته اتم اورانیوم	$۱/۷۵ \times 10^{-۱۴} \text{ m}$	 pm	 fm
	جرم یک گیره کاغذ	$۱/۰ \times 10^{-۴} \text{ kg}$	 g	 mg
	زمانی که نور مسافت $۳/۰$ متر را در هوا طی می‌کند.	$۱/۰ \times 10^{-۹} \text{ s}$	 μs	 ns
	زمانی که صوت مسافت $۳۵/۰$ متر را در هوا طی می‌کند.	$۱/۰ \times 10^{-۳} \text{ s}$	 ms	 μs

خوب است بدانید

یکای پایه یا بنیادی اطلاعات در رایانه و ارتباطات، بیت (bit) است. هر بیت تنها با دو مقدار ۰ و ۱ تعریف می‌شود. این دو مقدار می‌توانند به صورت مقدارهای منطقی (درست/ نادرست، آری/ نه)، علائم جبری (+/-) یا حالت‌های راه‌اندازی (روشن/ خاموش) تفسیر شوند.

به دسته‌های ۸ تایی از بیت‌ها، بایت می‌گویند ($۱B = ۸b$). یک بایت می‌تواند نشان‌دهنده یک کاراکتر (یک حرف، یک عدد صحیح بین ۰ تا ۹، یا یک علامت نشانه‌گذاری و غیره) باشد. برای مثال، کد حرف A و a به صورت‌های زیر است:



$2^{10} \text{ b} = 1024 \text{ b} = 1 \text{ kb}$	کیلو بیت
$2^{20} \text{ b} = 1024 \text{ kb} = 1 \text{ Mb}$	مگا بیت
$2^{30} \text{ b} = 1024 \text{ Mb} = 1 \text{ Gb}$	گیگا بیت
$2^{40} \text{ b} = 1024 \text{ Gb} = 1 \text{ Tb}$	ترا بیت
$2^{50} \text{ b} = 1024 \text{ Tb} = 1 \text{ Pb}$	پتا بیت
$2^{60} \text{ b} = 1024 \text{ Pb} = 1 \text{ Eb}$	اگزا بیت
$2^{70} \text{ b} = 1024 \text{ Eb} = 1 \text{ Zb}$	زتا بیت
$2^{80} \text{ b} = 1024 \text{ Zb} = 1 \text{ Yb}$	یوتا بیت

با کمی دقت متوجه می‌شویم که هر بایت می‌تواند ۲۵۶ ترکیب ۸ تایی از صفرها و یک‌ها بسازد که هر کدام نماینده یک کارا کتر هستند.

پیشوندهای بزرگ ترکیب یادی اطلاعات به صورت کیلو بیت (kb)، مگا بیت (Mb)، گیگا بیت (Gb)، ترا بیت (Tb) و غیره است. بر خلاف پیشوندهای یکای SI که در آن هر کیلو برابر 10^3 است در مبنای دوتایی هر کیلو برابر $1024 = 2^{10}$ است (جدول روبه‌رو را ببینید).

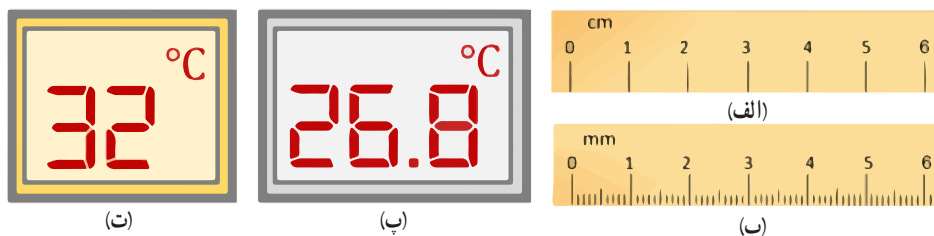
توجه داشته باشید که ظرفیت ذخیره داده و اطلاعات در حافظه‌های SD، USB، DVD و ... را بر حسب پیشوندهایی از بایت (B) اعلام می‌کنند.



۵-۱ اندازه‌گیری: خطا و دقت

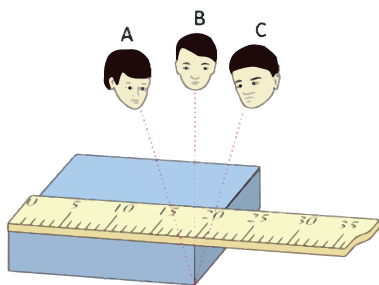
در اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی مانند طول، جرم، زمان و ... قطعیت وجود ندارد و همواره مقداری خطا وجود دارد. با انتخاب وسیله‌های دقیق و روش صحیح اندازه‌گیری، تنها می‌توان خطای اندازه‌گیری را کاهش داد، ولی هیچ گاه نمی‌توان آن را به صفر رساند. با وجود این، توجه به عوامل زیر نقش مهمی در افزایش دقت اندازه‌گیری دارد.

۱- دقت وسیله اندازه‌گیری: یکی از عوامل مهم در دقت اندازه‌گیری، دقت و حساسیت وسیله اندازه‌گیری است. برای مثال، دقت خط‌کشی که تا میلی‌متر مدرج شده، بیشتر از دقت خط‌کشی است که تا سانتی‌متر مدرج شده است. بنابر یک قاعده کلی، خطای اندازه‌گیری توسط خط‌کش و سایر وسیله‌های درجه‌بندی شده، $\pm \frac{1}{p}$ کمینه تقسیم‌بندی مقیاس آن وسیله است و برای وسیله‌های رقمی (دیجیتال) مثبت و منفی یک واحد از آخرین رقمی است که می‌خوانند. به این ترتیب، خطای اندازه‌گیری خط‌کشی که تا سانتی‌متر مدرج شده، برابر $\pm 0.5 \text{ cm}$ (شکل ۱-۸ الف)، خط‌کشی که تا میلی‌متر درجه‌بندی شده برابر $\pm 0.5 \text{ mm}$ (شکل ۱-۸ ب)، خطای دماسنج رقمی در شکل ۱-۸ پ، که $26/8^\circ \text{C}$ را می‌خواند برابر $\pm 0.1^\circ \text{C}$ و خطای دماسنج رقمی شکل ۱-۸ ت، که 32°C را می‌خواند برابر $\pm 1^\circ \text{C}$ است.



شکل ۱-۸ خطای اندازه‌گیری (الف) با خط‌کش سانتی‌متری برابر $\pm 0.5 \text{ cm}$ ، (ب) با خط‌کش میلی‌متری برابر $\pm 0.5 \text{ mm}$ ، (پ) و (ت) با دماسنج‌های رقمی به ترتیب برابر $\pm 0.1^\circ \text{C}$ و $\pm 1^\circ \text{C}$ است.

فیزیک و اندازه‌گیری



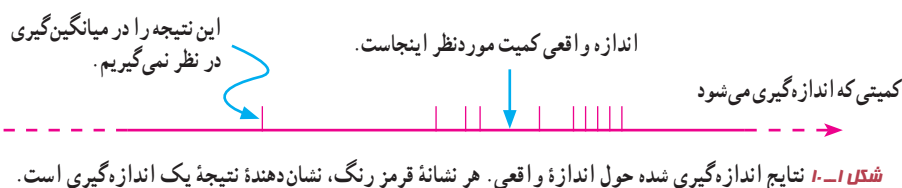
شکل ۱-۹ خطای مشاهده، ناشی از اختلاف منظر، در خواندن و گزارش نتیجه اندازه‌گیری تأثیر مهمی دارد.

۲- مهارت شخص آزمایشگر: یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار روی دقت اندازه‌گیری،

مهارت‌های شخص آزمایشگر است. یکی از این مهارت‌ها، نحوه خواندن نتیجه اندازه‌گیری است. شکل ۹-۱ تأثیر اختلاف منظر در خواندن نتیجه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. خواندن نتیجه اندازه‌گیری از منظرهای A و C خطا را افزایش می‌دهد در حالی که گزارش شخصی که از منظر B نتیجه اندازه‌گیری را می‌خواند دقت بیشتری دارد.

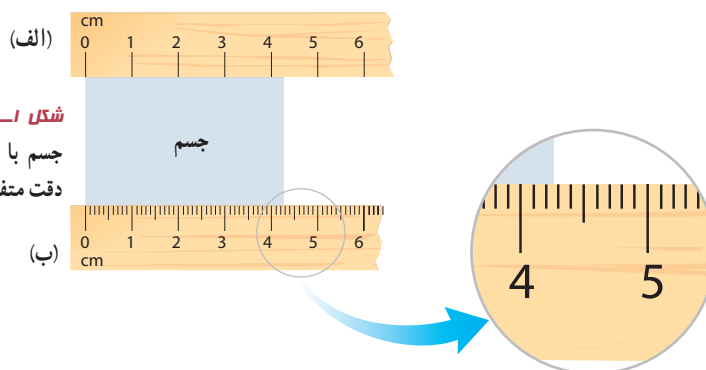
۳- تعداد دفعات اندازه‌گیری: برای کاهش خطا در اندازه‌گیری هر کمیت، معمولاً اندازه‌گیری

آن را چند بار تکرار می‌کنند. میانگین عددهای حاصل از اندازه‌گیری به عنوان نتیجه اندازه‌گیری گزارش می‌شود. البته در میان عددهای متفاوت، اگر یک یا دو عدد اختلاف زیادی با بقیه داشته باشند در میانگین‌گیری به حساب نمی‌آیند (شکل ۱-۱۰).



رقم‌های بامعنا و گزارش نتیجه اندازه‌گیری: رقم‌هایی را که بعد از اندازه‌گیری یک کمیت

فیزیکی ثبت می‌کنید رقم‌های بامعنا می‌گویند. رقم آخر، که غیر قطعی و مشکوک است و آن را حدس می‌زنیم نیز جزو رقم‌های بامعنا محسوب می‌شود. برای مثال، فرض کنید می‌خواهید طول جسمی را با دو خط‌کش با درجه‌بندی و دقت متفاوت اندازه‌گیری کنید (شکل ۱-۱۱).



خطای اندازه‌گیری در ابزارهای رقمی، برابر مثبت و منفی دقت آن ابزار است. به این ترتیب نتیجه اندازه‌گیری دما توسط دماسنج شکل بالا را باید به صورت زیر گزارش کنیم:

$$(22.6 \pm 0.1)^\circ\text{C}$$

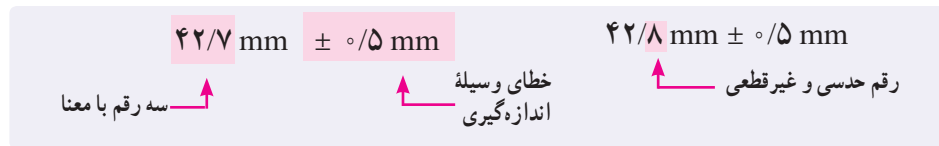
خط‌کش شکل ۱-۱۱ الف، برحسب سانتی‌متر مدرج شده است و خطای اندازه‌گیری آن ± 0.5 سانتی‌متر

است. به نظر شما خط‌کش الف چه طولی را نشان می‌دهد؟ $4/2$ یا $4/3$ سانتی‌متر؟ از آنجا که خط‌کش الف برحسب میلی‌متر مدرج نشده است، لذا عددهای ۲ و ۳ قطعی نیستند و آنها را حدس می‌زنیم. در این حالت نتیجه اندازه‌گیری شامل دو رقم بامعناست و آخرین رقم سمت راست، حدسی یا غیرقطعی است. به این ترتیب، نتیجه اندازه‌گیری به صورت زیر ثبت و گزارش می‌شود:

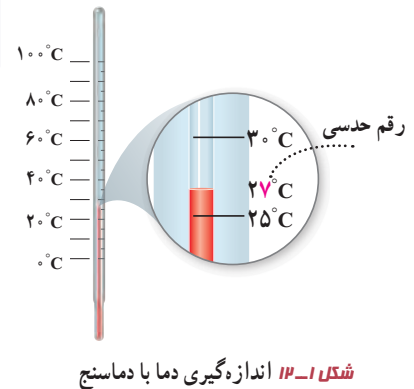
$$4.2 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm} \quad \text{یا} \quad 4.3 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$$

رقم حدسی و غیرقطعی خطای وسیله اندازه‌گیری دو رقم بامعنا

اندازه‌گیری طول جسم را با خط‌کش دیگری که تا میلی‌متر مدرج شده است انجام می‌دهیم. به نظر شما خط‌کش ب، چه طولی را نشان می‌دهد؟ $42/8$ یا $42/7$ میلی‌متر؟ از آنجا که خط‌کش شکل ۱-۱۱ ب، برحسب میلی‌متر مدرج شده است، لذا عددهای ۷ و ۸ قطعی نیستند و آنها را حدس می‌زنیم. در این حالت نتیجه اندازه‌گیری با سه رقم بامعنا بیان شده است و آخرین رقم سمت راست، حدسی یا غیرقطعی است. به این ترتیب، نتیجه اندازه‌گیری به صورت زیر ثبت و گزارش می‌شود:



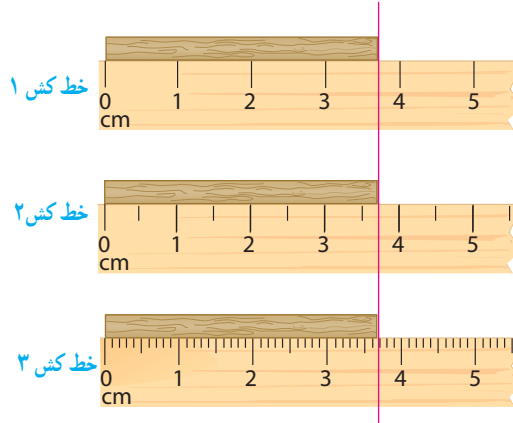
باید توجه کنید که این موضوع در سایر وسیله‌های اندازه‌گیری درجه‌بندی شده نیز صدق می‌کند و آخرین رقم سمت راست حاصل از اندازه‌گیری، همواره حدسی و غیرقطعی است (شکل ۱-۱۲). در ابزارهای اندازه‌گیری با نمایشگر رقمی (دیجیتال) آخرین رقم سمت راست نتیجه اندازه‌گیری، اگرچه ما آن را حدس نمی‌زنیم و توسط دستگاه گزارش می‌شود، ولی غیرقطعی و مشکوک است. برای مثال، رقم ۸ در دمایی که دماسنج شکل ۱-۸ پ می‌خواند $(26/8 \pm 0/1)^\circ\text{C}$ ، غیرقطعی و مشکوک است.



مثال ۲-۱

نتیجه اندازه‌گیری توسط هر خط‌کش را به همراه خطای آن بنویسید.

پاسخ:



خط‌کش ۱: کمینه درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۱ cm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۱ cm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش به صورت $\pm 0/5 \text{ cm}$ بیان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را $3/7 \text{ cm} \pm 0/5 \text{ cm}$ بیان کرد.

خط‌کش ۲: کمینه درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۵ mm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۵ mm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره

کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش به صورت $\pm 0/25 \text{ cm}$ بیان می‌شود که باید به صورت $\pm 0/3 \text{ cm}$ گرد شود. بنابراین می‌توان نتیجه اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را $3/7 \text{ cm} \pm 0/3 \text{ cm}$ بیان کرد. اگر نتیجه اندازه‌گیری را به صورت $3/7 \text{ cm} \pm 0/25 \text{ cm}$ بیان کنید هر چند از نظر ریاضیات مشکلی ندارد ولی از نظر محاسبه‌های فیزیکی نادرست است.

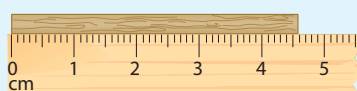
خط‌کش ۳: کمینه درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۱ mm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۱ mm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش، $\pm 0/5 \text{ mm}$ یا $\pm 0/05 \text{ cm}$ است. بنابراین می‌توان نتیجه اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را $3/68 \text{ cm} \pm 0/05 \text{ cm}$ یا $36/8 \text{ mm} \pm 0/5 \text{ mm}$ بیان کرد.

تمرین ۴-۱

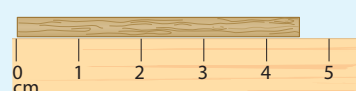
۱- در هر یک از شکل‌های (الف) تا (پ)، طول جسم را چقدر گزارش می‌کنید؟ در گزارش خود، هم عدد غیرقطعی و هم خطای وسیله را مشخص کنید.



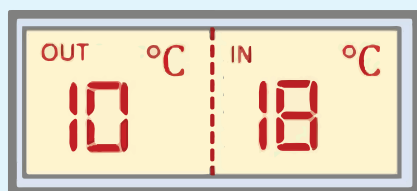
(ب)



(ب)



(الف)

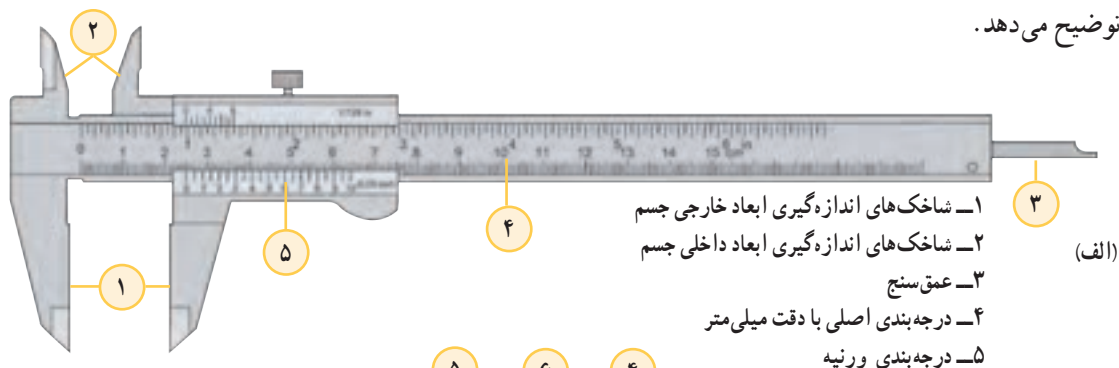


۲- شکل روبه‌رو یک دماسنج رقمی را نشان می‌دهد که دمای خارج و داخل گلخانه‌ای را به ترتیب 10°C و 18°C می‌خواند. عدد غیرقطعی و خطای دماسنج را مشخص کنید.

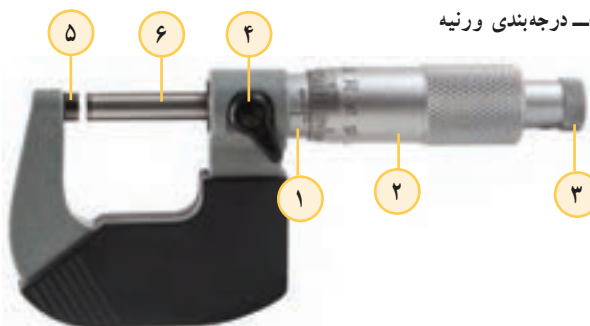
۳- نتیجه اندازه‌گیری توسط دماسنج شکل ۱-۱۲ را به همراه خطای آن بنویسید.

فعالیت ۵-۱

در بسیاری از کارگاه‌های صنعتی مانند تراشکاری‌ها، اندازه‌گیری طول با ابزارهای دقیق تراز خط کش میلی‌متری انجام می‌شود. این ابزارها، کولیس و ریزسنج نام دارند که اجزای اصلی آنها در شکل‌های الف و ب نشان داده شده است. اگر کمینه تقسیم‌بندی یک کولیس 0.1 mm باشد در این صورت نتیجه نهایی یک اندازه‌گیری نوعی با این کولیس، به صورت $5.60\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ بیان می‌شود. اگر کمینه تقسیم‌بندی کولیس 0.5 mm باشد (شکل الف) در این صورت خطای اندازه‌گیری توسط این کولیس $0.25\text{ mm} \pm$ است که باید به صورت $3\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ گرد شود. به این ترتیب نتیجه یک اندازه‌گیری نوعی با این کولیس، به صورت $4.30\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ بیان می‌شود. همچنین کمینه تقسیم‌بندی ریزسنج‌هایی که در اغلب آزمایشگاه‌ها وجود دارد 0.1 mm است (شکل ب) و نتیجه نهایی یک اندازه‌گیری نوعی را می‌توان به صورت $1.638\text{ mm} \pm 0.005\text{ mm}$ ثبت و گزارش کرد. در گروه خود، چند جسم متفاوت انتخاب کنید. ابعاد مختلف این اجسام را به کمک کولیس و ریزسنج اندازه‌گیری کنید. نحوه کار کردن با کولیس و ریزسنج را معلم به شما توضیح می‌دهد.



- ۱- استوانه مدرج ثابت
- ۲- استوانه مدرج چرخان
- ۳- پیچ هرزگرد
- ۴- قفل
- ۵- فک ثابت (سندان)
- ۶- فک متحرک (زبان)



فعالیت ۱-۶

الف) آزمایشی طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان جرم و حجم یک قطره آب را اندازه‌گیری کرد.
 ب) تکه‌ای سیم لاکی نازک یا نخ قرقره به طول تقریبی یک متر تهیه کنید. آزمایشی طراحی و اجرا کنید که به کمک یک خط کش میلی‌متری بتوان قطر این سیم یا نخ را اندازه‌گیری کرد.

خوب است بدانید

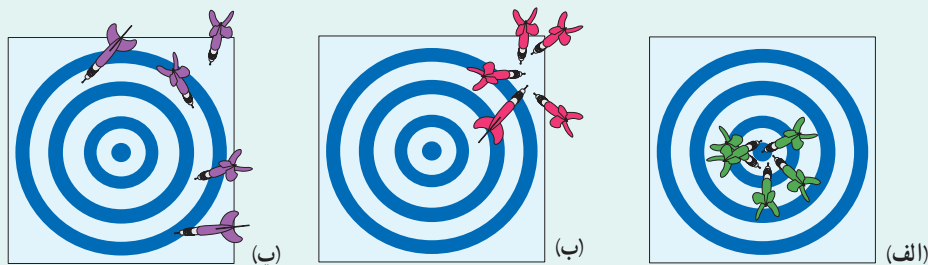
محاسبه‌های جبری با رقم‌های بامعنا: هنگامی که عددها در هم ضرب یا بر هم تقسیم می‌شوند تعداد رقم‌های بامعنا در نتیجه محاسبه نمی‌تواند بیشتر از تعداد رقم‌های بامعنا ی عددی باشد که کمترین رقم بامعنا را دارد. مثلاً حاصل عبارت $3/1415 \times 2/923 \times 7/12$ هر چند برابر $65/38014404$ می‌شود، ولی باید با سه رقم بامعنا، یعنی $65/4$ بیان شود. در جمع یا تفریق عددها آنچه اهمیت دارد محل ممیز است و نه تعداد رقم‌های بامعنا. برای نمونه، حاصل عبارت $245/41 + 4/8$ باید به صورت $250/2$ بیان شود. اگر نتیجه به صورت $250/21$ بیان شود نادرست است. همچنین حاصل عبارت $21/4356 - 41/342$ باید به صورت $31/9$ بیان شود.

چگونگی تشخیص رقم‌های بامعنا: در جدول زیر و ادامه آن نحوه تعیین تعداد رقم‌های بامعنا به همراه مثال آمده است:

مثال	قاعده
$788/6$ چهار رقم بامعنا دارد.	تمام عددهای غیر صفر بامعنا هستند.
408 سه رقم بامعنا دارد.	تمام صفرهایی که بین اعداد غیر صفر قرار دارند بامعنا هستند.
000907 سه رقم بامعنا دارد.	صفرهایی که در طرف چپ اعداد قرار دارند، بامعنا نیستند.

صفرهایی که در طرف راست اعداد قرار دارند می‌توانند بامعنا باشند یا نباشند. برای مثال، اگر طول میله‌ای 230 mm گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا ممکن است دو یا سه رقم باشد. اگر نتیجه اندازه‌گیری با نمادگذاری علمی، به صورت $230\text{ mm} = 2/3 \times 10^2\text{ mm}$ نوشته شود، دارای دو رقم بامعنا و اگر به صورت $230\text{ mm} = 2/30 \times 10^2\text{ mm}$ نوشته شود دارای سه رقم بامعنا است.

تفاوت دقت و صحت: دقت همواره به معنای صحت و درستی نیست. برای مثال، یک ساعت رقمی (دیجیتال) معمولی که $17:35:10$ را نشان می‌دهد بسیار دقیق است (زمان را تا ثانیه اعلام می‌کند)، ولی اگر این ساعت چند دقیقه آهسته کار کند، دیگر مقداری که نشان می‌دهد درست نیست. از سوی دیگر، یک ساعت قدیمی دیواری ممکن است زمان صحیح را نشان دهد، ولی اگر این ساعت عقربه ثانیه‌شمار نداشته باشد دقت آن کم است. اندازه‌گیری‌های با کیفیت بالا نظیر اندازه‌گیری‌هایی که برای تعریف استانداردها صورت گرفته‌اند هم دقیق‌اند و هم صحت دارند. برای درک بهتر تفاوت دقت و صحت، به مثالی از بازی پرتاب دارت توجه کنید. در شکل (الف)، دقت و صحت، در شکل (ب) تنها دقت و در شکل (پ) نه دقت و نه صحت وجود دارد.



۶-۱ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک

آیا تاکنون از خود پرسیده‌اید که چگونه می‌توان تعداد کهکشان‌ها و ستارگان کیهان، جرم آب اقیانوس‌ها، جرم جو زمین، یا تعداد درختان روی زمین را برآورد کرد؟ یا چگونه می‌توان تعداد ضربان‌هایی را برآورد کرد که قلب یک شخص در طول عمرش می‌زند؟ یا تعداد موهای سر یک شخص را چگونه می‌توان تخمین زد؟ یا چگونه می‌توان تعداد اتم‌های اکسیژن در بدن یک فرد ۶۰ کیلوگرمی را برآورد کرد؟

برخی اوقات برای شناخت بهتر یک موضوع و کمیت‌های وابسته به آن، نیاز داریم اندازه‌ای هرچند غیر دقیق (تقریبی) را در علم یا حتی زندگی روزمره خود به کار ببریم. برای این کار از فرایند تخمین یا برآورد استفاده می‌کنیم. تخمین نه تنها در علم، بلکه در زندگی روزمره نیز روش مفیدی در حل برخی از مسائل است. معمولاً در موارد زیر از تخمین استفاده می‌کنیم:

- دقت بالا در محاسبه‌ها، اهمیت چندانی نداشته باشد.
- زمان کافی برای محاسبه‌های دقیق نداشته باشیم.
- همه یا بخشی از داده‌های مورد نیاز، در دسترس نباشد.

نوعی از تخمین که در فیزیک کاربرد زیادی دارد، تخمین مرتبه بزرگی نامیده می‌شود. عبارت مرتبه بزرگی، اغلب برای ارجاع به توان‌های 10^x به کار می‌رود، زیرا نتیجه نیز به صورت توانی از 10^x بیان می‌شود. لازم است توجه شود که در حل مسئله‌ها به روش تخمین مرتبه بزرگی، برخی اوقات ممکن است مرتبه بزرگی پاسخ، با پاسخ واقعی مسئله، یک یا دو مرتبه بزرگی متفاوت باشد. در تخمین مرتبه بزرگی، ابتدا همه اعداد به صورت نمادگذاری علمی ($x \times 10^n$) نوشته می‌شوند و آنگاه از قاعده زیر استفاده می‌کنیم:

$$\text{اگر } 1 \leq x < 5 \text{ باشد در این صورت: } x \sim 10^0 \quad \text{اگر } 5 \leq x < 10 \text{ باشد در این صورت: } x \sim 10^1$$

برای گرد کردن اعداد در فرایند تخمین مرتبه بزرگی، با توجه به قاعده‌ای که گفته شد مطابق

مثال‌های زیر عمل می‌کنیم:

$$0.000499 = 4/99 \times 10^{-4} \sim 10^{-4}$$

این عدد کوچک‌تر از ۵ است و به صورت 10^{-4} گرد می‌شود.

$$92137 = 9/2137 \times 10^4 \sim 10^5$$

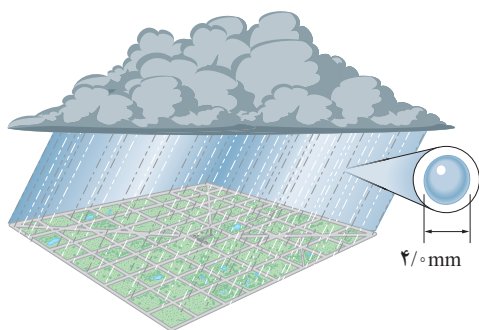
این عدد بزرگ‌تر از ۵ است و به صورت 10^5 گرد می‌شود.

$$136 = 1/36 \times 10^2 \sim 10^2$$

این عدد کوچک‌تر از ۵ است و به صورت 10^2 گرد می‌شود.

مثال ۳-۱

شهر رشت با مساحتی حدود 180 کیلومتر مربع در زمینی مسطح و هموار در شمال ایران واقع است. در یک روز طوفانی حدود 10% میلی‌متر باران در این شهر باریده است. مرتبه بزرگی تعداد قطره‌های باران را در این روز طوفانی تخمین بزنید.



پاسخ: مساحت شهر را با A و ارتفاع باران باریده شده را با d نشان می‌دهیم.

به این ترتیب داریم:

$$A = 180 \times 10^6 \text{ m}^2 = 1/8 \times 10^8 \text{ m}^2 \sim 10^8 \text{ m}^2$$

$$d = 4/10 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

به این ترتیب حجم باران باریده شده برابر است با:

$$V_1 = Ad \sim (10^8 \text{ m}^2)(10^{-3} \text{ m}) = 10^6 \text{ m}^3$$

اگر هر قطره باران را به صورت کُرهای به قطر $4/10 \text{ mm}$ فرض کنیم (شکل

روبه‌رو)، در این صورت حجم هر قطره باران برابر است با:

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (2/10 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \sim 10^{-8} \text{ m}^3$$

به این ترتیب، مرتبه بزرگی تعداد قطره‌های باران برابر است با:

$$\frac{V_1}{V_2} \sim \frac{10^6 \text{ m}^3}{10^{-8} \text{ m}^3} = 10^{14}$$

مثال ۴-۱

تخمین بزنید که قلب یک نفر در طول عمرش چند لیتر خون را به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند. قلب در هر ضربان (beat) به طور میانگین 70 cm^3 خون به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند.

پاسخ: برای حل این مثال لازم است اطلاعاتی را از قبل بدانید. این اطلاعات را ممکن است از کتاب‌های درسی سال‌های قبل یا از طریق رسانه‌های دیگر کسب کرده باشید.

• با توجه به جدول ۱-۵، قلب یک شخص سالم در هر $1/8 \text{ s}$ یک بار خون را به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند که با توجه به تخمین مرتبه بزرگی، مقدار آن را بر حسب توانی از 10^0 به صورت 10^0 s گرد می‌کنیم.

• طول عمر میانگین انسان‌ها حدود ۷۵ سال (۷۵ year) است که به صورت 10^2 year گرد می‌کنیم.

• هر لیتر (L) برابر با 10^3 cm^3 است.

• از جدول ۱-۴ داریم هر سال تقریباً برابر 3×10^7 ثانیه است. با توجه به تخمین مرتبه بزرگی و بر حسب توانی از 10^0 ، یک

سال را به صورت 10^7 ثانیه گرد می‌کنیم.

به این ترتیب، تعداد ضربان قلب (N) یک انسان در طول عمرش را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$N \sim (10^2 \text{ year}) \left(\frac{10^7 \text{ s}}{1 \text{ year}} \right) \left(\frac{10^0 \text{ beat}}{1 \text{ s}} \right) = 10^9 \text{ beat}$$

با توجه به فرض مسئله، مقدار خونی که در هر ضربان به سرخرگ آئورت پمپ می‌شود را به صورت 10^2 cm^3 گرد می‌کنیم.

بنابراین، حجم خون پمپ شده (V) به سرخرگ آئورت برابر است با:

$$V \sim (10^9 \text{ beat}) \left(\frac{10^2 \text{ cm}^3}{\text{beat}} \right) \left(\frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ cm}^3} \right) = 10^8 \text{ L}$$

مثال ۱-۵



جو زمین که ضخامت آن به مقیاس رسم نشده است.

اطراف کره زمین، لایه‌ای از هوا وجود دارد. به این لایه که از گازهای متفاوتی تشکیل شده است، جو زمین گفته می‌شود (شکل روبه‌رو). مرتبه بزرگی جرم جو زمین را تخمین بزنید.

فشار جو را در تمام نقاط سطح زمین 10^5 فرض کنید.

پاسخ: برای برآورد مرتبه بزرگی جرم جو زمین، از رابطه $P = F/A$ که در علوم سال نهم با آن آشنا شدید استفاده می‌کنیم. در این رابطه، به جای F ، وزن جو زمین (mg) و به جای A ، مساحت سطح زمین $(4\pi R^2)$ را قرار می‌دهیم. همچنین از جدول ۱-۳ می‌دانیم شعاع تقریبی زمین $R = 6/4 \times 10^6 \text{ m}$ است. به این ترتیب داریم:

$$A = 4\pi R^2 \approx 13(6/4 \times 10^6 \text{ m})^2 \sim 10^{15} \text{ m}^2 \quad (\text{تخمین مرتبه بزرگی مساحت سطح زمین})$$

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = PA \Rightarrow F \sim (10^5 \text{ Pa})(10^{15} \text{ m}^2) \Rightarrow F \sim 10^{20} \text{ N} \quad (\text{تخمین مرتبه بزرگی وزن کل جو زمین})$$

$$mg \sim 10^{20} \text{ N} \Rightarrow m \sim 10^{19} \text{ kg} \quad (\text{تخمین مرتبه بزرگی جرم کل جو زمین})$$

تمرین ۱-۵

الف) تخمین بزنید در هر شبانه روز چند لیتر بخار بنزین وارد هوای شهر تهران می‌شود.

ب) تحقیق کنید در کشورهای دوستدار محیط‌زیست، چه تدابیری می‌اندیشند تا این بخار، که برای محیط‌زیست و همچنین سلامتی انسان‌ها بسیار مضر است، وارد هوا نشود.

راهنمایی: برای به دست آوردن مقدار این تخمین، ابتدا باید راه‌هایی را مورد توجه قرار دهید که سبب تولید بخار بنزین و ورود آن به هوا می‌شود. یکی از راه‌های تولید بخار بنزین و ورود آن به هوا به صورت زیر است:

وقتی بنزین خودرویی به تدریج مصرف می‌شود بالای بنزین درون باک، بخار بنزین تشکیل می‌شود. وقتی خودرو برای سوخت‌گیری دوباره به جایگاه پمپ بنزین می‌رود، با ورود بنزین به باک، بخار بنزین از آن خارج و به هوای بیرون رانده می‌شود.

خوب است بدانید



انریکو فرمی (۱۹۰۱-۱۹۵۴ م) فیزیک‌دان بزرگ ایتالیایی قرن بیستم بود که بیشتر فعالیت‌های علمی خود را در آمریکا دنبال کرد. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عنصرهای سنگین به سبک‌تر را بر اثر بمباران نوترونی بررسی کرد و جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ میلادی را برای این کار دریافت کرد. وی همچنین برای توانایی و علاقه‌اش در طرح و حل مسئله‌های تخمینی (از مرتبه بزرگی) مشهور است. به همین جهت در برخی کتاب‌ها، به این گونه مسئله‌ها، مسئله‌های فرمی می‌گویند.

۲-۱ چگالی

چگالی هر ماده یکی از ویژگی های مهم آن به شمار می رود که کاربردهای گوناگونی دارد. برای مثال با توجه به دستورالعمل موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چگالی شیرخام تحویلی در کارخانه های شیر و لبنیات باید در دمای ۱۵ درجه سلسیوس بین ۱۰۲۹ تا ۱۰۳۲ کیلوگرم بر متر مکعب باشد.

در علوم سال هفتم دیدید که اگر ماده همگنی دارای جرم m و حجم V باشد، چگالی ρ آن به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (۱-۱)$$

یکای چگالی در SI کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) است. در جدول ۸-۱ چگالی برخی مواد داده شده است.

جدول ۸-۱ چگالی برخی مواد متداول			
ماده	$\rho (\text{kg/m}^3)$	ماده	$\rho (\text{kg/m}^3)$
یخ	0.917×10^3	آب	1.000×10^3
آلومینیم	2.70×10^3	گلیسرین	1.26×10^3
آهن	7.86×10^3	اتیل الکل	0.806×10^3
مس	8.92×10^3	بنزن	0.879×10^3
نقره	10.5×10^3	جیوه	13.6×10^3
سرب	11.3×10^3	هوا	1.29
اورانیم	19.1×10^3	هلیوم	1.79×10^{-1}
طلا	19.3×10^3	اکسیژن	1.43
پلاتین	21.4×10^3	هیدروژن	8.99×10^{-2}

داده های این جدول در دمای صفر درجه ($^{\circ}\text{C}$) سلسیوس و فشار یک اتمسفر اندازه گیری و گزارش شده اند.

تموین ۶-۱

یکی دیگر از یکاهای متداول چگالی، گرم بر سانتی متر مکعب (g/cm^3) است. به روش تبدیل زنجیره ای نشان دهید:

$$1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$$

پرسش ۴-۱

چگالی بنزین $0.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ است. توضیح دهید چرا آب مایع مناسبی برای خاموش کردن بنزین شعله ور نیست.

مثال ۶-۱

فلز آسمیم ($\rho = 22.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) یکی از چگال ترین مواد یافت شده روی زمین است. جرم قطعه ای از این ماده به حجم 23 cm^3 ، چند کیلوگرم است؟

پاسخ: از رابطه ۱-۱ داریم:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V = (22.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \times (23 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 0.518 \text{ kg}$$

این نتیجه نشان می دهد که اگر قطعه ای مکعبی، به اندازه یک قوطی کبریت، از این فلز داشته باشیم، در این صورت جرم آن کمی بیشتر از نیم کیلوگرم خواهد بود.

تمرین ۱-۷

حجم خون در گردش یک فرد بالغ با توجه به جرمش، می‌تواند بین $4/7^\circ\text{L}$ تا $5/5^\circ\text{L}$ باشد. جرم $4/7^\circ\text{L}$ خون چند کیلوگرم است؟ چگالی خون را $1/05\text{g/cm}^3$ بگیرید.

تمرین ۱-۸

جرم و وزن تقریبی هوای درون کلاستان را پیدا کنید.

فعالیت ۱-۷



اگر پرتقالی را درون ظرف محتوی آب بیندازیم پیش‌بینی کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید (شکل الف) و نتیجه مشاهده خود را با توجه به مفهوم چگالی توضیح دهید.

اگر پرتقال را بدون پوست درون ظرف محتوی آب بیندازیم دوباره پیش‌بینی کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را مطابق شکل (ب) انجام دهید و نتیجه مشاهده خود را با توجه به مفهوم چگالی توضیح دهید.

در آزمایش (الف) پرتقال بیشتر دارد و اصطلاحاً سنگین‌تر است. آیا سنگین‌تر بودن یک جسم دلیلی بر فرو رفتن آن در آب است؟ توضیح دهید.

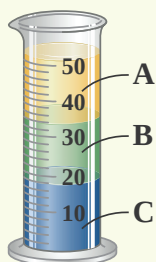
فعالیت ۱-۸



الف) جرم و حجم تعدادی جسم جامد را اندازه بگیرید. در صورتی که شکل جسم‌ها منظم باشد، ابعاد آنها را به کمک کولیس یا ریزسنج اندازه بگیرید. اگر جسم جامد شکل نامنظمی داشته باشد، از روشی که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است حجم آن را اندازه بگیرید.

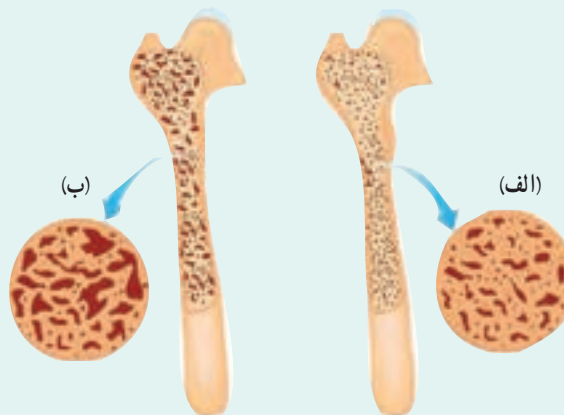
ب) با استفاده از سرنگ مدرج بزرگ و ترازوی با دقت مناسب، چگالی برخی از مایع‌های در دسترس مانند شیر، روغن، مایع ظرفشویی و... را اندازه بگیرید. قبل و بعد از پرکردن سرنگ، جرم آن را اندازه بگیرید و به این روش جرم مایع را تعیین کنید.

پرسش ۱-۵



سه مایع مخلوط‌نشده‌ای A، B و C که چگالی‌های متفاوتی دارند درون استوانه‌ای شیشه‌ای ریخته شده‌اند. این سه مایع عبارت‌اند از: جیوه (با چگالی $13/6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)، روغن زیتون (با چگالی $9/20 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$) و آب (با چگالی $1/00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) است. جنس هر یک از مایع‌های A، B و C درون استوانه را مشخص کنید.

کاهش چگالی استخوان که در پزشکی به نام پوکی استخوان شناخته می‌شود علت اصلی شکستگی‌های مفصل ران و لگن در بیشتر افراد مسن است. به همین دلیل تشخیص به موقع و پیشگیری از پیشرفت آن اهمیت زیادی دارد. سنجش تراکم استخوان یا چگالی سنجی روشی است که با استفاده از آن می‌توان میزان سختی استخوان‌های بدن را تعیین کرد. امروزه مشخص شده است که میزان فعالیت بدنی از دوران نوجوانی، مصرف کلسیم (که منبع آن لبنیات است) و عوامل وراثتی نقش مهمی در تراکم استخوان دارد. شکل (الف) استخوانی را در حالت طبیعی و شکل (ب) در حالتی که دچار کاهش چگالی و پوکی شده است نشان می‌دهد.

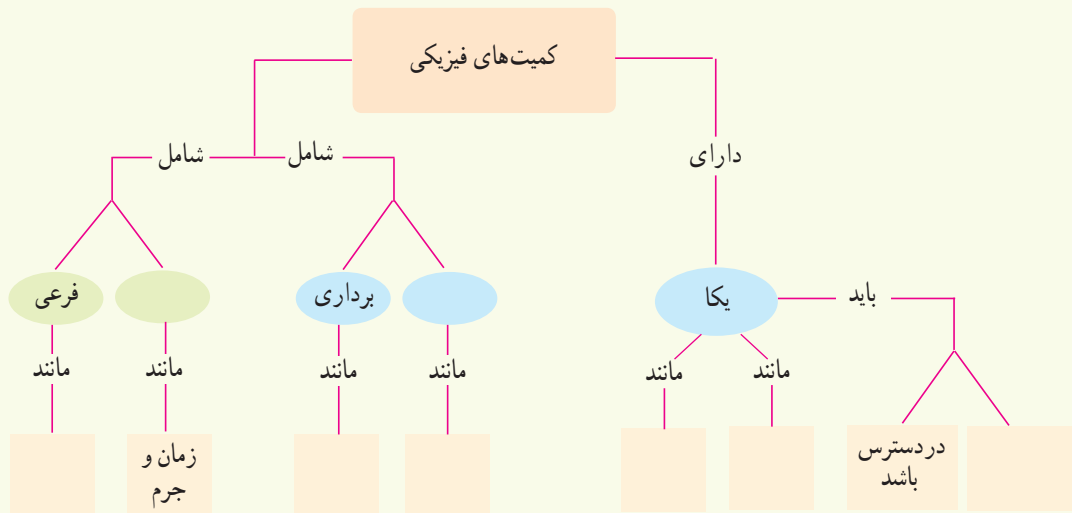


۱-۱ و ۲-۱ فیزیک: دانش بنیادی و مدل‌سازی در فیزیک

- ۱ در چه صورت یک مدل یا نظریه فیزیکی بازنگری می‌شود؟
- ۲ فرایند مدل‌سازی در فیزیک را با ذکر یک مثال توضیح دهید.

۳-۱ و ۴-۱ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی و اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها

- ۳ نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



- ۴ سعی کنید با نگاه کردن، طول برخی از اجسامی را که در محیط اطرافتان هستند، بر حسب سانتی‌متر یا متر برآورد کنید. سپس طول آنها را با خط کش یا متر اندازه بگیرید. برآوردهای شما تا چه حد درست بوده‌اند؟
- ۵ جرم یک سوزن ته‌گرد را چگونه می‌توان با یک ترازوی آشپزخانه اندازه‌گیری کرد؟
- ۶ گاليله در برخی از کارهایش از ضربان نبض خود به عنوان زمان‌سنج استفاده کرد. شما نیز چند پدیده تکرارشونده در طبیعت را نام ببرید که می‌توانند به عنوان ابزار اندازه‌گیری زمان به کار روند.

۷ الف) هر میکروقرن، تقریباً چند دقیقه است؟

ب) یک میلیارد ثانیه دیگر، تقریباً چند سال پیرتر می‌شوید؟

۸ هکتار، از جمله یکاهای متداول مساحت است. هر هکتار برابر ۱۰ هزار متر مربع است.

الف) اگر زمین را کره‌ای یکنواخت به شعاع ۶۴۰۰ کیلومتر در نظر بگیریم (شکل روبه‌رو)، مساحت آن چند هکتار است؟

ب) تحقیق کنید مساحت کل سرزمین ایران، شامل خشکی و دریا، چند هکتار است؟ این مساحت چند درصد از مساحت کره زمین است؟



- ۹ یکی از بزرگ‌ترین الماس‌های شناخته‌شده در ایران، دریای نور به جرم ۱۸۲ قیراط، است. این الماس به رنگ کمیاب صورتی شفاف بوده و در خزانه جواهرات ملی نگهداری می‌شود. کوه نور نیز یکی دیگر از الماس‌های مشهور جهان است که جرمی حدود ۱۰۸ قیراط دارد و هم اکنون در برج لندن نگهداری می‌شود. با توجه به اینکه هر قیراط معادل ۲۰۰ میلی‌گرم است، جرم دریای نور و کوه نور بر حسب گرم چقدر است؟



۱۰ سریع‌ترین رشد گیاه متعلق به گیاهی موسوم به هِسپروئوکا است که در مدت ۱۴ روز، ۳/۷ متر رشد می‌کند (شکل روبه‌رو). آهنگ رشد این گیاه برحسب میکرومتر بر ثانیه چقدر است؟

۱۱ دستگاه بریتانیایی یکاها، دستگاهی است که در برخی از کشورها مانند آمریکا و انگلستان همچنان استفاده می‌شود. یکای اصلی طول در این دستگاه پا (فُوت) و یکای کوچک‌تر آن اینچ است به‌طوری که $1\text{ ft} = 12\text{ in}$ است. ارتفاع هواپیمایی را که در فاصله ۳۰۰۰۰ پا از سطح آزاد دریاها در حال پرواز است برحسب متر به‌دست آورید. هر اینچ ۲/۵۴ سانتی‌متر است.

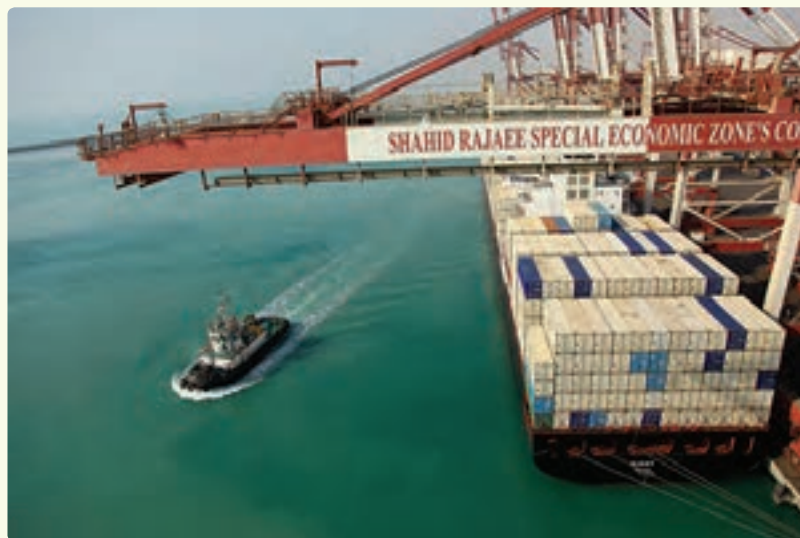


۱۲ قدیمی‌ترین سنگ‌نوشته حقوق بشر که تاکنون یافت شده است به حدود ۲۵۵۰ سال پیش باز می‌گردد که به فرمان کورش، پادشاه ایران در دوره هخامنشیان نوشته شده است. مرتبه بزرگی سنّ این سنگ‌نوشته برحسب ثانیه چقدر است؟

۱۳ تندی شناورها در دریا بر حسب یکایی به نام گره بیان می‌شود. هر گره دریایی برابر ۵/۱۴۴ متر بر ثانیه است. تاریخچه گره دریایی به حدود ۴۰۰ سال پیش باز می‌گردد، زمانی که ملوانان تندی متوسط کشتی خود را با استفاده از وسیله‌ای به نام تندی‌سنج شناور اندازه می‌گرفتند. این وسیله، شامل طنابی بود که در فواصل مساوی، گره‌ای روی آن زده شده بود. در حین کشیده شدن طناب به دریا، تعداد گره‌های رد شده از دست ملوان در یک زمان معین شمرده می‌شد و تندی متوسط کشتی را به‌دست می‌آوردند. پس از آن، ملوان‌ها از واژه «گره» برای بیان تندی متوسط کشتی استفاده می‌کنند.

الف) اگر یک کشتی حمل کالا با تندی ۱۴ گره از بندر شهید رجایی به طرف جزیره لاوان حرکت کند، تندی آن را برحسب کیلومتر بر ساعت به دست آورید.

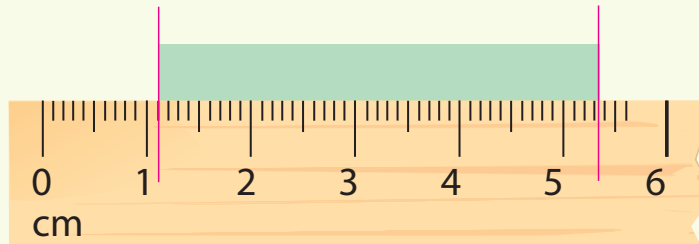
ب) مایل، یکی دیگر از یکاهای متداول طول در دستگاه بریتانیایی است. یک مایل دریایی برابر ۱۸۵۲ متر است.^۱ تندی کشتی قسمت الف) را بر حسب مایل بر ساعت به دست آورید.



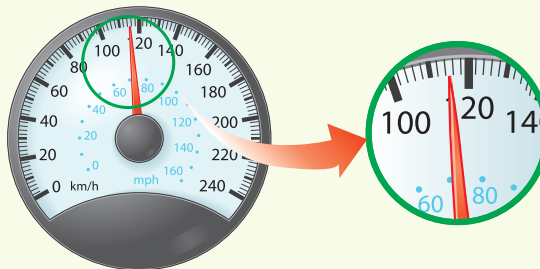
۱- هر مایل در خشکی ۱۶۰۹ متر است.

۵-۱ اندازه‌گیری: خطا و دقت

۱۴ دانش‌آموزی برای اندازه‌گیری طول میله‌ای به کمک یک خط‌کش میلی‌متری، مطابق شکل زیر عمل کرده است. طول میله را برحسب میلی‌متر، سانتی‌متر و متر گزارش کنید. در گزارش خود رقم حدسی (غیرقطعی) و خطای خط‌کش را مشخص کنید.



۱۵ شکل زیر، صفحه‌تندی‌سنج^۱ یک خودرو را نشان می‌دهد. تندی خودرو چند کیلومتر بر ساعت است؟ رقم غیرقطعی و خطای تندی‌سنج را در گزارش مشخص کنید.



۱۶ شکل‌های (الف) و (ب)، به ترتیب یک ریزسنج و یک کولیس رقمی را نشان می‌دهد. رقم غیرقطعی و خطای هر یک از این وسیله‌ها را مشخص کنید.



(ب)



(الف)

۶-۱ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک

۱۷ الف) مرتبه بزرگی تعداد نفس‌هایی را که یک شخص در طول عمرش می‌کشد، تخمین بزنید.

ب) مرتبه بزرگی تعداد پلک‌هایی را که چشم یک شخص در طول عمرش می‌زند، تخمین بزنید.

۱۸ مرتبه بزرگی جرم آب اقیانوس‌ها را تخمین بزنید.

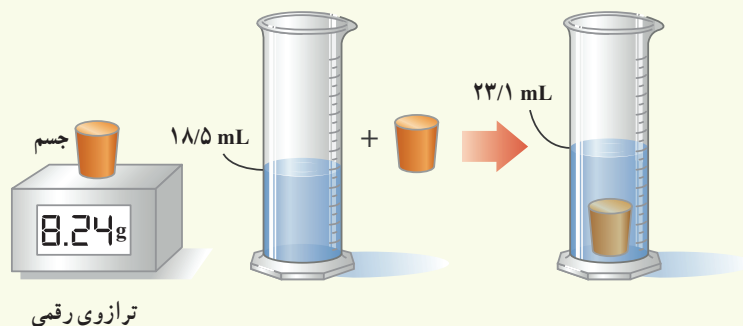
^۱ Speedometer

۲-۱ چگالی



- ۱۹ الف) قطعه‌ای فلزی به شما داده شده است و ادعا می‌شود که از طلای خالص ساخته شده است. چگونه می‌توانید درستی این ادعا را بررسی کنید؟
- ب) بزرگ‌ترین شمش طلا با حجم $10^4 \text{ cm}^3 \times 1/573$ و جرم $250\% \text{ kg}$ توسط یک شرکت ژاپنی ساخته شده است (شکل روبه‌رو). چگالی این شمش طلا را به دست آورید.
- پ) نتیجه به دست آمده در قسمت (ب) را با چگالی طلا در جدول ۸-۱ مقایسه کنید و دلیل تفاوت این دو عدد را بیان کنید.

- ۲۰ برای تعیین چگالی یک جسم جامد، ابتدا جرم و حجم آن را مطابق شکل زیر پیدا کرده‌ایم. با توجه به داده‌های روی شکل، چگالی جسم را بر حسب g/L و g/cm^3 حساب کنید.



- ۲۱ الف) ستاره‌های کوتوله سفید بسیار چگال هستند و چگالی آنها در SI حدود 10^6 میلیون است. اگر شما یک قوطی کبریت از ماده تشکیل دهنده این ستاره‌ها در اختیار داشتید، جرم آن چند کیلوگرم می‌شد؟ ابعاد و حجم قوطی کبریت را خودتان تخمین بزنید!
- ب) اگر جمعیت کره زمین ۷ میلیارد نفر، جرم میانگین هر نفر 60 کیلوگرم و ماده تشکیل دهنده انسان‌ها از جنس ستاره‌های کوتوله سفید فرض شود (فرضی ناممکن!)، ابعاد یک اتاق چقدر باشد تا همه انسان‌ها در آن جای گیرند؟



کار، انرژی و توان



خانم زهرا نعمتی، نخستین بانوی ایرانی برنده مدال طلا از مسابقات جهانی پارالمپیک ۲۰۱۲ لندن. به نظر شما این قهرمان جهان، چقدر انرژی صرف کشیدن کمان می‌کند؟ مقدار این انرژی و تندی تیری را که از کمان رها می‌شود چگونه می‌توان حساب کرد؟

انرژی مهم‌ترین مفهومی است که در سرتاسر فیزیک و علوم و مهندسی با آن سروکار داریم. انرژی این امکان را فراهم می‌کند تا تمامی فعالیت‌های روزمره خود را انجام دهید. بخوابید و استراحت کنید؛ مشاهده کنید و بیندیشید؛ برخیزید و طرحی نو در اندازید! انرژی همچنین توان لازم را برای به حرکت درآوردن موتور خودروها، کشتی‌ها و هواپیماها فراهم می‌کند.

در علوم سال هفتم دیدید که انرژی شکل‌های متفاوتی دارد و در همه چیز و همه جا وجود دارد. انرژی می‌تواند از شکلی به شکل دیگر تبدیل شود و در حین این فرایند، مقدار کل آن پایسته می‌ماند. همچنین دیدید که با انجام کار می‌توان انرژی را از جسمی به جسم دیگر منتقل کرد. در این فصل پس از آشنایی با انرژی جنبشی و کار انجام شده توسط نیروهای ثابت، به قضیه کار-انرژی جنبشی خواهیم پرداخت. در ادامه فصل، رابطه بین کار و انرژی پتانسیل و پایستگی انرژی مکانیکی را بررسی می‌کنیم. سرانجام با توان، به عنوان کمیتی برای بیان آهنگ انجام کار آشنا می‌شویم.

۱-۲ انرژی جنبشی

در علوم سال هفتم دیدید هر چیزی که حرکت کند، انرژی دارد و انرژی وابسته به حرکت یک جسم را انرژی حرکتی یا انرژی جنبشی نامیدیم (شکل ۱-۲). همچنین دیدید هر چه جسمی تندتر حرکت کند، انرژی جنبشی بیشتری دارد و هنگامی که جسم ساکن باشد، انرژی جنبشی آن صفر است. برای جسمی به جرم m که با تندی v حرکت می کند، انرژی جنبشی از رابطه زیر به دست می آید:

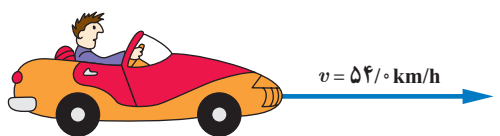
$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-2)$$



شکل ۱-۲ جسم در حال حرکت، انرژی جنبشی دارد.

یکاهای SI جرم و تندی به ترتیب کیلوگرم (kg) و متر بر ثانیه (m/s) است. بنابراین، یکای SI انرژی جنبشی (و هر نوع دیگری از انرژی) kgm^2/s^2 است که به افتخار جیمز ژول، فیزیک دان انگلیسی، ژول (J) نامیده می شود. انرژی جنبشی کمیته نرده ای و همواره مثبت است؛ این کمیت تنها به جرم و تندی جسم بستگی دارد و به جهت حرکت جسم وابسته نیست.

مثال ۱-۲



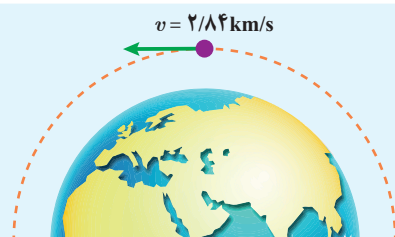
جرم خودرویی به همراه راننده اش $840 \times 10^2 \text{ kg}$ است. این خودرو با تندی 54 km/h در حرکت است، انرژی جنبشی آن چند ژول است؟
پاسخ: با توجه به اطلاعات داده شده داریم:

$$m = 840 \times 10^2 \text{ kg}, \quad v = 54 \text{ km/h} = (54 \text{ km/h}) \left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 15 \text{ m/s}$$

با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۱-۲ داریم:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(840 \times 10^2 \text{ kg})(15 \text{ m/s})^2 = 945 \times 10^4 \text{ J}$$

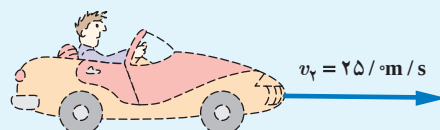
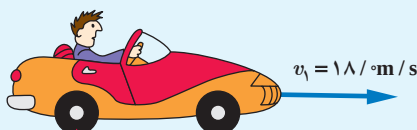
تمرین ۱-۲



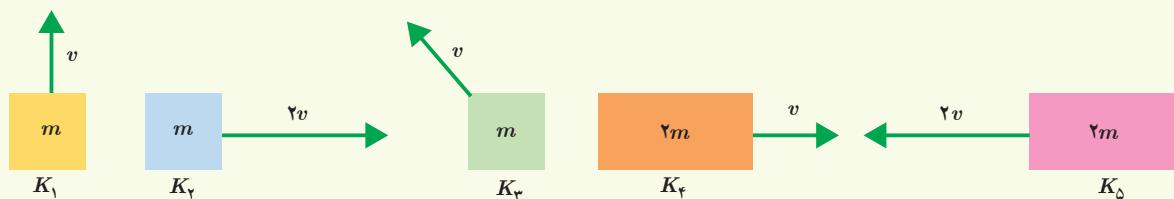
ماهواره ای به جرم 224 kg ، با تندی ثابت 284 km/s دور زمین می چرخد. انرژی جنبشی ماهواره را بر حسب ژول و مگاژول حساب کنید.

تمرین ۲-۲

جرم خودرویی به همراه راننده اش $840 \times 10^2 \text{ kg}$ است (شکل زیر). تندی خودرو در دو نقطه از مسیرش روی شکل زیر داده شده است. تغییرات انرژی جنبشی خودرو ($\Delta K = K_2 - K_1$) را بین این دو نقطه حساب کنید.



انرژی جنبشی هر یک از اجسام زیر را با هم مقایسه کنید و مقدار آن را به ترتیب از کمترین تا بیشترین بنویسید.



خوب است بدانید



لایب نیتس (۱۶۴۶-۱۷۱۶م)

لایب نیتس فیلسوف و ریاضی دان آلمانی نخستین دانشمندی بود که به اهمیت انرژی جنبشی در فیزیک پی برد. لایب نیتس استدلال می کرد که در طبیعت حاصل ضرب جرم در مربع تندی پایسته است. وی نام این مفهوم جدید را نیروی زنده نامید^۱.

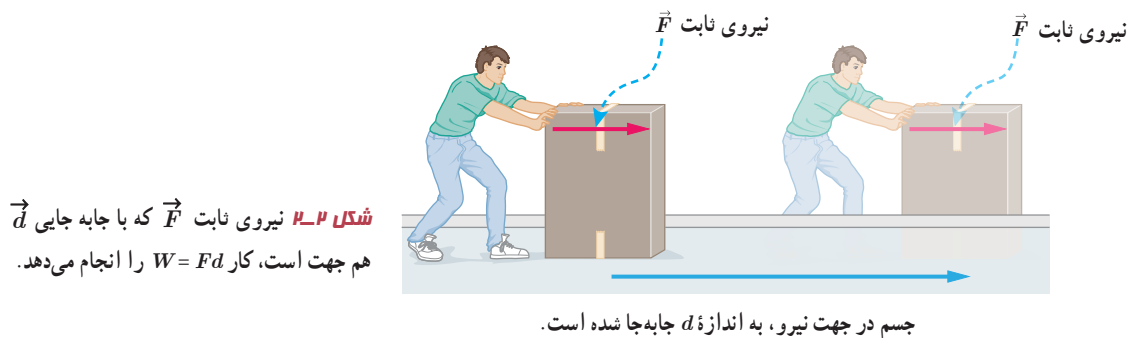
سال ها پیش از لایب نیتس، رنه دکارت (۱۶۵۰-۱۵۹۶م)، فیلسوف، ریاضی دان و فیزیک دان فرانسوی ادعا کرده بود حاصل ضرب جرم در سرعت که امروزه تکانه نامیده می شود، در طبیعت کمیتی پایسته است.

معرفی واژه انرژی به جای اصطلاح نیروی زنده را به توماس یانگ (۱۸۲۹-۱۷۷۳م) فیزیک دان انگلیسی نسبت داده اند، هر چند از اصطلاح جدید وی در ابتدا چندان استقبال نشد. او در کتابی که

در سال ۱۸۰۷ میلادی به چاپ رساند، پیشنهاد کرد که به منظور تمایز بهتر میان مفاهیم نیرو و انرژی، به جای نیروی زنده از واژه انرژی استفاده شود. در سال ۱۸۶۷ میلادی، لرد کلوین و پیتر تیت دو فیزیک دان اسکاتلندی در جلد اول رساله فلسفه طبیعی، اصطلاح امروزی انرژی جنبشی را برای انرژی جسم در حال حرکت به کار بردند و ضریب یک دوم را هم که لایب نیتس در نظر نگرفته بود، وارد کردند.

۲-۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت

در علوم سال هفتم دیدید که مفهوم کار در فیزیک، با مفهوم آن در زندگی روزمره بسیار متفاوت است. همچنین با تعریف کار، برای حالتی که نیروی وارد شده به جسم، ثابت و با جابه جایی جسم در یک جهت باشد (شکل ۲-۲)، به صورت رابطه زیر آشنا شدید :



$$W = Fd$$

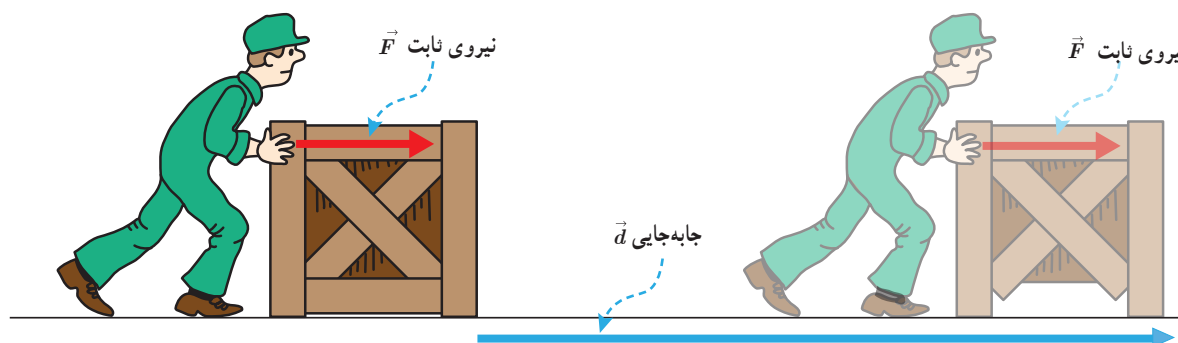
(۲-۲)

^۱ - vis viva (living force)

در این رابطه F اندازه نیروی وارد بر جسم و d اندازه جابه جایی آن است. کار، همان یکای انرژی را دارد و کمیتی زده ای است. برای استفاده از این رابطه به منظور محاسبه کار باید به دو نکته توجه کرد. اول آنکه، نیروی ثابت وارد بر جسم، باید با جابه جایی آن هم جهت باشد و دوم آنکه، باید بتوان جسم را مانند یک ذره فرض کرد (بخش مدل سازی را در فصل اول ببینید).

مثال ۲-۲

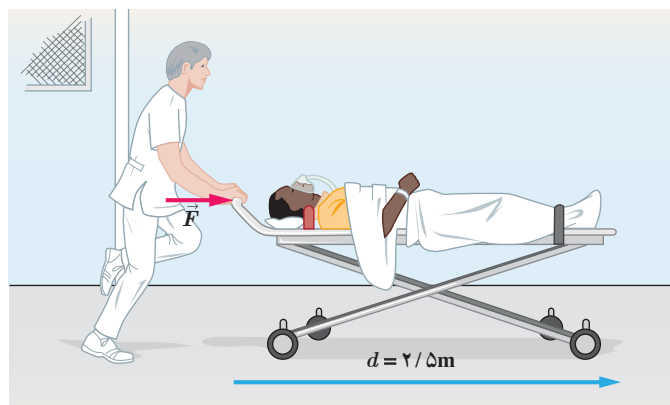
شکل زیر کارگری را در حال هل دادن جعبه ای با نیروی ثابت 225N نشان می دهد. اگر جعبه 14m در امتداد نیرو جابه جا شود، کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟



پاسخ: اندازه نیروی وارد شده به جعبه، ثابت و با جابه جایی جعبه هم جهت است. بنابراین، از رابطه ۲-۲ داریم:

$$W = Fd = (225\text{N})(14\text{m}) = 3.15 \times 10^3 \text{J}$$

مثال ۳-۲



بیماری به جرم 72kg روی تختی به جرم 15kg دراز کشیده است. پرستاری این تخت را با نیروی ثابت و افقی $\vec{F}$ روی سطحی هموار و با اصطکاک ناچیز هل می دهد. مجموعه تخت و بیمار با شتاب 0.60m/s^2 حرکت می کند.

(الف) اندازه نیروی $\vec{F}$ چقدر است؟

(ب) اگر تخت 2.5m در جهت این نیرو جابه جا شود، کار انجام شده توسط نیروی $\vec{F}$ را حساب کنید.

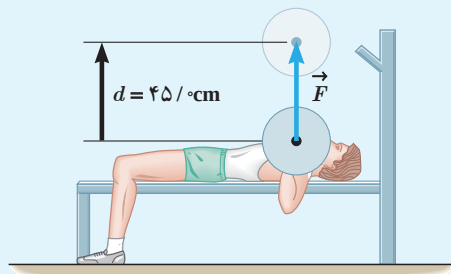
پاسخ: (الف) جرم کل بیمار و تخت برابر 87kg است. با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$F = ma = (87\text{kg})(0.60\text{m/s}^2) = 52\text{N}$$

(ب) چون نیرو و جابه جایی در یک جهت اند، با استفاده از رابطه (۲-۲) کار نیروی F برابر است با:

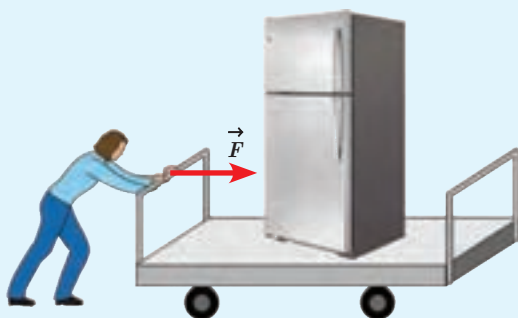
$$W = Fd = (52\text{N})(2.5\text{m}) = 1.3 \times 10^2 \text{J}$$

تمرین ۲-۳



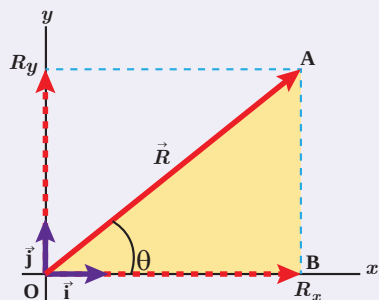
ورزشکاری وزنه‌ای به جرم 68 kg را به طور یکنواخت، 45 cm بالای سر خود می‌برد (شکل روبه رو). کاری که این ورزشکار روی وزنه انجام داده است را محاسبه کنید. اندازه شتاب گرانش زمین را $g = 9.81\text{ N/kg}$ بگیرید.

تمرین ۲-۴



شکل روبه‌رو شخصی را در حال هل دادن یک گاری حمل بار روی سطحی هموار و بدون اصطکاک با نیرویی به بزرگی $F = 66\text{ N}$ نشان می‌دهد. اگر گاری $18/4\text{ m}$ در جهت نیرو جابه‌جا شود، کاری را که شخص روی گاری انجام می‌دهد چقدر است؟

مهارت‌های ریاضی (یادآوری از ریاضی سال‌های هشتم و نهم)



در ریاضی سال هشتم با تجزیه یک بردار روی محورهای x و y و نوشتن مؤلفه‌های آن بر حسب بردارهای یک‌ه‌ $\vec{i}$ و $\vec{j}$ آشنا شدید (شکل روبه رو).

اگر R_x و R_y مؤلفه‌های بردار $\vec{R}$ روی محورهای x و y باشند، می‌توان نوشت:

$$\vec{R} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} \quad (1)$$

همچنین در ریاضی سال نهم دیدید که در یک مثلث قائم الزاویه، مانند مثلث OAB در شکل بالا، توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس را برای زاویه‌ای مانند θ به صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$\sin \theta = \frac{AB}{OA} \quad \text{و} \quad \cos \theta = \frac{OB}{OA} \quad (2)$$

اگر اندازه بردار $\vec{R}$ را با R نشان دهیم، با توجه به شکل بالا داریم:

$$OA = R \quad \text{و} \quad OB = R_x \quad \text{و} \quad AB = R_y$$

به این ترتیب، مؤلفه‌های بردار $\vec{R}$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

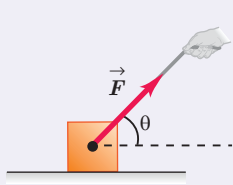
$$R_x = R \cos \theta \quad \text{و} \quad R_y = R \sin \theta \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۳) در رابطه (۱) می‌توان یک بردار را بر حسب توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس نوشت. به این ترتیب داریم:

$$\vec{R} = R \cos \theta \vec{i} + R \sin \theta \vec{j} \quad (4)$$

مقادیر سینوس و کسینوس به ازای چند زاویه پرکاربرد

θ	$\sin \theta$	$\cos \theta$
0°	۰	۱
30°	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
45°	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
60°	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$
90°	۱	۰
180°	۰	-۱



برای مثال وقتی جسمی را مطابق شکل روبه رو با نیروی $\vec{F}$ می کشیم، مؤلفه افقی این نیرو $F \cos \theta$ و مؤلفه قائم آن $F \sin \theta$ است که در آن F اندازه نیروی $\vec{F}$ است. همچنین با توجه به رابطه ۴ می توان نوشت:

$$\vec{F} = F \cos \theta \vec{i} + F \sin \theta \vec{j}$$

همان طور که تا اینجا دیدید، تعریف کار بر اساس رابطه ۲-۲ تنها برای حل مسئله هایی به کار می رود که نیرو و جابه جایی در یک جهت باشند. اگر مطابق شکل ۳-۲ نیروی وارد شده به جسم با جابه جایی زاویه θ بسازد، در این حالت نیروی $\vec{F}$ دارای دو مؤلفه است؛ یکی موازی با جابه جایی و دیگری عمود بر آن. همان طور که از علوم هفتم نیز به یاد دارید، مؤلفه ای از نیرو که بر جابه جایی عمود است $(F \sin \theta)$ کاری روی جسم انجام نمی دهد. کار انجام شده روی جسم تنها ناشی از مؤلفه ای از نیرو است که در راستای جابه جایی است $(F \cos \theta)$. در این حالت، کاری که نیروی ثابت $\vec{F}$ به ازای جابه جایی $\vec{d}$ روی جسم انجام می دهد از رابطه زیر به دست می آید:

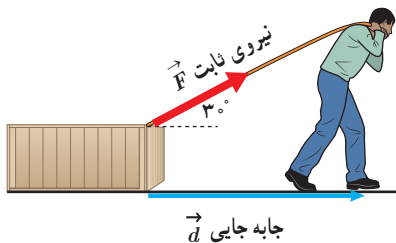
$$W = (F \cos \theta) d$$

(۳-۲)



شکل ۳-۲ نیروی ثابت $\vec{F}$ با جابه جایی $\vec{d}$ زاویه θ می سازد و کار $W = (F \cos \theta) d$ را روی جسم انجام می دهد.

مثال ۲-۴

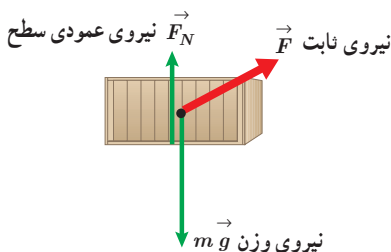


شکل روبه رو شخصی را نشان می دهد که جعبه ای را با نیروی ثابت 195 N روی سطحی هموار و با اصطکاک ناچیز، به اندازه $4/2 \text{ m}$ جابه جا می کند.
الف) کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟
ب) نیروهای دیگری را که بر جسم وارد می شود مشخص کنید. کاری را که هر کدام از این نیروها روی جسم انجام می دهند حساب کنید.

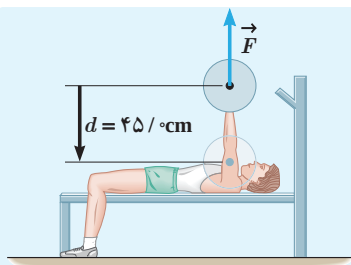
پاسخ: الف) با جایگذاری اطلاعات داده شده و $\cos \theta = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$ در رابطه ۳-۲ داریم:

$$W = (F \cos \theta) d = (195 \text{ N} \times \frac{\sqrt{3}}{2})(4/2 \text{ m}) = 709 \text{ J}$$

ب) نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر جابه جایی عمودند (شکل روبه رو) و کاری روی جسم انجام نمی دهند. (توجه کنید که: $\cos \theta = \cos 90^\circ = 0$)



تمرین ۲-۵



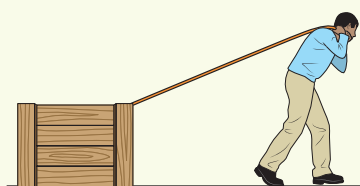
تمرین ۲-۳ را دوباره ببینید. کار انجام شده توسط ورزشکار را روی وزنه برای حالتی حساب کنید که ورزشکار با وارد کردن همان نیروی $\vec{F}$ ، وزنه را به آرامی پایین می‌آورد (شکل روبه رو). توضیح دهید که در این دو حالت، چه تفاوتی بین مقادیر به دست آمده برای کار انجام شده توسط ورزشکار وجود دارد.

پرسش ۲-۲

شخصی جسمی را یک بار با طنابی بلند (شکل الف) و بار دیگر با طنابی کوتاه‌تر (شکل ب) روی سطحی هموار می‌کشد. اگر



(ب)



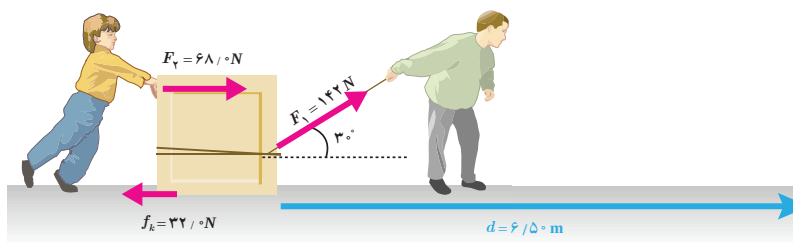
(الف)

جابه جایی و کاری که این شخص در هر دو بار روی جعبه انجام می‌دهد یکسان باشد، توضیح دهید در کدام حالت، شخص نیروی بزرگ‌تری وارد کرده است. اصطکاک را در هر دو حالت، ناچیز فرض کنید.

کار کل: اگر به جای یک نیرو، چند نیرو بر جسمی وارد شود، کار را چگونه باید محاسبه کنیم؟ یک روش آن است که با استفاده از رابطه ۲-۳، کار انجام شده توسط هر نیرو را به طور جداگانه محاسبه کنیم. سپس با جمع جبری کار انجام شده توسط تک تک نیروها کار کل (W_t) را بیابیم. روش دیگر یافتن کار کل آن است که ابتدا مؤلفه در امتداد جابه جایی را برای هر نیرو مشخص می‌کنیم. آن‌گاه با توجه به جهت این مؤلفه‌ها، اندازه نیروی خالص را، که در امتداد بردار جابه جایی است، به دست می‌آوریم. سرانجام، اندازه این نیروی خالص را در رابطه ۲-۳ قرار می‌دهیم. در مثال زیر از هر دو روش برای محاسبه کار کل استفاده شده است.

مثال ۲-۵

شکل زیر پدر و پسری را در حال جابه جا کردن یک جعبه سنگین روی سطحی هموار نشان می‌دهد. نیروی F_1 را پدر و نیروی F_2 را پسر به جسم وارد می‌کنند و f_k نیز نیروی اصطکاک جنبشی است که با حرکت جسم مخالفت می‌کند و در خلاف جهت جابه جایی به جعبه وارد می‌شود. کار کل انجام شده روی جسم را محاسبه کنید.



۱- t در W_t از سر حرف واژه total به معنای کل گرفته شده است.

پاسخ:

روش اول: در این روش، کار انجام شده توسط هر نیرو را به طور جداگانه محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه کار نیروی F_1 ، اطلاعات داده شده و $\cos \theta = \cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$ را در رابطه ۲-۳ جایگذاری می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

$$W_1 = (F_1 \cos \theta) d = (142 \text{ N} \times \sqrt{3}/2)(6/5 \text{ m}) = 749 \text{ J}$$

چون پسر جعبه را در جهت جابه‌جایی هل می‌دهد، کار انجام شده توسط نیروی F_2 برابر است با:

$$W_2 = F_2 d = (68/0 \text{ N})(6/5 \text{ m}) = 442 \text{ J}$$

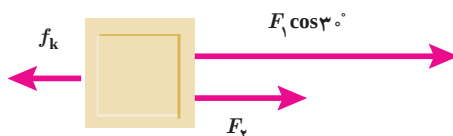
برای محاسبه کار نیروی f_k ، اطلاعات داده شده و $\cos \theta = \cos 180^\circ = -1$ را در رابطه ۲-۳ جایگذاری می‌کنیم. پس:

$$W_3 = (f_k \cos \theta) d = (32/0 \text{ N} \times (-1))(6/5 \text{ m}) = -208 \text{ J}$$

همان‌طور که گفتیم کار کل (W_t) انجام شده با جمع جبری مقدار کار انجام شده توسط تک تک نیروها برابر است. توجه کنید که کار نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه صفر است. به این ترتیب داریم:

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 = 749 \text{ J} + 442 \text{ J} + (-208 \text{ J}) = 1030 \text{ J}$$

روش دوم: در این روش، ابتدا نیروها و مؤلفه‌های نیروهایی را شناسایی می‌کنیم که در امتداد جابه‌جایی بر جسم وارد می‌شوند (شکل زیر).



اندازه نیروی خالص در امتداد جابه‌جایی برابر است با:

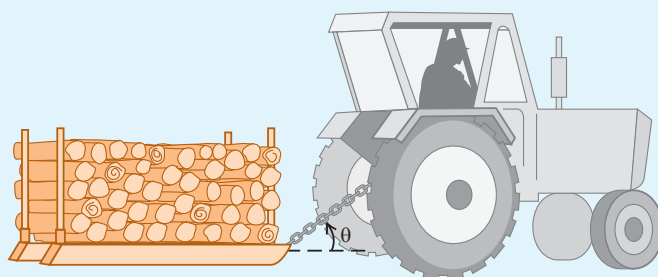
$$F = F_1 \cos 30^\circ + F_2 - f_k = 142 \text{ N} \times \sqrt{3}/2 + 68/0 \text{ N} - 32/0 \text{ N} = +159 \text{ N}$$

علامت مثبت نشان می‌دهد نیروی خالص F در جهت جابه‌جایی است. به این ترتیب کار کل انجام شده برابر است با:

$$W_t = F d = (159 \text{ N})(6/5 \text{ m}) = 1030 \text{ J}$$

تمرین ۲-۶

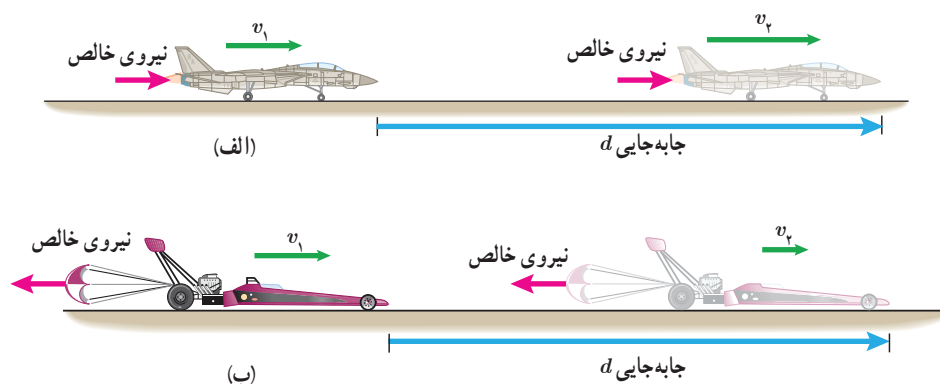
کشاورزی توسط تراکتور، سورتمه‌ای پر از هیزم را در راستای یک زمین هموار به اندازه ۲۳۵m جابه‌جا می‌کند (شکل زیر). وزن کل سورتمه و بار آن $mg = 147 \times 10^4 \text{ N}$ است. تراکتور نیروی ثابت $F_1 = 500 \times 10^3 \text{ N}$ را در زاویه $\theta = 45^\circ$ بالای افق به سورتمه وارد می‌کند. نیروی اصطکاک جنبشی $f_k = 3/50 \times 10^4 \text{ N}$ است که برخلاف جهت حرکت به سورتمه وارد می‌شود. کار کل انجام شده روی سورتمه را به دو روش محاسبه کنید.



۳-۲ کار و انرژی جنبشی

اگر در حین جابه‌جایی جسمی، نیروی خالصی به آن وارد شود، کار کل انجام شده روی جسم ممکن است مثبت یا منفی باشد. در شکل (۴-۲ الف)، نیروی خالص وارد شده به هواپیما با جابه‌جایی آن هم جهت است و کار کل انجام شده روی هواپیما، سبب افزایش انرژی جنبشی آن شده است؛ درحالی که در شکل (۴-۲ ب)، نیروی خالص برخلاف جهت جابه‌جایی به یک خودروی مسابقه‌ای وارد شده و کار کل انجام شده روی آن، سبب کاهش انرژی جنبشی اتومبیل شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت: وقتی نیروی خالصی به جسمی وارد می‌شود، اگر کار مثبتی روی جسم انجام دهد به معنای دادن انرژی به آن است و اگر کار منفی روی جسم انجام دهد، به معنای گرفتن انرژی از آن است.

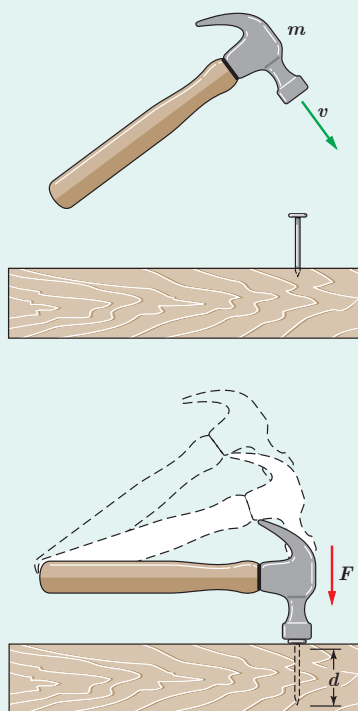
شکل ۴-۲ الف) کار مثبت روی هواپیما انجام شده و انرژی جنبشی آن افزایش یافته است. **ب)** کار منفی روی خودرو انجام شده و انرژی جنبشی آن کاهش یافته است.



بین کار کل انجام شده روی یک جسم و تغییر انرژی جنبشی آن رابطه‌ای وجود دارد که به قضیه کار-انرژی جنبشی معروف است. مطابق این قضیه، کار کل انجام شده روی یک جسم با تغییر انرژی جنبشی آن برابر است. اگر انرژی جنبشی جسمی را در دو وضعیت متفاوت با K_1 و K_2 نشان دهیم، در این صورت قضیه کار-انرژی جنبشی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W_t = K_2 - K_1 \quad (4-2)$$

هنگامی که $W_t > 0$ است انرژی جنبشی جسم افزایش می‌یابد (انرژی جنبشی پایانی بزرگ‌تر از انرژی جنبشی آغازی K_1 است) و جسم در پایان جابه‌جایی تندتر از آغاز آن حرکت می‌کند. هنگامی که $W_t < 0$ است، انرژی جنبشی جسم کاهش می‌یابد ($K_2 < K_1$) و تندی آن پس از جابه‌جایی کمتر است. هنگامی که $W_t = 0$ است انرژی جنبشی جسم در دو نقطه آغازی و پایانی یکسان ($K_2 = K_1$) و تندی آن نیز در این دو نقطه برابر است. توجه کنید که قضیه کار-انرژی جنبشی نه تنها برای حرکت یک جسم روی مسیری مستقیم معتبر است، بلکه اگر جسم روی هر مسیر خمیده‌ای نیز حرکت کند، می‌توان از آن استفاده کرد (تمرین ۸-۲ را ببینید).



قضیه کار-انرژی جنبشی، قانون جدیدی در فیزیک نیست؛ بلکه صرفاً کار (رابطه ۲-۳) و انرژی جنبشی (رابطه ۲-۱) را به هم مرتبط می‌سازد و به سادگی می‌توان آن را از قانون دوم نیوتون به دست آورد (اثبات این قضیه جزء اهداف این کتاب نیست).

قضیه کار-انرژی جنبشی برای حل مسئله‌هایی مفید است که کار نیروهای وارد شده به جسم به سادگی محاسبه می‌شود. در این صورت با داشتن کار کل، می‌توانیم تندی جسم را در هر نقطه دلخواه از مسیرش پیدا کنیم. همچنین اگر قضیه کار-انرژی جنبشی را به صورت $K_f - K_i = W_t$ بنویسیم، تغییر انرژی جنبشی را می‌توان کاری در نظر گرفت که جسمی متحرک، روی جسم دیگری انجام می‌دهد. برای مثال چکشی که میخی را به چوبی می‌کوبد، هنگام برخورد با میخ، روی آن کار انجام می‌دهد (شکل روبه‌رو).

مثال ۲-۶



توپ فوتبالی به جرم $10^2 \times 4/50$ از نقطه پناستی با تندی $18/0 \text{ m/s}$ به طرف دروازه شوت می‌شود (شکل روبه‌رو). توپ با تندی $15/0 \text{ m/s}$ به دستان دروازه‌بان برخورد می‌کند. کار کل انجام شده روی توپ را که سبب کاهش تندی آن شده است محاسبه کنید.

پاسخ: با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی به سادگی می‌توان مسئله را حل کرد. ابتدا با توجه به اطلاعات داده شده و رابطه ۲-۱ انرژی جنبشی توپ را در دو وضعیت مورد نظر مسئله به دست می‌آوریم:

$$K_i = \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}(0/450 \text{ kg})(18/0 \text{ m/s})^2 = 72/9 \text{ J}$$

$$K_f = \frac{1}{2}mv_f^2 = \frac{1}{2}(0/450 \text{ kg})(15/0 \text{ m/s})^2 = 50/6 \text{ J}$$

به این ترتیب، کار کل انجام شده روی توپ را از رابطه ۲-۴ محاسبه می‌کنیم:

$$W_t = K_f - K_i = 50/6 \text{ J} - 72/9 \text{ J} = -22/3 \text{ J}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که کار کل انجام شده روی توپ، انرژی جنبشی آن را کاهش داده است.

مثال ۲-۷



چتربازی به جرم کل ۷۵۰ kg ، از بالونی که در ارتفاع $۸/۰۰ \times ۱۰^۲\text{ m}$ از سطح زمین است، با تندی $۱/۲۰\text{ m/s}$ به بیرون بالون می‌پرد. اگر او با تندی $۴/۸۰\text{ m/s}$ به زمین برسد، کار نیروی مقاومت هوا روی چترباز را در طول مسیر سقوط محاسبه کنید. شتاب گرانش زمین را $۹/۸۱\text{ m/s}^۲$ بگیرید.

پاسخ: ابتدا انرژی جنبشی چترباز را در دو وضعیت پریدن از بالون و همچنین رسیدن به سطح زمین به دست می‌آوریم. با توجه به اطلاعات داده شده و همچنین رابطه ۱-۲ داریم:

$$K_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}(۷۵۰\text{ kg})(۱/۲۰\text{ m/s})^2 = ۵۴/۰\text{ J}$$

$$K_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}(۷۵۰\text{ kg})(۴/۸۰\text{ m/s})^2 = ۸۶۴\text{ J}$$

همان‌طور که در شکل روبه‌رو دیده می‌شود در طول حرکت چترباز، دو نیروی وزن و مقاومت هوا به او وارد می‌شود. نیروی وزن در جهت جابه جایی و نیروی مقاومت بر خلاف جابه جایی است. بنابراین، کار کل برابر مجموع کار این دو نیرو است. به این ترتیب، از رابطه ۴-۲ داریم:

$$W_t = K_2 - K_1 \Rightarrow W_{\text{وزن}} + W_{\text{مقاومت هوا}} = ۸۶۴\text{ J} - ۵۴/۰\text{ J} = ۸/۱۰ \times ۱۰^۲\text{ J}$$

با پیدا کردن کار نیروی وزن (mg) و جایگذاری آن در عبارت بالا، کار نیروی مقاومت هوا را به دست می‌آوریم. از رابطه ۲-۲ داریم:

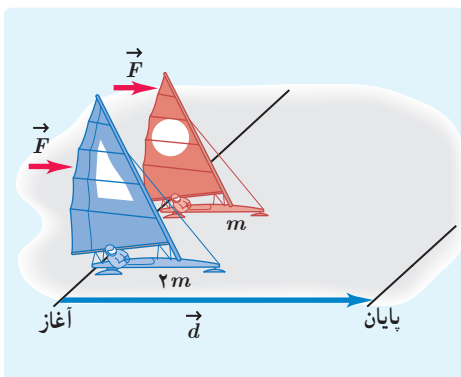
$$W_{\text{وزن}} = mgd = (۷۵۰\text{ kg})(۹/۸۰\text{ m/s}^۲)(۸/۰۰ \times ۱۰^۲\text{ m}) = ۵/۸۸ \times ۱۰^۵\text{ J}$$

به این ترتیب، کار نیروی مقاومت هوا برابر است با:

$$۵/۸۸ \times ۱۰^۵\text{ J} + W_{\text{مقاومت هوا}} = ۸/۱۰ \times ۱۰^۵\text{ J} \Rightarrow W_{\text{مقاومت هوا}} = -۵/۸۷ \times ۱۰^۵\text{ J}$$

توجه کنید برای اینکه چترباز به طور ایمن و با تندی نسبتاً کمی به زمین برسد، کار نیروی مقاومت هوا اثر کار نیروی وزن را تقریباً خنثی کرده است.

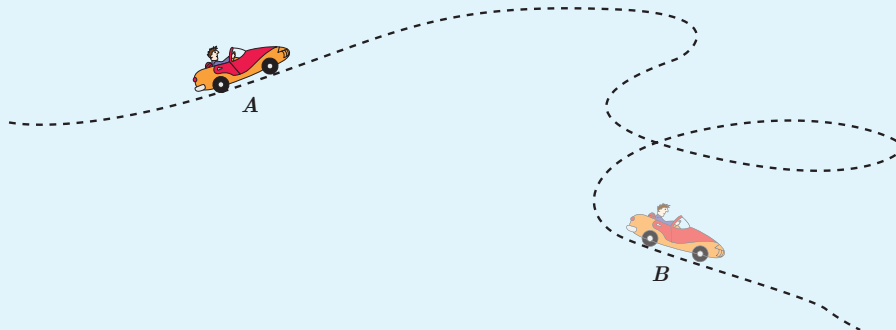
تمرین ۲-۷



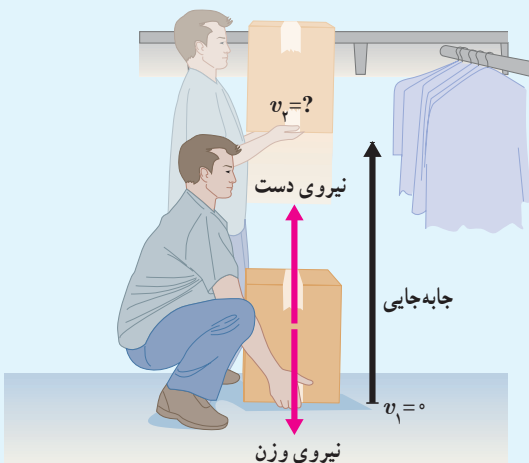
دو قایق بادبانی مخصوص حرکت روی سطوح یخ‌زده، دارای جرم‌های m و $۲m$ ، روی دریاچه افقی و بدون اصطکاک قرار دارند و نیروی ثابت و یکسان $\vec{F}$ با وزیدن باد به هر دو وارد می‌شود (شکل روبه‌رو). هر دو قایق از حال سکون شروع به حرکت می‌کنند و از خط پایان به فاصله d می‌گذرند. انرژی جنبشی و تندی قایق‌ها را درست پس از عبور از خط پایان، با هم مقایسه کنید.

تمرین ۲-۸

جرم یک خودروی الکتریکی به همراه راننده اش $10^3 \times 8/4$ kg است. وقتی این خودرو از موقعیت A به موقعیت B می‌رود، کار کل انجام شده روی خودرو $10^4 \times 7/35$ J است. اگر تندی خودرو در موقعیت A برابر $54/0$ km/h باشد، تندی آن در موقعیت B چند متر بر ثانیه است؟



تمرین ۲-۹

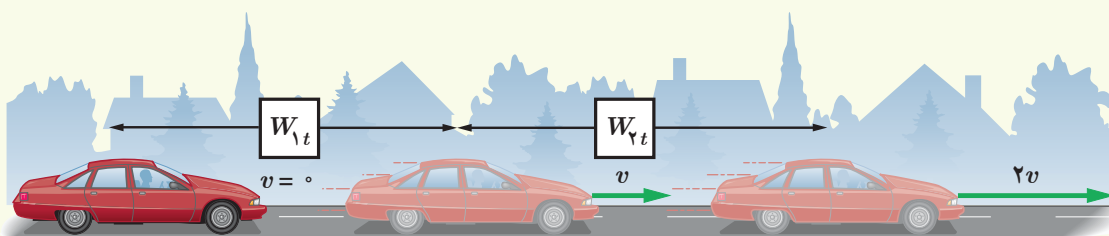


شکل روبه رو شخصی را نشان می‌دهد که با وارد کردن نیروی ثابت $52/7$ N، جعبه‌ای به جرم $4/1$ kg را از حال سکون در امتداد قائم جابه جا می‌کند.

الف) کار انجام شده توسط شخص و کار انجام شده توسط نیروی وزن را روی جعبه در ارتفاع $1/4$ m به طور جداگانه حساب کنید. ب) کار کل انجام شده روی جعبه تا ارتفاع $1/4$ m چقدر است؟ پ) با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی، تندی نهایی جعبه را در ارتفاع $1/4$ m حساب کنید.

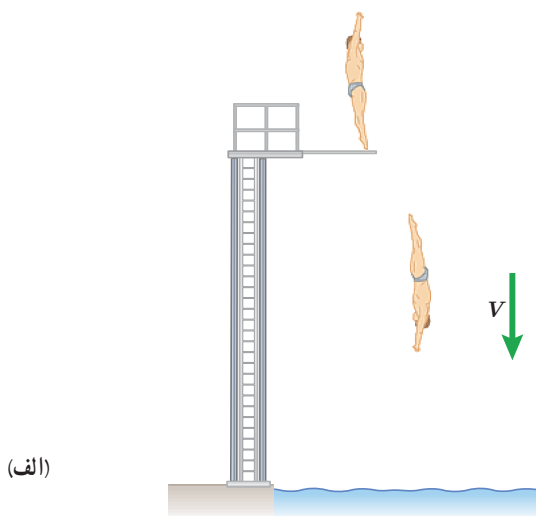
پرسش ۲-۳

برای آنکه تندی خودرویی از حال سکون به v برسد، باید کار کل W_{1t} روی آن انجام شود. همچنین برای آنکه تندی خودرو از v به $2v$ برسد، باید کار کل W_{2t} روی آن انجام شود (شکل زیر). نسبت W_{1t}/W_{2t} چقدر است؟



۴-۲ کار و انرژی پتانسیل

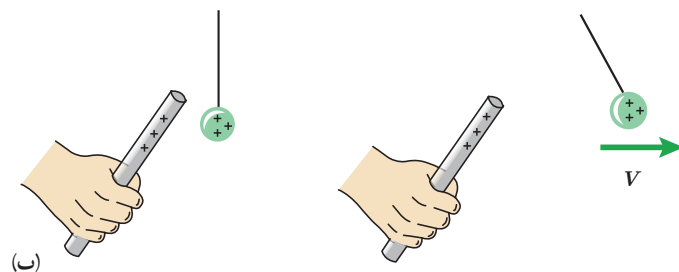
در علوم هفتم با نوع دیگری از انرژی، به نام انرژی پتانسیل یا انرژی ذخیره‌ای آشنا شدید که می‌تواند به شکل‌های متنوعی مانند گرانشی، کشسانی و الکتریکی باشد. انرژی پتانسیل، برخلاف انرژی جنبشی که به حرکت یک جسم وابسته است، ویژگی یک سامانه (دستگاه یا سیستم) است تا ویژگی یک جسم منفرد. به عبارت دیگر، انرژی پتانسیل به مکان اجسام یک سامانه نسبت به یکدیگر بستگی دارد. وقتی انرژی پتانسیل یک سامانه کاهش می‌یابد، به شکل‌های دیگری از انرژی تبدیل می‌شود. برای مثال، وقتی شخصی از یک تخته پرش به درون استخری پر از آب شیرجه می‌زند، انرژی پتانسیل سامانه شخص-زمین به تدریج به انرژی جنبشی شخص تبدیل می‌شود و شخص با تندی نسبتاً زیادی با سطح آب برخورد می‌کند (شکل ۵-۲ الف). یا هنگامی که فنری را توسط جسمی فشرده و رها می‌کنیم، انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جسم-فنر به انرژی جنبشی جسم تبدیل می‌شود و جسم با تندی زیادی پرتاب می‌شود (شکل ۵-۲ ب). همچنین وقتی یک جسم باردار را به جسم باردار دیگر نزدیک‌تر می‌کنیم، بسته به نوع بار، اجسام یکدیگر را می‌ربایند یا می‌رانند. در این حالت انرژی پتانسیل الکتریکی سامانه دو جسم باردار تغییر می‌کند (شکل ۵-۲ پ).



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵-۲ هر سامانه می‌تواند دست کم از دو جسم یا تعداد بسیار بیشتری از اجسام تشکیل شده باشد. (الف) انرژی پتانسیل گرانشی در سامانه شخص-زمین. (ب) انرژی پتانسیل کشسانی در سامانه جسم-فنر. (پ) انرژی پتانسیل الکتریکی در سامانه دو جسم باردار.

خوب است بدانید

انرژی پتانسیل، کمیتی مربوط به یک سامانه است. در اغلب موارد وقتی دو یا چند جسم به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند به دلیل موقعیت مکانی‌شان در سامانه، انرژی پتانسیل دارند. از نظر تاریخی، اصطلاح انرژی پتانسیل را نخستین بار ویلیام رانکین در میانه قرن نوزدهم (۱۸۵۳ م) معرفی کرد؛ هر چند دانشمندان دیگری پیش از وی، به گونه‌ای مفهوم آن را به کار برده بودند. اواخر قرن ۱۷، کریستیان هویگنس، کتابی درباره حرکت نوشت و در آن به نوعی به انرژی پتانسیل اشاره کرد. با وجود این، اصطلاح انرژی پتانسیل را به کار نبرده بود و به اهمیت آن نیز پی نبرده بود. همچنین، لاگرانژ، لاپلاس، پواسون و گرین از برجسته‌ترین دانشمندان زمان خود، در اواخر قرن ۱۸ و اوایل قرن ۱۹، مفهوم پتانسیل الکتریکی را در فرمول‌بندی ریاضی اثرات الکتریکی به کار برده بودند.

انرژی پتانسیل گرانشی

شکل ۶-۲ جسمی به جرم m را نشان می‌دهد که در حال سقوط به طرف زمین است. در حین سقوط، نیروی وزن $m\vec{g}$ و نیروی مقاومت هوا $\vec{f}_{\text{air}}$ به آن وارد می‌شود. وقتی جسم از ارتفاع h_1 به ارتفاع h_2 از سطح زمین می‌رسد کار نیروی وزن در این جابه‌جایی برابر است با:

$$W_{\text{وزن}} = (mg \cos \theta) d = (mg \cos 90^\circ) d = mgd$$

$$= mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1)$$

انرژی پتانسیل گرانشی سامانه متشکل از زمین و جسمی به جرم m که در ارتفاع h از سطح زمین است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = mgh \quad (5-2)$$

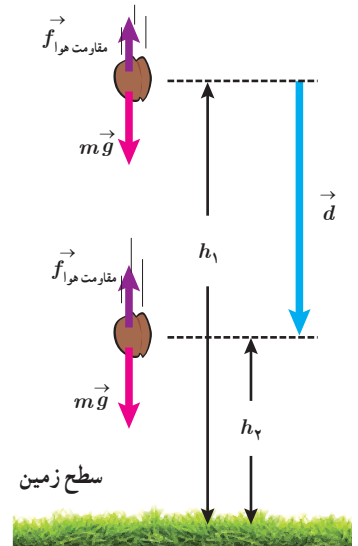
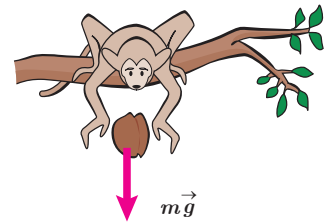
به این ترتیب، کار نیروی وزن را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$W_{\text{وزن}} = -(U_2 - U_1) = -\Delta U \quad (6-2)$$

رابطه ۶-۲ نشان می‌دهد کار نیروی وزن برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است. همچنین توجه کنید که علامت منها در جلوی ΔU در رابطه ۶-۲ اهمیت زیادی دارد. هنگامی که جسمی رو به پایین حرکت می‌کند h کاهش می‌یابد، نیروی وزن جسم کار مثبت انجام می‌دهد و انرژی پتانسیل گرانشی کاهش می‌یابد ($\Delta U < 0$).

هنگامی که جسمی رو به بالا حرکت می‌کند و از زمین دور می‌شود، h افزایش می‌یابد. در این صورت کار انجام شده توسط نیروی وزن جسم منفی است و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می‌یابد ($\Delta U > 0$).

اگرچه رابطه ۶-۲ را برای جسمی که در امتداد قائم و رو به پایین سقوط می‌کرد به دست آوردیم، ولی به سادگی می‌توان نشان داد این رابطه برای هر مسیر دلخواهی برقرار است. به عبارت دیگر، کار نیروی وزن به مسیر بستگی ندارد و همواره برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی سامانه جسم-زمین است.



شکل ۶-۲ نیروهای وارد شده به جسمی که به طرف زمین سقوط می‌کند.

تمرین ۱۰-۲

برای جسمی به جرم m که رو به بالا حرکت می‌کند و از سطح زمین دور می‌شود نشان دهید کار نیروی وزن، همچنان از رابطه ۶-۲ به دست می‌آید. فرض کنید که جسم به اندازه کافی نزدیک به سطح زمین بماند به گونه‌ای که وزن آن ثابت باشد.

توجه: انرژی پتانسیل گرانشی، یک ویژگی مشترک جسم و زمین است و برای سامانه‌ای متشکل از این دو، تعریف می‌شود. بنابراین، $U = mgh$ را باید انرژی پتانسیل گرانشی سامانه جسم – زمین بخوانیم؛ زیرا اگر زمین ثابت بماند و جسم از زمین دور شود، U افزایش می‌یابد و اگر جسم به زمین نزدیک شود U کاهش می‌یابد. توجه کنید که رابطه $U = mgh$ شامل هر دو ویژگی جسم (جرم آن m) و زمین (مقدار g) است. (برخی مواقع و صرفاً برای سادگی در گفتار، به انرژی پتانسیل گرانشی سامانه جسم – زمین، انرژی پتانسیل گرانشی جسم نیز می‌گویند.)

هنگامی که با انرژی پتانسیل گرانشی سر و کار داریم می‌توانیم $h = 0$ را در هر ارتفاعی انتخاب کنیم؛ زیرا اگر مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را انتقال دهیم، مقدارهای h_1 و h_2 تغییر می‌کنند و همین طور مقدارهای U_1 و U_2 . ولی باید توجه داشته باشیم که این انتقال مبدأ، تأثیری بر اختلاف ارتفاع $h_2 - h_1$ یا بر اختلاف انرژی پتانسیل گرانشی $U_2 - U_1 = mg(h_2 - h_1)$ ندارد.

کمیتی که در فیزیک اهمیت دارد تغییر انرژی پتانسیل گرانشی (ΔU) بین دو نقطه است نه مقدار U در یک نقطه خاص. در نتیجه همان طور که در مثال بعد خواهید دید می‌توانیم U را در هر نقطه‌ای که بخواهیم برابر صفر تعریف کنیم بدون آنکه تأثیری در پاسخ مسئله داشته باشد.

مثال ۲-۸

شکل زیر، کوه نوردی به جرم $72/0 \text{ kg}$ را نشان می‌دهد که در حال صعود به قله زردکوه بختیاری به ارتفاع $4/22 \text{ km}$ از سطح آزاد دریاست. تغییر انرژی پتانسیل گرانشی کوه نورد در $1/25$ کیلومتری پایان ارتفاع صعود چقدر است؟ مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را (الف) سطح دریا و (ب) قله کوه بگیرد. ($g = 9/81 \text{ m/s}^2$)



زردکوه بختیاری، یکی از غنی‌ترین ذخایر طبیعی آب ایران و سرچشمه رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود است.

پاسخ: اگر مطابق فرض (الف)، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در سطح دریا بگیریم، می‌توان نوشت:

$$h_1 = 2/97 \times 10^3 \text{ m} \quad \text{و} \quad h_2 = 4/22 \times 10^3 \text{ m}$$

$$\Delta U = mg(h_2 - h_1) = (72/0 \text{ kg})(9/81 \text{ m/s}^2)(4/22 \times 10^3 \text{ m} - 2/97 \times 10^3 \text{ m}) = 8/83 \times 10^5 \text{ J}$$

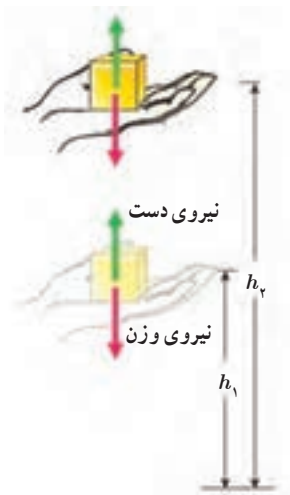
حال اگر مطابق فرض (ب)، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در قله کوه فرض کنیم، خواهیم داشت:

$$h_1 = -1/25 \times 10^3 \text{ m} \quad \text{و} \quad h_2 = 0$$

$$\Delta U = mg(h_2 - h_1) = (72/0 \text{ kg})(9/81 \text{ m/s}^2)[0 - (-1/25 \times 10^3 \text{ m})] = 8/83 \times 10^5 \text{ J}$$

همان طور که انتظار داشتیم انتقال مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی، تأثیری در نتیجه نهایی و فیزیک مسئله ندارد.

مثال ۲-۹



جسم ساکنی به جرم m را مانند شکل روبه رو، با دستمان از ارتفاع h_1 به ارتفاع h_2 می‌بریم و دوباره به حالت سکون می‌رسانیم. با چشم‌پوشی از مقاومت هوا، کار نیروی دست را در این جابه‌جایی محاسبه کنید.

پاسخ: با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی (رابطه ۲-۴) داریم:

$$W_t = W_{\text{وزن}} + W_{\text{دست}} = K_2 - K_1$$

از آنجا که جسم در ابتدا و انتهای مسیر ساکن است، تغییر انرژی جنبشی آن صفر است ($\Delta K = 0$). به این ترتیب داریم:

$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{دست}} = 0 \Rightarrow W_{\text{دست}} = -W_{\text{وزن}}$$

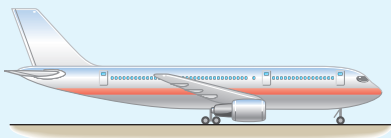
با توجه به رابطه ۲-۵ می‌توانیم کار نیروی وزن را با استفاده از تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی به دست آوریم.

$$W_{\text{وزن}} = -\Delta U = -(mgh_2 - mgh_1)$$

به این ترتیب، کار نیروی دست برابر است با:

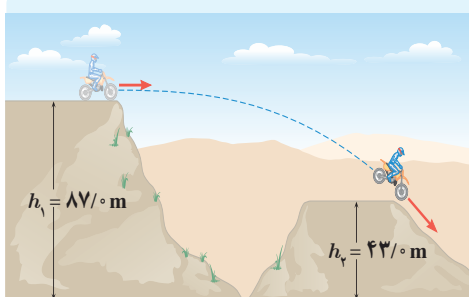
$$W_{\text{دست}} = -(-\Delta U) = +(mgh_2 - mgh_1)$$

تمرین ۲-۱۱



انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل گرانشی (نسبت به زمین) یک هواپیمای مسافربری به جرم 10^4 kg که با تندی 864 km/h در ارتفاع 10^3 m حرکت می‌کند چقدر است؟ مقدار این انرژی‌ها را با هم مقایسه کنید.

تمرین ۲-۱۲



جرم موتور سواری با موتورش 147 kg است. این موتورسوار، پرشی مطابق شکل روبه‌رو انجام می‌دهد.

الف) انرژی پتانسیل گرانشی موتور سوار را روی هر یک از تپه‌ها حساب کنید (9.81 m/s^2).

ب) کار نیروی وزن موتورسوار را در این جابه‌جایی به دست آورید.

انرژی پتانسیل کشسانی

در علوم هفتم با انرژی پتانسیل وابسته به اجسام کشسان، مانند فنر و نوآرهای لاستیکی آشنا شدید. در این بخش تنها به بررسی انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جسم - فنر می‌پردازیم. فنرها را به شکل‌ها و اندازه‌های متفاوتی می‌سازند (شکل ۲-۷) و در بیشتر وسایل و ابزارهای مورد استفاده ما در زندگی روزمره کاربرد دارند. آنها را می‌توان در اتومبیل‌ها، قطارها، اغلب ساعت‌ها، برخی از اسباب بازی‌ها و ... مشاهده کرد (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۷ انواع مختلف فنر. بنا به کاربرد، برخی از فنرها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که بین حلقه‌های مجاور آنها فاصله‌ای وجود ندارد و نمی‌توان آنها را متراکم کرد.



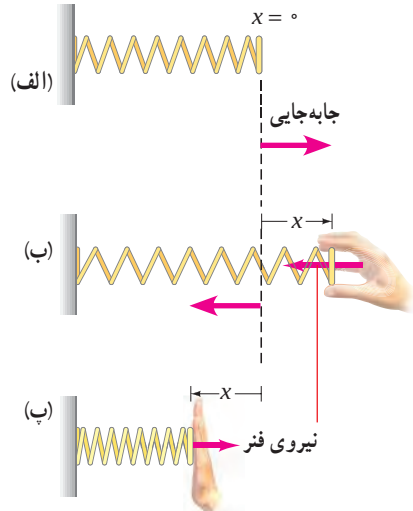
(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۸-۲ کاربرد فنر در (الف) ساعت (ب) اتومبیل (پ) قطار

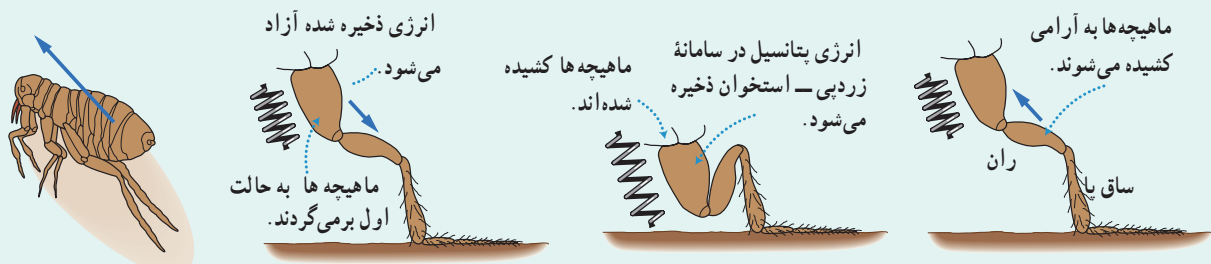
شکل ۹-۲ الف فنری را در وضعیت تعادلش نشان می‌دهد ($x = 0$) که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده شده است. با کشیدن یا فشردن فنر به اندازه x از مکان تعادلش، نیرویی در خلاف جهت جابه‌جایی به دست شخص وارد می‌شود (شکل‌های ۹-۲ ب و پ). یعنی کار نیروی فنر در این جابه‌جایی، منفی و تغییر انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جسم-فنر مثبت است. با توجه به آنچه در رابطه ۶-۲ دیدیم در مورد تغییر انرژی پتانسیل کشسانی فنر نیز، مشابه تغییر انرژی پتانسیل گرانشی می‌توان نوشت:

$$W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} \quad (۷-۲)$$

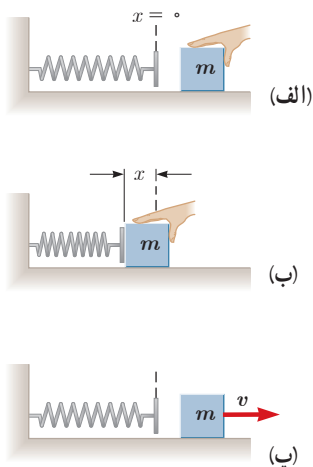
شکل ۹-۲ الف فنر در حال تعادل. (ب و پ) با کشیدن و فشردن فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در سامانه دست-فنر ذخیره می‌شود.

خوب است بدانید

حشره‌کک به داشتن توانایی پرش شگفت‌آور شهرت دارد؛ زیرا می‌تواند بیش از صد برابر ارتفاع پیکر خود بپرد. نتایج پژوهش‌هایی که روی نحوه حرکت حشره‌کک انجام شده، نشان می‌دهند که $1/10 \text{ ms}$ طول می‌کشد تا این حشره به تندی پیشینه خود، یعنی حدود $1/10 \text{ m/s}$ برسد. در این مدت کک می‌تواند تا ارتفاع $3/5 \text{ cm}$ بپرد. شکل‌های زیر به ترتیب الگوی پرش کک را براساس ذخیره و آزاد شدن انرژی پتانسیل کشسانی در پاهای آن نشان می‌دهد. جرم کک حدود $5/10 \text{ mg}$ است.



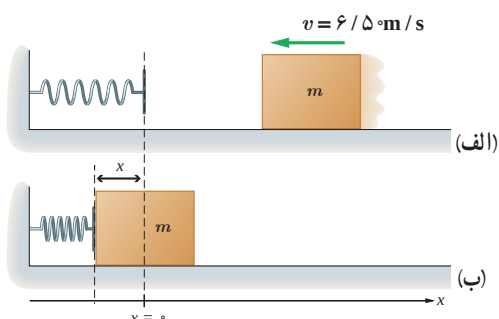
مثال مفهومی ۲-۱۰



دریافت خود را از شکل رو به رو با توجه به مفاهیمی که تا اینجا با آن آشنا شدید، بیان کنید. فرض کنید جسم روی سطحی افقی و بدون اصطکاک حرکت می‌کند.

پاسخ: شکل الف فنری را در حال تعادل نشان می‌دهد که نه فشرده و نه کشیده شده است و انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جسم - فنر صفر است. در شکل ب، جسمی به جرم m فنر را فشرده می‌کند. با توجه به فشرده‌گی فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در سامانه جسم - فنر ذخیره شده است. وقتی جسم رها می‌شود، مطابق شکل پ نیرویی که فنر به جسم وارد می‌کند روی جسم کار انجام می‌دهد، انرژی پتانسیل کشسانی سامانه فنر-جسم کاسته و انرژی جنبشی جسم افزوده می‌شود.

مثال ۲-۱۱



جسمی به جرم $4/20 \times 10^2 \text{ g}$ مطابق شکل روبه‌رو با تندی $6/50 \text{ m/s}$ به فنری برخورد کرده و آن را فشرده می‌کند.

(الف) انرژی جنبشی جسم در موقعیت شکل الف چقدر است؟
 (ب) اگر بیشترین انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره شده در سامانه جسم-فنر $5/60 \text{ J}$ باشد، کار نیروی فنر چقدر است؟
 (پ) با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی، کار نیروی اصطکاک را وقتی جسم از موقعیت شکل (الف) به موقعیت شکل (ب) می‌رود حساب کنید.

پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۲-۱، انرژی جنبشی جسم در موقعیت الف برابر است با:

$$K_1 = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0/420 \text{ kg})(6/50 \text{ m/s})^2 = 8/87 \text{ J}$$

(ب) با توجه به رابطه ۲-۷ کار نیروی فنر برابر است با:

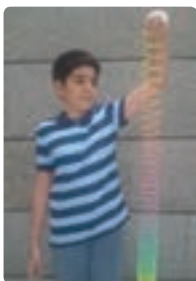
$$W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} = -(U_2 - U_1) = -(5/60 - 0) = 5/60 \text{ J}$$

(پ) از قضیه کار-انرژی جنبشی (رابطه ۲-۴) کار نیروی اصطکاک را به دست می‌آوریم:

$$W_{\text{فنر}} + W_{\text{اصطکاک}} + W_{\text{وزن}} + W_{\text{عمودی سطح}} = K_2 - K_1$$

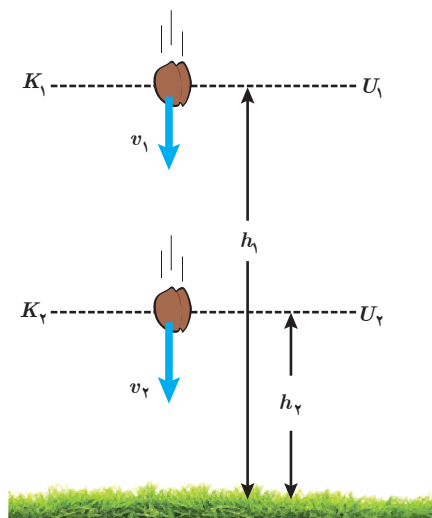
$$5/60 \text{ J} + W_{\text{اصطکاک}} + 0 + 0 = 0 - 8/87 \text{ J} \Rightarrow W_{\text{اصطکاک}} = -3/27 \text{ J}$$

فعالیت ۲-۱



یک فنر فلزی یا پلاستیکی نرم و نسبتاً بلند اختیار کنید. فنر را مطابق شکل روبه رو، از یک طرف آن در امتداد قائم آویزان کنید. ابتدا پیش بینی کنید که با رها کردن فنر، چه اتفاقی می‌افتد؟ فنر را رها کنید و با دقت، تمامی تبدیل‌های انرژی آن را بررسی کنید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید. اگر دوربین با امکان ضبط و پخش آهسته فیلم در اختیار دارید، فیلمی از این فعالیت تهیه کنید و آن را به طور آهسته مشاهده کنید.

۵-۲ پایستگی انرژی مکانیکی



شکل ۱۰-۲ جسمی را در حال سقوط به طرف زمین نشان می‌دهد. فرض کنید مقاومت هوا در برابر حرکت جسم ناچیز است و تنها نیروی وزن به آن وارد می‌شود. در قسمتی از مسیر انرژی جنبشی جسم از K_1 به K_2 و انرژی پتانسیل آن از U_1 به U_2 تغییر کرده است. همان‌طور که دیدیم مطابق رابطه ۶-۲، کار نیروی وزن هنگام جابه‌جایی از موقعیت ۱ به موقعیت ۲ برابر است با:

$$W_{\text{وزن}} = -(U_2 - U_1)$$

از آنجا که در طول مسیر تنها نیروی وزن به جسم وارد می‌شود کار کل انجام شده روی جسم برابر کار نیروی وزن است. به این ترتیب، بنا به قضیه کار-انرژی جنبشی (رابطه ۴-۲) داریم:

$$W_t = W_{\text{وزن}} = K_2 - K_1$$

از مقایسه دو رابطه اخیر می‌توان نوشت:

$$K_2 - K_1 = -(U_2 - U_1)$$

که می‌توان آن را به صورت زیر نیز بازنویسی کرد:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2$$

(۸-۲)

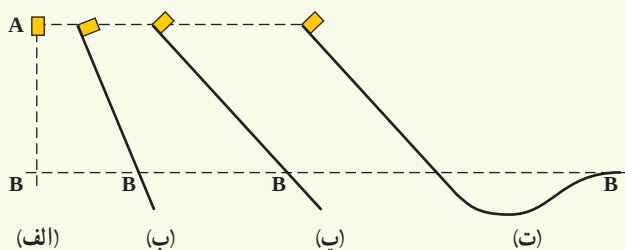
این رابطه نشان می‌دهد مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی جسم در نقطه‌های مختلف مسیر حرکت با هم برابر است. مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی هر جسم را انرژی مکانیکی آن می‌نامیم و با E نشان می‌دهیم ($E = K + U$). به این ترتیب، از رابطه ۸-۲ نتیجه می‌شود:

$$E_1 = E_2$$

(۹-۲)

چون نقطه‌های (۱) و (۲) در مسیر حرکت جسم در شکل ۱۰-۲ اختیاری‌اند، نتیجه می‌گیریم با نادیده گرفتن نیروی مقاومت هوا، انرژی مکانیکی در تمام نقاط مسیر مقدار یکسانی دارد و پایسته می‌ماند. این نتیجه، اصل پایستگی انرژی مکانیکی نام دارد و برای شرایطی که بتوان اثر ناشی از نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا را نادیده گرفت، کاربرد دارد.

پرسش ۴-۲



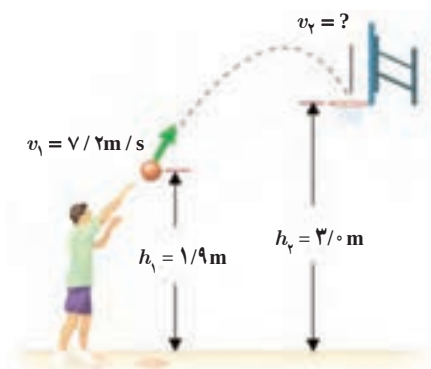
شکل روبه‌رو، چهار وضعیت متفاوت را برای حرکت جسمی نشان می‌دهد. در وضعیت الف، جسم از حال سکون سقوط می‌کند و در سه وضعیت دیگر جسم از حال سکون روی مسیری بدون اصطکاک و رو به پایین حرکت می‌کند. تندی جسم را در نقطه B برای هر چهار وضعیت با هم مقایسه کنید.

شکل ۱۰-۲ با نزدیک تر شدن جسم به زمین، انرژی پتانسیل گرانشی کاهش و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد.



کریستیان هویگنس (۱۶۹۵-۱۶۴۹م)، فیزیک‌دان، اخترشناس و ریاضی‌دان هلندی، نخستین دانشمندی بود که در قرن هفدهم، پایستگی انرژی مکانیکی را برای حرکت یک جسم بر اثر گرانش زمین بیان کرد. هویگنس در ادامه فعالیت‌های گالیله در خصوص آونگ، قوانین آونگ ساده را ارائه داد و ساعت‌های آونگی را اختراع کرد. وی همچنین ساخت عدسی‌های تلسکوپ را بهبود بخشید و برای نخستین بار حلقه‌های سیاره زحل را مشاهده و گزارش کرد.

مثال ۲-۱۲



شکل روبه‌رو ورزشکاری را در حال پرتاب توپ بسکتبالی با تندی $v_1 = 7/2 \text{ m/s}$ به طرف سبد نشان می‌دهد. تندی توپ هنگام رسیدن به دهانه سبد چقدر است؟ مقاومت هوا را هنگام حرکت توپ نادیده بگیرید.

پاسخ: چون اثر نیروی مقاومت هوا را در حین حرکت توپ ناچیز فرض کردیم، پایداری انرژی مکانیکی برقرار است. لذا از رابطه ۲-۸ می‌توان نوشت:

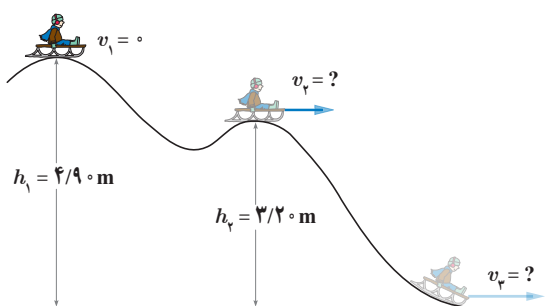
$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

با حذف m از طرفین معادله بالا، و جایگذاری مقادیر داده شده داریم:

$$\frac{1}{2}(7/2 \text{ m/s})^2 + (9/81 \text{ m/s}^2)(1/9 \text{ m}) = \frac{1}{2}v_2^2 + (9/81 \text{ m/s}^2)(3/0 \text{ m})$$

با حل معادله بالا، تندی توپ در دهانه سبد برابر $v_2 = 5/5 \text{ m/s}$ به دست می‌آید.

مثال ۲-۱۳



سورتمه سواری از ارتفاع $h_1 = 4/9 \text{ m}$ بالای سطح زمین و روی مسیری بدون اصطکاک، از حال سکون شروع به حرکت می‌کند.

(الف) تندی سورتمه را در ارتفاع h_2 به دست آورید.

(ب) تندی سورتمه را هنگامی که به سطح زمین می‌رسد پیدا کنید. مقاومت هوا را هنگام حرکت سورتمه نادیده بگیرید.

پاسخ: (الف) چون نیروهای اصطکاک و مقاومت هوا را در حین حرکت سورتمه ناچیز فرض کردیم، پایداری انرژی مکانیکی برقرار است؛ لذا از رابطه ۲-۸ می‌توان نوشت:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

با حذف m (جرم سورتمه و سورتمه سوار) از طرفین معادله بالا، و جایگذاری مقادیر داده شده داریم:

$$0 + (9/81 \text{ m/s}^2)(4/9 \text{ m}) = \frac{1}{2}v_2^2 + (9/81 \text{ m/s}^2)(3/2 \text{ m}) \Rightarrow v_2 = 5/77 \text{ m/s}$$

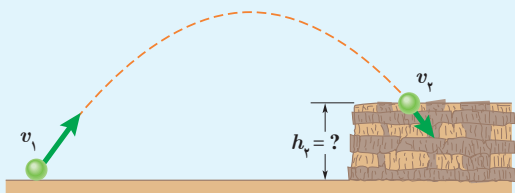
(ب) به‌طور مشابه قسمت قبل، انرژی مکانیکی وضعیت اول و وضعیت سوم سورتمه سوار را مساوی یکدیگر قرار می‌دهیم.

در این صورت تندی سورتمه سوار روی زمین برابر $v_3 = 9/8 \text{ m/s}$ به دست می‌آید. به‌جای این کار می‌توانستید انرژی مکانیکی وضعیت دوم و وضعیت سوم سورتمه سوار را مساوی یکدیگر قرار دهید.

تمرین ۲-۱۳

در مثال ۲-۱۲، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در ارتفاع h_1 بگیرید و بر این اساس تندی توپ را هنگام رسیدن به دهانه سبد حساب کنید.

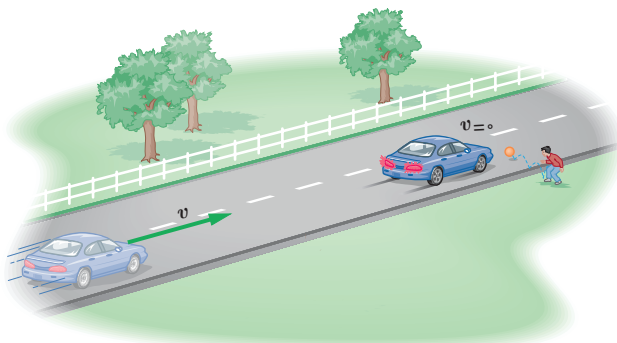
تموین ۲-۱۴



تویی مطابق شکل از سطح زمین با تندی $v_1 = 42^\circ/\text{m/s}$ به طرف صخره‌ای پرتاب می‌شود.

اگر توپ با تندی $v_2 = 24^\circ/\text{m/s}$ به بالای صخره برخورد کند، ارتفاع h_f را به دست آورید. مقاومت هوا را هنگام حرکت توپ نادیده بگیرید.

۶-۲ کار و انرژی درونی



شکل ۲-۱۱ وقتی خودرویی ترمز می‌گیرد کار نیروهایی که بر خلاف جهت جابه‌جایی خودرو به آن وارد می‌شوند، انرژی جنبشی خودرو را کاهش می‌دهند.

خودرویی را در نظر بگیرید که با تندی v روی سطح جاده‌ای افقی در حرکت است. ناگهان راننده مانعی را می‌بیند و ترمز می‌کند طوری که چرخ‌های خودرو قفل می‌شوند و روی آسفالت جاده کشیده و ساییده می‌شوند و خط ترمز به وجود می‌آید (شکل ۱۱-۲). در این فرایند نیروی اصطکاک که برخلاف جهت جابه‌جایی خودرو به آن وارد می‌شود، روی خودرو کار منفی انجام می‌دهد. حال این پرسش مطرح می‌شود که پس از توقف خودرو، انرژی جنبشی آن کجا رفته است؟ برای پاسخ به این پرسش، نوع دیگری انرژی را معرفی می‌کنیم که انرژی درونی نامیده می‌شود. انرژی درونی یک جسم، مجموع انرژی‌های ذره‌های تشکیل دهنده آن است.

معمولاً با گرم‌تر شدن یک جسم، انرژی درونی آن بالا می‌رود. انرژی درونی یک جسم، هم به تعداد ذرات جسم و هم به انرژی هر ذره بستگی دارد. به طوری که هرچه تعداد ذرات سازنده یک جسم و انرژی هر ذره آن بیشتر باشد، انرژی درونی آن نیز بیشتر است. چون در حین ترمز گرفتن خودرو، لاستیک‌های آن و سطح جاده گرم‌تر شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که انرژی درونی هر دو افزایش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که در اثر کار نیروی اصطکاک، انرژی جنبشی خودرو به انرژی درونی لاستیک‌های آن و سطح جاده تبدیل شده است.

در این گونه موارد، اصطلاحاً می‌گوییم انرژی تلف شده است. در واقع، همان‌طور که اشاره شد، در این حالت انرژی از بین رفته است بلکه به انرژی درونی لاستیک‌ها و سطح جاده تبدیل شده است. چون این انرژی را در اغلب موارد و در عمل نمی‌توان دوباره مورد استفاده قرار داد، معمولاً از اصطلاح انرژی تلف شده استفاده می‌شود.

پرسش ۲-۴

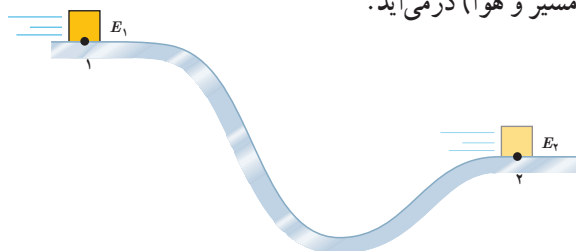


شخصی توپ در حال حرکتی را با دست خود می‌گیرد (شکل روبه‌رو). پس از توقف توپ، انرژی جنبشی آن کجا رفته است؟

شکل ۲-۱۲ جسمی را نشان می‌دهد که پس از طی مسیری انرژی مکانیکی آن از E_1 به E_2 تغییر کرده است. اگر در طول مسیر نیروهای اصطکاک و مقاومت هوا، به جسم وارد شوند و روی جسم کار منفی انجام دهند، بخشی از انرژی مکانیکی جسم را به انرژی درونی جسم، سطح مسیر و هوا تبدیل می‌کنند. اگر کار انجام شده توسط این نیروها که معمولاً به نیروهای اتلافی نیز شناخته می‌شوند را با W_f نمایش دهیم در این صورت می‌توان نوشت^۱:

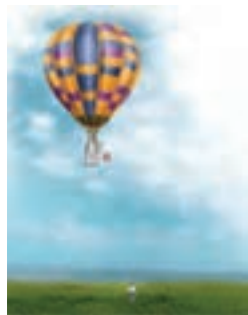
$$W_f = E_2 - E_1 \quad (2-10)$$

این رابطه نشان می‌دهد با حضور نیروهای اتلافی، انرژی مکانیکی جسم یا سامانه پایسته نمی‌ماند و تغییر می‌کند. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره کردیم این تغییر انرژی به صورت افزایش انرژی درونی جسم و محیط اطراف آن (سطح مسیر و هوا) درمی‌آید.



شکل ۲-۱۲ وقتی نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا در حین حرکت جسم، روی آن کار انجام دهند انرژی مکانیکی جسم پایسته نیست.

قانون پایستگی انرژی: در یک سامانهٔ منزوی^۲، مجموع کل انرژی‌ها پایسته می‌ماند. انرژی را نمی‌توان خلق یا نابود کرد و تنها می‌توان آن را از یک شکل به شکل دیگر تبدیل کرد. این بیان، که براساس آزمایش‌های بسیاری بنا شده است قانون پایستگی انرژی نامیده می‌شود و تاکنون هیچ مورد استثنایی برای آن یافت نشده است.



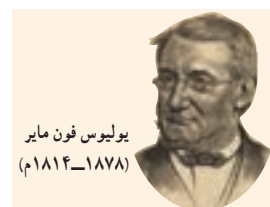
از بالونی که در ارتفاع 45° متری سطح زمین و با تندی $4/2^\circ \text{m/s}$ در پرواز است، بسته‌ای به جرم 25°kg رها می‌شود و با تندی $23/6^\circ \text{m/s}$ به زمین برخورد می‌کند. کار انجام شده توسط نیروی مقاومت هوا بر روی بسته را از لحظهٔ رها شدن تا هنگام رسیدن به زمین حساب کنید.

پاسخ: ابتدا انرژی مکانیکی بسته را در لحظهٔ رها شدن و هنگام برخورد به زمین حساب می‌کنیم. اگر مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را سطح زمین فرض می‌کنیم، داریم:

$$\begin{aligned} E_1 &= K_1 + U_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \\ &= \frac{1}{2}(25^\circ \text{kg})(4/2^\circ \text{m/s})^2 + (25^\circ \text{kg})(9/81 \text{ m/s}^2)(45^\circ \text{m}) = 1/13 \times 10^4 \text{ J} \\ E_2 &= K_2 + U_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \\ &= \frac{1}{2}(25^\circ \text{kg})(23/6^\circ \text{m/s})^2 + 0 = 6/96 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

با جایگذاری مقادیر انرژی مکانیکی بسته در رابطهٔ ۲-۱۰، کار انجام شده توسط نیروی مقاومت هوا بر روی بسته برابر است با:

$$W_f = E_2 - E_1 = 6/96 \times 10^3 \text{ J} - 1/13 \times 10^4 \text{ J} = -4/3 \times 10^3 \text{ J}$$



یولیوس فون مایر
(۱۸۱۴-۱۸۷۸م)

قانون پایستگی انرژی بیانی از ثبات در طبیعت است. انرژی کل، کمیتی است که پایسته می‌ماند؛ درحالی که کمیت‌های دیگر می‌توانند تغییر کنند. اولین اظهار نظر دربارهٔ اینکه قانون پایستگی انرژی در طبیعت حاکم است، در اواسط قرن نوزدهم میلادی مطرح شد. مایر در آلمان و ژول در انگلستان، اظهار نظر کردند که گرما و انرژی مکانیکی هم‌ارز یکدیگرند؛ یعنی می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند و مجموع آنها ثابت بماند. قانون پایستگی انرژی مایر و ژول، دو شاخهٔ مهم فیزیک، به نام ترمودینامیک و مکانیک را وحدت بخشید.



جیمز پریسکات ژول
(۱۸۱۸-۱۸۸۹م)

مثال ۲-۱۴

۱ - معمولاً از حرف کوچک f برای نشان دادن نیروهای اتلافی مانند اصطکاک و مقاومت هوا استفاده می‌شود.

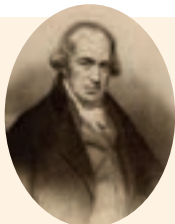
۲ - به سامانه‌ای که نه از محیط اطراف انرژی بگیرد و نه به محیط اطراف انرژی دهد، سامانهٔ منزوی گفته می‌شود.

تموین ۲-۱۵



توپى به جرم 0.45 kg با تندی $v_1 = 8 \text{ m/s}$ از نقطه A می‌گذرد (شکل روبه‌رو). نیروی مقاومت هوا و نیروی اصطکاک در سطح تماس توپ با زمین، 20% درصد انرژی جنبشی توپ را تا رسیدن به نقطه B تلف می‌کنند. تندی توپ را در این نقطه به دست آورید.

۲-۲ توان



جیمزوات (۱۷۳۶-۱۸۱۹م) مخترع و مهندس اسکاتلندی، فعالیت حرفه‌ای خود را با اصلاح و تکمیل ماشین بخار نیوکامن آغاز کرد. پس از آن در سال ۱۷۶۹ میلادی، ماشین بخار دیگری طراحی کرد که نسبت به ماشین‌های بخار موجود، بازده و سرعت عمل بیشتری داشت. اختراع جدید وات، مورد استقبال زیادی قرار گرفت به طوری که ظرف چند سال پس از اختراع وی، حدود 500 دستگاه از آن، در سراسر انگلستان مورد استفاده قرار گرفت. مقدار اسب بخار ($1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$) از آزمایش‌هایی به دست آمده که توسط وات انجام شده است. نتیجه این آزمایش‌ها این بود که یک اسب می‌تواند در بالا بردن زغال سنگ از معدن در هر دقیقه 33000 فوت-پوند (ft-lbs) کار انجام دهد. هر فوت - پوند تقریباً معادل $1/36$ ژول است.

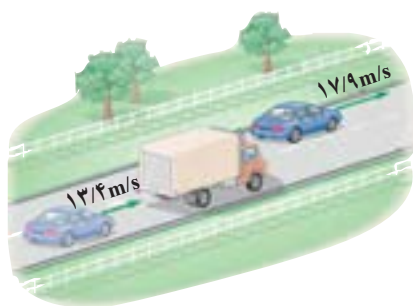
در علوم نهم با برخی از ماشین‌های ساده آشنا شدید. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هر ماشین، چه ساده باشد چه پیچیده، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا کار معینی را انجام دهد. یک ماشین می‌تواند کار معینی را آرام، یا تند انجام دهد. برای مثال، هرچه موتور یک خودرو قوی‌تر باشد راحت‌تر و سریع‌تر می‌تواند از یک جاده کوهستانی بالا رود. در صورتی که برای پیمودن همین مسیر توسط خودرویی مشابه، ولی با موتور ضعیف‌تر، زمان طولانی‌تری لازم است.

در اغلب موارد لازم است بدانیم در چه مدت زمانی می‌توان کار معینی را انجام داد. در فیزیک، آهنگ انجام کار را با کمیتی به نام توان توصیف می‌کنیم. هرچند در گفت و گوهای روزمره، معمولاً واژه توان را با واژه‌های انرژی یا نیرو مترادف می‌گیرند، اما این کمیت در فیزیک تعریف دقیقی دارد. توان، همانند کار و انرژی، کمیتی است نرده‌ای و به صورت آهنگ انجام کار بیان می‌شود. هنگامی که کار W در بازه زمانی Δt انجام می‌شود، کار انجام شده در واحد زمان یا توان متوسط $\bar{P}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} \quad (2-11)$$

یکای SI توان، وات (W) است که به احترام جیمزوات مخترع انگلیسی نام‌گذاری شده است. مطابق تعریف توان (رابطه ۲-۱۱)، یک وات برابر است با یک ژول بر ثانیه ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$). استفاده از یکاهای بزرگ‌تر توان، مانند کیلووات (kW) و مگاوات (MW) نیز متداول است. یکای قدیمی توان، به نام اسب بخار ($1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$) هنوز نیز استفاده می‌شود. این یکا نخستین بار توسط وات برای ارزیابی توان خروجی اختراع جدیدش، ماشین بخار، معرفی شد. توان موتور بیشتر وسایل نقلیه با این یکا بیان می‌شود.

مثال ۲-۱۵



شکل روبه‌رو خودرویی به جرم 10^3 kg را نشان می‌دهد که برای سبقت گرفتن از کامیونی، در مسیری افقی و در مدت 300 s تندی خود را از $v_1 = 13.4 \text{ m/s}$ به $v_2 = 17.9 \text{ m/s}$ تغییر داده است. توان متوسط موتور خودرو برای انجام این کار، دست کم چقدر باید باشد؟ نیروهای اتلافی را نادیده بگیرید.

۱ - یکای hp از سر حرف عبارت horse power به معنای اسب بخار گرفته شده است.

پاسخ: با توجه به رابطه ۲-۴، کار کل انجام شده توسط موتور خودرو، برابر تغییر انرژی جنبشی آن است. به این ترتیب، با به دست آوردن انرژی جنبشی خودرو در دو وضعیت داده شده و محاسبه کار کل موتور خودرو داریم:

$$W_t = K_2 - K_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$= \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2}(1300 \times 10^3 \text{ kg})[(17/9 \text{ m/s})^2 - (13/4 \text{ m/s})^2] = 9/16 \times 10^4 \text{ J}$$

با جایگذاری مقدار به دست آمده در رابطه ۲-۱۱، کمترین توان متوسط موتور خودرو برای انجام این کار برابر است با:

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{9/16 \times 10^4 \text{ J}}{3/0 \text{ s}} = 3/05 \times 10^4 \text{ W} = 40/9 \text{ hp}$$

در واقع با وجود نیروهای اتلافی (مانند مقاومت هوا) در حین حرکت خودرو، توان مورد نیاز از این مقدار بیشتر است.

مثال ۲-۱۶

جرم اتاقک بالابری به همراه بار آن 500 kg است (شکل روبه‌رو). اگر این بالابر در مدت $10/0 \text{ s}$ از طبقه همکف به طبقه دوم در ارتفاع $6/2 \text{ m}$ برود، توان متوسط موتور این بالابر چند اسب بخار است؟ نیروهای اتلافی را نادیده بگیرید.

پاسخ: با توجه به رابطه ۲-۴، کار کل انجام شده روی اتاقک بالابر (شامل کار نیروی وزن و کار نیروی موتور بالابر) برابر تغییر انرژی جنبشی آن است. به این ترتیب داریم:

$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{موتور}} = K_2 - K_1$$

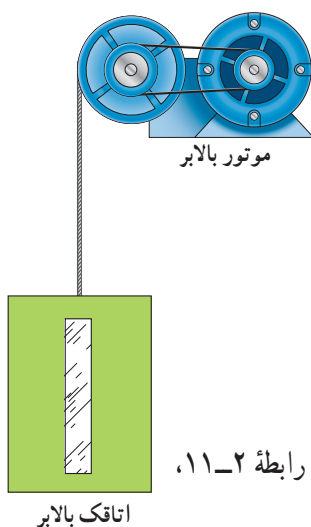
$$-mg(h_2 - h_1) + W_{\text{موتور}} = 0 - 0$$

$$W_{\text{موتور}} = mg(h_2 - h_1) = (500 \text{ kg})(9/81 \text{ m/s}^2)(6/2 \text{ m} - 0) = 3/04 \times 10^4 \text{ J}$$

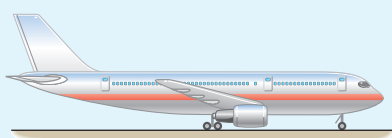
در محاسبه بالا، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را سطح زمین (طبقه همکف) گرفته‌ایم. با توجه به رابطه ۲-۱۱،

توان متوسط موتور بالابر برابر است با:

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{موتور}}}{\Delta t} = \frac{3/04 \times 10^4 \text{ J}}{10/0 \text{ s}} = 3/04 \times 10^3 \text{ W} = 4/08 \text{ hp}$$

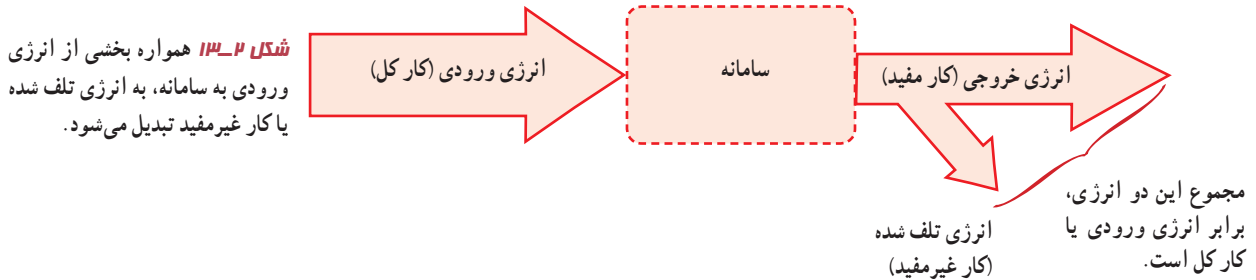


تمرین ۲-۱۶



هر یک از دو موتور جت یک هواپیمای مسافربری بوئینگ ۷۶۷، پیشرانده‌ای (نیروی جلوبر هواپیما) برابر $1/97 \times 10^5 \text{ N}$ ایجاد می‌کند. اگر هواپیما در هر دقیقه $15/6 \text{ km}$ در امتداد این نیرو حرکت کند، توان متوسط هر یک از موتورهای هواپیما چند اسب بخار است؟

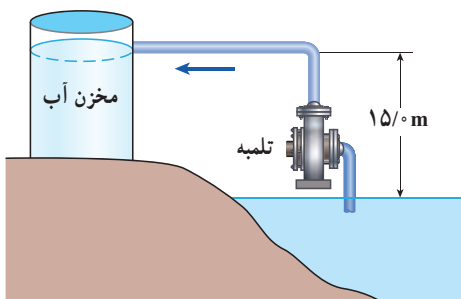
بازده: در هر سامانه تنها بخشی از انرژی ورودی (انرژی مصرفی سامانه) به انرژی موردنظر ما تبدیل می‌شود. برای مثال، وقتی موتور بالابری کار می‌کند بخشی از انرژی الکتریکی ورودی به کار مکانیکی تبدیل می‌شود و اتا‌فک بالابر را جابه‌جا می‌کند. بخش دیگری از انرژی الکتریکی ورودی به صورت انرژی‌های ناخواسته‌ای مانند گرم‌تر شدن اجزای موتور و کابل بالابر در می‌آید. شکل ۱۳-۲ طرح واره‌ای است که این نوع تبدیل انرژی‌ها در سامانه را نشان می‌دهد.



همان‌طور که طرح واره شکل ۱۳-۲ نشان می‌دهد تنها بخشی از انرژی ورودی قابل استفاده است که به آن انرژی خروجی یا کار مفید می‌گویند. نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی را بازده می‌نامیم. معمولاً بازده هر سامانه را برحسب درصد بیان می‌کنند، که همواره عددی کوچک‌تر از ۱۰۰ است. با توجه به تعریف بازده، از رابطه زیر می‌توان درصد بازده هر سامانه را به سادگی محاسبه کرد.

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \times 100 \quad (12-2)$$

مثال ۱۷-۲



تلمبه‌ای با توان ورودی ۱۵/۴ kW در هر ثانیه ۷۰٪ لیتر آب دریاچه‌ای به چگالی 1000 kg/m^3 را مطابق شکل روبه‌رو تا ارتفاع ۱۵/۰ متری مخزنی می‌فرستد. بازده تلمبه چند درصد است؟

پاسخ: انرژی الکتریکی ورودی به تلمبه برابر است با

$$E_{\text{ورودی}} = (15/4 \times 10^3 \text{ W})(1/0 \text{ s}) = 1/54 \times 10^4 \text{ J}$$

جرم هر لیتر آب دریاچه $1/0 \text{ kg}$ و کار مفید تلمبه برابر است با:

$$E_{\text{خروجی}} = mg(h_2 - h_1) = (70/0 \text{ kg})(9/81 \text{ N/kg})(15/0 \text{ m} - 0) = 1/03 \times 10^4 \text{ J}$$

در محاسبه بالا، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را سطح آب دریاچه گرفته‌ایم. با توجه به رابطه ۱۲-۲، درصد بازده تلمبه برابر است با:

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{1/03 \times 10^4 \text{ J}}{1/54 \times 10^4 \text{ J}} \times 100 = 66/9\%$$

لازم است توجه کنید که بخشی از توان ورودی تلمبه به دلیل اصطکاک آب در حال حرکت با جداره داخلی لوله تلف می‌شود.

تمرین ۲-۱۷

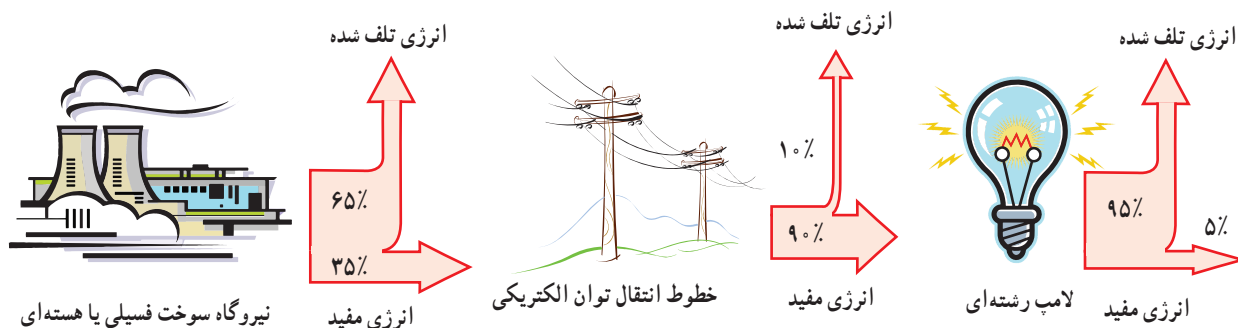


آب ذخیره شده در پشت سد یک نیروگاه برق آبی، از ارتفاع ۹۰۰ متری روی پره های توربینی می ریزد و آن را می چرخاند. با چرخش توربین، مولد می چرخد و انرژی الکتریکی تولید می شود (شکل روبه رو). اگر ۸۵ درصد کار نیروی گرانش به انرژی الکتریکی تبدیل شود، در هر ثانیه چند متر مکعب آب باید روی توربین بریزد تا توان الکتریکی خروجی مولد نیروگاه به ۲۰۰ MW برسد؟ جرم هر متر مکعب آب را 10^3 kg در نظر بگیرید.

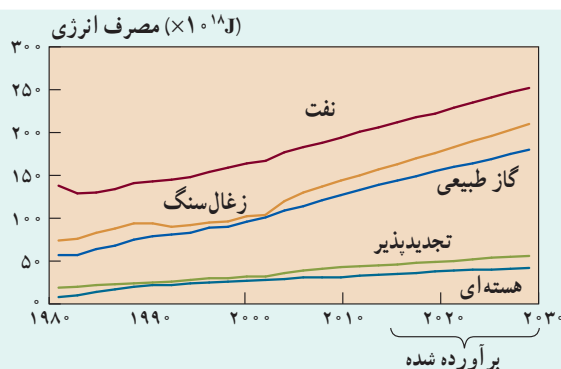
فعالیت ۲-۲

شکل زیر طرح واره ای از درصد انرژی مفید و انرژی تلف شده در یک نیروگاه سوخت فسیلی یا هسته ای را از آغاز تا مصرف در یک لامپ رشته ای نشان می دهد.

الف) یک نیروگاه سوخت فسیلی را در نظر بگیرید که با مصرف گازوئیل، انرژی الکتریکی تولید می کند. با سوختن هر لیتر گازوئیل ۳۴/۲ مگاژول انرژی گرمایی تولید می شود. برای اینکه یک لامپ رشته ای ۱۰۰ واتی در طول یک ماه به مدت ۱۸۰ ساعت روشن بماند (به طور میانگین هر شبانه روز ۶ ساعت)، چقدر گازوئیل باید در نیروگاه مصرف شود؟
 ب) با توجه به نتیجه قسمت الف، درک خود از هشدار معروف «لامپ اضافی خاموش!» را بیان کنید.
 پ) اگر در سراسر ایران، هر خانه در طول یک ماه، معادل انرژی الکتریکی مصرف شده در قسمت الف، صرفه جویی کند، مرتبه بزرگی گازوئیل صرفه جویی شده را تخمین بزنید.

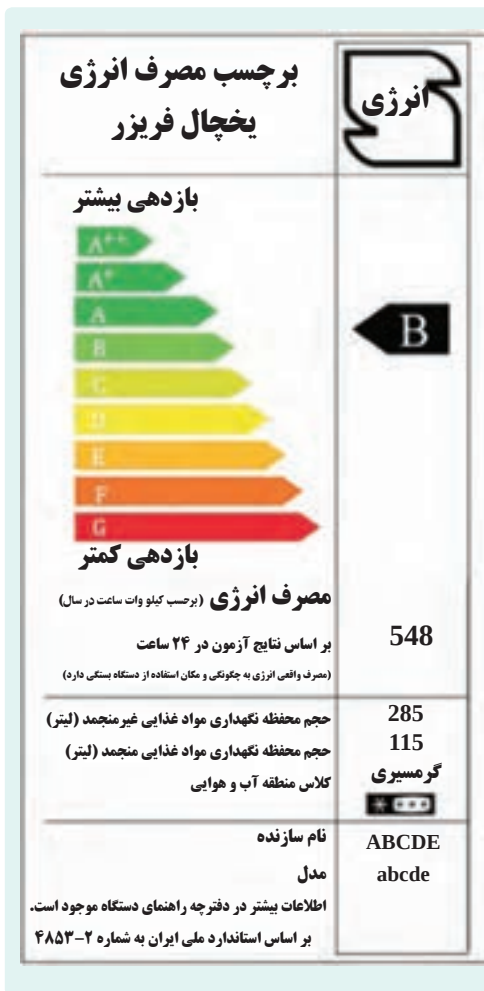


خوب است بدانید



کل مصرف انرژی از منابع مختلف. همان طور که دیده می شود طی ۱۵ سال آینده مصرف انرژی جهان از منابع مختلف رشد چشمگیری خواهد داشت. در این میان بهره برداری از سوخت های فسیلی بیش از سایر منابع انرژی است.

بهینه سازی مصرف انرژی: امروزه انرژی در همه عرصه های زندگی بشر و همچنین توسعه زیرساخت های صنعتی و اقتصادی نقش محوری ایفا می کند و یکی از ارکان استقلال و اقتدار سیاسی کشورها محسوب می شود. افزایش روز افزون مصرف انواع مختلف انرژی در جهان، هم اینک به یکی از چالش های فراروی بشر تبدیل شده است (شکل روبه رو). این امر به ویژه پس از بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰ میلادی،



متخصصان حوزه انرژی را به بررسی و ارائه راهکارهایی برای استفاده و مصرف بهینه انرژی واداشته است.

همان‌طور که دیده می‌شود بهینه‌سازی مصرف انرژی از نظر اقتصادی نه تنها یک ضرورت است؛ بلکه از جنبه زیست محیطی نیز اهمیت بسزایی دارد. بهینه‌سازی مصرف انرژی به بیان ساده به مجموعه‌ای از راهکارها و عملکردها گفته می‌شود که منجر به کاهش مصرف مقدار انرژی در بخش‌های مختلفی از قبیل تولید، خدمات و مسکونی شود. به این منظور دولت‌ها تلاش می‌کنند تا برنامه‌های مختلفی را پس از برنامه‌ریزی دقیق و به خصوص توجه به جنبه‌های زیست محیطی آن به اجرا در آورند. برای مثال، یکی از موارد مهمی که در سال‌های اخیر در ایران از طرف مسئولان مورد تأکید نظری و عملی قرار گرفته است، تعیین ملاک‌هایی برای مصرف انرژی کلیه وسایل خانگی است که عملکرد آنها به انرژی وابسته است. حاصل این کار تهیه و تدوین برچسب انرژی است که شامل اطلاعات مربوط به مصرف انرژی کالای تولید شده است (شکل روبه‌رو).

برچسب مصرف انرژی مربوط به نوعی از یخچال فریزر. همان‌طور که دیده می‌شود شاخص مصرف انرژی این کالا، از رتبه A تا G، دارای رتبه B است که رتبه متوسطی محسوب می‌شود.

فعالیت ۲-۳

مدت زمانی را که طول می‌کشد تا با دویدن به بالای یک راه‌پله برسید اندازه بگیرید. آهنگ انجام این کار را محاسبه کنید. پاسخ خود را بر حسب وات و اسب بخار بیان کنید.

۲-۱ انرژی جنبشی



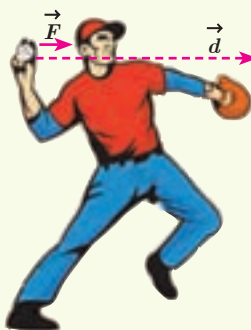
۱) تقریباً بیشتر شهاب‌سنگ‌هایی که وارد جو زمین می‌شوند به دلیل اصطکاک زیاد با ذرات تشکیل دهنده جو، به دمای بالایی می‌رسند و می‌سوزند. شکل روبه رو شهاب سنگی به جرم $10^5 \text{ kg} \times 1/35$ را نشان می‌دهد که با تندی $4/12 \text{ km/s}$ وارد جو زمین شده است. انرژی جنبشی این شهاب سنگ را به دست آورید. این انرژی را با انرژی جنبشی یک هواپیمای مسافربری به جرم $10^4 \text{ kg} \times 7/25$ که با تندی 936 km/h در حرکت است مقایسه کنید.



۲) حدود ۵۰۰۰۰ سال پیش شهاب سنگی در نزدیک آریزونای آمریکا به زمین برخورد کرده و چاله‌ای بزرگ از خود به جای گذاشته است (شکل روبه رو). با اندازه‌گیری‌های جدید (۲۰۰۵ میلادی) برآورد شده است که جرم این شهاب سنگ حدود $10^8 \text{ kg} \times 1/40$ بوده و با تندی $12/0 \text{ km/s}$ به زمین برخورد کرده است. انرژی جنبشی این شهاب سنگ هنگام برخورد به زمین چقدر بوده است؟ (خوب است بدانید انرژی آزاد شده توسط هر تن TNT برابر $4/18 \times 10^9 \text{ J}$ است.)

۲-۲ و ۳-۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت و کار و انرژی جنبشی

۳) در شکل‌های (الف) و (ب) جرم ارباب‌ها یکسان است. برای اینکه تندی ارباب‌ها از صفر به مقدار معین v برسد، کار انجام شده در هر دو حالت را باهم مقایسه کنید.



۴) ورزشکاری سعی می‌کند توپ بیسبالی به جرم 145 g را با بیشترین تندی ممکن پرتاب کند. به این منظور، ورزشکار نیرویی به بزرگی $F = 75/0 \text{ N}$ تا لحظه پرتاب توپ و در امتداد جابه‌جایی ($d = 1/45 \text{ m}$) بر آن وارد می‌کند (شکل روبه‌رو). تندی توپ هنگام جدا شدن از دست ورزشکار چقدر است؟

۵) آیا کار کل انجام شده بر یک جسم در یک جابه‌جایی می‌تواند منفی باشد؟ توضیح دهید.

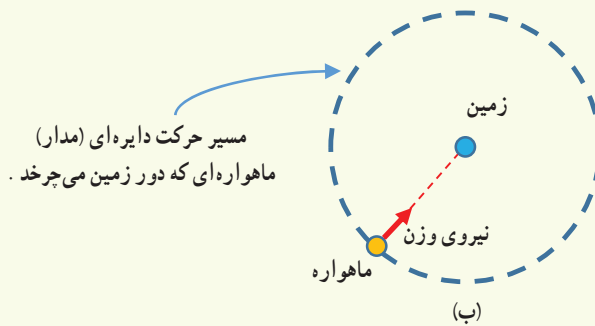
۶) برای آنکه نیروی خالصی، بتواند تندی جسم را از صفر به v برساند باید مقدار کار W را روی آن انجام دهد. اگر قرار باشد تندی این جسم از صفر به $3v$ برسد کاری که روی جسم باید انجام شود چند برابر W است؟



۷ اگر مطابق شکل روبه‌رو سطلی را در دست نگه دارید، آیا نیروی دست شما هنگامی که با تندی ثابت در مسیر افقی قدم می‌زنید روی سطل کاری انجام می‌دهد؟ اگر تندی حرکت شما در طول مسیر کم و زیاد شود چطور؟ پاسخ خود را در هر مورد توضیح دهید.

۸ شخصی گلوله‌ای برفی به جرم $۱۵۸g$ را از روی زمین بر می‌دارد و تا ارتفاع $۱۸۵cm$ بالا می‌برد و سپس آن را با تندی $۱۲/۴m/s$ پرتاب می‌کند. کار انجام شده توسط شخص روی گلوله برف چقدر است؟

۹ ماهواره‌ها در مدارهای معین و با تندی ثابتی دور زمین می‌چرخند. حرکت یک ماهواره به دور زمین (شکل الف) را می‌توان مطابق شکل (ب) مدل‌سازی کرد. همان‌طور که دیده می‌شود نیروی خالصی (نیروی وزن) همواره بر ماهواره وارد می‌شود. چگونه امکان دارد با وجود وارد شدن این نیرو به ماهواره، انرژی جنبشی آن ثابت بماند؟

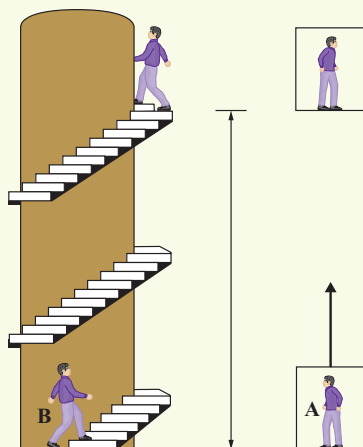


(الف)

۲-۴ کار و انرژی پتانسیل

۱۰ آیا انرژی جنبشی یک جسم می‌تواند منفی باشد؟ انرژی پتانسیل گرانشی یک سامانه چطور؟ توضیح دهید.

۱۱ دو شخص هم جرم A و B به طبقه سوم ساختمانی می‌روند. شخص A با آسانسور و شخص B به آرامی از پله‌های ساختمان بالا می‌روند. گزاره‌های درست را با ذکر دلیل مشخص کنید.



الف) در طبقه سوم، انرژی پتانسیل گرانشی (نسبت به زمین) شخص A از شخص B کمتر است، زیرا آرام‌تر بالا رفته است.

ب) انرژی پتانسیل گرانشی (نسبت به زمین) شخص A کمتر از شخص B است، زیرا برای رسیدن به طبقه سوم ساختمان مسافت کمتری پیموده است.

پ) کار نیروی وزن برای هر دو شخص در طول مسیر یکسان است.

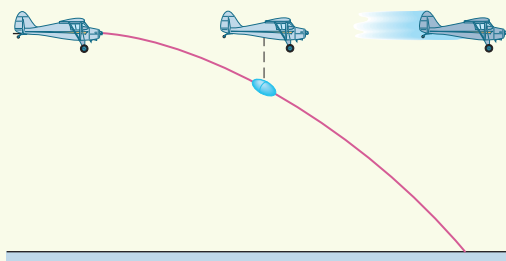
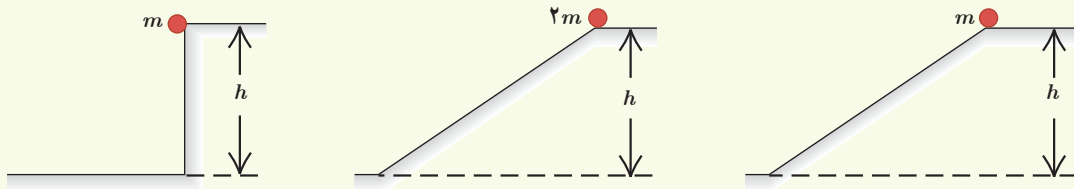
ت) انرژی پتانسیل گرانشی هر دو شخص در طبقه سوم ساختمان یکسان است.

۲-۵ و ۶- پایستگی انرژی مکانیکی و کار و انرژی درونی

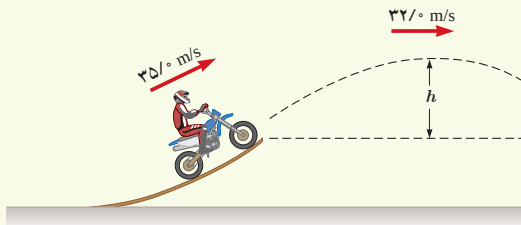
۱۲ در سه شکل زیر اجسامی از حالت سکون و ارتفاع h نسبت به سطح افق رها می‌شوند و نیروی اصطکاک و مقاومت هوا بر آنها وارد نمی‌شود. در کدام حالت، جسم

(الف) بیشترین تندی را هنگام رسیدن به سطح افقی دارد؟

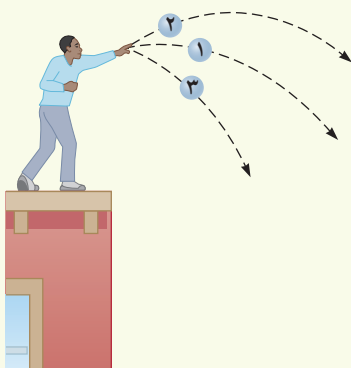
(ب) تا هنگام رسیدن به پایین مسیر، بیشترین مقدار کار نیروی وزن روی آن انجام شده است؟



۱۳ در شکل روبه‌رو هواپیمایی که در ارتفاع 225m از سطح زمین و با تندی 198km/h پرواز می‌کند، بسته‌ای را برای کمک به آسیب دیدگان زلزله رها می‌کند. تندی بسته هنگام برخورد به زمین چقدر است؟ (از تأثیر مقاومت هوا روی حرکت بسته چشم‌پوشی کنید.)



۱۴ موتورسواری از انتهای سکویی مطابق شکل روبه‌رو، پرشی را با تندی 35m/s انجام می‌دهد. اگر تندی موتورسوار در بالاترین نقطه مسیرش به 32m/s برسد، ارتفاع h را پیدا کنید. اصطکاک و مقاومت هوا را در طول مسیر حرکت موتورسوار نادیده بگیرید.



۱۵ سه توپ مشابه، از بالای ساختمانی با تندی یکسانی پرتاب می‌شوند (شکل روبه‌رو). توپ (۱) در امتداد افق، توپ (۲) با زاویه‌ای بالاتر از امتداد افق و توپ (۳) با زاویه‌ای پایین‌تر از امتداد افق پرتاب می‌شود. با نادیده گرفتن مقاومت هوا، انرژی جنبشی توپ‌ها را هنگام برخورد با سطح زمین، با یکدیگر مقایسه کنید.

۱۶ گلوله‌ای به جرم 45g از دهانه تفنگی با تندی $1/22\text{km/s}$ و ارتفاع $1/62\text{m}$ از سطح زمین شلیک می‌شود. اگر گلوله با تندی 425km/s به زمین برخورد کند،

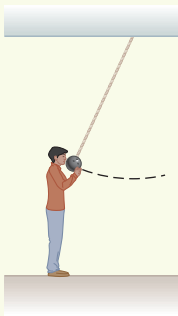
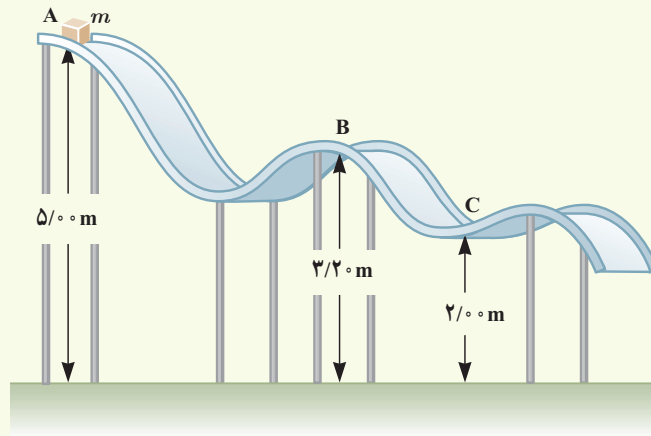
(الف) در مدت حرکت گلوله کار نیروی مقاومت هوا چقدر است؟

(ب) مقدار به‌دست آمده در قسمت (الف) را با کار نیروی وزن مقایسه کنید.

۱۷ جسمی به جرم $m = ۱۲/۵ \text{ kg}$ در نقطه A از حالت سکون رها می‌شود و در مسیری بدون اصطکاک سُر می‌خورد (شکل زیر). تعیین کنید:

الف) تندی جسم را در نقطه B

ب) کار نیروی گرانشی را در حرکت جسم از نقطه A تا نقطه C.



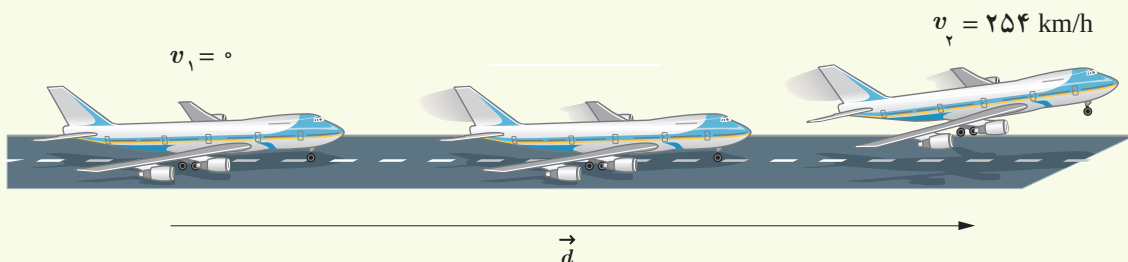
۱۸ شکل رویه‌رو گلوله‌ای را نشان می‌دهد که از سقف کلاسی آویزان شده و دانش‌آموزی آن را از وضعیت تعادل خارج کرده و در برابر نوک بینی خود گرفته است. الف) وقتی دانش‌آموز گلوله را رها می‌کند هنگام برگشت به او برخورد نمی‌کند. چرا؟ (این تجربه ساده ولی هیجان‌انگیز را در صورت امکان در کلاستان انجام دهید). ب) اگر دانش‌آموز هنگام رها کردن گلوله، آن را هل دهد، هنگام برگشت آن، چه اتفاقی می‌افتد؟

۲-۲ توان

۱۹ بالابری با تندی ثابت، باری به جرم $۶/۸۰ \times ۱۰^۲ \text{ kg}$ را در مدت ۱۸۶ s تا ارتفاع $۷۸/۴ \text{ m}$ بالا می‌برد. اگر جرم بالابر $۳/۲۰ \times ۱۰^۲ \text{ kg}$ باشد، توان متوسط موتور آن چند وات و چند اسب بخار است؟

۲۰ شخصی به جرم $۷۸/۵ \text{ kg}$ ، در مدت زمان $۸۴/۰ \text{ s}$ از تعداد ۵۰ پله بالا می‌رود. توان متوسط مفید او چند وات است؟ ارتفاع هر پله را $۲۸/۵ \text{ cm}$ فرض کنید.

۲۱ شکل زیر هواپیمایی به جرم $۷/۲۰ \times ۱۰^۴ \text{ kg}$ را نشان می‌دهد که از حال سکون شروع به حرکت می‌کند و پس از $۲/۰۵ \times ۱۰^۲ \text{ m}$ جابه‌جایی در امتداد باند هواپیما، به تندی برخاستن $v_p = ۲۵۴ \text{ km/h}$ می‌رسد.



الف) کار کل نیروهای وارد بر هواپیما را در این جابه‌جایی حساب کنید.

یک دقیقه پس از برخاستن، هواپیما تا ارتفاع ۵۶۵m از سطح زمین اوج می‌گیرد و تندی آن به ۳۲۸km/h می‌رسد. در این مدت،

ب) کار نیروی وزن چقدر است؟

پ) به جز نیروی وزن، چه نیروهای دیگری بر هواپیما اثر می‌کند (با این نیروها در علوم سال ششم آشنا شدید)؟ کار کدام یک از این نیروها مثبت و کار کدام یک از آنها منفی است؟

ت) کار کل نیروهای وارد بر هواپیما چقدر است؟

ث) توان کل انجام کار توسط نیروهای غیر از وزن را بیابید.

۲۲ سالانه نزدیک به ۱۲۵ میلیارد لیتر مواد و فراورده‌های نفتی از طریق حدود $1/40 \times 10^4$ km خطوط لوله در نقاط مختلف کشور توزیع می‌شود. این خطوط در طول مسیر خود از مراکز انتقال متعددی می‌گذرند تا توان لازم را برای ادامه راه به دست آورند. شکل زیر یکی از این مراکز را نشان می‌دهد که در ارتفاع $2/05 \times 10^3$ m از سطح دریای آزاد قرار دارد. در این مرکز، در هر ثانیه یک متر مکعب مواد نفتی از طریق لوله‌ای با قطر ۳۲/۰ اینچ (۸۱/۲cm) توسط دو دستگاه پمپ (تلمبه) تا ارتفاع $2/70 \times 10^3$ m از سطح دریای آزاد فرستاده می‌شود. اگر بازده هر یک از پمپ‌های این مرکز ۲۸ درصد باشد^۱ توان هر یک از آنها بر حسب مگاوات (MW) و اسب بخار (hp) چقدر است؟ (چگالی مواد نفتی را $8/60 \times 10^2$ kg/m^۳ بگیرید.)



مرکز انتقال نفت گندم‌کار، یکی از ۷ مرکزی است که در مسیر مارون — اصفهان قرار دارد. این مسیر، که طولی برابر ۴۳۱ کیلومتر دارد دومین مسیر سخت و صعب‌العبور خطوط انتقال مواد نفتی در دنیاست.

۱ — بخش زیادی از انرژی پمپ‌ها، صرف غلبه بر چسبندگی زیاد مواد نفتی با جداره داخلی لوله‌های انتقال می‌شود.



ویژگی‌های فیزیکی مواد



چرا آب روی گلبرگ‌ها و برگ‌های نیلوفر آبی (نیلوفرهایی که در آب رشد می‌کنند) به صورت قطره‌های ریز و درشتی درمی‌آید؟

آشنایی با ویژگی‌های فیزیکی مواد در تمام شاخه‌های علوم، مهندسی و پزشکی اهمیت زیادی دارد. مطالعه هر یک از حالت‌های ماده، منجر به کاربردهای فراوانی در فناوری، صنعت و زندگی روزمره شده است. شاره‌ها (واژه‌ای که برای مایع‌ها و گازها به کار می‌بریم) در بسیاری از جنبه‌های زندگی ما نقش مهمی دارند. جامدها بخش بزرگی از محیط فیزیکی پیرامون ما را می‌سازند و آنها را به هر شکلی که بخواهیم در می‌آوریم. خورشید، که به زمین نور و گرما می‌بخشد، از حالت چهارم ماده به نام پلاسما ساخته شده است.

در این فصل ضمن آشنایی با برخی از ویژگی‌های فیزیکی سه حالت آشنای ماده، نگاهی به نیروهای بین مولکولی و ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو خواهیم داشت. پس از آن فشار در شاره‌ها، شناوری، اصل ارشمیدس و اصل برنولی را به همراه برخی از کاربردهای آنها بررسی می‌کنیم.

۱-۳ حالت های ماده

سال های قبل در درس علوم دیدید که به هر چیزی که فضا را اشغال کند (حجم داشته باشد) ماده می گوئیم. مواد از ذره های ریزی به نام اتم یا مولکول ساخته شده اند. اندازه اتم ها حدود یک تا چند انگستروم ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$) است و اندازه مولکول ها به این بستگی دارد که از چند اتم ساخته شده باشند. اندازه برخی از درشت مولکول ها، مانند بسپارها (پلیمرها)، می تواند تا ۱۰۰۰ انگستروم نیز باشد. ذره های سازنده مواد همواره در حرکت اند و به یکدیگر نیرو وارد می کنند. حالت ماده به چگونگی حرکت این ذره ها و اندازه نیروی بین آنها بستگی دارد.

جامد، مایع و گاز سه حالت (فاز) آشنای ماده هستند^۱ که در این فصل به بررسی برخی از ویژگی های فیزیکی آنها خواهیم پرداخت. حالت چهارم ماده، پلازما نامیده می شود که اغلب در دماهای خیلی بالا به وجود می آید. ماده درون ستارگان و بیشتر فضای بین ستاره ای، آذرخش، شفق های قطبی، آتش و ماده داخل لوله تابان لامپ های مهتابی از پلازما تشکیل شده است (شکل ۱-۳).

جامد: هزاران سال است که بشر از مواد جامد بهره می گیرد. اصطلاح های عصر حجر، عصر برنز، و عصر آهن اهمیت مواد جامد را در توسعه تمدن های پیشین نشان می دهد. تجربه روزمره نشان می دهد که جسم جامد، حجم و شکل معینی دارد. ذرات جسم جامد به سبب نیروهای الکتریکی که به یکدیگر وارد می کنند در کنار یکدیگر می مانند. این ذرات در مکان های معینی نسبت به یکدیگر قرار دارند و در اطراف این مکان ها، نوسان های بسیار کوچکی دارند.

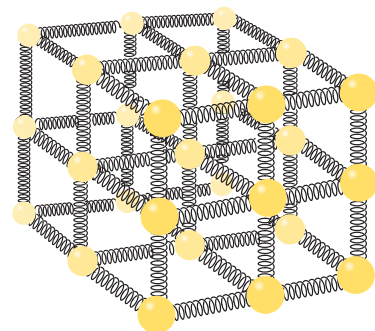
وقتی جامدی مانند یک تکه آهن، گرم می گردد محدوده و دامنه این نوسان ها بیشتر می شود و جسم جامد منبسط می شود. برای درک بهتر ساختار جسم جامد، معمولاً مدلی مطابق شکل ۲-۳ ارائه می دهند و فرض می کنند که ذرات آن توسط فنرهایی به یکدیگر متصل اند. اگر این ذرات نسبت به وضعیت تعادل، به هم نزدیک تر یا از هم دورتر شوند، نیروی کشسانی بین فنرها آنها را به وضع تعادل بر می گرداند و جسم جامد، شکل و اندازه اولیه اش را حفظ می کند.

اتم های برخی از جامدها در طرح های منظمی مانند شکل های ۳-۳-الف کنار هم قرار می گیرند. جامدهایی را که در یک الگوی سه بعدی تکرار شونده از این واحدهای منظم ساخته می شود **جامد بلورین** می نامیم. فلزها، نمک ها، الماس، یخ و بیشتر مواد معدنی جزو جامدهای بلورین اند. وقتی مایعی را به آهستگی سرد کنیم اغلب جامدهای بلورین تشکیل می شوند. در این فرایند سردسازی آرام، ذرات سازنده مایع فرصت کافی دارند تا در طرح های منظم خود را مرتب کنند.

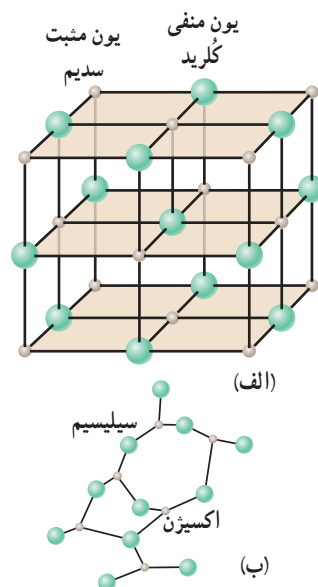
ذرات سازنده **جامدهای بی شکل (آمورف)** برخلاف جامدهای بلورین، در طرح های منظمی کنار هم قرار ندارند. وقتی مایعی به سرعت سرد شود معمولاً جامد بی شکل به وجود می آید. در این فرایند سردسازی سریع، ذرات فرصت کافی ندارند تا در طرحی منظم، مرتب شوند. بنابراین در طرح نامنظمی که در حالت مایع داشتند باقی می مانند. شیشه، مثالی از یک جامد بی شکل است (شکل ۳-۳-ب).



شکل ۱-۳ چهار حالت ماده در این تصویر وجود دارد. یخ (جامد)، آب (مایع)، هوا (گاز) و خورشید (پلازما)



شکل ۲-۳ مدلی از ساختار یک جامد فلزی که از میلیاردها میلیارد بخش، مانند این تشکیل شده است.



شکل ۳-۳ (الف) ساختار بلورین NaCl، که در آن یون های سدیم و یون های کلرید به صورت یک در میان در گوشه های یک مکعب قرار گرفته اند. (ب) ذرات سازنده یک جامد بی شکل، مانند شیشه که در طرحی نامنظم در کنار هم قرار گرفته اند.

۱- در این کتاب تمایزی بین فاز (phase) و حالت (state) ماده قائل نشده ایم.



قلم‌زنی یکی از هنرهای صنعتی ایران و با قدمتی چندین هزار ساله است. تحقیق کنید صنعتگران قلم‌زن، چگونه از شُل و سفت شدن قیر کمک می‌گیرند تا بدون سوراخ شدن فلز، بر روی آن نقش و نگارهای متنوعی ایجاد کنند.



شکل ۳-۴ ذرات سازندهٔ جوهر به تدریج در آب پخش می‌شوند.



شکل ۳-۵ طرحی از حرکت نامنظم و کاتوره‌ای یک مولکول آب

مایع: مولکول‌های مایع نظم و تقارن جامدهای بلورین را ندارند و به صورت نامنظم و نزدیک به یکدیگر قرار گرفته‌اند. مایع به راحتی جاری می‌شود و به شکل ظرف خودش در می‌آید. فاصلهٔ ذرات سازندهٔ مایع و جامد تقریباً یکسان و در حدود یک آنگستروم است.

پدیدهٔ پخش در مایع‌ها: اگر مقداری نمک را در یک لیوان آب بریزید، پس از مدتی آب، شور می‌شود. اگر چند قطره جوهر را به آب درون لیوانی اضافه کنید، به تدریج رنگ آب تغییر می‌کند (شکل ۳-۴). تجربه‌های ساده‌ای مانند این، نشان می‌دهند که ذرات سازندهٔ نمک و جوهر در آب درون لیوان پخش شده‌اند. دلیل پخش ذرات نمک و جوهر در آب، به حرکت مولکول‌های آب مربوط می‌شود. در واقع به دلیل حرکت‌های نامنظم و کاتوره‌ای (تصادفی) مولکول‌های آب (شکل ۳-۵) و برخورد آنها با ذرات سازندهٔ نمک و جوهر، این گونه مواد در آب پخش می‌شوند.

خوب است بدانید



بلورهای مایع موادی هستند که ویژگی‌های فیزیکی آنها چیزی بین خواص مایع‌ها و بلورهای جامد است. این بلورها در سال ۱۸۸۸ میلادی توسط گیاه‌شناس و شیمی‌دان اتریشی به نام فردریک رینیتزر^۱ کشف شدند. شناخت رفتار فیزیکی بلورهای مایع تا دهه‌ها سال پس از کشف، برای دانشمندان کار ساده‌ای نبود. وقتی بلور مایعی بین دو لایهٔ شفاف شیشه‌ای باشد در شرایط معمولی، مولکول‌های آن به صورت نسبتاً منظم، در یک صف قرار گرفته‌اند و نور را به خوبی از خود عبور می‌دهند. اما وقتی یک جریان ضعیف الکتریکی از آن می‌گذرد، مولکول‌های بلور مایع نظم ذاتی خود را از دست می‌دهند و محفظه بلور تیره‌رنگ می‌شود. اگر جریان الکتریکی تنها از برخی از قسمت‌های بلور عبور کند تنها همان قسمت‌ها تیره‌رنگ می‌شوند. در اوایل دههٔ ۱۹۷۰ میلادی اولین دسته از بلورهای مایع پایدار به صورت تجاری ساخته و از آن در تولید صفحه‌های نمایشگرهای بلور مایع (LCD) استفاده شد. در سال ۱۹۹۱ میلادی پیر ژیل دو ژن، فیزیک‌دان فرانسوی به خاطر تحقیقاتش در یافتن روش‌های استفاده از بلورهای مایع، جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد. بخش کوچکی از کاربردهای بلور مایع در ابزارهای نشان داده شده در شکل روبه‌رو آمده است.

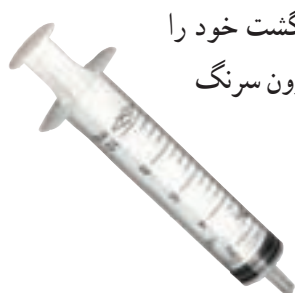
۱- Friedrich Reinitzer (1827-1927)

گاز: ماده‌ای است که شکل مشخصی ندارد. اتم‌ها و مولکول‌های آن آزادانه و با تندی بسیار زیاد به اطراف حرکت و با یکدیگر و با دیواره‌های ظرفی که در آن قرار دارند برخورد می‌کنند^۱. فاصله میانگین مولکول‌های گاز در مقایسه با اندازه آنها، خیلی بیشتر است. مثلاً اندازه مولکول‌های هوا بین ۱ تا ۳ آنگستروم است در حالی که فاصله میانگین آنها در شرایط معمولی در حدود $35\text{\AA}$ است (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶ حرکت نامنظم ذرات گاز درون یک بادکنک

فعالیت ۲-۳

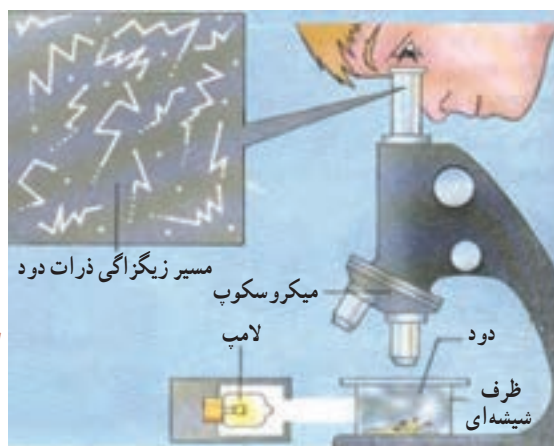


یک سرنگ، مثلاً 10° سی سی، اختیار کنید. پیستون آن را بکشید تا هوا وارد سرنگ شود. انگشت خود را محکم روی دهانه خروجی سرنگ قرار دهید و تا جایی که می‌توانید پیستون را حرکت دهید تا هوای درون سرنگ متراکم شود.

هوای درون سرنگ را خالی و آن را تا نیمه از آب پر کنید. با مسدود نمودن انتهای سرنگ سعی کنید تا جایی که ممکن است مایع درون آن را متراکم کنید. از این آزمایش ساده چه نتیجه‌ای در مورد تراکم پذیری گازها و مایع‌ها می‌گیرید؟ توضیح دهید.

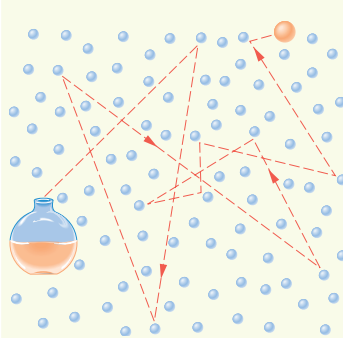
حرکت براونی: شکل ۳-۷ ظرفی شیشه‌ای محتوی ذرات دود را نشان می‌دهد که پرتوهای نور به آن می‌تابد. اگر با میکروسکوپ درون ظرف محتوی دود را مشاهده کنیم دیده می‌شود که ذره‌های دود به‌طور نامنظم و درهم و برهم و در یک مسیر زیگزاگی حرکت می‌کنند. این حرکت نامنظم و کاتوره‌ای ذرات دود را **حرکت براونی** می‌نامند.

مشاهده بیشتر توسط میکروسکوپ نشان می‌دهد که ذره‌های دود برخورد‌های اندکی با یکدیگر دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت باید ذرات دیگری که قابل مشاهده نیستند با آنها برخورد کرده و مسیر حرکت آنها را تغییر داده باشند. این ذره‌های مشاهده‌ناپذیر، همان مولکول‌های هوا هستند. حرکت زیگزاگی و نامنظم ذره‌های دود نشانگر این است که مولکول‌های هوا به صورت کاتوره‌ای و نامنظم در حرکت‌اند.



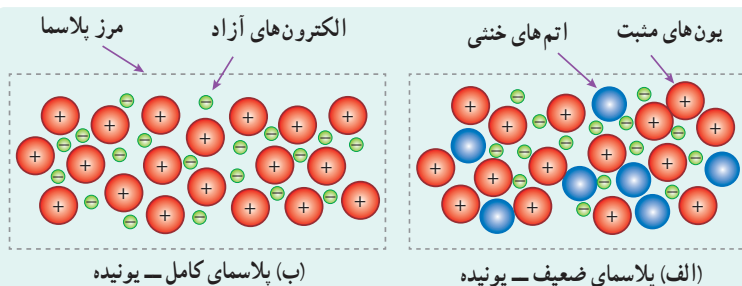
شکل ۳-۷ آزمایشی برای مشاهده حرکت براونی ذرات دود درون یک ظرف شیشه‌ای

۱- تندی مولکول‌های هوا در دمای اتاق حدود 500 m/s است.



الف) وقتی در شیشه عطری را در گوشه‌ای از اتاق باز می‌کنید، پس از چند ثانیه ذرات عطر در همه جای اتاق پخش و بوی آن حس می‌شود. با توجه به شکل روبه‌رو این پدیده را چگونه توجیه می‌کنید؟ چرا پدیده پخش در گازها سریع‌تر از مایع‌ها رخ می‌دهد؟
 ب) هوای اطراف کره زمین، آمیزه‌ای از نیتروژن (۷۸ درصد)، اکسیژن (۲۱ درصد)، کربن دی‌اکسید، بخار آب و مقدار کمی گازهای بی‌اثر (کریپتون، نئون و هلیم) است. این مولکول‌ها به طور کاتوره‌ای و با تندی زیاد همواره در حرکت‌اند. برخورد مولکول‌های هوا به یکدیگر سبب پخش آنها می‌شود. اهمیت این پدیده را برای حیات روی کره زمین توضیح دهید.

خوب است بدانید



اگر این مطلب را زیر نور لامپ مهتابی می‌خوانید برای یافتن پلاسما لازم نیست راه دوری بروید. ماده داخل لوله تابان لامپ مهتابی، پلاسماست. وقتی گازی تا دماهای خیلی زیاد (چندین هزار درجه سلسیوس به بالا) گرم شود،

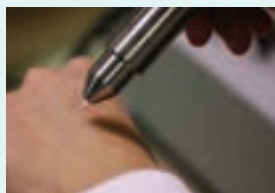
یک یا چند الکترون از هر اتم آزاد می‌شود. ماده حاصل، مجموعه‌ای از الکترون‌های آزاد، یون‌ها و اتم‌های خنثی خواهد بود. این حالت یونیده و شبه خنثای ماده، که حاوی مقادیر مساوی از بارهای مثبت و منفی است، پلاسما نامیده می‌شود که معمولاً از آن به عنوان حالت چهارم ماده نیز یاد می‌کنند (شکل‌های الف و ب).

قسمت عمده‌ای از جهان قابل مشاهده، از پلاسما تشکیل شده است. خورشید، ستارگان و بیشتر فضای بین ستاره‌ای، برخی از لایه‌های بالایی جو زمین، آذرخش، شفق‌های قطبی و شعله‌های آتش از جنس پلاسما هستند. پلاسما به طور طبیعی روی زمین به ندرت یافت می‌شود. در انفجارهای هسته‌ای و شیمیایی، راکتورهای همجوشی هسته‌ای و ... پلاسما را می‌توان به طور مصنوعی ایجاد کرد. افزون بر اینها پلاسمای درون لامپ‌های نئون و مهتابی (حاوی گازهای جیوه و آرگون)، که بر اثر تخلیه الکتریکی تابش می‌کند، سال‌هاست به عنوان چشمه‌های نور در زندگی روزمره ما به کار می‌روند.

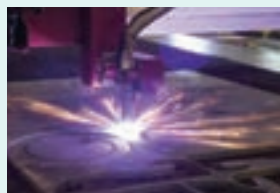
پلاسما، برخلاف گاز، رسانای بسیار خوب الکتریسیته و گرماست. بین ذرات پلاسما نیروی الکتریکی وجود دارد. ماهیت بلند بُرد بودن این نیرو، در رفتار پلاسما نقش مهمی ایفا می‌کند. توجه به ویژگی‌های خاص پلاسما و بهره‌مندی از آن، سبب کاربردهای فراوانی در صنعت، فناوری، پزشکی، دندانپزشکی و ... شده است. از جمله این کاربردها می‌توان به نمایشگرهای صفحه تخت، ابزارهای جوش، برش و سوراخ کاری، چشمه‌های نور و مبدل‌های انرژی، سوزن‌های پلاسمایی و ... اشاره کرد (شکل‌های زیر). در چند دهه اخیر، فیزیک پلاسما به یکی از رشته‌های روبه رشد و پرکاربرد فیزیک تبدیل شده است.



کاربرد پلاسما در دندانپزشکی



کاربرد پلاسما در پزشکی



برش کاری با پلاسما

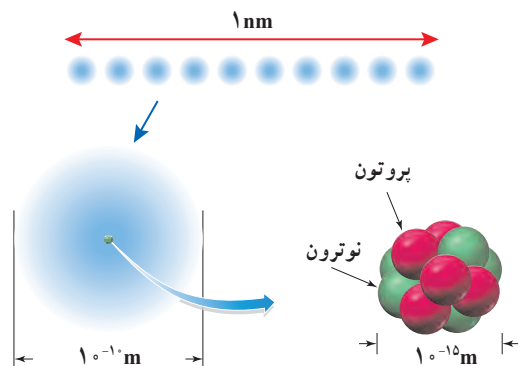


جوشکاری با پلاسما

۲-۳ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو

علم نانو یکی از شاخه‌های جدید علوم است که به دلیل تأثیر شگرفی که در فناوری ایفا می‌کند از توجه روزافزونی در دنیای امروز برخوردار است. ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. در این بخش می‌کشیم تا شما را با مبانی این علم و همچنین کاربردهای آن در فناوری و زندگی آشنا سازیم.

پیشوند نانو از واژه‌ای یونانی به معنای کوتوله^۱ گرفته شده و به معنای یک میلیاردم است. پس یک نانومتر (۱nm) برابر یک میلیاردم متر یا 10^{-9} متر است. برای اینکه تصویری از این مقیاس داشته باشید، می‌توان گفت طول ده اتم کربن در کنار یکدیگر، تقریباً برابر با یک نانومتر است. (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸ ابعاد هسته اتم کربن در حدود یک فمتومتر، قطر اتم کربن در حدود یک انگستروم و طول 10^9 اتم کربن که کنار هم قرار گرفته باشند حدود یک نانومتر است.

تمرین ۱-۳

در مکعبی به ابعاد یک نانومتر، چه تعداد اتم را می‌توان جای داد؟ اگر ابعاد مکعب 10^9 نانومتر باشد چطور؟ قطر هر اتم را $10^{-10} \times 10^9$ فرض کنید.

حال این پرسش مطرح می‌شود که چرا نام یک شاخه علم که در تمام علوم دیگر کاربرد دارد باید با پیشوند نانو آغاز شود؟ چه چیز ویژه‌ای در مورد این مقیاس طول وجود دارد؟ برای یافتن پاسخ ابتدا به موضوع زیر توجه کنید.

نقطه ذوب طلا (1064°C) را می‌توان در هر کتاب مرجع مربوط به فلزها پیدا کرد و درستی آن را با قرار دادن یک قطعه طلا در کوره‌ای با دمای بالا تأیید کرد. وقتی دما به 1064°C می‌رسد طلای جامد تغییر حالت می‌دهد و به شکل توده‌ای از طلای مایع درمی‌آید. اگر این آزمایش را دوباره انجام دهیم، ولی به جای یک قطعه بزرگ طلا، که می‌توانیم آن را ببینیم و به راحتی لمس کنیم، قطعه‌ای را که قطر آن تنها چند نانومتر است در کوره بگذاریم و ذوب کنیم (بدیهی است برای انجام این کار به تجهیزات و روش‌های خاص نیاز داریم، اما شدنی است) با شگفتی درمی‌یابیم که دمای ذوب طلا فقط 427°C است. آیا اشتباه کرده‌ایم؟ آزمایش‌های بیشتر نشان می‌دهند که اشتباهی رخ نداده است. با این آزمایش در واقع در می‌یابیم که دمای ذوب ذره‌های طلا در مقیاس نانو، تفاوت زیادی با دمای ذوب طلا در اندازه‌های معمولی دارد.

ریچارد فاینمن



(۱۹۸۸-۱۹۱۸ میلادی)، یکی از فیزیک‌دانان مشهور قرن بیستم است که در آمریکا به دنیا آمد. وی در سال ۱۹۶۵ جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد. کتاب‌های درسی و فیلم‌های سخنرانی فاینمن بسیار مشهورند و چشم‌انداز خوبی را در بیشتر زمینه‌های فیزیک، در اختیار مخاطبانش قرار می‌دهند. مورخان علم باور دارند علوم و فناوری

در مقیاس نانو، در سال ۱۹۵۹ میلادی شروع شد، زمانی که فاینمن یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی در پایین وجود دارد»، در انجمن فیزیک آمریکا ایراد کرد. فاینمن به مفهوم مقیاس‌بندی علاقه‌مند بود و در این سخنرانی‌ها مجسم کرد که یک بیت اطلاعات را می‌توان در یک نانو فضا (به‌طور دقیق خوشه‌ای از ۱۲۵ اتم) ذخیره کرد، که در آن زمان پیش‌بینی بسیار مهم و بی‌نهایت جسورانه‌ای بود. فاینمن برآورد کرد که در آن مقیاس از کوچک‌سازی، همه کتاب‌هایی که در طول تاریخ نوشته شده‌اند را می‌توان در مکعبی به ضلع $1/2$ میلی‌متر، ذخیره کرد (همان‌گونه که از عنوان سخنرانی او پیداست). فاینمن همچنین در سخنرانی خود، پیش‌بینی کرد که با کوچک شدن مواد تا گستره مقیاس نانو، رفتار آنها تغییر می‌کند به طوری که می‌توان این تغییر رفتار را به یک مزیت تبدیل کرد. او در پایان سخنرانی‌اش می‌گوید: «من از بیان پرسش‌هایی باکی ندارم. آیا می‌توانیم اتم‌ها را تا کوچک‌ترین مقیاس به ترتیب دلخواه همان مرتب کنیم؟»

به نظر شما چرا در کتاب‌های مرجع دمای ذوب طلا را 1064°C ذکر کرده‌اند؟

به کمک مثالی که زدیم می‌توان گفت علوم نانو، شاخه‌ای از علوم است که تغییر در ویژگی‌های فیزیکی مواد را در مقیاس نانو بررسی می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی هر ماده‌ای، مانند نقطه ذوب طلا، با کم شدن اندازه آن تقریباً ثابت می‌ماند. اما اگر اندازه آن ماده به مقیاس نانو کاهش یابد (بسته به نوع ماده و ویژگی فیزیکی مورد اندازه‌گیری، این اندازه می‌تواند حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد) چه اتفاقی می‌افتد؟ ویژگی‌های فیزیکی مواد از قبیل: نقطه ذوب، رسانندگی الکتریکی و گرمایی، شفافیت، استحکام، رنگ و... اغلب می‌تواند به طور چشمگیری در مقیاس نانو تغییر کند. فناوری نانو در واقع از ویژگی‌های خاصی از مواد بهره‌برداری می‌کند که در مقیاس نانو تغییر می‌کنند. تاکنون دستاوردهای بسیار مهمی در این زمینه حاصل شده است.

نکته مهمی که باید توجه داشت این است که ویژگی‌های فیزیکی تمام مواد، شامل جامدها، مایع‌ها و گازها، در مقیاس نانو تغییر می‌کنند. به علاوه، لازم نیست که همه ابعاد یک ماده در مقیاس نانو باشند. برای نمونه، یک نانو ذره (مانند ذره‌های کوچک طلا با دمای ذوب کم که پیش از این توصیف شدند) در هر سه بُعد کوچک است، اما اگر صرفاً یک بُعد ماده‌ای را در مقیاس نانو محدود کنیم در این صورت یک نانو لایه داریم که لایه‌ای به ضخامت نانو مقیاس است. آزمایش نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی نانو لایه‌ها نیز همچون نانو ذره‌ها، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

مثال مفهومی ۱-۳



سیم‌های آلومینیمی که روی هم پیچیده شده‌اند.

آلومینیم یکی از رساناهای بسیار خوب جریان الکتریکی است. سطح آلومینیم، چه به صورت سیم، قوطی نوشابه یا بال هواپیما باشد، در مجاورت هوا به آلومینیم اکسید تبدیل می‌شود. از آنجا که آلومینیم اکسید، عایق بسیار خوبی است و رسانای الکتریسیته نیست پس چرا وقتی دو سیم آلومینیمی را مطابق شکل روبه‌رو به هم وصل می‌کنیم، جریان الکتریکی از یک سیم به سیم دیگر جریان می‌یابد؟

پاسخ: برای پاسخ به این پرسش باید به ضخامت لایه‌ای توجه کنیم که روی سطح آلومینیم تشکیل می‌شود. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که وقتی قطعه‌ای آلومینیمی در مجاورت هوا قرار می‌گیرد لایه‌ای بسیار نازک از اکسید آلومینیم روی سطح آن تشکیل می‌شود که ضخامت آن از مرتبه نانومتر است. در این مقیاس، ویژگی‌های الکتریکی اکسید آلومینیم تغییر می‌کند و به یک رسانا تبدیل می‌شود. بنابراین هنگام اتصال دو سیم آلومینیمی، الکترون‌ها به طور آزادانه از یک سیم به سیم دیگر می‌روند. به عبارت دیگر، اکسید آلومینیم در مقیاس نانو، به دلیل ابعاد و شکل هندسی‌اش، مانند یک رسانا عمل می‌کند نه عایق!

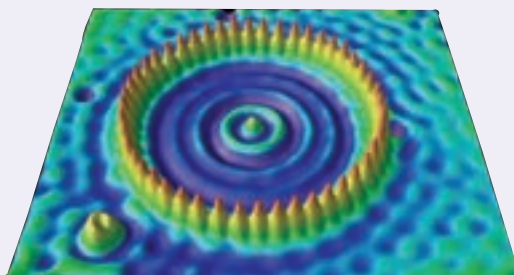
۱- یاقوت سرخ نام دیگر آلومینیم اکسید است که یکی از سنگ‌های باارزش در جواهرسازی است.

فعالیت ۳-۳

علوم و فناوری نانو دستاوردهای فراوانی در عرصه‌های مختلف، از جمله: پزشکی و داروسازی، رایانه‌ها، ذخیره‌سازی داده‌ها و گوشی‌های تلفن همراه، صنایع هواپیماسازی و خودروسازی، پوشاک، خوردنی‌ها و... داشته است. تأثیر علوم نانو را در یکی از این حوزه‌ها در گروه خود، به عنوان موضوع تحقیق انتخاب کرده و نتیجه تحقیق را به کلاس ارائه دهید.

فناوری و کاربرد

شکل الف یک میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ (AFM) را نشان می‌دهد که به میکروسکوپ‌های کاوشگر روبشی معروف‌اند. این میکروسکوپ‌ها در گسترش علوم و فناوری در مقیاس نانو، از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند و این امکان را فراهم می‌کنند که اجسام در مقیاس نانومتر مورد بررسی و استفاده قرار گیرند. اولین میکروسکوپ کاوشگر روبشی به نام میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی^۲ (STM) در سال ۱۹۸۲ میلادی توسط دو فیزیک‌دان سوئیسی اختراع شد که جایزه نوبل فیزیک ۱۹۸۶ را برای آنها به همراه آورد. میکروسکوپ‌های نیروی اتمی بر خلاف میکروسکوپ‌های STM که تنها برای مواد رسانا قابل استفاده هستند برای تمامی مواد شامل: رسانا، نارسانا و حتی مواد غوطه‌ور در یک محلول نیز به کار می‌روند. با AFM همانند STM می‌توان تصاویری از سطح یک جسم فراهم کرد (شکل ب). افزون بر این، AFM را می‌توان برای اندازه‌گیری نیروهای فوق‌العاده کوچک، از مرتبه نانونیوتون تا پیکونیوتون، مورد استفاده قرار داد.



(ب)



(الف)

۳-۳ نیروهای بین مولکولی

پیش از این با انجام فعالیت ۲-۳ دیدید که متراکم کردن آب درون سرنگ عملاً امکان‌پذیر نیست. برای توجیه پدیده‌هایی مشابه این، باید به نیروهای بین مولکولی در یک مایع توجه کنیم. به‌طور کلی، نیروهای بین مولکول‌های همسان مانند نیروهای بین مولکول‌های آب را نیروی **هم‌چسبی** می‌نامیم (شکل ۳-۹). وقتی سعی می‌کنیم فاصله بین مولکول‌های مایع را کم کنیم نیروی دافعه بزرگی بین آنها ظاهر می‌شود که از تراکم‌پذیری مایع جلوگیری می‌کند. همین‌طور وقتی مولکول‌های مایع را کمی از هم دور کنیم، نیروی جاذبه بین آنها ظاهر می‌شود. این جاذبه در قطره آب آویزان از شاخه درخت دیده می‌شود.

نیروهای بین مولکولی کوتاه‌برد هستند، یعنی وقتی فاصله بین مولکول‌ها چند برابر فاصله بین مولکولی شود، نیروهای بین مولکولی بسیار کوچک و عملاً صفر خواهند شد.

۱- Atomic Force Microscope (AFM)

۲- Scanning Tunneling Microscope (STM)

مولکول‌های آب به یکدیگر نیروی جاذبه وارد می‌کنند.

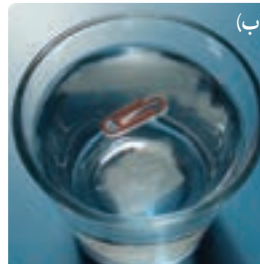


شکل ۳-۹ قطره‌های شبنمی که روی شاخ و برگ درختان در نور خورشید صبحگاهی می‌درخشند، نشانه‌ای از نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب است.

پرسش ۳-۳

وقتی شیشه می‌شکند با نزدیک کردن قطعه‌های آن به هم نمی‌توان اجزای شیشه را دوباره به هم چسباند؛ ولی اگر قطعه‌های شیشه را آن قدر گرم کنیم که نرم شوند می‌توان آنها را به هم چسباند. این پدیده‌ها را با توجه به کوتاه‌بودن نیروهای بین مولکولی توجیه کنید.

کشش سطحی: نشستن یا راه رفتن برخی حشره‌ها روی سطح آب (شکل ۳-۱۰ الف)، شناور ماندن گیره فلزی کاغذی روی سطح آب (شکل ۳-۱۰ ب) و تشکیل حباب‌های آب و صابون (شکل ۳-۱۰ پ) تنها نمونه‌هایی از وجود کشش سطحی هستند. کشش سطحی ناشی از هم‌چسبی مولکول‌های سطح مایع است و آن را می‌توان با نیروهای بین مولکولی توضیح داد. به دلیل نیروهای جاذبه‌ای که مولکول‌های سطح مایع به یکدیگر وارد می‌کنند سطح مایع شبیه یک پوسته تحت کشش رفتار می‌کند و کشش سطحی روی می‌دهد. با کشش سطحی همچنین می‌توان توضیح داد که چرا قطره‌هایی که آزادانه سقوط می‌کنند تقریباً کروی‌اند (شکل ۳-۱۰ ت). به ازای حجمی معین، کره نسبت به هر شکل هندسی دیگری، کوچک‌ترین مساحت سطح را دارد. به این ترتیب سطح قطره‌ای که آزادانه سقوط می‌کند مانند یک پوسته کشیده شده، تمایل به کمینه کردن مساحتش را دارد.



شکل ۳-۱۰ (الف) نشستن حشره روی سطح آب، (ب) قرارگرفتن گیره فلزی روی سطح آب، (پ) تشکیل حباب‌های آب و صابون و (ت) قطره‌های کروی آب در حال سقوط آزاد، جلوه‌هایی از کشش سطحی هستند.

فعالیت ۳-۴



(الف) سعی کنید یک سوزن ته گرد یا گیره کاغذ را مطابق شکل روی سطح آب شناور کنید. برای این منظور می‌توانید از یک تکه دستمال کاغذی استفاده کنید.

(ب) پس از شناور شدن سوزن یا گیره، سطح آب را به دقت مشاهده کنید و مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.

(پ) اکنون یکی دو قطره مایع شوینده را به آرامی به آب درون ظرف بیفزایید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش کنید و دلیلی برای آن ارائه دهید.

ترشوندگی: دیدیم که نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های یک ماده سبب بروز پدیده‌های جالبی می‌شود. هنگامی که دو ماده مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند نیز جاذبه مولکولی مشابهی بین مولکول‌های آنها ظاهر می‌شود که به آن **نیروی دگرچسبی** می‌گوییم. هم‌چسبی و دگرچسبی هر دو نیروهای بین مولکولی هستند. تفاوت آنها در این است که هم‌چسبی، جاذبه بین مولکول‌های همسان و دگرچسبی جاذبه بین مولکول‌های ناهمسان است.

هرگاه مایعی در تماس با جامدی قرار گیرد دو حالت می‌تواند رخ دهد. یکی اینکه دگرچسبی بین مولکول‌های مایع و جامد از هم‌چسبی بین مولکول‌های مایع بیشتر باشد. در این صورت می‌گوییم مایع، جامد را تر یا خیس می‌کند. مثلاً در شکل ۳-۱۱ الف می‌بینیم که آب، سطح شیشه تمیز را خیس کرده و روی آن پهن شده است. اما اگر نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های مایع از نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های مایع و جامد بیشتر باشد می‌گوییم مایع جامد را تر نمی‌کند. در شکل ۳-۱۱ ب می‌بینیم که سطح شیشه با جیوه خیس نشده و جیوه به شکل قطره روی سطح شیشه باقی مانده است (هرچه قطره بزرگ‌تر باشد نیروی گرانش زمین، آن را تخت‌تر می‌کند).



شکل ۳-۱۱ (الف) پخش آب روی سطح شیشه (ب) قطره‌ای شدن جیوه روی سطح شیشه

پرسش ۳-۴



شکل روبه‌رو خروج قطره‌های روغن با دمای متفاوت را از دهانه دو قطره‌چکان نشان می‌دهد.

(الف) توضیح دهید در کدام شکل دمای قطره‌های روغن کمتر است.

(ب) افزایش دما چه تأثیری بر نیروی هم‌چسبی مولکول‌های یک مایع می‌گذارد؟

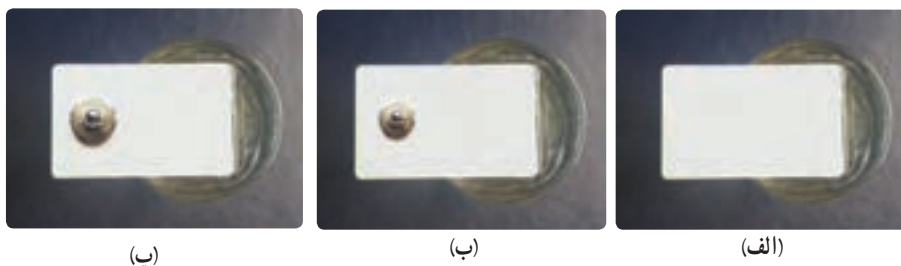
(پ) چرا هنگام شستن ظروف، افزون بر استفاده از مایع ظرف‌شویی، ترجیح می‌دهیم از آب گرم نیز استفاده کنیم؟

فعالیت ۳-۵

یک طرف یک تکه شیشه کوچک (با ابعادی حدود 10 cm در 10 cm) را کمی بالاتر از شعله یک شمع بگیرید تا سطح شیشه به طور کامل دوداندود شود. شیشه را از طرف تمیز آن روی سطحی افقی قرار دهید و سپس روی سطح دوداندود شده آن چند قطره آب بریزید. آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

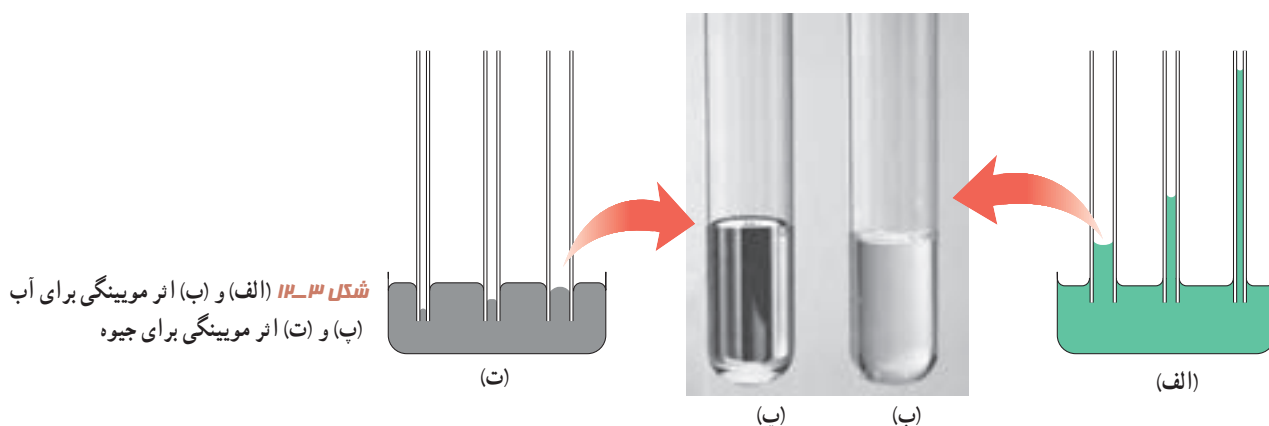
بار دیگر سطح شیشه را به جای دوداندود کردن، با روغن چرب کنید و آزمایش را تکرار کنید. مشاهده خود را توضیح دهید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید. (پس از بحث کافی در خصوص این فعالیت، دوباره به تصویر و پرسش شروع فصل بازگردید و پاسخی قانع‌کننده ارائه دهید.)

این فعالیت به شما کمک می‌کند تا درک بهتری از نیروی دگرچسبی به دست آورید. به این منظور از یک لیوان پر از آب، یک کارت بانکی و تعدادی وزنه چند گرمی یا سکه‌های پول استفاده کنید. ابتدا مطابق شکل الف، کارت را طوری روی لبه لیوان قرار دهید که تنها نیمی از آن با آب در تماس باشد. وزنه‌های چند گرمی را روی قسمتی از کارت قرار دهید که با آب در تماس نیست (ابتدا وزنه ۵ گرمی، سپس ۱۰ گرمی و...). نتیجه مشاهده خود را با توجه به مفاهیمی که تاکنون فرا گرفته‌اید توضیح دهید. یکی دو قطره مایع شوینده به آب اضافه کنید و آزمایش را تکرار کنید. نتیجه مشاهده خود را در گروه خود به بحث بگذارید.



اثر موینگی: لوله‌هایی که قطر داخلی آنها حدود یک دهم میلی‌متر ($1\text{ mm}/10 \sim$) باشد، معمولاً لوله موین نامیده می‌شوند. واژه موین به معنی «مُو مانند» است. آزمایش نشان می‌دهد اگر چند لوله موین شیشه‌ای و تمیز را وارد یک ظرف آب کنیم، آب در لوله‌های موین بالا می‌رود و سطح آن بالاتر از سطح آب ظرف قرار می‌گیرد. همچنین هرچه قطر لوله موین کمتر باشد ارتفاع ستون آب در آن بیشتر است. افزون بر اینها سطح آب در بالای لوله‌های موین فرورفته است.

اگر همین آزمایش‌ها را با جیوه انجام دهیم مشاهده می‌کنیم که جیوه در لوله‌های موین مقداری بالا می‌رود ولی سطح آن پایین‌تر از سطح جیوه ظرف قرار می‌گیرد. همچنین هرچه قطر لوله موین کمتر باشد ارتفاع ستون جیوه در آن کمتر است. افزون بر اینها سطح جیوه در لوله موین برآمده است. اثر موینگی در لوله‌های با قطر داخلی بزرگ‌تر از لوله‌های موین نیز قابل مشاهده است. شکل‌های ۱۲-۳ الف و ب، اثر موینگی را برای آب و شکل‌های ۱۲-۳ پ و ت اثر موینگی را برای جیوه، در چنین لوله‌هایی نشان می‌دهد.



برای توجیه فیزیکی تفاوت اثر موینگی آب و جیوه، باید به نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی توجه کرده و اندازه آنها را با یکدیگر مقایسه کنیم. آب تمایل به چسبیدن به دیواره‌های شیشه‌ای دارد زیرا نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های آب و مولکول‌های شیشه بیشتر از نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های آب است. در نتیجه آب سطح شیشه را خیس می‌کند و مانند شکل ۳-۱۲ الف در لوله بالا می‌رود. در مورد جیوه نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های جیوه و مولکول‌های شیشه کمتر از نیروی هم‌چسبی بین خود مولکول‌های جیوه است. در نتیجه جیوه سطح شیشه را خیس نمی‌کند و مانند شکل ۳-۱۲ ب سطح جیوه در لوله موین پایین‌تر از سطح جیوه درون ظرف قرار می‌گیرد.

فعالیت ۳-۷



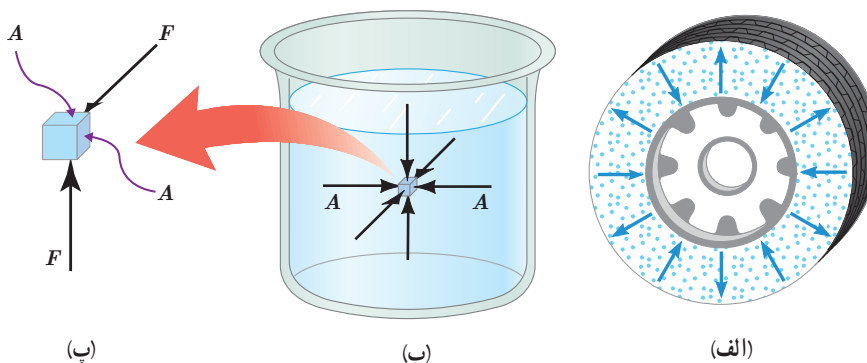
سازه‌های آبی شوشتر که از دوران هخامنشیان تا ساسانیان، جهت بهره‌گیری بیشتر از آب ساخته شده‌اند.

در ساختن دیوارهای ساختمان باید اثر موینگی در نظر گرفته شود، زیرا تراوش آب از منفذهای موین در این دیوارها می‌تواند سبب خسارت در داخل ساختمان شود. برای جلوگیری از این خسارت، دیوارهای داخل یا خارج ساختمان را معمولاً با مواد ناتراوا (مانند قیر) می‌پوشانند. تحقیق کنید در معماری سنتی ایران به جای قیراندود کردن، چگونه از نفوذ آب به داخل سازه‌ها جلوگیری می‌کردند.

۳-۴ فشار در شاره‌ها

وقتی شاره‌ای (مایع یا گاز) ساکن است، به هر سطحی که با آن در تماس باشد، مانند جداره یک ظرف یا سطح جسمی که در شاره غوطه‌ور است، نیرویی عمودی وارد می‌کند (شکل ۳-۱۳). این همان نیرویی است که وقتی پاهای خود را درون یک استخر آب تکان می‌دهید احساس می‌کنید که پاهای شما را فشار می‌دهد.

با وجود اینکه شاره به عنوان یک کل ساکن است، مولکول‌های آن در حال حرکت‌اند؛ نیرویی که توسط شاره وارد می‌شود ناشی از برخورد مولکول‌ها با اطراف آن است.



شکل ۳-۱۳ الف) برخورد مولکول‌های هوای درون لاستیک به سطح داخلی آن سبب ایجاد نیروی عمودی می‌شود. (ب) به هر نقطه از سطح جسم غوطه‌ور در شاره (آب) نیرویی عمودی وارد می‌شود. (پ) برای سادگی تنها نیروهای وارد بر دو سطح نشان داده شده است.

فشار P که به یک سطح فرضی A درون شاره وارد می‌شود به صورت نسبت اندازه نیروی عمودی وارد بر این سطح به مساحت آن تعریف می‌شود:

$$P = \frac{F}{A} \quad (۱-۳)$$

یکای SI فشار، پاسکال (Pa) است که در علوم سال نهم با آن آشنا شدید، به طوری که داریم:

$$۱\text{Pa} = ۱\text{N}/۱\text{m}^2$$

مثال ۲-۳



یک زیردریایی تفریحی در اعماق اقیانوسی به آرامی حرکت می‌کند (شکل روبه‌رو). این زیردریایی تعدادی پنجره کوچک دایره‌ای شکل به شعاع $۰/۴\text{m}$ دارد. اگر فشار آب در محل هر یک از این پنجره‌ها برابر $۹/۰ \times ۱۰^۵\text{Pa}$ باشد، بزرگی نیروی عمودی که آب بر سطح خارجی یکی از این پنجره‌ها وارد می‌کند چقدر است؟

پاسخ: مساحت پنجره برابر است با:

$$A = \pi r^2 = ۳/۱۴ \times (۰/۴\text{m})^2 = ۰/۵\text{m}^2$$

به این ترتیب از رابطه (۱-۳) داریم:

$$F = PA = (۹/۰ \times ۱۰^۵\text{Pa}) \times (۰/۵\text{m}^2) = ۴/۵ \times ۱۰^۵\text{N}$$

این نیرو تقریباً معادل وزن جسمی به جرم $۴/۵ \times ۱۰^۴\text{kg}$ است!

محاسبه فشار در شاره‌ها: در علوم سال نهم دیدید فشار هوا در ارتفاع‌های بالا کمتر از فشار

در سطح دریاست، به همین دلیل باید در حین پرواز، فشار هوای کابین هواپیما را برای سلامت سرنشینان تنظیم کنند. وقتی به درون قسمت عمیق استخری شیرجه می‌زنید، با افزایش عمق از سطح آب، افزایش فشار را روی گوش‌های خود احساس می‌کنید. همچنین با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش شکل ۱۴-۳ دیدید که با افزایش عمق از سطح شاره، فشار ناشی از شاره نیز افزایش می‌یابد. در ادامه می‌خواهیم یک رابطه کلی برای محاسبه فشار در هر نقطه دلخواه درون یک شاره ساکن به دست آوریم. به این منظور، فرض می‌کنیم شتاب گرانش g و چگالی شاره یکنواخت و برابر ρ باشد. در شکل ۱۵-۳ الف، بخشی از شاره به ارتفاع h نشان داده شده است که بین دو سطح فرضی A قرار دارد. نیروهای در راستای قائم، که بر این بخش از شاره وارد می‌شود در شکل ۱۵-۳ ب نشان داده شده است. چون شاره در حال تعادل است، نیروها متوازن‌اند و برایندها صفر است. بنابراین از قانون دوم نیوتون برای نیروهای در راستای قائم داریم:

$$F_p = F_1 + mg$$

$$P_p A = P_1 A + mg$$



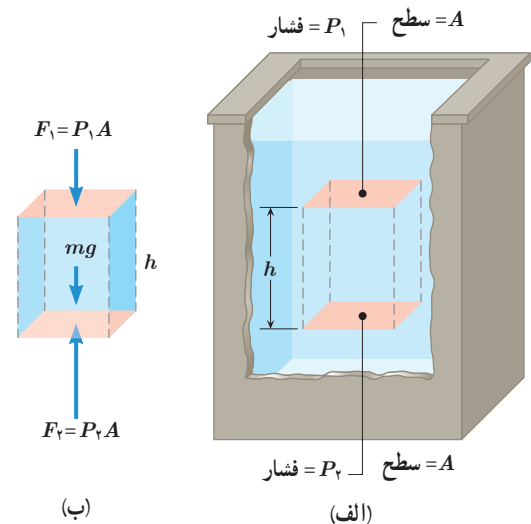
شکل ۱۴-۳ با باز کردن در بطری، آب از سوراخ‌های ایجادشده در بطری، با فشار متفاوت خارج می‌شود. سرعت خروج آب از کدام سوراخ بیشتر است؟

با جایگذاری $m = \rho V = \rho Ah$ در رابطه اخیر و حذف A از طرفین تساوی داریم:

$$P_r = P_1 + \rho gh \quad (2-3)$$

معمولاً رابطه ۲-۳ را بر حسب عمق از سطح شاره بیان می‌کنند (شکل ۱۶-۳). به این منظور نقطه ۱ را در سطح شاره می‌گیرند که فشار برابر P_1 است. نقطه ۲ را در هر جایی درون شاره می‌توان گرفت. فشار در این نقطه را با P نمایش دهیم. به این ترتیب داریم:

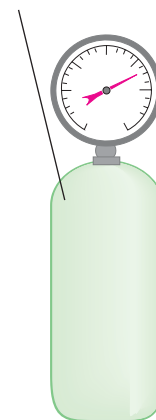
$$P = P_1 + \rho gh \quad (3-3)$$



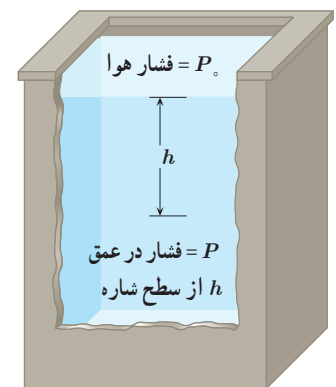
شکل ۱۶-۳ (الف) بخشی از شاره ساکن (ب) نیروهای وارد بر این بخش از شاره در راستای قائم.

این رابطه نشان می‌دهد فشار در عمق h از سطح شاره، به اندازه ρgh از فشار P_1 در سطح شاره بیشتر است. همان‌طور که خواهیم دید فشار در سطح دریای آزاد، حدود 1.013×10^5 پاسکال (Pa) است و به آن ۱ اتمسفر (atm) نیز می‌گویند. رابطه‌های ۲-۳ و ۳-۳ برای همه شاره‌های ساکن و در حال تعادل کاربرد دارد. یعنی هم برای مایع‌ها و هم برای گازها می‌توان از آن استفاده کرد. مثلاً می‌توان اختلاف فشار آب در عمق‌های متفاوت یک اقیانوس یا اختلاف فشار هوای بالا و پایین یک ساختمان را با استفاده از این رابطه‌ها حساب کرد. با توجه به اینکه چگالی گازها خیلی کم است، در محفظه‌های کوچک گاز، مانند شکل ۱۷-۳، اختلاف فشار در نقاط مختلف داخل محفظه ناچیز است.

فشار گاز در تمام نقاط یک محفظه کوچک را می‌توان یکسان فرض کرد.



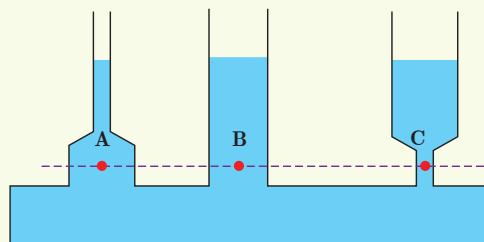
شکل ۱۷-۳



شکل ۱۸-۳

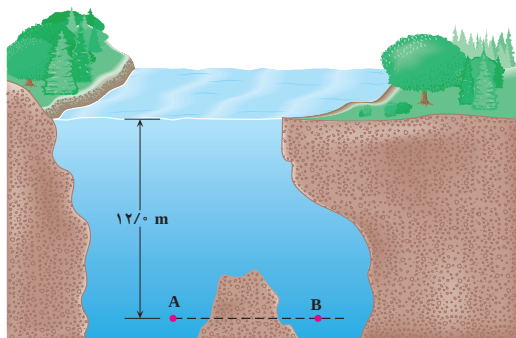
پرسش ۳-۵

در علوم سال نهم دیدید که فشار در نقاط هم‌تراز یک مایع ساکن مانند نقاط A، B و C در شکل یکسان است و به شکل ظرف بستگی ندارد. سازگاری این موضوع را با رابطه ۳-۳ توضیح دهید.



۱- زیرنویس صفر برای عمق صفر است. معمولاً فشار هوا را در سطح آزاد دریا با زیرنویس صفر نمایش می‌دهند.

مثال ۳-۳



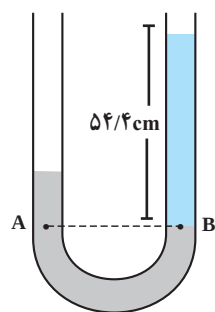
نقاط A و B در عمق یکسانی از سطح آب یک دریاچه قرار گرفته‌اند. فشار در نقطه A چقدر است؟ در نقطه B چطور؟ چگالی آب دریاچه را 1000 kg/m^3 و فشار هوا در سطح دریاچه را $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ در نظر بگیرید.

پاسخ: با توجه به رابطه ۳-۳، فشار در نقطه A برابر است با:

$$P = P_0 + \rho gh = 1.01 \times 10^5 (\text{Pa}) + (1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ N/kg})(12.0 \text{ m}) = 2.19 \times 10^5 \text{ Pa}$$

چون نقطه A با نقطه B هم‌تراز است، فشار در این نقطه با فشار در نقطه A برابر است.

مثال ۴-۳



در یک لوله U شکل، مقداری جیوه قرار دارد. در شاخه سمت راست لوله آن قدر آب می‌ریزیم تا ارتفاع آب به 54.4 cm برسد (شکل روبه‌رو). اختلاف ارتفاع جیوه در دو شاخه چند سانتی‌متر است؟ (مقیاس‌ها در این شکل واقعی نیست.)

پاسخ: در شکل روبه‌رو، نقاط A و B که درون جیوه انتخاب شده‌اند، هم‌ترازند، بنابراین $P_A = P_B$ است. به این ترتیب می‌توان نوشت:

$$P_0 + \rho_m gh_m = P_0 + \rho_w gh_w \Rightarrow \rho_m h_m = \rho_w h_w$$

$$(13600 \text{ kg/m}^3) \times h_m = (1000 \text{ kg/m}^3) \times 54.4 \text{ cm} \Rightarrow h_m = 4.0 \text{ cm}$$

(توجه کنید که در روابط بالا زیرنویس m برای جیوه و زیرنویس w برای آب انتخاب شده‌اند.)

مثال ۵-۳



اختلاف بین فشار هوای بالا و پایین برج آزادی، با ارتفاع ۴۵ متر، چقدر است؟ چگالی هوا را تقریباً 1.2 kg/m^3 بگیرید.

پاسخ: با توجه به رابطه ۲-۳ داریم:

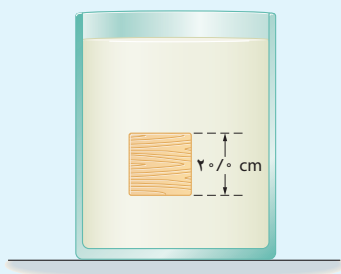
$$P_2 = P_1 + \rho gh \Rightarrow P_2 - P_1 = \rho gh$$

$$= (1.2 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ N/kg})(45 \text{ m}) = 5.3 \times 10^2 \text{ Pa}$$

تمرین ۲-۳

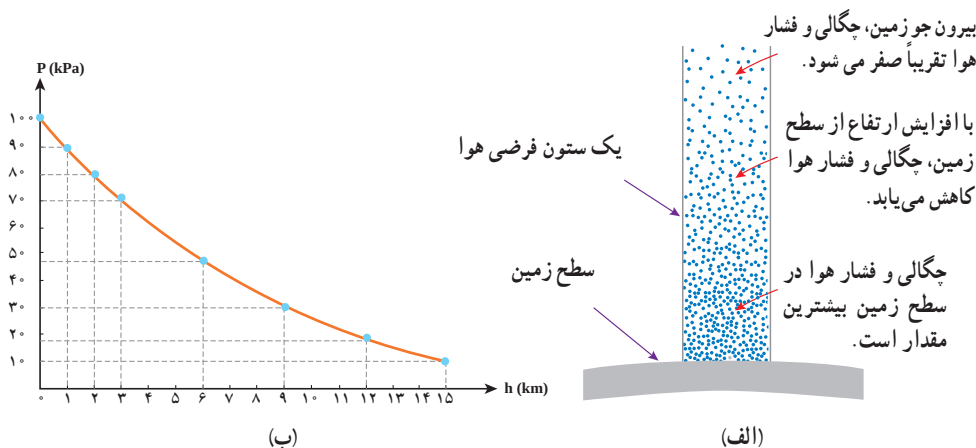
شناگری در عمق ۵/۰ متری از سطح آب دریاچه‌ای شنا می‌کند. فشار ناشی از آب و همچنین فشار کل در این عمق چقدر است؟ اگر مساحت پرده گوش را یک سانتی‌متر مربع (1cm^2) فرض کنیم، بزرگی نیرویی که به پرده گوش این شناگر وارد می‌شود چند نیوتون است؟ فشار هوای محیط را 10^5Pa یا 10^1 بگیرید.

تمرین ۳-۳



جسمی مکعبی به طول ضلع 20cm درون شاره‌ای غوطه‌ور و در حال تعادل است (شکل روبه‌رو). فشار در بالا و زیر جسم به ترتیب برابر 10^5 و $10^6/8$ کیلوپاسکال است.
چگالی شاره چند کیلوگرم بر متر مکعب است؟ (راهنمایی: از رابطه ۲-۳ استفاده کنید.)

برای محاسبه اختلاف فشار بین دو نقطه از هوا که اختلاف ارتفاع قابل توجهی دارند، دیگر نمی‌توان از رابطه ۲-۳ استفاده کرد. برای مثال، اختلاف فشار قله دماوند و سطح دریا با استفاده از این رابطه، حدود 74 kPa به دست می‌آید در حالی که مقدار واقعی آن نزدیک به 50 kPa است! برای یافتن دلیل تفاوت آشکار بین این مقادیر، باید توجه کنیم که با افزایش ارتفاع از سطح زمین، چگالی هوا کاهش می‌یابد (شکل ۳-۱۸-الف). محاسبه‌های دقیق‌تر نشان می‌دهند که تغییر فشار برحسب ارتفاع از سطح زمین، مطابق نمودار شکل ۳-۱۸-ب است. نیروی جاذبه زمین سبب می‌شود که لایه‌های زیرین هوا نسبت به لایه‌های بالایی هوا متراکم‌تر شوند. در نتیجه هرچه به سطح زمین نزدیک‌تر می‌شویم، چگالی و فشار هوا بیشتر می‌شود.



شکل ۳-۱۸ (الف) با افزایش ارتفاع از سطح زمین، چگالی و فشار هوا کاهش می‌یابد. (ب) نمودار فشار هوا برحسب ارتفاع از سطح دریای آزاد.



در هواشناسی و روی نقشه‌های آب و هوا، معمولاً از یکای بار (bar) برای فشار هوا استفاده می‌کنند. به طوری که داریم:

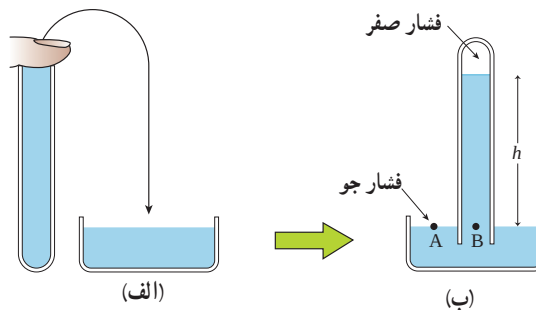
$$1 \text{ bar} = 1/000 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1/000 \times 10^5 \text{ Pa}$$

یک ستون به سطح مقطع 1 m^2 در نظر بگیرید که از سطح دریای آزاد تا بالاترین بخش جو زمین ادامه می‌یابد (شکل روبه‌رو). اگر فشار هوا را در سطح دریا 1 bar در نظر بگیریم، چند کیلوگرم هوا در این ستون فرضی وجود دارد؟ با توجه به شکل ۳-۱۸ ب، چند درصد این جرم تا ارتفاع ۹ کیلومتری این ستون فرضی قرار دارد؟

جوسنج (بارومتر): وسیله‌ای ساده که برای اندازه‌گیری فشار جو به کار می‌رود. این فشارسنج

در سال ۱۶۴۳ میلادی توسط تورچلی فیزیک‌دان ایتالیایی اختراع شد.

جوسنج شامل یک لوله شیشه‌ای بلند (به طول تقریبی 80° سانتی‌متر) با یک سر بسته است که از جیوه پر شده (شکل ۳-۱۹ الف) و سپس در یک ظرف محتوی جیوه به طور وارون قرار گرفته است (شکل ۳-۱۹ ب). فضای خالی بالای ستون جیوه تنها محتوی بخار جیوه است که فشار آن ناچیز بوده و در عمل برابر صفر فرض می‌شود.



شکل ۳-۱۹ جوسنج جیوه‌ای که برای اندازه‌گیری فشار جو به کار می‌رود.

فشار در نقطه B برابر ρgh و در نقطه A برابر P_0 است. چون نقاط A و B هم‌ترازند، می‌توان نوشت:

$$P_A = P_B \Rightarrow P_0 = 0 + \rho gh \Rightarrow P_0 = \rho gh \quad (4-3)$$

بنابراین جوسنج، فشار جو را به طور مستقیم از روی ارتفاع ستون جیوه نشان می‌دهد که در سطح دریای آزاد این ارتفاع حدود 760 mm است. به همین دلیل در بسیاری موارد فشار اندازه‌گیری شده برحسب میلی‌متر جیوه (mmHg) یا سانتی‌متر جیوه (cmHg) بیان می‌شود.^۲

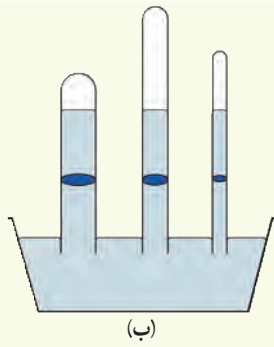
۱- چون جیوه و بخار آن بسیار سمی است و می‌تواند جذب پوست یا مخاط تنفسی شود، انجام این کار توصیه نمی‌شود.

۲- به افتخار تورچلی، 1 mmHg را یک تور (torr) می‌نامند.



اونجلیستا تورچلی (۱۶۴۷-۱۶۰۸م) یکی از فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانان ایتالیایی و از شاگردان گالیله بود. هرچند تورچلی فعالیت‌هایی در ریاضیات و نورشناسی نیز داشته است ولی شهرت اصلی وی برای اختراع بارومتر یا جوسنج است. وی به کمک این جوسنج ساده توانست نشان دهد که فشار هوا به ارتفاع از سطح دریا بستگی دارد. تورچلی همچنین به کمک این ابزار ساده توانست در بالای ستون جیوه درون لوله، خلأ نسبی ایجاد کند که به خلأ تورچلی شناخته می‌شود.

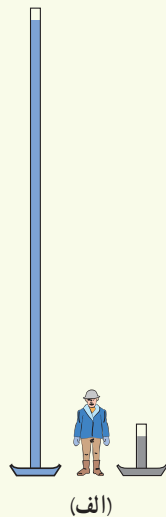
پرسش ۳-۶



(ب)



(پ)



(الف)

الف) توضیح دهید چرا تورچکلی در آزمایش خود ترجیح داد به جای آب از جیوه استفاده کند؟ (ممکن است شکل الف بتواند در پاسخ به این پرسش به شما کمک کند.)

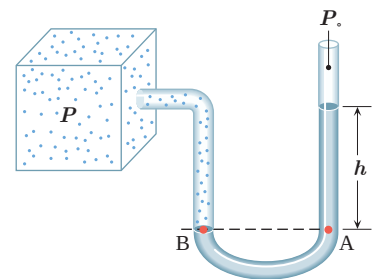
ب) برای لوله‌های غیرمویین، اگر سطح مقطع و طول لوله‌ها متفاوت باشد، ارتفاع ستون جیوه تغییر نمی‌کند (شکل ب). علت را توضیح دهید.

پ) در قلم خودکار، جوهر از طریق یک لوله وارد نوک قلم شده و در آنجا توسط یک گوی فلزی ضد زنگ غلتان، روی ورقه کاغذ پخش می‌شود. در بدنه لایه‌ای یا درپوش بالایی این نوع قلم‌های خودکار، سوراخ ریزی ایجاد می‌کنند (شکل پ). دلیل این کار را توضیح دهید.

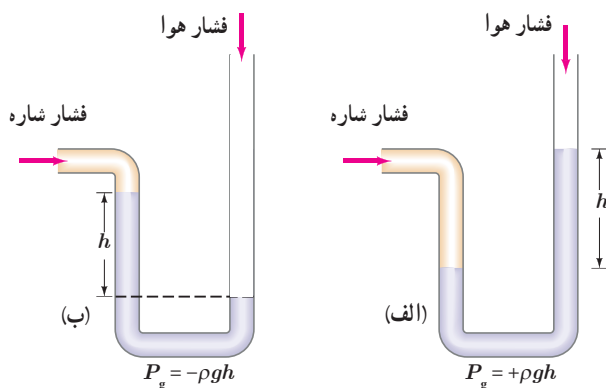
فشارسنج (مانومتر): یکی از وسیله‌های ساده برای اندازه‌گیری فشار یک شاره محصور، فشارسنج U شکل است. شکل ۳-۲ لوله باز U شکلی را نشان می‌دهد که حاوی مایعی به چگالی ρ ، اغلب جیوه یا آب است. انتهای راست لوله، باز و با فشار جو P_0 در ارتباط است. انتهای چپ لوله، به ظرفی که فشار P آن باید اندازه‌گیری شود وصل شده است. فشار در نقطه A برابر $P_0 + \rho gh$ است. فشار در نقطه B برابر P است. چون نقاط A و B هم‌ترازند، فشار آنها با یکدیگر برابر است. به این ترتیب داریم:

$$P_A = P_B \Rightarrow P = P_0 + \rho gh \Rightarrow P - P_0 = \rho gh$$

در رابطه اخیر فشار P را فشار مطلق و $P - P_0$ که تفاوت بین **فشار مطلق** و فشار جو است را **فشار پیمانه‌ای** می‌نامند و معمولاً آن را با نماد P_g نشان می‌دهند.^۱ بدین ترتیب در شکل ۳-۲ فشار پیمانه‌ای را به سادگی می‌توان از رابطه $P_g = \rho gh$ به دست آورد. اگر فشار شاره بیشتر از فشار جو باشد، فشار پیمانه‌ای مثبت است (شکل ۳-۲۱ الف). در خلأ نسبی و شاره‌ای که فشار آن کمتر از فشار جو است، فشار پیمانه‌ای منفی است (شکل ۳-۲۱ ب).



شکل ۳-۲. فشارسنج با لوله باز که برای اندازه‌گیری فشار یک شاره محصور استفاده می‌شود.



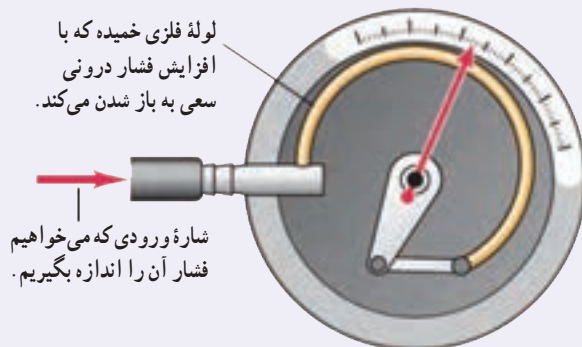
شکل ۳-۲۱. (الف) فشار شاره بیشتر از فشار جو است. (ب) فشار شاره کمتر از فشار جو است.

۱- اندیس g از سر حرف واژه gauge به معنای پیمانه گرفته شده است.

فعالیت ۳-۸

آزمایشی طراحی و سپس اجرا کنید که به کمک آن بتوان نشان داد فشار در یک عمق معین از مایع به جهت‌گیری سطحی که فشار به آن وارد می‌شود بستگی ندارد.

فناوری و کاربرد



فشارسنج بوردون: بسیاری از فشارسنج‌ها برای اندازه‌گیری فشار یک شماره، از یک لوله خمیده یک سر بسته و قابل انعطاف استفاده می‌کنند (شکل روبه‌رو). انتهای این لوله به عقربه‌ای متصل است که فشار را روی صفحه‌ای مدرج نشان می‌دهد. تغییر فشار پیمانه‌ای شماره درون لوله سبب تغییر شکل لوله و در نتیجه حرکت عقربه روی صفحه مدرج می‌شود. این فشارسنج‌ها که به فشارسنج بوردون شناخته می‌شوند معمولاً برای اندازه‌گیری فشار در مخزن‌های گاز و همچنین اندازه‌گیری فشار باد لاستیک وسیله‌های نقلیه به کار می‌روند.

مثال ۳-۶

یکی دیگر از یکاهای متداول فشار، اتمسفر یا جو است که با نماد atm نمایش داده می‌شود. فشار یک اتمسفر، به صورت فشار معادل ستونی از جیوه به ارتفاع 760 mm تعریف می‌شود (در دمای 0°C و به ازای $g = 9.81\text{ N/kg}$). هر اتمسفر، معادل چند پاسکال است؟ چگالی جیوه را برابر $13.6 \times 10^4\text{ kg/m}^3$ بگیرید.

پاسخ: رابطه ۳-۴، فشار جو را بر حسب ارتفاع ستون جیوه به ما می‌دهد. با جایگذاری مقادیر داده شده در این رابطه داریم:

$$P_0 = \rho gh = (13.6 \times 10^4\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ N/kg})(0.76\text{ m}) = 1.01 \times 10^5\text{ Pa}$$

همان‌طور که دیده می‌شود 1 atm تنها اندکی از 1 bar بیشتر است.

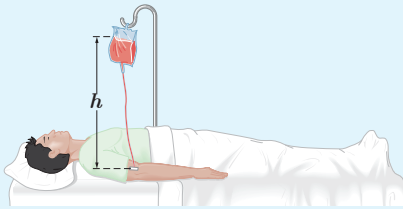
مثال ۳-۷

عمیق‌ترین قسمت خلیج فارس با عمقی حدود 93 m متر در نزدیکی جزیره تنب بزرگ قرار دارد. فشار پیمانه‌ای در این عمق چند پاسکال است؟ چگالی آب خلیج فارس را 1028 kg/m^3 بگیرید.

پاسخ: همان‌طور که دیدیم، فشار پیمانه‌ای برابر اختلاف فشار درون شماره با فشار جو است. به این ترتیب داریم:

$$P - P_0 = \rho gh = (1028\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ N/kg})(93\text{ m}) = 9.4 \times 10^5\text{ Pa}$$

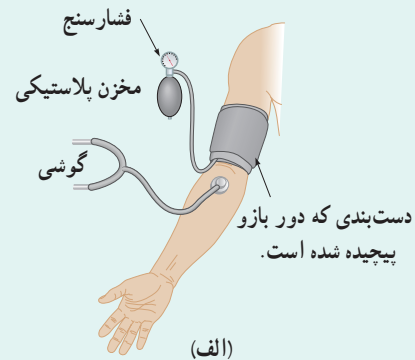
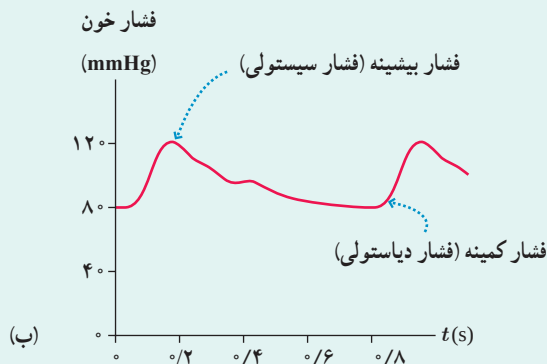
تمرین ۳-۵



شکل روبه‌رو یک کیسه پلاستیکی حاوی محلولی را نشان می‌دهد که در حال تزریق به یک بیمار است. سوزن سرنگی را به قسمت خالی از مایع بالای این کیسه وارد می‌کنند طوری که فشار هوا در این بخش از کیسه همواره با فشار هوای بیرون برابر بماند. اگر فشار پیمانه‌ای در سیاهرگ 133° پاسکال باشد، ارتفاع کمینه h چقدر باشد تا محلول در سیاهرگ نفوذ کند؟ چگالی محلول را 1045 kg/m^3 بگیرید.

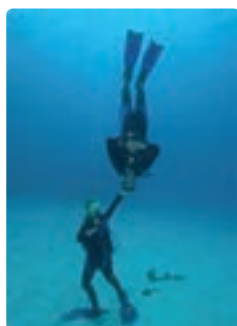
خوب است بدانید

شکل الف فشارسنجی را نشان می‌دهد که برای اندازه‌گیری فشار خون به کار می‌رود. با چندین بار فشردن مخزن پلاستیکی بر از هوا، فشار دست‌بند افزایش می‌یابد تا جریان خون در سرخرگ اصلی دست در بازو متوقف شود. سپس دریچه مخزن باز شده، و شخص اندازه‌گیرنده با گوشی به صدای عبور خون از سرخرگ گوش می‌کند. وقتی فشاری که دست‌بند به سرخرگ اصلی دست وارد می‌کند در حال کاهش باشد، درست زمانی که فشار به زیر بیشینه فشار خونی که قلب تولید می‌کند (فشار سیستولی) فرو افتد، سرخرگ برای یک لحظه در هر ضربان قلب باز می‌شود. در این شرایط، جریان خون متلاطم، پُر سر و صدا و با تندی زیاد است و می‌توان آن را با گوشی شنید. فشارسنج طوری درجه‌بندی شده است که فشار را بر حسب mmHg نشان می‌دهد، و مقدار به دست آمده حدود 120 mmHg برای قلب معمولی است. با کاهش بیشتر فشار دست‌بند، صداهای متناوب هنوز شنیده می‌شود تا فشار به زیر فشار کمینه قلب (فشار دیاستولی) فرو افتد. در این وضعیت صداهای مداومی شنیده می‌شود. در قلب عادی، این گذار در فشاری حدود 80 mmHg رخ می‌دهد. فشار خون را معمولاً بر حسب نسبت فشار سیستولی به فشار دیاستولی بیان می‌کنند، که برای قلب سالم $120/80$ است.



۳-۵ شناوری و اصل ارشمیدس

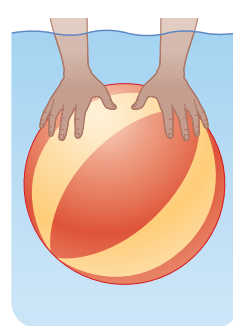
ممکن است بارها تجربه کرده باشید که وقتی تویی را وارد آب می‌کنید، پس از حذف نیروی دست، توپ به طرف بالا جهیده و روی آب شناور می‌شود (شکل ۳-۲۲ الف). همچنین شناور ماندن کشتی‌های فولادی روی آب، پدیده‌ای آشناست با وجود آنکه می‌دانیم چگالی فولاد حدود ۸ برابر چگالی آب است (شکل ۳-۲۲ ب). افزون بر اینها، جابه‌جا کردن یک جسم سنگین غوطه‌ور داخل آب، خیلی آسان‌تر از انجام همین کار در خارج آب است (شکل ۳-۲۲ پ). پیش از پرداختن به دلایل این پدیده‌ها، فعالیت صفحه بعد را انجام دهید.



(ب)



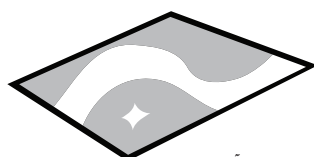
(ب)



(الف)

شکل ۳-۲۲ (الف) وارد کردن توپ داخل آب (ب) کشتیرانی در دریای خزر (بندر امیرآباد)، (پ) جابه‌جا کردن یک غواص غوطه‌ور با یک دست

فعالیت ۳-۹



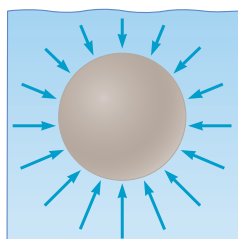
فویل آلومینیمی



فویل آلومینیمی مجاله‌شده

درون یک ظرف مقداری آب بریزید. یک فویل آلومینیمی به ابعاد تقریبی $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ اختیار کنید و آن را مجاله کنید. پیش‌بینی کنید با قرار دادن فویل مجاله شده روی سطح آب، چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید.

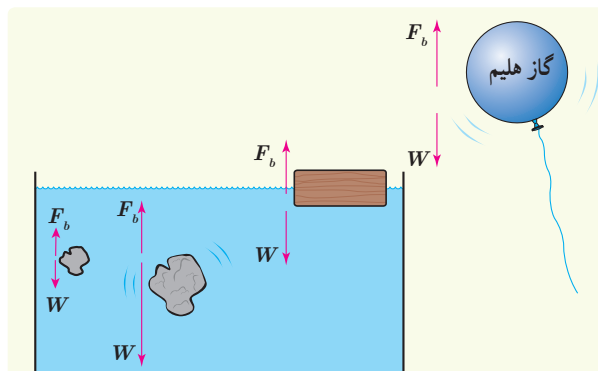
اکنون فویل مجاله شده را آن قدر فشار دهید تا تقریباً مشابه یک توپ کروی شود. اگر این توپ آلومینیمی را روی سطح آب قرار دهید، پیش‌بینی کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید. پیش‌بینی‌ها و نتایج مشاهده (آزمایش) خود را در گروه‌تان به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.



ارشمیدس دانشمند یونانی دوران باستان، نخستین کسی بود که پی برد به جسم‌های درون یک شاره یا غوطه‌ور در آن، همواره نیروی بالاسوی خالصی به نام **نیروی شناوری** از طرف شاره وارد می‌شود. دلیل این نیرو برای جسمی غوطه‌ور درون شاره به طور کیفی در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است.

شکل ۳-۲۳ پیکان‌ها نشان می‌دهند که نیروهای ناشی از فشار وارده بر جسم، به دلیل افزایش عمق، در زیر آن بزرگ‌ترند.

پرسش ۳-۷

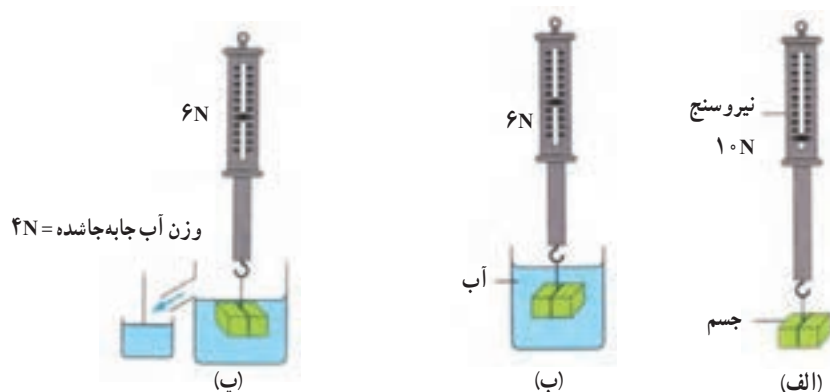


در شکل روبه‌رو، نیروی شناوری F_b و نیروی وزن W وارد بر چند جسم نشان داده شده است. با توجه به نیروی خالص وارد بر هر جسم، وضعیت آن را به کمک یکی از واژه‌های شناوری، غوطه‌وری، فرورفتن و بالارفتن توصیف کنید.

۱- buoyant force

اصل ارشمیدس را به سادگی می‌توان به طور تجربی بررسی کرد. شکل ۳-۲۴ الف یک جسم فلزی آویزان شده به یک نیروسنج را نشان می‌دهد که وزن آن ۱۰ نیوتون است. وقتی این جسم مطابق شکل ۳-۲۴ ب به طور کامل درون آب قرار می‌گیرد، نیروسنج عدد ۶ نیوتون را نشان می‌دهد. در واقع این کاهش ۴ نیوتونی عددی که نیروسنج نشان می‌دهد، ناشی از نیروی شناوری است که از طرف شاره به جسم وارد شده است.

اگر ظرفی لوله‌دار مطابق شکل ۳-۲۴ پ تهیه کنید به طوری که تا سطح لوله دارای آب باشد، با فرو کردن جسم درون آن، آب اضافی از طریق لوله به ظرف دیگری می‌ریزد. وزن آب خارج شده ۴ نیوتون است که دقیقاً برابر نیروی شناوری است که از طرف آب به جسم وارد می‌شود.



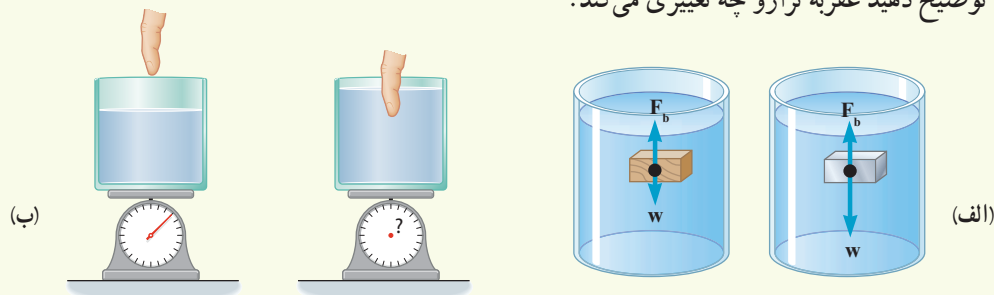
شکل ۳-۲۴ آزمایشی ساده برای تحقیق اصل ارشمیدس

با توجه به آنچه تا اینجا دیدیم اصل ارشمیدس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

وقتی تمام یا قسمتی از یک جسم در شاره‌ای فرو رود، شاره نیرویی بالاسو بر آن وارد می‌کند که با وزن شاره جابه‌جا شده توسط جسم برابر است^۱.

پرسش ۳-۸

- در شکل (الف) نیروهای وارد بر دو جسم با حجم یکسان و چگالی متفاوت نشان داده شده است که در شاره‌ای قرار دارند. جهت حرکت دو جسم را روی شکل تعیین کنید. همچنین چگالی هر جسم را با چگالی آب مقایسه کنید.
- شکل (ب) ظرفی محتوی آب را نشان می‌دهد که روی یک ترازوی عقربه‌ای قرار دارد. شخصی انگشت خود را وارد آب می‌کند. توضیح دهید عقربه ترازو چه تغییری می‌کند.

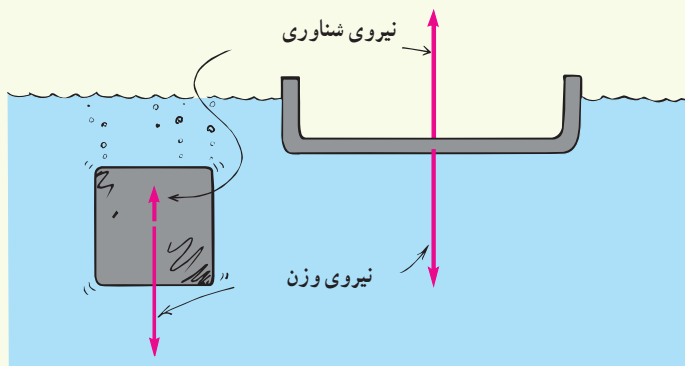


۱- حل هر گونه مسئله عددی مبتنی بر این بیان، خارج از اهداف برنامه درسی کتاب است. در ارزشیابی از این قسمت، تنها پرسش‌های توصیفی و فعالیت‌های عملی می‌تواند مطرح شود.

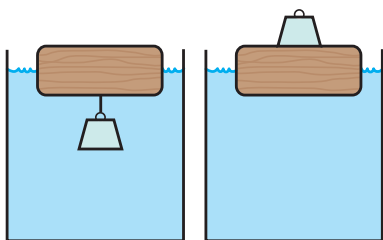
- ۳- جرم قطعه‌های آهنی در شکل (پ) با یکدیگر برابر است. دریافت خود را از این شکل بیان کنید.
- ۴- توضیح دهید چرا یک کشتی هوایی که با گاز هلیوم (که چگالی آن کمتر از چگالی هواست) پر شده است نمی‌تواند به طور نامحدود به بالا رفتن ادامه دهد.



(ت)



(پ)



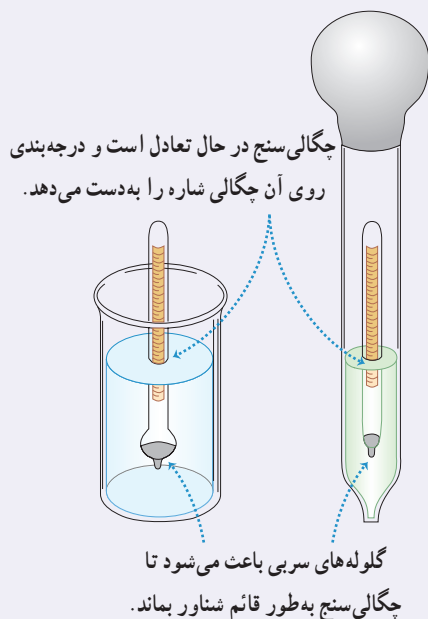
(ب)

(الف)

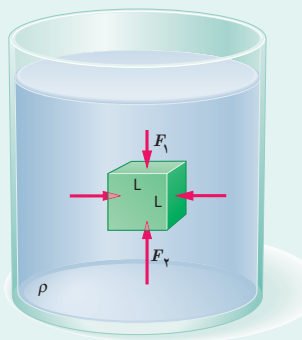
فعالیت ۳-۱۰

یک قطعه چوبی را روی آب درون ظرفی قرار دهید. یک وزنه آهنی را یک بار روی چوب قرار دهید (شکل الف) و بار دیگر از زیر چوب آویزان کنید (شکل ب). پیش‌بینی کنید در کدام تجربه، چوب بیشتر در آب فرو می‌رود؟ آزمایش را انجام دهید. پیش‌بینی‌ها و نتایج مشاهده (آزمایش) خود را در گروه‌تان به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

فناوری و کاربرد



یک کاربرد عملی شناوری، چگالی‌سنج است که برای اندازه‌گیری چگالی مایع‌ها به کار می‌رود (شکل الف). ساقه چگالی‌سنج تا جایی درون شاره فرو می‌رود که وزن شاره جابه‌جا شده درست برابر وزن آن شود. چگالی‌سنج در مایع‌های چگال‌تر نسبت به مایع‌های کم‌چگال، کمتر فرو می‌رود. چگالی مایع از روی درجه‌بندی ساقه چگالی‌سنج خوانده می‌شود. شکل (ب) یک نوع رایج چگالی‌سنج را نشان می‌دهد که برای بررسی چگالی اسید باتری یا ضدیخ خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد و شبیه یک قطره‌چکان بزرگ پزشکی است. ته لوله بزرگ را در مایع فرو می‌برند و محفظه پلاستیکی بالای آن را می‌فشارند تا هوا خارج شود و سپس رها می‌کنند. مایع درون لوله بزرگ بالا می‌رود، و چگالی‌سنج در این نمونه مایع شناور می‌ماند.



برای بررسی عامل فیزیکی نیروی شناوری، جسمی مکعبی شکل به ضلع L را در نظر بگیرید که درون شاره ساکنی با چگالی ρ غوطه‌ور است (شکل روبه‌رو). پیکان‌ها، نیروهایی را نشان می‌دهد که شاره به سطح این جسم وارد می‌کند. نیروهای افقی وارد به جسم یکدیگر را خنثی می‌کنند (چرا؟) در حالی که برای نیروهای عمودی داریم:

$$F_L = P_1 A \quad \text{و} \quad F_V = P_2 A$$

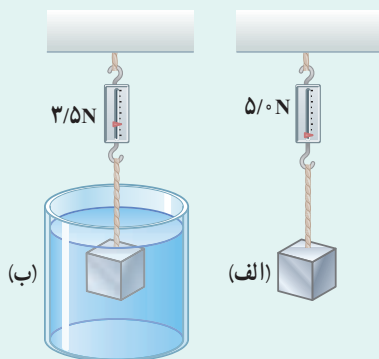
با استفاده از رابطه ۲-۳ و با توجه به اینکه در این رابطه $L = h$ است، می‌توان نوشت:

$$F_V = P_2 A = (P_1 + \rho g L) A = P_1 A + \rho g A L = F_L + \rho V g$$

به این ترتیب نیروی شناوری وارد بر جسم غوطه‌ور برابر است:

$$F_b = F_V - F_L = \rho V g \quad (۱)$$

این رابطه همان اصل ارشمیدس است. مطابق این رابطه، هرگاه جسمی درون شاره ساکنی غوطه‌ور باشد، نیروی شناوری وارد بر جسم برابر $\rho V g$ است. در این رابطه ρ چگالی شاره و V حجم جسم است. توجه کنید که حجم جسم غوطه‌ور، برابر حجم شاره جابه‌جا شده است.



مثال ۱: نیروسنجی وزن جسمی را $۵/۰\text{N}$ نشان می‌دهد (شکل الف). وقتی این جسم را داخل آب فرو می‌بریم نیروسنج عدد $۳/۵\text{N}$ را نشان می‌دهد (شکل ب). چگالی جسم را پیدا کنید. (فرض کنید ρ آب و g در SI به ترتیب برابر $۱۰^۳ \times ۱/۰۰$ و $۹/۸۱$ هستند.)

پاسخ: نیروی شناوری وارد بر جسم برابر $۱/۵\text{N}$ است. بنابراین با توجه به رابطه ۱ حجم جسم برابر است با:

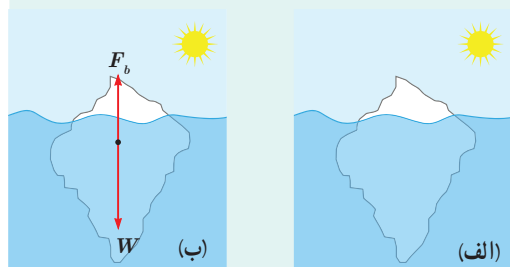
$$F_b = \rho V g \Rightarrow ۱/۵\text{N} = (۱/۰۰ \times ۱۰^۳ \text{kg/m}^3) V (۹/۸۱ \text{N/kg}) \Rightarrow V = ۱/۵ \times ۱۰^{-۴} \text{m}^3$$

چون نیروسنج وزن جسم را $۵/۰\text{N}$ می‌خواند، جرم آن برابر است با:

$$W = mg \Rightarrow ۵/۰\text{N} = m (۹/۸۱ \text{N/kg}) \Rightarrow m = ۰/۵۱ \text{kg}$$

اگر چگالی جسم را با ρ نشان دهیم از رابطه ۱-۱ داریم:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{۰/۵۱ \text{kg}}{۱/۵ \times ۱۰^{-۴} \text{m}^3} = ۳/۴ \times ۱۰^۳ \text{kg/m}^3$$



مثال ۲: کوه یخی درون اقیانوسی شناور است (شکل الف). اگر چگالی

آب اقیانوس ۱۰۳۰kg/m^3 و چگالی کوه یخ ۹۱۷kg/m^3 باشد، چند درصد کوه یخ درون آب می‌ماند؟ (مجموعه کوه یخ و آب اقیانوس را در حال سکون فرض کنید.)

پاسخ: نیروی شناوری و نیروی وزن وارد شده به کوه یخ در شکل (ب) نشان داده است. چون کوه یخ در حال تعادل است، از قانون دوم نیوتون داریم:

$$F_b = W \Rightarrow F_b = m_i g = \rho_i V_i g$$

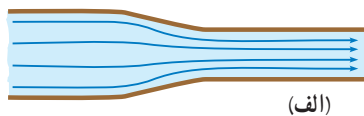
در این رابطه ρ_i و V_i ، به ترتیب چگالی و حجم کوه یخ است. اگر چگالی آب اقیانوس را ρ_o و حجم آب جابه‌جا شده را V_o بگیریم، از رابطه ۱ و رابطه بالا می‌توان نوشت:

$$\rho_o V_o g = \rho_i V_i g \Rightarrow V_o = \frac{\rho_i}{\rho_o} V_i \Rightarrow V_o = \frac{917 \text{ kg/m}^3}{1030 \text{ kg/m}^3} V_i = 0.89 V_i$$

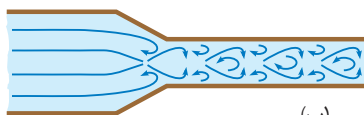
این نتیجه نشان می‌دهد که حجم آب جابه‌جا شده برابر ۸۹ درصد حجم کوه یخ است. یعنی ۸۹ درصد حجم کوه یخ درون آب می‌ماند و تنها ۱۱ درصد آن بیرون از آب مشاهده می‌شود.

۳-۶ شاره در حرکت و اصل برنولی

تا اینجا به بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی شاره‌های ساکن پرداختیم. اکنون آماده‌ایم تا یک شاره در حال حرکت را بررسی کنیم. وقتی شاره‌ای حرکت می‌کند، این حرکت می‌تواند یکنواخت و لایه‌ای (شکل ۳-۲۵ الف) یا متلاطم و آشوبناک (شکل ۳-۲۵ ب) باشد. درست مانند هوا، که گاهی به صورت نسیمی ملایم و گاهی به صورت طوفانی پراثر می‌وزد. هنگام حرکت آب در شلنگ، جریان تند و سریع آب در یک رودخانه (شکل ۳-۲۶ الف)، حرکت خون درون رگ‌ها، حرکت هوا درون سامانه‌های گرمایش و سرمایش، جریان دود در هوا (شکل ۳-۲۶ ب) پدیده‌های جالبی رخ می‌دهد. بررسی این پدیده‌ها اغلب می‌تواند بسیار پیچیده باشد. برای پرهیز از این پیچیدگی‌ها، مدل آرمانی و ساده‌شده‌ای از یک شاره در حال حرکت و بدون تلاطم را بررسی می‌کنیم، افزون بر این فرض می‌کنیم شاره تراکم‌ناپذیر است (یعنی، چگالی آن ثابت است) و اصطکاک داخلی (چسبندگی) ندارد^۱.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲۵ (الف) حرکت لایه‌ای شاره. نقش کلی جریان شاره، با گذر زمان تغییر نمی‌کند. (ب) حرکت متلاطم شاره. نقش کلی جریان شاره و مسیر حرکت ذرات آن، به طور مداوم تغییر می‌کند.



(ب)

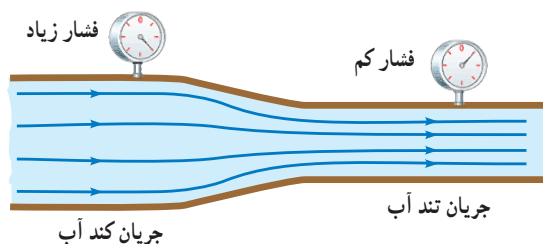


(الف)

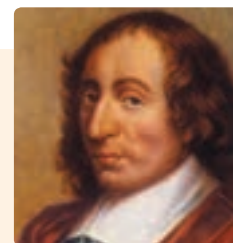
شکل ۳-۲۶ (الف) پل زمان خان (شهر سامان، استان چهارمحال و بختیاری) هنگام عبور آب از مجاری زیر پل. جریان آب در برخی نواحی آشوبناک می‌شود. (ب) جریان لایه‌ای و تلاطم دود. جریان دود از سرچوب عود، در ابتدا لایه‌ای است و سپس در بالا متلاطم می‌شود.

۱- معمولاً از واژه‌های چسبندگی یا وiskسائی برای اشاره به اصطکاک داخلی در شاره‌ها استفاده می‌شود.

شکل ۳-۲۷ جریان لایه‌ای آب را، درون لوله‌ای افقی و با دو سطح مقطع متفاوت نشان می‌دهد. در حالت پایا، که همه جای لوله پر از آب است، مقدار آبی که در یک مدت زمان معین از یک مقطع لوله می‌گذرد با مقداری که از هر مقطع دیگر لوله در همان مدت زمان می‌گذرد برابر است. در نتیجه با توجه به تغییر اندازه سطح مقطع لوله، جریان آب کند یا تند می‌شود.



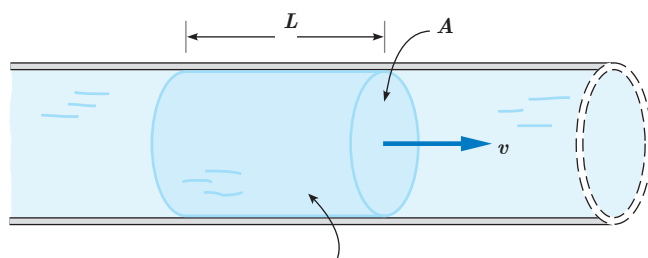
شکل ۳-۲۷ آب با جریان لایه‌ای، در لوله‌ای با دو سطح مقطع متفاوت حرکت می‌کند. با کاهش سطح مقطع لوله، جریان آب تندتر می‌شود و فشار آن کاهش می‌یابد.



دانیل برنولی، فیزیک‌دان و ریاضی‌دان سوئیسی، متوجه شد که در جاهایی از لوله که جریان آب تندتر است، فشار کمتر است. برنولی همچنین متوجه شد که این اصل نه تنها برای مایع‌ها، بلکه برای گازها نیز برقرار است. **اصل برنولی** برای شارهای که به طور لایه‌ای و در امتداد افق حرکت می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود:

در مسیر حرکت شار، با افزایش تندی شار، فشار آن کاهش می‌یابد.

آهنگ جریان شار: شکل ۳-۲۸ جریان یکنواخت شارهای را نشان می‌دهد که با تندی v درون لوله‌ای با سطح مقطع A در حرکت است.



شکل ۳-۲۸ آهنگ جریان شار درون یک لوله، به صورت نسبت حجم شار جابه‌جا شده به زمان تعریف می‌شود.

حجم این بخش شار برابر AL است.

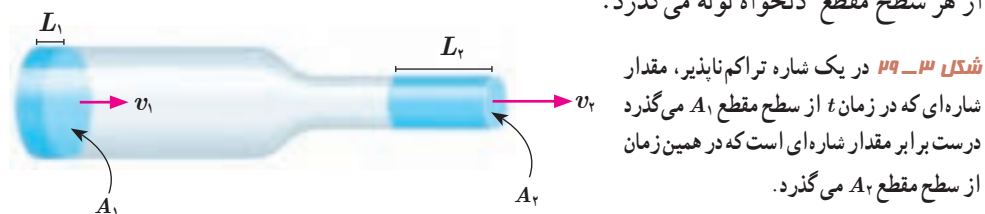
اگر در مدت زمان t ، حجم معینی از شار (AL) از مقطع A این لوله عبور کند، **آهنگ جریان شار** از این مقطع فرضی، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{آهنگ جریان شار} = \frac{\text{حجم شار}}{\text{زمان}} = \frac{AL}{t} = Av \quad (۵-۳)$$

توجه کنید که نسبت مسافت به زمان (L/t) در حرکت یکنواخت شار، برابر تندی شار v است.

دانیل برنولی (۱۷۸۲-۱۷۵۰م) یکی از فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانان نامدار سوئیسی است. پدر و برخی دیگر از اعضای فامیل وی، چهره‌های سرشناسی در دانش ریاضیات زمان خود بودند. هرچند برنولی در ریاضیات، پزشکی و آمار تلاش‌هایی داشته است اما دلیل اصلی شهرت وی، اصلی موسوم به اصل برنولی است که در اثر معروفش به نام هیدرودینامیکا به آن پرداخته است. این اصل امکان درک گستره وسیعی از پدیده‌های مختلف را تا کنون در اختیار بشر قرار داده است.

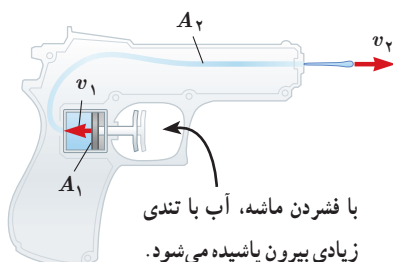
معادله پیوستگی: شکل ۲۹-۳ شماره‌ای با جریان لایه‌ای را نشان می‌دهد که در لوله‌ای با دو سطح مقطع متفاوت، در حرکت است. در حالت پایا و در مدت زمان یکسان، جرم یکسانی از شماره، از هر سطح مقطع دلخواه لوله می‌گذرد.



از این موضوع، به سادگی می‌توان به **معادله پیوستگی** برای شماره تراکم ناپذیر دست یافت که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (۶-۳)$$

مثال ۸-۳



شکل روبه‌رو یک تفنگ آب‌پاش را نشان می‌دهد که با فشردن ماشه آن، آب با تندی زیادی بیرون می‌آید.

اگر $A_1 = 1/0 \text{ cm}^2$ ، $A_2 = 1/0 \text{ mm}^2$ و $v_1 = 0/15 \text{ cm/s}$ باشد تندی خروج آب را به دست آورید.

پاسخ: با توجه به فرض‌های مسئله، از معادله پیوستگی به سادگی می‌توان تندی خروج آب از تفنگ را به دست آورد. از معادله ۶-۳ داریم:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$(1/0 \text{ cm}^2)(0/15 \text{ cm/s}) = (1/0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2)v_2$$

به این ترتیب تندی خروج آب برابر $v_2 = 0/15 \times 10^4 \text{ cm/s} = 15 \text{ m/s}$ است.

پرسش ۹-۳



وقتی شیر آبی را کمی باز کنید و آب به آرامی جریان یابد، مشاهده می‌شود که باریکه‌ی آب با نزدیک‌تر شدن به زمین، باریک‌تر می‌شود (شکل روبه‌رو). دلیل این پدیده را با توجه به معادله پیوستگی توضیح دهید.

کاربردهایی از اصل برنولی: از بررسی نیروی بالابر وارده به بال‌های هواپیما گرفته تا بررسی

حرکت کات‌دار توپ فوتبال و افشانهٔ عطر، از اصل برنولی استفاده می‌شود. شکل ۳-۳۰ آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که در علوم ششم با آن آشنا شدید. وقتی یک ورق کاغذ را جلو دهانتان می‌گیرید و در سطح بالای آن می‌دمید، کاغذ به طرف بالا حرکت می‌کند. دلیل این پدیده را با توجه به اصل برنولی می‌توان به سادگی توضیح داد.

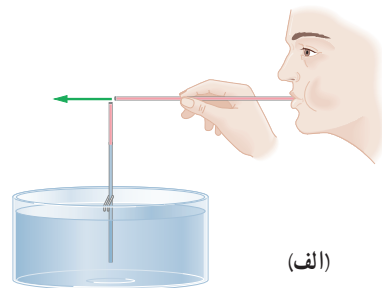
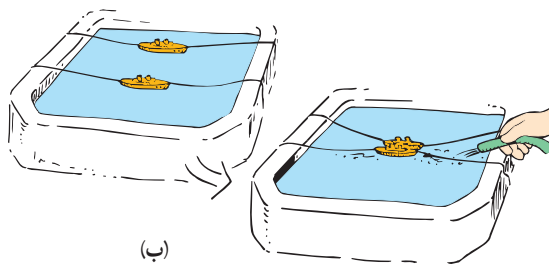


شکل ۳-۳۰ تندی جریان هوا در بالای کاغذ بیشتر از زیر آن است. با توجه به اصل برنولی، فشار هوا در بالای کاغذ کمتر از زیر آن است.

فعالیت ۱۱-۳

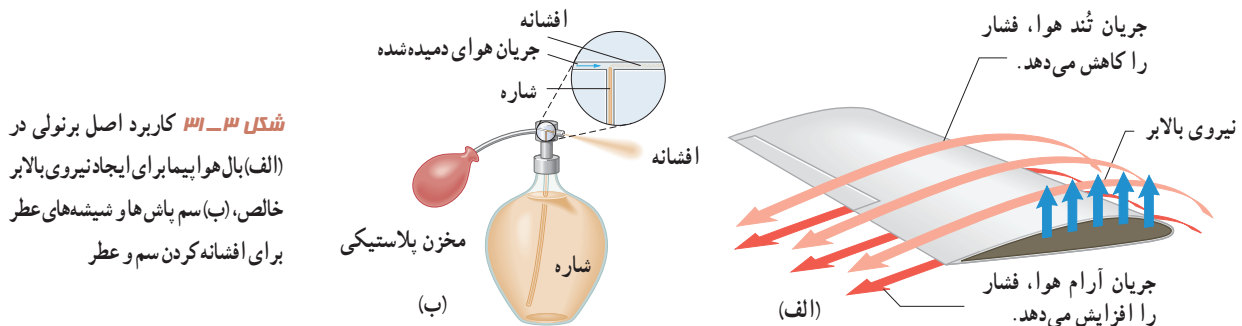
الف) یک نی نوشابه را به طور عمودی درون ظرفی محتوی آب قرار دهید به طوری که ته نی با کف ظرف آب در تماس نباشد. مطابق شکل الف، درون یک نی افقی به گونه‌ای بدمید که جریان هوای خروجی درست از بالای سر نی عمودی بگذرد. مشاهدهٔ خود را گزارش کنید و دلیل آن را به کمک اصل برنولی توضیح دهید.

ب) این فعالیت را می‌توانید در ظرف شویی آشپزخانهٔ منزلتان یا یک تشت بزرگ در حیاط مدرسه انجام دهید. مطابق شکل یک جفت قایق اسباب بازی را روی سطح آب قرار داده و شل کنار هم ببندید. سپس جریانی از آب را بین آنها برقرار کنید. به حرکت قایق‌ها نسبت به یکدیگر توجه کنید (شکل ب). با توجه به اصل برنولی توضیح دهید چرا قایق‌ها به طرف هم کشیده می‌شوند.



شکل ۳-۳۱ الف قسمتی از بال یک هواپیما را نشان می‌دهد. بال‌های هواپیما طوری طراحی شده‌اند که تندی هوا در بالای بال بیشتر از زیر آن است. در نتیجه، فشار هوای بالای بال، کمتر از فشار هوای زیر آن است. به این ترتیب نیروی بالابر خالصی به بال هواپیما وارد می‌شود.^۱ شکل ۳-۳۱ ب یک سم‌پاش معمولی را نشان می‌دهد که براساس اصل برنولی کار می‌کند. وقتی مخزن پلاستیکی پر از هوا را فشار می‌دهید، جریان سریع هوای دمیده شده، سبب کاهش فشار هوای بالای لولهٔ فرو رفته در شاره می‌شود. در نتیجه شاره از لوله بالا می‌آید و از طریق روزنه‌ای که به آن متصل است به بیرون افشانه می‌شود. در بیشتر شیشه‌های عطر نیز از همین اثر استفاده می‌شود.

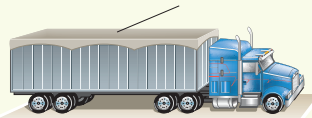
۱- در واقع این نیروی بالابر که براساس اصل برنولی ایجاد می‌شود، بخش کوچکی از نیروی بالابر هواپیما را تأمین می‌کند. بخش عمده‌ترین نیروی بالابر وارد بر هواپیما، منشأ دیگری دارد که موضوع بحث این کتاب نیست.



پرسش ۳-۱۰

پوشش برزنتی صاف و تخت است.

کامیون در حال توقف



پوشش برزنتی پُف کرده است.

کامیون در حال حرکت



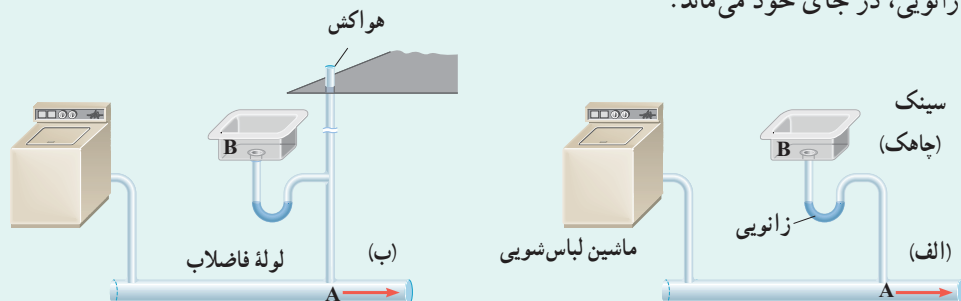
(الف) روزهایی که باد می‌وزد، ارتفاع موج‌های دریا یا اقیانوس بالاتر از ارتفاع میانگین می‌شود. با اصل برنولی چگونه می‌توان افزایش ارتفاع موج را توضیح داد؟

(ب) شکل روبه‌رو کامیونی را در دو وضعیت سکون و در حال حرکت نشان می‌دهد. با استفاده از اصل برنولی توضیح دهید چرا وقتی کامیون در حال حرکت است پوشش برزنتی آن پُف می‌کند.

خوب است بدانید

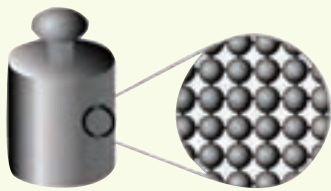
یک مثال عملی از کاربرد اصل برنولی در لوله کشی ساختمان، در شکل زیر نشان داده شده است. ابتدا فرض کنید لوله هواکش در نظر گرفته نشده باشد (شکل الف). جمع شدن آب در زانویی زیر سینک، مشابه یک دریوش عمل می‌کند. این دریوش، مانع از آن می‌شود که گاز تولید شده در لوله فاضلاب، از خروجی سینک بالا آمده و وارد آشپزخانه شود. اما وقتی ماشین لباس شویی آب حاصل از شست و شو را به درون لوله فاضلاب تخلیه می‌کند، طبق اصل برنولی فشار در این لوله (نقطه A) به کمتر از فشار هوا کاهش می‌یابد. از آنجا که فشار در خروجی چاهک (نقطه B) برابر فشار هواست، این اختلاف فشار، آب جمع شده در زانویی را که مشابه یک دریوش عمل می‌کند، خالی کرده و به درون لوله فاضلاب می‌ریزد. به این ترتیب، مانع ورود گاز فاضلاب به آشپزخانه برداشته شده و این گاز با بوی نامطبوع وارد فضای آشپزخانه می‌شود.

با اضافه کردن لوله هواکش، که با هوای بیرون ساختمان مرتبط است، این مشکل رفع می‌شود (شکل ب). زیرا وقتی آب ماشین لباس شویی در لوله فاضلاب تخلیه می‌شود، کاهش فشار در لوله سبب می‌شود تا هوا از طریق هواکش وارد شود. این هوای ورودی، فشار در لوله هواکش و در طرف سمت راست لوله تخلیه سینک را نزدیک به فشار جو نگه می‌دارد، به طوری که آب جمع شده در زانویی، در جای خود می‌ماند.

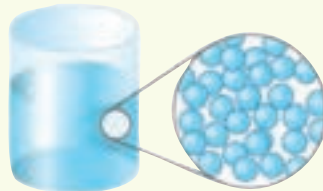


۳-۱ حالت‌های ماده

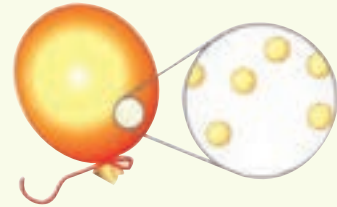
۱ دریافت خود را از شکل‌های زیر بر اساس مفاهیمی که از سه حالت معمول ماده فرا گرفته‌اید بیان کنید.



(ب)



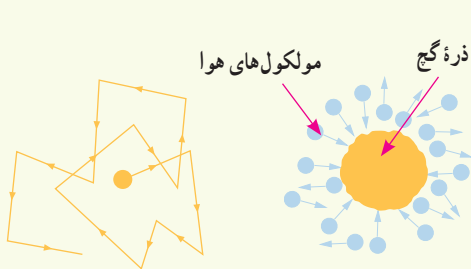
(ب)



(الف)



۲ توضیح دهید از سه حالت مختلف ماده در چه بخش‌هایی از یک دوچرخه و به چه دلیلی استفاده شده است.



۳ هنگام پاک کردن تخته سیاه، ذرات گچ به‌طور نامنظم در هوای اطراف پراکنده شده و حرکت می‌کنند. این حرکت نامنظم ذرات گچ، مطابق شکل روبه‌رو مدل‌سازی شده است.

(الف) چه عاملی باعث حرکت نامنظم ذره‌های گچ می‌شود؟

(ب) مولکول‌های هوا بسیار کوچک‌تر و سبک‌تر از ذره‌های گچ هستند و توسط میکروسکوپ هم دیده نمی‌شوند. توضیح دهید چگونه این تجربه ساده، شهادتی بر وجود مولکول‌های هواست.

۴ توضیح دهید چرا

(الف) پدیده پخش در گازها، سریع‌تر از مایع‌ها انجام می‌شود. در توضیح خود به چند مثال نیز اشاره کنید.

(ب) یک بادکنک پر از باد، حتی اگر دهانه آن نیز کاملاً بسته شده باشد، باز هم رفته‌رفته کم باد می‌شود.

۳-۲ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو

۵ هر یک از موارد زیر را توضیح دهید.

(الف) علوم و فناوری نانو

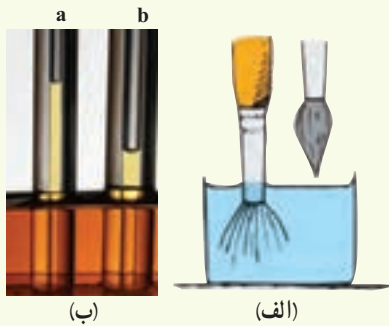
(ب) ابعاد مواد مورد بررسی در علوم و فناوری نانو و اهمیت بررسی مواد در ابعاد نانو

(پ) تفاوت نانو ذره و نانو لایه

۳-۳ نیروهای بین مولکولی

۶ شیشه گران برای چسباندن تکه‌های شیشه به یکدیگر، آنها را آن قدر گرم می‌کنند که نرم شوند. این کار را با توجه به کوتاه‌برد بودن

نیروی جاذبه بین مولکولی توضیح دهید.

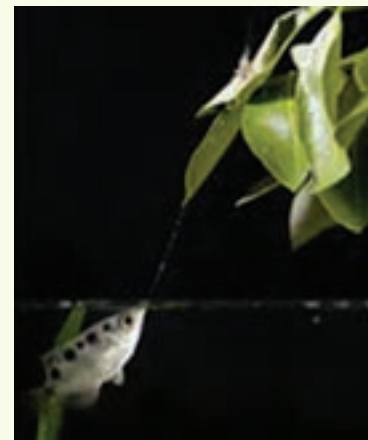
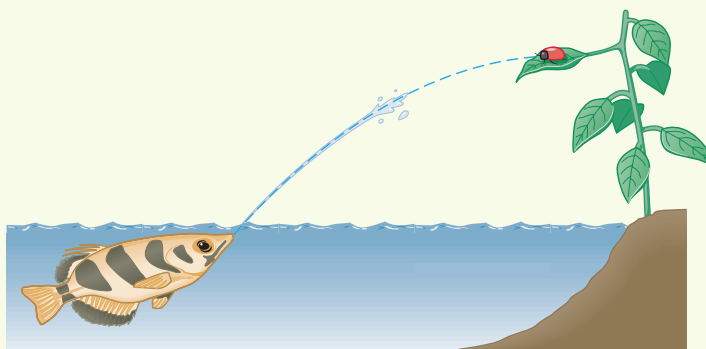


۷ الف) توضیح دهید چرا وقتی قلم مویی را از آب بیرون می کشیم (شکل الف)، موه‌های آن به هم می چسبند. (اشاره : به پدیده کشش سطحی در مایع‌ها توجه کنید.)
 ب) شکل (ب) دو لوله موئین هم جنس را نشان می دهد که درون مایعی قرار دارند. چرا ارتفاع مایع درون لوله b از دو لوله دیگر کمتر است؟ با توجه به شکل، نیروی هم چسبی مایع را با نیروی دگر چسبی مایع و لوله های موئین مقایسه کنید.

۸ تغییرات اقلیمی سال های اخیر در کشورهای غرب ایران، پدیده خطرناک ریزگردها را به مناطق وسیعی از کشورمان گسترش داده است. چگالی ریزگردها در حالتی که ته نشین شده باشد تقریباً دو برابر چگالی آب است.
 الف) چرا بادهای نسبتاً ضعیف قادرند توده های بزرگی از ریزگردها را به حرکت درآورند در حالی که توفان های شدید دریایی تنها مقدار اندکی آب را به صورت قطره های ریز به طرف بالا می پاشند؟
 ب) بررسی کنید برای مقابله با این پدیده و مهار آن، چه تدابیری را می توان اندیشید.

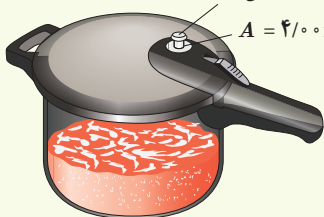


۹ نوعی ماهی به نام ماهی کمان گیر با جمع کردن آب در دهان خود و پرتاب آن به سوی حشراتی که در بیرون از آب، روی گیاهان نشسته اند، آنها را شکار می کند و می خورد (شکل الف). هدف گیری آنها به اندازه ای دقیق است که معمولاً در این کار اشتباه نمی کنند.
 کدام ویژگی فیزیکی آب این امکان را به ماهی کمان گیر برای شکار می دهد؟



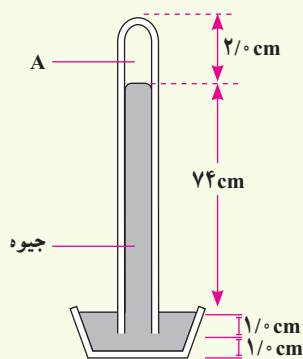
وزنه ای که روی روزنه خروج
 بخار آب قرار داده می شود

$$A = 4/00 \text{ mm}^2$$



۳-۴ فشار در شاره ها

۱۰ مساحت روزنه خروج بخار آب، روی درب زودپزی $4/00 \text{ mm}^2$ است (شکل روبه رو).
 جرم وزنه ای که روی این روزنه باید گذاشت چقدر باشد تا فشار داخل آن در 2 atm نگه داشته شود؟ فشار بیرون دیگ زودپز را 1 atm بگیرید.



۱۱ شکل روبه‌رو یک جوسنج ساده جیوه‌ای را نشان می‌دهد. (ضخامت دیواره شیشه‌ای را نادیده بگیرید.)

(الف) در ناحیه A چه چیزی وجود دارد؟

(ب) چه عاملی جیوه را درون لوله نگه می‌دارد؟

(پ) فشار هوای محیطی که این جوسنج در آنجا قرار دارد چقدر است؟

(ت) اگر این جوسنج را بالای کوهی ببریم چه تغییری در ارتفاع ستون جیوه درون لوله رخ می‌دهد؟ دلیل آن را توضیح دهید.

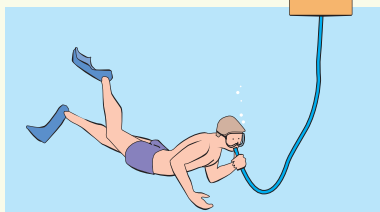
۱۲ (الف) ارتفاع چهار شهر مرتفع ایران از سطح دریا، به شرح زیر است :

فریدون شهر : ۲۶۱۲m سمیرم : ۲۴۳۴m بروجن : ۲۲۶۵m شهرکرد : ۲۰۷۲m

با توجه به نمودار شکل ۱۸-۳، فشار تقریبی هوا را در این چهار شهر بنویسید.

(ب) چگالی میانگین هوا تا ارتفاع ۳ کیلومتری از سطح دریای آزاد حدود $\bar{\rho} = 1.0 \text{ kg/m}^3$ است. با استفاده از رابطه

$P = P_0 - \bar{\rho}gh$ فشار هوا را در این شهرها حساب کنید و مقادیر به دست آمده را با نتیجه قسمت الف مقایسه کنید.



۱۳ غواص‌ها می‌توانند با قرار دادن یک سر لوله‌ای در دهان خود، در حالی که سر دیگر

آن از آب بیرون است، تا عمق بیشینه‌ای در آب فرو روند و نفس بکشند (شکل روبه‌رو).

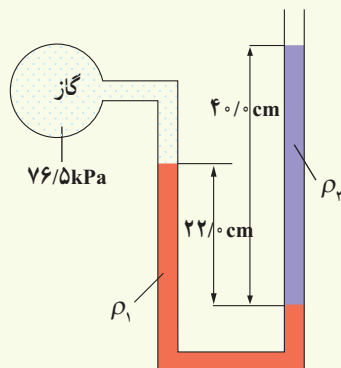
با گذشتن از این عمق، اختلاف فشار درون و بیرون ریه غواص افزایش می‌یابد و غواص را ناراحت می‌کند. چون هوای درون ریه از طریق لوله با هوای بیرون ارتباط دارد، فشار

هوای درون ریه، همان فشار جو است در حالی که فشار وارد بر قفسه سینه او، همان فشار در عمق آب است. در عمق ۶/۱۵m از

سطح آب، اختلاف فشار درون ریه غواص با فشار وارد بر قفسه سینه او چقدر است؟ (خوب است بدانید که غواص‌های مجهز به

مخزن هوای فشرده می‌توانند تا عمق بیشتری در آب فرو روند، زیرا فشار هوای درون ریه آنها با افزایش عمق، همپای فشار آب بر

سطح بیرونی بدن می‌شود.)

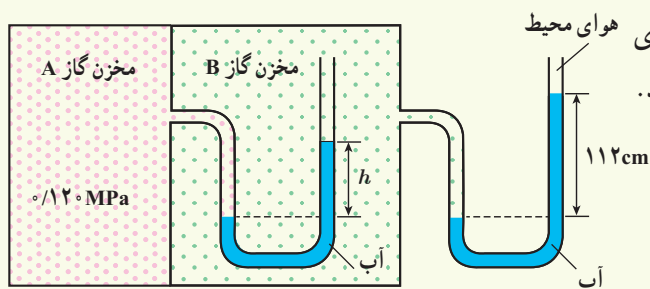


۱۴ درون لوله U شکلی که به یک مخزن محتوی گاز وصل شده است جیوه

($\rho_1 = 13.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) و مایعی با چگالی نامعلوم ρ_2 وجود دارد (شکل

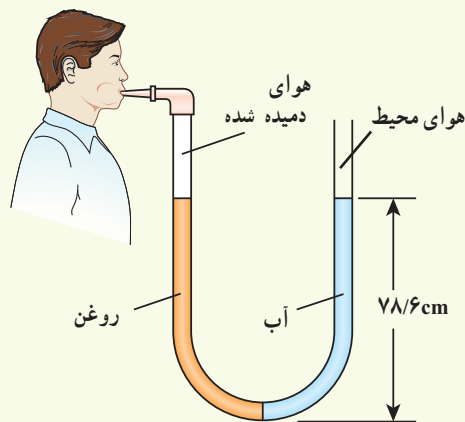
روبه‌رو).

اگر فشار هوای بیرون لوله U شکل ۱۰۱ kPa باشد، چگالی مایع را تعیین کنید.



۱۵ در شکل روبه‌رو مقدار h چند سانتی‌متر است؟ فشار هوای محیط

محیط را ۱۰۱ kPa و چگالی آب را 1000 kg/m^3 بگیرید.

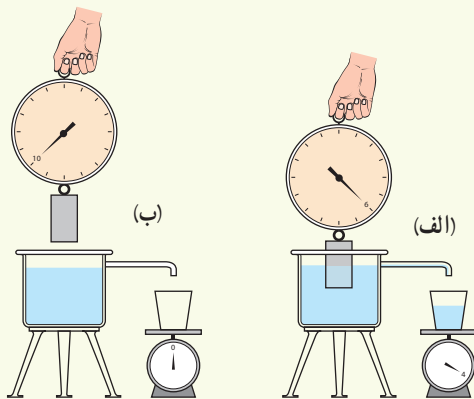


۱۶ لوله U شکلی را در نظر بگیرید که محتوی حجم مساوی از آب و روغن است (شکل روبه‌رو). با توجه به اطلاعات روی شکل، فشار پیمانه‌ای هوای درون ریه شخصی که از شاخه سمت چپ لوله درون آن دمیده، چقدر است؟ چگالی روغن را 0.85 kg/m^3 بگیرید.

۳-۵ شناوری و اصل ارشمیدس

۱۷ دو قوطی نوشابه، یکی معمولی و دیگری رژیمی را در ظرفی محتوی آب بگذارید. متوجه خواهید شد که نوشابه رژیمی شناور می‌ماند در حالی که نوشابه معمولی فرو می‌رود. با استفاده از اصل ارشمیدس، این نتیجه را توضیح دهید. (اشاره: چگالی شیرین کننده‌های مصنوعی مورد استفاده در نوشابه‌های رژیمی کمتر از شکر است.)

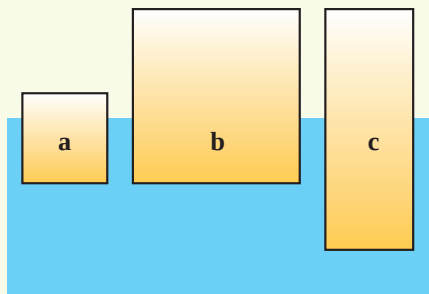
۱۸ دریافت خود را از شکل‌های الف و ب بنویسید.



۱۹ سه جسم a، b و c با چگالی‌های متفاوت، مطابق شکل روبه‌رو درون آب شناورند. چگالی این سه جسم را با یکدیگر مقایسه کنید.

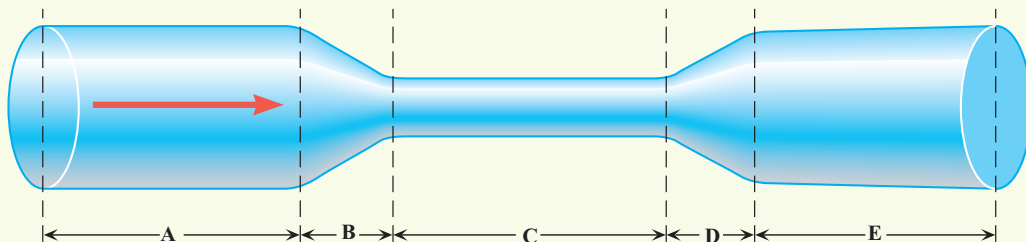
۲۰ توضیح دهید چرا نیروی شناوری برای جسمی که در یک شاره قرار دارد رو به بالاست.

۲۱ توضیح دهید چه موقع نیروی شناوری وارد بر یک شناگر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.



۳-۶ شاره در حرکت و اصل برنولی

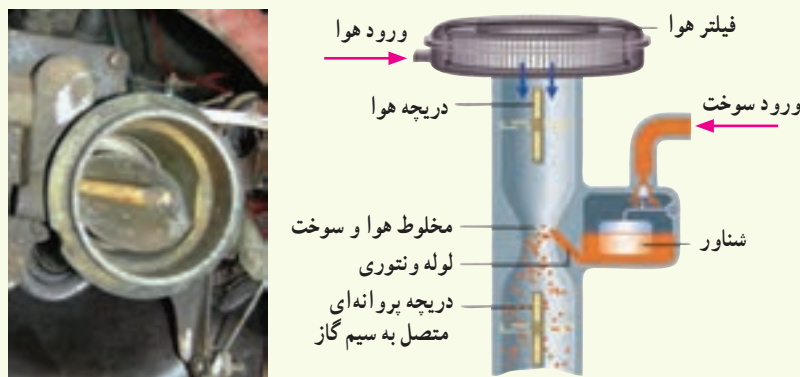
۲۲ در لوله‌ای پراز آب مطابق شکل زیر، آب از چپ به راست در جریان است. روی این لوله ۵ قسمت (A و B، C، D، E) نشان شده است. الف) در کدام یک از قسمت‌های لوله، تندی آب، در حال افزایش، در حال کاهش، یا ثابت است؟ ب) تندی آب را در قسمت‌های A، C و E لوله با یکدیگر مقایسه کنید.



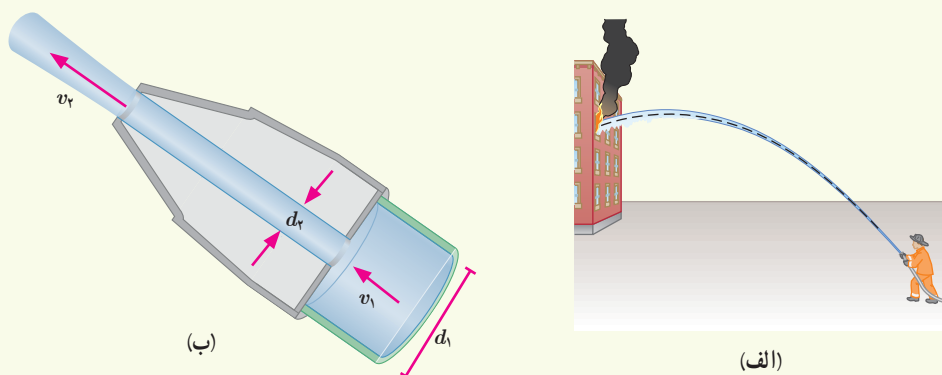
۲۳ دو نوار کاغذی به طول تقریبی ۱۰ cm را مطابق شکل (الف) به انتهای یک نی نوشابه بچسبانید. وقتی مطابق شکل (ب) به درون نی دمیده می شود نوارهای کاغذی به طرف یکدیگر جذب می شوند. با توجه به اصل برنولی دلیل این پدیده را توضیح دهید.



۲۴ شکل زیر کاربراتور یک موتور بنزینی قدیمی را نشان می دهد. حجم هوایی که وارد کاربراتور می شود توسط دریچه پروانه ای که به سیم گاز خودرو وصل شده، قابل تنظیم است. با توجه به کاربرد اصل برنولی در ساختمان یک کاربراتور، توضیح دهید چرا با فشردن بیشتر پدال گاز، دور موتور خودرو افزایش می یابد و خودرو می تواند سریع تر حرکت کند.

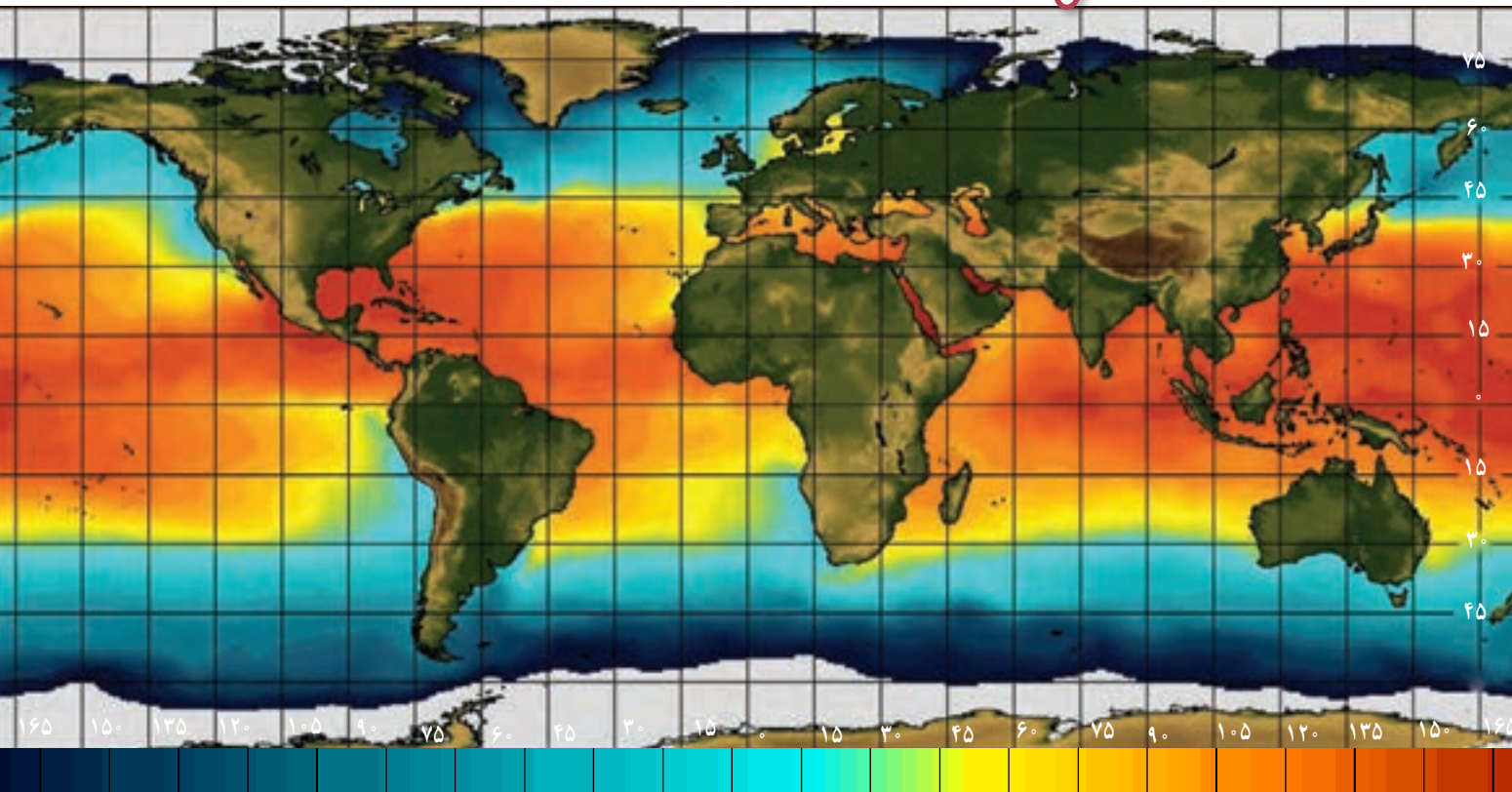


۲۵ شکل (الف) آتش نشانی را در حال خاموش کردن آتش از فاصله نسبتاً دوری نشان می دهد. نمایی بزرگ شده از شیر بسته شده به انتهای لوله آتش نشانی در شکل (ب) نشان داده شده است. اگر آب با تندی $v_1 = 1/5 \text{ m/s}$ از لوله وارد شیر شود و قطر ورودی شیر $d_1 = 9/6 \text{ cm}$ و قطر قسمت خروجی آن $d_2 = 2/5 \text{ cm}$ باشد، تندی خروج آب را از شیر پیدا کنید.



فصل ۴

دما و گرما



هواشناسان براساس تصویرهای ماهواره‌ای وضعیت هوا را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از بخش‌های عمده گزارش آنها، اعلام دمای مناطق مختلف زمین است. این تصویر ماهواره‌ای، دمای سطح کره زمین را در یک لحظه خاص از یک روز نمایش می‌دهد. رنگ‌ها نشان‌دهنده گستره دمایی از -63°C تا 37°C است.

چگونه آب می‌تواند آتش را خاموش کند؟ چرا آتش‌نشان‌ها لباس‌های براق روشن می‌پوشند؟ چرا پارچه خنثی که روی بند پهن شده است، ساعتی بعد خشک می‌شود؟ چگونه بادهای ساحلی به وجود می‌آیند؟ چگونه شیشه‌های دوجداره مانع از اتلاف گرما می‌شوند؟ چگونه با اسپری کردن باغ‌های میوه می‌توان از یخ‌زدن آنها در شبی سرد جلوگیری کرد؟ چرا بیشتر پل‌ها به صورت بخش‌هایی مجزا ساخته می‌شوند که فاصله کمی بین آنها وجود دارد؟ چگونه موهای خرس‌های قطبی می‌تواند آنها را از سرمای کشنده قطب در امان نگه دارد؟ پاسخ این پرسش‌ها و بسیاری از پرسش‌های مشابه را می‌توان با بررسی مفهوم دما و گرما و اثرهای آن روی ماده به دست آورد.

در کتاب‌های علوم با مفهوم‌های دما و گرما به طور ساده آشنا شدید. در این فصل، ضمن گسترش و توضیح بیشتر این مفاهیم به بررسی مواردی از قبیل دماسنجی و اثر تغییر دما بر حجم مواد می‌پردازیم. افزون بر اینها، گرماسنجی و اندازه‌گیری گرمای ویژه، تغییر حالت مواد و گرمای ذوب و تبخیر را بررسی می‌کنیم و راه‌های انتقال گرما را مورد بحث قرار می‌دهیم و سرانجام قانون گازها را بررسی می‌کنیم.

۱-۴ دما و دماسنجی

وقتی شخص بیماری به پزشک مراجعه می‌کند، یکی از مهم‌ترین اطلاعات برای پزشک، تعیین دمای بدن بیمار است. برای این منظور پزشک از دماسنج استفاده می‌کند. برای نگهداری مواد غذایی و جلوگیری از فاسد شدن آنها، دمای یخچال بسیار مهم است و اگر دما نامناسب باشد، ممکن است در زمان کوتاهی مواد غذایی فاسد شود. بنابراین، ایجاد دمای معین و حفظ آن در فناوری و صنعت و پژوهش‌های علمی، اهمیت فراوان دارد.



شکل ۴-۱ یک نمونه دماسنج الکلی

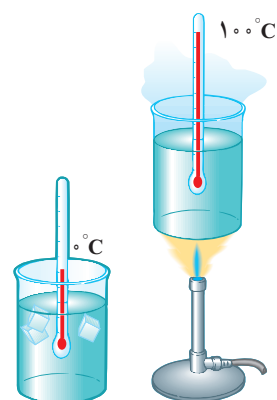
در کتاب‌های علوم خود دیدید دما کمیتی است که میزان سردی و گرمی اجسام را مشخص می‌کند. برای اندازه‌گیری دما لازم است مقیاس دمایی داشته باشیم و برای این کار می‌توانیم از هر مشخصه قابل اندازه‌گیری بهره بگیریم که با گرمی و سردی جسم تغییر می‌کند. به این ویژگی، اصطلاحاً **کمیت دماسنجی** می‌گویند. تغییر کمیت دماسنجی، اساس کار دماسنج‌هاست. ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع دماسنج، دماسنج‌های جیوه‌ای^۱ و الکلی است که در کتاب‌های علوم با آنها آشنا شده‌اید. در این دماسنج‌ها، کمیت دماسنجی، ارتفاع مایع درون لوله دماسنج است؛ زیرا به جز چند مورد استثنا تمام مواد با افزایش دما، منبسط و با کاهش آن منقبض می‌شوند. شکل ۴-۱ نمونه‌ای از یک دماسنج الکلی را نشان می‌دهد.

مقیاس‌های دما: یکی از مقیاس‌های متداول دما، مقیاس دما برحسب درجه سلسیوس است. این مقیاس مبتنی بر دو نقطه ثابت است: یکی دمایی که در آن آب خالص در فشار جو متعارف (۱ atm) شروع به یخ‌زدن می‌کند و دیگری دمایی که آب خالص در فشار جو متعارف در حال جوشیدن است. به نقطه اول، عدد صفر و به نقطه دوم، عدد ۱۰۰ را اختصاص می‌دهند و فاصله بین این دو را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم می‌کنند و هر قسمت را ۱ درجه می‌نامند (شکل ۴-۲). قبلاً به چنین دماسنجی، دماسنج با مقیاس سانتی‌گراد^۲ گفته می‌شد. یکای درجه سلسیوس را با نماد °C، و دما برحسب درجه سلسیوس را معمولاً با θ نمایش می‌دهند.

از سال ۱۹۵۴ میلادی بنا به دلایل عملی به جای سلسیوس، یکای دیگری به نام کلونین به عنوان مقیاس بین‌المللی دما انتخاب شد. این یکا، با نماد K نمایش داده می‌شود. دما برحسب کلونین را معمولاً با T نشان می‌دهند. رابطه میان دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلونین به صورت زیر است:

$$T = \theta + 273/15 \quad (۴-۱)$$

بنا به رابطه ۴-۱ صفر کلونین برابر $273/15^\circ\text{C}$ است که این کمترین دمای ممکن نیز هست^۳. اما برای دما، حد بالایی وجود ندارد. گستره برخی از دماهای مشهور در شکل ۴-۳ برحسب کلونین نشان داده شده است.

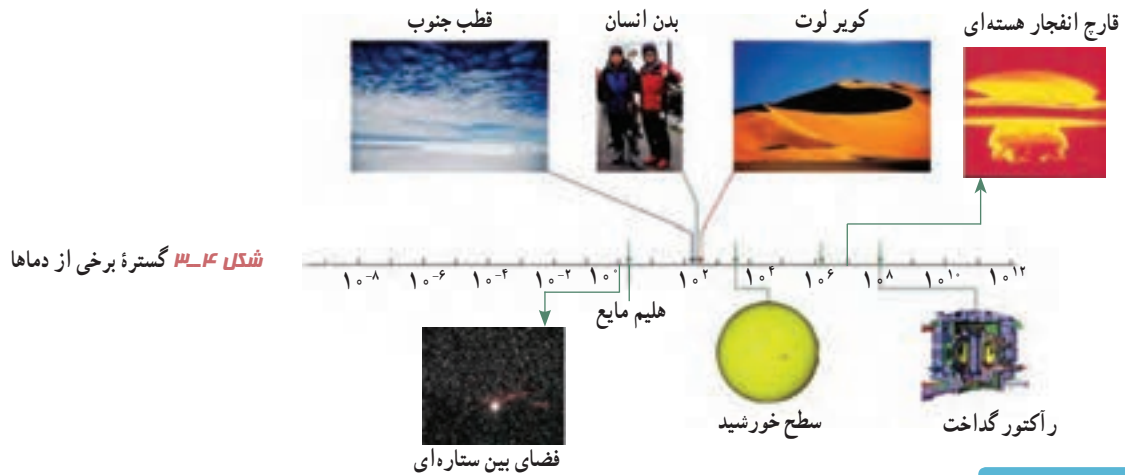


شکل ۴-۲ شکلی طرح‌وار از مقیاس‌بندی دما

۱- جیوه بسیار سمی است و از این‌رو امروزه غالباً از الکل در دماسنج‌ها استفاده می‌شود.

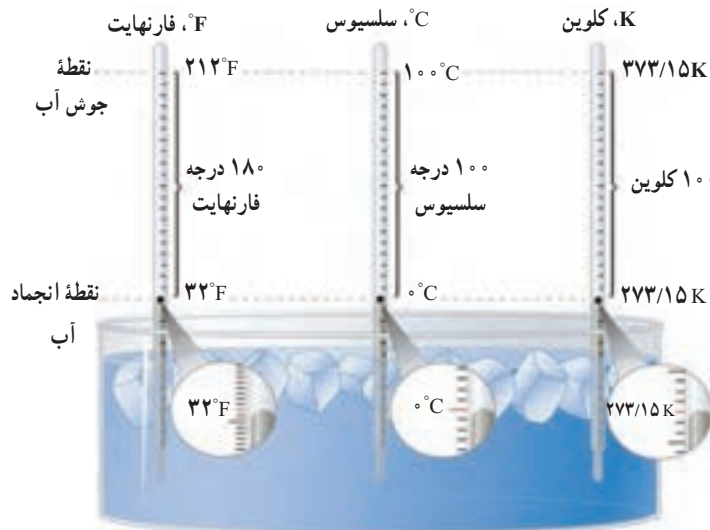
۲- برگرفته از centi به معنای یک‌صدم و grade به معنای درجه.

۳- صفر کلونین به طور دقیق برابر $273/15^\circ\text{C}$ است ولی برای محاسبه‌های این کتاب همان مقدار تقریبی 273°C در نظر گرفته می‌شود.



تمرین ۱-۴

نشان دهید که تغییر دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلونین با هم برابر است.



یکای رایج دیگر دما که هنوز هم در صنعت و هواشناسی کاربرد دارد، فارنهایت است. شکل ۴-۴ مقایسه‌ای از این سه یکای دما را نشان می‌دهد. با کمی دقت متوجه می‌شویم که رابطه مقیاس دمای فارنهایت (F) و سلسیوس (θ) به صورت $F = \frac{9}{5}\theta + 32$ است.

تمرین ۲-۴

الف) دمای بدن یک انسان سالم تقریباً 37°C است. این دما را برحسب کلونین و فارنهایت بنویسید.
 ب) گرم‌ترین نقطه روی زمین، ناحیه‌ای در کویر لوت است که دمای آن تا حدود 70°C و سردترین نقطه در قطب جنوب است که دمای آن تا -89°C گزارش شده است. این دماها را برحسب کلونین و فارنهایت به دست آورید.

فعالیت ۱-۴

تحقیق کنید برای نگهداری یاخته‌های بنیادی بندناف خون، به چه دمایی نیازمندیم. این دما چگونه ایجاد و حفظ می‌شود؟

دماسنج‌های معیار^۱: امروزه از انواع دماسنج‌ها در زندگی روزمره استفاده می‌شود. برخی از آنها در شکل‌های ۴-۵ نشان داده شده است.



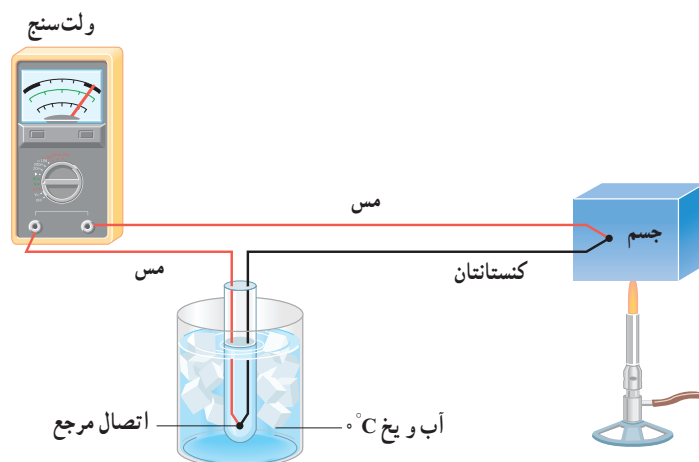
(ب) دماسنج تابشی که بر اساس آشکارسازی شدت تابش گرمایی خروجی از پوست کار می‌کند.



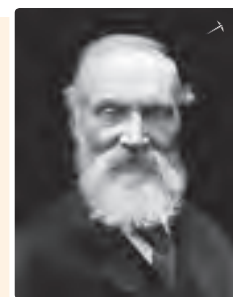
(الف) برخی از دماسنج‌ها که در اطراف خود مشاهده می‌کنید.

شکل ۴-۵

دانشمندان برای کارهای علمی، سه دماسنج را به‌عنوان دماسنج‌های معیار برای اندازه‌گیری گستره دماهای مختلف پذیرفته‌اند: دماسنج گازی، دماسنج مقاومت پلاتینی و تفسنج (پیرومتر). اساس کار دماسنج گازی مبتنی بر قانون گازهای کامل است و همچنین اساس کار تفسنج، بر تابش گرمایی مبتنی است که هر دو در بخش‌های آینده بررسی می‌شود. با اصول کار دماسنج‌های مقاومت پلاتینی نیز در سال آینده آشنا خواهید شد. یکی از دماسنج‌های مهم دیگر که تا پیش از سال ۱۹۹۰ میلادی جزو دماسنج‌های معیار شمرده می‌شد، دماسنج ترموکوپل است که به دلیل دقت کمتر آن نسبت به دماسنج‌های بیان شده، از مجموعه دماسنج‌های معیار کنار گذاشته شد؛ ولی این دماسنج همچنان کاربرد فراوانی در صنعت و آزمایشگاه‌ها دارد. از این‌رو، در ادامه به معرفی این دماسنج می‌پردازیم. کمیت دماسنجی این دماسنج، ولتاژ است. نمونه‌ای طرح‌وار از این دماسنج در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل



ویلیام تامسون کلون^۲

ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و مهندس بریتانیایی در ۲۸ ژوئن ۱۸۲۴م. در شهر بلفاست ایرلند به دنیا آمد. او تحصیلات دانشگاهی خود را در دانشگاه گلاسکو به انجام رسانید و در این دوران، غیر از اختراعات مختلف، کارهای مهمی در تحلیل ریاضی‌وار الکتریسته و نیز فرمول‌بندی قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام داد و نقشی مهم در احیای رشته فیزیک در عصر مدرن ایفا کرد. با این حال، عمده شهرت کلون به خاطر تعیین دقیق صفر مطلق برابر با $273/15^{\circ}\text{C}$ است و این در حالی است که پیش از او *سدهی کارنوی* فرانسوی در سال ۱۸۲۴، یعنی همان سالی که کلون زاده شد، مقدار $267-$ را برای دمای صفر مطلق پیشنهاد داده بود. با این وصف، یکای دما در SI به افتخار این کار کلون، به اسم او نامگذاری شده است. او همچنین به خاطر دستاوردهای علمی خود از سال ۱۸۹۲ به *لرد کلون* ملقب شد و اولین دانشمند بریتانیایی نام گرفت که به مجلس *لردها* راه یافت. کلون در ۱۷ دسامبر ۱۹۰۷ م. در سن ۸۳ سالگی در اسکاتلند دیده از جهان فرو بست.

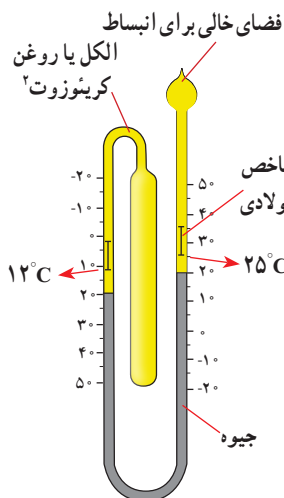
۱- Standard Thermometer

۲- William Thomson Baron Kelvin



شکل ۷-۴ در این تصویر دمای یک گرماسنج به روش الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود.

مطابق این شکل، دو سیم فلزی غیر هم‌جنس مانند مس و کنستانتان از طرفی در دمای ذوب یخ نگه‌داشته شده، و از طرف دیگر در مکانی به هم متصل‌اند که می‌خواهیم دمای آن را به‌دست آوریم. این مجموعه با سیم‌های مسی رابط به یک ولت‌سنج بسته می‌شود. با تغییر دمای محل مورد اندازه‌گیری، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد، تغییر می‌کند. اگر آزمایش را چندین بار و برای دماهای متفاوت تکرار کنیم، می‌توانیم ولتاژهای مربوط به هر دمایی را مشخص کنیم. گستره دماسنجی یک ترموکوپل به جنس سیم‌های آن بستگی دارد؛ مثلاً در یکی از انواع ترموکوپل‌ها که جنس سیم‌ها از آلیاژهای خاصی^۱ است، گستره دماسنجی از 270°C تا 1372°C است. مزیت ترموکوپل این است که به دلیل جرم کوچک محل اتصال، خیلی سریع با دستگاهی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود به حالت تعادل گرمایی می‌رسد و به علاوه می‌تواند در مدارهای الکترونیکی به کار رود که در بسیاری از وسایل صنعتی، گرمایشی و سرمایشی یافت می‌شود. شکل ۷-۴ روشی از اندازه‌گیری دما با دماسنج‌هایی از این دست را نشان می‌دهد.



فعالیت ۲-۴

نوع ویژه‌ای از دماسنج‌های مایعی که بیشینه و کمینه دما را در یک مدت زمان معین نشان می‌دهد، دماسنج بیشینه - کمینه نام دارد. از این دماسنج‌ها معمولاً در مراکز پرورش گل و گیاه، باغداری، هواشناسی و ... استفاده می‌شود. در مورد چگونگی کار این دماسنج‌ها تحقیق کنید.

۲-۴ انبساط گرمایی



شکل ۸-۴ ماده‌ای که دندان را پر می‌کند باید همان مشخصه‌های گرمایی دندان را داشته باشد.

اگر در یک ظرف شیشه‌ای محکم باشد، معمولاً برای باز کردن در ظرف روی آن آب داغ می‌ریزیم. وقتی دو لیوان شیشه‌ای درهم، گیر کرده باشند، با ریختن آب سرد در لیوان داخلی و گذاشتن لیوان بیرونی در آب گرم، می‌توانیم دو لیوان را از هم جدا کنیم. وقتی دندانپزشک سوراخ دندانی را پر می‌کند، باید ماده پرکننده دندان همان مشخصه‌های انبساط گرمایی دندان را داشته باشد (شکل ۸-۴)، زیرا در غیر این صورت، خوردن یک بستنی سرد و در پی آن نوشیدن چای داغ، بسیار دردناک خواهد بود و ممکن است سبب شکستن دندان نیز بشود.

chromel (۹۰٪ Ni & ۱۰٪ Cr) آلیاژ کرومل (۹۵٪ Ni & ۲٪ Al & ۲٪ Mn & ۱٪ Si) Alumeل آلیاژ آلومل - ۱

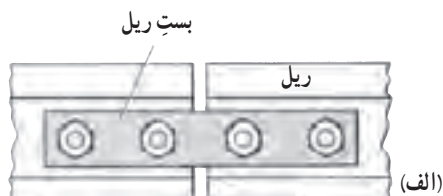
۲- creosote

پرسش ۱-۴

الف) چرا بهتر است قفل و کلید یک در، هم جنس باشند؟
 ب) چرا در برخی از فصل‌های سال، بعضی از درب‌ها در چارچوب خود گیر می‌کنند؟

بیشتر اجسام با افزایش دما حجمشان زیاد و با کاهش دما حجمشان کم می‌شود. همان‌طور که دیدیم این پدیده اساس ساخت بعضی از دماسنج‌هاست. بی‌توجهی به پدیده انبساط در ساختن پل‌ها، ساختمان‌ها، خط‌آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

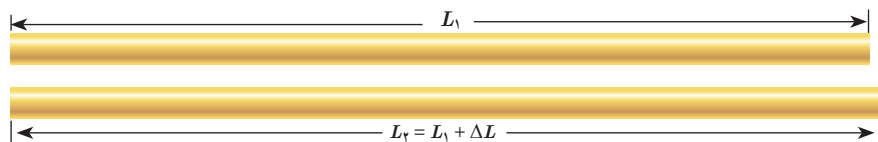
فعالیت ۳-۴



(ب) بست ریل

۱) شکل (الف) طرحی از دو قسمت متوالی خط‌آهن (ریل) راه‌آهن‌های قدیمی و شکل (ب) تصویر واقعی از آن را در گذشته نشان می‌دهد. اگر فاصله خالی بین این دو قسمت به حد کافی زیاد نمی‌بود، چه مشکلی پیش می‌آمد؟
 ۲) امروزه بین قسمت‌های متوالی خط‌آهن فاصله‌ای در نظر گرفته نمی‌شود و این قسمت‌ها پشت سرهم جوشکاری می‌شوند. تحقیق کنید در این روش چگونه مشکل ناشی از انبساط در یک روز گرم تابستانی برطرف می‌شود؟

انبساط طولی: میله‌ای فلزی به طول اولیه L_1 را در نظر بگیرید. اگر دمای میله را به اندازه ΔT افزایش دهیم، تجربه نشان می‌دهد که طول میله به اندازه $L_2 = L_1 + \Delta L$ افزایش می‌یابد (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹ انبساط گرمایی
 میله‌ای به طول اولیه L_1

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هرچه تغییر دمای میله فلزی بیشتر باشد، افزایش طول بیشتر است و هرچه طول اولیه میله بزرگ‌تر باشد، به ازای یک تغییر دمای مشخص افزایش طول بیشتر خواهد بود. همچنین اگر دمای دو میله هم‌اندازه که جنس‌های آنها با هم متفاوت است را به یک اندازه افزایش دهیم، میزان افزایش طول آنها متفاوت است. بنابراین، در تغییرات دمایی به نسبت کوچک، ΔL را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \quad (۲-۴)$$

به α ضریب انبساط طولی میله می‌گویند که به جنس میله بستگی دارد.
 در رابطه ۲-۴، ΔL و L_1 بر حسب متر (m)، ΔT بر حسب کلوین (K) یا درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$) و از آنجا یکای α ، بر کلوین ($1/\text{K}$) یا بر درجه سلسیوس ($1/^{\circ}\text{C}$) تعیین می‌شود.

ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۱-۴ داده شده است. توجه کنید که مقادیر داده شده برای α در جدول بسیار کوچک است. همچنین ضریب انبساط طولی α علاوه بر جنس ماده، به دما نیز اندکی وابسته است، اما به دلیل اینکه این وابستگی ناچیز است، معمولاً آن را در محاسبات معمولی نادیده می‌گیریم.

جدول ۱-۴ ضریب انبساط طولی برخی اجسام			
ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$	ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$
الماس	$1/2 \times 10^{-6}$	مس	17×10^{-6}
شیشه پیرکس	$3/2 \times 10^{-6}$	برنج	19×10^{-6}
شیشه معمولی	$9-12 \times 10^{-6}$	آلومینیم	23×10^{-6}
فولاد	$11-13 \times 10^{-6}$	سرب	29×10^{-6}
بتون	$10-14 \times 10^{-6}$	یخ (در $^{\circ}C$)	51×10^{-6}

مثال ۱-۴

طول یک پل معلق^۱ (شکل الف)، ۱۱۵۸ m است. این پل از نوعی فولاد با $1/^{\circ}C$ 13×10^{-6} ساخته شده است. فرض کنید کمترین دمای ممکن $5^{\circ}C$ و بیشترین دمای ممکن $5^{\circ}C$ باشد. بیشترین تغییر طول ممکن پل چقدر است؟
پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = (13 \times 10^{-6} / ^{\circ}C)(1158m)(10^{\circ}C) = 1/5m$$

تغییر طول ۱/۵ m مقدار نسبتاً زیادی است. بدیهی است که در عمل نمی‌توان فضایی خالی به طول ۱/۵ m را برای این تغییر طول روی پل در نظر گرفت. برای رفع این مشکل از تعدادی *بست/انبساطی/نگشتی*^۲ که از جنس فلز هستند استفاده می‌کنند. شکل (ب)، نوعی از این بست‌ها و شکل (پ)، نمونه‌ای دیگر از این بست‌ها را نشان می‌دهد.



(پ) نمونه‌ای دیگر از بست‌های انبساطی



(ب) نمونه‌ای از بست‌های انبساطی



(الف) تصویری از یک پل معلق

۱- پل معلق فولادی مکیناک (Macinac) در میشیگان آمریکا

۲- Finger Expansion Joint

آزمایش ۴-۱



هدف: اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی

وسایلهای موردنیاز: دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی، چند لوله فلزی توخالی، ارلن با لوله جانبی و درپوش، لوله لاستیکی، دماسنج، مجموعه پایه و گیره و چراغ الکلی.

شرح آزمایش:

۱- طول لوله توخالی موردنظر را اندازه بگیرید (L_1) و لوله را روی دستگاه نصب کنید.

۲- در ارلن مقداری آب بریزید و درپوش آن را بگذارید.

۳- دمای محیط را بخوانید (θ_1) و دماسنج را در جای نشان داده شده قرار دهید.

۴- ارلن را گرما دهید تا آب به جوش آید.

۵- آن قدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لوله توخالی کاملاً گرم شود و سپس دمای دماسنج را بخوانید (θ_2).

۶- افزایش طول میله توخالی را با ریزسنج متصل به دستگاه اندازه بگیرید (ΔL).

۷- با استفاده از رابطه ۴-۲ ضریب انبساط طولی را به دست آورید.

۸- می‌توانید این آزمایش را برای میله‌های توخالی دیگر، تکرار کنید.

دماسنج نواری دوفلزه: نوار دوفلزه (بی‌متال^۱) از دو تیغه فلزی متفاوت، مانند برنج و آهن ساخته

شده است که سرتاسر به هم جوش داده شده یا پرچ شده‌اند. هرگاه این نوار، گرم یا سرد شود، نوار مانند

شکل ۴-۱۰ (الف) خم می‌شود (شکل با اندکی اغراق رسم شده است). از این ویژگی می‌توان برای

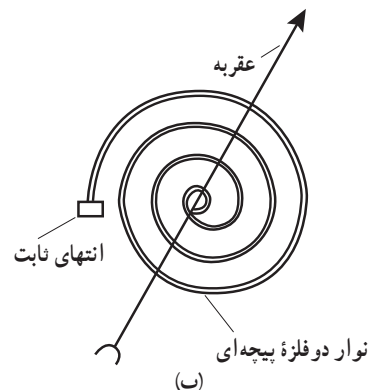
دماسنجی و ساختن دماسنج استفاده کرد. به این نوع دماسنج‌ها، دماسنج نواری دوفلزه گفته می‌شود.

شکل ۴-۱۰ (ب)، طرحی از این دماسنج را که در آن از یک نوار دوفلزه پیچیده‌ای استفاده شده است،

نشان می‌دهد و شکل ۴-۱۰ (پ)، تصویری واقعی از این نوع دماسنج است.



(پ)



(ب)



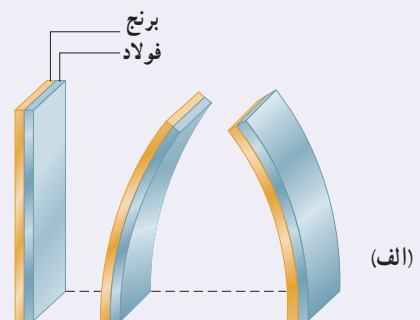
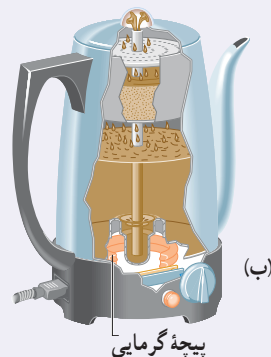
(الف)

شکل ۴-۱۰: (الف) با گرم و سرد شدن، نوار دوفلزه در جهت‌های مخالفی خم می‌شود.

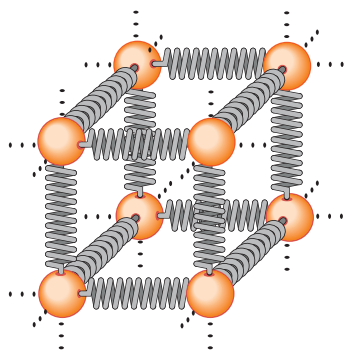
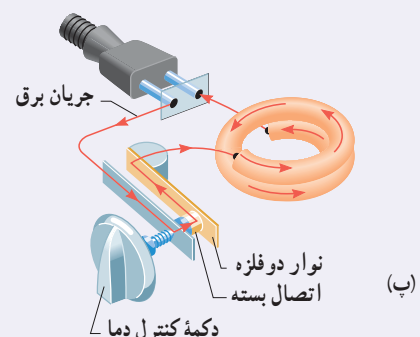
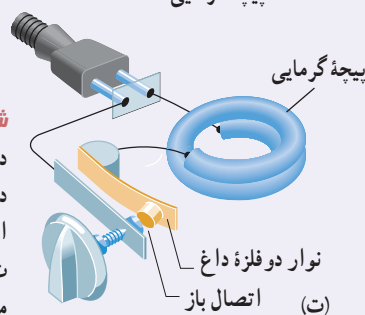
(ب) یک نوار دوفلزه پیچیده‌ای (پ) یک دماسنج نواری واقعی

^۱ bi-metal

دماپا (ترموستات): در دماسنج نواری دوفلزه دیدیم که یک نوار دو فلزه با افزایش یا کاهش دما خم می‌شود. این خم‌شدگی طوری است که در هنگام گرم‌شدن، تیغه با ضریب انبساط بیشتر، کمان خارجی و تیغه دیگر کمان داخلی را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۱-۴ الف). از این ویژگی برای ساخت نوعی دماپا (ترموستات) استفاده می‌شود. دماپاها در بسیاری از وسایل الکتریکی مانند یخچال، آبگرم‌کن، کتری برقی و ... کاربرد دارند (شکل ۱۱-۴ ب). در واقع دماپا کلیدی الکتریکی است که در آن، قطع و وصل جریان با استفاده از حسگرهای گرمایی انجام می‌شود. اغلب از نوارهای دوفلزه به عنوان حسگرهای گرمایی در دماپا استفاده می‌شود (شکل ۱۱-۴ ب). در مدار ساده نشان داده شده در شکل ۱۱-۴ پ، عبور جریان الکتریکی از کتری برقی باعث گرم‌شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازه معینی برسد، بر اثر خم‌شدن نوار، جریان قطع شده و کتری برقی خاموش می‌شود (شکل ۱۱-۴ ت). با خاموش شدن کتری، دمای تیغه کاهش می‌یابد و نوار دوباره به شکل وضعیت قبلی خود بازمی‌گردد و به این ترتیب، دوباره مدار وصل شده و کتری برقی روشن می‌شود.



شکل ۱۱-۴ الف تیغه دوفلزه با تغییر دما در جهت‌های مختلفی خم می‌شود، ب) دماپا در یک کتری برقی، پ) با برقرار شدن جریان الکتریکی، نوار دوفلزه گرم می‌شود. ت) سپس نوار خم شده و اتصال را قطع می‌کند.



شکل ۱۲-۴ در جامدها، نیروی بین اتمی مثل فنر عمل می‌کند.

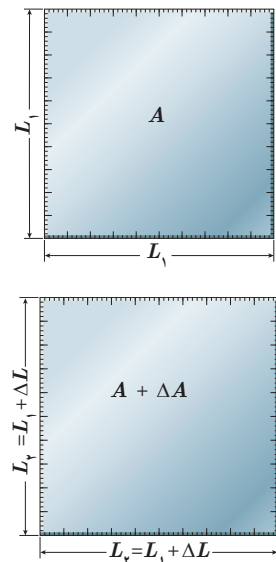
توجیه انبساط گرمایی، مبتنی بر دیدگاه میکروسکوپی است. انبساط گرمایی یک جسم پیامد تغییر فاصله بین اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل دهنده آن است. برای درک این مدل، چگونگی رفتار اتم‌ها در یک ماده جامد را در نظر بگیرید. همان‌گونه که در فصل ۳ دیدیم، می‌توان اتم‌ها را ذراتی در نظر گرفت که با فنرهایی به اتم‌های مجاور متصل شده‌اند (شکل ۱۲-۴). اتم‌ها پیرامون مکان‌های تعادل خود با دامنه کم، نوسان می‌کنند. می‌توان نشان داد با افزایش دمای جامد، فاصله متوسط بین اتم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، جسم جامد منبسط می‌شود.

در مایع با افزایش دما حرکت کاتوره‌ای اتم‌ها و مولکول‌ها بیشتر می‌شود. این افزایش حرکت‌ها باعث دور شدن اتم‌ها و مولکول‌ها از هم می‌شود و حجم مایع افزایش می‌یابد.

انبساط سطحی و حجمی: سطح و حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. تجربه نشان می‌دهد با انبساط جسم جامد، شکل آن عوض نمی‌شود و همه ابعاد آن به تناسب افزایش می‌یابد. در اینجا ابتدا به انبساط سطحی می‌پردازیم. اگر مساحت اولیه جسم جامد A_1 و افزایش دما ΔT باشد، افزایش مساحتی به اندازه ΔA پیدا می‌کند (شکل ۴-۱۳). نشان داده می‌شود که این افزایش مساحت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T \quad (4-3)$$

در این رابطه، α ضریب انبساط طولی جسم جامد با یکای بر کلین ($1/K$) یا بر درجه سلسیوس ($1/^\circ C$) است، یکای ΔA و A_1 مترمربع (m^2) و یکای ΔT ، کلین (K) یا درجه سلسیوس ($^\circ C$) است.



شکل ۴-۱۳ انبساط گرمایی یک ورقه مربعی به ضلع $L = L_1$

فعالیت ۴-۴

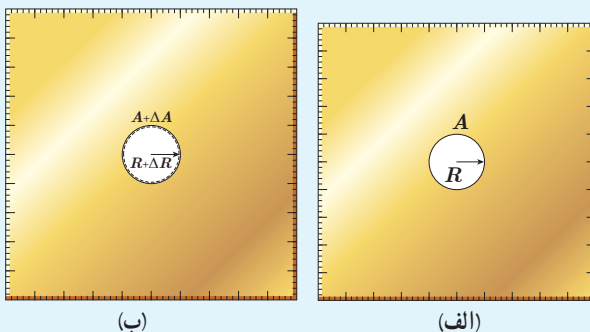
ورقه‌ای فلزی و مستطیلی شکل به اضلاع a_1 و b_1 را در نظر بگیرید. بر اثر افزایش دمای ΔT ، طول اضلاع مستطیل به اندازه Δa و Δb افزایش می‌یابند. اگر ضریب انبساط طولی ورقه α باشد، نشان دهید که افزایش مساحت این ورقه با تقریب مناسب از رابطه $\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$ به دست می‌آید.

مثال ۲-۴

مساحت یک ورقه مسی 2500 cm^2 است. اگر دمای این ورقه را $5^\circ C$ افزایش دهیم، مساحت آن چقدر افزایش خواهد یافت؟
پاسخ: از رابطه ۴-۳ استفاده می‌کنیم. ضریب انبساط طولی مس با استفاده از جدول ۴-۱ برابر $17 \times 10^{-6} / ^\circ C$ است؛ بنابراین داریم:

$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T = 2(17 \times 10^{-6} / ^\circ C)(2500 \text{ cm}^2)(5^\circ C) = 4/3 \text{ cm}^2$$

تمرین ۳-۴



شکل‌های (الف) و (ب) نشان می‌دهند که وقتی روی یک ورقه فلزی حفره‌ای دایره‌ای داشته باشیم و ورقه را گرم کنیم، قطر (یا مساحت) حفره بزرگ می‌شود. فرض کنید جنس ورقه، برنجی است و حفره‌ای به قطر یک اینچ (2.54 cm) درون آن ایجاد شده است. وقتی دمای ورقه، $20^\circ C$ افزایش یابد، افزایش مساحت حفره چقدر خواهد شد؟

جدول ۴-۲ ضریب انبساط
حجمی چند مایع

ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
جیوه	0.18×10^{-3}
گلیسرین	0.49×10^{-3}
روغن زیتون	0.70×10^{-3}
پارافین	0.76×10^{-3}
بنزین	1.00×10^{-3}
اتانول	1.09×10^{-3}
اسید استیک	1.10×10^{-3}
بنزن	1.25×10^{-3}
کلروفرم	1.27×10^{-3}
استون	1.43×10^{-3}
اتر معمولی	1.60×10^{-3}
آمونیاک	2.45×10^{-3}

اکنون به انبساط حجمی می‌پردازیم. همان‌طور که گفتیم حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. اگر حجم اولیه جسم (جامد یا مایع) V_1 و افزایش دما ΔT باشد، جسم افزایش حجمی به اندازه ΔV پیدا می‌کند که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T \quad (4-4)$$

در این رابطه، β ضریب انبساط حجمی جامد یا مایع است. یکای ΔV و V_1 مترمکعب (m^3)، یکای ΔT ، کلوین (K) یا درجه سلسیوس ($^{\circ}C$) و از آنجا یکای β ، بر کلوین ($1/K$) یا بر درجه سلسیوس ($1/^{\circ}C$) است.

انبساط طولی بیشتر جامدها در راستاهای مختلف، با ضریب انبساط طولی یکسان صورت می‌گیرد. می‌توان نشان داد که ضریب انبساط حجمی این جامدها با تقریب مناسبی سه برابر ضریب انبساط طولی آنهاست.

$$\beta_{\text{جامد}} = 3\alpha \quad (5-4)$$

چون مایع‌ها شکل معینی ندارند، انبساط آنها را فقط به صورت حجمی بررسی می‌کنیم. در جدول ۴-۲ ضریب انبساط حجمی برخی مایع‌ها داده شده است.

مثال ۳-۴

در یک روز داغ تابستان که دمای هوا $40/^{\circ}C$ است، شخصی باک (مخزن) ۵۵ لیتری اتومبیل خود را از بنزین کاملاً پر می‌کند. فرض کنید بنزین از منبعی در زیرزمین با دمای $12/^{\circ}C$ بالا آمده باشد. شخص اتومبیل را پارک می‌کند و ساعتی بعد بازمی‌گردد. مشاهده می‌کند بنزین قابل توجهی از باک سرریز شده است. چقدر بنزین از باک بیرون ریخته است؟ (از افزایش حجم باک که بسیار ناچیز است صرف‌نظر می‌شود).

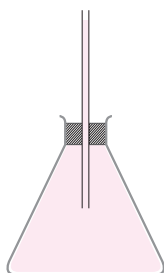
پاسخ: با توجه به اینکه بنزین، زمان کافی برای هم‌دم شدن با محیط داشته است، دمای نهایی آن را $40/^{\circ}C$ در نظر می‌گیریم. اکنون با استفاده از رابطه ۴-۴ و جدول ۴-۲ برای ضریب انبساط حجمی بنزین خواهیم داشت:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T = (1.00 \times 10^{-3}/^{\circ}C)(55L)(40/^{\circ}C - 12/^{\circ}C) = 1.5L$$

بنابراین، در کمال تعجب درمی‌یابیم که 1.5 لیتر بنزین روی زمین ریخته است.

نکته مهم در استفاده از رابطه ۴-۴ این است که باید یکای ΔV و V_1 یکسان باشد. مقایسه ضریب انبساط حجمی جامدها با ضریب انبساط حجمی مایعات نشان می‌دهد انبساط حجمی جامدها عموماً از مایعات بسیار کمتر است و به همین دلیل در بسیاری از محاسبات می‌توان از مقدار افزایش حجم جامد در مقابل مقدار افزایش حجم مایع صرف‌نظر کرد.

مثال ۴-۴



ارلنی شیشه‌ای را که در دمای 20°C گنجایشی برابر با $200/\text{cm}^3$ دارد، مطابق شکل با گلیسرین در همان دما پر کرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسرین را به 60°C برسانیم

(الف) آیا گلیسرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

(ب) اگر پاسخ قسمت (الف) مثبت است، حجم گلیسرین سرریز شده چقدر است؟

پاسخ:

(الف) افزایش حجم گلیسرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطه‌های ۴-۴ و ۵-۴ محاسبه می‌کنیم.

$$\Delta V_{\text{گلیسرین}} = \beta_{\text{گلیسرین}} V_{\text{گلیسرین}} \Delta T = (49 \times 10^{-5}/^\circ\text{C})(200/\text{cm}^3)(60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 3/9 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_{\text{شیشه}} \Delta T = (3 \times 9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C})(200/\text{cm}^3)(60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0/2 \text{ cm}^3$$

در این محاسبه از جدول‌های ۴-۴ و ۱-۴ برای ضریب انبساط حجمی گلیسرین و ضریب انبساط طولی شیشه استفاده کرده‌ایم؛ چون افزایش حجم گلیسرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسرین از ظرف سرریز می‌شود.

(ب) حجم گلیسرین سرریز شده برابر است با

$$\Delta V_{\text{گلیسرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (3/9 \text{ cm}^3 - 0/2 \text{ cm}^3) = 3/7 \text{ cm}^3$$

فعالیت ۵-۴

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با آن بتوانید حجم گلیسرین سرریز شده در مثال ۴-۴ را اندازه بگیرید. سپس از روی آن، ضریب انبساط حجمی گلیسرین را تعیین کنید.

تمرین ۴-۴

افزایش دما که به طور معمول موجب افزایش حجم اجسام می‌شود، بر جرم آنها تأثیری ندارد. به همین دلیل انتظار داریم که چگالی اجسام با افزایش دما کاهش یابد. رابطه چگالی با تغییر دما به صورت $\rho_T = \rho_1/(1 + \beta \Delta T)$ است که در آن ρ_T و ρ_1 به ترتیب چگالی ماده در دماهای T_T و T_1 ، β ضریب انبساط حجمی و $\Delta T = T_T - T_1$ است.

(الف) رابطه چگالی با تغییر دما را به دست آورید.

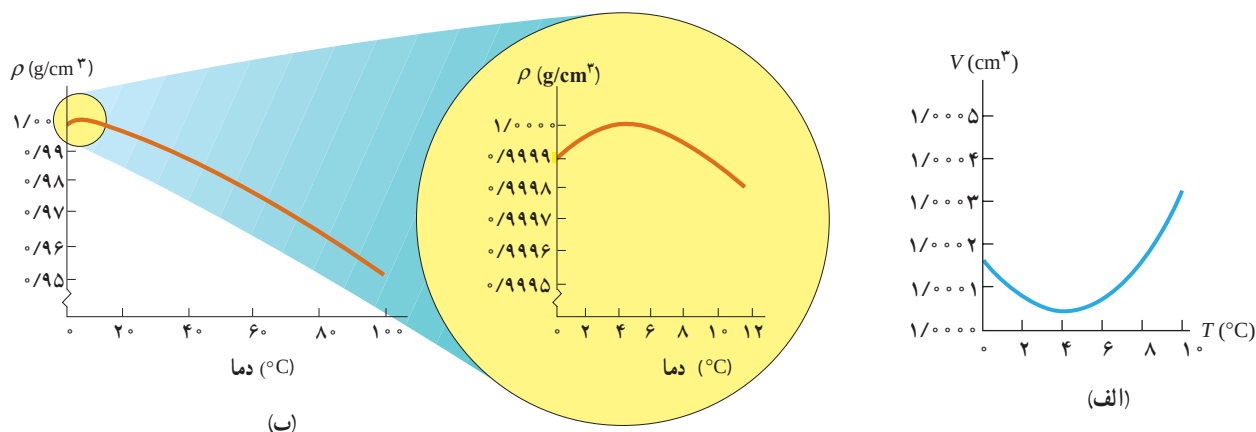
(ب) نشان دهید با تقریب مناسبی می‌توان چگالی جسم را از رابطه $\rho_T = \rho_1(1 - \beta \Delta T)$ نیز به دست آورد.

مثال ۵-۴

یک قطعه سرب را در دمای اتاق در نظر بگیرید. اگر دمای این قطعه را 200°C افزایش دهیم، چگالی آن چند برابر می‌شود؟

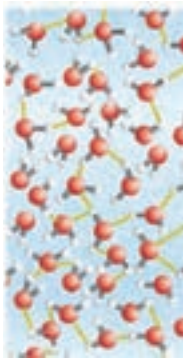
$$\rho_T = \rho_1(1 - \beta \Delta T) \Rightarrow \frac{\rho_T}{\rho_1} = (1 - 3 \alpha \Delta T) = 1 - (3 \times 29 \times 10^{-6}/^\circ\text{C})(200^\circ\text{C}) = 0/98$$

انبساط غیرعادی آب: در زمستان‌های سرد، سطح آب آبیگرها و دریاچه‌های کوچک یخ می‌زند و به تدریج یخ ضخیم‌تر می‌شود؛ اما در ته آبیگرها، دمای آب بالاتر از $^{\circ}\text{C}$ بوده و برای موجودات زنده‌ای که آنجا زندگی می‌کنند، نسبتاً گرم و مناسب است. در واقع حجم بیشتر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش و در نتیجه چگالی آنها افزایش می‌یابد، ولی رفتار آب در محدوده دمایی $^{\circ}\text{C}$ تا $^{\circ}\text{C}$ ۴ متفاوت است؛ یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴-۱۴ (الف) و (ب)، به ترتیب نمودار حجم برحسب دما و نمودار چگالی برحسب دما را برای آب شیرین نشان می‌دهد که در آنها رفتار غیرعادی آب در محدوده $^{\circ}\text{C}$ تا $^{\circ}\text{C}$ ۴ دیده می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، در بازه دمایی $^{\circ}\text{C}$ تا $^{\circ}\text{C}$ ۴ با افزایش دما، حجم آب کاهش و چگالی آن افزایش می‌یابد. پس از دمای $^{\circ}\text{C}$ ۴ مانند دیگر اجسام، با افزایش دما، حجم افزایش و چگالی کاهش می‌یابد. همین تغییر حجم غیرعادی آب است که موجب می‌شود دریاچه‌ها به جای اینکه از پایین به بالا یخ بزنند، از بالا یخ بزنند. وقتی دمای سطح آب مثلاً از $^{\circ}\text{C}$ ۱۰ اندکی کمتر شود، چگالی آب نسبت به آب زیر خود افزایش می‌یابد و این آب، پایین می‌رود. این رفتار تا رسیدن به دمای $^{\circ}\text{C}$ ۴ ادامه می‌یابد؛ ولی همان‌طور که دیدیم در دمای پایین‌تر از $^{\circ}\text{C}$ ۴، حجم آب افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد؛ یعنی سرد شدن بیشتر آب موجب می‌شود که چگالی آب سطح دریا نسبت به آب زیر آن کمتر شود و در نتیجه در سطح باقی بماند تا اینکه یخ بزند (شکل ۴-۱۵ الف). بنابراین، در حالی که آب زیر دریاچه هنوز مایع است و دمای بیش از صفر درجه دارد، سطح آب یخ می‌زند. اگر آب دریاچه‌ها از پایین به بالا یخ می‌زد، اثرات زیست‌محیطی زیانباری در پی داشت و حیات گیاهی و جانوری در عمق دریاچه‌ها از بین می‌رفت.

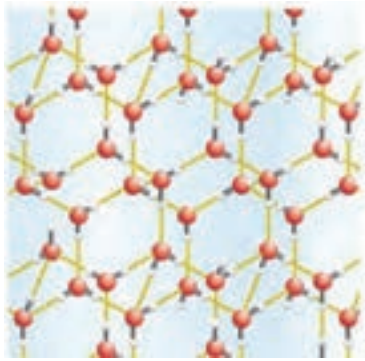


شکل ۴-۱۴ (الف) تغییرات حجم یک گرم آب (شیرین) با دما، (ب) تغییرات چگالی آب (شیرین) با دما

رفتار شگفت‌انگیز آب را می‌توان با ساختار مولکول‌های آن در یخ توضیح داد. مولکول‌های آب در یخ شبکه‌ای بلوری تشکیل می‌دهند، به طوری که مولکول‌ها در بعضی نواحی خیلی به هم نزدیک‌اند و در نواحی دیگر، بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۴-۱۵ ب). وقتی آب از یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، دیگر شبکه بلوری وجود ندارد و آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد (شکل ۴-۱۵ پ). در محدوده دماهای $^{\circ}\text{C}$ تا $^{\circ}\text{C}$ ۴ بقایای ساختار مولکولی یخ هنوز در آب وجود دارد و موجب رفتار غیرعادی آب می‌شود.



(ب)



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۵ (الف) آب در حالت مایع چگال‌تر از یخ است و در نتیجه یخ بر روی آب شناور می‌ماند. (ب) مولکول‌های آب در یخ تشکیل یک شبکه بلوری می‌دهند. (پ) آب در حالت مایع تشکیل شبکه بلوری نمی‌دهد.

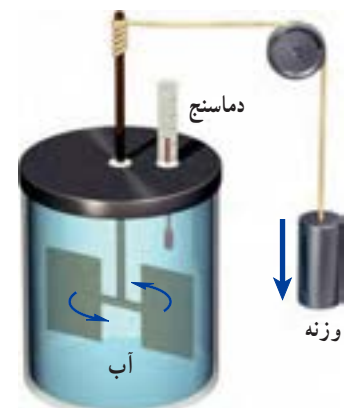
فعالیت ۴-۶

وقتی آب در یک ظرف روباز یخ می‌بندد معمولاً یک برآمدگی مرکزی ایجاد می‌شود. در این مورد تحقیق کنید.

۳-۴ گرما

همان‌طور که در درس علوم دوره اول متوسطه دیدید، اگر آب خیلی سرد را در لیوان بریزیم و سپس این لیوان را روی میز اتاق بگذاریم، آب گرم می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. به همین ترتیب، اگر آب داغ را در لیوان بریزیم و لیوان را روی میز بگذاریم، آب خنک می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. این گرم‌تر یا سردتر شدن در ابتدا به سرعت رخ می‌دهد و سپس با آهنگ کندتری ادامه می‌یابد تا اینکه دمای آب با دمای اتاق یکسان گردد. در این حالت که آب، لیوان و هوای اتاق در دمای یکسانی هستند، اصطلاحاً می‌گوییم **تعادل گرمایی** حاصل شده است. تا پیش از قرن نوزدهم، چنین مشاهداتی را با پذیرفتن موجودی به نام کالریک توجیه می‌کردند. به عبارتی فرض می‌کردند که چیزی به نام کالریک از جسم گرم به جسم سرد جریان می‌یابد. اما کنت رامفورد^۱ (۱۷۵۳ تا ۱۸۱۴م) و جیمز پرسکات ژول^۲ (۱۸۱۸ تا ۱۸۸۹م) در پی آزمایش‌های هوشمندانه‌ای که نمونه‌ای از آن در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است، دریافتند آنچه که در چنین فرایندهایی رخ می‌دهد، چیزی جز انتقال انرژی نیست. مثلاً در مثال آب داغ، انتقال انرژی از آب به محیط پیرامون، سبب کاهش دمای آب می‌شود. در حالت کلی هرگاه جسمی با دمای بیشتر در تماس گرمایی با جسمی با دمای کمتر قرار گیرد، بر اثر اختلاف دمای دو جسم، انرژی از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود. به این انرژی انتقال یافته بر اثر اختلاف دمای دو جسم، **گرما** گفته می‌شود.

توجه کنید اشاره کردن به گرمای موجود در یک جسم اشتباه است. گرما مربوط به انرژی درحال گذار است؛ بنابراین، عبارت‌هایی مانند گرمای یک جسم، نادرست است. گرما را با نماد Q نشان می‌دهند. چون گرما، انرژی انتقال یافته است، پس باید همان یکای انرژی (ژول) را داشته باشد. یکای دیگر گرما،



شکل ۴-۱۶ نمونه‌ای از آزمایش ژول: در این آزمایش نشان داده می‌شود کار نیروی وزن برابر با مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای آب است.

۱- Sir Benjamin Thomson, Count Rumford

۲- James Prescott Joule

کالری^۱ است که در موارد خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وقتی دو جسم سرد و گرم در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، از دیدگاه میکروسکوپی، آنچه که اتفاق می‌افتد کاهش انرژی‌های جنبشی و پتانسیل مربوط به حرکت‌های کاتوره‌ای اتم‌ها، مولکول‌ها و سایر اجزای میکروسکوپی داخل جسم گرم، و افزایش همین انرژی‌ها در داخل جسم سرد است تا آنکه دو جسم به تعادل گرمایی برسند (شکل ۴-۱۷).



شکل ۴-۱۷ وقتی دو جسم با دمای متفاوت را در تماس با یکدیگر قرار می‌دهیم، انرژی از جسم گرم به جسم سرد، منتقل می‌شود. با رسیدن به تعادل گرمایی، دیگر گرمایی منتقل نمی‌شود.

پرسش ۴-۲

- الف) منظور از این جمله که «دماسنج‌های معمولی دمای خودشان را اندازه‌گیری می‌کنند» چیست؟
 ب) در یک کلاس درس میز، صندلی، دانش‌آموز، تخته، شیشه پنجره و ... وجود دارد. در یک روز زمستانی، دمای کدام یک از آنها بیشتر از دمای هوای اتاق است؟ دمای کدام یک کمتر از دمای هوای اتاق است؟
 پ) در شکل ۴-۱۷ میانگین انرژی جنبشی ذرات دو جسم چگونه تغییر کرده است؟

ظرفیت گرمایی: اگر یک پارچ آب سرد را از داخل یخچال بیرون آوریم و در اتاق قرار دهیم، آب از محیط خود، گرما می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود. آزمایش نشان می‌دهد که گرمای گرفته‌شده توسط آب با تغییر دمای آب، متناسب است؛ یعنی هرچه آب سردتر باشد، مقدار گرمایی که می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود، بیشتر است. بنابراین، اگر جسمی با محیط اطراف خود گرمای Q را مبادله کند و در اثر این مبادله گرما، دمایش به اندازه ΔT تغییر کند، Q متناسب با ΔT است که ضریب این تناسب را با C نشان می‌دهند، به‌طوری که:

$$Q = C \Delta T$$

(۴-۶)

به C ، **ظرفیت گرمایی** جسم گفته می‌شود که به جنس جسم و جرم آن بستگی دارد. در رابطه ۴-۶ یکای Q ، ژول (J) و یکای ΔT ، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای C ، ژول بر کلوین (J/K) می‌شود.

^۱ ۱ cal = ۴/۱۸۶۰ J

وقتی می‌گوییم ظرفیت گرمایی یک جسم 2000 J/K است، یعنی اگر به آن جسم 2000 J گرما بدهیم، دمای آن 1 K افزایش پیدا می‌کند. توجه کنید که منظور از ظرفیت، این نیست که جسم، توانایی محدودی در مبادله گرما دارد؛ بلکه تا وقتی که اختلاف دما باشد، مبادله گرما ادامه می‌یابد. مقدار زیاد آب، مانند آب دریاچه‌ها و دریاها، نوسان‌های دمای هوای اطراف خود را متعادل می‌کند؛ زیرا اگر مقدار آب زیاد باشد، می‌تواند گرمای زیادی از محیط بگیرد یا اینکه به محیط بدهد، بی‌آنکه دمای خودش تغییر محسوسی بکند (شکل ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸ تصویری از سواحل قشم. آب دریا به دلیل داشتن ظرفیت گرمایی زیاد، دمای هوا را متعادل نگه می‌دارد، اما دمای خودش تغییر محسوسی نمی‌کند.

گرمای ویژه: تجربه نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی اجسامی که از ماده یکسانی ساخته شده‌اند متناسب با جرم آنهاست. بنابراین، مناسب‌تر آن است که ظرفیت گرمایی واحد جرم اجسام را تعریف کنیم که به آن ظرفیت گرمایی ویژه یا به سادگی **گرمای ویژه** می‌گویند. گرمای ویژه هر جسم، مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از آن جسم داده شود تا دمای آن یک درجه سلسیوس (یا یک کلوین) افزایش یابد. گرمای ویژه را با c نشان می‌دهند و طبق تعریف، رابطه‌اش با ظرفیت گرمایی به صورت $c = C/m$ است. در نتیجه رابطه ۴-۶ چنین می‌شود:

$$Q = mc\Delta T \quad (4-7)$$

در رابطه ۴-۷ یکای Q ، ژول (J) و یکای m ، کیلوگرم (kg) و یکای ΔT ، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای c در SI، ژول بر کیلوگرم - کلوین ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) است.

گرمای ویژه یک جسم به جنس ماده تشکیل دهنده آن بستگی دارد. گرمای ویژه برخی از مواد در جدول ۴-۳ داده شده است.

جدول ۴-۳ - گرمای ویژه برخی از مواد*		
گرمای ویژه ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	ماده	
۱۲۸	سرب	عناصر جامد
۱۳۴	تنگستن	
۲۳۶	نقره	
۳۸۶	مس	
۹۰۰	آلومینیم	
۳۸۰	برنج	جامدهای دیگر
۴۵۰	نوعی فولاد (آلیاژ آهن با ۲٪ کربن)	
۴۹۰	استیل ضدزنگ	
۷۹۰	گرانیت	
۸۰۰	بتون	
۸۴۰	شیشه	
۲۲۲۰	یخ	
۱۴۰	جیوه	مایعات
۲۴۳۰	اتانول	
۳۹۰۰	آب دریا	
۴۱۸۷	آب	

* تمام مواد غیر از یخ در دمای 20°C

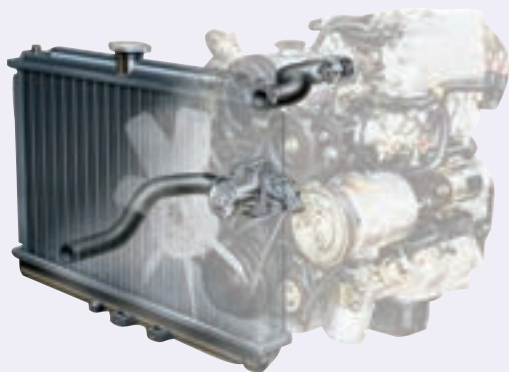
مثال ۴-۶

مقدار $2/00\text{ L}$ آب با دمای $20/0^\circ\text{C}$ در اختیار داریم. چقدر گرما لازم است تا دمای این آب را به نقطه جوش آن (در دمای 100°C) برسانیم؟

پاسخ: براساس چگالی آب، جرم $2/00\text{ L}$ آب برابر $2/00\text{ kg}$ است و از جدول ۳-۴ گرمای ویژه آب $4187\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ است. بنابراین، گرمای لازم برای گرم کردن $2/00\text{ kg}$ آب، از $20/0^\circ\text{C}$ تا نقطه جوش آب، برابر است با

$$Q = m_{\text{آب}} c_{\text{آب}} \Delta T = (2/00\text{ kg})(4187\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(100/0^\circ\text{C} - 20/0^\circ\text{C}) = 6/70 \times 10^5\text{ J}$$

فناوری و کاربرد



شکل ۴-۱۹ تصویری از سیستم خنک کننده خودرو

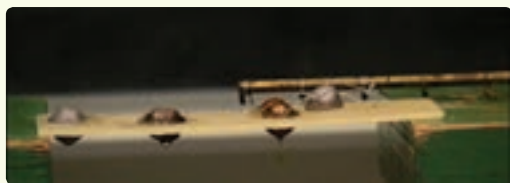
استفاده از آب در دستگاه های گرم کننده و خنک کننده: در

جدول ۳-۴ دیدیم که گرمای ویژه آب از سایر مواد بیشتر است. این نشان می دهد که وقتی یک کیلوگرم آب به اندازه یک درجه سلسیوس تغییر دما دهد، در مقایسه با سایر مواد، گرمای بیشتری با محیط اطراف خود مبادله می کند. از این خاصیت آب برای گرم کردن فضای خانه ها به وسیله شوفاژ استفاده می شود. آب گرم شده در مخزن به وسیله پمپ (تلمبه) و از طریق لوله به رادیاتور می رسد. آب در رادیاتور که با هوای سرد در تماس است، سرد می شود و بخشی از انرژی درونی خود را از دست می دهد و بار دیگر، از طریق لوله های برگشت، به مخزن برمی گردد

و در هر چرخه باز همین عمل تکرار می شود. از آب برای خنک کردن موتور خودروها نیز استفاده می شود (شکل ۴-۱۹). بدین منظور، در محفظه سیلندر و سرسیلندر، مسیرهای عبور آب در نظر گرفته شده است که به وسیله واترپمپ (تلمبه آب)، آب به سرعت در درون این مسیرها گردش می کند و گرما را از موتور به رادیاتور اتومبیل می برد. در اثر عبور هوا از میان پره های رادیاتور، هوا با آب درون رادیاتور تبادل گرمایی می کند، آب انرژی خود را از دست می دهد و دوباره به موتور برمی گردد و این عمل تکرار می شود.

پوشش ۴-۳

چند گوی فلزی از جنس های مختلف، مثلاً از آلومینیم، فولاد، برنج، مس، سرب و ...، را اختیار می کنیم که همگی جرم یکسانی داشته باشند. گوی ها را توسط ریسمان هایی داخل ظرف آبی قرار می دهیم که آب آن در حال جوشیدن است و پس از مدتی گوی ها را بیرون آورده و آنها را روی یک ورقه پارافین قرار می دهیم. به نظر شما کدام گوی، پارافین بیشتری را ذوب می کند و علت آن چیست؟ این آزمایش را نخستین بار فیزیک دان ایرلندی، جان تیندال^۱ (۱۸۹۳-۱۸۲۰ م.) طراحی و اجرا کرد.



گوی ها بسته به جنس خود، ورقه پارافین را در زمان های متفاوت ذوب می کنند.

^۱ John Tyndall

مول و عدد آووگادرو: همان طور که در فصل ۱ دیدید، در بسیاری از موارد یکای مناسب برای تعیین مقدار یک ماده، مول (mol) است. مقدار ماده برحسب مول را با n نشان می‌دهند. یک مول از هر ماده به معنای 6.02×10^{23} از اجزای سازنده آن ماده است که به آن عدد آووگادرو گفته می‌شود؛ مثلاً یک مول آلومینیم به معنای 6.02×10^{23} اتم آلومینیم است و یک مول آلومینیم اکسید به معنای 6.02×10^{23} مولکول آلومینیم اکسید است. بدیهی است که اگر جرم نمونه‌ای از ماده را با m و جرم یک مول از ماده را با M (که موسوم به جرم مولی است) نشان دهیم داریم:



شکل ۴-۲. یک مول هوا، یک مول آب، یک مول نمک طعام در کنار هم

$$n = \frac{m}{M} \quad (۴-۸)$$

که در آن n برحسب مول (mol)، m برحسب کیلوگرم (kg) و M برحسب کیلوگرم بر مول (kg/mol) است؛ مثلاً شکل ۴-۲ یک مول از سه نمونه مواد در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

مثال ۴-۲



شکل روبه‌رو، نوعی از الماس را نشان می‌دهد که تقریباً از کربن خالص است. جرم این الماس ۴۴/۵ قیراط است. یک قیراط معادل با 0.200 g است. چه تعداد اتم کربن در این الماس وجود دارد؟ جرم مولی کربن 12.011 g/mol است.

پاسخ: نخست با استفاده از رابطه ۴-۸ تعداد مول اتم کربن موجود در الماس را به‌دست می‌آوریم:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{(44.5 \times 0.200) \text{ g}}{(12.011) \text{ g/mol}} = 0.741 \text{ mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از کربن به تعداد عدد آووگادرو اتم کربن وجود دارد، نتیجه می‌گیریم:

(عدد آووگادرو) (تعداد مول) = تعداد اتم کربن

$$= (0.741 \text{ mol})(6.02 \times 10^{23} \text{ اتم/mol}) = 4.46 \times 10^{23} \text{ اتم}$$

گرمای ویژه مولی: وقتی مقدار ماده به جای جرم برحسب مول بیان شود باید به‌جای ظرفیت گرمایی واحد جرم از ظرفیت گرمایی واحد مول (C/n) استفاده کنیم که به آن ظرفیت گرمایی مولی یا **گرمای ویژه مولی** گفته می‌شود. در واقع گرمای ویژه مولی یک ماده، مقدار گرمایی است که باید به یک مول از آن ماده بدهیم تا در شرایط فیزیکی تعیین شده، دمای آن 1 K افزایش یابد (با این کمیت در فصل ۵ بیشتر آشنا خواهیم شد).

اگر گرمای ویژه مولی مواد مختلف را با هم مقایسه کنیم، به نظم شگفت‌انگیزی پی می‌بریم و درمی‌یابیم برای بیشتر فلزها، مقدار آن تقریباً مساوی با $25 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ است. این نظم با آنکه تقریبی است به نام قاعده «دولن و پتی» مشهور است که بیان می‌دارد گرمای لازم برای بالا بردن دمای یک مول از هر کدام از این فلزها، مقدار یکسانی است و به جنس آنها بستگی ندارد.

دمای تعادل: اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند، پس از مدتی همدمای می‌شوند، یعنی دمای آنها به مقدار یکسانی می‌رسد. به این دما، **دمای تعادل** می‌گویند که می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی، آن را محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند و بقیه اجسام گرما می‌گیرند. بنا به قرارداد علامت Q برای اجسامی که گرما می‌گیرند مثبت ($Q > 0$) و برای اجسامی که گرما می‌دهند منفی ($Q < 0$) اختیار می‌شود؛ مثلاً از رابطه (۴-۷) نیز درمی‌یابیم که با افزایش دما، مقدار مثبتی برای Q به دست می‌آید و با کاهش دما، مقداری منفی برای Q به دست می‌آید. بنا به قانون پایستگی انرژی، همان قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند، پس جمع جبری این Q ها صفر می‌شود:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0 \quad (9-4)$$

هرگاه چند جسم متفاوت با گرمای ویژه $c_1, c_2, c_3, \dots$ و به جرم‌های $m_1, m_2, m_3, \dots$ و دماهای اولیه $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ را در تماس با یکدیگر قرار دهیم با استفاده از رابطه (۴-۹) معادله‌ای به دست می‌آوریم که می‌توان دمای تعادل θ را از آن محاسبه کرد.

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) + m_3 c_3 (\theta - \theta_3) + \dots = 0 \quad (10-4)$$

مثال ۴-۸

شخصی 300 kg آب 70°C را در یک لیوان آلومینیومی 120°C کیلوگرمی که دمای آن 20°C است می‌ریزد. دمای نهایی پس از آنکه آب و لیوان به تعادل گرمایی برسند چقدر است؟ فرض کنید هیچ گرمایی با محیط مبادله نمی‌شود.

پاسخ: با توجه به اینکه هیچ مبادله گرمایی با محیط نداریم، با استفاده از رابطه ۴-۹ داریم:

$$Q_{\text{آب}} + Q_{\text{آلومینیوم}} = 0$$

اکنون با استفاده از رابطه ۴-۷ ($Q = mc\Delta\theta$) خواهیم داشت:

$$m_{\text{آب}} c_{\text{آب}} (\theta - \theta_{\text{آب}}) + m_{\text{آلومینیوم}} c_{\text{آلومینیوم}} (\theta - \theta_{\text{آلومینیوم}}) = 0$$

که در آن θ دمای تعادل مجموعه است. با استفاده از گرمای ویژه آب و آلومینیوم از جدول ۴-۳ خواهیم داشت:

$$(300 \text{ kg})(4187 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(\theta - 70^\circ\text{C}) + (120 \text{ kg})(900 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(\theta - 20^\circ\text{C}) = 0$$

و از آنجا پس از اندکی محاسبه جبری برای دمای تعادل به $\theta = 66^\circ\text{C}$ می‌رسیم.

از معادله ۴-۱۰ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژه یک جسم نیز استفاده کنیم.

مثال ۴-۹

در ظرف عایقی حاوی 50°C آب 2°C ، یک قطعه مس 10°C کیلو گرمی به دمای 50°C و یک قطعه فلز دیگر به جرم 15°C و به دمای 60°C و ویژه نامعلوم می اندازیم و دمای تعادل را اندازه می گیریم. دمای تعادل 22°C شده است. با چشم پوشی از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام، گرمای ویژه فلز را حساب کنید.

پاسخ: دمای تعادل 22°C است و نیز با استفاده از سایر داده های این مثال و جدول ۳-۴ داریم:

$$\text{آب: } m_1 = 50^\circ\text{C}, \theta_1 = 2^\circ\text{C}, c_1 = 4187 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{مس: } m_2 = 10^\circ\text{C}, \theta_2 = 50^\circ\text{C}, c_2 = 386 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{فلز: } m_3 = 15^\circ\text{C}, \theta_3 = 60^\circ\text{C}, c_3 = ?$$

اکنون با استفاده از رابطه ۴-۱ خواهیم داشت:

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) + m_3 c_3 (\theta - \theta_3) = 0$$

$$(50^\circ\text{C})(4187 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(22^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}) + (10^\circ\text{C})(386 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(22^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})$$

$$+ (15^\circ\text{C}) c_3 (22^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) = 0 \Rightarrow c_3 = 545 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

تمرین ۴-۵

جسمی به جرم 25°C و دمای 3°C را درون ظرف عایقی حاوی 50°C آب 25°C می اندازیم. پس از چند دقیقه دمای تعادل را اندازه می گیریم. دمای تعادل 21°C می شود. گرمای ویژه جسم را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام چشم پوشی کنید.

گرماسنج و گرماسنجی: گرماسنج که به آن کالری متر نیز می گویند شامل ظرفی است در پوش دار که به خوبی عایق بندی گرمایی شده است (شکل ۴-۲۱). این ظرف در آزمایش های گرماسنجی مانند تعیین گرمای ویژه اجسام، به کار می رود. در گرماسنج مقداری آب با جرم معین می ریزیم و پس از هم دما شدن آب و گرماسنج، دمای آب را اندازه می گیریم. سپس جسمی را که می خواهیم گرمای ویژه اش را پیدا کنیم و جرم و دمای اولیه آن معلوم است، درون گرماسنج قرار می دهیم. آنگاه به کمک همزن آب را به هم می زنیم تا مجموعه سریع تر به دمای تعادل برسد. پس از برقراری تعادل گرمایی، دمای تعادل را اندازه می گیریم.

با استفاده از رابطه های (۴-۹) و (۴-۱۰) و با چشم پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادله گرما داریم:

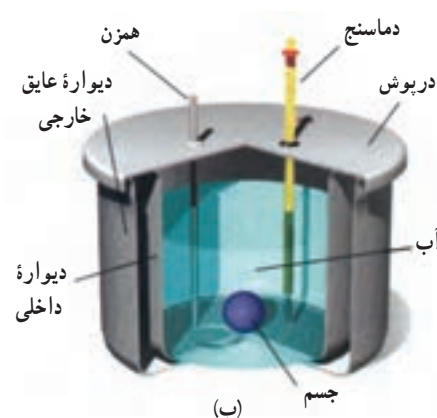
$$Q_{\text{آب}} + Q_{\text{جسم}} + Q_{\text{ظرف}} = 0$$

$$m_{\text{آب}} c_{\text{آب}} (\theta - \theta_{\text{آب}}) + m_{\text{جسم}} c_{\text{جسم}} (\theta - \theta_{\text{جسم}}) + m_{\text{ظرف}} c_{\text{ظرف}} (\theta - \theta_{\text{ظرف}}) = 0$$

به کمک این رابطه می توانیم گرمای ویژه جسم را به دست آوریم. معمولاً در مورد گرماسنج به جای آنکه جرم و گرمای ویژه ظرف گرماسنج را جداگانه معلوم کنند، ظرفیت گرمایی ظرف گرماسنج را مشخص می کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۱ (الف) عکسی واقعی و (ب) طرحی از نمای داخلی یک گرماسنج

مثال ۴-۱۰

برای اندازه‌گیری گرمای ویژه فلزی با جنس نامعلوم، قطعه‌ای $۰/۶۰۰$ کیلوگرمی از آن را تا $۱۰۰/۰^{\circ}\text{C}$ گرم می‌کنیم و سپس آن را در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی $۱/۸۰ \times ۱۰^۲ \text{ J/K}$ که حاوی $۰/۵۰۰ \text{ kg}$ آب با دمای اولیه $۱۷/۳^{\circ}\text{C}$ است، می‌اندازیم. اگر دمای نهایی مجموعه $۲۰/۰^{\circ}\text{C}$ شود، گرمای ویژه این فلز چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه (۴-۱۰) و تعریف ظرفیت گرمایی داریم:

$$Q_{\text{آب}} + Q_{\text{فلز}} + Q_{\text{گرماسنج}} = 0$$

$$m_{\text{آب}} c_{\text{آب}} (\theta - \theta_{\text{آب}}) + m_{\text{فلز}} c_{\text{فلز}} (\theta - \theta_{\text{فلز}}) + C_{\text{گرماسنج}} (\theta - \theta_{\text{گرماسنج}}) = 0$$

اکنون با جای گذاری مقادیر خواهیم داشت:

$$(۰/۵۰۰ \text{ kg})(۴۱۸۷ \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C})(۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۷/۳^{\circ}\text{C}) + (۰/۶۰۰ \text{ kg}) c_{\text{فلز}} (۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۰۰/۰^{\circ}\text{C}) + (۱/۸۰ \times ۱۰^۲ \text{ J/K})(۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۷/۳^{\circ}\text{C}) = 0$$

پس از عملیات جبری، گرمای ویژه فلز $۱۲۸ \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ به دست می‌آید. اگر به جدول ۴-۳ نگاه کنیم درمی‌یابیم که این گرمای ویژه بسیار نزدیک به گرمای ویژه سرب است و احتمالاً جنس ماده نامعلوم سرب بوده است.

آزمایش ۴-۲



هدف: تعیین گرمای ویژه فلزی با جنس نامعین

وسایله‌های موردنیاز: گرماسنج با ظرفیت گرمایی معین، یک جسم کوچک فلزی (مثل یک وزنه فلزی قلاب‌دار)، دماسنج، ترازو، بشر شیشه‌ای، چراغ گازی، سه پایه و شعله‌پخش‌کن، انبر.

شرح آزمایش:

۱- مقداری آب با جرم معلوم را درون گرماسنج بریزید و صبر کنید تا دمای گرماسنج و آب، یکسان شود. این دما را اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۲- جرم جسم فلزی را به کمک ترازو اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

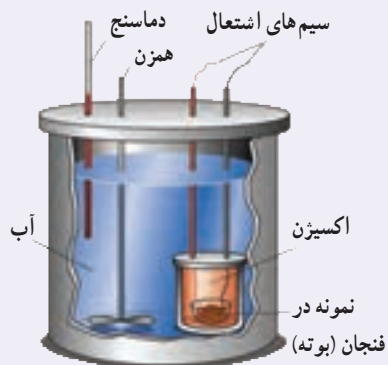
۳- جسم فلزی را درون بشر قرار دهید، مقداری آب روی آن بریزید و سپس مجموعه را روی چراغ گازی روشن بگذارید.

۴- صبر کنید تا آب چند دقیقه بجوشد. دمای آب را در این حالت اندازه بگیرید. این دما، همان دمای جسم فلزی نیز هست.

۵- جسم داغ شده را توسط انبر به سرعت درون گرماسنج بیندازید.

۶- آب درون گرماسنج را با همزن آن به هم بزنید و دمای تعادل را اندازه گرفته و یادداشت کنید.

۷- با استفاده از رابطه ۴-۱۰ گرمای ویژه جسم فلزی را به دست آورید.

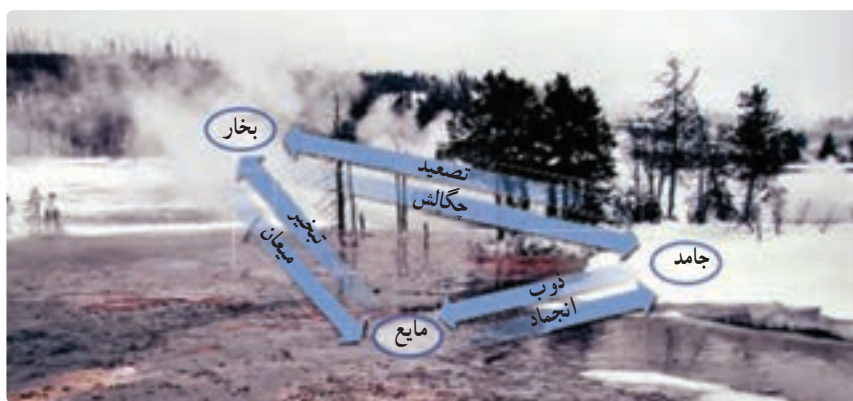


شکل ۴-۲ اجزای یک گرماسنج بمبی

گرماسنج بمبی^۱: گرماسنج بمبی نوعی گرماسنج است که از آن برای تعیین ارزش غذایی مواد با اندازه‌گیری انرژی آزاد شده آنها در حین سوختن استفاده می‌شود. نمونه‌ای که جرم آن به دقت اندازه‌گیری شده است در ظرف سرسته‌ای که محتوی اکسیژن است (که اصطلاحاً به آن بمب گفته می‌شود) قرار داده می‌شود (شکل ۴-۲۲). سپس این محفظه در آب یک گرماسنج قرار داده می‌شود و توسط جریان الکتریکی عبوری از یک سیم نازک، نمونه داخل آن سوزانده می‌شود. با اندازه‌گیری تغییر دمای آب، انرژی حاصل از احتراق ماده مورد نظر را به دست می‌آورند که تقریباً معادل انرژی آزاد شده از آن ماده است.

۴-۴ تغییر حالت‌های ماده

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، موادی که در اطراف ما وجود دارند معمولاً در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز (بخار^۲) یافت می‌شوند. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. برای مثال در شکل ۴-۲۳ انواع تغییر حالت‌هایی که برای سه حالت آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه‌اند.



شکل ۴-۲۳ تغییر حالت‌های مختلف آب که به‌طور هم‌زمان در این تصویر واقعی مشاهده می‌شود.

تبدیل جامد به مایع را **ذوب**، تبدیل مایع به بخار را **تبخیر** و تبدیل مایع به جامد را **انجماد** و تبدیل بخار به مایع را چگالش بخار به مایع یا **میعان** می‌نامیم. امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم و بدون گذر از حالت مایع صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، **تصعید** و تغییر حالت وارون آن، یعنی از بخار به جامد **چگالش بخار به جامد** گفته می‌شود. برای مثال، نفتالین در دمای اتاق به‌طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود، یا در صبح‌های بسیار سرد زمستان، برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشه پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است. در ادامه تغییر حالت‌های جامد - مایع، و مایع - بخار را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم.

^۱ - Bomb Calorimeter

^۲ - در مباحث پیشرفته‌تر فیزیک، بخار و گاز تعاریف متفاوتی دارند، ولی در این کتاب هر دو به یک معنا گرفته شده‌اند.

تغییر حالت جامد — مایع : دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرما دادن را برای جامدهای خالص و بلورین ادامه دهیم، وقتی دمای جسم به مقدار مشخصی برسد، افزایش دما متوقف می‌شود و دما ثابت باقی می‌ماند. در این حالت، جسم شروع به ذوب شدن می‌کند و به مایع تبدیل می‌شود. این دمای ثابت را **نقطه ذوب** یا دمای گذار جامد به مایع می‌نامند، که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد. به استثنای چند مورد خاص، حجم جامدهای بلوری هنگام ذوب شدن افزایش می‌یابد؛ زیرا حجمی که بلور با آرایش منظم مولکول‌ها در حالت جامد اشغال می‌کند، نسبت به این حجم در حالت مایع که آرایش مولکولی نامنظمی دارد، کمتر است. برخلاف جامدهای خالص و بلورین، جامدهای بی‌شکل مانند شیشه و قیر نقطه ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع وقتی این مواد را گرم می‌کنیم، پیش از ذوب شدن خمیری‌شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به تدریج ذوب می‌شوند. معمولاً افزایش فشار وارد بر جسم سبب بالا رفتن نقطه ذوب جسم می‌شود. اما در برخی مواد مانند یخ، افزایش فشار به کاهش نقطه ذوب می‌انجامد که این در مورد یخ بسیار ناچیز است.



در نقطه سه‌گانه آب، سه فاز آب در تعادل اند.

فعالیت ۴-۷

نقطه ذوب یخ در فشار ۱ atm برابر 0°C است. برای آب نقطه‌ای موسوم به نقطه سه‌گانه وجود دارد که در آن سه حالت یخ، آب و بخار در تعادل اند. دمای این نقطه 0.01°C است. تحقیق کنید برای رسیدن به این نقطه به چه فشاری نیاز است.



شکل ۴-۲۴ تصویری از یخ در حال ذوب

عمل ذوب، فرایندی گرماگیر است؛ یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود، زیرا مولکول‌های جامد باید از ساختار صلب قبلی خود رها شوند. این گرما، دمای جسم را تغییر نمی‌دهد؛ بلکه سبب تغییر حالت آن می‌شود. ذوب شدن یک قالب یخ و تبدیل آن به آب (شکل ۴-۲۴) مثالی مشهور از این دست است.

فعالیت ۴-۸



برف و یخ دو شکل آشنای حالت جامد آب هستند، اما با وجود این، ظاهر متفاوتی دارند. دلیل این امر را تحقیق کنید.



اسپری کردن باغ‌های میوه: گاهی اوقات گیاهان را با آب اسپری می‌کنند تا آنها را از یخ زدن در سرمای سخت محافظت کنند. این محافظت ناشی از لایه یخی نیست که روی گیاه تشکیل می‌شود. این محافظت ناشی از فرایندهایی است که پس از نشستن آب روی گیاه رخ می‌دهند؛ یعنی فرایندهایی که در آنها آب تا نقطه انجماد سرد می‌شود و سپس یخ می‌بندد. لازمه هر دو فرایند این است که آب به گیاه گرما بدهد. انرژی که به گیاه و سپس به هوا منتقل می‌شود می‌تواند دمای باغ را بین 2°C تا 0°C حفظ کند که این موجب بقای گیاهان می‌شود. باغبان از روی یخ تشکیل شده روی گیاهان می‌تواند بگوید که آیا اسپری کردن به گیاهان کمک کرده یا مضر بوده است. اگر اسپری کردن به درستی انجام شده باشد، قطرات پیش از یخ زدن روی گیاهان پخش می‌شوند و لایه‌ای شفاف درست می‌کنند. در غیر این صورت، تک تک قطراتی که به طور جزئی یخ زده‌اند، لایه یخی غیر شفاف درست می‌کنند. به همین دلیل باغبان‌ها در طول شب، مدام شفافیت یخ روی گیاهان را بررسی می‌کنند.

انجماد یک مایع و تبدیل آن به یک جامد، عکس فرایند ذوب شدن است و لازمه این فرایند گرفتن گرما از مایع است تا مولکول‌ها بتوانند در یک ساختار جدید قرار گیرند. در اینجا نیز تغییر حالت بدون تغییر دما رخ می‌دهد. گرمای منتقل شده برای تغییر حالت جسم از جامد به مایع یا از مایع به جامد، با جرم جسم نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم جسم را گرمای نهان ویژه ذوب می‌گویند که به اختصار آن را گرمای نهان ذوب می‌نامیم و آن را با L_F نشان می‌دهیم^۱.

$$L_F = \frac{Q}{m} \quad (۱۱-۴)$$

گرمای نهان ذوب بستگی به جنس جسم دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. بنابراین، وقتی نمونه‌ای به جرم m کاملاً تغییر فاز دهد گرمای منتقل شده برابر با $Q = mL_F$ است.

وقتی تغییر فاز از جامد به مایع انجام می‌شود، جسم گرما می‌گیرد ($Q > 0$):

$$Q = +mL_F$$

و اگر تغییر فاز از مایع به جامد انجام شود، جسم گرما از دست می‌دهد ($Q < 0$):

$$Q = -mL_F$$

گرمای نهان ذوب و نقطه ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقادیر برای برخی از مواد در جدول ۴-۴ داده شده است.

جدول ۴-۴ نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)
هیدروژن	-۲۵۹	۵۸/۶
اکسیژن	-۲۱۸	۱۳/۸
ازت	-۲۱۰	۲۵/۵
جیوه	-۳۹	۱۱/۸
یخ	0°	۳۳۳/۷
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۴	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

۱- اندیس F حرف اول واژه انگلیسی «Fusion» است که بیشتر به معنای ذوب به کار می‌رود. با اینکه هم‌اکنون از واژه «melting» برای ذوب استفاده می‌شود، همچنان از F برای نشان دادن ذوب استفاده می‌گردد.

فعالیت ۹-۴

تحقیق کنید وجود ناخالصی در مایع چه تأثیری بر نقطه انجماد آن دارد.

مثال ۱۱-۴



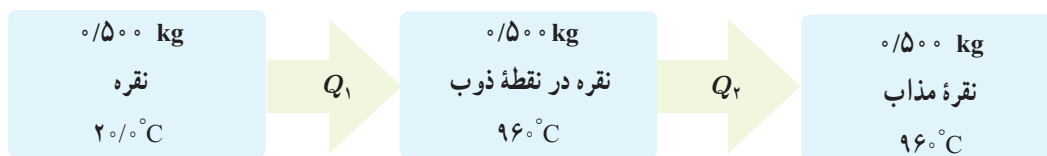
فلز گالیم (Ga) یکی از چند عنصری است که در دماهای پایین ذوب می‌شود. دمای ذوب این فلز 29.8°C و گرمای نهان ذوب آن 8.04 kJ/kg است. یک قطعه 10°C گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطه ذوب خود به طور کامل ذوب شود؟ (از تبادل گرما بین فلز و هوای محیط چشم‌پوشی می‌شود.)

پاسخ: با استفاده از رابطه ۱۱-۴ داریم:

$$Q = mL_F = (10^{\circ}\text{C} \times 10^{-2} \text{ kg})(8.04 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 804 \text{ J}$$

مثال ۱۲-۴

یک جواهرساز برای ساختن جواهری می‌خواهد از 0.500 kg نقره برای ریختن در قالب‌های جواهر استفاده کند. به این منظور او باید نقره را ذوب کند. اگر دمای اولیه نقره همان دمای اتاق و برابر 20°C باشد، چقدر گرما باید به این مقدار نقره داده شود؟ **پاسخ:** مرحله‌های این فرایند به‌طور طرح‌وار در شکل زیر رسم شده است.



که در آن

$$Q_1 = m_{\text{نقره}} c_{\text{نقره}} \Delta\theta = (0.500 \text{ kg})(236 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C})(960^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = 1.11 \times 10^5 \text{ J}$$

$$Q_2 = m_{\text{نقره}} L_F = (0.500 \text{ kg})(88.3 \text{ kJ/kg}) = 0.442 \times 10^5 \text{ J}$$

که در آن از گرمای ویژه و گرمای نهان ذوب نقره مندرج در جدول‌های ۳-۴ و ۴-۴ استفاده کردیم. اکنون گرمای کل با جمع کردن Q_1 و Q_2 به دست می‌آید:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1.11 \times 10^5 \text{ J} + 0.442 \times 10^5 \text{ J} = 1.55 \times 10^5 \text{ J} = 155 \text{ kJ}$$

آزمایش ۳-۴

هدف: تعیین گرمای نهان ذوب یخ

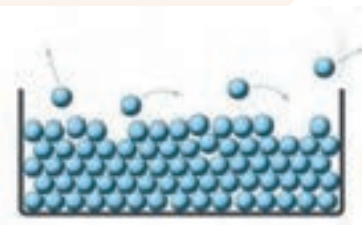
وسایله‌های موردنیاز: بشر شیشه‌ای با حجم 400 cc ، چراغ گازی، سه پایه، توری نسوز، ترازو، مقداری مخلوط آب و یخ، گرماسنج با ظرفیت گرمایی معلوم و دماسنج.

شرح آزمایش :

- ۱- 20°C آب در بشر بریزید و آن را روی سه پایه قرار دهید. چراغ گاز را روشن کنید تا دمای آب دست کم به 60°C برسد.
- ۲- آب گرم را درون گرماسنج بریزید و پس از مدتی دمای تعادل آب و گرماسنج را با دماسنج اندازه بگیرید و یادداشت کنید.
- ۳- قطعه یخی به جرم تقریبی 50g را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای 0°C) بیرون آورده و جرم آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید.
- ۴- یخ را درون گرماسنج بیندازید و صبر کنید تا کاملاً ذوب شود. اینک دمای تعادل را اندازه بگیرید.
- ۵- با استفاده از اعداد به دست آمده، گرمای ذوب (L_F) را حساب کنید.

تغییر حالت مایع — بخار : دیدیم که به تبدیل مایع به بخار تبخیر می‌گویند. خشک شدن لباس

خیسی که روی بند رخت آویخته شده است، یا خشک شدن سریع یک زمین خیس در هوای گرم تابستان مثال‌هایی از نوعی تبخیر هستند که به آن **تبخیر سطحی** گفته می‌شود. تا پیش از رسیدن به نقطه جوش مایع، تبخیر به طور پیوسته‌ای از سطح مایع رخ می‌دهد. در پدیده تبخیر سطحی، تندی برخی از مولکول‌های مایع به حدی می‌رسد که می‌توانند از سطح مایع فرار کنند (شکل ۴-۲۵). تجربه نشان می‌دهد آهنگ رخ دادن این فرایند به عواملی از جمله دما و مساحت سطح مایع بستگی دارد.



شکل ۴-۲۵ در حین تبخیر سطحی، مولکول‌های پراثرتری از سطح مایع می‌گریزند.

فعالیت ۴-۱۰



- الف) بررسی کنید از دیدگاه مولکولی، افزایش دما و افزایش مساحت سطح مایع چگونه بر آهنگ تبخیر سطحی مایع اثر می‌گذارد؟
- ب) با بررسی تبخیر سطحی در شرایط مختلف سعی کنید از راه تجربه، عامل یا عامل‌های دیگری را پیدا کنید که بر آهنگ تبخیر سطحی مؤثر باشند.
- پ) تحقیق کنید کوزه‌های سفالی چگونه می‌توانند آب داخل خود را خنک کنند.

خوب است بدانید



تعریق و تنظیم دمای بدن : برای جانوران بزرگ جثه، نسبت مساحت سطح

بدن — که از آن گرما تلف می‌شود — به حجم داخلی بدن — که در آن گرما تولید می‌شود — نسبتاً کم است. بنابراین، آنها غالباً دستگاه‌های ویژه‌ای برای خلاص شدن از این گرمای ناخواسته دارند؛ مثلاً سگ‌ها با نفس نفس زدن و خرگوش کوهی که در تصویر نشان داده شده است، با فرستادن خون به گوش‌های نازک، بزرگ و پر از مویرگ خود این گرمای ناخواسته را از دست می‌دهند. بدن انسان‌ها به گونه‌ای دیگر عمل می‌کند و با عرق کردن گرما از دست می‌دهد. در واقع عرق کردن سبب می‌شود که لایه‌آبی روی پوست بدن تشکیل شود. این لایه آب با جذب گرمای مورد نیاز برای تبخیر سطحی از بدن، بدن را خنک می‌کند.



شکل ۴-۲۷ در هنگام جوشیدن، حباب‌ها از محل تشکیل خود به سمت سطح آزاد مایع بالا می‌روند.

وقتی مایعی را روی اجاقی قرار می‌دهیم، با گرم کردن مایع به دمای مشخصی می‌رسیم که در آن حباب‌های گاز از درون مایع بالا می‌آیند، که نشانه‌ای از آغاز فرایندی موسوم به **جوشیدن**^۱ است. به این دمای مشخص، نقطه جوش می‌گویند. در مورد آب، به محض اینکه حباب‌ها بالا می‌آیند به آب کمی سردتر می‌رسند و پیش از رسیدن به سطح آزاد آب با صدای تیزی فرو می‌پاشند و در آنجا دوباره به مایع تبدیل می‌شوند. ولی وقتی دمای آب همچنان بالا برود، حباب‌ها می‌توانند بیشتر بالا بروند تا اینکه سرانجام به سطح آزاد آب می‌رسند و در آنجا با صدای دیگری که به آن «غلغل کردن» می‌گویند فرو می‌پاشند (شکل ۴-۲۶). در این حالت است که می‌گوییم آب به «جوش کامل» رسیده است و آهنگ تبخیر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دماسنجی که مخزن آن درست بالای سطح آب قرار دارد دمای ثابتی را نشان می‌دهد که برای آب خالص در فشار جو متعارف (۱ atm)، 100°C است. در جوشیدن، کل مایع در فرایند تبخیر شرکت می‌کند. به فرایند تبخیر تا پیش از رسیدن به نقطه جوش، تبخیر سطحی و به فرایند تبخیر در نقطه جوش، اصطلاحاً جوشیدن می‌گویند، در حالی که هر دو فرایند، تبخیرند.

فعالیت ۴-۱۱

از تفاوت نقطه جوش اجسام مختلف در صنعت، استفاده زیادی می‌شود. تحقیق کنید چگونه از این ویژگی برای جدا کردن محصولات نفتی استفاده می‌شود؟

جدول ۴-۵ مقادیر L_V برای آب در دماهای مختلف^۲

L_V (kJ/kg)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۲۴۹۰	۰
۲۴۵۴	۱۵
۲۳۷۴	۵۰
۲۲۵۶	۱۰۰
۲۱۱۵	۱۵۰
۱۹۴۰	۲۰۰

* مقادیر تا 100°C در فشار ۱ atm است.

تجربه نشان می‌دهد که گرمای منتقل شده برای تبخیر هر مایع با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم مایع بخار شده را گرمای نهان ویژه تبخیر می‌نامیم که برای سادگی **گرمای نهان تبخیر** نامیده می‌شود و آن را با L_V ^۲ نشان می‌دهیم.

$$L_V = \frac{Q}{m} \quad (۴-۱۲)$$

گرمای نهان تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. جدول ۴-۵ برخی از مقدارهای L_V را نشان می‌دهد که به طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به دست آمده است.

پوشش ۴-۴

چرا در جدول ۴-۵ گرمای تبخیر آب با افزایش دمای آن کاهش می‌یابد؟

۱- Boiling

۲- زیرنویس V حرف اول واژه انگلیسی Vaporization به معنای تبخیر است.

گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم m که گرمای تبخیر آن L_V است از رابطه $Q = +mL_V$ به دست می‌آید. علامت مثبت نشان دهنده آن است که مایع هنگام تبخیر گرما می‌گیرد.

مثال ۴-۱۳

معمولاً وقتی هوا را با بخاری‌های شعله‌ای گرم می‌کنند، برای حفظ رطوبت محیط، ظرف آبی را روی بخاری می‌گذارند. اگر دمای آب در یکی از این ظرف‌ها روی 50°C ثابت مانده باشد، تعیین کنید برای تبخیر 200 kg از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

پاسخ: با توجه به رابطه ۴-۱۲ و استفاده از جدول ۴-۵ داریم:

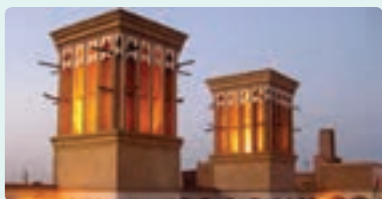
$$Q = +mL_V = +(200\text{ kg})(2374 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 474800 \text{ kJ}$$

جدول ۴-۶ نقطه جوش و گرمای نهان تبخیر برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر

ماده	نقطه جوش ($^\circ\text{C}$)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیوم	-۲۶۹	۲۱
هیدروژن	-۲۵۳	۴۶۰
ازت	-۱۹۶	۲۰۰
اکسیژن	-۱۸۳	۲۱۴
آمونیاک	-۳۵	۱۳۶۹
اتر	۳۵	۳۷۷
برم	۵۹	۱۹۳
کلروفرم	۶۲	۲۴۷
اتانول	۷۹	۸۴۶
بنزن	۸۰	۳۹۰
آب	۱۰۰	۲۲۵۶
ید	۱۸۴	۱۶۴
گلیسرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای نهان تبخیر مایع در نقطه جوش آن سروکار داریم و البته نقطه جوش هر مایع به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطه جوش آن می‌شود. جدول ۴-۶ نقطه جوش و گرمای نهان تبخیر مربوط به این نقطه را برای برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر نشان می‌دهد.

خوب است بدانید



بادگیرها: بادگیرها از گذشته‌های بسیار دور در مناطق کویری ایران مانند یزد، کرمان، کاشان، طبس و... برای خنک کردن هوای داخل بناها مورد استفاده قرار می‌گرفته است. ساختمان بادگیر به شکل مکعب مستطیل است که در دو یا چهار طرف آن، شکاف‌هایی تعبیه شده است. جریان باد با برخورد به شکاف‌های رو به باد، توسط کانال‌هایی به درون ساختمان هدایت می‌شود و بدین ترتیب هوای بیرون به داخل ساختمان می‌رود. در درون ساختمان، هوا از طریق یک تونل به پایین بادگیر و سپس از آنجا به زیرزمین منتقل می‌شود. آب به صورت نم روی دیواره‌های تونل و در حوض کوچکی در زیرزمین وجود دارد و هوا با تبخیر شدن آب، بیشتر خنک می‌شود. به عبارتی، گرما از دیواره‌های تونل، حوض آب یا هوا گرفته می‌شود تا آب از مایع به بخار تبدیل شود. سپس جریان هوا از طریق کانال‌های دیگری از دهانه‌های پشت به بادگیر خارج می‌شود.

الف) چرا غذا در دیگ زودپز، زودتر پخته می‌شود؟
 ب) دلیل دیرتر پخته شدن تخم مرغ در ارتفاعات چیست؟ کوهنوردان برای رفع این مشکل چه کاری انجام می‌دهند؟

مثال ۴-۱۴

۲/۰ لیتر آب را درون یک کتری برقی با توان الکتریکی ۱/۵ kW می‌ریزیم و آن را روشن می‌کنیم.
 الف) از شروع جوشیدن تا تبخیر همه آب درون کتری چقدر گرما به آب داده می‌شود؟
 ب) چه مدت طول می‌کشد تا این فرایند انجام شود؟ فرض کنید تمام انرژی الکتریکی تبدیل شده به انرژی گرمایی، به آب می‌رسد.

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه ۴-۱۲ و جدول ۴-۶ داریم:

$$Q = mL_V = (2/0 \text{ kg})(2256 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 4/5 \times 10^6 \text{ J}$$

ب) آن گاه با استفاده از رابطه توان خواهیم داشت:

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{4/5 \times 10^6 \text{ J}}{1/5 \times 10^3 \text{ J/s}} = 3/0 \times 10^3 \text{ s} = 5/0 \text{ min}$$

برای اندازه‌گیری گرمای نهان تبخیر در نقطه جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش ۴-۴ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

آزمایش ۴-۴

هدف: تعیین گرمای نهان تبخیر آب

وسایله‌های مورد نیاز: بشر ۲۰۰ cc، دماسنج، سه پایه، توری، پایه و گیره، چراغ گاز، زمان‌سنج، آب و ترازو

شرح آزمایش:

- ۱- جرم بشر خالی را اندازه‌گیری کنید و مقدار معینی آب (مثلاً 200 kg) در آن بریزید.
- ۲- توری را روی سه پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و بشر را روی توری قرار دهید.
- ۳- دماسنج را به کمک پایه و گیره طوری درون بشر قرار دهید تا مخزن آن کمی پایین‌تر از سطح آب باشد.

۴- در لحظه‌ای که دمای آب به $\theta_1 = 70^\circ \text{C}$ می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید ($t_1 = 0 \text{ s}$).

۵- صبر کنید تا آب به جوش آید. زمان (t_2) و دما (θ_2) را ثبت کنید.

۶- با استفاده از رابطه $P(t_2 - t_1) = mc(\theta_2 - \theta_1)$ و جای‌گذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب (P) را به دست آورید.

۷- گرما دادن را آن قدر ادامه دهید تا مقدار قابل ملاحظه‌ای از آب بخار شود (تذکر: در طول گرمادادن باید شرایط چراغ و بشر ثابت بماند تا توان گرمادهی چراغ به آب تغییر نکند).

۸- زمان (t_2) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن کردن آن جرم آب بخار شده (m') را به دست آورید.

۹- گرمای تبخیر را با استفاده از رابطه $P(t_2 - t_1) = m' L_V$ به دست آورید.



تمرین ۴-۶

قطعه یخی به جرم $1/0 \text{ kg}$ و دمای اولیه -2°C را آن قدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار 100°C شود. کل گرمای مورد نیاز برای این تبدیل چند کیلو ژول است؟

تبدیل بخار به مایع نیز در طبیعت رخ می‌دهد و گاهی قطره‌های مایعی از بخار روی سطوح جامد تشکیل می‌شود. به این پدیده، **میعان** گفته می‌شود. در واقع میعان، وارون فرایند تبخیر است. بنابراین، بخار گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. گرمای مربوط به میعان مقداری بخار به جرم m و گرمای نهان تبخیر L_V از رابطه $Q = -mL_V$ محاسبه می‌شود. علامت منفی نشان‌دهنده آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد و باعث گرم شدن اجسام پیرامون خود می‌شود؛ مثلاً یکی از عواملی که موجب می‌شود در هوایی که رطوبت آن زیاد است، احساس گرمای بیشتری بکنیم، همین میعان بخار آب روی بدنمان است.

فعالیت ۴-۱۲



در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق کنید.

مثال ۴-۱۵

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی روی شیشه پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره‌قطره می‌شود. اگر دمای شیشه حدود 5°C باشد برای آنکه 50 g آب روی شیشه تشکیل شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

پاسخ: با استفاده از جدول ۴-۶ و رابطه ۴-۱۲ داریم:

$$Q = -mL_V = -(50 \times 10^{-3} \text{ kg})(2490 \times \frac{10^3 \text{ J}}{\text{kg}}) = -1/2 \times 10^5 \text{ J}$$

در این عمل، $1/2 \times 10^5 \text{ kJ}$ گرما به شیشه داده می‌شود.

فعالیت ۴-۱۳

در فرایندهای تغییر حالت (تغییر فاز) دما تغییر نمی‌کند، اما انرژی درونی ماده تغییر می‌کند. در این باره تحقیق کنید.

همان‌طور که در کتاب علوم هفتم دیدیم، شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارت‌اند از: رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی. در هر فرایند انتقال گرما، ممکن است هر سه این ساز و کارها دخالت داشته باشند (شکل ۴-۲۷).

اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. انتقال گرما، از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم هم‌دما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر ساز و کار هریک از این روش‌ها می‌پردازیم.

رسانش گرمایی: بسیاری از ما این تجربه را داریم که انتهای قاشق فلزی درون ظرف غذای روی اجاق روشن را با دست گرفته و داغی آن را احساس کرده‌ایم. اما همچنین دیده‌ایم اجسامی دیگر مانند شیشه، چوب و... نیز می‌توانند گرما را تا حدودی انتقال دهند. رسانش گرمایی در این اجسام، به دلیل ارتعاش اتم‌ها و گسترش این ارتعاش‌ها در طول آنهاست (شکل ۴-۲۸). به جهت نبود الکترون‌های آزاد، این اجسام، رساناهای گرمایی خوبی نیستند. به همین دلیل از برخی از این مواد در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا حتی‌الامکان از خروج گرما در زمستان و ورود آن در تابستان جلوگیری کنند. اما در فلزات افزون بر ارتعاش‌های اتمی، الکترون‌های آزاد نیز در انتقال گرما نقش دارند. بنابراین، نسبت به سایر اجسام، رساناهای گرمایی بسیار بهتری هستند. در واقع چون الکترون‌ها بسیار کوچک‌اند و به سرعت حرکت می‌کنند با برخورد با سایر الکترون‌ها و اتم‌ها سبب رسانش گرما می‌شوند (شکل ۴-۲۹). بنابراین، در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرما بیشتر از اتم‌هاست.

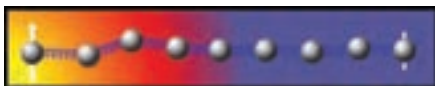
با شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال گرما به روش رسانش می‌توانیم گرمای منتقل شده از یک سر میله به سر دیگر آن را محاسبه کنیم. فرض کنید طول یک میله L و مساحت مقطع آن A باشد (شکل ۴-۳۰) و یک سر میله در دمای بالاتر T_H و سر دیگر آن در دمای پایین‌تر T_L قرار گرفته باشد. گرمایی که در مدت زمان t از انتهای با دمای بالاتر میله به انتهای با دمای پایین‌تر آن شارش می‌یابد، را با Q نشان می‌دهیم. نسبت $\frac{Q}{t}$ ، آهنگ رسانش گرمایی نامیده می‌شود و آن را با H نشان می‌دهیم.

تجربه نشان می‌دهد که آهنگ رسانش گرمایی (H) با مساحت سطح مقطع میله (A) و اختلاف دمای دو انتهای میله ($T_H - T_L$) نسبت مستقیم و با طول میله (L) نسبت وارون دارد؛ یعنی:

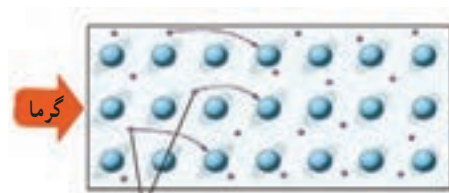
$$H = \frac{Q}{t} = k \frac{A(T_H - T_L)}{L} \quad (۴-۱۳)$$



شکل ۴-۲۷ هر سه روش انتقال گرما را در این تصویر مشاهده می‌کنید.

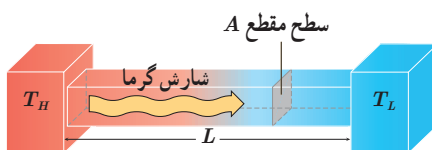


شکل ۴-۲۸ در نافلزات گرما صرفاً از طریق ارتعاش اتم‌ها انتقال می‌یابد. در شکل، این انتقال ارتعاشات توسط فنرها شبیه‌سازی شده است.



الکترون‌های آزاد

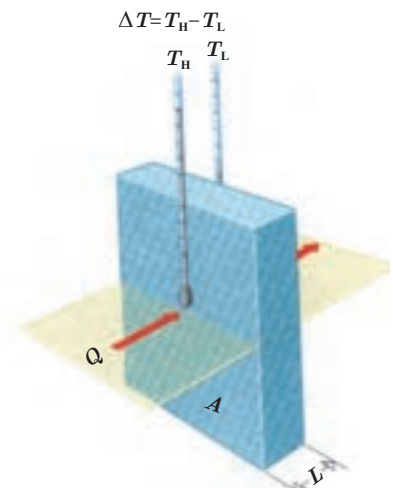
شکل ۴-۲۹ الکترون‌های آزاد با برخورد به یکدیگر و اتم‌ها موجب رسانش بهتری برای گرما می‌شوند.



شکل ۴-۳۰ میله‌ای به طول L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_H و T_L قرار گرفته است.

در این رابطه، k رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. در SI، یکای رسانندگی گرمایی $J/s \cdot m \cdot K$ یا وات بر متر-کلونین ($W/m \cdot K$) است. جدول ۴-۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۷ رسانندگی گرمایی برخی از مواد			
رسانندگی گرمایی ($W/m \cdot K$)	ماده	رسانندگی گرمایی ($W/m \cdot K$)	ماده
۲	یخ	۰/۰۵	پشم شیشه
۳۵	سرب	۰/۰۴	چوب پنبه
۸۰	آهن	۰/۰۲۴	هوای خشک
۲۳۵	آلومینیم	۰/۲ تا ۰/۱	انواع چوب
۴۲۰	نقره	۰/۶	آب
۴۰۰	مس	۰/۸ تا ۰/۶	آجر
		۱ تا ۰/۶	انواع شیشه



شکل ۴-۳۱ تیغه‌ای به ضخامت L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_L و T_H قرار گرفته است.

اگرچه رابطه ۴-۱۳ برای میله بیان شده است، ولی برای تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع A و ضخامت L نیز برقرار است (شکل ۴-۳۱). از لحاظ تجربی برای اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی مواد برای اجسام فلزی از میله و برای اجسام نافلزی از تیغه، یا بره استفاده می‌کنند.

پرسش ۴-۶

برخی آشپزها برای آنکه سیب‌زمینی زودتر آب‌پز شود، ابتدا چند سیخ کوچک فلزی درون سیب‌زمینی فرو می‌کنند و بعد آن را در آب انداخته و روی اجاق قرار می‌دهند. علت این کار آشپزها چیست؟

مثال ۴-۱۶

طول و عرض شیشه پنجره اتاقی $۲/۰\text{ m}$ و $۱/۵\text{ m}$ و ضخامت آن $۵/۰\text{ mm}$ است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است، $-۳/۰^\circ\text{C}$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است، $+۲/۰^\circ\text{C}$ است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟ ($k = ۱\text{ W/m} \cdot \text{K}$)

پاسخ: با استفاده از رابطه ۴-۱۳ داریم:

$$H = k \frac{A(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن $k = ۱\text{ W/m} \cdot \text{K}$ ، $A = (۱/۵\text{ m})(۲/۰\text{ m}) = ۳/۰\text{ m}^2$ ، $\Delta T = ۵/۰^\circ\text{C} = ۵/۰\text{ K}$ و $L = ۰/۰۰۵\text{ m}$ در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$H = (۱\text{ W/m} \cdot \text{K}) \frac{(۳/۰\text{ m}^2)(۵/۰^\circ\text{C})}{۰/۰۰۵\text{ m}} = ۳ \times ۱۰^۳\text{ W}$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری ۳ kW می‌شود.

مثال ۴-۱۷



برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشه پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایه میانی هوا جایگزین می‌کنند. طول و عرض شیشه دوجداره پنجره اتاقی به ترتیب $2/0\text{ m}$ و $1/5\text{ m}$ ، ضخامت هر یک از دو لایه شیشه‌ای آن 5 mm و ضخامت لایه میانی هوا 12 mm است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است $3/0^\circ\text{C}$ - و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است $2/0^\circ\text{C}$ + است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت، با عدد به دست آمده در مثال قبل مقایسه کنید. فرض کنید می‌توان مجموعه شیشه دوجداره و هوای بین آن را مانند تیغه یا بره‌ای با همان مساحت و ضخامت لایه هوا در نظر گرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً برابر با رسانندگی گرمایی هواست.

پاسخ: با استفاده از رابطه ۴-۱۳ داریم:

$$H = kA \frac{(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت:

$$H = (0/024\text{ W/m.K}) \frac{(3/0^\circ\text{C} - 2/0^\circ\text{C})}{0/012\text{ m}} = 30\text{ W}$$

توجه کنید که در این محاسبه از رسانندگی گرمایی هوا، $k = 0/024\text{ W/m.K}$ استفاده شد. همان‌طور که می‌بینید عدد به دست آمده، تفاوت زیادی با عدد به دست آمده در مثال قبل دارد (100 بار کوچک‌تر است) که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

تمرین ۴-۷

مساحت استخری با کف تخت، 820 مترمربع و عمق آن $2/0$ متر است. در یک روز گرم دمای سطح آب 25°C و دمای کف آب 12°C است. آهنگ رسانش گرمایی از سطح استخر به کف آن چقدر است؟

فعالیت ۴-۱۴



تصویری بسیار بزرگ شده از موی یک خرس قطبی

موهای خرس قطبی توخالی هستند. تحقیق کنید این موضوع چه نقشی در گرم نگه داشتن بدن خرس در سرمای قطب دارد؟

همرفت: وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چگونه همه آب آن در مدت نه چندان زیادی گرم می‌شود؟ بخاری چگونه هوای داخل اتاق را گرم می‌کند؟ انتقال گرما در مایعات و گازها که معمولاً رساناهای گرمایی خوبی نیستند عمدتاً به روش همرفت، یعنی همراه با جابه‌جایی بخشی از خود ماده، انجام می‌گیرد. همان‌طور که در کتاب علوم هشتم دیدید این پدیده بر اثر کاهش چگالی شاره با افزایش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما به روش همرفت را می‌توان به سادگی با انجام آزمایش نمایش داد.

آزمایش ۴-۵

هدف: مشاهده پدیده همرفت

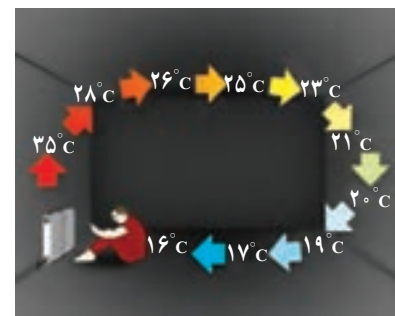
وسایلهای موردنیاز: لوله همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پتاسیم پرمنگنات یا جوهر، چراغ الکلی یا گازی

شرح آزمایش:

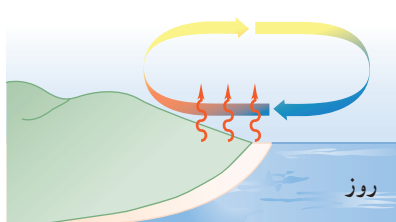
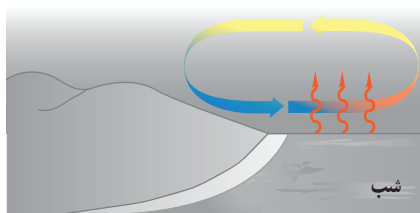
- ۱- لوله را از آب سرد پر کنید و به آرامی چند دانه پتاسیم پرمنگنات (یا چند قطره جوهر) را از دهانه لوله به داخل آن بریزید.
- ۲- یکی از شاخه‌های قائم لوله را مطابق شکل روی شعله بگیرید و در همان لحظه شاخه قائم دیگر لوله را با دست لمس کنید.
- ۳- دستتان را از شاخه قائم بردارید و در حالی که گرما دادن را ادامه می‌دهید به مایع درون لوله با دقت نگاه کنید. پس از چند دقیقه دوباره همان شاخه قائم لوله را لمس کنید.
- ۴- مشاهدات خود را بنویسید و با بحث در گروه، دلیل هریک از مشاهدات را توضیح دهید.



همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، برخلاف رسانش گرمایی، انتقال گرما با انتقال بخش‌هایی از خود ماده صورت می‌گیرد و وقتی شاره در تماس با جسمی گرم‌تر از خود قرار گیرد، فاصلهٔ متوسط مولکول‌ها در بخشی از شاره که در تماس با جسم گرم است، افزایش می‌یابد؛ بدین ترتیب حجم آن زیاد می‌شود، در نتیجه چگالی این قسمت از شاره کاهش می‌یابد؛ چون اکنون چگالی این شارهٔ انبساط‌یافته کمتر از شارهٔ سردتر اطراف خود است. نیروی شناوری (بنا به اصل ارشمیدس) موجب بالا رفتن آن می‌شود. آن‌گاه مقداری از شارهٔ سردتر اطراف آن، جایگزین شارهٔ گرم‌تر می‌شود که بالا رفته است و این فرایند به همین ترتیب ادامه می‌یابد. گرم شدن هوای داخل اتاق به وسیلهٔ بخاری و رادیاتور شوفاژ (شکل ۴-۳۲)، گرم شدن آب درون قابلمه (شکل ۴-۳۳)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۴-۳۴)، انتقال گرما از مرکز خورشید به سطح آن و ... همگی بر اثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهند. همهٔ این مثال‌ها نمونه‌هایی از **همرفت طبیعی** است.



شکل ۴-۳۲ گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت



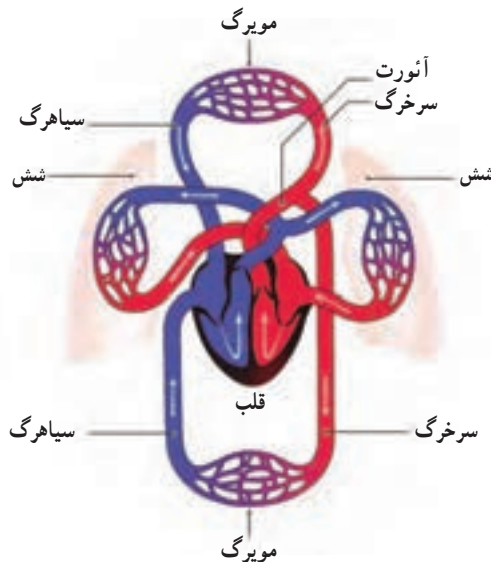
شکل ۴-۳۳ روز: زمین ساحل گرم‌تر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی دریا به سمت ساحل می‌شود. شب: زمین ساحل سردتر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی ساحل به سمت دریا می‌شود.



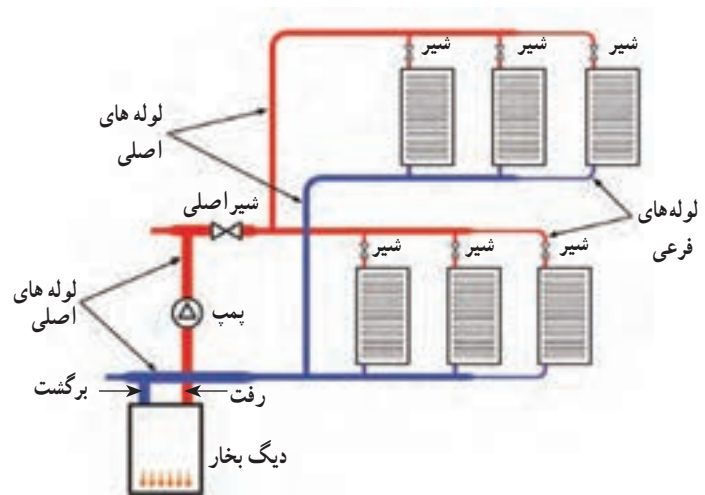
شکل ۴-۳۳ گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت

به نظر شما چه ارتباطی بین انتقال گرما به روش همرفت و ضریب انبساط حجمی، برای یک مایع وجود دارد؟

نوع دیگری از همرفت، **همرفت واداشته** است که در آن شاره به کمک یک تلمبه (طبیعی یا مصنوعی) به حرکت واداشته می‌شود تا با این حرکت، انتقال گرما صورت پذیرد. سیستم گرم‌کننده مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۴-۳۵)، سیستم خنک‌کننده موتور اتومبیل و نیز گرم و سرد شدن بخش‌های مختلف بدن بر اثر گردش جریان خون (شکل ۴-۳۶) در بدن جانوران خونگرم مثال‌هایی عینی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.



شکل ۴-۳۶ طرحی از دستگاه گردش خون که در آن قلب همچون تلمبه‌ای باعث همرفت واداشته خون می‌شود.



شکل ۴-۳۵ طرحی از سیستم گرم‌کننده مرکزی در ساختمان‌ها

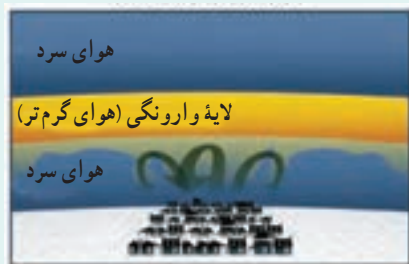
فعالیت ۴-۱۵



چهار بطری شیشه‌ای یکسان، دو رنگ جوهر قرمز و آبی، دو کارت ویزیت مقوایی و آب بسیار سرد و بسیار گرم تهیه کنید. در دو تا از بطری‌ها جوهر آبی و در دو بطری دیگر جوهر قرمز بریزید. سپس بطری‌های آبی را با آب خیلی سرد و بطری‌های قرمز را با آب خیلی گرم پر کنید. اکنون در حالی که دهانه یک بطری قرمز را با کارت ویزیت گرفته‌اید، دهانه آن را دقیقاً روی دهانه یک بطری آبی قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. همین آزمایش را به طور معکوس نیز انجام دهید؛ یعنی این بار، یک بطری آبی رنگ که دهانه آن با کارت پوشیده شده است را روی دهانه یک بطری قرمز رنگ قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. مشاهدات خود را توضیح دهید. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



(الف)



(ب)

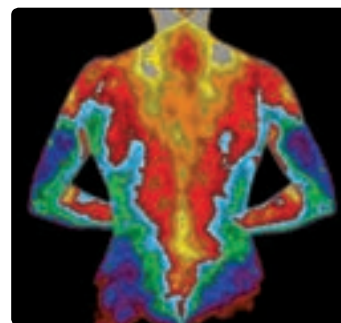
الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در: الف) شرایط عادی و ب) شرایطی که وارونگی هوا رخ می‌دهد.

وارونگی هوا: در شرایط عادی، توزیع لایه‌های هوای اطراف زمین به این ترتیب است که هوای گرم در اطراف سطح زمین قرار دارد و هوای لایه‌های بالاتر از آن به تدریج سرد و سردتر است. بدیهی است که در این حالت شرایطی مثل همرفت طبیعی حاکم است؛ یعنی هوای گرم‌تر به بالا می‌رود و هوای سردتر و چگال‌تر پایین می‌آید و بدین ترتیب چرخش هوایی بر اثر پدیده همرفت رخ می‌دهد (شکل الف).

وارونگی هوا معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود و در آن همرفت طبیعی در جو زمین متوقف می‌گردد. در چنین شب‌هایی، لایه هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایه هوای گرم بالاتر قرار می‌گیرد. این لایه هوای گرم، پیش از این، بر اثر پدیده همرفت در یک روز عادی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایه هوای سرد مجاور زمین، باعث می‌شود پدیده همرفتی بین این لایه بسیار سرد و لایه هوای گرم بالای آن رخ ندهد. بدین ترتیب، مانع از چرخش هوا بر اثر پدیده همرفت در سطح زمین می‌گردد. به این پدیده، وارونگی هوا می‌گویند. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلاینده شهری واقع در لایه هوای سرد مجاور زمین، که عمدتاً ناشی از تردد خودروها و کارخانجات دودزا است، در این لایه حبس

می‌شوند (شکل ب). وارونگی هوا تا وقتی تداوم دارد که بر اثر وزیدن باد لایه‌های هوای سرد و گرم جابه‌جا شود، یا با افزایش دمای قابل توجه لایه سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جو زمین از سر گرفته شود. با توجه به اینکه در این پدیده، الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در یک روز طبیعی بر هم می‌خورد، به این پدیده وارونگی دما^۱ نیز گفته می‌شود.

تابش گرمایی: همه ما تجربه گرم شدن در آفتاب را داریم. با نزدیک کردن دستان به اجسام گرمی مانند رادیاتور گرم شوفاژ، یا زیر لامپ رشته‌ای روشن نیز تجربه مشابهی خواهیم داشت. آیا با نزدیک کردن دستان به زیر لامپ رشته‌ای، گرما با روش رسانش، یا همرفت به دستان می‌رسد؟



می‌دانید که هوا رسانای خوبی نیست و چون دست شما زیر لامپ قرار دارد، انتقال گرما به روش همرفت نیز نمی‌تواند رخ داده باشد. خورشید، لامپ داغ، کتری، رادیاتور شوفاژ و ... از خود پرتوهایی گسیل می‌کنند که دست ما با جذب کردن آنها گرم می‌شود. این پرتوها از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند که در سال‌های بعد خواهید دید شامل امواج رادیویی، تابش فروسرخ، نور مرئی، تابش فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای γ است. هر کدام از این امواج چشمه‌های تولیدکننده مربوط به خود را دارد. ما در این بخش، به تابش الکترومغناطیسی گسیل‌شده از مواد

شکل ۴-۳۷ تصویری دمانگانت از بدن یک فرد معمولی. سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای 22°C به دلیل تابش گرمایی با آهنگی در حدود 10 W گرما از دست می‌دهد در حالی که در همین شرایط به دلیل همرفت و رسانش در مجموع با آهنگی در حدود 100 W گرما از دست می‌دهد.

۱- Air Inversion

۲- Temperature Inversion

دما و گرما



شکل ۴-۳۸ درون مکعب لسلی، آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.



شکل ۴-۳۹ اینها اندام‌های حفرة‌ای هستند که گرما را آشکار می‌کنند.



شکل ۴-۴۰ کلم اسکانک برف اطراف خود را آب کرده است.

بر اثر دمای آنها سروکار داریم. در واقع هر جسم در هر دمایی تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند و به همین دلیل به این نوع تابش، تابش گرمایی می‌گویند. نشان داده می‌شود که تابش گرمایی در دماهای زیر حدود 50°C عمدتاً به صورت تابش فروسرخ است که نامرئی است. برای آشکارسازی تابش‌های فروسرخ از ایزاری موسوم به **دمانگار**^۱ استفاده می‌کنیم و به تصویر به دست آمده از آن **دمانگاشت**^۲ می‌گوییم. شکل ۴-۳۷ تصویر دمانگاشتی از بدن یک شخص را نشان می‌دهد. توجه کنید که رنگ‌ها نمادین است و ناحیه‌های گرم‌تر با رنگ قرمز و ناحیه‌های سردتر با رنگ آبی مشخص شده است.

تابش گرمایی از سطح هر جسم علاوه بر دما به مساحت، میزان صیقلی بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۴-۳۸). سطوح صاف و درخشان با رنگ‌های روشن تابش گرمایی کمتری دارند، در حالی که تابش گرمایی سطوح تیره، ناصاف و مات بیشتر است. تابش گرمایی در پدیده‌های زیستی نیز کاربردهای فراوانی دارد که در اینجا به دو نمونه از آنها اشاره می‌شود.

الف) شکار تابش فروسرخ: نوعی از مارهای زنگی اندام‌هایی حفرة‌ای بر روی پوزه خود دارند که نسبت به تابش فروسرخ حساس‌اند (شکل ۴-۳۹). این مارها اغلب در سیاهی شب شکار می‌کنند. در واقع اندام‌های حفرة‌ای به آنها کمک می‌کند که طعمه‌های خونگرم خود را به واسطه تابش فروسرخ‌شان در تاریکی و سرمای شب مشاهده کنند.

ب) کلم اسکانک^۳: کلم اسکانک (شکل ۴-۴۰) یکی از چندین گیاهی است که می‌تواند دمایش را تا بیشتر از دمای محیط بالا ببرد. این نوع کلم به خاطر بالا رفتن دمایش، انرژی خود را از طریق تابش فروسرخ از دست می‌دهد و می‌تواند برف اطرافش را در زمستان آب کند.

فعالیت ۴-۱۶



رادیومتر وسیله‌ای است که از یک حباب شیشه‌ای تشکیل شده است که درون آن چهار پره فلزی قائم قرار دارد که می‌توانند حول یک محور (سوزن عمودی) بچرخند. دو وجه هر چهار پره، یک در میان سفید و سیاه است. وقتی این وسیله کنار یک چشمه نور قرار گیرد، پره‌ها حول سوزن عمودی می‌چرخند و هر چه شدت نور بیشتر باشد، این چرخش سریع‌تر است. در مورد دلیل چرخش پره‌ها تحقیق کنید.

۱- Thermograph

۲- Thermogram

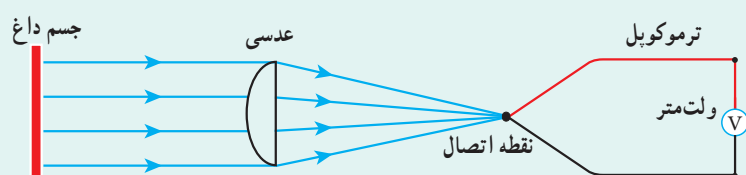
۳- Skunk Cabbage

از تابش گرمایی می‌توان به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری دمای اجسام استفاده کرد. به روش‌های اندازه‌گیری دما مبتنی بر تابش گرمایی، **تف‌سنجی**^۱ و به ابزارهای اندازه‌گیری دما به این روش، **تف‌سنج**^۲ می‌گویند. تف‌سنج برخلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرد. تف‌سنجی، به‌خصوص در اندازه‌گیری دماهای بالای 1100°C اهمیت ویژه‌ای دارد. تف‌سنج تابشی و تف‌سنج نوری، تف‌سنج‌هایی برای اندازه‌گیری این دماها هستند و تف‌سنج نوری به عنوان دماسنج معیار برای اندازه‌گیری این دماها انتخاب شده است.

خوب است بدانید

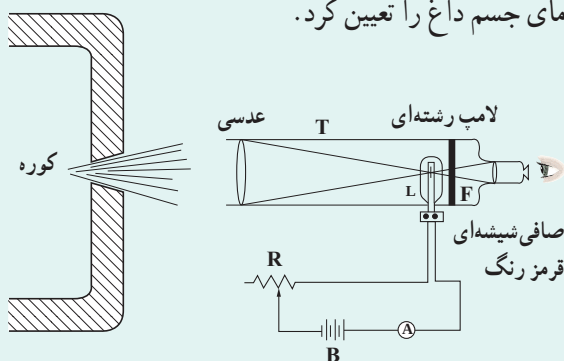
تف‌سنج‌های اندازه‌گیری دماهای بالا

الف) تف‌سنج تابشی: این تف‌سنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل شده از جسم روی یک ترموکوپل اندازه می‌گیرد. می‌توان دمای جسم را از روی ولتاژ خروجی ترموکوپل تعیین کرد.



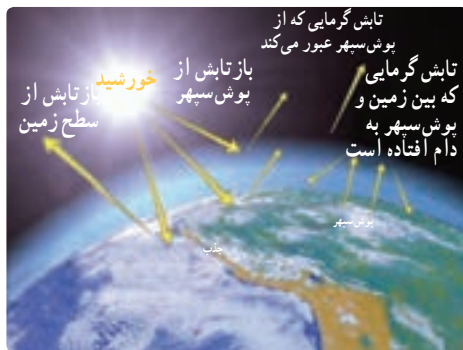
(الف) تف‌سنج تابشی و طرحی از ساختار آن

ب) تف‌سنج نوری: این تف‌سنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری دمای اجسام خیلی داغ با دمای بیش از 1200 K (مانند کوره‌ها) به کار می‌رود. اساس کار این تف‌سنج، مقایسه رنگ و شدت نور تابیده از کوره، با رنگ و شدت نور یک لامپ رشته‌ای است. این تف‌سنج از یک دوربین T تشکیل شده است که در لوله آن یک صافی شیشه‌ای قرمز رنگ F و یک لامپ الکتریکی کوچک L قرار دارد. نور تابیده شده از کوره، توسط عدسی دوربین روی رشته لامپ متمرکز می‌شود و ناظری که به درون دوربین نگاه می‌کند، رشته تیره لامپ را بر زمینه نور کوره می‌بیند. رشته لامپ به باتری B و مقاومت متغیر R متصل شده است. با تغییر دادن مقاومت متغیر R، جریان رشته لامپ را به تدریج افزایش می‌دهیم تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به طوری که رشته لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



(ب) تف‌سنج نوری و طرحی از ساختار آن

یخ بستن بر اثر تابش: در بعضی نواحی که یخچال رایج نیست، برای ساختن یخ، آب را در کاسه‌ای کم عمق می‌ریزند و در طول شب بیرون می‌گذارند. کف و اطراف کاسه، عایق‌بندی شده و روی آن باز است. بدیهی است که اگر دمای هوا به زیر نقطه انجماد آب برسد، آب یخ خواهد زد. اما گاهی در شب‌هایی که هوا صاف است ممکن است آب در هوایی که دمای آن قدری بالاتر از نقطه انجماد آب است نیز یخ ببندد. دلیل این پدیده آن است که در یک شب صاف، آسمان را می‌توان مثل یک سطح واحد در نظر گرفت که دمایش زیر نقطه انجماد آب است. در طول شب، تبدلی از تابش فروسرخ بین سطح آسمان و آب صورت می‌گیرد. گسیل تابشی آب که ابتدا دمایش بالاتر از نقطه انجماد است بیشتر از تابشی است که از آسمان جذب می‌کند و بنابراین آب سرد می‌شود. اگر دمای هوای اطراف آب خیلی بیشتر از نقطه انجماد آب نباشد، آب ممکن است بر اثر این فرایند تابشی آنقدر گرما از دست بدهد تا یخ بزند.



شکل ۴-۱۴ جذب، بازتابش و تابش گرمایی در جو و سطح زمین و اثر گلخانه‌ای

اثر گلخانه‌ای^۱: بخشی از نور خورشید با عبور از جو زمین به سطح آن می‌رسد و بخش عمده این نور جذب زمین می‌شود. زمین گرم می‌شود و با تابش گرمایی از خود امواج فروسرخ گسیل می‌کند. وجود گازهایی مانند کربن‌دی‌اکسید CO_2 که مولکول‌های جذب‌کننده بسیار خوبی برای امواج فروسرخ هستند، در لایه پوش سپهر^۲ جو زمین، باعث کدر شدن این لایه برای تابش‌های فروسرخ می‌شود. این لایه بخش عمده تابش گرمایی حاصل از زمین را جذب می‌کند. خود این لایه نیز تابش گرمایی می‌کند. بخشی از تابش گرمایی لایه پوش سپهر از جو خارج می‌شود، ولی بیشتر آن به زمین بازمی‌گردد و به این ترتیب، رفت و برگشتی از تابش گرمایی بین این لایه و سطح زمین رخ می‌دهد. در تشابه با گلخانه‌ها که با ایجاد محیطی محصور مانع از جریان هوا و خروج هوای گرم از گلخانه‌ها می‌شوند، به این به دام افتادن تابش گرمایی بین لایه پوش سپهر و سطح زمین اثر گلخانه‌ای می‌گویند و به گازهای موجود در لایه پوش سپهر که سبب این پدیده می‌شوند گازهای گلخانه‌ای می‌گویند^۳. اگر لایه پوش سپهر وجود نداشت، دمای میانگین سطح زمین چیزی در حدود $18^\circ C -$ می‌شد، ولی اینک این دما چیزی در حدود $15^\circ C +$ است؛ یعنی اثر گلخانه‌ای حدود $33^\circ C$ به دمای میانگین سطح زمین افزوده است (شکل ۴-۱۴).

با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در پوش سپهر، اثر گلخانه‌ای تشدید می‌شود و بدین ترتیب، دمای زمین افزایش می‌یابد. در چند دهه اخیر به دلیل فعالیت‌های مختلف صنعتی و افزایش آلاینده‌هایی مثل CO_2 در جو زمین، غلظت گازهای گلخانه‌ای در لایه پوش سپهر زیادتر از قبل شده و دمای سطح زمین بالا رفته است.

گفتنی است که همواره در حالت تعادل، انرژی تابشی به سطح زمین با مجموع انرژی‌های بازتابیده از سطح زمین و تابش گرمایی زمین برابر است. همین برابری در خارجی‌ترین سطح جو زمین نیز وجود دارد.

^۱ - Greenhouse effect

^۲ - پوش سپهر یا استراتوسفر، لایه‌ای حدوداً در فاصله ۱۰ تا ۱۸ کیلومتری سطح زمین است.

^۳ - چون اصطلاح اثر گلخانه‌ای اغلب برای به دام افتادن تابش گرمایی توسط جو زمین به کار می‌رود، به غلط پنداشته می‌شود که گرم بودن گلخانه نیز ناشی از به دام افتادن تابش‌های گرمایی است. در حالی که دلیل گرم بودن گلخانه‌ها، عدم جریان هوا در آنها است.

۶-۴ قوانین گازها

روی برخی از اسپری‌ها نوشته شده است "از قرار دادن اسپری در آتش خودداری شود". با داغ کردن قوطی اسپری، جنبش مولکولی گاز درون آن زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های آن افزایش می‌یابد و این می‌تواند حتی موجب ترکیدن قوطی شود. اگر در یک بطری نوشابه پلاستیکی و توخالی، اندکی آب داغ بریزیم و سپس آب را در بطری چرخانده و دور بریزیم و آن‌گاه در بطری را محکم ببندیم، بطری پس از مدتی محاله می‌شود. شکل ۴-۴۲ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل محاله شده است. همچنین شکل ۴-۴۳ یک اسباب‌بازی ساده را نشان می‌دهد که مخزن پایینی آن تا نیمه از یک مایع رنگی پر شده است. وقتی این مخزن را در دستتان می‌گیرید، فشار هوا و بخار مایع در نیمه خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع این مخزن را به طرف پایین می‌راند. این کار سبب می‌شود مایع رنگی مخزن پایینی از لوله باریک مارپیچ که انتهای پایینی آن درون این مخزن قرار دارد بالا رود. هر چه دستتان گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را در برگرد، مایع در لوله بیشتر بالا می‌رود.

برای بررسی رفتار گاز می‌توان مقداری گاز را درون یک استوانه قرار داد و در هر لحظه دما، فشار و حجم آن را اندازه‌گیری کرد. دانشمندانی مانند بویل، ماریوت، شارل، گئی لوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطه بین فشار، حجم، دما و مقدار گاز درون یک محفظه را بیابند.

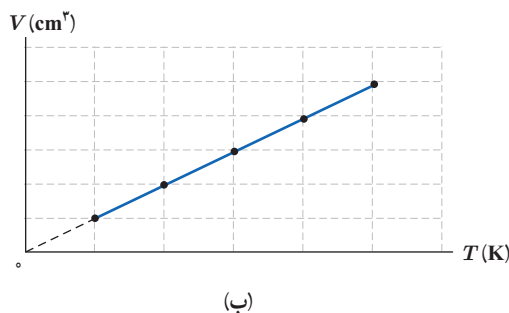
بررسی گاز در فشار ثابت: تاکنون در مورد انبساط گرمایی جامدها و مایع‌ها مطالبی را فرا گرفته‌ایم. اما در مورد گازها چگونه؟ آیا حجم گازها نیز متناسب با دما تغییر می‌کند؟ چون گازها به سادگی متراکم می‌شوند باید به فشار گاز نیز فکر کنیم. ژاک شارل^۱ دانشمند فرانسوی (۱۷۴۶-۱۸۲۳ م.) به‌طور تجربی دریافت که اگر فشار مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود حجم آن مستقیماً با افزایش دما (بر حسب کلون) افزایش و با کاهش دما، کاهش می‌یابد. شکل ۴-۴۴ الف، نوعی از آزمایش او و شکل ۴-۴۴ ب، نتیجه‌ای از آن آزمایش را نشان می‌دهد.



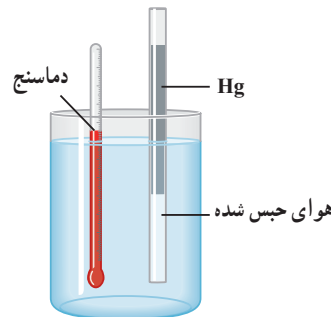
شکل ۴-۴۲ سرد شدن هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه محاله شدن مخزن شده است.



شکل ۴-۴۳ با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لوله مارپیچ بالا می‌رود.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۴۴ الف) اسبابی برای تحقیق اثر دما بر حجم مقدار ثابتی از گاز که در فشار ثابت نگه داشته شده است. ب) نمودار V بر حسب T برای یک گاز وقتی فشار و مقدار گاز ثابت باشد.

نتیجه این آزمایش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V}{T} = \text{ثابت}$$

(۴-۱۴) (فشار و جرم ثابت)

در این رابطه V حجم گاز و T دمای گاز بر حسب کلون است.

۱- Jacques Charles

فعالیت ۴-۱۷



سرِ سرنگی را که پیستون آن آزادانه حرکت می‌کند به فشارسنجی می‌بندیم و آن را به طور افقی درون ظرف آبی می‌گذاریم و ظرف را به آرامی گرم می‌کنیم. توضیح دهید کدام یک از کمیت‌های دما، حجم، فشار و مقدار هوای درون سرنگ تغییر می‌کند و تغییر آنها چگونه است؟

مثال ۴-۱۸

در آزمایشی، دمای مقدار معینی گاز اکسیژن را در فشار ثابت از 27°C به 87°C می‌رسانیم. اگر حجم گاز ابتدا $2/0\text{L}$ باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

پاسخ: در این آزمایش، جرم و فشار گاز ثابت مانده است. پس بنا به رابطه ۴-۱۴ داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

با استفاده از داده‌های مثال، می‌دانیم:

$$T_1 = (27 + 273)\text{K} = 300\text{K}, \quad V_1 = 2/0\text{L}$$

$$T_2 = (87 + 273)\text{K} = 360\text{K}, \quad V_2 = ?$$

$$\frac{2/0}{300} = \frac{V_2}{360} \Rightarrow V_2 = 2/4\text{L}$$

بنابراین

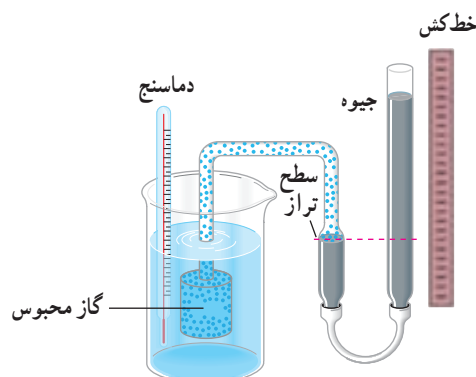
بررسی گاز در حجم ثابت: شیمیدان فرانسوی ژوزف لوئیس گی لوساک^۱ ($1850-1878\text{م.}$)

در سال 1802 میلادی به طور تجربی دریافت که اگر حجم مقدار معینی از یک گاز ثابت نگه داشته شود، فشار آن مستقیماً با دما (بر حسب کلوین) متناسب است (شکل ۴-۴۵). شکل ۴-۴۶ نوعی از آزمایش او را برای بررسی تغییر فشار و دمای گاز، در حجم ثابت نشان می‌دهد.

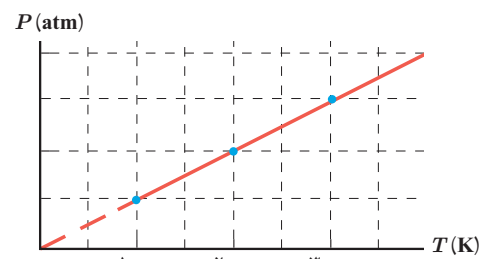
$$\frac{P}{T} = \text{ثابت}$$

(حجم و جرم ثابت)

(۴-۱۵)



شکل ۴-۴۶ آزمایشی ساده برای اندازه‌گیری فشار گاز در دماهای مختلف (در حجم ثابت)



شکل ۴-۴۵ رابطه بین فشار و دمای یک گاز، در حجم ثابت

^۱ Joseph Louis Gay-Lussac

مثال ۴-۱۹

راننده‌ای پیش از حرکت، فشار لاستیک اتومبیل خود را با یک فشارسنج اندازه می‌گیرد و برای آن مقدار 214 kPa را به دست می‌آورد. در این زمان، دما برابر با 15°C است. پس از چند ساعت رانندگی، توقف می‌کند و فشار لاستیک را دوباره اندازه می‌گیرد. اینک فشار 241 kPa شده است. اکنون دمای هوای داخل لاستیک چقدر است؟ از تغییر حجم کم هوای درون لاستیک چشم‌پوشی کنید و فرض کنید فشار هوای محیط برابر با $101 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$ باشد.

پاسخ: می‌دانیم که فشارسنج‌ها، فشار پیمانه‌ای (سنج‌های) را اندازه می‌گیرند که برابر با اختلاف فشار مطلق با فشار هوای محیط است. بنابراین، برای استفاده از رابطه ۴-۱۵ باید فشار هوای محیط را به فشارهای پیمانه‌ای اضافه کنیم. پس داریم:

$$P_1 = 214 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 315 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 241 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 342 \text{ kPa}$$

همچنین توجه کنید که دماها باید برحسب کلون باشد. بنابراین، برای دمای اولیه داریم:

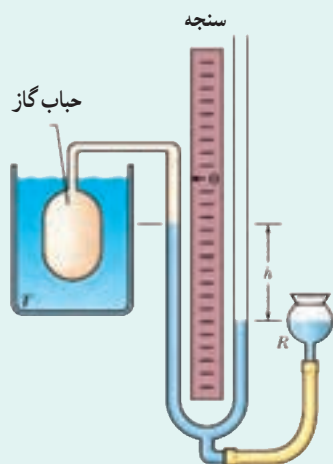
$$T_1 = (15 + 273) \text{ K} = 288 \text{ K}$$

اکنون با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۴-۱۵ خواهیم داشت:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_1}{T_1}, \quad T_2 = \left(\frac{342 \text{ kPa}}{315 \text{ kPa}} \right) (288 \text{ K}) = 313 \text{ K} = (313 - 273)^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

این پاسخی معقول است؛ زیرا پس از یک رانندگی طولانی، لاستیک‌ها به میزان قابل توجهی گرم می‌شوند.

خوب است بدانید



دماسنج گازی حجم ثابت: مطابق شکل، این دماسنج شامل یک حباب پر شده از گاز

است که توسط لوله‌ای به یک فشارسنج جیوه‌ای متصل شده است. با بالا و پایین بردن مخزن R، همواره می‌توان سطح جیوه را در شاخه سمت چپ لوله U شکل، در مقابل صفر خط کش نگه داشت تا حجم گاز ثابت بماند. با تغییر دما، فشار گاز تغییر می‌کند. دما با فشار نسبت مستقیم دارد و نمودار دما برحسب فشار خطی است. برای استاندارد کردن درجه‌بندی دماسنج، در یک توافق بین‌المللی، نقطه‌ای موسوم به **نقطه سه‌گانه آب^۱** را به عنوان مرجع اندازه‌گیری دما انتخاب کرده‌اند. نقطه سه‌گانه آب، نقطه‌ای است که در آن سه فاز آب (آب مایع، یخ و بخار آب) در تعادل‌اند. به این نقطه دمای $273/16 \text{ K}$ اختصاص داده‌اند.^۲ برای اندازه‌گیری دمای محیط، فشار گاز درون حباب را در این دما

اندازه می‌گیرند و به آن دما و فشار به ترتیب، مقادیر T و P را اختصاص می‌دهند. به همین ترتیب، به دما و فشار گاز درون حباب در نقطه سه‌گانه آب به ترتیب، مقادیر T_{tr} و P_{tr} را اختصاص می‌دهند (توجه کنید P_{tr} آن فشاری نیست که برای رسیدن به نقطه سه‌گانه لازم است، بلکه فشار گاز موردنظر در نقطه سه‌گانه است). با توجه به خطی بودن رابطه فشار و دما داریم:

$$T = T_{tr} \left(\frac{P}{P_{tr}} \right) = (273/16 \text{ K}) \left(\frac{P}{P_{tr}} \right)$$

یعنی با دانستن فشار گاز در دمای مورد نظر و در نقطه سه‌گانه آب، به راحتی می‌توان دمای مورد نظر را محاسبه کرد. اگر از

۱ - Triple Point of Water

۲ - دقت کنید که این دما همان دمای صفر درجه سلسیوس نیست و اندکی با آن متفاوت است.

گازهای مختلف در درون حباب استفاده کنیم، به مقادیر متفاوتی برای دمای مورد نظر می‌رسیم که البته فقط اندکی با هم تفاوت دارند. اما وقتی این گازها بسیار رقیق باشند نشان داده می‌شود که همگی به یک مقدار واحد برای دمای مورد نظر همگرا می‌شوند.



رابرت بویل

رابرت بویل در ۲۶ ژانویه ۱۶۲۷ در شهر مونستر ایرلند به دنیا آمد. بویل در سال ۱۶۴۱ در ۱۴ سالگی به ایتالیا سفر کرد و در آنجا تحت تأثیر اندیشه‌های گالیله قرار گرفت و در مراجعت به انگلستان وارد دانشگاه آکسفورد شد. او در آکسفورد عضو انجمن دانشجویی به نام «کالج نامرئی» شد که وظیفه اصلی آن کشف حقایق علمی از راه و روش آزمایش بود. بویل تجربه‌گری ماهر بود و در نتیجه تجربه‌ها و آزمایش‌های زیاد خود به کشف قانون بویل نایل آمد. او همچنین در مورد پدیده صوت، رنگ‌ها، بلورها و الکتریسیته ساکن نظریه‌های جالبی ارائه داد و حتی چیزی نمانده بود که به کشف عنصر اکسیژن نایل شود. او ضمن کارهای آزمایشگاهی خود پی برد که از ترکیب عناصر می‌توان مواد جدیدی ساخت. رابرت بویل علاوه بر کارهای علمی به امور اجتماعی و انسان‌دوستانه نیز پای‌بند بود و از جمله هزینه انتشار کتاب مشهور نیوتون (اصول) را بر عهده گرفت. بویل در ۳۰ آوریل ۱۶۹۱، در سن ۶۴ سالگی در لندن درگذشت.

بررسی گاز در دمای ثابت: سومین قانون تجربی گازها، توسط دانشمند انگلیسی رابرت

بویل^۱ (۱۶۲۷-۱۶۹۱ م.) در سال ۱۶۶۲ میلادی ارائه شد و دانشمند فرانسوی امه ماریوت^۲ (۱۶۲۰ تا ۱۶۸۴ م.) در سال ۱۶۷۶ میلادی به نتیجه مشابهی رسید.

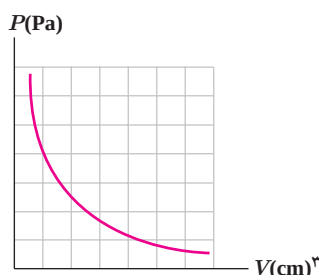
در واقع آنها دریافتند که اگر دمای مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود، فشار آن با حجمش رابطه وارون دارد (شکل ۴-۴۷). به عبارتی، حاصل ضرب فشار و حجم گاز مقداری ثابت است.

ثابت $PV =$

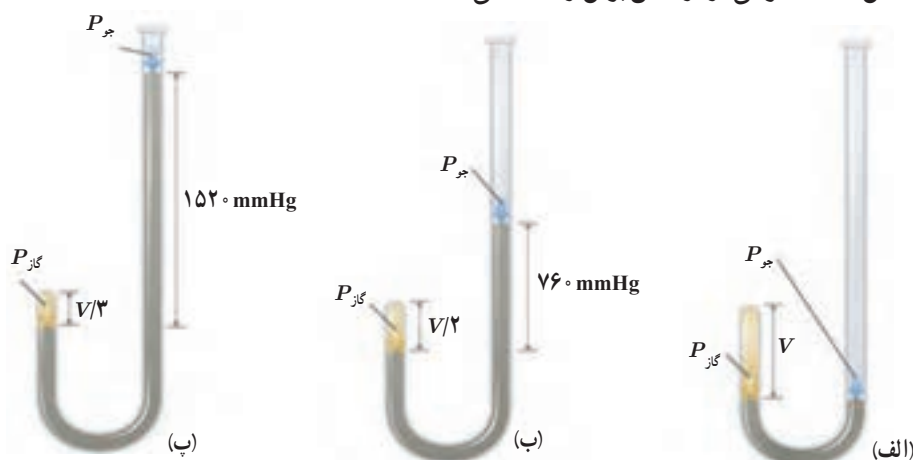
(دما و جرم ثابت)

(۴-۱۶)

شکل ۴-۴۷ نمودار فشار بر حسب حجم گاز در دمای ثابت



شکل ۴-۴۸ نوعی از آزمایش بویل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۸ (الف) در ابتدا گاز در فشار $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$ است توجه کنید که ارتفاع جیوه در هر دو شاخه یکسان است و دهانه شاخه سمت راست باز است. حجم گاز محبوس V است. (ب) اگر جیوه به شاخه سمت راست افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه 760 mm گردد، فشار گاز برابر فشار جو (760 mmHg) به علاوه 760 mmHg ، یعنی برابر 1520 mmHg و حجم گاز محبوس $\frac{V}{2}$ می‌شود. (پ) اگر باز هم به شاخه سمت راست جیوه افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه 1520 mm گردد فشار کل وارد به گاز به 2280 mmHg می‌رسد و حجم گاز محبوس به $\frac{V}{3}$ کاهش می‌یابد.

۱ - Robert Boyle

۲ - Edme Mariotte

مثال ۴-۲۰



دلفینی حباب هوایی را در زیر دریاچه‌ای تفریحی ایجاد می‌کند. فرض کنید این حباب به سطح دریاچه می‌رسد و با رسیدن به سطح آب، حجم آن دو برابر می‌شود. عمقی که در آن حباب تشکیل شده است، چقدر بوده است؟ فرض کنید فشار هوا در سطح آب 101 kPa ، دمای آب دریاچه در همه جا یکسان است و فشار هوای داخل حباب همان فشار آب پیرامون آن است.

پاسخ: با توجه به اینکه بالا آمدن حباب در دمای یکسان آب دریاچه، رخ می‌دهد از رابطه ۴-۱۸ برای هوای درون حباب استفاده می‌کنیم:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

که در اینجا P_1 و V_1 به ترتیب، فشار و حجم هوای داخل حباب در محل ایجاد آن و P_2 و V_2 به ترتیب، فشار و حجم آن در سطح دریاچه است. بنابراین:

$$P_1 = P_2 + \rho g h \quad , \quad P_2 = P_0 \quad , \quad V_2 = 2 V_1$$

با قرار دادن این روابط در رابطه ۴-۱۶ خواهیم داشت:

$$(P_0 + \rho g h) V_1 = P_0 (2 V_1)$$

$$h = \frac{P_0}{\rho g} = \frac{101 \times 10^3 \text{ Pa}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ N/kg})} = 10.3 \text{ m}$$

و از آنجا

بنابراین، دلفین در عمق 10.3 m از سطح دریاچه، حباب را ایجاد کرده است.

فعالیت ۴-۱۸

با وجود تلاش در جهت ثابت نگه داشتن فشار هوای درون هواپیما، همواره مقدار آن کمتر از فشار هوای روی زمین است. وقتی هواپیما بالا می‌رود و فشار هوا کم می‌شود، بسته‌های نوشیدنی یا دسر باد می‌کنند و حتی گاهی درشان باز می‌شود. با فرض ثابت بودن دما، این پدیده را توضیح دهید.

قانون آووگادرو: کمیت دیگری که در بررسی قوانین گازها باقی مانده است، جرم گاز و یا به طور

معادل تعداد مول گاز است. آمدئو آووگادرو^۱ (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶ م.) دانشمند ایتالیایی در سال ۱۸۱۱ میلادی بیان کرد که در دما و فشار یکسان، نسبت حجم گاز V به تعداد مولکول‌های آن N ثابت است:

$$\frac{V}{N} = \text{ثابت} \quad (\text{دما و فشار یکسان})$$

همان‌طور که در بخش ۴-۳ دیدیم در یک مول از گاز به تعداد 6.02×10^{23} (عدد آووگادرو) مولکول وجود دارد. بنابراین، $N = n N_A$ که در آن n تعداد مول و N_A همان عدد آووگادرو است. پس نتیجه می‌گیریم که رابطه بالا را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{V}{n} = \text{ثابت} \quad (۴-۱۷) \quad (\text{دما و فشار یکسان})$$

۱- Amedeo Avogadro



آمدئو آووگادرو: آمدئو آووگادرو

در ۹ ژوئن ۱۷۷۶ در شهر تورین ایتالیا به دنیا آمد. پدرش قاضی مشهوری بود و علاقه داشت پسرش حرفه او را پیشه کند. آمدئو فرد نابغه‌ای بود و در ۲۰ سالگی به دریافت دکترای حقوق نایل آمد. اما پس از سه سال کار و تجربه، دریافت که این حرفه خواسته‌هایش را برآورده نمی‌کند و از این رو به ریاضیات و فیزیک و شیمی روی آورد. در ۳۳ سالگی به مقام استادی فیزیک رسید. دو سال بعد، در سال ۱۸۱۱ نظریه معروف مولکولی خود را در یک مجله فرانسوی به چاپ رساند. اما این نظریه در زمان خود مورد توجه قرار نگرفت و به فراموشی سپرده شد. آووگادرو با کوشش فراوان توانست فرق بین اتم و مولکول را کشف کند. او همچنین بیان کرد که حجم مساوی از هر گاز دارای تعداد مولکول یکسانی است، به شرط آنکه اندازه‌گیری در شرایط یکسانی از دما و فشار صورت گیرد. امروزه نظریه آووگادرو به قانون آووگادرو معروف است و شهرتی عالم‌گیر دارد. آووگادرو بقیه عمرش را نیز صرف پژوهش و تدریس موضوع‌های علمی کرد و سرانجام در سال ۱۸۵۶ در ۸۰ سالگی درگذشت، درحالی که دنیای علم آن روز به نبوغش بی‌نبرده بود.

قانون گازهای آرمانی (کامل): همه روابطی که برای گازها بیان کردیم در مورد گازهایی که به اندازه کافی رقیق باشند، یا چگالی آنها به حد کافی کم باشد، با دقت خوبی برقرار است. به این گازها که مولکول‌های آنها به حدی از هم دورند که برهم تأثیر چندانی نمی‌گذارند، گاز آرمانی (کامل) می‌گویند. در واقع این روابط برای گازهای واقعی که چگالی بالایی دارند نتایجی تقریبی دارد. این روابط را می‌توانیم در شکلی کلی موسوم به قانون گازهای آرمانی به صورت زیر ترکیب کنیم:

$$\text{ثابت } \frac{PV}{nT}$$

این مقدار ثابت را با R نشان می‌دهند و به آن ثابت جهانی گازها می‌گویند. آزمایش نشان می‌دهد که مقدار R برابر است با

$$R = 8.314 \text{ J/mol.K}$$

بنابراین، قانون گازهای کامل را می‌توان چنین نوشت:

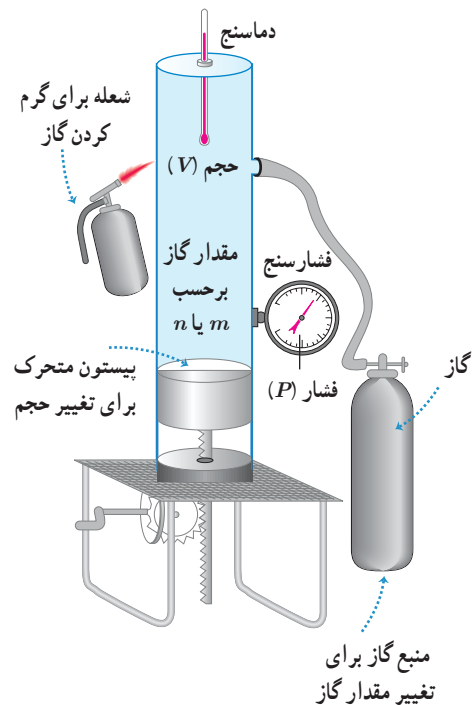
$$PV = nRT$$

(۴-۱۸)

که در آن P برحسب پاسکال (Pa)، V برحسب مترمکعب (m^3)، n برحسب مول (mol) و T برحسب کلونین (K) است. شکل ۴-۴۹ الف طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و شکل ۴-۴۹ ب تصویری واقعی از این دستگاه را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۴۹ الف طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و ب تصویری واقعی از آن

مثال ۴-۲۱

الف) تعداد مولکول‌های هوایی که در اتاقی به ابعاد $4/00\text{ m}$ ، $6/00\text{ m}$ ، $3/00\text{ m}$ در فشار $1/00\text{ atm}$ و دمای 20°C وجود دارد چقدر است؟

ب) جرم هوای درون اتاق چقدر است؟ جرم مولی متوسط گازهای موجود در هوا، 29 kg/mol است.

پاسخ: توجه کنید که هوا به صورت تقریبی گاز آرمانی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین از قانون گازهای آرمانی (رابطه ۴-۲۰) استفاده می‌کنیم.

الف) در استفاده از قانون گازهای آرمانی باید مقادیر فشار مطلق هوا برحسب پاسکال، دما برحسب کلوین و حجم برحسب مترمکعب جای‌گذاری شود.

$$P = 1/00\text{ atm} = (1/00 \times 1/01 \times 10^5)\text{Pa} = 1/01 \times 10^5\text{ Pa}$$

$$V = (4/00\text{ m})(6/00\text{ m})(3/00\text{ m}) = 72/0\text{ m}^3$$

$$T = (273 + 20)\text{K} = 293\text{K}$$

در نتیجه برای n داریم:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/01 \times 10^5\text{ Pa})(72/0\text{ m}^3)}{(8/314\text{ J/mol.K})(293\text{K})} = 2/99 \times 10^3\text{ mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از هوای درون اتاق به تعداد عدد آووگادرو، مولکول گاز وجود دارد، نتیجه می‌گیریم:
مولکول $1/80 \times 10^{23} = (\text{mol/مولکول}) (2 \times 10^{23}) (2/99 \times 10^3\text{ mol}) = (\text{عدد آووگادرو})(\text{تعداد مول}) = \text{تعداد مولکول هوا}$
ب) با استفاده از رابطه ۴-۸ ($n = m/M$) جرم هوای درون اتاق را محاسبه می‌کنیم:

$$m = nM = (2/99 \times 10^3\text{ mol})(29\text{ kg/mol}) = 86/7\text{ kg}$$

مثال ۴-۲۲

درون استوانه‌ای 12 L گاز اکسیژن با دمای 7°C وجود دارد. فشار گاز درون استوانه را با فشارسنجی اندازه می‌گیریم. فشارسنج 14 atm را نشان می‌دهد. دمای گاز را به 77°C و حجم آن را به 25 L می‌رسانیم. فشاری که فشارسنج در پایان نشان می‌دهد، چند اتمسفر است؟ فشار هوای بیرون استوانه 1 atm است. فرض کنید گاز درون استوانه، گاز آرمانی است.
پاسخ: می‌دانیم فشارسنج، فشار پیمانه‌ای را نشان می‌دهد و در قانون گازهای کامل باید از فشار مطلق استفاده کنیم. بنابراین:

$$\begin{cases} P_1 = P_{g1} + P_0 = 14 + 1 = 15\text{ atm} \\ V_1 = 12\text{ L} \\ T_1 = \theta_1 + 273 = 7 + 273 = 280\text{ K} \end{cases} \quad \begin{cases} P_2 = ? \\ V_2 = 25\text{ L} \\ T_2 = \theta_2 + 273 = 77 + 273 = 350\text{ K} \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{15 \times 12}{280} = \frac{P_2 \times 25}{350} \Rightarrow P_2 = 9/0\text{ atm}$$

بنابراین، فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با

$$P_{g2} = P_2 - P_0 = 9/0 - 1/0 = 8/0\text{ atm}$$

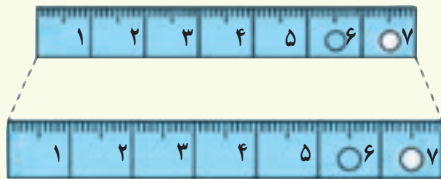
۴-۱ دماسنجی

۱) دماهای زیر را بر حسب درجه سلسیوس و فارنهایت مشخص کنید :

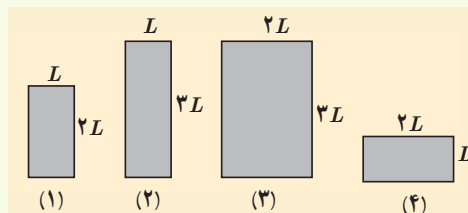
الف) °K (ب) ۲۷۳K (پ) ۳۷۳K (ت) ۵۴۶K

۲) برای اندازه‌گیری دمای یک جسم توسط دماسنج به چه نکاتی باید توجه کنیم؟ (راهنمایی: به نکاتی که در فصل ۱ خواندید نیز توجه کنید)

۴-۲ انبساط گرمایی



۳) شکل روبه‌رو، یک خط کش فلزی را که در آن سوراخی ایجاد شده است در دو دمای متفاوت نشان می‌دهد (برای روشن بودن مطلب، انبساط به صورت اغراق آمیزی رسم شده است). از این شکل چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



۴) شکل روبه‌رو چهار صفحه فلزی هم جنس به اضلاع متفاوت را در یک دما نشان می‌دهد. اگر دمای همه آنها را به اندازه یکسان زیاد کنیم، الف) ارتفاع کدام صفحه یا صفحه‌ها بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟ ب) مساحت کدام یک بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

پ) اگر در هر چهار تایی آنها روزنه کوچک هم اندازه‌ای وجود داشته باشد، افزایش قطر چهار روزنه در اثر افزایش دمای یکسان را با هم مقایسه کنید.

۵) یک بزرگراه از بخش‌های بتونی به طول 25 m ساخته شده است. این بخش‌ها در دمای 10°C ، بتون‌ریزی و عمل آورده شده‌اند. برای جلوگیری از تاب برداشتن بتون در دمای 50°C ، مهندسان باید چه فاصله‌ای را بین این قطعه‌ها در نظر بگیرند؟
 $\alpha_{\text{بتون}} = 14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

۶) یک ظرف آلومینیمی با حجم 400 cm^3 در دمای 40°C به طور کامل از گلیسرین پر شده است. اگر دمای ظرف و گلیسرین به 30°C برسد، چقدر گلیسرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

۷) مقداری بنزین در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع $h = 10 \text{ m}$ ریخته شده است. در دمای 10°C فاصله بین سطح بنزین تا بالای ظرف برابر $\Delta h = 5 \text{ cm}$ است. اگر از انبساط ظرف در نتیجه افزایش دما چشم‌پوشی شود، در چه دمایی بنزین از ظرف سرریز می‌شود؟



۸) در شکل روبه‌رو با کاهش دما، نوار دوفلزه به طرف پایین خم می‌شود. اگر یکی از نوارها، برنجی و نوار دیگر فولادی باشد؛ الف) نوار بالایی از چه جنسی است؟

ب) اگر نوارها را گرم کنیم به کدام سمت خم می‌شوند.



۹) طول خط‌های لوله گاز و نفت در کشورمان که مواد سوختی را از جنوب کشور به مرکز و شمال منتقل می‌کند به چند صد کیلومتر می‌رسد. دمای هوا در زمستان ممکن است تا 10°C - و در تابستان تا 50°C + برسد. جنس این لوله‌ها عموماً از فولاد با $\alpha \approx 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ است.

طول خط لوله، بین دو ایستگاه تهران – اصفهان تقریباً 230 km است.

الف) در اثر این اختلاف دما این خط چقدر منبسط می شود؟

ب) چگونه می توان تأثیر این انبساط را برطرف کرد؟

۱۰) در یک روز گرم یک تانکر حامل سوخت با $30,000\text{ L}$ بنزین بارگیری شده است. هوا در محل تحویل سوخت 20°C سردتر از محلی است که در آنجا سوخت بار زده شده است. راننده چند لیتر سوخت را در این محل تحویل می دهد؟

۳-۴ گرما



۱۱) برای گرم کردن 200 g آب جهت تهیه چای، از یک گرمکن الکتریکی غوطه ور در آب استفاده می کنیم. روی برجسب گرمکن 200 W نوشته شده است. با نادیده گرفتن اتلاف گرما، زمان لازم برای رساندن دمای آب از 30°C به 100°C را محاسبه کنید.

۱۲) دمای یک قطعه فلز 60°C کیلوگرمی را توسط یک گرمکن 50 W در مدت 110 s از 18°C به 38°C رسانده ایم. این آزمایش برای گرمای ویژه فلز چه مقداری

را به دست می دهد؟ حدس می زنید که این پاسخ از مقدار واقعی گرمای ویژه فلز بیشتر باشد یا کمتر؟ توضیح دهید.

۱۳) گرماسنجی به جرم 200 g گرم از مس ساخته شده است. یک قطعه 80°C گرمی از یک ماده نامعلوم همراه با 50°C گرم آب به درون گرماسنج ریخته می شود. اکنون دمای این مجموعه 30°C شده است. در این هنگام 100 g آب 70°C به گرماسنج اضافه می شود، دمای تعادل 52°C می شود. گرمای ویژه قطعه را محاسبه کنید.

۴-۴ تغییر حالت های ماده

۱۴) یکی از روش های بالابردن دمای یک جسم، دادن گرما به آن است. اگر به جسمی گرما دهیم، آیا دمای آن حتماً بالا می رود؟ توضیح دهید.

۱۵) قبل از تزریق دارو یا سرم به یک بیمار، محل تزریق را با الکل تمیز می کنند. این کار سبب احساس خنکی در محل تزریق می شود. علت را توضیح دهید.

۱۶) کدام گزینه درباره فرایند ذوب نادرست است؟

الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر مواد، سبب پایین رفتن نقطه ذوب می شود.

ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب کاهش اندک نقطه ذوب آن می شود.

پ) فرایند ذوب، عملی گرماگیر است.

ت) گرمایی که جسم جامد در نقطه ذوب خود می گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی شود.

۱۷) کمترین گرمای لازم برای ذوب کامل 20 g نقره که در آغاز در دمای 20°C قرار دارد چقدر است؟ (فشار هوا را یک اتمسفر فرض کنید)

۱۸) یک راه برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد یک سالن سرپسته در شب هنگام، وقتی که دمای زیر صفر پیش بینی شده است، قرار دادن تشت بزرگ پر از آب در سالن است. اگر جرم آب درون تشت 15 kg و دمای اولیه آن 20°C باشد و همه آن به یخ 0°C تبدیل شود، آب چقدر گرما به محیط پیرامونش می دهد؟

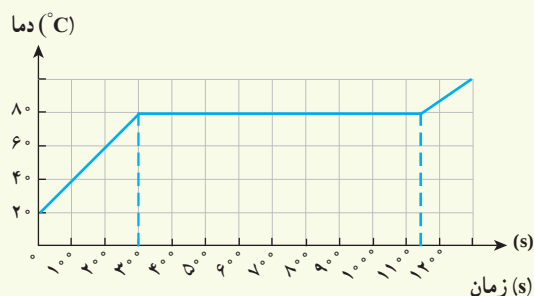
۱۹ یک گرمکن 5° واتی به طور کامل در 10° گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می شود.

الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از 2°C به 25°C می رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.

ب) چه مدت طول می کشد تا دمای آب درون گرماسنج از 25°C به نقطه جوش (100°C) برسد؟

پ) چه مدت طول می کشد تا 20° گرم آب در حال جوش درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۲۰ گرمکنی در هر ثانیه 20% ژول گرما می دهد. الف) چقدر طول می کشد تا این گرمکن $100^\circ/\text{kg}$ آب 10°C را به بخار آب 100°C تبدیل کند؟ ب) این گرمکن در همین مدت، چه مقدار یخ 0°C را می تواند به آب 0°C تبدیل کند؟



۲۱ اگر به جسم جامدی که ابعاد آن به اندازه کافی کوچک است

با توان ثابتی گرما بدهیم نمودار دما - زمان آن به صورت کیفی مانند

شکل روبه رو می شود. این نمودار در اینجا برای جسم جامدی به جرم

50 g رسم شده که توسط یک گرم کن 10 W گرم شده است.

الف) چقدر طول می کشد تا این جامد به نقطه ذوب خود برسد؟

ب) گرمای ویژه جامد و پ) گرمای نهان ذوب آن را محاسبه کنید.

۲۲ در چاله کوچکی 100 kg آب 10°C قرار دارد. اگر بر اثر تبخیر سطحی قسمتی از آب تبخیر شود و بقیه آن یخ ببندد، جرم آب

یخ زده چقدر می شود؟

۲۳ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه های مهم کنترل دمای بدن است.

الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم 50 kg به اندازه 1°C کاهش یابد؟ گرمای نهان تبخیر آب در دمای

بدن (37°C) برابر $2420\text{ J/kg}^\circ\text{C}$ و گرمای ویژه بدن در حدود 3480 J/kg.K است. ب) حجم آبی که شخص باید برای جبران آب

تبخیر شده بنوشد، چقدر است؟

۴-۵ روش های انتقال گرما

۲۴ اگر شما یک تیر چوبی و یک لوله فلزی سرد را که هم دما هستند لمس کنید، چرا حس می کنید که لوله سردتر است؟ چرا ممکن

است دست شما به لوله بچسبد؟

۲۵ یک پالتو چگونه شما را گرم نگه می دارد؟ چرا استفاده از چند لباس زیر پالتو این عمل را تشدید می کند؟

۲۶ شیشه پنجره ای دارای عرض 2 m ، ارتفاع 1 m و ضخامت 4 mm است.

الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است 2°C و دمای وجهی از شیشه که در تماس

با هوای گرم داخل اتاق است 7°C است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه

با $k \approx 1\text{ W/m.K}$ به بیرون اتاق انتقال پیدا می کند؟

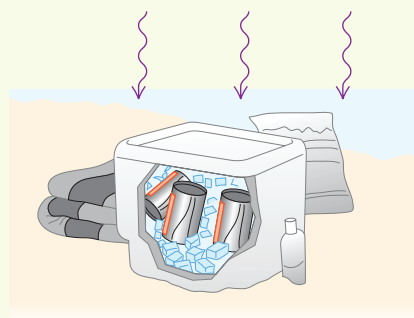
ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می شود؟

۲۷ جعبه یخ دانی از جنس پلی استیرن با مساحت کل دیواره های 8 m^2 و ضخامت

دیواره های 2 cm در اختیار دارید. اختلاف دمای سطح داخلی و خارجی یخ دان

20°C است. در یک روز (24 h) چقدر یخ آب می شود؟ رسانندگی گرمایی

پلی استیرن برابر است با $k = 0.1\text{ W/m.K}$.



۲۸ دو قوری همجنس و هم اندازه را در نظر بگیرید که سطح بیرونی یکی سیاه رنگ و دیگری سفید رنگ است. هر دو را با آب داغ با دمای یکسان پر می کنیم. آب کدام قوری زودتر خنک می شود؟

۴-۶ قوانین گازها

۲۹ گازی در دمای 20°C دارای حجم 100 cm^3 است. الف) این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا در فشار ثابت، حجم آن 200 cm^3 شود؟ ب) این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم 50 cm^3 خواهد شد؟

۳۰ هوایی با فشار 1 atm درون استوانه یک تلمبه دوچرخه به طول 24 cm محبوس است. راه های ورودی و خروجی هوای استوانه تلمبه را می بندیم. اکنون

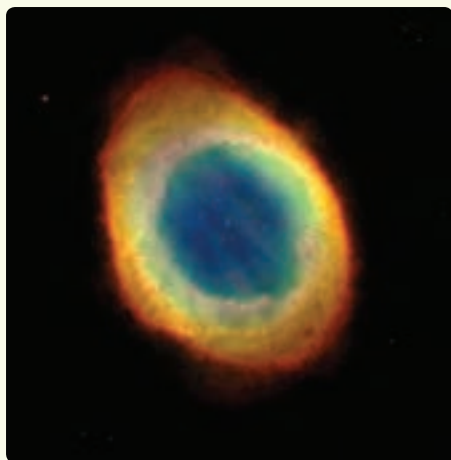
الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به 3 cm افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چقدر خواهد شد؟

ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس 3 atm شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۳۱ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا 17°C است، فشارسنج، فشار درون لاستیک را 200 atm نشان می دهد. پس از یک رانندگی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه گیری می شود. اکنون فشارسنج، 240 atm نشان می دهد. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است؟ حجم لاستیک را ثابت و فشار جو را 100 atm اتمسفر در نظر بگیرید.

۳۲ دما و فشار متعارف (STP)^۱ برای گاز، دمای 273 K و 101325 Pa و فشار 1 atm معرفی می شود. حجم یک مول گاز کامل در دما و فشار متعارف چقدر است؟

۳۳ یک حباب هوا به حجم 2 cm^3 در ته یک دریاچه به عمق 4 m قرار دارد که دما در آن جا 4°C است. حباب تا سطح آب بالا می آید که در آنجا دما 20°C است (دمای هوای حباب با دمای آب اطراف آن یکسان است). در لحظه ای که حباب به سطح آب می رسد حجم آن چقدر است؟ فشار هوا در سطح دریاچه را 101325 Pa در نظر بگیرید.



۳۴ سحابی سیاره ای^۲، ابری است حلقوی (شکل روبه رو) که عمدتاً از گاز هیدروژن با غلظت 100% مولکول بر سانتی متر مکعب و دمای 10000 K تشکیل شده است. فشار گاز در این سحابی را محاسبه کنید.

۱- Standard Temperature and Pressure

۲- Planetary nebula

ترمودینامیک

فصل ۵



موتور ماشین‌های بنزینی تا حدود ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کنند. دانشمندان و مهندسان در پی کارآمدتر کردن این ماشین‌ها هستند. با این حال، حد بالایی برای بازده این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کل انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

مقدمه

در موتور خودروها، از واکنش شیمیایی اکسیژن با بخار بنزین در سیلندرها، انرژی گرمایی تولید می‌شود. گاز داغ شده، پیستون‌ها را درون سیلندرها می‌فشارد و کار مکانیکی انجام می‌دهد و این کار باعث جابه‌جایی خودرو می‌شود. موتور خودروها، هواپیماها، قطارها، کشتی‌ها و نیروگاه‌های تولید برق براساس اصول ترمودینامیک طراحی و ساخته می‌شوند. مطالعه ترمودینامیک در قرن نوزدهم آغاز شده است. مهندسان طراح ماشین‌های گرمایی می‌خواستند بدانند قوانین فیزیک چه محدودیت‌هایی در عملکرد ماشین‌های بخار و ماشین‌های دیگری که با استفاده از انرژی گرمایی، انرژی مکانیکی تولید می‌کنند، به وجود می‌آورند. در ترمودینامیک به مطالعه رابطه بین گرما و کار و تبدیل گرما به کار مکانیکی می‌پردازیم. پایداری انرژی و این واقعیت که گرما خود به خود از جسم سرد به جسم داغ منتقل نمی‌شود، بخشی از مبانی دانش ترمودینامیک را تشکیل می‌دهند.

در این علم، فرایندهای فیزیکی به وسیله گروهی از کمیت‌های مشاهده‌پذیر یا ماکروسکوپی که حتماً شامل دماست، توصیف می‌شود. مثلاً مهندسی که رفتار گازهای احتراقی در موتور یک خودرو را بررسی می‌کند، به کمک کمیت‌هایی مانند دما، فشار، حجم، گرمای ویژه و... رفتار گاز را توضیح می‌دهد، بدون آنکه درگیر جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های گاز شود. از این منظر بسیاری از مطالبی که در فصل پیش خواندیم در محدوده علم ترمودینامیک می‌گنجد.

در ترمودینامیک تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً به شکل گاز یا مایع است و با محیط پیرامون خود گرما و کار مبادله می‌کند. این جسم را **دستگاه** و اجسام پیرامون دستگاه را که می‌توانند با آن تبادل انرژی داشته باشند، **محیط** می‌نامیم. مثلاً در موتور خودرو، مخلوط هوا و بخار بنزین دستگاه نامیده می‌شود، در یخچال خانگی، گازی که در لوله‌های فلزی درون و بیرون یخچال جریان دارد و گرما را از درون یخچال به بیرون منتقل می‌کند، دستگاه نامیده می‌شود. همچنین آبی که در یک کتری برقی قرار می‌گیرد و به آن گرما داده می‌شود تا به بخار تبدیل شود را می‌توان دستگاه در نظر گرفت (شکل ۵-۱). در این بررسی، کتری و سیم گرمکن آن، اجزای محیط هستند.

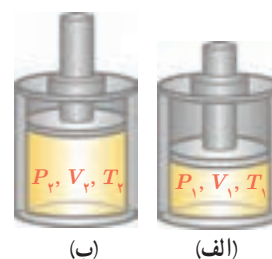


شکل ۵-۱ آب درون کتری را می‌توان دستگاه ترمودینامیکی در نظر گرفت.

به طور ساده، منظور از دستگاه بخش مشخصی از ماده است که تحولات و مبادله انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود. دستگاه می‌تواند مقدار مشخصی آب، کلّ جو زمین یا حتی بدن یک موجود زنده باشد. نکته مهم آن است که بتوانیم مشخص کنیم چه ماده‌ای دستگاه و چه ماده‌ای محیط است. گستره ترمودینامیک فراتر از پدیده‌های گرمایی مربوط به گازهاست، ولی در این کتاب، بیشتر خود را به بررسی ترمودینامیک گازهای در حالت تعادل محدود می‌کنیم.

۱-۵ معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۵-۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی بدون اصطکاک مسدود شده است. پیستون می‌تواند درون استوانه حرکت کند (در اینجا دستگاه مورد بررسی، گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت ۱ (با حجم V_1) نگه داشته شده باشد، دما و فشار آن در همه نقاط گاز یکسان خواهد بود؛ مثلاً برابر با T_1 و P_1 . در چنین وضعیت‌هایی می‌گوییم گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. از کمیت‌های V ، P و T برای توصیف حالت تعادل ترمودینامیکی گاز استفاده می‌کنیم. این کمیت‌های ماکروسکوپی را که حالت تعادل با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** گاز می‌نامیم. در حالت تعادل، متغیرهای ترمودینامیکی گاز مقدار یگانه و مشخصی دارند؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه‌ای در وضعیت شکل ۵-۲ الف قرار دارد مقدار این کمیت‌ها مقدارهای یگانه P_1 ، V_1 و T_1 است، حال اگر گاز را به سرعت گرم یا سرد کنیم، یا پیستون را به سرعت جابه‌جا کنیم، نقاط مختلف گاز فشار یکسان و نیز دمای یکسانی نخواهند داشت. بنابراین، نمی‌توان فشار و دمای یگانه‌ای به کلّ گاز نسبت داد. باید منتظر ماند تا پس از مدتی فشار و دما در همه نقاط گاز به مقادیر یگانه و جدید دیگری چون P_2 و T_2 برسد. به عبارت دیگر، اکنون متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دارای مقادیر یگانه P_2 ، V_2 و T_2 هستند (شکل ۵-۲ ب).



شکل ۵-۲ گاز داخل استوانه در حالت‌های (الف) اولیه و (ب) نهایی در تعادل ترمودینامیکی است.

خلاصه اینکه یک دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حالت تعادل ترمودینامیکی است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به طور خودبه خودی تغییر نکند.

متغیرهای ترمودینامیکی مستقل از یکدیگر نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می نامند. اگر گاز آرمانی (کامل) باشد، معادله حالت آن ساده و مستقل از نوع گاز است و با قانون گاز آرمانی (معادله ۴-۲)، یعنی $PV=nRT$ داده می شود.

۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار^۱

دیدیم حالت تعادل یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P ، V و T بیان کرد. همچنین دیدیم در اثر گرم شدن گاز یا جابه جا شدن پیستون، حالت تعادل گاز تغییر می کند. هنگامی که دستگاه از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر می رود، می گوییم یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.

اکنون فرض کنید گاز در حالت اولیه P_1 ، V_1 و T_1 باشد. گاز را در حجم ثابت گرم می کنیم تا به حالت تعادل نهایی P_2 ، V_2 و T_2 برسد. در این فرایند، حالت دستگاه در حجم ثابت از a به b تغییر کرده است (شکل ۳-۵). اگر حالت های بین a و b غیر تعادلی باشند، برای این فرایند نمی توان نمودار رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای یگانه ای را نمی توان به کل گاز نسبت داد. اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک گرمکن با دمای قابل تنظیم (منبع گرما) قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع را برابر با دمای اولیه دستگاه، یعنی T_1 ، انتخاب می کنیم. تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. دمای منبع را اندکی افزایش می دهیم. گرمای کمی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر اندکی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه a' در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقطه های a'' ، a''' و ... به دست می آیند. اگر گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک باشد، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۵-۵ رسم کرد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل بوده و سریع به تعادل می رسد. چنین فرایندی را **فرایند ایستاوار** می نامند. در ادامه این فصل، فرایندهای مورد بررسی عمده تاً ایستاوار در نظر گرفته می شوند. برای رسم نمودارهای ایستاوار، چند نقطه تعادلی را تعیین کرده و با وصل کردن آنها به یکدیگر نمودار ترمودینامیکی را رسم می کنیم.

۳-۵ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می گیرد و معمولاً فرض می شود که دستگاه در حین تبادل گرما، در تماس با یک **منبع گرما**^۲ است.

الف) گرما: در فصل ۴ دیدیم گرما انرژی ای است که به سبب اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می شود. محیط و دستگاه نیز هنگامی مبادله گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند. بنا به قرارداد،

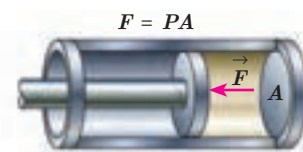
^۱ quasi - static

^۲ heat reservoir

گرمایی را که دستگاه می‌گیرد، با علامت مثبت، و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان می‌دهیم. در ترمودینامیک دستگاه با یک منبع گرما مبادله گرما می‌کند که در ادامه، آن را معرفی می‌کنیم.

منبع گرما: هرگاه یک استکان چای داغ یا یک قطعه یخ را در هوای اتاق بگذاریم، پس از مدتی چای خنک شده و یخ ذوب می‌شود و دمای آن با دمای هوا برابر می‌شود، بی‌آنکه دمای هوای اتاق تغییر محسوسی کند. در این مثال، هوای اتاق را برای چای یا قطعه یخ، اصطلاحاً منبع گرما می‌گویند. در حالت کلی، یک منبع گرما جسمی است که جرم آن در مقابل جرم دستگاهی که با آن تبادل گرما دارد، چنان بزرگ است که می‌تواند مقدار زیادی گرما بگیرد، یا از دست بدهد، بی‌آنکه تغییر دمای محسوسی بکند. در عمل (در آزمایشگاه)، منبع گرما می‌تواند وسیله‌ای باشد که تنظیم دمای آن توسط آزمایشگر صورت می‌گیرد و می‌تواند به دستگاه گرما بدهد، یا از آن گرما بگیرد.

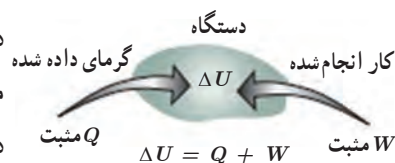
(ب) کار: شکل ۵-۶ گازی را درون یک استوانه نشان می‌دهد. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و پیستون که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت چپ جابه‌جا می‌گردد. در این جابه‌جایی نیروی $\vec{F}$ که گاز به پیستون وارد می‌کند، کار انجام می‌دهد. مقدار این کار برابر با حاصل ضرب بزرگی نیروی $\vec{F}$ در اندازه جابه‌جایی پیستون است. در این فرایند پیستون نیز روی گاز کار انجام می‌دهد که در بخش‌های بعد محاسبه آن را خواهیم آموخت.



شکل ۵-۶ در شکل بالا $\vec{F}$ ، نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

۵-۴ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل دهنده آن ماده برابر است. به‌طور دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی ماده که آن را با U نشان می‌دهیم، با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل ذره‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، مقدار U مشخص است. این مقدار به متغیرهای ترمودینامیکی مانند P و T بستگی دارد. در مورد گاز آرمانی می‌توان نشان داد که انرژی درونی فقط تابع دمای گاز است، به‌طوری که با افزایش دما انرژی درونی گاز افزایش می‌یابد. هنگامی که دستگاه در یک فرایند ترمودینامیکی ایستوار با مبادله کار، گرما، یا هر دو با محیط از حالت اولیه (۱) با انرژی درونی U_1 به حالت نهایی (۲) با انرژی درونی U_2 برسد، تغییر انرژی درونی^۱، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط بستگی دارد. اگر دستگاه در فرایندی ایستوار، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود (شکل ۵-۷)، این بستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۵-۷ قرارداد علامت‌ها برای قانون اول ترمودینامیک

$$\Delta U = Q + W \quad (۵-۱)$$

که به آن قانون اول ترمودینامیک گویند و بیانگر اصل پایستگی انرژی است. توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای یک گاز رخ می‌دهد و از حالت اولیه یکسان (T_1 ، V_1 و P_1) آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان (T_2 ، V_2 و P_2) می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز (ΔU) برابر است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می‌توانند متفاوت باشند.

در رابطه ۵-۱ اگر W کار دستگاه روی محیط در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قریباً کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به صورت $\Delta U = Q - W$ نوشته می‌شود.

۱- در برخی کتاب‌ها از جمله کتاب‌های شیمی، تغییر انرژی درونی با ΔE نشان داده شده است.

در رابطه ۵-۱، گرمای Q می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ($\Delta U > 0$)، یا کاهش ($\Delta U < 0$) یابد یا اینکه تغییر نکند ($\Delta U = 0$).

مثال ۵-۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه 420 J گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد 100 J باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟
پاسخ: چون دستگاه از محیط گرما گرفته است $Q = +420\text{ J}$ و چون کار دستگاه روی محیط 100 J است پس کار محیط روی دستگاه $W = -100\text{ J}$ می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = 420\text{ J} + (-100\text{ J}) = 320\text{ J}$$

خوب است بدانید

سوخت و ساز بدن و قانون اول ترمودینامیک



وقتی غذا می خوریم انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد غذایی به بدن ما انتقال می یابد. از طرفی وقتی فعالیت انجام می دهیم انرژی درونی بدن کاهش می یابد و طبق قانون اول ترمودینامیک به کار و گرما تبدیل می شود. بنا به تعریف، آهنگ سوخت و ساز بدن، آهنگ تبدیل انرژی شیمیایی مواد غذایی و

اکسیرن به انرژی درونی بدن برای جبران کاهش انرژی درونی است و معمولاً برحسب کیلوکالری بر ساعت (kcal/h) یا برحسب وات بیان می شود. جدول زیر آهنگ سوخت و ساز بدن را در برخی از فعالیت ها برای شخصی به جرم متوسط 65 kg نشان می دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط 65 kg

آهنگ تقریبی سوخت و ساز		نوع فعالیت
Watt	kcal/h	
70	60	خوابیدن
115	100	نشستن
230	200	فعالیت های سبک (خوردن، لباس پوشیدن و ...)
460	400	فعالیت های متوسط (تنیس، راه رفتن و ...)
1150	1000	دویدن (15 km/h)
1270	1100	دوچرخه سواری سرعت

۱- در علوم تغذیه معمولاً kcal را با Cal نشان می دهند و آن را کالری بزرگ می خوانند. هر کالری بزرگ $4/186$ کیلوژول است.



کنت رامفورد

کنت رامفورد با نام اصلی بنیامین تامپسون در سال ۱۷۵۳ میلادی در ماساچوست آمریکا، که آن زمان مستعمره انگلستان بود، به دنیا آمد. نخست به ارتش پیوست و در این دوران شروع به آزمایش هایی با باروت کرد و در قدرت مواد منفجره سلاح های جنگی تغییرات چشمگیری به وجود آورد و به همین خاطر به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد. چندی نگذشت که به مقام های وزارت جنگ، وزارت کشور و خزانه داری نائل آمد. در ژانویه سال ۱۷۹۸ در انجمن سلطنتی لندن سخنرانی ای درباره «ایجاد گرما بر اثر مالش» ایراد کرد که بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. این سخنرانی جالب نتیجه مشاهداتی بود که سال ها پیش روی توپ جنگی انجام داده بود. کنت رامفورد اکتشافات و مشاهدات خود را در کتابی تحت عنوان «روش های انتقال گرما» چاپ و منتشر کرد و ثابت نمود نظریه لاوازیه در مورد وجود شاره ای به نام کالریک، به عنوان عامل انتقال انرژی گرمایی نادرست است. رامفورد، یک مؤسسه علمی در لندن دایر کرد و هدف او از تأسیس این سازمان، تشویق مردم برای پژوهش های علمی بود. کارهایی که در این مؤسسه انجام می شد اکثراً عملی بود و گاهی نتایجی به دست می آمد که نشان می داد تجربیات عملی همواره از مطالعات نظری ناشی می گردد. بنیامین تامپسون در سال ۱۸۱۴ دیده از جهان فروست. او نایفه و تجربه گر ماهر بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.

۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

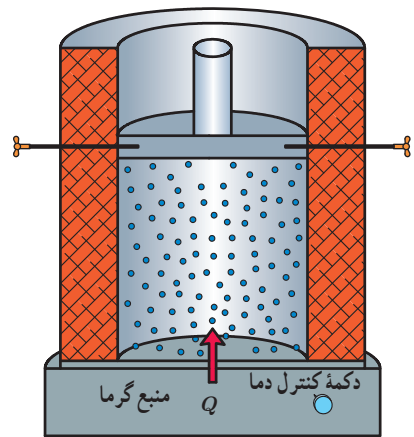
همان‌طور که گفتیم دستگاه‌های ترمودینامیکی می‌توانند فرایندهای مختلفی را طی کنند. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع‌تر است؛ از جمله: **فرایند هم‌حجم^۱**، **فرایند هم‌فشار^۲**، **فرایند هم‌دما^۳** و **فرایند بی‌درو^۴**. در ادامه به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

الف) فرایند هم‌حجم: حجم گاز طی این فرایند ثابت می‌ماند و بنابراین کاری انجام نمی‌شود. در این فرایند، گاز با محیط فقط تبادل گرما می‌کند و تغییر انرژی درونی گاز برابر با گرمایی است که با محیط (منبع گرما) مبادله می‌کند.

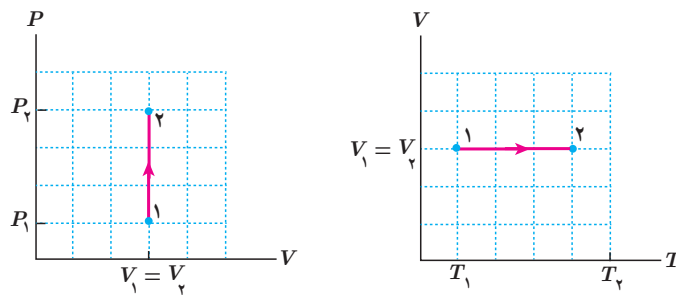
$$\Delta U = Q + W = Q + 0 = Q$$

برای بررسی این فرایند، گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می‌دهیم (شکل ۵-۸)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز برابر باشد. دمای منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز طی یک فرایند ایستوار، با گذار از حالت‌های تعادلی به حالت نهایی مورد نظر برسد.

در شکل ۵-۹ نمودارهای $P-V$ و $V-T$ برای گرم کردن هم‌حجم یک گاز نشان داده شده است. در این فرایند دما و فشار گاز در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال، گاز به صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۵-۸ وارونه می‌شود.



شکل ۵-۸ دمای گاز را در فرایند هم‌حجم با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می‌دهیم.



شکل ۵-۹ نمودارهای $P-V$ و $V-T$ برای یک فرایند ایستوار هم‌حجم.

مثال ۲-۵

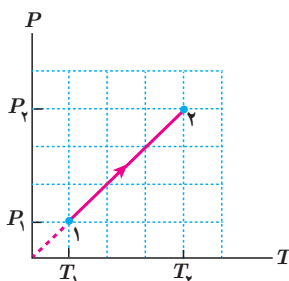
نشان دهید نمودار $P-T$ برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحه $P-T$ می‌گذرد.

پاسخ: چون گاز آرمانی است با استفاده از معادله حالت گاز آرمانی داریم:

$$P = \left(\frac{nR}{V} \right) T$$

چون (nR/V) ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات

می‌گذرد (شبیه خط $y = ax$ در صفحه $y-x$). با نقطه‌گذاری نیز می‌توان نمودار را رسم کرد.



۱ - Isochoric

۲ - Isobaric

۳ - Isothermal

۴ - Adiabatic

روی قوطی‌های اسپری، هشدار داده شده است که از انداختن آن در آتش خودداری کنید. علت این توصیه را براساس فرایند هم حجم توضیح دهید.

اکنون به تعیین گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در فصل ۴ با گرمای ویژه مولی آشنا شدیم. گرمای ویژه مولی یک گاز در حجم ثابت (C_V) برابر است با مقدار گرمایی که باید به یک مول از آن گاز در حجم ثابت داده شود تا دمای آن 1 K افزایش یابد.

$$C_V = \frac{Q}{n\Delta T}$$

بنابراین در فرایند هم حجم داریم:

$$Q = nC_V\Delta T \quad (2-5)$$

یکای C_V در SI برابر $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ است.

گرمای ویژه مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۵-۱ آمده است. می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در حجم ثابت با تقریب خوبی برای گازهای آرمانی تک اتمی برابر با $\frac{3}{2}R$ و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی برابر با $\frac{5}{2}R$ است.

مثال ۵-۳

به $2/00$ مول از گازهای آرمانی He ، O_2 و CO_2 ، در حجم ثابت، 100°C ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۲ و جدول ۵-۱ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

$$\Delta T = \frac{100/0\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(12/5\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 4/00\text{ K} \quad \text{برای He}$$

$$\Delta T = \frac{100/0\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(21/2\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 2/36\text{ K} \quad \text{برای O}_2$$

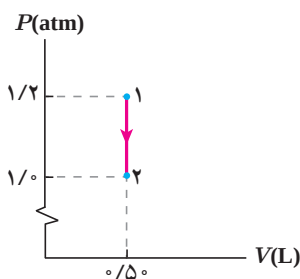
$$\Delta T = \frac{100/0\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(28/5\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 1/75\text{ K} \quad \text{برای CO}_2$$

جدول ۵-۱ گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم برحسب $\text{J/mol}\cdot\text{K}$

گاز	C_V
Ar	۱۲/۵
He	۱۲/۵
Ne	۱۲/۵
هوا	۲۰/۸
CO	۲۰/۷
H ₂	۲۰/۴
HCl	۲۱/۴
N ₂	۲۰/۸
NO	۲۰/۹
O ₂	۲۱/۲
Cl ₂	۲۴/۸
CO ₂	۲۸/۵
CS ₂	۴۰/۹
H ₂ S	۲۵/۴
N ₂ O	۲۸/۵
SO ₂	۳۱/۳

مثال ۵-۴

شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم را در صفحه $P-V$ نشان می‌دهد^۱. گاز را آرمانی و تک اتمی فرض کنید. در این فرایند گاز چقدر گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟
پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۲ داریم:



$$Q = nC_V\Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T = \frac{3}{2}(nRT_2 - nRT_1) = \frac{3}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$= \frac{3}{2}\left[(1/0 \times 1/5 \text{ Pa})(0/5 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 1/5 \text{ Pa})(0/5 \times 10^{-3} \text{ m}^3)\right]$$

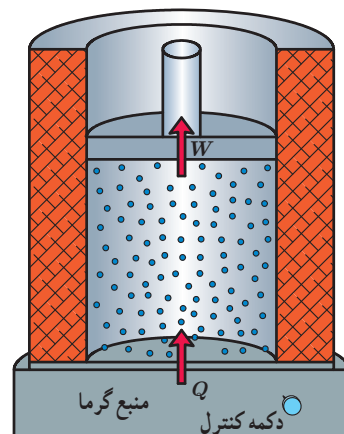
$$= -15 \text{ J}$$

گرمای مبادله شده $|Q| = 15 \text{ J}$ است. چون Q منفی شده است، گاز گرما از دست داده است.

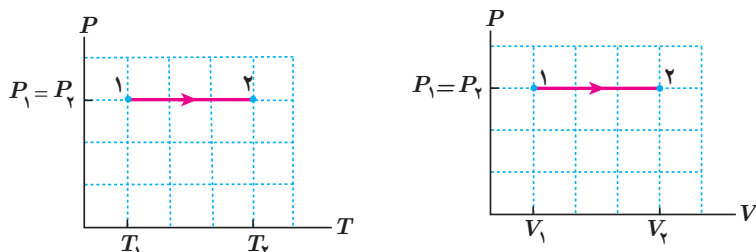
تمرین ۵-۱

دمای n مول گاز با گرمای ویژه مولی در حجم ثابت C_V ، در یک فرایند هم‌حجم از T_1 به T_2 رسیده است.
 الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.
 ب) اگر این گاز، گاز آرمانی و تک اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می‌شود؟

ب) فرایند هم‌فشار: فرایندی است که فشار گاز در طی آن ثابت می‌ماند. به‌عنوان مثالی از این فرایند، گازی آرمانی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۵-۱۰ داخل استوانه‌ای است که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است و دمای اولیه گاز و منبع برابر است. گاز ابتدا در فشار و حجم P_1 و V_1 در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است. دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه، مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود و دمای گاز کمی افزایش می‌یابد و در نتیجه گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به طرف بالا جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش، به‌صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته به طرف بالا حرکت می‌کند. در این فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودارهای $P-T$ و $P-V$ این فرایند در شکل ۵-۱۱ رسم شده است.



شکل ۵-۱۰ گرم کردن گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم

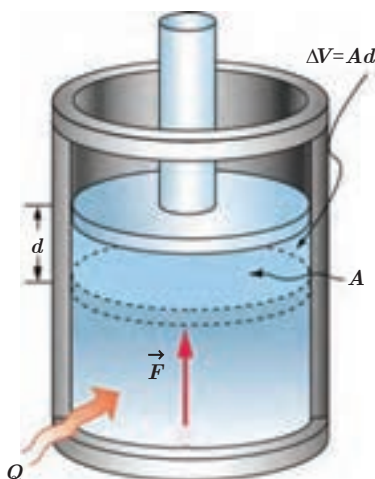


شکل ۵-۱۱ نمودارهای $P-T$ و $P-V$ برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیستند و از این‌رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قطعه‌ای از محور را برش می‌دهیم و آن را با نماد $\hookrightarrow$ مشخص می‌کنیم.

تمرین ۵-۲

نشان دهید نمودار $V-T$ برای فرایند هم فشار یک گاز آرمانی، خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد.



شکل ۵-۱۲ در این انبساط هم فشار، پیستون به اندازه d روبه بالا جابه‌جا شده و گاز کاری برابر $P\Delta V$ روی پیستون انجام داده است.

در فرایند هم فشار، گرما و کار هردو مبادله می‌شود. در اینجا ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز P باشد با توجه به تعریف فشار ($P=F/A$)، گاز طی این فرایند نیروی ثابت $F=PA$ را به پیستون وارد می‌کند که در آن مساحت پیستون است. اگر در این فرایند پیستون به اندازه d جابه‌جا شود (شکل ۵-۱۲)، کاری که گاز روی پیستون انجام می‌دهد برابر است با

$$\text{کار گاز روی پیستون} = Fd \cos \theta = (PA)d \cos 0^\circ = P(Ad)$$

ولی Ad ، تغییر حجم گاز و برابر است با $\Delta V = V_f - V_i$ ؛ در نتیجه،

$$\text{کار گاز روی پیستون} = P\Delta V$$

بنا به قانون سوم نیوتون، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند و نیرویی که پیستون به گاز وارد می‌کند هم اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایه گاز مجاور آن، هم اندازه و هم جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت:

$$\text{کار منفی گاز روی پیستون} = -P\Delta V$$

در این کتاب، کار محیط روی دستگاه (مثلاً در اینجا کار پیستون روی گاز) را با W نشان می‌دهیم.

بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

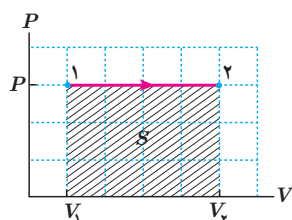
$$W = -P\Delta V$$

(۳-۵) (کار در فرایند هم فشار)

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ($\Delta V > 0$) کار محیط روی دستگاه (W) منفی و اگر گاز متراکم شود ($\Delta V < 0$) کار محیط روی دستگاه (W) مثبت است.

تمرین ۵-۳

نشان دهید رابطه ۳-۵ که برای یک انبساط هم فشار به دست آمده، برای یک تراکم هم فشار نیز برقرار است.



فعالیت ۵-۱

با توجه به نمودار شکل روبه‌رو، نشان دهید در فرایند هم فشار، مساحت زیر نمودار $P-V$ برابر با قدرمطلق کار انجام شده است.

گرچه فعالیت ۱-۵ برای یک فرایند هم فشار است، ولی می توان نشان داد که نتیجه آن در حالت کلی نیز برای هر فرایندی برقرار است و همواره قدرمطلق کار انجام شده برابر با مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه $P-V$ است.

مثال ۵-۵

گازی آرمانی به حجم $۱/۰۰۰$ لیتر در فشار ثابت $۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ Pa}$ مقداری گرما به محیط می دهد و حجم آن به $۰/۹۰۰$ لیتر می رسد. اگر دمای اولیه گاز $۳۰۰/۰^\circ \text{K}$ باشد، دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟

پاسخ: چون گاز، آرمانی است و حجم آن به طور هم فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

در نتیجه

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = (300/0^\circ \text{K}) (0/900) = 270 \times 10^2 \text{ K}$$

کار انجام شده محیط روی گاز برابر است با

$$W = -P \Delta V = -(1/00 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (0/900 - 1/000) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 10/0 \text{ J}$$

مثال ۶-۵

گرمای تبخیر آب در نقطه جوش $۲/۲۶ \times ۱۰^۳ \text{ J/g}$ است. اگر $۱/۰۰ \text{ g}$ (یا $۱/۰۰ \text{ cm}^3$) آب بر اثر جوشیدن در فشار جو متعارف^۱ ($۱/۰۱ \times ۱۰^۵ \text{ Pa}$) به $۱/۶۷ \times ۱۰^۳ \text{ cm}^3$ بخار تبدیل شود،

(الف) کار محیط روی آب چقدر است؟

(ب) افزایش انرژی درونی آب چقدر است؟

پاسخ: (الف) چون تبخیر آب در فشار ثابت رخ داده است می توان نوشت:

$$W = -P \Delta V = -(1/01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (1/67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1/00 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = -1/69 \times 10^2 \text{ J}$$

(ب) برای محاسبه تغییر انرژی درونی آب، نخست گرمای داده شده به آن را به دست می آوریم:

$$Q = +mL_V = (1/00 \text{ g}) (2/26 \times 10^3 \text{ J/g}) = 2/26 \times 10^3 \text{ J}$$

اینک با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = 2/26 \times 10^3 \text{ J} + (-1/69 \times 10^2 \text{ J}) = 2/09 \times 10^3 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمای مبادله شده در فرایند هم فشار می پردازیم. مانند آنچه که در مورد گرمای ویژه مولی در حجم ثابت دیدیم، درمی یابیم که گرمای لازم برای تغییر دمای هم فشار یک گاز به اندازه ΔT ، از رابطه زیر داده می شود:

$$Q = nC_p \Delta T \quad (4-5)$$

^۱ - Standard Atmospheric Pressure

جدول ۲-۵ گرمای ویژه مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب J/mol.K

گاز	C_p
Ar	۲۰/۸
He	۲۰/۸
Ne	۲۰/۸
هوا	۲۹/۱
CO	۲۹/۱
H _۲	۲۸/۸
HCl	۲۹/۱
N _۲	۲۹/۱
NO	۲۹/۸
O _۲	۲۹/۴
Cl _۲	۳۳/۹
CO _۲	۳۶/۹
CS _۲	۴۵/۷
H _۲ S	۳۴/۲
N _۲ O	۳۸/۸
SO _۲	۳۹/۹

که در آن C_p گرمای ویژه مولی در فشار ثابت است. گرمای ویژه مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۲-۵ آمده است.

می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، برای گازهای آرمانی تک‌اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی $\frac{7}{2}R$ است.

مثال ۲-۵

گرمایی که $1/100$ L گاز آرمانی O_۲ در فشار جو متعارف ($1/10 \times 10^5$ Pa) و با دمای اولیه 300°K از دست می‌دهد تا دمایش به 270°K برسد، چقدر است؟

پاسخ: تعداد مول گاز n با استفاده از قانون گازهای آرمانی برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/10 \times 10^5 \text{ Pa})(1/100 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/314 \text{ J/mol.K})(300^\circ\text{K})} = 0.0405 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۲-۵ و رابطه ۴-۵ داریم:

$$Q = nC_p(T_f - T_i) \\ = (0.0405 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol.K})(270^\circ\text{K} - 300^\circ\text{K}) = -35/7 \text{ J}$$

گرمای مبادله شده $|Q| = 35/7 \text{ J}$ است و با توجه به اینکه Q منفی شده است، نتیجه می‌گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می‌دهد.

مثال ۸-۵

مقداری گاز تک‌اتمی آرمانی در یک انبساط هم‌فشار، 100°J کار انجام می‌دهد.

(الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟

(ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ: (الف) گرمای مبادله شده از رابطه ۴-۵ به دست می‌آید:

$$Q = nC_p\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)\Delta T = \frac{5}{2}nR\Delta T$$

در رابطه بالا $nR\Delta T$ مجهول است و باید آن را محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم‌فشار استفاده می‌کنیم:

$$W = -P\Delta V = -P(V_f - V_i) = -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) = -nR\Delta T$$

از صورت مسئله می‌دانیم که گاز منبسط شده و 100°J کار انجام داده است. بنابراین، $W = -100^\circ\text{J}$ است و در نتیجه

داریم:

$$nR\Delta T = 100^\circ\text{J}$$

با قراردادن این مقدار در رابطه Q خواهیم داشت :

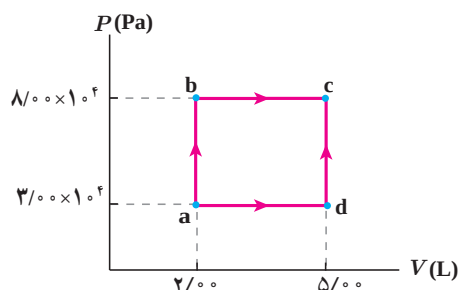
$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(1000\text{ J}) = 2500\text{ J}$$

گرمای مبادله شده $|Q| = 2500\text{ J}$ است. علامت مثبت Q نشان می‌دهد که گاز (دستگاه) گرما گرفته است.

ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U = Q + W = 2500\text{ J} + (-1000\text{ J}) = 1500\text{ J}$$

مثال ۵-۹



در شکل روبه‌رو، نمودار $P-V$ برای یک گاز آرمانی نشان داده شده است.

در فرایند ab ، 1500 J و در فرایند bc ، 600 J گرما به دستگاه داده شده است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند ab چقدر است؟

ب) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند abc چقدر است؟

پ) گرمای داده شده به گاز در فرایند adc را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) چون در فرایند ab هیچ تغییر حجمی نداریم، $W_{ab} = 0$ و در نتیجه

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 1500\text{ J}$$

ب) فرایند bc در فشار ثابت رخ می‌دهد و بنابراین، کار انجام شده روی دستگاه برابر است با

$$W_{bc} = -P\Delta V = -P(V_c - V_b) = -(8.00 \times 10^5\text{ Pa})(3.00 \times 10^{-3}\text{ m}^3) = -2400\text{ J}$$

در نتیجه کل کار انجام شده در فرایند abc برابر است با

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = 0 - 2400\text{ J} = -2400\text{ J}$$

و از طرفی گرمای کل داده شده به دستگاه در فرایند abc برابر است با

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 1500\text{ J} + 600\text{ J} = 2100\text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 2100\text{ J} - 2400\text{ J} = 300\text{ J}$$

پ) می‌دانیم در فرایندهای مختلفی که از حالت اولیه یکسان آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان می‌رسند، تغییر انرژی درونی

گاز یکسان است. بنابراین :

$$\Delta U_{adc} = \Delta U_{abc} = 300\text{ J}$$

از طرفی کل کار انجام شده در فرایند adc برابر است با :

$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -P(V_d - V_a) + 0 = -(3.00 \times 10^5\text{ Pa})(3.00 \times 10^{-3}\text{ m}^3) = -900\text{ J}$$

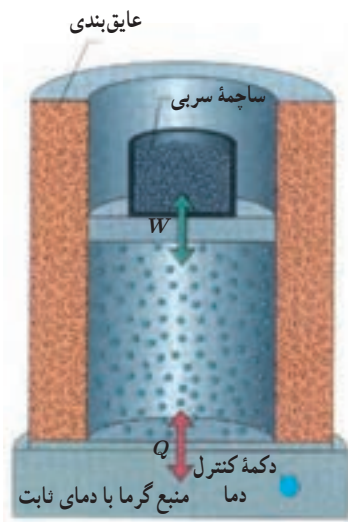
با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U_{adc} = Q_{adc} + W_{adc}$$

و در نتیجه

$$Q_{adc} = \Delta U_{adc} - W_{adc} = (300\text{ J}) - (-900\text{ J}) = 1200\text{ J}$$

ترمودینامیک



شکل ۱۳-۵ استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله‌های سربی، تراکی هم‌دمای می‌دهد.

(پ) فرایند هم‌دمای: دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دمای می‌توان مطابق شکل ۵-۱۳ استوانه‌ای حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرمایی با دمای ثابت و برابر با دمای اولیه گاز قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی کاهش داد. با افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی بر فشار گاز داخل استوانه افزوده می‌شود.

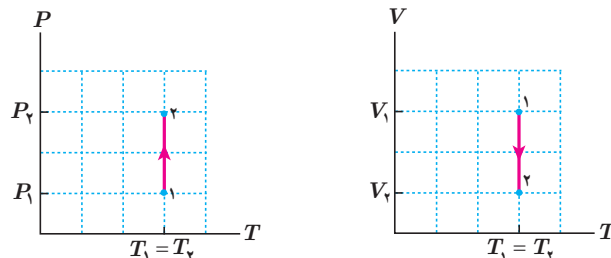
در فرایند هم‌دمای، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W = 0$$

در نتیجه:

$$Q = -W$$

که چون در تراکم، کار انجام شده محیط روی گاز، W ، مثبت است، Q منفی می‌شود؛ یعنی در تراکم هم‌دمای، گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای $P-T$ و $V-T$ این فرایند در شکل ۵-۱۴ رسم شده است.



شکل ۱۴-۵ نمودارهای $P-T$ و $V-T$ برای یک فرایند تراکم هم‌دمای

تمرین ۴-۵

مشابه آنچه که برای تراکم هم‌دمای شرح دادیم، انبساط هم‌دمای گاز کامل را شرح دهید و علامت‌های Q و W را برای چنین فرایندی تعیین و نمودارهای $P-T$ و $V-T$ را برای آن رسم کنید.

فعالیت ۲-۵

انتهای یک سرنگ حاوی هوا را مسدود و آن را وارد حجم بزرگی از آب کنید. پس از مدتی، پیستون سرنگ را به آرامی بفشارید. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

مثال ۱۰-۵

گازی آرمانی را در دمای ثابت از حالت اولیه $V_1 = 4/^\circ L$ و $P_1 = 1/^\circ \text{atm}$ تا حالت نهایی با حجم $V_2 = 1/^\circ L$ متراکم می‌کنیم. الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هریک از حجم‌های $3/^\circ L$ ، $2/^\circ L$ و $1/^\circ L$ حساب کنید و نمودار $P-V$ را با استفاده از روش نقطه‌یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

اگر مساحت سطح زیر این نمودار $5/5 \times 10^2 \text{ J}$ باشد، W (ب) و Q (پ) در این فرایند چقدر است؟

پاسخ: الف) چون گاز، آرمانی و فرایند همدماست داریم:

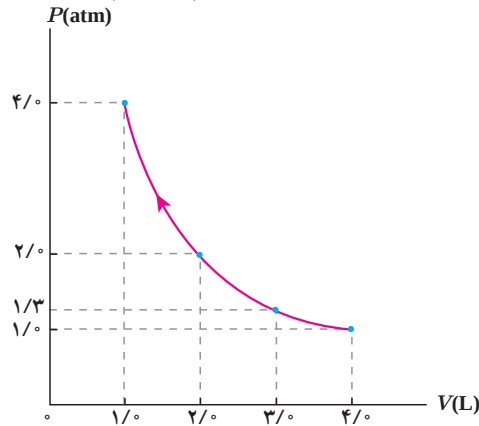
$$PV = nRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

$$V_2 = 3/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(3/0) \Rightarrow P_2 = 1/3 \text{ atm}$$

$$V_3 = 2/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_3)(2/0) \Rightarrow P_3 = 2/0 \text{ atm}$$

$$V_4 = 1/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_4)(1/0) \Rightarrow P_4 = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار $P-V$ را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم:



$V(\text{L})$	$P(\text{atm})$
4/0	1/0
3/0	1/3
2/0	2/0
1/0	4/0

ب) قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر با مساحت سطح زیر نمودار $P-V$ است. افزون بر این، چون گاز متراکم شده

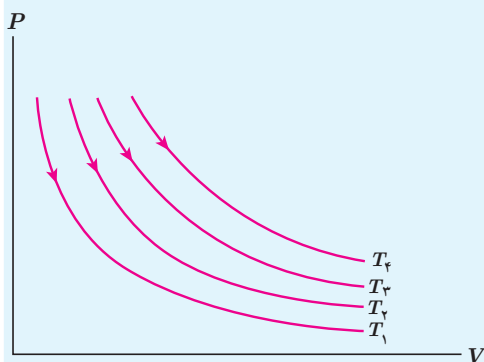
است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است؛ یعنی:

$$W = +5/5 \times 10^3 \text{ J}$$

پ) برای فرایند همدمای گاز کامل نشان دادیم $Q = -W$ است. بنابراین، برای Q داریم:

$$Q = -W = -5/5 \times 10^3 \text{ J}$$

تمرین ۵-۵



در شکل روبه‌رو، نمودار $P-V$ مربوط به انبساط همدمای یک گاز آرمانی در دماهای مختلف رسم شده است.

الف) نشان دهید: $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$. (راهنمایی: خطی عمود بر محور V یا عمود بر محور P رسم کنید، به گونه‌ای که هر چهار نمودار را قطع کند و سپس قانون گازهای آرمانی را برای نقطه‌های برخورد با منحنی‌ها به کار ببندید)
ب) در یک تغییر حجم معین، اندازه کار انجام شده در کدام فرایند بیشتر است؟

ت) فرایند بی‌دررو: در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط، گرما مبادله نمی‌شود. برای

انجام دادن این فرایند یا باید دستگاه را مطابق شکل ۵-۱۵ کاملاً عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم و یا اینکه گاز را چنان به سرعت متراکم یا منبسط کنیم که گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نکند. بنابراین، در فرایند بی‌دررو $Q = 0$ است. در نتیجه، قانون اول ترمودینامیک برای این

فرایند به صورت زیر درمی آید :

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$\Delta U = W$$

(۵-۵) (فرایند بی دررو)

در انبساط بی دررو، گاز آرمانی، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است، در نتیجه $\Delta U < 0$ است و انرژی درونی گاز و دمای آن کاهش می یابد. در تراکم بی دررو، عکس این اتفاق رخ می دهد و انرژی درونی گاز و دمای آن افزایش می یابد.

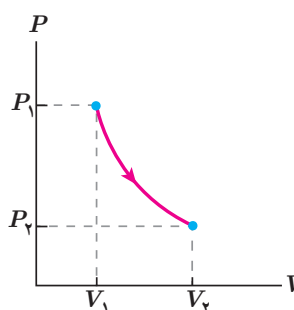
فعالیت ۳-۵

وقتی در یک نوشابه گازدار خیلی سرد را سریع باز می کنیم، مشاهده می شود که هاله رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می شود. این پدیده را توجیه کنید.



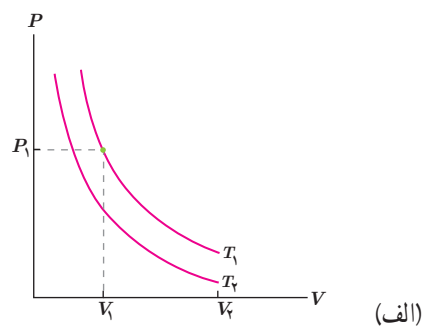
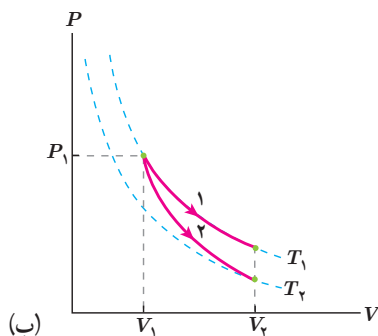
مثال ۱۱-۵

گازی آرمانی را با حجم V_1 و فشار P_1 در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی دررو منبسط کنیم، نشان داده می شود که نمودار $P-V$ آن خمی مشابه شکل روبه رو می شود که اندکی با خم یک فرایند هم دما متفاوت است. با فرض آنکه گاز در طی دو فرایند هم دما و بی دررو که از حجم و فشار یکسانی شروع می شوند، به حجم یکسانی انبساط یابد، نمودارهای این دو فرایند را در یک صفحه $P-V$ رسم و با هم مقایسه کنید. در کدام فرایند مقدار کار بیشتر است؟



پاسخ: در شکل (الف) دو منحنی هم دما، با استفاده از نتیجه تمرین ۵-۵ برای دماهای T_1 و T_2

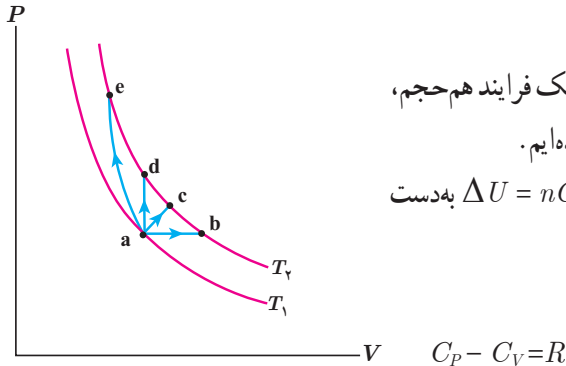
$(T_1 > T_2)$ رسم شده است. در فرایند هم دما، دما تغییر نمی کند. بنابراین، در انبساط هم دما مسیر ۱ در شکل (ب) همواره $T = T_1$ است، ولی همان طور که پیش تر گفتیم در انبساط بی دررو، دمای گاز آرمانی کاهش می یابد، پس گاز باید از مسیری مانند مسیر ۲ به دمایی پایین تر، مثل دمای T_2 در شکل (ب) برسد. از اینجا همچنین نتیجه می شود که چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم دما بیشتر است، مقدار کار برای این فرایند بیشتر است.



تمرین ۵-۶

مثال ۵-۱۱ را با فرض آنکه گاز به جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

مثال ۵-۱۲



در شکل روبه‌رو گازی آرمانی را از طریق چند فرایند مختلف، از جمله یک فرایند هم‌حجم، یک فرایند هم‌فشار و یک فرایند بی‌دررو از دمای T_1 به دمای T_2 رسانده‌ایم.

الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ به‌دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

پ) کار انجام شده روی گاز را در فرایند بی‌دررو بیابید.

پاسخ: الف) همان‌طور که می‌دانیم انرژی درونی گاز آرمانی فقط به دمای گاز بستگی دارد. بنابراین، با توجه به اینکه دماهای اولیه و نهایی در همه فرایندها یکی است، تغییر انرژی درونی در هر چهار فرایند برابر است. پس کافی است تغییر انرژی درونی را در یکی از فرایندها حساب کنیم؛ در فرایند هم‌حجم کار انجام شده برابر صفر است. بنابراین، می‌توانیم بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W = Q + 0 = Q$$

$$Q = nC_V \Delta T$$

$$\Delta U = nC_V \Delta T$$

ب) تغییر انرژی درونی در هر چهار فرایند برابر است. پس کافی است تغییر انرژی درونی فرایندهای هم‌فشار و هم‌حجم را مساوی هم بگیریم:

$$\Delta U_{\text{هم‌فشار}} = \Delta U_{\text{هم‌حجم}}$$

$$Q_{\text{هم‌فشار}} + W_{\text{هم‌فشار}} = Q_{\text{هم‌حجم}} + W_{\text{هم‌حجم}}$$

$$nC_P \Delta T + (-P \Delta V) = nC_V \Delta T + 0$$

اما می‌دانیم برای گاز آرمانی $PV = nRT$ است و بنابراین، در فرایند هم‌فشار $P \Delta V = nR \Delta T$ است. بنابراین، $nC_P \Delta T - nR \Delta T = nC_V \Delta T$ با تقسیم کردن دو طرف تساوی اخیر به $n \Delta T$ خواهیم داشت:

$$C_P - R = C_V \quad \text{یا} \quad C_P - C_V = R$$

پ) قانون اول ترمودینامیک را برای فرایند بی‌دررو به کار می‌بریم:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

و نیز با توجه به بند الف)، $\Delta U = nC_V \Delta T$ است و بنابراین $nC_V \Delta T = 0 + W$ و یا

$$W = nC_V \Delta T$$

نتایج مثال ۵-۱۲، کاربردهای فراوانی در ترمودینامیک گازهای آرمانی دارد.

مقدار $5/0 \text{ mol}$ از یک گاز آرمانی تک اتمی با فشار و حجم اولیه P_1 و V_1 و دمای اولیه $T_1 = 300 \text{ K}$ را تا حجم نهایی V_2 یک بار به صورت هم دما و بار دیگر به صورت بی دررو منبسط می کنیم. در انبساط بی دررو دمای مطلق گاز به 285 K می رسد.

الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم دماست؟

ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی دررو را حساب کنید.

پاسخ: الف) با استفاده از قانون گازهای آرمانی داریم:

$$\left(\frac{P_2 V_2}{T_2} \right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_2 V_2}{T_2} \right)_{\text{هم دما}}$$

با توجه به اینکه حجم نهایی در دو فرایند یکسان است، داریم:

$$\left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{هم دما}} \Rightarrow \frac{P_{2 \text{ بی دررو}}}{P_{2 \text{ هم دما}}} = \frac{T_{2 \text{ بی دررو}}}{T_{2 \text{ هم دما}}} = \frac{285 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.95$$

ب) در مثال ۵-۱۲ دیدیم برای گاز آرمانی در فرایند بی دررو $W = nC_V \Delta T$ است. بنابراین،

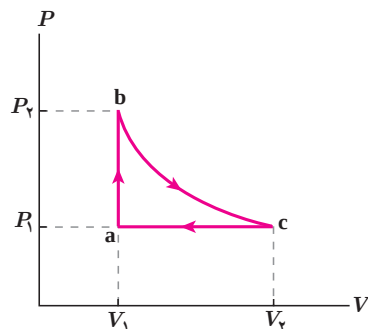
$$W_{\text{بی دررو}} = nC_V \Delta T = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = (5/0 \text{ mol}) \left(\frac{3}{2} \times 8.314 \text{ J/mol.K} \right) (-15 \text{ K}) = -935 \text{ J}$$

پرسش ۵-۲



سرنگ آتش زنه^۱ استوانه کوچکی است مجهز به پیستونی که کاملاً بر سطح داخلی استوانه منطبق است. در فضای محبوس داخل سرنگ، فقط هوا و تکه کاغذ کوچکی قرار دارد. با راندن سریع پیستون به داخل، و تراکم بی درروی هوای محبوس، تکه کاغذ مشتعل می شود. معمولاً از کاغذ نیتروسولوز در این آزمایش استفاده می شود که نقطه اشتعال بسیار پایینی دارد. چرا کاغذ در این فرایند آتش می گیرد؟

۵-۶ چرخه ترمودینامیکی



شکل ۵-۱۷ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته ای را در صفحه $P-V$ تشکیل می دهد.

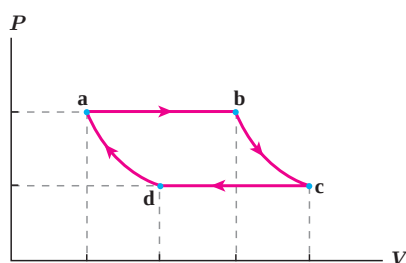
دستگاه می تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۵-۱۶، از سه فرایند هم حجم ab ، فرایند bc و فرایند هم فشار ca تشکیل شده است. مجموعه این فرایندها یک **چرخه ترمودینامیکی** را تشکیل داده است.

در واقع در چرخه ترمودینامیکی، دستگاه پس از طی چند فرایند مختلف به حالت اولیه خود بازمی گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ($\Delta U = 0$). بنابراین، از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه های ترمودینامیکی داریم:

$$Q = -W$$

$$(5-6) \text{ (چرخه ترمودینامیکی)}$$

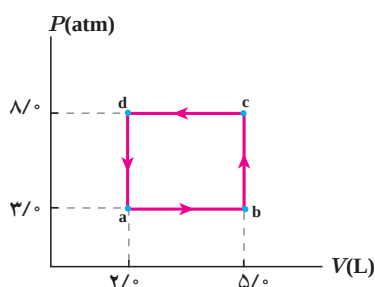
فعالیت ۴-۵



شکل روبه‌رو یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می‌دهد.
 الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.
 ب) نشان دهید مقدار کار کل انجام‌شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.
 پ) کار کل انجام‌شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۴-۵ دریافتیم اندازه کار انجام‌شده در چرخه برابر با مساحت سطح داخل چرخه در صفحه $P-V$ است و می‌توان نشان داد در چرخه‌های ساعتگرد در صفحه $P-V$ کار انجام‌شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه‌های پادساعتگرد، مثبت است.

مثال ۵-۱۴



گازی چرخه ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را می‌پیماید.
 الف) کار انجام‌شده روی گاز در این چرخه چقدر است؟
 ب) گرمای مبادله شده بین گاز و محیط در چرخه چقدر است؟
پاسخ: الف) همان‌طور که دیدیم اندازه کار انجام‌شده روی گاز، برابر با مساحت سطح داخل چرخه است:

$$|W| = S_{abcd} = (8 - 3) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 15 \times 10^3 \text{ J}$$

چون چرخه در صفحه $P-V$ پاد ساعتگرد است، داریم:

$$W = +15 \times 10^3 \text{ J}$$

با توجه به رابطه ۵-۶ می‌توان نوشت:

$$Q = -W = -15 \times 10^3 \text{ J}$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط $|Q| = 15 \times 10^3 \text{ J}$ است و علامت منفی Q نشان می‌دهد در این چرخه، گاز به محیط گرما داده است.

۷-۵ ماشین‌های گرمایی

تا حدود سه قرن پیش، انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوانات تأمین می‌شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب‌های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به‌دست می‌آمد. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان‌ها و مکان‌های خاصی امکان‌پذیر بود. امروزه بیشتر انرژی مورد نیاز انسان از طریق **ماشین‌های گرمایی** به‌دست می‌آید. ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می‌کنند. از این ماشین‌ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، خودرو، هواپیما و فضاپیما استفاده

می‌شود. همچنین در نیروگاه‌ها کار حاصل از این ماشین‌ها نخست به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکه برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد و از این طریق، انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی تأمین می‌شود.

از نظر تاریخی نخستین ماشین‌های گرمایی، **ماشین‌های برون‌سوز** مانند ماشین بخار بوده است. نوع دیگری از ماشین‌ها نیز وجود دارند که به خصوص در موتور خودروها استفاده می‌شوند و با سوخت‌هایی چون بنزین و گازوئیل کار می‌کنند که به آنها **ماشین‌های درون‌سوز** می‌گویند.

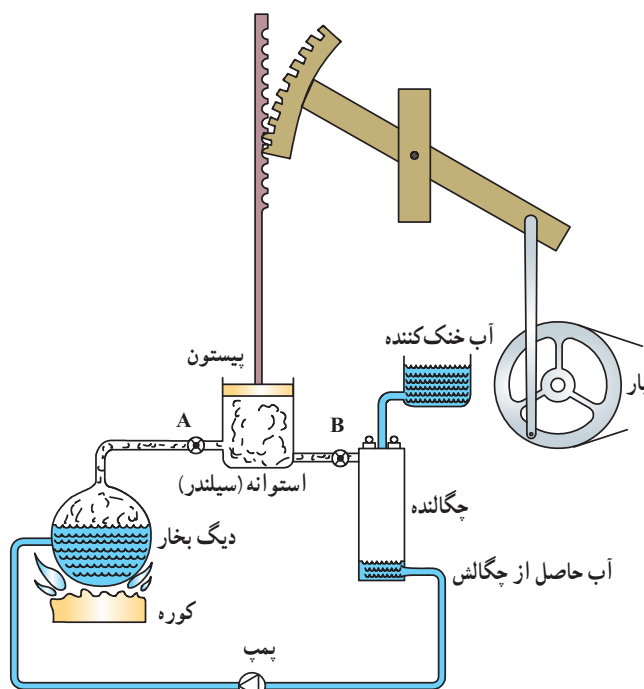
در ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند ترمودینامیکی، دستگاه مقداری گرما از محیط دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از این ماشین‌ها در یک چرخه معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود. در ادامه با ذکر مثال‌هایی چگونگی کار ماشین‌های برون‌سوز و درون‌سوز را توضیح می‌دهیم و با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شویم.

الف) ماشین‌های گرمایی برون‌سوز

ماشین‌های برون‌سوز انواع مختلفی دارند که ابتدایی‌ترین نوع آنها ماشین نیوکامن^۱ است که از آن برای بیرون کشیدن آب از معادن استفاده می‌شد. انواع روزآمدتر این ماشین‌ها ماشین استرلینگ^۲ و ماشین بخار^۳ است. در ادامه به توضیح نمونه ساده‌ای از ماشین‌های بخار می‌پردازیم که توسط جیمز وات (۱۸۱۹-۱۷۳۶م.) طراحی شد.

ماشین بخار وات^۴: در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را

طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام دادن چند فرایند مختلف، که به توضیح آنها می‌پردازیم، به حالت اولیه خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود؛ چون گرما توسط کوره، از بیرون، به آب داده می‌شود، ماشین بخار از نوع ماشین‌های برون‌سوز محسوب می‌شود. با باز شدن شیر A بخار حاصل از دیگ بخار با فشار وارد استوانه (سیلندر) می‌شود و به این ترتیب، پیستون را به بالا می‌راند در حالی که شیر B بسته است. وقتی پیستون به بالای استوانه می‌رسد شیر A بسته می‌شود و به این ترتیب، دیگ بخار مسدود می‌گردد. همزمان شیر B باز می‌شود و بدین ترتیب، بخار از استوانه خارج و وارد محفظه چگالنده می‌گردد. با ورود بخار به چگالنده، پیستون پایین می‌آید و هنگامی که پیستون به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد، شیر B بسته و



شکل ۵-۱۷ طرحی از بخش‌های اصلی یک ماشین بخار وات

شامل دیگ بخار، سیلندر، پیستون، چگالنده و پمپ

۱- Newcomen engine

۲- Stirling engine

۳- Steam engine

۴- James Watt engine

به طور همزمان شیر A باز می‌شود و این مراحل دوباره تکرار می‌گردد. آب خنک کننده، چگالنده را همواره خنک نگه می‌دارد و بدین ترتیب، بخاری که وارد محفظه چگالنده می‌گردد، به مایع تبدیل می‌گردد (توجه کنید که آب خنک کننده وارد چگالنده نمی‌شود، بلکه اطراف آن را خنک می‌سازد). مایع پس از خروج از چگالنده توسط یک پمپ (تلمبه) به دیگ بخار برگردانده می‌شود و این چرخه پی‌درپی تکرار می‌شود.

تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بخار دشوار است. اما با برخی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه رانکین^۱) رسید. منظور از چرخه آرمانی چرخه‌ای است که فرایندهای آن ایستاوار و بدون اصطکاک و هرگونه اتلافی باشد. همان‌طور که در ماشین بخار وات دیدیم دستگاه (آب) در هر چرخه با دو منبع گرمای دیگ بخار و چگالنده، تبادل گرما می‌کند و کار خالصی انجام می‌دهد. دیگ بخار را که در دمای بالاتری قرار دارد، منبع با دمای بالاتر و چگالنده را منبع با دمای پایین‌تر می‌نامند. گرمایی را که دستگاه از منبع با دمای بالاتر می‌گیرد با Q_H ، و گرمایی را که دستگاه به منبع با دمای پایین‌تر می‌دهد با Q_L ، و کار خالص انجام‌شده توسط دستگاه در طی چرخه را با $|W|$ نمایش می‌دهیم.

فعالیت ۵-۵



در مورد ماشین‌های بخاری که امروزه در نیروگاه‌های گرمایی (حرارتی) استفاده می‌شوند و نحوه کارکرد آنها تحقیق کنید و نتیجه تحقیق را در کلاس ارائه نمایید.

فعالیت ۵-۶



قایق پوت-پوت^۲، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

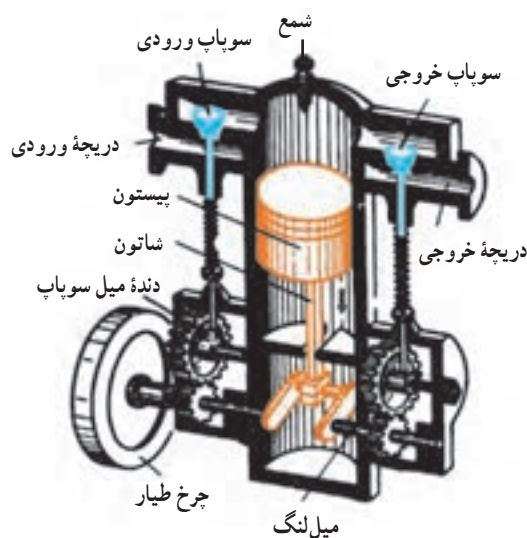
ب) ماشین‌های گرمایی درون سوز

موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماها، برخی کشتی‌ها، قطارها و مولدهای کوچک برق (ژنراتور) درون سوزند. ماشین‌های گرمایی درون سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی^۳ می‌پردازیم.

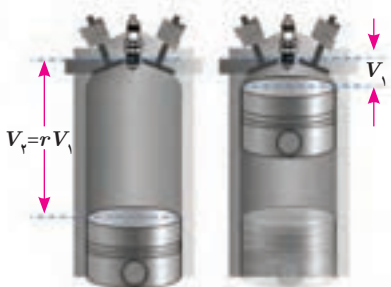
۱- این چرخه توسط مهندس اسکاتلندی ویلیام رانکین (۱۸۷۲-۱۸۲۰م.) ارائه شد.

۲- put-put

۳- gasoline engine



شکل ۱۸-۵ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور



شکل ۱۹-۵ حجم فضای بالای پیستون در ابتدا V_1 و در انتها rV_1 است.

ماشین درون سوز بنزینی: موتور ماشین بنزینی از یک یا چند استوانه

(سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها داخل آنها حرکت می‌کنند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است. در این نوع موتور، بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته (شاتون) و میل لنگ به حرکت چرخشی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت چرخشی به چرخ‌ها، اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.

ماشین بنزینی چرخه‌ای را طی می‌کند که شامل شش فرایند است. از این شش فرایند، چهار فرایند همراه با حرکت پیستون‌اند که به آنها ضربه^۱ می‌گویند. این فرایندها به طور طرح وار در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.

۱- ضربه مکش: با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه

ورودی وارد استوانه می‌شود. همان‌طور که شکل ۵-۱۹ نشان می‌دهد وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن V_1 و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا $V_2 = rV_1$ است (r را نسبت تراکم یا نسبت انبساط^۲ می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا داخل استوانه محبوس می‌گردد.

۲- ضربه تراکم: پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم

V_1 می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه، در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

۳- آتش گرفتن: هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط

آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V_1 تا مقدار زیادی بالا می‌رود؛ چون آتش گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می‌دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی‌گیرد، این موتورها را درون‌سوز می‌گویند.

۴- ضربه قدرت: در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از V_1 به

V_2 می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

۵- تخلیه: در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم V_2) قرار دارد، سوپاپ دریچه

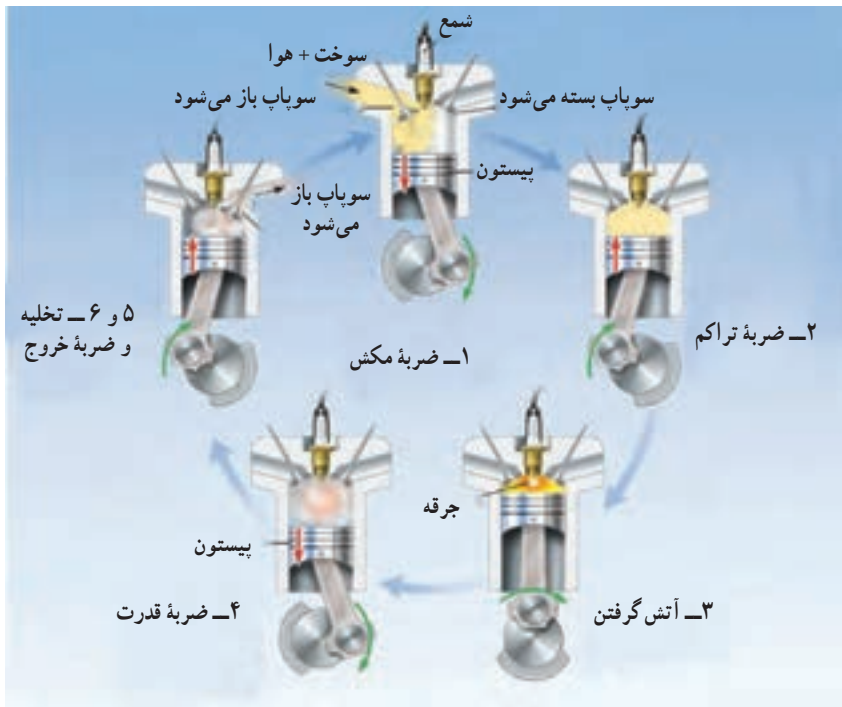
خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود، تا اینکه فشار گاز داخل استوانه با فشار جو یکسان شود. در این مرحله پیستون ساکن است.

۶- ضربه خروج گاز: پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون می‌راند و حجم

فضای بالای پیستون از V_2 به مقدار اولیه V_1 می‌رسد.

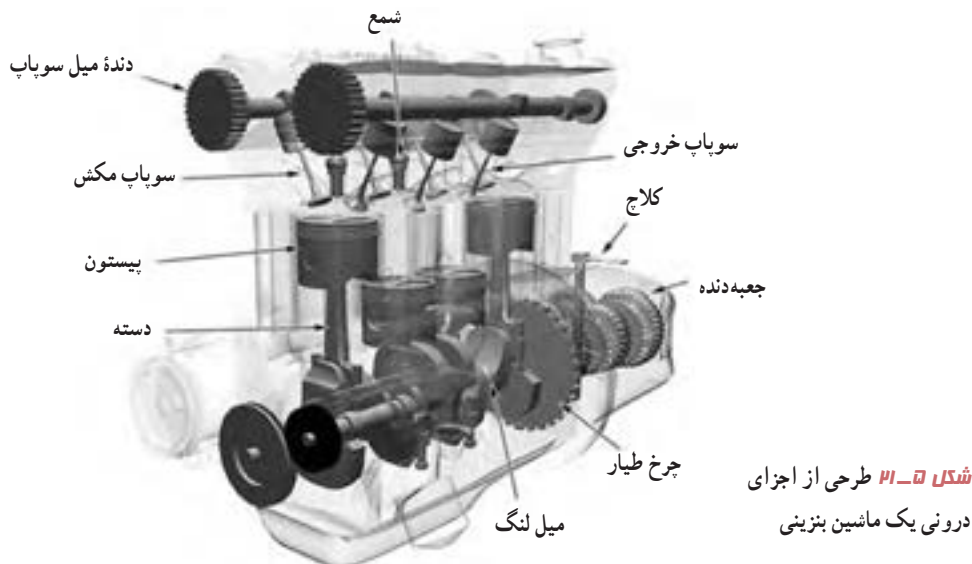
۱- Stroke

۲- Compression ratio or expansion ratio



شکل ۵-۲۰ مراحل مختلف در چرخه موتورهای درون سوز

تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بنزینی دشوار است. اما با بعضی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه اتو) رسید. در این ساده‌سازی‌ها می‌توان دستگاه را گازی کامل در نظر گرفت و بدین ترتیب، فرض کرد که گاز به جای آتش گرفتن، گرمای Q_H را از محیط (منبع با دمای بالا) دریافت می‌کند، به جای تخلیه و خروج گاز، گرمای Q_L را به محیط (منبع با دمای پایین) تحویل می‌دهد و در طی این چرخه، کارخالص $|W|$ را روی محیط انجام می‌دهد. شکل ۵-۲۱ طرحی از اجزای یک ماشین بنزینی چهار سیلندر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

۱- Otto Cycle - موتورهای درون‌سوز بنزینی در سال ۱۸۷۶ توسط مهندس آلمانی «نیکلاس اتو» ساخته شد و این چرخه به افتخار او چرخه اتو نامیده شده است. اما ایده موتورهای چهارضربه‌ای پیشتر در سال ۱۸۶۲ توسط مهندس فرانسوی «آلفونس روشا» مطرح شده بود.

چرخه اتو: همان طور که در متن درس اشاره شد چگونگی عمل یک ماشین درون سوز بنزینی را می توان با فرض مجموعه ای از ساده سازی ها به طور تقریبی بیان کرد و بر اساس این فرض ها به چرخه ای موسوم به چرخه اتو رسید و آن را در صفحه $P-V$ رسم کرد. این فرض ها عبارت اند از:

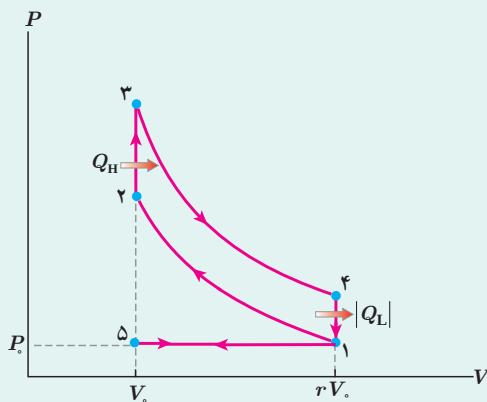
۱- ماده کاری (ماده ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می شود) هواست و مانند یک گاز آرمانی با ظرفیت گرمایی ثابت رفتار می کند.

۲- تمام فرایندها ایستاوارند.

۳- هیچ اصطکاک یا تلاطمی وجود ندارد.

۴- هیچ اتلاف گرمایی از طریق دیواره های اتاقک احتراق نداریم.

۵- فرایندها برگشت پذیرند. (یعنی در پایان فرایند، هم دستگاه و هم محیط می توانند دقیقاً به حالت های اولیه خود بازگردانده شود) چرخه اتو در شکل زیر رسم شده است که مراحل آن عبارت اند از:



۱ → ۵ مکش ایستاوار در فشار ثابت جو.

۵ → ۲ تراکم بی درروی ایستاوار.

۲ → ۳ افزایش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۳ → ۴ انبساط بی درروی ایستاوار.

۴ → ۱ کاهش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۱ → ۵ خروج ایستاوار در فشار ثابت جو.

بازده ماشین گرمایی: هدف از ساخت هر ماشین آن است که انرژی گرفته شده را تا بیشترین

مقدار ممکن به انرژی مفید خروجی تبدیل کند. بنابراین بازده هر ماشین به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}} \quad (\text{برای هر ماشینی})$$

در ماشین های گرمایی، انرژی مفید خروجی همان کار $|W|$ و انرژی داده شده به ماشین، همان

گرمای Q_H است. بنابراین، برای بازده هر ماشین گرمایی داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (7-5) \quad (\text{برای هر ماشین گرمایی})$$

در بررسی هر یک از ماشین های برون سوز بخار و درون سوز بنزینی برای ساده سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی فرض می کنند که در آنها هیچ اتلاfi نداریم و فرایندها به طور ایستاوار انجام می شوند. در طی این چرخه ها مقداری گرما از یک منبع دما بالا^۱ گرفته شده (Q_H)، مقداری کار انجام می شود ($|W|$) و

^۱ - High-temperature reservoir

مقداری گرما به یک منبع دمای بالا داده می‌شود ($|Q_L|$). طرز کار همه ماشین‌های گرمایی در شکل ۵-۲۲ به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است.

قانون اول ترمودینامیک $\Delta U = Q + W$ برای چرخه ماشین‌های آرمانی به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

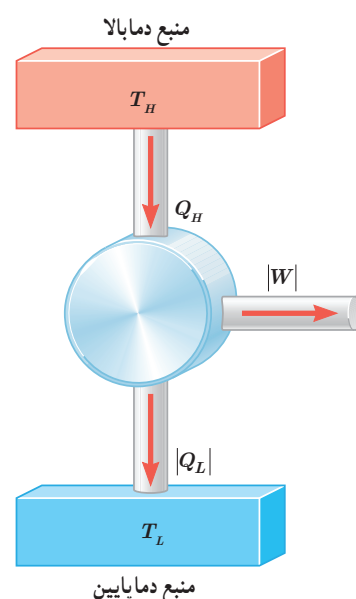
در این رابطه، Q_H مثبت و Q_L و W منفی است. بنابراین:

$$Q_H = |W| + |Q_L| \quad (\text{ماشین‌های گرمایی آرمانی}) \quad (۸-۵)$$

در نتیجه بازده برای ماشین‌های گرمایی آرمانی چنین می‌شود:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \quad (\text{برای ماشین‌های گرمایی آرمانی}) \quad (۹-۵)$$

بازده ماشین‌های گرمایی واقعی از بازده ماشین‌های آرمانی کمتر است. بازده واقعی ماشین‌های درون‌سوز بنزینی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بازده ماشین‌های درون‌سوز دیزلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد، و بازده ماشین‌های برون‌سوز بخار ۳۰ تا ۴۰ درصد است.



شکل ۵-۲۲ طرز کار طرح‌وار یک ماشین گرمایی آرمانی

مثال ۵-۱۵

بازده یک ماشین درون‌سوز بنزینی ۲۲٪ درصد است. این ماشین در هر چرخه $2/51 \times 10^3 \text{ J}$ کار انجام می‌دهد. الف) گرمای حاصل از سوخت و ب) گرمای خارج شده از موتور در هر چرخه چقدر است؟ ماشین را آرمانی فرض کنید. پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۵-۷ داریم

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \Rightarrow 0.22 = \frac{2/51 \times 10^3}{Q_H}$$

$$Q_H = 1/141 \times 10^4 \text{ J} \approx 1/14 \times 10^4 \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه ۵-۸ داریم:

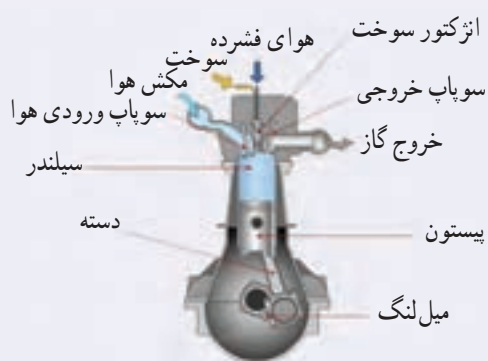
$$|Q_L| = Q_H - |W| = 1/141 \times 10^4 \text{ J} - 2/51 \times 10^3 \text{ J} = 8/90 \times 10^3 \text{ J}$$

فناوری و کاربرد

نسبت تراکم ماشین‌ها: محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم r می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی رسید. اما در عمل ممکن نیست به هر نسبت تراکمی دست یافت؛ مثلاً نسبت تراکم ماشین‌های بنزینی معمولی تا حدود ۱۰ و ماشین‌های بنزینی مدرن تا حدود ۱۴ است. در نسبت‌های تراکم بالا، مخلوط سوخت و هوا در ضربه تراکم، چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل^۲ مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشینی در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا به‌طور بی‌دررو متراکم و در

۱- Low-temperature reservoir

۲- Rudolf Christian Karl Diesel (۱۸۵۸-۱۹۱۳)



شکل ۳۳.۵ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

نتیجه داغ می‌شود تا اینکه بتواند گازوئیلی را که به داخل استوانه پاشیده می‌شود محترق کند (در این ماشین، شمع وجود ندارد). میزان پاشیده شدن گازوئیل طوری تنظیم می‌شود که احتراق تقریباً به طور هم فشار پیستون را به سمت پایین هل می‌دهد. بقیه چرخه، یعنی ضربه قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربه خروج دقیقاً مانند ماشین بنزینی است. در تحلیل ماشین دیزل نیز مانند ماشین بنزینی از اثرهای اتلافی چشم پوشی می‌شود. نسبت تراکم برای ماشین‌های دیزل را حتی تا مقدار ۲۳ نیز می‌توان افزایش داد. شکل ۲۳-۵ طرحی از سیلندر و اجزای جانبی این ماشین را نشان می‌دهد.

۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بخش قبل و در بررسی ماشین‌های گرمایی، دیدیم که همهٔ این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای Q_H را از یک منبع دمابالا می‌گیرد، مقداری از آن را به کار $|W|$ تبدیل می‌کند و بقیه $|Q_L|$ را به یک منبع دماپایین می‌دهد. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که آیا امکان تبدیل همهٔ گرمای دریافتی به کار وجود دارد؟ درواقع، هیچ یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همهٔ گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: "ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بپیماید که در طی آن مقداری گرما را از منبع دمابالا جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند."

عبارت بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان **ماشین گرمایی** نامیده می‌شود^۱؛ یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰ درصد) شود. توجه داریم که اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع دمابالا به کار تبدیل شود، قانون اول ترمودینامیک نقض نمی‌شود؛ اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است.

قضیه کارنو: براساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از یک (۱۰۰ درصد) کمتر است و اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع با دماهای T_H و T_L کار می‌کند چقدر است؟ و ماده کاری (ماده‌ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) چه تأثیری بر این بازده دارد؟ پاسخ به این پرسش‌ها را **سدهی کارنو** مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد و دریافت که بازده چنین ماشینی مستقل از ماده کاری است که چرخه ماشین را طی می‌کند. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** می‌نامند.



نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد

سدهی کارنو^۲ در اوّل

ژوئن ۱۷۹۶ میلادی

در پاریس و در

خانواده‌ای که در آن

علم و سیاست عجین

شده بود، به دنیا آمد.

او نخستین پسر لایزار کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لایزار بخش سوم نام فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدهی کارنو در ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی-لوساک و بوسون قرار گرفت. پس از فارغ التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدهی به عنوان افسر وارد رشته مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکه گرما» به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریه بازده ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها رودلف کلاسیوس و لرد کلوین با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام **آنتروپی** پرداختند. از این رو، از کارنو اغلب به عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در ۲۴ آگوست ۱۸۳۲ میلادی در

سن ۳۶ سالگی درگذشت.

۱- Nicolas Leonard Sadi Caront

۲- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلوین - پلانک قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.

محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (۵-۱) \quad (\text{برای ماشین کارنو})$$

که در آن T_L و T_H برحسب کلوین است. همان‌طور که می‌بینید بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع دمابالا و دماب پایین که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.

بنا به قضیه کارنو، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای T_H و T_L کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی کارنو $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$ است.

مثال ۵-۱۶

توربین بخار یک نیروگاه برق بین دماهای $T_H = 800^\circ\text{K}$ و $T_L = 300^\circ\text{K}$ کار می‌کند. بازده ماشین کارنویی که بین این دو دما کار می‌کند چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300^\circ\text{K}}{800^\circ\text{K}} = 0.625$$

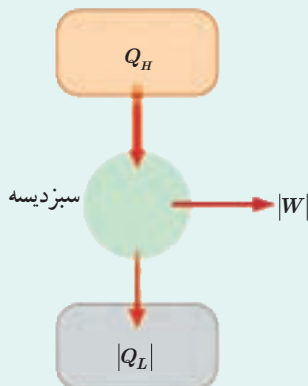
بازده واقعی توربین‌های بخار در عمل از این عدد کمتر و در حدود ۴۰ درصد است.

خوب است بدانید

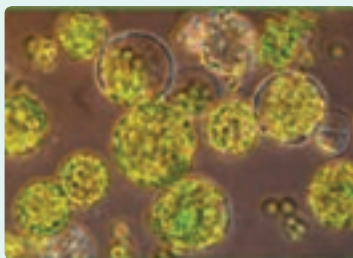
ترمودینامیک و فوتوسنتز: ترمودینامیک در پدیده‌های زیستی نیز کاربرد دارد.

یکی از این کاربردها فوتوسنتز است. در فوتوسنتز، گیاهان درصد کوچکی از انرژی نور خورشید را که در بخشی از گستره نور مرئی واقع است به دام می‌اندازند و به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. در واقع فوتوسنتز شامل دو مرحله است. در مرحله نخست، انرژی نور خورشید به دام می‌افتد و صرف تولید مولکول‌هایی می‌شود که این انرژی را به‌طور موقت ذخیره می‌کنند و در مرحله دوم انرژی شیمیایی ذخیره شده، صرف ساختن ترکیب‌های آلی می‌شود. شکل (الف) مرحله نخست فرایند فوتوسنتز را به گونه‌ای مشابه آنچه که یک ماشین گرمایی انجام می‌دهد نشان می‌دهد. انرژی حاصل

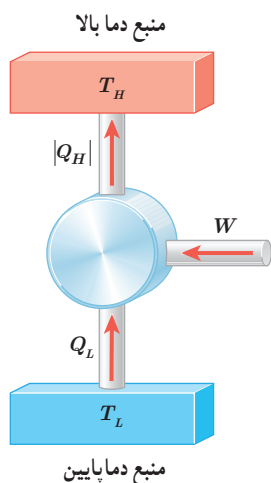
از خورشید وارد گیاه می‌شود. سبزدیسه (کلروپلاست) گیاه (شکل ب) همچون یک ماشین گرمایی این انرژی را می‌گیرد و کار $|W|$ را انجام می‌دهد و در همین زمان گرمای $|Q_L|$ را به محیط، که همان هوا و خاک اطراف گیاه است، می‌دهد. در ماشین‌های گرمایی، ماشین کار را مثلاً به‌صورت چرخاندن یک چرخ انجام می‌دهد. در فوتوسنتز، سبزدیسه که شامل رنگیزه‌های سبزین (کلروفیل) است، کار را به‌صورت انرژی شیمیایی در مولکول‌های خاصی مانند ATP (آدنوزین تری فسفات) ذخیره می‌کند. این انرژی شیمیایی می‌تواند بعداً وقتی جانوری گیاه را می‌خورد به‌صورت کار مکانیکی درآید.



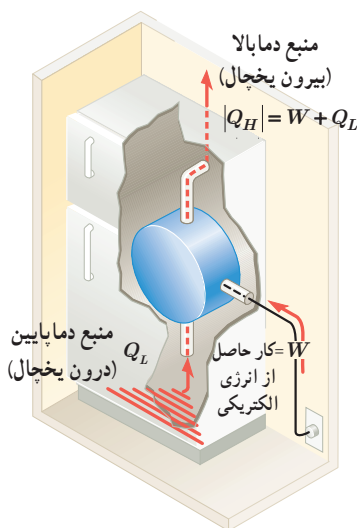
(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.



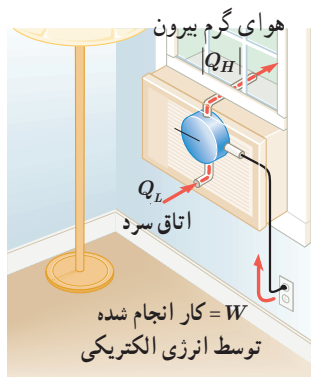
(ب) یک یاخته گیاهی شامل سبزدیسه‌هاست.



شکل ۵-۲۴ طرز کار طرح وار یک یخچال آرمانی



شکل ۵-۲۵ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی



شکل ۵-۲۶ طرحی از طرز کار یک کولرگازی

گرما همواره از جسمی با دمای بالا به جسمی با دمای پایین منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل به‌طور خودبه‌خود رخ نمی‌دهد. مثلاً اگر یک لیوان آب سرد در اتاق قرار داشته باشد گرما به‌طور خودبه‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود و ممکن نیست آب به‌طور خودبه‌خود سردتر شود. به عبارت دیگر: "ممکن نیست گرما به‌طور خودبه‌خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود." به این گزاره، **قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی** می‌گویند^۱. اما با انجام کار می‌توان گرما را از جسمی سرد به جسمی گرم منتقل کرد. (می‌توان نشان داد دو بیان ماشین گرمایی و یخچالی قانون دوم ترمودینامیک معادل یکدیگرند؛ یعنی اگر قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی نقض شود، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نیز نقض می‌شود و بر عکس.)

یخچال وسیله‌ای است که این عمل را انجام می‌دهد و با استفاده از کار، گرما را از منبعی دما پایین می‌گیرد و به منبعی دما بالا می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخه ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه (ماده کاری) کار W را انجام می‌دهد. دستگاه گرمای Q_L را از منبع دما پایین می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع دما بالا می‌دهد. به عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به‌طور طرح‌وار در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است. یخچال‌های خانگی، کولرهای گازی و تلمبه‌های گرمایی نمونه‌هایی از یخچال‌ها هستند؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار W توسط کمپرسور (متراکم‌کننده) می‌شود، گرمای Q_L از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود و گرمای $|Q_H|$ به هوای بیرون یخچال داده می‌شود (شکل ۵-۲۵). طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولر گازی منبع دما پایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دما بالا، هوای بیرون اتاق است (شکل ۵-۲۶).

ضریب عملکرد یخچال: در هر یخچال می‌خواهیم با صرف کمترین کار ممکن، بیشترین گرما را از منبع دما پایین بگیریم. بنابراین، **ضریب عملکرد یخچال** (K) به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع دما پایین (Q_L) به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد (W) تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_L}{W} \quad (۱۱-۵) \quad (\text{برای هر یخچالی})$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد برای یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و برای کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است. در بررسی یخچال‌ها، مانند ماشین‌های گرمایی برای ساده‌سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی را فرض می‌کنیم که در آن هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به‌طور ایستوار انجام می‌شوند. اکنون قانون اول ترمودینامیک ($\Delta U = Q + W$) برای چرخه یخچال آرمانی به صورت زیر درمی‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

۱- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلاسیوس قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.

در این رابطه، Q_H منفی و Q_L و W مثبت است. بنابراین :

$$|Q_H| = W + Q_L \quad (12-5) \quad (\text{برای یخچال آرمانی})$$

با قرار دادن W از رابطه (۱۲-۵) در رابطه ضریب عملکرد (معادله ۵-۱۱)، ضریب عملکرد یخچال‌های آرمانی از رابطه زیر به دست می‌آید :

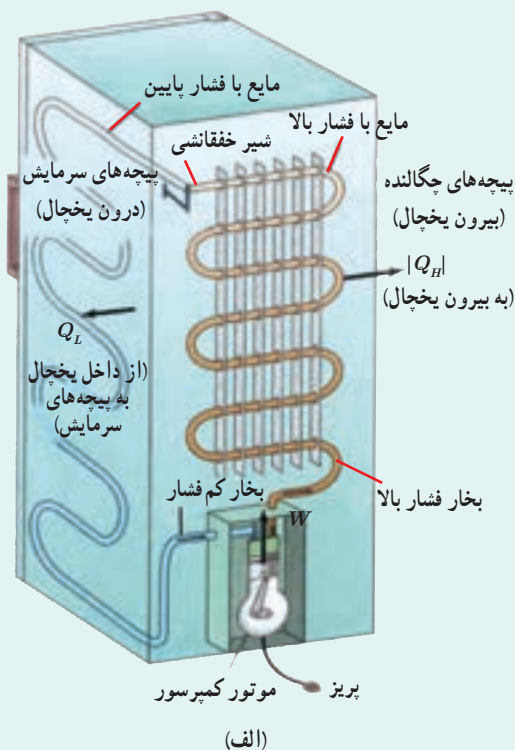
$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} \quad (13-5) \quad (\text{برای یخچال‌های آرمانی})$$

مانند ماشین‌های گرمایی که بازده آنها حدّ بالایی دارد، برای ضریب عملکرد یخچال‌ها نیز حدّ بالایی وجود دارد. به این حدّ بالا، ضریب عملکرد **یخچال کارنو** گفته می‌شود و نشان داده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید.

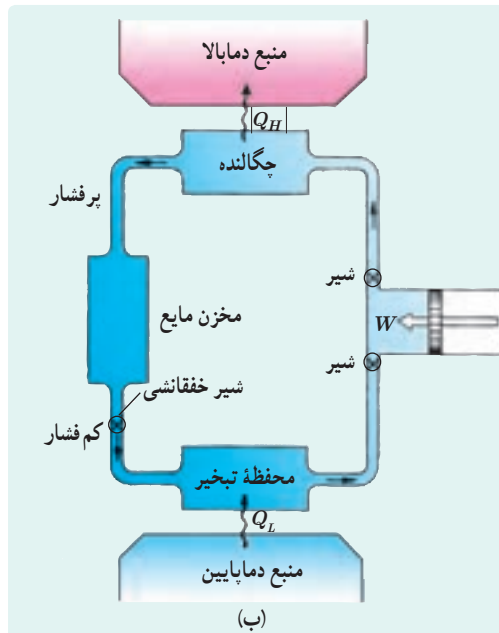
$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (14-5) \quad (\text{برای یخچال کارنو})$$

در این رابطه T_H و T_L به ترتیب، دمای منبع‌های دما پایین و دما بالا برحسب کلین است.

خوب است بدانید



ساز و کار یخچال خانگی : یخچال خانگی یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌های خانگی را در اندازه‌های مختلف می‌سازند و آنها را با حجم داخلی مشخص می‌کنند؛ مثلاً یخچال ۹ فوت دارای حجم داخلی ۹ فوت مکعب یا حدود ۲۴۰ لیتر است. در شکل (الف) یک یخچال خانگی و در شکل (ب) نمایش طرح‌وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارت‌اند از : چگالنده، پیچ‌های سرمایش (محفظه تبخیر)، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقا نشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). چگالنده با منبع دما بالا (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع دما پایین (محتویات داخل یخچال) در تماس است. در یخچال‌های قدیمی‌تر ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است، اما این گاز از جمله گازهایی است که به لایه اُزن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به مایع در فشار زیاد تبدیل می‌شود و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم درمی‌آید.



طرز کار یخچال خانگی به طور مختصر به شرح زیر است :
کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظه تبخیر به چگالنده منتقل می کند و دما و فشار آن را بالا می برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع دما بالا (اتاق) بیشتر شده است، گرمای $|Q_H|$ را به این منبع می دهد، مایع می شود و وارد مخزن مایع می گردد. هنگامی که این مایع پر فشار از شیر خفقا نشی می گذرد به شدت سرد می شود، به طوری که از منبع دما پایین (هوا، غذا و یخ داخل یخچال) هم سردتر می شود و از آن گرمای Q_L را می گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می شود.

پرسش ۳-۵

با فرض آنکه بتوان ضریب عملکرد یک یخچال را با ضریب عملکرد یخچال کارنو توصیف کرد، به گمان شما یک کولر گازی در آب و هوای معتدل بهتر کار می کند، یا در آب و هوای گرم؟

مثال ۵-۱۷

فرض کنید در هر چرخه یک یخچال فرضی، دستگاه $8/^\circ\text{kJ}$ گرما از منبع دما پایین بگیرد و کمپرسور $2/^\circ\text{kJ}$ کار روی دستگاه انجام دهد. با فرض آرمانی بودن یخچال،
(الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می دهد؟
(ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟
پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۵-۱۲ داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = 2/^\circ\text{kJ} + 8/^\circ\text{kJ} = 10/^\circ\text{kJ}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۵-۱۱ داریم:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{8/^\circ\text{kJ}}{2/^\circ\text{kJ}} = 4/^\circ$$

مثال ۵-۱۸

توان یک یخچال 1000 وات و ضریب عملکرد آن $4/^\circ$ است. با فرض آرمانی بودن یخچال،
(الف) چه مدت طول می کشد تا در این یخچال $1/^\circ\text{kg}$ آب $25/^\circ\text{C}$ به یخ $-10/^\circ\text{C}$ تبدیل شود؟
(ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می شود؟ $L_F = 3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}$ و $c_{\text{یخ}} = 2/10 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ و $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$.

پاسخ: الف) گرمای Q_L که آب از دست می‌دهد، برابر است با

$$Q_L = mc_{\text{آب}}|\Delta\theta| + mL_F + mc_{\text{یخ}}|\Delta\theta| = (1/0 \cdot \text{kg})(4/20 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(25/^\circ\text{C}) \\ + (1/0 \cdot \text{kg})(3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) + (1/0 \cdot \text{kg})(2/10 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(10/^\circ\text{C}) = 4/61 \times 10^5 \text{ J}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۱۱-۵ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_L}{K} = \frac{4/61 \times 10^5 \text{ J}}{4/00} = 1/15 \times 10^5 \text{ J}$$

حال با استفاده از رابطه توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می‌آید:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/15 \times 10^5 \text{ J}}{1000 \text{ J/s}} = 1/15 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱۲-۵ برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = 1/15 \times 10^5 \text{ J} + 4/61 \times 10^5 \text{ J} = 5/76 \times 10^5 \text{ J}$$

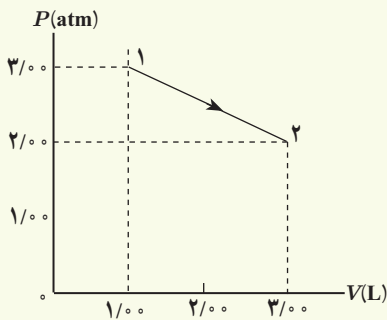
۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

- ۱) ظرفی شامل 3 kg آب است. با هم زدن آب داخل ظرف، 40 kJ کار روی آن انجام می‌دهیم و در این مدت 31 kJ گرما از ظرف به بیرون منتقل می‌شود. انرژی درونی آب چقدر تغییر می‌کند؟

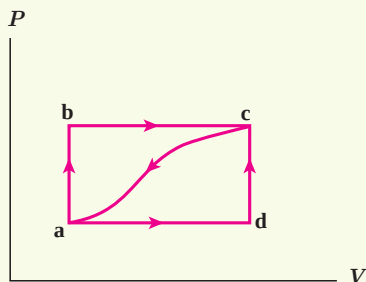
۵-۵ برخی فرایندهای ترمودینامیکی

- ۲) الف) در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟
 ب) در فرایند هم فشار چگونه می‌توان حجم گاز را افزایش یا کاهش داد؟
- ۳) ته یک سرنگ را که دسته آن می‌تواند آزادانه حرکت کند مسدود می‌کنیم، آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

- ۴) حجم 5°C مول از یک گاز آرمانی تک اتمی $8/3$ لیتر و فشار آن $1/5$ اتمسفر است. الف) مقداری گرما به گاز می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید. ب) اگر به جای گرما دادن به گاز، مقداری گرما از گاز بگیریم تا حجم آن در طی یک فرایند هم فشار نصف شود، کار و گرمای مبادله شده در این فرایند چقدر می‌شود؟

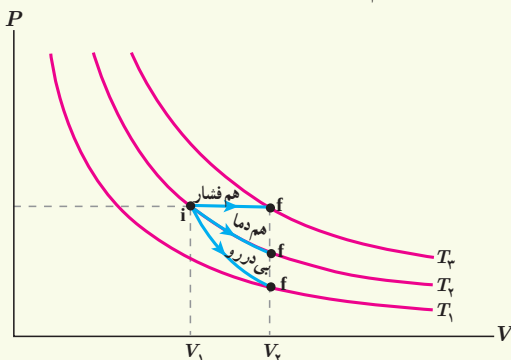


- ۵) نمودار $P-V$ ی گازی رقیق در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. در این فرایند با فرض آنکه انرژی درونی در نقطه (۱) برابر 456 J و در نقطه (۲) برابر 912 J باشد، چقدر گرما مبادله شده است؟ آیا گاز گرما گرفته است یا از دست داده است؟



- ۶) گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر، 9°C ژول گرما می‌گیرد و 7°C ژول کار انجام می‌دهد. الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟ ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز در مقایسه با مسیر abc بیشتر است یا کمتر؟ گرمای داده شده به گاز بیشتر است یا کمتر؟ پ) اگر گاز را از مسیر خمیده از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن انرژی بگیریم؟

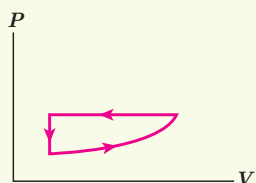
- ۷) 12°g گاز اکسیژن (O_2) در فشار متعارف جو ($1.01 \times 10^5\text{ Pa}$) از 25°C تا 125°C گرم می‌شود. نسبت تغییر انرژی درونی گاز به گرمای داده شده به آن را به دست آورید؟



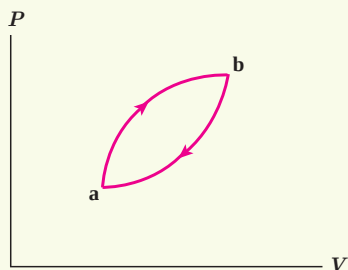
- ۸) یک مکعب آلومینیمی توپر به ضلع 20 cm از 50°C تا 150°C در فشار متعارف جو ($1.01 \times 10^5\text{ Pa}$) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب و تغییر انرژی درونی آن را محاسبه کنید.
- ۹) مطابق شکل روبه‌رو، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم فشار، هم دما و بی‌دررو از V_1 به حجم بزرگ‌تر V_2 می‌رسد.

الف) اندازه کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

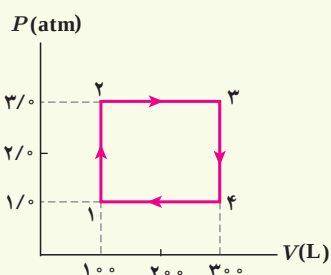
۵-۶ چرخه ترمودینامیکی



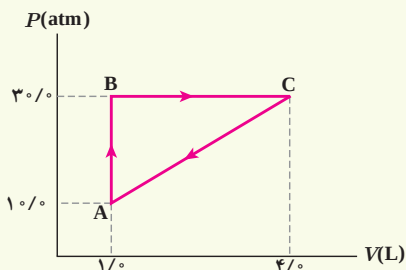
۱۰ برای چرخه گازی که نمودار $P-V$ ی آن در اینجا نشان داده شده است، ΔU گاز، W و Q مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



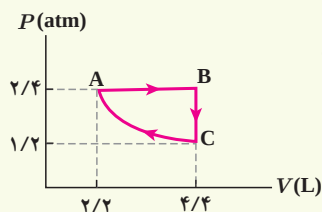
۱۱ شکل روبه‌رو چرخه‌ای را نشان می‌دهد که یک گاز طی کرده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است؟ ب) اگر مقدار گرمای مبادله شده در این چرخه 400 J باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



۱۲ یک گاز کامل دو اتمی چرخه نشان داده شده در شکل زیر را می‌پیماید. دمای گاز در حالت (۱) برابر 200 K است. الف) دما در سه نقطه دیگر چقدر است؟ ب) کار انجام شده در چرخه چقدر است؟ پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟ ت) در چه فرایندهایی گاز گرما از دست داده است؟

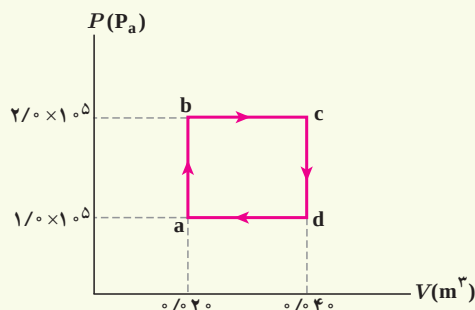


۱۳ گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای مبادله شده در این چرخه چند ژول است؟



۱۴ دستگاهی متشکل از 2 mol گاز کامل تک اتمی حجمی برابر 2 L را در فشار $2/4\text{ atm}$ اشغال کرده است. این دستگاه چرخه‌ای مطابق شکل را می‌پیماید که در آن فرایند CA فرایندی هم‌دما است. الف) دما در نقاط A، B، و C چقدر است؟ ب) ΔU را برای هریک از سه فرایند چرخه به دست آورید.

۵-۲ ماشین های گرمایی



۱۵ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه ای

را مطابق شکل روبه رو می بینید. مطلوب است :

الف) کار انجام شده توسط ماشین گرمایی در پیمودن یک چرخه،

ب) گرمای مبادله شده در فرایند abc،

پ) گرمای مبادله شده در فرایند cda

ت) تغییر انرژی درونی در فرایند abc

۱۶ یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه 1000 J گرما از منبع دما بالا می گیرد و 600 J گرما به منبع دما پایین می دهد. الف) بازده

این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه 0.5 s طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟

۱۷ بازده یک ماشین آرمانی 25% درصد است و در هر چرخه $10^3 \times 8/2\text{ J}$ کار انجام می دهد. الف) Q_H و Q_L را در هر چرخه ماشین

به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به 30% درصد افزایش یابد، Q_H و Q_L به ازای همان مقدار کار چقدر می شود؟

۱۸ یک ماشین بخار در هر دقیقه $10^5 \times 1/5\text{ MJ}$ گرما از دیگ بخار دریافت می کند و $10^4 \times 9/0\text{ MJ}$ گرما در جگالنده از دست

می دهد. با فرض آرمانی بودن این ماشین الف) کار انجام شده توسط ماشین در هر دقیقه چند مگاژول است؟ و ب) بازده این ماشین

چقدر است؟

۱۹ یک ماشین گرمایی درون سوز در هر چرخه 800 kJ گرما از سوزاندن سوخت دریافت می کند و 200 kJ کار تحویل می دهد.

گرمای حاصل از سوخت $10^4 \times 5/0\text{ J/g}$ است و ماشین در هر ثانیه 40% چرخه را می بینید. کمیت های زیر را حساب کنید.

الف) بازده ماشین، ب) با فرض آرمانی بودن ماشین، گرمای تلف شده در هر چرخه، پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه و ت) توان

ماشین.

۵-۸ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

۲۰ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه های جوش (در فشار متعارف جو) و انجماد آب کار می کند و بازده آن 70%

درصد است. آیا ادعای این مخترع می تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

۲۱ می خواهیم بازده یک ماشین کارنو را افزایش دهیم. با مثالی عددی بررسی کنید آیا بهتر است که دمای منبع دما بالا را افزایش دهیم

یا دمای منبع دما پایین را به همان مقدار کاهش دهیم؟

۲۲ مخترعی ادعا می کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع های با دمای 300 K و 400 K کار می کنند. داده های هر ماشین

در هر چرخه عبارت اند از :

$$\text{ماشین A} \quad W = -40\text{ J}, \quad Q_L = -175\text{ J}, \quad Q_H = 200\text{ J}$$

$$\text{ماشین B} \quad W = -400\text{ J}, \quad Q_L = -200\text{ J}, \quad Q_H = 500\text{ J}$$

$$\text{ماشین C} \quad W = -400\text{ J}, \quad Q_L = -200\text{ J}, \quad Q_H = 600\text{ J}$$

$$\text{ماشین D} \quad W = -10\text{ J}, \quad Q_L = -90\text{ J}, \quad Q_H = 100\text{ J}$$

با فرض آرمانی بودن این چهار ماشین :

الف) کدام یک از ماشین ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می کنند؟

ب) کدام یک از ماشین ها قابل ساخت هستند؟

۲۳ یک ماشین کارنو بین دماهای 280°K و 360°K کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه 75% گرما از منبع دما بالا می‌گیرد. الف) در هر چرخه $|W|$ چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع دما پایین داده می‌شود؟

۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

۲۴ قرار است نیم ساعت دیگر مهمانی برای شما برسد در حالی که هیچ یخی را برای نوشابه خود آماده نکرده‌اید. به سرعت $1/00\text{ L}$ آب 10°C را در قالب‌های یخ می‌ریزید و در فریزر قرار می‌دهید. آیا در زمانی که مهمان می‌رسد، یخ خواهید داشت؟ ضریب عملکرد یخچال $4/0$ و توان آن 110 W است. (فرض کنید همه توان الکتریکی یخچال صرف سرد کردن و یخ زدن آب می‌شود.)

۲۵ یک کولر گازی در هر دقیقه $10^4 \times 9/0$ گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت $10^5 \times 1/3$ گرما به فضای بیرون می‌دهد. با فرض آرمانی بودن کولر،

الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟

ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

۲۶ فرض کنید 250 g آب صفر درجه سلسیوس در اختیار داریم. می‌خواهیم با قرار دادن این آب در یخچال، یخ تهیه کنیم. یخچال در اتاقی قرار دارد که دمای آن 22°C است. دمای داخل یخچال در 5°C ثابت نگه داشته شده است. کمترین مقدار انرژی الکتریکی که باید به یخچال داده شود تا یخ صفر درجه سلسیوس تشکیل شود، چقدر است؟

واژه نامه

Evaporation	تبخیر سطحی	Rate	آهنگ
Experimental	تجربی	Flow Rate	آهنگ جریان
Estimate	تخمین (برآورد)	Greenhouse Effect	اثر گلخانه‌ای
Compressibility	تراکم پذیری	Significant Figures	ارقام بامعنا
Wetting	ترشوندگی	Cylinder	استوانه (سیلندر)
Sublimation	تصعید	Static Friction	اصطکاک ایستایی
Thermal Equilibrium	تعادل گرمایی	Principle	اصل
Pyrometer	تف سنج	Archimedes' Principle	اصل ارشمیدس
Optical Pyrometer	تف سنج نوری	Bernoulli Principles	اصل برنولی
Turbulent	تلاطم	Expansion	انبساط
Speed	تندی	Volume Expansion	انبساط حجمی
Takeoff Speed	تندی برخاستن	Linear Expansion	انبساط طولی
Average Speed	تندی متوسط	Thermal Expansion	انبساط گرمایی
Power	توان	Freezing	انجماد
Gas Universal Constant	ثابت جهانی گازها	Measurement	اندازه‌گیری
Displacement	جابجایی	Potential Energy	انرژی پتانسیل
Solid	جامد	Gravitational Potential	انرژی پتانسیل گرانشی
Crystalline Solid	جامدهای بلورین	Energy	انرژی
Amorphous Solid	جامدهای بی‌شکل	Elastic Potential Energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Mass	جرم	Kinetic Energy	انرژی جنبشی
Turbulent Flow	جریان تلاطمی	Internal Energy	انرژی درونی
Laminar Flow	جریان لایه‌ای	Contraction	انقباض
Floating Object	جسم شناور	Time Interval	بازه زمانی
Submerged Object	جسم غوطه‌ور	Efficiency	بازده
Earth Atmosphere	جو زمین	Resultant	برایند
Barometer	جو سنج	Vector	بردار
Boiling	جوشیدن	Expansion Joint	بست انبساطی
Cycle	چرخه	Crystalline	بلورین
Otto Cycle	چرخه اُتو	Conservation of Energy	پایستگی انرژی
Viscosity	چسبندگی (وکشیانی)	Diffusion	پخش
Source	چشمه	Physical Phenomena	پدیده‌های فیزیکی
Condensation	چگالش	Plasma	پلازما
Condenser	چگالنده	Piston	پیستون
Density	چگالی	Unit Prefixes	پیشوندهای یکا
Phase	حالت (فاز)	Thermal Radiation	تابش گرمایی
Motion	حرکت	Vaporization	تبخیر

Conversion Factor	ضرب (عامل) تبدیل	Brownian Motion	حرکت براونی
Coefficient of Performance	ضرب عملکرد	Error	خطا
Heat Capacity	ظرفیت گرمایی	Fundamental Knowledge	دانش بنیادی
Insulator	عایق	Accuracy	درستی (صحت)
Uncertainty	عدم قطعیت	Valve	دریچه (سوپاپ)
Nanoscience	علوم نانو	International System Units	دستگاه بین‌المللی یکاها
Quasi-Static Process	فرایند ایستوار	Thermodynamics System	دستگاه ترمودینامیکی
Adiabatic Process	فرایند بی‌دررو	Metric System	دستگاه متریک
Thermodynamics Process	فرایند ترمودینامیکی	Precision	دقت
Throttling Process	فرایند خفقاوشی	Adhesion	دگرچسبی
Isochoric process	فرایند هم‌حجم	Temperature	دما
Isothermal process	فرایند هم‌دما	Thermostat	دماپا
Isobaric process	فرایند هم‌فشار	Thermometer	دماسنج
Pressure	فشار	Thermometer Clinical	دماسنج طبی
Gauge Pressure	فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای)	Maximum – Minimum Thermometer	دماسنج کمینه-بیشینه
Standard Atmospheric Pressure	فشار متعارف جو	Standard Thermometer	دماسنج معیار
Manometer	فشارسنج	Thermograph	دمانگاشت
Technology	فناوری	Dynamics	دینامیک
Spring	فنر	Boiler	دیگ بخار
Rule of Dulong–Petit	قاعدهٔ دولن - پتی	Elementary Particles	ذرات بنیادی
First Law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک	Fusion	ذوب
Second Law of Thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک	Thermal Conduction	رسانش گرمایی
Newtons Laws	قانون‌های نیوتون	Humidity	رطوبت
Work – kinetic Energy Theorem	قضیهٔ کار – انرژی جنبشی	Micrometer	ریزسنج
Carnot Theorem	قضیهٔ کارنو	Light Year	سال نوری
Carat	قیراط	Global Positioning System(GPS)	سامانه مکان‌یابی جهانی
Work	کار	Planetary Nebula	سحابی سیاره‌ای
Surface Tension	کشش سطحی	Velocity	سرعت
Physical Quantity	کمیت‌های فیزیکی	The Fire Syringe	سرنگ آتش‌زنه
Gravitational Work	کار گرانشی	Valve	سوپاپ (دریچه)
Temperature Quantity	کمیت دماسنجی	Fluid	شماره
Macroscopic Quantity	کمیت ماکروسکوپی	Dew	شبنم
Vector Quantities	کمیت‌های برداری	Acceleration	شتاب
Scalar Quantities	کمیت‌های نرده‌ای	Spark Plug	شمع
Caliper	کولیس	Exhaust Stroke	ضربهٔ تخلیه
Galaxy	کهکشان	Compression Stroke	ضربهٔ تراکم
Ideal Gas	گاز آرمانی (کامل)	Power Stroke	ضربهٔ قدرت
Gravitation	گرانش	Intake Stroke	ضربهٔ مکش

Liquefaction	میعان	Heat	گرما
Crank	میل لنگ	Calorimeter	گرماسنج
Nanoparticle	نانو ذره	Bomb Calorimeter	گرماسنج بمبی
Nanolayer	نانو لایه	Latent Heat	گرمای نهان
Nanotechnology	نانوفناوری	Specific Heat	گرمای ویژه
Scalar	نرده ای	Molar Specific Heat	گرمای ویژه مولی
Compression Ratio	نسبت تراکم	Knot	گره (دریایی - هوایی)
Physical Theory	نظریه فیزیکی	Capillary Tube	لوله موین
Freezing Point	نقطه انجماد	Venturi Tube	لوله ونتوری
Boiling Point	نقطه جوش	Steam engine	ماشین بخار
Melting Point	نقطه ذوب	Gasoline Engine	ماشین بنزینی
Triple Point	نقطه سه گانه	Diesel Engine	ماشین دیزل
Abbreviation	نماد	Carnot Engine	ماشین کارنو
Scientific Notation	نمادگذاری علمی	Heat Engine	ماشین گرمایی
Bi-Metal Strip	نوار دوفلزه	External Combustion Engine	ماشین گرمایی برون سوز
Force	نیرو	Internal Combustion	ماشین گرمایی درون سوز
Spring Balance	نیروسنج	Environment	محیط
Repulsive Force	نیروی رانشی	Model	مدل
Attractive Force	نیروی ربایشی	Modeling	مدل سازی
Dissipative Forces	نیروهای اتلافی	Order-of Magnitude	مرتبه بزرگی
Buoyant Force	نیروی شناوری	Explosion Step	مرحله آتش گرفتن
Air (Temperature) Inversion	وارونگی هوا (دما)	Exhaust Step	مرحله تخلیه
Weight	وزن	Exhaust Step	مرحله تخلیه
Cohesion	هم چسبی	Equation of Continuity	معادله پیوستگی
Convection	همرفت	Equation of State	معادله حالت
Forced Convection	همرفت واداشته	Approximate Value	مقدار تقریبی
Unit	یکا	Temperature Scale	مقیاس دماسنجی
Base Units	یکاهای اصلی	Nano-Scale	مقیاس نانو
Derived Units	یکاهای فرعی	High-temperature Reservoir	منبع دما بالا
Refrigerator	یخچال	Low-temperature Reservoir	منبع دما پایین
Astronomical Unit	یکای نجومی	Heat Reservoir	منبع گرما
		Capillarity	موینگی

فهرست منابع

منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, Mc Graw – Hill.
2. Applied Physics, 10th Edition, Dale Ewen, 2012, Prentice Hall.
3. Physics, 4th Edition, James S. Walker, Pearson, 2010.
4. IGCSE Physics, 3th Edition, Tom Duncan, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, First edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
7. Physics, Allen Giambattista, Betty Richardson and Robert Richardson, Second Edition, 2008, McGraw– Hill.
8. Concept in Thermal Physics, first edition, S.J. Blundel and K.M. Blundel, 2006, Oxford University Press.
9. Physics for Scientists and Engineering, Randy Knight, 3th Edition, 2013, Pearson.
10. Physics, Mike Crundell, Cambridge International AS and A Level, 2th Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2th Edition, 2012, Pearson.
12. Heat and Thermodynamics, Mark Zemansky and Richard Dittman, Seventh edition, 1997, Mc Graw – Hill
13. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
14. College Physics, Sears & Zemansky and Hugh D. Young, 9th edition 2012, Addison–Wesely.
15. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9th Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.
16. Contemporary College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
17. Glencoe Physics, Paul W. Zitzewitz, 2000, McGraw– Hill
18. Physics for Scientists and Engineers, Paul Tipler and Gene Morsca, 2008, W.H. Freeman.
19. Science at the Nanoscale, Chin Wee Shong, 2010, Pan Stanford Publishing.
20. Physical Science, Shipman, 13th Edition, 2013, Brooks/Cole.
21. Nanoscale Science: Activities for Grades 6–12, M. Gail Jones, 2007, NSTA Press.
22. Nanotechnology for Dummies, Richard Booker and Earl Boysen, 2005, John Wiley & Sons, Inc.
23. How Things Work, Louis A. Bloomfield, 5th Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.

منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحتی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد اول) مکانیک، گرما و شارها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و یرل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
- ۳- مبانی فیزیک (جلد اول و دوم) ریموند سروی و کریس ووثیل، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات فاطمی.
- ۴- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۱-۱۳۸۷، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۵- دوره درسی فیزیک گ.س.لند سبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
- ۶- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
- ۷- فیزیک تجربی (از مجموعه ۵ جلدی المپیاد فیزیک)، کمیته المپیاد فیزیک ژاپن، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات مدرسه.
- ۸- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس اوہانیان، ترجمه یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۹- فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۱۰- فیزیک پایه، ویراست سوم، فرانک بلت، ترجمه محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۱۱- به علوم نانو خوش آمدید (به همراه DVD)، ویژه دوره آموزش متوسطه، اندرو اس مَدَن و دیگران، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و معصومه قاسمی، چاپ سوم ۱۳۹۵، انتشارات مدرسه.

عکاس شروع فصل اول: آقای محمد یزدی راد

