بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک (۱)

رشتهٔ ریاضی و فیزیک

پایهٔ دهم

دورهٔ دوم متوسطه

۱۳۹۵

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: فیزیک (۱) پایهٔ دهم دورهٔ دوم متوسطه ـ ۱۱۰۲۰۹

پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

مدیریت برنامه‌ریزی درسی وتألیف: 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) ـ سید اکبر میرجعفری و کاظم بهنیا (ویراستار ادبی)

مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

شناسه افزوده آماده‌سازی: لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) ـ مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) ـ محمّد مهدی ذبیحی (طراح جلد) ـ راحله زادفتح‌اله (طراح گرافیک و صفحه‌آرا) ـ فاطمه رئیسیان فیروزآباد، کبری اجابتی، سیف‌الله بیک محمد دلیوند، شاداب ارشادی، زینت بهشتی شیرازی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)

نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir

ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ اوّل ۱۳۹۵

شابک ۵ـ۲۵۳۹ـ۰۵ـ۹۶۴ـ۹۷۸

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.

امام‌خمینی
«قدس‌سرّه‌الشریف»

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 به‌صورت 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.

فهرست

فصل ۱ فیزیک و اندازه‌گیری ۱

۱ـ۱ فیزیک : دانش بنیادی ۲
۱ـ۲ مدل‌سازی در فیزیک ۵
۱ـ۳ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی ۶
۱ـ۴ اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها ۷
۱ـ۵ اندازه‌گیری : خطا و دقت ۱۴
۱ـ۶ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک ۱۹
۱ـ۷ چگالی ۲۲
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۲۵

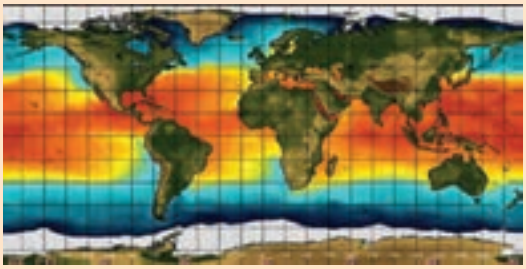
فصل ۲ کار، انرژی و توان ۲۹

۲ـ۱ انرژی جنبشی ۳۰
۲ـ۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت ۳۱
۲ـ۳ کار و انرژی جنبشی ۳۷
۲ـ۴ کار و انرژی پتانسیل ۴۱
۲ـ۵ پایستگی انرژی مکانیکی ۴۷
۲ـ۶ کار و انرژی درونی ۴۹
۲ـ۷ توان ۵۱
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۵۶

فصل ۳ ویژگی‌های فیزیکی مواد ۶۱

۳ـ۱ حالت‌های ماده ۶۲
۳ـ۲ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو ۶۶
۳ـ۳ نیروهای بین‌مولکولی ۶۸
۳ـ۴ فشار در شاره‌ها ۷۲
۳ـ۵ شناوری و اصل ارشمیدس ۸۰
۳ـ۶ شارهٔ در حرکت و اصل برنولی ۸۵
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ..... ۹۰

فصل ۴ دما و گرما ۹۵



۴ـ۱ دما و دماسنجی ۹۶
۴ـ۲ انبساط گرمایی ۹۹
۴ـ۳ گرما ۱۰۸
۴ـ۴ تغییر حالت‌های ماده ۱۱۶
۴ـ۵ روش‌های انتقال گرما ۱۲۵
۴ـ۶ قوانین گازها ۱۳۴
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ ..... ۱۴۱

فصل ۵ ترمودینامیک ۱۴۵

۵ـ۱ معادلهٔ حالت ۱۴۶
۵ـ۲ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار ۱۴۷
۵ـ۳ تبادل انرژی ۱۴۷
۵ـ۴ انرژی درونی و قانون اوّل ترمودینامیک ۱۴۸
۵ـ۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی ۱۵۰
۵ـ۶ چرخهٔ ترمودینامیکی ۱۶۱
۵ـ۷ ماشین‌های گرمایی ۱۶۲
۵ـ۸ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی) ۱۶۹
۵ـ۹ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها ۱۷۱
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵ ..... ۱۷۵

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

الف) سخنی با دانش‌آموزان عزیز

کتاب فیزیک ۱ نخستین کتاب فیزیک در دورهٔ دوم متوسطه است که برای پایه دهم دورهٔ نظری تألیف و چاپ شده است. این کتاب در ادامهٔ تغییر برنامهٔ درسی آموزش علوم تجربی در دورهٔ اول متوسطه است. درس فیزیک برای رشته‌های علوم تجربی و ریاضی و فیزیک در سه پایهٔ دهم، یازدهم و دوازدهم ارائه خواهد شد. برای ارتباط مؤثرتر با برنامهٔ درسی این کتاب و تحقق اهداف آن، توجه به مواردی که در ادامه می‌آید توصیه می‌شود.

مسیر آموزش و یادگیری : دانش‌آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، وقتی شوق‌انگیز و لذت‌بخش است که با تلاش و جدّیت شما برای پیمودن آن همراه شود. پیش از همه، باید به توانایی‌های خود باور و اعتماد داشته باشید. مفاهیمی که در هر سال تحصیلی می‌خوانید، با سطح درک و فهم شما است و برای بهبود و ارتقای زندگی فردی، اجتماعی و حرفه‌ای شما مفیدند. در فرایند آموزش، جدی و پر تلاش باشید و تا جایی که امکان دارد، به طور فعال و باانگیزه 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 شیوه‌های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری ویژهٔ خود را دارید و بهتر است بر همین اساس روشی مناسب برای یادگیری خود بیابید و متناسب با آن برنامه‌ریزی کنید. شاید مهم‌ترین کاری که می‌توانید انجام دهید، آن باشد که برای خود زمان‌های مطالعه با برنامهٔ زمان‌بندی منظم و کافی در محیطی خالی از عامل‌های برهم‌زنندهٔ تمرکز، در نظر بگیرید. روشن است که باید وقت بیشتری را صرف جنبه‌هایی کنید که یادگیری آن برای شما دشوارتر است. اگر با شنیدن و انجام آزمایش مطالب درسی را می‌آموزید، حضور فعال در کلاس‌های درس بسیار مهم است. اگر با توضیح دادن آنها را می‌آموزید، آنگاه علاوه بر حضور فعال در کلاس‌های درس، کار کردن با دانش آموزان دیگر نیز برای شما بسیار راه‌گشا است. اگر حل کردن مسئله برای شما دشوار است وقت بیشتری را صرف یادگیری روش حل مسئله‌ها کنید. با توجه به آنچه گفته شد، اکنون به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :

آیا من توانایی به کاربردن مفهوم های ریاضی را در فیزیک دارم؟ اگر پاسخ شما منفی است، به کتاب‌های ریاضیات پایهٔ هفتم تا دهم خود مراجعه کنید و افزون بر اینها از معلم خودن نیز راهنمایی‌های لازم را بخواهید. آسان‌ترین فعالیت‌ها در فیزیک برای من کدام‌ها بوده‌اند؟ نخست این فعالیت‌ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتمادبه‌نفس در شما کمک می‌کند. آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم، مطلب را بهتر می‌فهمم یا پس از آن؟ آیا زمانی که صرف مطالعهٔ فیزیک می‌کنم کافی است؟ برای من بهترین ساعت روز برای مطالعهٔ 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 می‌کنم؟

کار گروهی : دانشمندان و مهندسان به ندرت در انزوا کار می‌کنند؛ بلکه بیشتر با یکدیگر همکاری دارند. در آموزش مدرسه‌ای نیز اگر با دیگر دوستانتان کار کنید، هم فیزیک بیشتر می‌آموزید و هم از این یادگیری بیشتر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان به این همکاری گروهی و مشارکت در یادگیری در کلاس‌های درس توجه ویژه‌ای دارند.

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

چه موقع فیزیک را فهمیده‌ایم؟ برخی از دانش‌آموزان هنگام خواندن درس فیزیک، خود را در این اندیشه می‌یابند که «من مفهوم‌ها را می‌دانم، اما نمی‌توانم مسئله‌ها را حل کنم.» حال آنکه در فیزیک، درک واقعی یک مفهوم یا اصل، با توانایی در به کار بردن آن اصل در مسئله‌های مختلف مرتبط است. فراگیری چگونگی حل مسئله‌ها اهمیت اساسی دارد؛ شما فیزیک را خوب فرا نگرفته‌اید؛ مگر آن که بتوانید آنچه را فرا گرفته‌اید، در موقعیت‌های مناسب به کار برید.

مسئله‌های فیزیک را چگونه حل کنیم؟ برای حل انواع مختلف مسئله‌های فیزیک به روش‌های متفاوتی نیاز داریم. صرف نظر از نوع مسئله‌ای که در دست دارید، گام‌های 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؛ امّا گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه‌حل مسئله همین مرحله است. در این مرحله باید متغیر هدف مسئله ــ یعنی کمیتی را که سعی در یافتن مقدار آن دارید ــ 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 کنیدکه 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 همهٔ 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 دورهٔ متوسطه دوم، مطابق با برنامهٔ درسی ملّی در چهار عرصه ارتباط با خالق، شناخت خود، خلق و خلقت تعریف شده و در جهت تقویت پنج عنصر تفکر و تعقل، ایمان، علم، عمل و اخلاق پیش خواهد رفت. بر این اساس مهم‌ترین شایستگی‌های مدنظر حوزهٔ 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/ به‌کارگیرد.

• 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 علوم‌تجربی 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 فعالیت ها با حفظ ارزش ها 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 دانش آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درهای درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همهٔ دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز یا بسته کند. بنابراین می‌توان گفت شیوهٔ آموزش کارآمد کلید موفقیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کارگیری شیوه های 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 می داند از اتحادیهٔ دبیران فیزیک ایران و انجمن های 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

فصل ۱ فیزیک و اندازه‌گیری

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

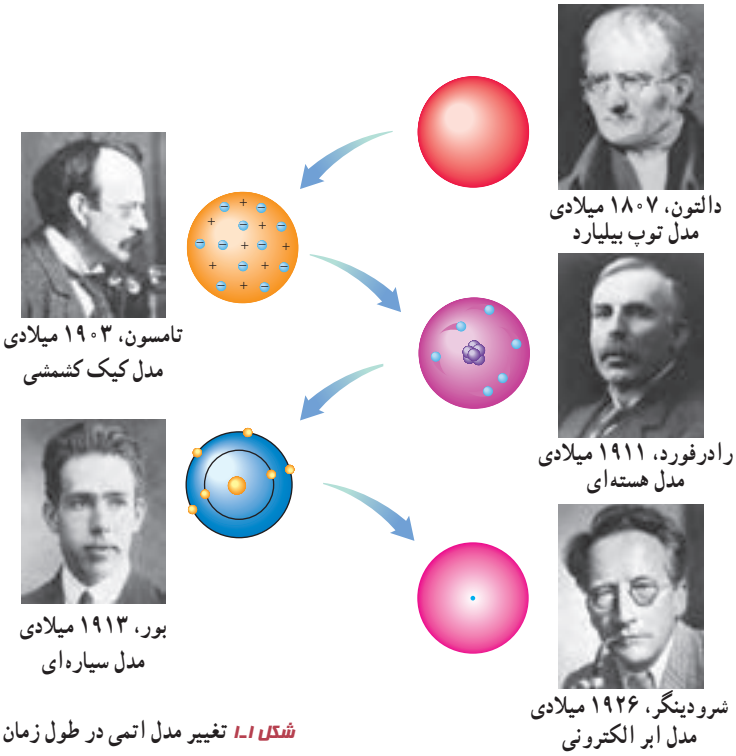
۱ـ۱ فیزیک: دانش بنیادی

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.

مطالعه و یادگیری فیزیک به این دلیل اهمیت دارد که فیزیک یکی از بنیادی‌ترین دانش‌ها و شالودهٔ تمامی مهندسی‌ها و فنّاوری‌هایی 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 مشاهده‌ها و کسب اطلاعات جدید در خصوص رفتار اتم‌ها، بارها اصلاح شد (شکل ۱ـ۱).



شکل ۱ـ۱ تغییر مدل اتمی در طول زمان

ویژگی آزمون‌پذیری و اصلاح نظریه‌های فیزیکی، نقطهٔ قوّت دانش فیزیک است و نقش مهمی در فرایند پیشرفت دانش و تکامل شناخت ما از جهان پیرامون داشته است.

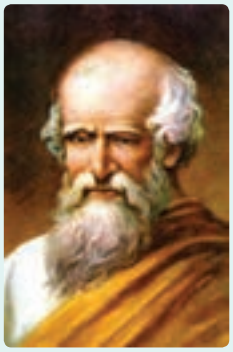
دانشمندان برای بیان قانون‌های فیزیکی، اغلب از گزاره‌های کلی و در عین حال مختصر استفاده می‌کنند. قانون‌های فیزیکی، معمولاً رابطهٔ بین برخی از کمیت‌های فیزیکی را توصیف می‌کنند و در دامنهٔ وسیعی از پدیده‌های گوناگون طبیعت معتبرند (مانند قانون‌های نیوتون که در علوم نهم با آنها آشنا شدید). برای توصیف دامنهٔ 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).

خوب است بدانید

واژهٔ فیزیک، ریشه در یونان باستان دارد و به معنای شناخت طبیعت است. تا آنجا که تاریخ مدون علم نشان می‌دهد، فیلسوفان آسیای صغیر در سدهٔ هفتم قبل از میلاد مسیح نخستین کسانی بودند که پرسش‌هایی دربارهٔ طبیعت مطرح ساختند.

اندیشه‌های علمی این فیلسوفان در سدهٔ 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 هیثم، 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.



ارشمیدس
(۲۸۷ تا ۲۱۲ قبل از میلاد)

ابن هیثم
(۱۰۴۰ــ ۹۶۵م)

ابوریحان بیرونی
(۱۰۴۸ــ ۹۷۳م)

ابوعلی سینا
(۱۰۳۷ــ ۹۸۰م)

خواجه نصیرالدین طوسی
(۱۲۷۴ــ ۱۲۰۱م)

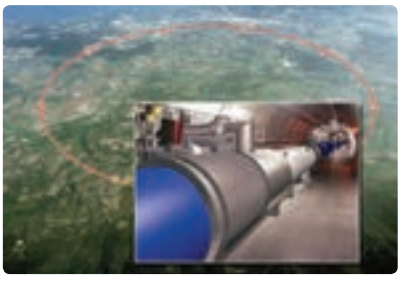
در کتاب‌های تاریخ علم، روایت کرده‌اند که گالیله جسم‌های سبک و سنگین را از بالای برج کج پیزا رها کرد تا دریابد که آیا زمان سقوط آنها یکسان است یا متفاوت. گالیله تشخیص داد که تنها یک بررسی تجربی می‌تواند به این پرسش پاسخ دهد. وی با تعمق زیاد روی نتیجهٔ آزمایش‌های خود، گام بلندی به سوی این اصل برداشت که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

گالیلئو گالیله
(۱۶۴۲ــ ۱۵۶۴م)

برج کج پیزا واقع در فلورانس ایتالیا

فیزیک، پایه و اساس تمامی مهندسی‌ها و فنّاوری‌هاست. هیچ مهندسی نمی‌توانست بدون آنکه نخست قانون‌های اساسی فیزیک را درک کند، یک تلویزیون با صفحهٔ تخت، یک فضاپیمای میان‌سیاره‌ای، یک لامپ کم‌مصرف LED یا حتی یک ابزار ساده طراحی کند. شکل ۱ــ۲ الف تا ج، بخش بسیار کوچکی از دستاوردهای دانش و فنّاوری‌های نوین را نشان می‌دهند که فیزیک، شالودهٔ تمامی آنهاست.

(الف)



(ب)

(پ)

(ت)

(ث)

(ج)

شکل ۱ـ۲ (الف) جُونو (Juno)، کاوشگری که ناسا به سوی مشتری (برجیس)، بزرگ‌ترین سیارهٔ منظومهٔ 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 جوّ مشتری، ویژگی‌های مغناطیسی و گرانشی و همچنین چگونگی شکل‌گیری این سیاره به زمین ارسال می‌کند. (ب) شتاب‌دهندهٔ 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 به‌کارند. بزرگ‌ترین دستاورد این آزمایشگاه تاکنون، کشف ذرهٔ بوزون هیگز است که خبر تأیید آن در تابستان ۱۳۹۱ اعلام شد. (پ) سامانهٔ 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 براساس نظریهٔ نسبیت اینشتین کار می‌کند. (ت) ترابری مگ لِو (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 ۱ـ۱

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

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

۱ـ۲ مدل‌سازی در فیزیک

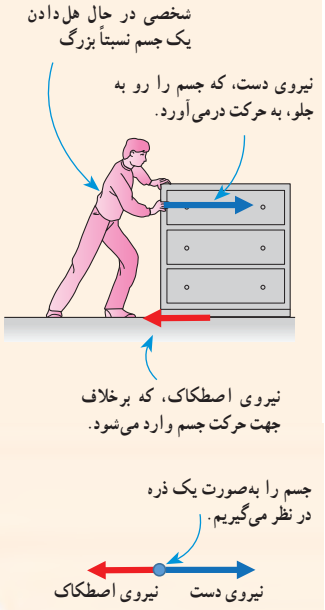
پدیده‌هایی مانند پرتاب توپ، افتادن برگ درخت، تشکیل رنگین‌کمان، آذرخش و ...، ممکن است برای ما عادی شده باشند؛ ولی بررسی و تحلیل آنها در فیزیک معمولاً با پیچیدگی‌هایی همراه است. به همین دلیل فیزیک‌دانان برای بررسی پدیده‌ها، از مدل‌سازی استفاده می‌کنند. مدل‌سازی در فیزیک فرایندی است که طی آن یک پدیدهٔ فیزیکی،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

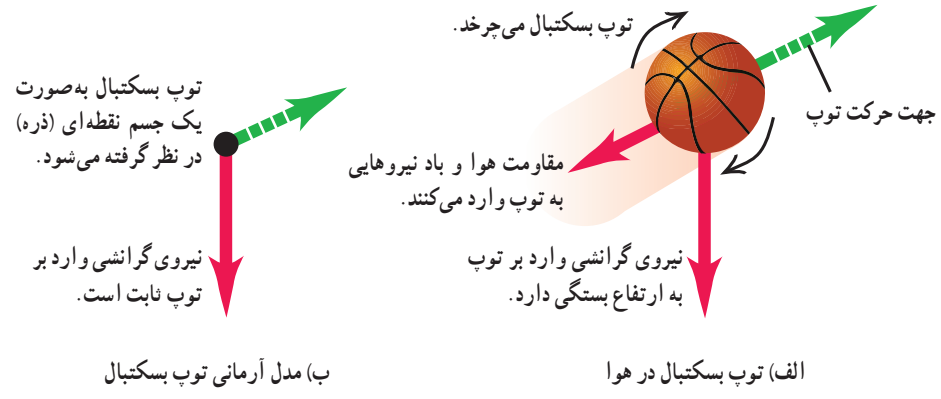
برای شناخت بهتر فرایند مدل‌سازی در فیزیک، فرض کنید بخواهیم حرکت یک توپ پرتاب‌شده را بررسی کنیم (شکل ۱ـ۳ الف). ممکن است در نگاه اول، بررسی و تحلیل حرکت توپ، ساده به نظر برسد، ولی واقعیت برخلاف این است. توپ، یک کرهٔ کامل نیست (درزها و برجستگی‌هایی روی توپ وجود دارد) و در حین حرکت به دور خود می‌چرخد، باد و مقاومت هوا بر حرکت آن اثر می‌گذارند. وزن توپ با تغییر فاصلهٔ 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 به‌طور ساده، امکان‌پذیر سازیم. با چشم پوشیدن از اندازه و شکل توپ، آن را به‌صورت 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 فاصلهٔ توپ از مرکز زمین، وزن آن ثابت می‌ماند (شکل ۱ـ۳ ب). اینک مسئلهٔ ما به قدر کافی ساده شده است و می‌توانیم حرکت آن را بررسی و تحلیل کنیم.

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

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

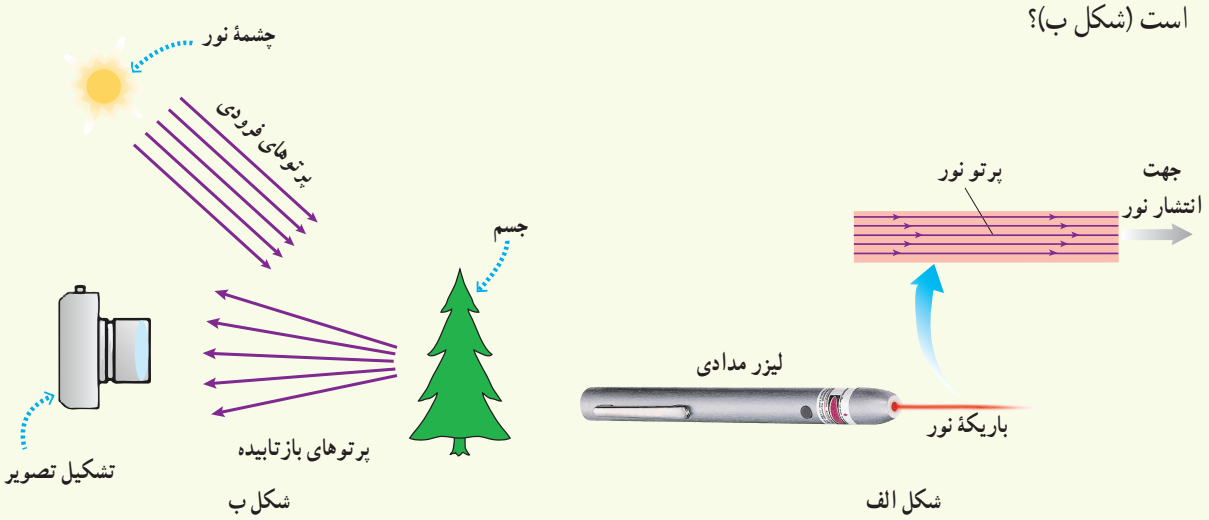




شکل ۱ـ۳ استفاده از یک مدل آرمانی برای ساده‌سازی تحلیل حرکت یک توپ بسکتبال در هوا

پرسش ۱ــ۱

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

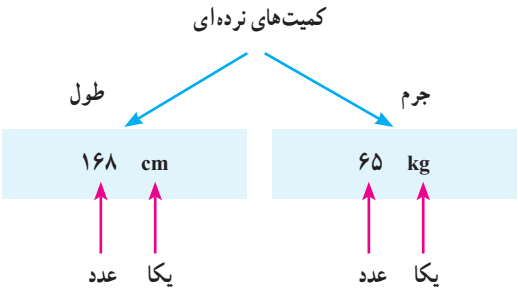


۱ــ۳ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی

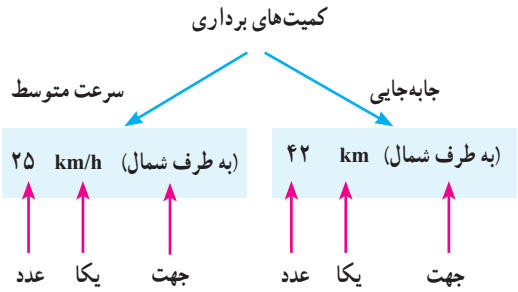
همان‌طور که پیش از این گفتیم فیزیک علمی تجربی است و هدف آن بررسی پدیده‌های فیزیکی در جهان پیرامون است. اساس تجربه و آزمایش، اندازه‌گیری است و برای بیان نتایج اندازه‌گیری، به‌طور معمول از عدد و یکای مناسب آن استفاده می‌کنیم. در فیزیک به هر چیزی که بتوان آن را اندازه گرفت، مانند طول، جرم، تندی، نیرو و زمان سقوط یک جسم، کمیت فیزیکی گفته می‌شود.

برای بیان برخی از کمیت‌های فیزیکی، تنها از یک عدد و یکای مناسب آن استفاده می‌شود. این گونه کمیت‌ها، **کمیت نرده‌ای (اسکالر)** نامیده می‌شوند. برای مثال، وقتی می‌گوییم جرم و طول قد شخصی به ترتیب، ۶۵ kg و ۱۶۸ cm است، از دو کمیت فیزیکی نرده‌ای برای توصیف این شخص استفاده کرده‌ایم (شکل ۱ــ۴).

برای بیان برخی دیگر از کمیت‌های فیزیکی، افزون بر یک عدد و یکای مناسب آن، لازم است به جهت آن نیز اشاره کنیم. این دسته از کمیت‌ها را، **کمیت برداری** می‌نامند. با برخی از این کمیت‌ها مانند جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نیرو در علوم سال نهم آشنا شدید. برای مثال، وقتی می‌گوییم جابه‌جایی دوچرخه‌سواری ۴۲ km به طرف شمال و سرعت متوسط آن ۲۵km/h به طرف شمال است، از دو کمیت برداری برای توصیف حرکت این دوچرخه‌سوار استفاده کرده‌ایم (شکل ۱ــ۵). برای نوشتن کمیت‌های برداری، مانند نیرو $\vec{F}$ و شتاب $\vec{a}$، از علامت پیکان بالای نماد آن کمیت استفاده می‌کنیم. اگر علامت پیکان بالای یک کمیت برداری نیاید، مانند F و a، تنها اندازهٔ آن کمیت برداری (شامل عدد و یکا) بیان شده است.



شکل ۱ــ۴ هر کمیت نرده‌ای را باید با عدد و یکای مناسب آن بیان کنیم. بیان یک کمیت فیزیکی، بدون ذکر یکای آن، معنایی ندارد!



شکل ۱ــ۵ 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!

۱ــ۴ اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها

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 به‌کار 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 ۱ــ۱). یکای این کمیت‌ها را یکاهای اصلی می‌نامند. سایر یکاهای دیگر را که برحسب یکاهای اصلی بیان می‌شوند، یکاهای فرعی می‌نامند.

جدول ۱ــ۱ کمیت‌های اصلی و یکای آنها

کمیت	نام یکا	نماد یکا
طول	متر	m
جرم	کیلوگرم	kg
زمان	ثانیه	s
دما	کِلوین	K
مقدار ماده	مُول	mol
جریان الکتریکی	آمپر	A
شدت روشنایی	کَندِلا (شمع)	cd

تعداد کمیت‌های فیزیکی، آن‌چنان زیاد است که تعیین یکای مستقل برای همهٔ 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 همهٔ 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، آن گاه 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 ۱ــ۲ 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 پرکاربرد فرعی، نامی مخصوص قرار داده‌اند، مثلاً یکای نیرو (kgm/s^2) 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.

جدول ۱ــ۲ چند مثال از یکاهای فرعی که در فصل‌های این کتاب استفاده شده‌اند

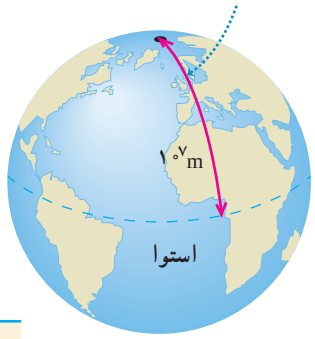
کمیت	یکای SI	یکای فرعی
تندی و سرعت	m/s	m/s
نیرو	نیوتون (N)	$kg\ m/s^2$
فشار	پاسکال (Pa)	kg/ms^2
انرژی	ژول (J)	$kg\ m^2/s^2$
توان	وات (W)	$kg\ m^2/s^3$
گرمای ویژه	J/kg K	$m^2/s^2\ K$

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 زمینهٔ سنجش تشکیل شد و ۱۷ دولت قرارداد *کنوانسیون* متر را امضا کردند. امضاکنندگان تصمیم گرفتند که یک مؤسسهٔ علمی دائمی به نام *دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها* تأسیس کنند. ایران نیز کنوانسیونِ متر را در سال ۱۳۵۴ امضا کرد و به عضویت این دفتر در آمد. مرکز اندازه‌شناسی سازمان ملی استاندارد ایران به‌عنوان نقطهٔ اتصال کشور به دستگاه اندازه‌گیری جهانی، وظیفهٔ ارتباط با این سازمان جهانی را دارد.

۱ــ SI سرحرف عبارت فرانسوی (Systeme International) به‌معنای دستگاه بین‌المللی است.

متر در آغاز به‌صورت یک‌ده‌میلیونیم این فاصله تعریف شد



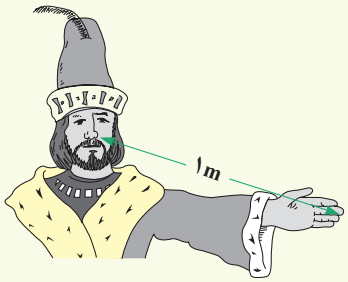
شکل ۱ــ۶ اولین تعریف متر در سال ۱۷۹۱ میلادی

طول : به لحاظ تاریخی، در اواخر قرن هجدهم، یکای طول (متر) به‌صورت یک ده میلیونیم فاصلهٔ استوا تا قطب شمال تعریف شد (شکل ۱ــ۶). تا سال ۱۹۶۰ میلادی، فاصلهٔ میان دو خط نازک حک‌شده در نزدیکی دو سر میله‌ای از جنس پلاتین ــ ایریدیوم، وقتی میله در دمای صفر درجهٔ 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 $\frac{۱}{۲۹۹۷۹۲۴۵۸}$ ثانیه در خلأ طی می‌کند. این تعریف، تخصصی است و برای اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق به‌کار می‌رود[۱]. در جدول ۱ــ۳ مقادیر تقریبی برخی طول‌ها آمده است.

جدول ۱ــ۳ مقادیر تقریبی برخی طول‌های اندازه‌گیری‌شده

جسم	طول (m)	جسم	طول (m)
فاصلهٔ منظومهٔ شمسی تا نزدیک‌ترین کهکشان	$۱۰^{۲۲}$	طول زمین فوتبال	۹×۱۰^{۱}
فاصلهٔ منظومهٔ شمسی تا نزدیک‌ترین ستاره	۴×۱۰^{۱۶}	طول بدن نوعی مگس	۵×۱۰^{-۳}
یک سال نوری	۹×۱۰^{۱۵}	اندازهٔ ذرات کوچک گرد و خاک	۱×۱۰^{-۴}
شعاع مدار میانگین زمین به دور خورشید	$۱/۵۰\times۱۰^{۱۱}$	اندازهٔ سلول‌های بیشتر موجودات زنده	۱×۱۰^{-۵}
فاصلهٔ میانگین ماه از زمین	$۳/۸۴\times۱۰^{۸}$	قطر اتم هیدروژن	۱×۱۰^{-۱۰}
شعاع میانگین زمین	$۶/۴۰\times۱۰^{۶}$	قطر هستهٔ اتم هیدروژن	$۱/۷۵\times۱۰^{-۱۴}$
فاصلهٔ ماهواره‌های مخابراتی از زمین	$۳/۶\times۱۰^{۷}$	قطر پروتون	۱×۱۰^{-۱۵}

پرسش ۱ــ۲



اگر مطابق شکل روبه‌رو، یکای طول را به‌صورت فاصلهٔ نوک بینی تا نوک انگشتان دست کشیده‌شده بگیریم، چه مزایا و چه معایبی دارد؟

فعالیت ۱ــ۲

ذرع و فرسنگ از جمله یکاهای قدیمی ایرانی برای طول است. هر ذرع ۱۰۴ سانتی‌متر و هر فرسنگ ۶۰۰۰ ذرع است[۲]. قشم، بزرگ‌ترین جزیرهٔ خلیج فارس است که مساحت آن از بیش‌از بیست کشور جهان بزرگ‌تر است. طول این جزیره حدود ۱۲۰ کیلومتر برآورد شده است. این طول را بر حسب ذرع و فرسنگ بیان کنید.

۱ــ نیازی به حفظ کردن این تعریف تخصصی نیست.

۲ــ 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 ۱ــ۱

الف) یکای نجومی[۱] برابر میانگین فاصلهٔ زمین تا خورشید است ($1AU \approx 1/50\times10^{11}m$). فاصلهٔ زمین (منظومهٔ 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]. کُوازارها[۳] دورترین اجرام شناخته‌شده از منظومهٔ شمسی هستند و به عبارتی در دورترین محل قابل مشاهدهٔ کیهان قرار دارند. فاصلهٔ کوازارها از منظومهٔ شمسی $1/00\times10^{26}$ متر برآورد شده است. این فاصله را بر حسب سال نوری بیان کنید. تندی نور را در خلأ $3/00\times10^{8}$ متر بر ثانیه بگیرید.

جرم : یکای جرم در SI، کیلوگرم (kg) نامیده می‌شود و به‌صورت جرم استوانه‌ای فلزی از جنس آلیاژ پلاتین ــ ایریدیوم تعریف شده است. جرم این استوانه که به دقت درون دو حباب شیشه‌ای جای گرفته، کیلوگرم استاندارد بین‌المللی است که در موزهٔ سِوْر فرانسه نگه‌داری می‌شود[۴]. نسخه‌های کاملاً مشابهی از این نمونه ساخته و برای کشورهای دیگر ارسال شده است (شکل ۱ــ۷).

در علوم سال هفتم با ابزارهای اندازه‌گیری جرم آشنا شدید. مقادیر تقریبی برخی جرم‌ها در جدول ۱ــ۴ آمده است.

شکل ۱ــ۷ استاندارد ملی کیلوگرم که نسخهٔ دقیقی از استاندارد بین‌المللی سِور فرانسه است. این نمونه، در مرکز اندازه‌شناسی در سازمان ملی استاندارد ایران نگه‌داری می‌شود.

جدول ۱ــ۴ مقادیر تقریبی برخی جرم‌های اندازه‌گیری‌شده

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	$7/34\times10^{22}$	اتم هیدروژن	$1/67\times10^{-27}$
کوسه	1×10^{3}	الکترون	$9/11\times10^{-31}$

فعالیت ۱ــ۳

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

۱ خروار = ۱۰۰ من تبریز

۱ من تبریز = ۴۰ سیر = ۶۴۰ مثقال

۱ مثقال = ۲۴ نخود = ۹۶ گندم

با توجه به اینکه هر مثقال معادل ۴/۸۶ گرم است، هرکدام از این یکاها را برحسب گرم و کیلوگرم بیان کنید.

۱ــ Astronomical Unit ۲ــ light year ۳ــQuasars

۴ــ یک استاندارد اتمی برای جرم می‌توانست بنیادی‌تر باشد ولی در حال حاضر نمی‌توانیم جرم را در مقیاس اتمی با دقتی همانند مقیاس ماکروسکوپی اندازه بگیریم.

زمان : در طول سال‌های ۱۲۶۸ تا ۱۳۴۶هـ.ش، یکای زمان، ثانیه (s) به‌صورت $\frac{۱}{۸۶۴۰۰}$ میانگین روز خورشیدی تعریف می‌شد[۱]. استاندارد کنونی زمان که از سال ۱۳۴۶هـ.ش به‌کار گرفته شد براساس دقت بسیار زیاد ساعت‌های اتمی تعریف شده است که در کتاب‌های پیشرفته‌تر 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 بازهٔ زمانی می‌نامیم. مقادیر تقریبی برخی بازه‌های زمانی در جدول ۱ــ۵ آمده است.

جدول ۱ــ۵ مقادیر تقریبی برخی از بازه‌های زمانی اندازه‌گیری‌شده

بازهٔ زمانی	ثانیه
سن عالم	۵×۱۰^{۱۷}
سن زمین	$۱/۴۳\times۱۰^{۱۷}$
میانگین عمر یک انسان	۲×۱۰^{۹}
یک سال	$۳/۱۵\times۱۰^{۷}$
یک روز	$۸/۶\times۱۰^{۴}$
زمان بین دو ضربان عادی قلب	۸×۱۰^{-۱}

فعالیت ۱ــ۴

در خصوص چگونگی اندازه‌گیری زمان از دوران باستان تا عصر حاضر مطالبی را به‌طور مستند تهیه کنید[۳].

مطالب تهیه‌شده را با توجه به مهارت و علاقه‌مندی افراد گروه خود، به یکی از شکل‌های روزنامهٔ 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 هـ.ش به تصویب رسید. با تصویب این قانون دستگاه متریک به‌عنوان دستگاه رسمی اندازه‌گیری در کشور تعیین شد. اجرای قانون اندازه‌گیری در کشور به عهدهٔ 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، اندازهٔ کمیت را در یک ضریب تبدیل (نسبتی از یکاها که برابر عدد یک است) ضرب می‌کنیم. برای مثال، چون ۱ m برابر ۱۰۰ cm است، داریم :

$$\frac{۱۰۰\,cm}{۱\,m}=۱ \qquad \text{و} \qquad \frac{۱\,m}{۱۰۰\,cm}=۱$$

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

۱ــ یک روز خورشیدی، زمانِ بین ظاهرشدن‌های متوالی خورشید در بالاترین نقطهٔ آسمان در هر روز است.

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

۳ــ 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، به‌صورت زیر به یکای m تبدیل می‌کنیم :

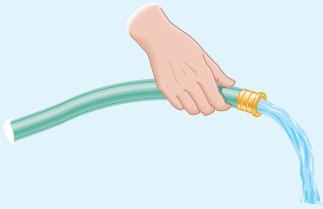
$$۸۵\text{cm} = (۸۵\text{cm})(۱) = (۸۵\,\text{cm})\left(\frac{۱\text{m}}{۱۰۰\,\text{cm}}\right) = ۰/۸۵\text{m}$$

ضریب تبدیل

همچنین در مثالی دیگر، تبدیل یکای کمیت ۳۶km/h را بر حسب یکای m/s به‌صورت زیر انجام می‌دهیم :

$$۳۶\text{km/h} = \left(۳۶\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)(۱)(۱) = \left(۳۶\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)\left(\frac{۱\,\text{h}}{۳۶۰۰\,\text{s}}\right)\left(\frac{۱۰۰۰\,\text{m}}{۱\,\text{km}}\right) = ۱۰\text{m/s}$$

تمرین ۱ــ ۲



در فیزیک، تغییر هر کمیت را نسبت به زمان، معمولاً آهنگ آن کمیت می‌نامیم. از شلنگ شکل روبه‌رو، آب با آهنگ $۱۲۵\,\text{cm}^۳/\text{s}$ خارج می‌شود. این آهنگ را به روش تبدیل زنجیره‌ای، برحسب یکای لیتر بر دقیقه (L/min) بنویسید. (هر لیتر معادل ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب است.)

سازگاری یکاها : هر کمیت فیزیکی را با نماد مشخصی نشان می‌دهیم. برای مثال اندازهٔ 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 اندازهٔ هر کمیت در آن، باید به سازگاری یکاها در دو طرف رابطه توجه کنیم. اگر بخواهیم حاصل دو طرف رابطه برحسب یکاهای SI بیان شود باید یکای کمیت‌های داده شده را نیز به یکاهای SI تبدیل کنیم. برای مثال، اگر جرم جسمی ۳۲۵g و شتاب آن $۱/۷۵\,\text{m/s}^۲$ باشد، برای سازگاری یکاها در دو طرف معادله، باید یکای جرم جسم را به کیلوگرم تبدیل کنیم. در این صورت مقدار حاصل را می‌توان برحسب یکای نیوتون بیان کرد.

$$F = ma = (۰/۳۲۵\,\text{kg})(۱/۷۵\,\text{m/s}^۲) = ۰/۵۶۹\,\text{N}$$

یکای دو طرف معادله با هم سازگار است.
(جدول ۱ــ 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 ۱ــ۶ فهرست شده‌اند. همان‌طور که از ضرایب تبدیل جدول پیداست هر پیشوند، توان معینی از ۱۰ را نشان می‌دهد که به‌صورت یک عامل ضرب به‌کار 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 (۱μm) که به آن میکرون نیز می‌گویند برابر $۱۰^{-۶}\text{m}$ است یا سه مِگاوات (۳/۰۰MW) برابر $۳/۰۰ \times ۱۰^۶\text{W}$ است.

نمادگذاری علمی : در پاره‌ای از اندازه‌گیری‌ها با مقدارهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک سر و 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 به‌صورت 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 محاسبهٔ مقدارهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک ساده‌تر می‌شود.

اندازهٔ هر کمیت فیزیکی، که به‌صورت نمادگذاری علمی بیان می‌شود، باید شامل سه قسمت باشد. قسمت‌های اول و دوم، در برگیرندهٔ حاصل ضرب عددی از ۱ تا ۱۰ در توان صحیحی از ۱۰ است و در قسمت سوم، یکای آن کمیت نوشته می‌شود. برای آشنایی بیشتر با نمادگذاری علمی، به مثال‌های جدول ۱ــ۷ توجه کنید.

جدول ۱ــ۶ پیشوندهای یکاها

ضریب	پیشوند	نماد	ضریب	پیشوند	نماد
10^{24}	یوتا	Y	10^{-24}	یوکتو	y
10^{21}	زِتا	Z	10^{-21}	زِپتو	z
10^{18}	اِگزا	E	10^{-18}	آتو	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}	هِکتو	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.

جدول ۱ــ۷ بیان اندازهٔ چند کمیت به‌صورت نمادگذاری علمی

نمونه	اندازهٔ کمیت (شامل عدد و یکا)	بیان به‌صورت نمادگذاری علمی
حجم بنزین مصرفی در ایران در سال ۱۳۹۴	۲۶ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ L	$2/60 \times 10^{10}$ L
تندی نور در هوا	۳۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ m/s	$3/00 \times 10^{8}$ m/s
طول کل خطوط انتقال نفت خام، گاز و سایر فراورده‌های سوختی در ایران	۳۸ ۹۰۰ ۰۰۰m	$3/89 \times 10^{7}$ m
حجم یک بشکه نفت	۱۵۹L	$1/59 \times 10^{2}$ L
قطر موی انسان	۰/۰۰۰ ۰۰۸ ۰۱ m	$8/01 \times 10^{-6}$ m
قطر اتم هیدروژن	۰/۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۱۰۶ m	$1/06 \times 10^{-10}$ m

مثال ۱ــ۱

مقدار بار الکتریکی الکترون $۱۶۰\times۱۰^{-۱۵}\mu C$ است. مقدار این بار را برحسب کولن و با نمادگذاری علمی بنویسید.

پاسخ : با توجه به جدول ۱ــ۶، پیشوند میکرو (μ) برابر $۱۰^{-۶}$ است. به این ترتیب داریم :

$$۱۶۰\times۱۰^{-۱۵}\ \mu C = ۱۶۰\times۱۰^{-۲۱} C = ۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹} C$$

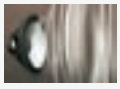
پرسش ۱ــ۳

کدام گزینه جرم یک زنبور عسل (۰/۰۰۰۱۵ kg) را به‌صورت نمادگذاری علمی درست بیان می‌کند؟

☐ $۰/۱۵\times۱۰^{-۳} kg$ ☐ $۱/۵\times۱۰^{-۴} kg$ ☐ $۱۵\times۱۰^{-۵} kg$

تمرین ۱ــ۳

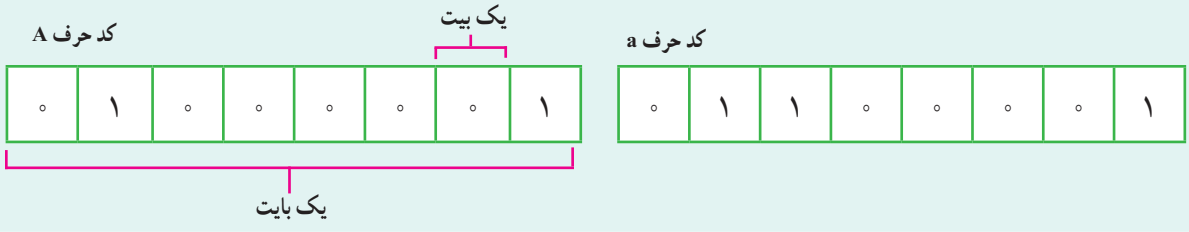
با توجه به پیشوندهای یکاهای SI و نمادگذاری علمی جدول زیر را کامل کنید.

..... μm	..... mm	$۷/۰\times۱۰^{-۶} m$	قطر میانگین یک گلبول (گویچهٔ) قرمز	
..... fm	..... pm	$۱/۷۵\times۱۰^{-۱۴} m$	قطر هستهٔ اتم اورانیوم	
..... mg	..... g	$۱/۰\times۱۰^{-۴} kg$	جرم یک گیرهٔ کاغذ	
..... ns	..... μs	$۱/۰\times۱۰^{-۹} s$	زمانی که نور مسافت ۰/۳ متر را در هوا طی می‌کند.	
..... μs	..... ms	$۱/۰\times۱۰^{-۳} s$	زمانی که صوت مسافت ۰/۳۵ متر را در هوا طی می‌کند.	

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 به‌صورت 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 نشان‌دهندهٔ 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 به‌صورت‌های زیر است :



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

پیشوندهای بزرگ‌تر یکای بنیادی اطلاعات به‌صورت کیلوبیت (kb)، مگابیت (Mb)، گیگابیت (Gb)، ترابیت (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 برحسب پیشوندهایی از بایت (B) اعلام می‌کنند.

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

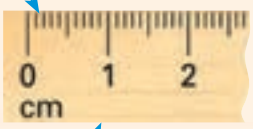
۱ــ۵ اندازه‌گیری: خطا و دقت

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.

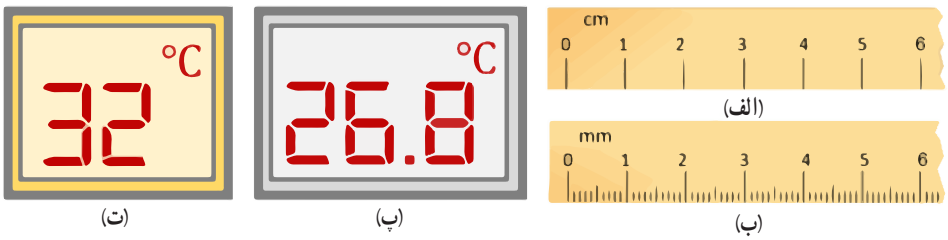
۱ــ دقت و سیلهٔ اندازه‌گیری : یکی از عوامل مهم در دقت اندازه‌گیری، دقت و حساسیت وسیلهٔ اندازه‌گیری است. برای مثال، دقت خط‌کشی که تا میلی‌متر مدرج شده، بیشتر از دقت خط‌کشی است که تا سانتی‌متر درجه‌بندی شده است. بنابر یک قاعدهٔ کلی، خطای اندازه‌گیری توسط خط‌کش و سایر وسیله‌های درجه‌بندی شده، $\pm\frac{1}{2}$ کمینهٔ تقسیم‌بندی مقیاس آن وسیله است و برای وسیله‌های رقمی (دیجیتال) مثبت‌ومنفی یک واحد از آخرین رقمی است که می‌خوانند. به این ترتیب، خطای اندازه‌گیری خط‌کشی که تا سانتی‌متر مدرج شده، برابر $\pm 0/5$cm (شکل ۱ــ۸ الف)، خط‌کشی که تا میلی‌متر درجه‌بندی شده برابر $\pm 0/5$mm (شکل ۱ــ۸ ب)، خطای دماسنج رقمی در شکل ۱ــ۸ پ، که $26/8^{\circ}C$ را می‌خواند برابر $\pm 0/1^{\circ}C$ و خطای دماسنج رقمی شکل ۱ــ۸ ت، که $32^{\circ}C$ را می‌خواند برابر $\pm 1^{\circ}C$ است.

دقت ابزارهای اندازه‌گیری مدرج، برابر کمینهٔ درجه‌بندی آن ابزار است. برای مثال، دقت خط‌کشی که کمینهٔ درجه‌بندی آن مطابق شکل زیر تا میلی‌متر است برابر ۱mm و خطای آن $\pm 0/5$mm است.

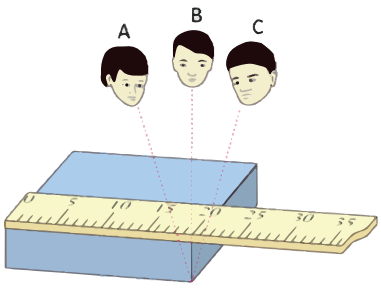
کمینهٔ درجه‌بندی این خط‌کش، ۱mm است.



دقت این خط‌کش ۱mm و خطای اندازه‌گیری توسط آن $\pm 0/5$mm است.



شکل ۱ــ۸ خطای اندازه‌گیری (الف) با خط‌کش سانتی‌متری برابر $\pm 0/5$ cm، (ب) با خط‌کش میلی‌متری برابر $\pm 0/5$ mm، (پ) و (ت) با دماسنج‌های رقمی به‌ترتیب برابر $\pm 0/1^{\circ}C$ و $\pm 1^{\circ}C$ است.



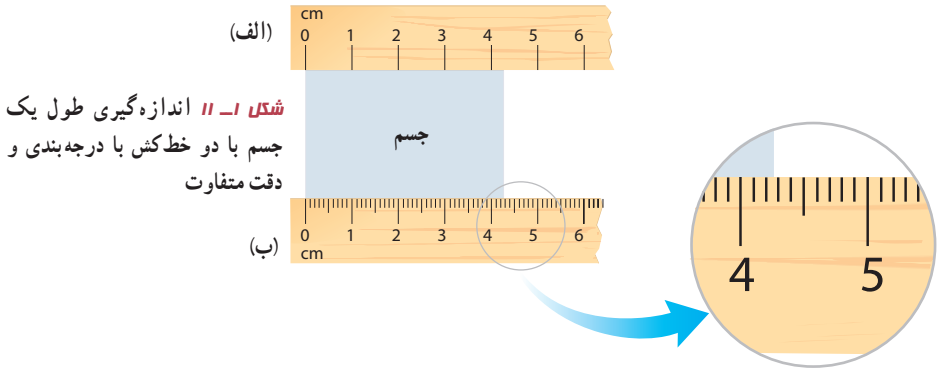
شکل ۱ــ ۹ خطای مشاهده، ناشی از اختلاف منظر، در خواندن و گزارش نتیجهٔ اندازه‌گیری تأثیر مهمی دارد.

۲ــ مهارت شخص آزمایشگر : یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار روی دقت اندازه‌گیری، مهارت‌های شخص آزمایشگر است. یکی از این مهارت‌ها، نحوهٔ خواندن نتیجهٔ اندازه‌گیری است. شکل ۱ــ۹ تأثیر اختلاف منظر در خواندن نتیجهٔ اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. خواندن نتیجهٔ اندازه‌گیری از منظرهای A و C خطا را افزایش می‌دهد در حالی که گزارش شخصی که از منظر B نتیجهٔ اندازه‌گیری را می‌خواند دقت بیشتری دارد.

۳ــ تعداد دفعات اندازه‌گیری : برای کاهش خطا در اندازه‌گیری هر کمیت، معمولاً اندازه‌گیری آن را چند بار تکرار می‌کنند. میانگین عددهای حاصل از اندازه‌گیری به‌عنوان نتیجهٔ 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 ۱ــ۱۰).

شکل ۱ــ۱۰ نتایج اندازه‌گیری شده حول اندازهٔ واقعی. هر نشانهٔ قرمز رنگ، نشان‌دهندهٔ نتیجهٔ یک اندازه‌گیری است.

رقم‌های بامعنا و گزارش نتیجهٔ 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 ۱ــ۱۱).



شکل ۱ــ ۱۱ اندازه‌گیری طول یک جسم با دو خط‌کش با درجه‌بندی و دقت متفاوت

خط‌کش شکل ۱ــ۱۱ الف، برحسب سانتی‌متر مدرج شده است و خطای اندازه‌گیری آن ۰/۵ ± سانتی‌متر است. به نظر شما خط‌کش الف چه طولی را نشان می‌دهد؟ ۴/۲ یا ۴/۳ 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 نتیجهٔ اندازه‌گیری شامل دو رقم بامعناست و آخرین رقم سمت راست، حدسی یا غیرقطعی است. به این ترتیب، نتیجهٔ اندازه‌گیری به‌صورت زیر ثبت و گزارش می‌شود :

$۴/۳\,\text{cm} \pm ۰/۵\,\text{cm}$ (رقم حدسی و غیرقطعی) یا $۴/۲\,\text{cm} \pm ۰/۵\,\text{cm}$ (خطای وسیلهٔ اندازه‌گیری) (دو رقم بامعنا)

دقت اندازه‌گیری در ابزارهای رقمی (دیجیتال)، برابر یک واحد از آخرین رقمی است که آن ابزار می‌خواند. برای مثال، آخرین رقمی که دماسنج شکل زیر نشان می‌دهد $۰/۶\,^\circ\text{C}$ و دقت آن $۰/۱\,^\circ\text{C}$ است.

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

$(۲۲/۶ \pm ۰/۱)\,^\circ\text{C}$

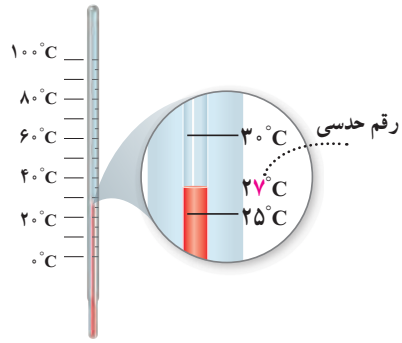
اندازه‌گیری طول جسم را با خط‌کش دیگری که تا میلی‌متر مدرج شده است انجام می‌دهیم. به نظر شما خط‌کش ب، چه طولی را نشان می‌دهد؟ ۴۲/۷ یا ۴۲/۸ میلی‌متر؟ از آنجا که خط‌کش شکل ۱ــ۱۱ب، برحسب میلی‌متر مدرج شده است، لذا عددهای ۷ و ۸ قطعی نیستند و آنها را حدس می‌زنیم. در این حالت نتیجهٔ اندازه‌گیری با سه رقم بامعنا بیان شده است و آخرین رقم سمت راست، حدسی یا غیرقطعی است. به این ترتیب، نتیجهٔ اندازه‌گیری به‌صورت زیر ثبت و گزارش می‌شود :

$۴۲/۸\ \text{mm} \pm ۰/۵\ \text{mm}$ — رقم حدسی و غیرقطعی

$\pm ۰/۵\ \text{mm}$ — خطای وسیلهٔ اندازه‌گیری

$۴۲/۷\ \text{mm}$ — سه رقم با معنا

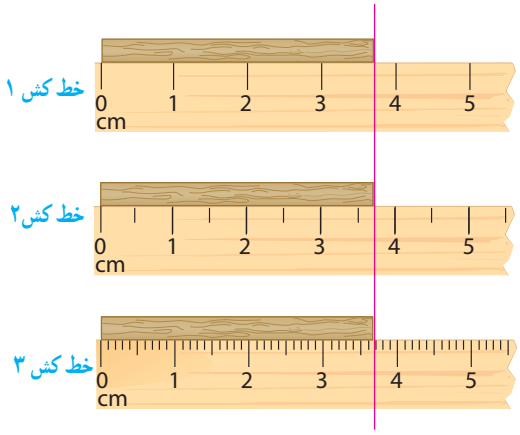
باید توجه کنید که این موضوع در سایر وسیله‌های اندازه‌گیری درجه‌بندی شده نیز صدق می‌کند و آخرین رقم سمت راست حاصل از اندازه‌گیری، همواره حدسی و غیرقطعی است (شکل ۱ــ۱۲). در ابزارهای اندازه‌گیری با نمایشگر رقمی (دیجیتال) آخرین رقم سمت راست نتیجهٔ اندازه‌گیری، اگرچه ما آن را حدس نمی‌زنیم و توسط دستگاه گزارش می‌شود، ولی غیرقطعی و مشکوک است. برای مثال، رقم ۸ در دمایی که دماسنج شکل ۱ــ۸ پ می‌خواند $۲۶/۸ \pm ۰/۱^{\circ}\text{C}$، غیرقطعی و مشکوک است.



شکل ۱ــ۱۲ اندازه‌گیری دما با دماسنج

مثال ۱ــ۲

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



پاسخ :

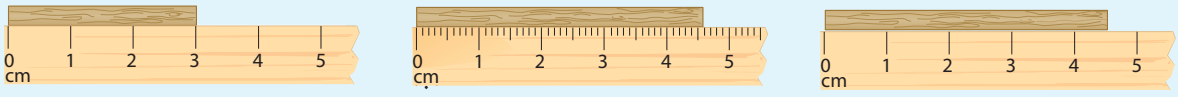
خط‌کش ۱ : کمینهٔ درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۱cm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۱cm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش به صورت ۰/۵cm± بیان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجهٔ اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را ۳/۷cm ± ۰/۵cm بیان کرد.

خط‌کش ۲ : کمینه درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۰/۵cm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۰/۵cm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش به صورت ۰/۲۵cm± بیان می‌شود که باید به صورت ۰/۳cm± گِرد شود. بنابراین می‌توان نتیجهٔ اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را ۳/۷cm ± ۰/۳cm بیان کرد. اگر نتیجهٔ اندازه‌گیری را به صورت ۳/۷cm ± ۰/۲۵cm بیان کنید هر چند از نظر ریاضیات مشکلی ندارد ولی از نظر محاسبه‌های فیزیکی نادرست است.

خط‌کش ۳ : کمینهٔ درجه‌بندی این خط‌کش، برابر ۱mm و در نتیجه دقت آن نیز برابر ۱mm است. مطابق قاعده‌ای که اشاره کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش، ۰/۵mm± یا ۰/۰۵cm± است. بنابراین می‌توان نتیجهٔ اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را ۳/۶۸cm ± ۰/۰۵cm یا ۳۶/۸mm ± ۰/۵mm بیان کرد.

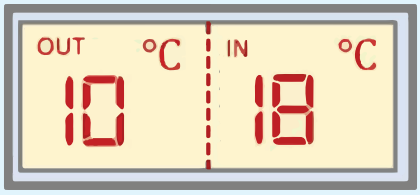
تمرین ۱ــ ۴

۱ــ 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.



(الف) (ب) (پ)

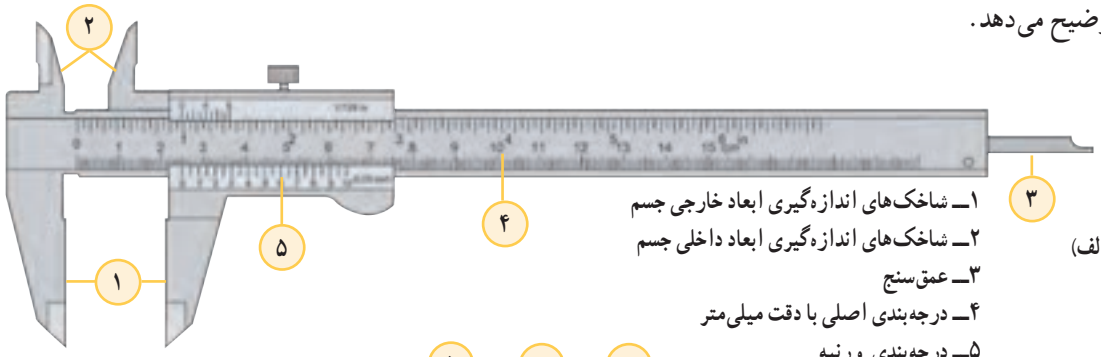
۲ــ شکل روبه‌رو یک دماسنج رقمی را نشان می‌دهد که دمای خارج و داخل گلخانه‌ای را به ترتیب $10^{\circ}C$ و $18^{\circ}C$ می‌خواند. عدد غیرقطعی و خطای دماسنج را مشخص کنید.



۳ــ نتیجهٔ اندازه‌گیری توسط دماسنج شکل ۱ــ۱۲ را به همراه خطای آن بنویسید.

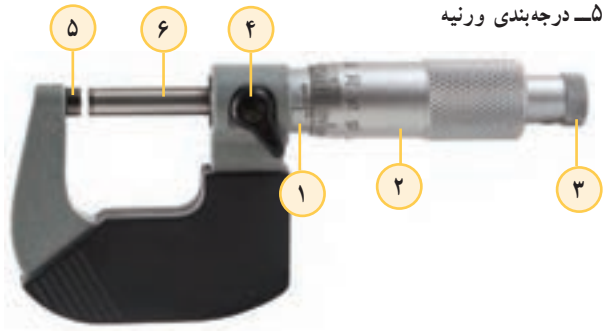
فعالیت ۱ــ ۵

در بسیاری از کارگاه‌های صنعتی مانند تراشکاری‌ها، اندازه‌گیری طول با ابزارهای دقیق‌تر از خط‌کش میلی‌متری انجام می‌شود. این ابزارها، کولیس و ریزسنج نام دارند که اجزای اصلی آنها در شکل‌های الف و ب نشان داده شده است. اگر کمینهٔ تقسیم‌بندی یک کولیس ۰/۱mm باشد در این صورت نتیجهٔ نهایی یک اندازه‌گیری نوعی با این کولیس، به‌صورت ۵/۶۰mm ± ۰/۰۵mm بیان می‌شود. اگر کمینه تقسیم‌بندی کولیسی ۰/۰۵mm باشد (شکل الف) در این صورت خطای اندازه‌گیری توسط این کولیس ۰/۰۲۵mm± است که باید به‌صورت ۰/۰۳mm± گرد شود. به این ترتیب نتیجه یک اندازه‌گیری نوعی با این کولیس، به‌صورت ۴/۳۰mm ± ۰/۰۳mm بیان می‌شود. همچنین کمینهٔ تقسیم‌بندی ریزسنج‌هایی که در اغلب آزمایشگاه‌ها وجود دارد ۰/۰۱mm است (شکل ب) و نتیجهٔ نهایی یک اندازه‌گیری نوعی را می‌توان به‌صورت ۱/۶۳۸mm ± ۰/۰۰۵mm ثبت و گزارش کرد. در گروه خود، چند جسم متفاوت انتخاب کنید. ابعاد مختلف این اجسام را به کمک کولیس و ریزسنج اندازه‌گیری کنید. نحوهٔ کارکردن با کولیس و ریزسنج را معلم به شما توضیح می‌دهد.



(الف)

۱ــ شاخک‌های اندازه‌گیری ابعاد خارجی جسم
۲ــ شاخک‌های اندازه‌گیری ابعاد داخلی جسم
۳ــ عمق‌سنج
۴ــ درجه‌بندی اصلی با دقت میلی‌متر
۵ــ درجه‌بندی ورنیه



(ب)

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

فعالیت ۱ــ 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 خط‌کش میلی‌متری بتوان قطر این سیم یا نخ را اندازه‌گیری کرد.

خوب است بدانید

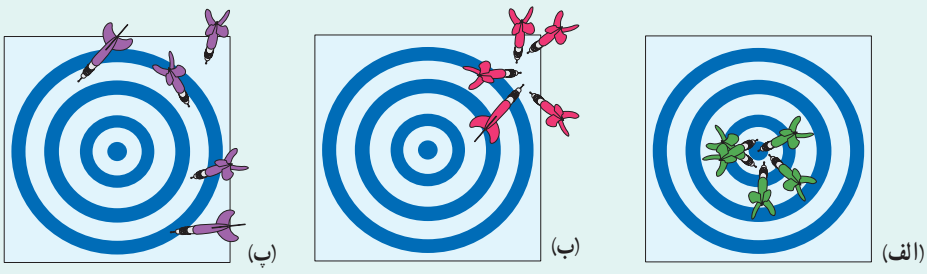
محاسبه‌های جبری با رقم‌های بامعنا : هنگامی که عددها در هم ضرب یا بر هم تقسیم می‌شوند تعداد رقم‌های بامعنا در نتیجهٔ محاسبه نمی‌تواند بیشتر از تعداد رقم‌های بامعنای عددی باشد که کمترین رقم بامعنا را دارد. مثلاً حاصل عبارت ۷/۱۲×۲/۹۲۳×۳/۱۴۱۵ هر چند برابر ۶۵/۳۸۰۱۴۴۰۴ می‌شود، ولی باید با سه رقم بامعنا، یعنی ۶۵/۴ بیان شود. در جمع یا تفریق عددها آنچه اهمیت دارد محل ممیز است و نه تعداد رقم‌های بامعنا. برای نمونه، حاصل عبارت ۴/۸+۲۴۵/۴۱ باید به‌صورت ۲۵۰/۲ بیان شود. اگر نتیجه به‌صورت ۲۵۰/۲۱ بیان شود نادرست است. همچنین حاصل عبارت ۲۱/۴۳۵۶ــ۴۱/۳۴۲+۱۲/۰ باید به‌صورت ۳۱/۹ بیان شود.

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

قاعده	مثال
تمام عددهای غیر صفر بامعنا هستند.	۷۸۸/۶ چهار رقم بامعنا دارد.
تمام صفرهایی که بین اعداد غیرصفر قرار دارند بامعنا هستند.	۴۰۸ سه رقم بامعنا دارد.
صفرهایی که در طرف چپ اعداد قرار دارند، بامعنا نیستند.	۰/۰۰۰۹۰۷ سه رقم بامعنا دارد.

صفرهایی که در طرف راست اعداد قرار دارند می‌توانند بامعنا باشند یا نباشند. برای مثال، اگر طول میله‌ای ۲۳۰mm گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا ممکن است دو یا سه رقم باشد. اگر نتیجهٔ اندازه‌گیری با نمادگذاری علمی، به‌صورت $۲/۳ \times ۱۰^{۲}\text{mm} = ۲۳۰\text{mm}$ نوشته شود، دارای دو رقم بامعنا و اگر به‌صورت $۲/۳۰ \times ۱۰^{۲}\text{mm} = ۲۳۰\text{mm}$ 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 ۱۰ :۳۵ :۱۷ 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 عقربهٔ 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.



۱ــ۶ تخمین مرتبهٔ بزرگی در فیزیک

آیا تاکنون از خود پرسیده‌اید که چگونه می‌توان تعداد کهکشان‌ها و ستارگان کیهان، جرم آب اقیانوس‌ها، جرم جوّ 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 روزمرهٔ خود به‌کار 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، تخمینِ مرتبهٔ بزرگی نامیده می‌شود. عبارت مرتبهٔ بزرگی، اغلب برای ارجاع به توان‌های ۱۰ به‌کار می‌رود، زیرا نتیجه نیز به‌صورت توانی از ۱۰ بیان می‌شود. لازم است توجه شود که در حل مسئله‌ها به روش تخمین مرتبهٔ بزرگی، برخی اوقات ممکن است مرتبهٔ بزرگی پاسخ، با پاسخ واقعی مسئله، یک یا دو مرتبهٔ بزرگی متفاوت باشد. در تخمین مرتبهٔ بزرگی، ابتدا همهٔ اعداد به‌صورت نمادگذاری علمی ($x\times10^{n}$) نوشته می‌شوند و آنگاه از قاعدهٔ زیر استفاده می‌کنیم :

اگر $1\le x<5$ باشد در این‌صورت : $x\sim10^{0}$	اگر $5\le x<10$ باشد در این‌صورت : $x\sim10^{1}$

برای گرد کردن اعداد در فرایند تخمین مرتبه بزرگی، با توجه به قاعده‌ای که گفته شد مطابق مثال‌های زیر عمل می‌کنیم :

$۱۳۶ = 1/36\times10^{2} \sim 10^{2}$

این عدد کوچک‌تر از ۵ است و به‌صورت 10^{0} گِرد می‌شود.

$92137 = 9/2137\times10^{4} \sim 10^{5}$

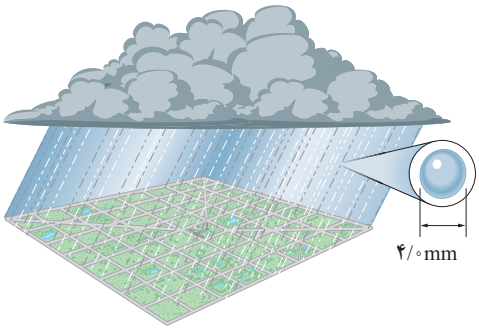
این عدد بزرگ‌تر از ۵ است و به‌صورت 10^{1} گِرد می‌شود.

$0/000499 = 4/99\times10^{-4} \sim 10^{-4}$

این عدد کوچک‌تر از ۵ است و به‌صورت 10^{0} گِرد می‌شود.

مثال ۱ــ ۳

شهر رشت با مساحتی حدود ۱۸۰ کیلومتر مربع در زمینی مسطح و هموار در شمال ایران واقع است. در یک روز طوفانی حدود ۱۰/۰ میلی‌متر باران در این شهر باریده است. مرتبهٔ 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 :

$$A = ۱۸۰ \times ۱۰^{۶}\,m^{۲} = ۱/۸ \times ۱۰^{۸}\,m^{۲} \sim ۱۰^{۸} m^{۲}$$

$$d = ۱۰/۰\,mm = ۱۰^{-۲}\,m$$

به این ترتیب حجم باران باریده شده برابر است با :

$$V_{۱} = Ad \sim (۱۰^{۸} m^{۲})(۱۰^{-۲} m) = ۱۰^{۶} m^{۳}$$

اگر هر قطرهٔ باران را به‌صورت کُره‌ای به قطر ۴/۰ mm فرض کنیم (شکل روبه‌رو)، در این صورت حجم هر قطرهٔ باران برابر است با :

$$V_{۲} = \frac{۴}{۳}\pi r^{۳} = \frac{۴}{۳}\pi (۲/۰ \times ۱۰^{-۳}\,m)^{۳} \sim ۱۰^{-۸} m^{۳}$$

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

$$\frac{V_{۱}}{V_{۲}} \sim \frac{۱۰^{۶}\,m^{۳}}{۱۰^{-۸}\,m^{۳}} = ۱۰^{۱۴}$$

مثال ۱ــ ۴

تخمین بزنید که قلب یک نفر در طول عمرش چند لیتر خون را به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند. قلب در هر ضربان (beat) به‌طور میانگین $۷۰\,cm^{۳}$ 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 ۱ــ۵، قلب یک شخص سالم در هر ۰/۸ s یک بار خون را به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند که با توجه به تخمین مرتبهٔ بزرگی، مقدار آن را بر حسب توانی از ۱۰ به‌صورت $۱۰^{۰}\,s$ گرد می‌کنیم.
- طول عمر میانگین انسان‌ها حدود ۷۵ سال (۷۵ year) است که به‌صورت $۱۰^{۲}\,year$ گرد می‌کنیم.
- هر لیتر (L) برابر با $۱۰^{۳}\,cm^{۳}$ است.
- از جدول ۱ــ۴ داریم هر سال تقریباً برابر ۳×۱۰^{۷} ثانیه است. با توجه به تخمین مرتبهٔ بزرگی و برحسب توانی از ۱۰، یک سال را به‌صورت $۱۰^{۷}$ ثانیه گرد می‌کنیم.

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

$$N \sim (۱۰^{۲}\,year)\left(\frac{۱۰^{۷}\,s}{۱\,year}\right)\left(\frac{۱۰^{۰}\,beat}{۱\,s}\right) = ۱۰^{۹}\,beat$$

با توجه به فرض مسئله، مقدار خونی که در هر ضربان به سرخرگ آئورت پمپ می‌شود را به صورت $۱۰^{۲}\,cm^{۳}$ گرد می‌کنیم. بنابراین، حجم خون پمپ شده (V) به سرخرگ آئورت برابر است با :

$$V \sim (۱۰^{۹}\,beat)\left(\frac{۱۰^{۲}\,cm^{۳}}{beat}\right)\left(\frac{۱\,L}{۱۰^{۳}\,cm^{۳}}\right) = ۱۰^{۸}\,L$$

مثال ۱ــ۵

جوّ زمین که ضخامت آن به مقیاس رسم نشده است.

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

فشار جو را در تمام نقاط سطح زمین $۱۰^{۵}$ فرض کنید.

پاسخ : برای برآورد مرتبهٔ بزرگی جرم جوّ زمین، از رابطهٔ $P = F/A$ که در علوم سال نهم با آن آشنا شدید استفاده می‌کنیم. در این رابطه، به جای F، وزن جوّ زمین (mg) و به جای A، مساحت سطح زمین $(۴\pi R^{۲})$ را قرار می‌دهیم. همچنین از جدول ۱ــ۳ می‌دانیم شعاع تقریبی زمین $R = ۶/۴\times ۱۰^{۶}\,\mathrm{m}$ است. به این ترتیب داریم :

(تخمین مرتبهٔ بزرگی مساحت سطح زمین) $A = ۴\pi R^{۲} \simeq ۱۳(۶/۴\times ۱۰^{۶}\,\mathrm{m})^{۲} \sim ۱۰^{۱۵}\,\mathrm{m}^{۲}$

(تخمین مرتبهٔ بزرگی وزن کل جوّ زمین) $P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = PA \Rightarrow F \sim (۱۰^{۵}\,\mathrm{Pa})(۱۰^{۱۵}\,\mathrm{m}^{۲}) \Rightarrow F \sim ۱۰^{۲۰}\,\mathrm{N}$

(تخمین مرتبهٔ بزرگی جرم کل جوّ زمین) $mg \sim ۱۰^{۲۰}\,\mathrm{N} \Rightarrow m \sim ۱۰^{۱۹}\,\mathrm{kg}$

تمرین ۱ــ۵

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 به‌دست 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 به‌صورت 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 (۱۹۵۴ــ۱۹۰۱ 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 جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ میلادی را برای این کار دریافت کرد. وی همچنین برای توانایی و علاقه‌اش در طرح و حلّ مسئله‌های تخمینی (از مرتبهٔ بزرگی) مشهور است. به همین جهت در برخی کتاب‌ها، به این گونه مسئله‌ها، مسئله‌های فرمی می‌گویند.

۱ــ۷ چگالی

چگالی هر ماده یکی از ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌رود که کاربردهای گوناگونی دارد. برای مثال با توجه به دستورالعمل موسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چگالی شیرخام تحویلی در کارخانه‌های شیر و لبنیات باید در دمای ۱۵ درجهٔ سلسیوس بین ۱۰۲۹ تا ۱۰۳۲ کیلوگرم بر متر مکعب باشد.

در علوم سال هفتم دیدید که اگر مادهٔ همگنی دارای جرم m و حجم V باشد، چگالی ρ آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۱ــ۱)$$

یکای چگالی در SI کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) است. در جدول ۱ــ۸ چگالی برخی مواد داده شده است.

جدول ۱ــ۸ چگالی برخی مواد متداول

ماده	ρ (kg/m^3)	ماده	ρ (kg/m^3)
یخ	$۰/۹۱۷ \times ۱۰^3$	آب	$۱/۰۰ \times ۱۰^3$
آلومینیم	$۲/۷۰ \times ۱۰^3$	گلیسیرین	$۱/۲۶ \times ۱۰^3$
آهن	$۷/۸۶ \times ۱۰^3$	اتیل الکل	$۰/۸۰۶ \times ۱۰^3$
مس	$۸/۹۲ \times ۱۰^3$	بنزن	$۰/۸۷۹ \times ۱۰^3$
نقره	$۱۰/۵ \times ۱۰^3$	جیوه	$۱۳/۶ \times ۱۰^3$
سرب	$۱۱/۳ \times ۱۰^3$	هوا	۱/۲۹
اورانیم	$۱۹/۱ \times ۱۰^3$	هلیم	$۱/۷۹ \times ۱۰^{-1}$
طلا	$۱۹/۳ \times ۱۰^3$	اکسیژن	۱/۴۳
پلاتین	$۲۱/۴ \times ۱۰^3$	هیدروژن	$۸/۹۹ \times ۱۰^{-2}$

داده‌های این جدول در دمای صفر درجه ($0^\circ C$) سلسیوس و فشار یک اتمسفر اندازه‌گیری و گزارش شده‌اند.

تمرین ۱ــ۶

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

$$۱ g/cm^3 = ۱۰۰۰ kg/m^3$$

پرسش ۱ــ۴

چگالی بنزین $۶/۸۰ \times ۱۰^2 kg/m^3$ است. توضیح دهید چرا آب مایع مناسبی برای خاموش‌کردن بنزین شعله‌ور نیست.

مثال ۱ــ۶

فلز اُسمیم ($\rho = ۲۲/۵ \times ۱۰^3 kg/m^3$) یکی از چگال‌ترین مواد یافت شده روی زمین است. جرم قطعه‌ای از این ماده به حجم $۲۳/۰ cm^3$، چند کیلوگرم است؟

پاسخ : از رابطهٔ ۱ــ۱ داریم :

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V = (۲۲/۵ \times ۱۰^3 kg/m^3) \times (۲۳/۰ \times ۱۰^{-6} m^3) = ۰/۵۱۸ kg$$

این نتیجه نشان می‌دهد که اگر قطعه‌ای مکعبی، به اندازهٔ یک قوطی کبریت، از این فلز داشته باشیم، در این صورت جرم آن کمی بیشتر از نیم کیلوگرم خواهد بود.

تمرین ۱ـ۷

حجم خون در گردش یک فرد بالغ با توجه به جرمش، می‌تواند بین ۴/۷۰L تا ۵/۵۰L باشد. جرم ۴/۷۰L خون چند کیلوگرم است؟ چگالی خون را $1/05 g/cm^3$ بگیرید.

تمرین ۱ـ۸

جرم و وزن تقریبی هوای درون کلاستان را پیدا کنید.

فعالیت ۱ـ۷

(ب) (الف)

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

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

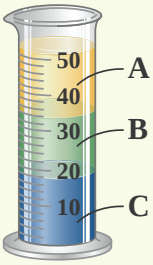
فعالیت ۱ـ۸

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 ۱ـ۵

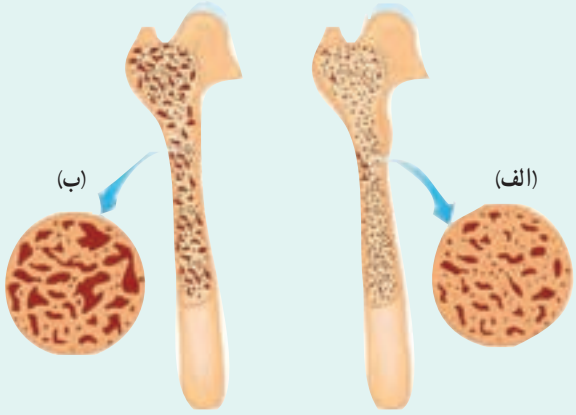


سه مایع مخلوط‌نشدنی A، B و C که چگالی‌های متفاوتی دارند درون استوانه‌ای شیشه‌ای ریخته شده‌اند. این سه مایع عبارت‌اند از: جیوه (با چگالی $13/6\times10^3 kg/m^3$)، روغن زیتون (با چگالی $9/20\times10^2 kg/m^3$) و آب (با چگالی $1/00\times10^3 kg/m^3$) است. جنس هر یک از مایع‌های A، B و C درون استوانه را مشخص کنید.

خوب است بدانید

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 چگالی‌سنجی 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.



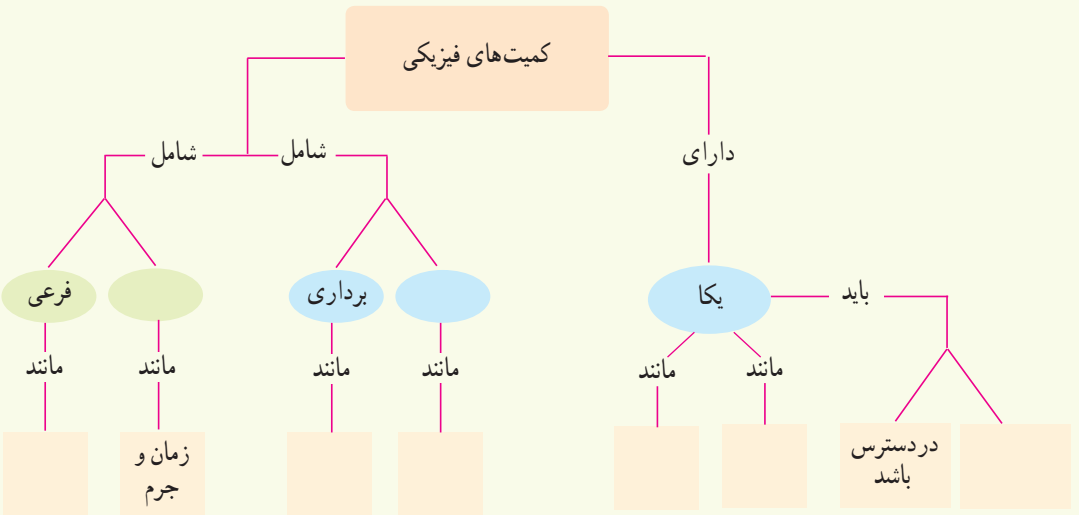
۱ـ۱ و ۱ـ۲ فیزیک: دانش بنیادی و مدل‌سازی در فیزیک

۱ در چه صورت یک مدل یا نظریهٔ فیزیکی بازنگری می‌شود؟

۲ فرایند مدل‌سازی در فیزیک را با ذکر یک مثال توضیح دهید.

۱ـ۳ و ۱ـ۴ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی و اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها

۳ نقشهٔ 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 خط‌کش 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 گالیله در برخی از کارهایش از ضربان نبض خود به‌عنوان زمان‌سنج استفاده کرد. شما نیز چند پدیدهٔ تکرارشونده در طبیعت را نام ببرید که می‌توانند به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری زمان به‌کار روند.

۷ الف) هر میکروقرن، تقریباً چند دقیقه است؟

ب) یک میلیارد ثانیهٔ 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 کرهٔ 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 خزانهٔ 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 هِسپِرویُوکا است که در مدت ۱۴ روز، ۳/۷ متر رشد می‌کند (شکل روبه‌رو). آهنگ رشد این گیاه برحسب میکرومتر بر ثانیه چقدر است؟

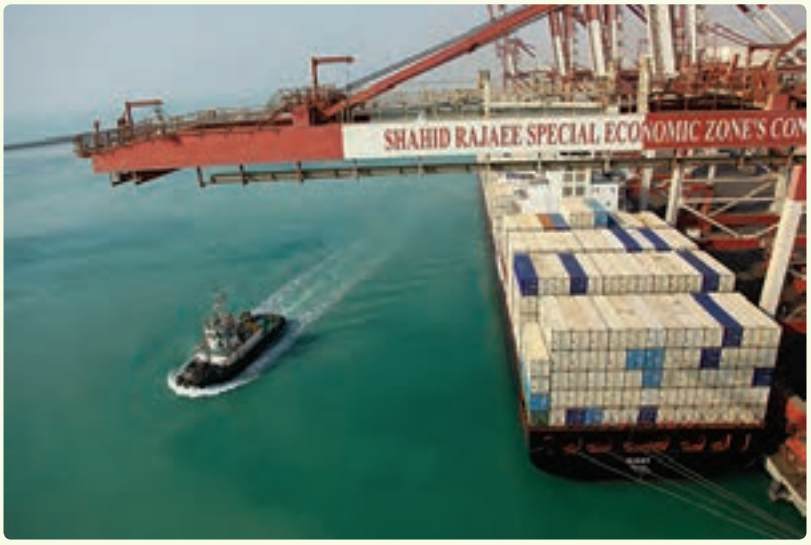
۱۱ دستگاه بریتانیایی یکاها، دستگاهی است که در برخی از کشورها مانند آمریکا و انگلستان همچنان استفاده می‌شود. یکای اصلی طول در این دستگاه پا (فُوت) و یکای کوچک‌تر آن اینچ است به‌طوری که $1\,ft = 12\,in$ است. ارتفاع هواپیمایی را که در فاصلهٔ ۳۰۰۰۰ پا از سطح آزاد دریاها در حال پرواز است برحسب متر به‌دست آورید. هر اینچ ۲/۵۴۰ سانتی‌متر است.

۱۲ قدیمی‌ترین سنگ‌نوشتهٔ حقوق بشر که تاکنون یافت شده است به حدود ۲۵۵۰ سال پیش باز می‌گردد که به فرمان کورش، پادشاه ایران در دورهٔ هخامنشیان نوشته شده است. مرتبهٔ 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 ۰/۵۱۴۴ متر بر ثانیه است. تاریخچهٔ 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 معیّن شمرده می‌شد و تندی متوسط کشتی را به‌دست می‌آوردند. پس از آن، ملوان‌ها از واژهٔ «گره» برای بیان تندی متوسط کشتی استفاده می‌کنند.

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

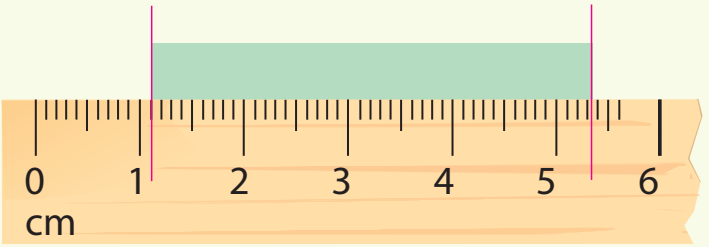
ب) مایل، یکی دیگر از یکاهای متداول طول در دستگاه بریتانیایی است. یک مایل دریایی برابر ۱۸۵۲ متر است[۱]. تندی کشتی قسمت (الف) را بر حسب مایل بر ساعت به دست آورید.



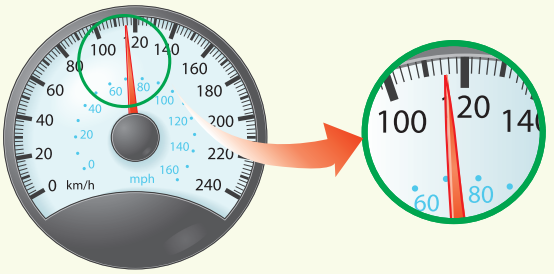
۱ــ هر مایل در خشکی ۱۶۰۹ متر است.

۱ــ۵ 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، صفحهٔ تندی‌سنج[1] 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.

(الف)

(ب)

۱ــ۶ تخمین مرتبهٔ بزرگی در فیزیک

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

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

۱۸ مرتبهٔ بزرگی جرم آب اقیانوس‌ها را تخمین بزنید.

۱ــ Speedometer

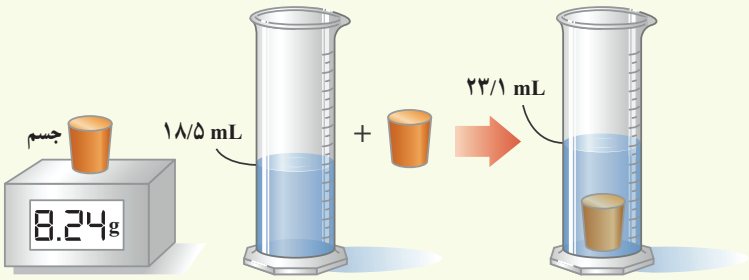
۱ـ۷ چگالی

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 $۱/۵۷۳\times۱۰^{۴}\,cm^{۳}$ و جرم $۲۵۰/۰\,kg$ توسط یک شرکت ژاپنی ساخته شده است (شکل روبه‌رو). چگالی این شمش طلا را به‌دست آورید.

پ) نتیجهٔ به‌دست آمده در قسمت (ب) را با چگالی طلا در جدول ۱ـ۸ 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 برحسب g/L و $g/cm^{۳}$ حساب کنید.



ترازوی رقمی

۲۱ الف) ستاره‌های کوتولهٔ سفید بسیار چگال هستند و چگالی آنها در SI حدود ۱۰۰ میلیون است. اگر شما یک قوطی کبریت از مادهٔ تشکیل‌دهندهٔ این ستاره‌ها در اختیار داشتید، جرم آن چند کیلوگرم می‌شد؟ ابعاد و حجم قوطی کبریت را خودتان تخمین بزنید!

ب) اگر جمعیت کرهٔ زمین ۷ میلیارد نفر، جرم میانگین هر نفر ۶۰ کیلوگرم و مادهٔ تشکیل‌دهندهٔ انسان‌ها از جنس ستاره‌های کوتولهٔ سفید فرض شود (فرضی ناممکن!)، ابعاد یک اتاق چقدر باشد تا همهٔ انسان‌ها در آن جای گیرند؟

فصل ۲

کار، انرژی و توان

خانم زهرا نعمتی، نخستین بانوی ایرانیِ برندهٔ 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 روزمرهٔ 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 به‌شکل 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 قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی خواهیم پرداخت. در ادامهٔ فصل، رابطهٔ 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.

۲ـ۱ انرژی جنبشی

شکل ۲ـ۱ جسم در حال حرکت، انرژی جنبشی دارد.

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 ۲ـ۱). همچنین دیدید هر چه جسمی تندتر حرکت کند، انرژی جنبشی بیشتری دارد و هنگامی‌که جسم ساکن باشد، انرژی جنبشی آن صفر است.

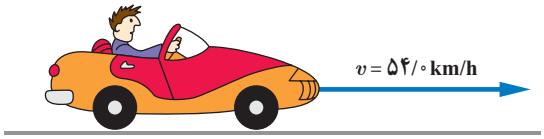
برای جسمی‌به جرم m که با تندی v حرکت می‌کند، انرژی جنبشی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$K = \frac{۱}{۲}mv^{۲} \qquad (۱ـ۲)$$

یکاهای SI جرم و تندی به ترتیب کیلوگرم (kg) و متربرثانیه (m/s) است. بنابراین، یکای SI انرژی جنبشی (و هر نوع دیگری از انرژی) $kgm^{۲}/s^{۲}$ است که به افتخار جیمز ژول، فیزیک‌دان انگلیسی، ژول (J) نامیده می‌شود. انرژی جنبشی کمیتی نرده‌ای و همواره مثبت است؛ این کمیت تنها به جرم و تندی جسم بستگی دارد و به جهت حرکت جسم وابسته نیست.

مثال ۲ـ۱

جرم خودرویی به همراه راننده‌اش $۸/۴۰ \times ۱۰^{۲}kg$ است. این خودرو با تندی $۵۴/۰km/h$ در حرکت است، انرژی جنبشی آن چند ژول است؟



پاسخ : با توجه به اطلاعات داده شده داریم :

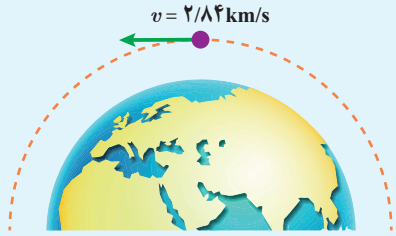
$$m = ۸/۴۰\times۱۰^{۲}kg \quad , \quad v = ۵۴/۰km/h = (۵۴/۰\frac{km}{h})(\frac{۱۰۰۰m}{۱km})(\frac{۱h}{۳۶۰۰s}) = ۱۵/۰m/s$$

با جایگذاری این مقادیر در رابطهٔ ۲ـ۱ داریم :

$$K = \frac{۱}{۲}mv^{۲} = \frac{۱}{۲}(۸/۴۰\times۱۰^{۲}kg)(۱۵/۰m/s)^{۲} = ۹/۴۵\times۱۰^{۴}J$$

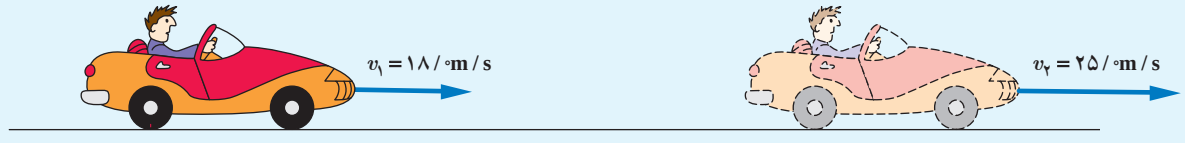
تمرین ۲ـ۱

ماهواره‌ای به جرم ۲۲۴kg، با تندی ثابت ۲/۸۴km/s دور زمین می‌چرخد. انرژی جنبشی ماهواره را برحسب ژول و مگاژول حساب کنید.



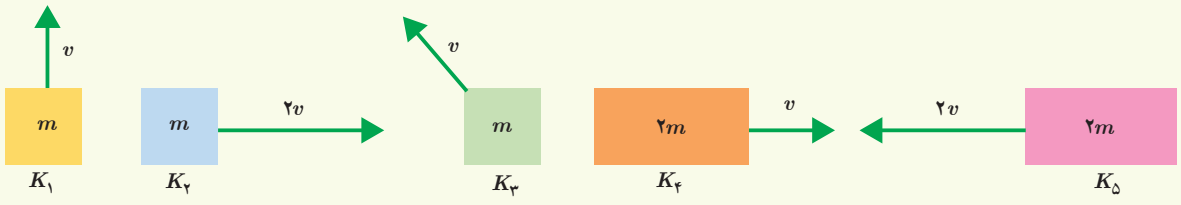
تمرین ۲ـ۲

جرم خودرویی به همراه راننده‌اش $۸/۴۰ \times ۱۰^{۲}kg$ است (شکل زیر). تندی خودرو در دو نقطه از مسیرش روی شکل زیر داده شده است. تغییرات انرژی جنبشی خودرو ($\Delta K = K_{۲} - K_{۱}$) را بین این دو نقطه حساب کنید.



پرسش ۲ــ۱

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

لایب‌نیتس (۱۷۱۶ــ ۱۶۴۶م)

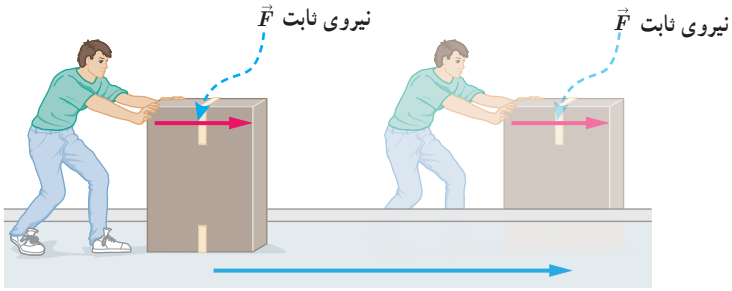
لایب نیتس فیلسوف و ریاضی‌دان آلمانی نخستین دانشمندی بود که به اهمیت انرژی جنبشی در فیزیک پی برد. لایب نیتس استدلال می‌کرد که در طبیعت حاصل ضرب جرم در مربع تندی پایسته است. وی نام این مفهوم جدید را نیروی زنده نامید[۱].

سال‌ها پیش از لایب نیتس، رنه دکارت (۱۶۵۰ــ۱۵۹۶م)، فیلسوف، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان فرانسوی ادعا کرده بود حاصل ضرب جرم در سرعت که امروزه تکانه نامیده می‌شود، در طبیعت کمیتی پایسته است.

معرفی واژهٔ انرژی به جای اصطلاح نیروی زنده را به توماس یانگ (۱۸۲۹ــ۱۷۷۳م) فیزیک‌دان انگلیسی نسبت داده‌اند، 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 واژهٔ انرژی استفاده شود. در سال ۱۸۶۷ میلادی، لُرد کِلوین و پیتر تیت دو فیزیک‌دان اسکاتلندی در جلد اول *رسالهٔ فلسفهٔ 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.

۲ــ۲ 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 جابه‌جایی جسم در یک جهت باشد (شکل ۲ــ۲)، به صورت رابطهٔ زیر آشنا شدید :



شکل ۲ــ۲ نیروی ثابت $\vec{F}$ که با جابه جایی $\vec{d}$ هم جهت است، کار $W = Fd$ را انجام می‌دهد.

جسم در جهت نیرو، به اندازهٔ d جابه‌جا شده است.

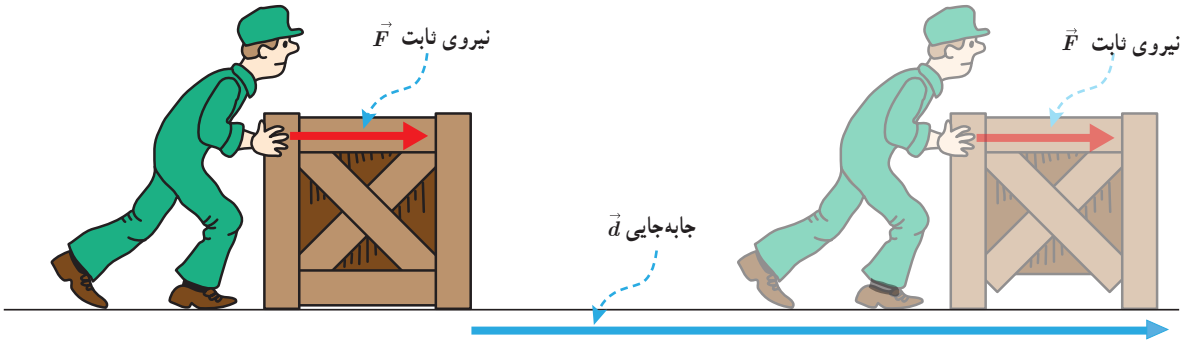
$$W = Fd \qquad (۲ــ۲)$$

۱ – vis viva (living force)

در این رابطه F اندازهٔ نیروی وارد بر جسم و d اندازهٔ جابه‌جایی آن است. کار، همان یکای انرژی را دارد و کمیتی نرده‌ای است. برای استفاده از این رابطه به منظور محاسبهٔ کار باید به دو نکته توجه کرد. اول آنکه، نیروی ثابت وارد بر جسم، باید با جابه‌جایی آن هم‌جهت باشد و دوم آنکه، باید بتوان جسم را مانند یک ذره فرض کرد (بخش مدل‌سازی را در فصل اول ببینید).

مثال ۲ــ۲

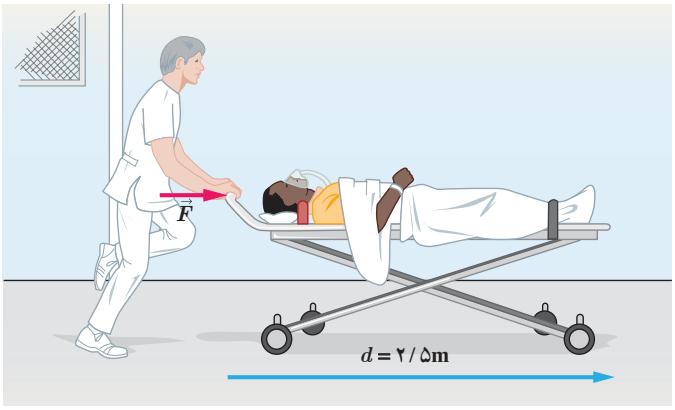
شکل زیر کارگری را در حال هُل دادن جعبه‌ای با نیروی ثابت ۲۲۵N نشان می‌دهد. اگر جعبه ۱۴/۰m در امتداد نیرو جابه‌جا شود، کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟



پاسخ : اندازهٔ نیروی وارد شده به جعبه، ثابت و با جابه‌جایی جعبه هم جهت است. بنابراین، از رابطهٔ ۲ــ۲ داریم :

$$W = Fd = (۲۲۵\text{N})(۱۴/۰\text{m}) = ۳/۱۵ \times ۱۰^{۳}\text{J}$$

مثال ۲ــ۳



بیماری به جرم ۷۲kg روی تختی به جرم ۱۵kg دراز کشیده است. پرستاری این تخت را با نیروی ثابت و افقی $\vec{F}$ روی سطحی هموار و با اصطکاک ناچیز هُل می‌دهد. مجموعهٔ تخت و بیمار با شتاب ۰/۶۰m/s^{۲} حرکت می‌کند.

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

ب) اگر تخت ۲/۵m در جهت این نیرو جابه‌جا شود، کار انجام شده توسط نیروی $\vec{F}$ را حساب کنید.

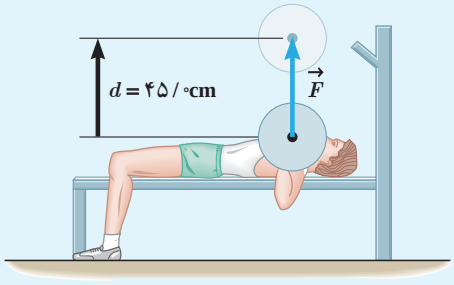
پاسخ : الف) جرم کل بیمار و تخت برابر ۸۷kg است. با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم :

$$F = ma = (۸۷\text{kg})(۰/۶۰\text{m/s}^{۲}) = ۵۲\text{N}$$

ب) چون نیرو و جابه‌جایی در یک جهت‌اند، با استفاده از رابطهٔ (۲ــ۲) کار نیروی F برابر است با :

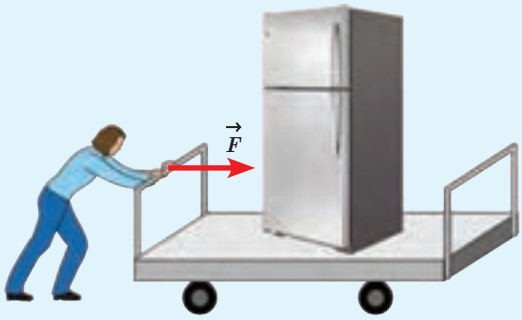
$$W = Fd = (۵۲\text{N})(۲/۵\text{m}) = ۱/۳ \times ۱۰^{۲}\text{J}$$

تمرین ۲ ـ ۳



ورزشکاری وزنه‌ای به جرم $۶۸/۰\text{kg}$ را به طور یکنواخت، $۴۵/۰\text{cm}$ بالای سر خود می‌برد (شکل روبه رو). کاری که این ورزشکار روی وزنه انجام داده است را محاسبه کنید. اندازهٔ شتاب گرانش زمین را $g = ۹/۸۱\text{N/kg}$ بگیرید.

تمرین ۲ ـ ۴



شکل روبه‌رو شخصی را در حال هُل دادن یک گاری حمل بار روی سطحی هموار و بدون اصطکاک با نیرویی به بزرگی $F = ۶۶/۰\text{N}$ نشان می‌دهد. اگر گاری $۱۸/۴\text{m}$ در جهت نیرو جابه جا شود، کاری را که شخص روی گاری انجام می‌دهد چقدر است؟

مهارت‌های ریاضی (یادآوری از ریاضی سال‌های هشتم و دهم)

در ریاضی سال هشتم با تجزیهٔ یک بردار روی محورهای x و y و نوشتن مؤلفه‌های آن بر حسب بردارهای یکهٔ $\vec{i}$ 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 :

$$\vec{R} = R_x\,\vec{i} + R_y\,\vec{j} \qquad (۱)$$

همچنین در ریاضی سال دهم دیدید که در یک مثلث قائم الزاویه، مانند مثلث OAB در شکل بالا، توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس را برای زاویه ای مانند θ به صورت زیر تعریف می کنند :

$$\cos\theta = \frac{OB}{OA} \quad \text{و} \quad \sin\theta = \frac{AB}{OA} \qquad (۲)$$

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

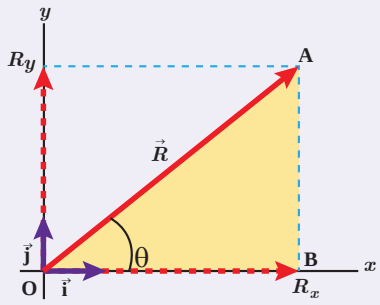
$$AB = R_y \quad \text{و} \quad OB = R_x \quad \text{و} \quad OA = R$$

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

$$R_y = R\sin\theta \quad \text{و} \quad R_x = R\cos\theta \qquad (۳)$$

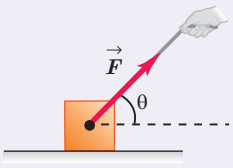
با جایگذاری رابطه‌های (۳) در رابطهٔ (۱) می‌توان یک بردار را برحسب توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس نوشت. به این ترتیب داریم :

$$\vec{R} = R\cos\theta\,\vec{i} + R\sin\theta\,\vec{j} \qquad (۴)$$



مقادیر سینوس و کسینوس به ازای چند زاویهٔ پرکاربرد

θ	sinθ	cosθ
۰°	۰	۱
۳۰°	$\frac{۱}{۲}$	$\frac{\sqrt{۳}}{۲}$
۴۵°	$\frac{\sqrt{۲}}{۲}$	$\frac{\sqrt{۲}}{۲}$
۶۰°	$\frac{\sqrt{۳}}{۲}$	$\frac{۱}{۲}$
۹۰°	۱	۰
۱۸۰°	۰	−۱

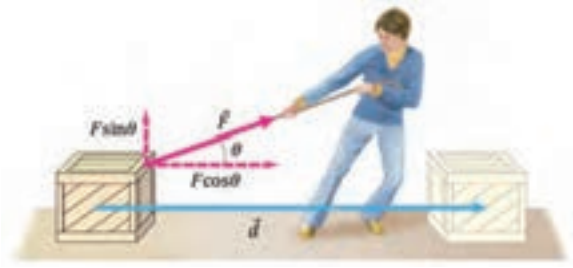


برای مثال وقتی جسمی‌را مطابق شکل روبه رو با نیروی $\vec{F}$ می کشیم، مؤلفهٔ افقی این نیرو $F\cos\theta$ و مؤلفهٔ قائم آن $F\sin\theta$ است که در آن F اندازهٔ نیروی $\vec{F}$ است. همچنین با توجه به رابطهٔ ۴ می‌توان نوشت :

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

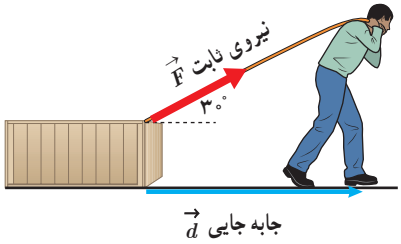
همان‌طور که تا اینجا دیدید، تعریف کار بر اساس رابطهٔ ۲ــ۲ تنها برای حلّ مسئله‌هایی به‌کار می‌رود که نیرو و جابه‌جایی در یک جهت باشند. اگر مطابق شکل ۲ــ۳ نیروی وارد شده به جسم با جابه‌جایی زاویهٔ θ بسازد، در این حالت نیروی $\vec{F}$ دارای دو مؤلفه است؛ یکی موازی با جابه‌جایی و دیگری عمود بر آن. همان‌طور که از علوم هفتم نیز به یاد دارید، مؤلفه‌ای از نیرو که بر جابه‌جایی عمود است ($F\sin\theta$) کاری روی جسم انجام نمی‌دهد. کار انجام شده روی جسم تنها ناشی از مؤلفه‌ای از نیرو است که در راستای جابه‌جایی است ($F\cos\theta$). در این حالت، کاری که نیروی ثابت $\vec{F}$ به ازای جابه‌جایی $\vec{d}$ روی جسم انجام می‌دهد از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$W = (F\cos\theta)d \qquad (۲ــ۳)$$



شکل ۲ــ۳ نیروی ثابت $\vec{F}$ با جابه‌جایی $\vec{d}$ زاویهٔ θ می‌سازد و کار $W = (F\cos\theta)d$ را روی جسم انجام می‌دهد.

مثال ۲ــ۴



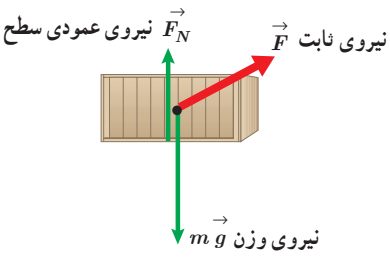
شکل روبه‌رو شخصی را نشان می‌دهد که جعبه‌ای را با نیروی ثابت ۱۹۵N روی سطحی هموار و با اصطکاک ناچیز، به اندازهٔ ۴/۲۰m جابه‌جا می‌کند.

الف) کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟

ب) نیروهای دیگری را که بر جسم وارد می‌شود مشخص کنید. کاری را که هر کدام از این نیروها روی جسم انجام می‌دهند حساب کنید.

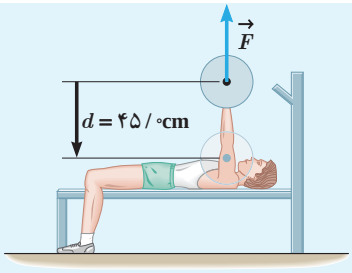
پاسخ : الف) با جایگذاری اطلاعات داده شده و $\cos\theta = \cos ۳۰^\circ = \frac{\sqrt{۳}}{۲}$ در رابطهٔ ۲ــ۳ داریم :

$$W = (F\cos\theta)d = (۱۹۵\text{N} \times \frac{\sqrt{۳}}{۲})(۴/۲۰\text{m}) = ۷۰۹\text{J}$$



ب) نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر جابه‌جایی عمودند (شکل روبه‌رو) و کاری روی جسم انجام نمی‌دهند. (توجه کنید که : $\cos\theta = \cos ۹۰^\circ = ۰$)

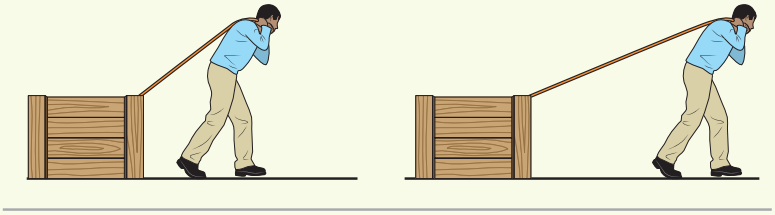
تمرین ۲ــ۵



تمرین ۲ــ۳ 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 ۲ــ۲

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

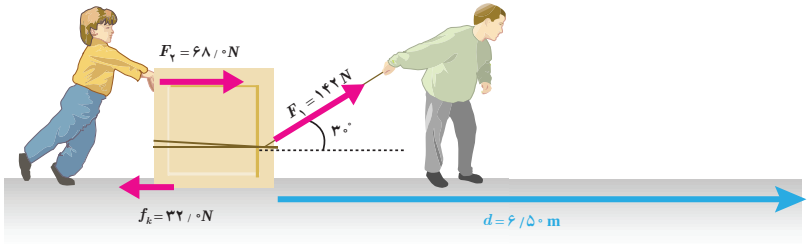


(ب) (الف)

کار کل : اگر به جای یک نیرو، چند نیرو بر جسمی‌وارد شود، کار را چگونه باید محاسبه کنیم؟ یک روش آن است که با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۳ ، کار انجام شده توسط هر نیرو را به طور جداگانه محاسبه کنیم. سپس با جمع جبری کار انجام شده توسط تک‌تک نیروها کار کل (W_t) را بیابیم[۱]. روش دیگر یافتن کار کل آن است که ابتدا مؤلفهٔ در امتداد جابه‌جایی را برای هر نیرو مشخص می‌کنیم. آن‌گاه با توجه به جهت این مؤلفه‌ها، اندازهٔ نیروی خالص را، که در امتداد بردار جابه جایی است، به دست می‌آوریم. سرانجام، اندازهٔ این نیروی خالص را در رابطهٔ ۲ــ۳ قرار می‌دهیم. در مثال زیر از هر دو روش برای محاسبهٔ کار کل استفاده شده است.

مثال ۲ــ۵

شکل زیر پدر و پسری را در حال جابه‌جا کردن یک جعبهٔ سنگین روی سطحی هموار نشان می‌دهد. نیروی $F_۱$ را پدر و نیروی $F_۲$ را پسر به جسم وارد می‌کنند و f_k نیز نیروی اصطکاک جنبشی است که با حرکت جسم مخالفت می‌کند و درخلاف جهت جابه‌جایی به جعبه وارد می‌شود. کار کل انجام شده روی جسم را محاسبه کنید.



۱ــ t در W_t از سرحرف واژهٔ 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 محاسبهٔ کار نیروی F_1، اطلاعات داده شده و $\cos\theta = \cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$ را در رابطهٔ **۲ــ۳** جایگذاری می‌کنیم. به این ترتیب داریم :

$$W_1 = (F_1 \cos\theta)d = (142\text{N} \times \sqrt{3}/2)(6/50\text{m}) = 799\text{J}$$

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

$$W_2 = F_2 d = (68/0\text{N})(6/50\text{m}) = 442\text{J}$$

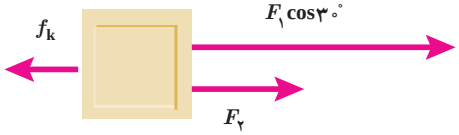
برای محاسبهٔ کار نیروی f_k، اطلاعات داده شده و $\cos\theta = \cos 180^\circ = -1$ را در رابطهٔ **۲ــ۳** جایگذاری می‌کنیم. پس :

$$W_3 = (f_k \cos\theta)d = (32/0\text{N} \times (-1))(6/50\text{m}) = -208\text{J}$$

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 :

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 = 799\text{J} + 442\text{J} + (-208\text{J}) = 1/03 \times 10^3\,\text{J}$$

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



اندازهٔ نیروی خالص در امتداد جابه‌جایی برابر است با :

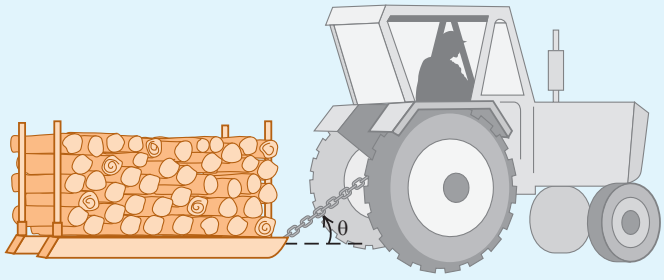
$$F = F_1 \cos 30^\circ + F_2 - f_k = 142\text{N} \times \sqrt{3}/2 + 68/0\text{N} - 32/0\text{N} = +159\text{N}$$

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

$$W_t = Fd = (159\text{N})(6/50\text{m}) = 1/03 \times 10^3\,\text{J}$$

تمرین ۲ــ۶

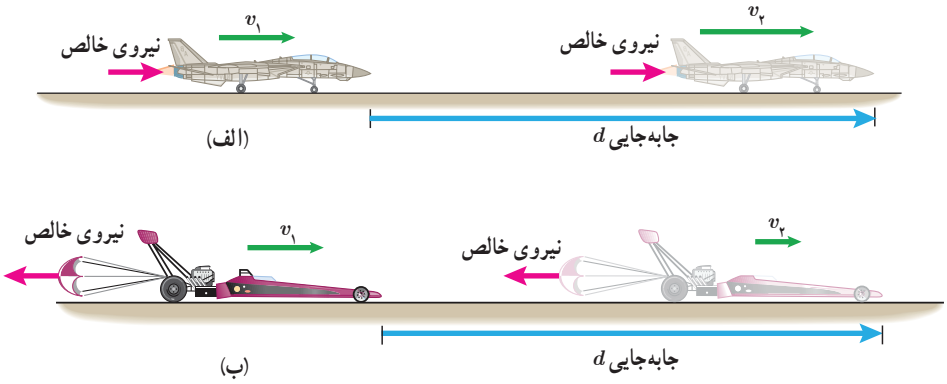
کشاورزی توسط تراکتور، سورتمه‌ای پر از هیزم را در راستای یک زمین هموار به اندازهٔ 235m جابه‌جا می‌کند (شکل زیر). وزن کل سورتمه و بار آن $mg = 1/47 \times 10^4\,\text{N}$ است. تراکتور نیروی ثابت $F_1 = 5/00 \times 10^3\,\text{N}$ را در زاویهٔ $\theta = 45^\circ$ بالای افق به سورتمه وارد می‌کند. نیروی اصطکاک جنبشی $f_k = 3/50 \times 10^3\,\text{N}$ است که برخلاف جهت حرکت به سورتمه وارد می‌شود. کار کل انجام شده روی سورتمه را به دو روش محاسبه کنید.



۲ـ۳ 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 (۲ـ۴ 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 (۲ـ۴ 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 جسمی‌وارد 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.



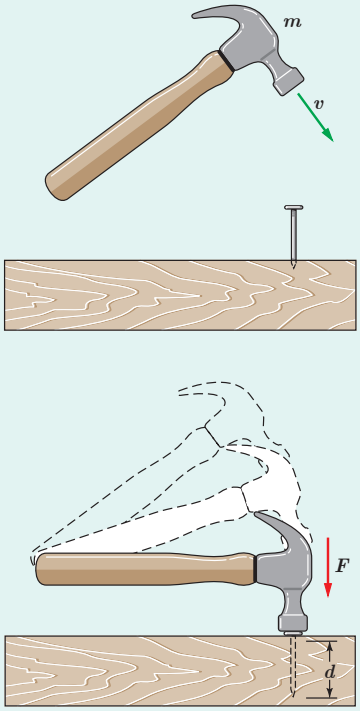
شکل ۲ـ۴ الف) کار مثبت روی هواپیما انجام شده و انرژی جنبشی آن افزایش یافته است. ب) کار منفی روی خودرو انجام شده و انرژی جنبشی آن کاهش یافته است.

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

$$W_t = K_2 - K_1 \qquad (۲ـ۴)$$

هنگامی‌که $W_t > 0$ است انرژی جنبشی جسم افزایش می‌یابد (انرژی جنبشی پایانی بزرگ تر از انرژی جنبشی آغازی K_1 است) و جسم در پایان جابه جایی تندتر از آغاز آن حرکت می‌کند. هنگامی‌که $W_t < 0$ است، انرژی جنبشی جسم کاهش می‌یابد ($K_2 < K_1$) و تندی آن پس از جابه جایی کمتر است. هنگامی‌که $W_t = 0$ است انرژی جنبشی جسم در دو نقطهٔ آغازی و پایانی یکسان ($K_2 = K_1$) و تندی آن نیز در این دو نقطه برابر است. توجه کنید که قضیهٔ کارــ انرژی جنبشی نه تنها برای حرکت یک جسم روی مسیری مستقیم معتبر است، بلکه اگر جسم روی هر مسیر خمیده ای نیز حرکت کند، می‌توان از آن استفاده کرد (تمرین ۲ــ۸ را ببینید).

خوب است بدانید



قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی، قانون جدیدی در فیزیک نیست؛ بلکه صرفاً کار (رابطهٔ ۲ــ۳) و انرژی جنبشی (رابطهٔ ۲ــ۱) را به هم مرتبط می‌سازد و به‌سادگی می‌توان آن را از قانون دوم نیوتون به‌دست آورد (اثبات این قضیه جزء اهداف این کتاب نیست).

قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی برای حل مسئله‌هایی مفید است که کار نیروهای وارد شده به جسم به سادگی محاسبه می‌شود. در این‌صورت با داشتن کار کل، می‌توانیم تندی جسم را در هر نقطهٔ دلخواه از مسیرش پیدا کنیم. همچنین اگر قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی را به‌صورت $K_۲ - K_۱ = W_t$ بنویسیم، تغییر انرژی جنبشی را می‌توان کاری درنظر 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 ۲ــ۶

توپ فوتبالی به جرم $۴/۵۰ \times ۱۰^۲ \text{g}$ از نقطهٔ پنالتی با تندی $۱۸/۰ \text{m/s}$ به طرف دروازه شوت می‌شود (شکل روبه‌رو). توپ با تندی $۱۵/۰ \text{m/s}$ 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 قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی به سادگی می‌توان مسئله را حل کرد. ابتدا با توجه به اطلاعات داده شده و رابطهٔ ۲ــ۱ انرژی جنبشی توپ را در دو وضعیت مورد نظر مسئله به دست می‌آوریم :

$$K_۱ = \frac{۱}{۲}mv_۱^۲ = \frac{۱}{۲}(۰/۴۵۰\text{kg})(۱۸/۰\text{m/s})^۲ = ۷۲/۹\text{J}$$

$$K_۲ = \frac{۱}{۲}mv_۲^۲ = \frac{۱}{۲}(۰/۴۵۰\text{kg})(۱۵/۰\text{m/s})^۲ = ۵۰/۶\text{J}$$

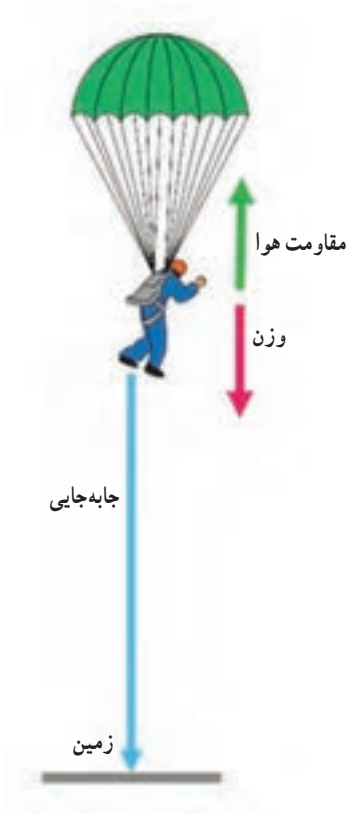
به این ترتیب، کار کل انجام شده روی توپ را از رابطهٔ ۲ــ۴ محاسبه می‌کنیم :

$$W_t = K_۲ - K_۱ = ۵۰/۶\text{J} - ۷۲/۹\text{J} = -۲۲/۳\text{J}$$

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

مثال ۲ــ۷

چتربازی به جرم کل ۷۵/۰kg، از بالونی که در ارتفاع $۸/۰۰\times۱۰^{۲}$m از سطح زمین است، با تندی ۱/۲۰m/s به بیرون بالون می‌پرد. اگر او با تندی ۴/۸۰m/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 رابطهٔ ۲ــ۱ داریم :

$$K_۱=\frac{۱}{۲}mv_۱^{۲}=\frac{۱}{۲}(۷۵/۰\text{kg})(۱/۲۰\text{m/s})^{۲}=۵۴/۰\text{J}$$

$$K_۲=\frac{۱}{۲}mv_۲^{۲}=\frac{۱}{۲}(۷۵/۰\text{kg})(۴/۸۰\text{m/s})^{۲}=۸۶۴\text{J}$$

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 رابطهٔ ۲ــ۴ داریم :

$$W_t=K_۲-K_۱\Rightarrow W_{\text{وزن}}+W_{\text{مقاومت هوا}}=۸۶۴\text{J}-۵۴/۰\text{J}=۸/۱۰\times۱۰^{۲}\text{J}$$

با پیدا کردن کار نیروی وزن (mg) و جایگذاری آن در عبارت بالا، کار نیروی مقاومت هوا را به دست می‌آوریم. از رابطهٔ ۲ــ۲ داریم :

$$W_{\text{وزن}}=mgd=(۷۵/۰\text{kg})(۹/۸۰\text{m/s}^{۲})(۸/۰۰\times۱۰^{۲}\text{m})=۵/۸۸\times۱۰^{۵}\text{J}$$

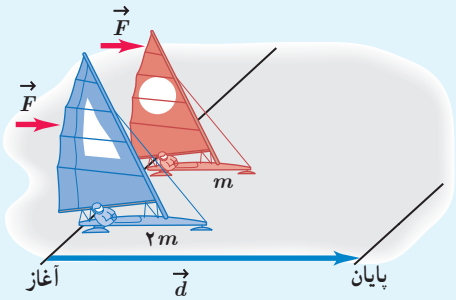
به این ترتیب، کار نیروی مقاومت هوا برابر است با :

$$۵/۸۸\times۱۰^{۵}\text{J}+W_{\text{مقاومت هوا}}=۸/۱۰\times۱۰^{۲}\text{J}\Rightarrow W_{\text{مقاومت هوا}}=-۵/۸۷\times۱۰^{۵}\text{J}$$

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 ۲ــ۷

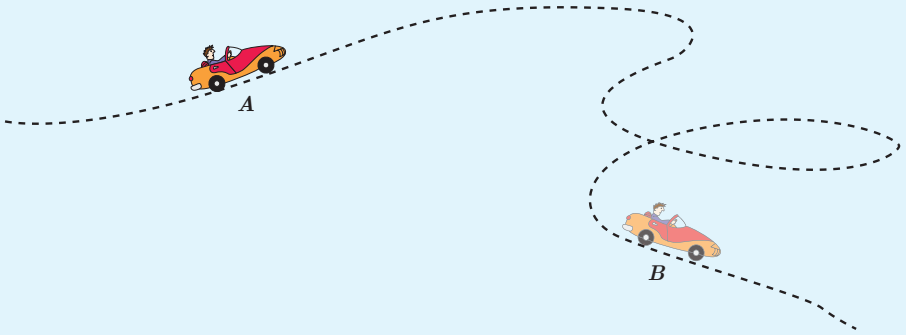
دو قایق بادبانی مخصوص حرکت روی سطوح یخ‌زده[۱]، دارای جرم‌های m و $۲m$، روی دریاچهٔ افقی و بدون اصطکاکی قرار دارند و نیروی ثابت و یکسان $\vec{F}$ با وزیدن باد به هر دو وارد می‌شود (شکل روبه‌رو). هردو قایق از حال سکون شروع به حرکت می‌کنند و از خط پایان به فاصلهٔ d می‌گذرند. انرژی جنبشی و تندی قایق‌ها را درست پس از عبور از خط پایان، با هم مقایسه کنید.



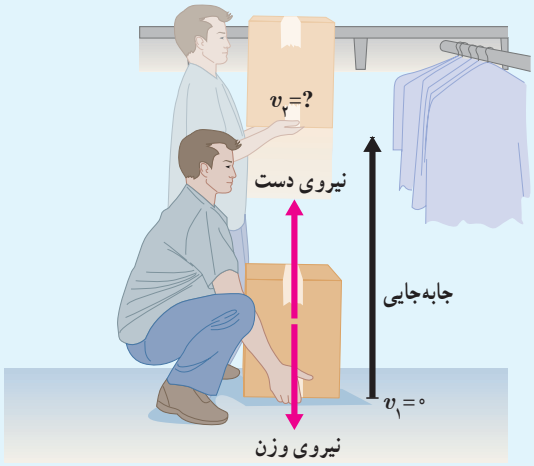
۱– iceboat

تمرین ۲ ــ ۸

جرم یک خودروی الکتریکی به همراه راننده‌اش $۸/۴۰ \times ۱۰^{۲}\,kg$ است. وقتی این خودرو از موقعیت A به موقعیت B می‌رود، کار کُل انجام شده روی خودرو $۷/۳۵ \times ۱۰^{۴}\,J$ است. اگر تندی خودرو در موقعیت A برابر $۵۴/۰\,km/h$ باشد، تندی آن در موقعیت B چند متر بر ثانیه است؟



تمرین ۲ ــ ۹



شکل روبه رو شخصی را نشان می‌دهد که با وارد کردن نیروی ثابت ۵۲/۷N، جعبه ای به جرم $۴/۱۰\,kg$ را از حال سکون در امتداد قائم جابه جا می‌کند.

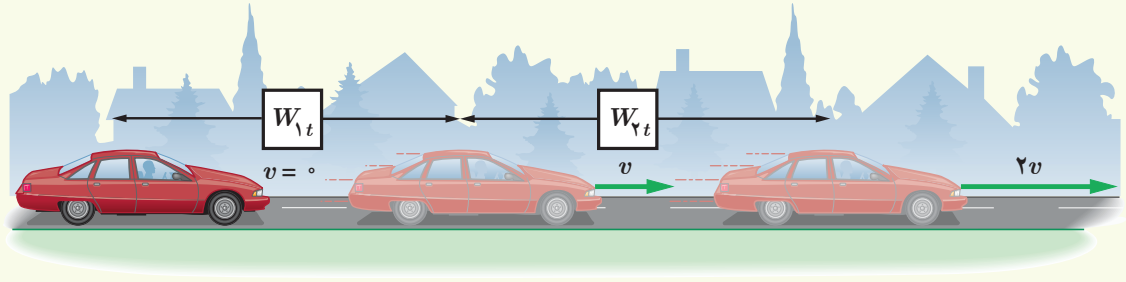
الف) کار انجام شده توسط شخص و کار انجام شده توسط نیروی وزن را روی جعبه در ارتفاع $۱/۴۰\,m$ به‌طور جداگانه حساب کنید.

ب) کار کل انجام شده روی جعبه تا ارتفاع $۱/۴۰\,m$ چقدر است؟

پ) با استفاده از قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی، تندی نهایی جعبه را در ارتفاع $۱/۴۰\,m$ حساب کنید.

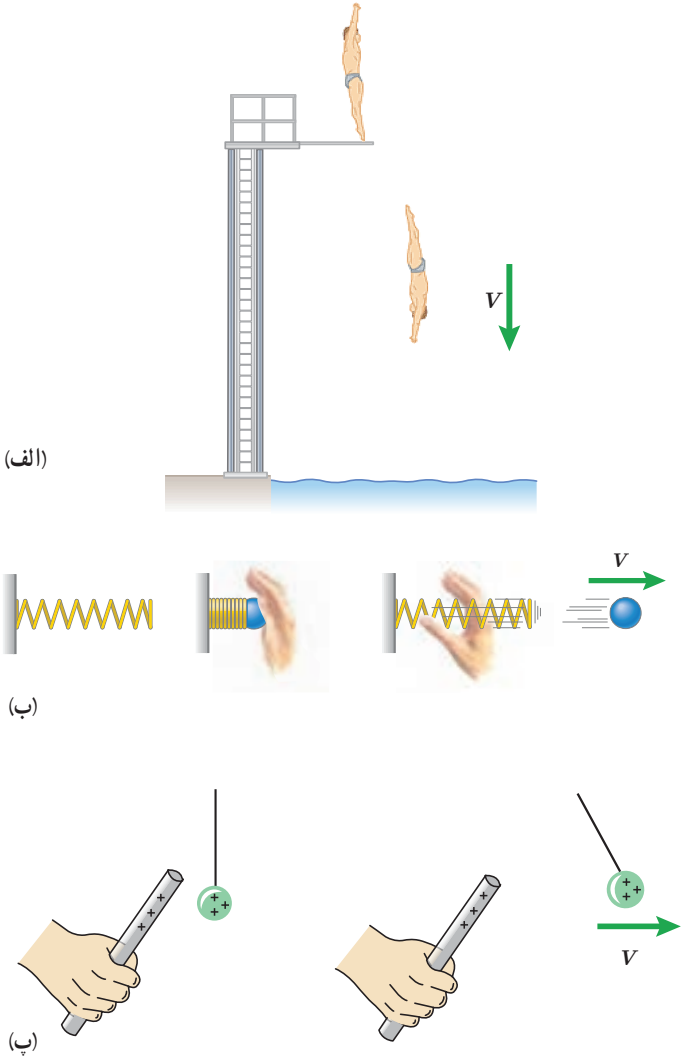
پرسش ۲ ــ ۳

برای آنکه تندی خودرویی از حال سکون به v برسد، باید کار کل $W_{۱t}$ روی آن انجام شود. همچنین برای آنکه تندی خودرو از v به $۲v$ برسد، باید کار کل $W_{۲t}$ روی آن انجام شود (شکل زیر). نسبت $W_{۱t}/W_{۲t}$ چقدر است؟



۲ــ۴ 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 تختهٔ پرش به درون استخری پر از آب شیرجه می‌زند، انرژی پتانسیل سامانهٔ شخص ــ زمین به تدریج به انرژی جنبشی شخص تبدیل می‌شود و شخص با تندی نسبتاً زیادی با سطح آب برخورد می‌کند (شکل ۲ــ۵ الف). یا هنگامی‌که فنری را توسط جسمی فشرده و رها می‌کنیم، انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جسم ــ فنر به انرژی جنبشی جسم تبدیل می‌شود و جسم با تندی زیادی پرتاب می‌شود (شکل ۲ــ۵ ب). همچنین وقتی یک جسم باردار را به جسم باردار دیگر نزدیک‌تر می‌کنیم، بسته به نوع بار، اجسام یکدیگر را می‌رانند یا می‌ربایند. در این حالت انرژی پتانسیل الکتریکی سامانهٔ دو جسم باردار تغییر می‌کند (شکل ۲ــ۵ پ).



شکل ۲ــ۵ هر سامانه می‌تواند دست‌کم از دو جسم یا تعداد بسیار بیشتری از اجسام تشکیل شده باشد. الف) انرژی پتانسیل گرانشی در سامانهٔ شخص ــ زمین. ب) انرژی پتانسیل کشسانی در سامانهٔ جسم ــ فنر. پ) انرژی پتانسیل الکتریکی در سامانهٔ 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 به‌دلیل موقعیت مکانی‌شان در سامانه، انرژی پتانسیل دارند. ازنظر تاریخی، اصطلاح انرژی پتانسیل را نخستین بار ویلیام رانکین در میانهٔ 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 دربارهٔ 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 ۲ــ۶ 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 $\vec{f}_{air}$ به آن وارد می‌شود. وقتی جسم از ارتفاع h_1 به ارتفاع h_2 از سطح زمین می‌رسد کار نیروی وزن در این جابه جایی برابر است با :

$$W_{\text{وزن}} = (mg\cos\theta)d = (mg\cos 0^\circ)d = mgd$$
$$= mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1)$$

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

$$U = mgh \qquad (۵ــ۲)$$

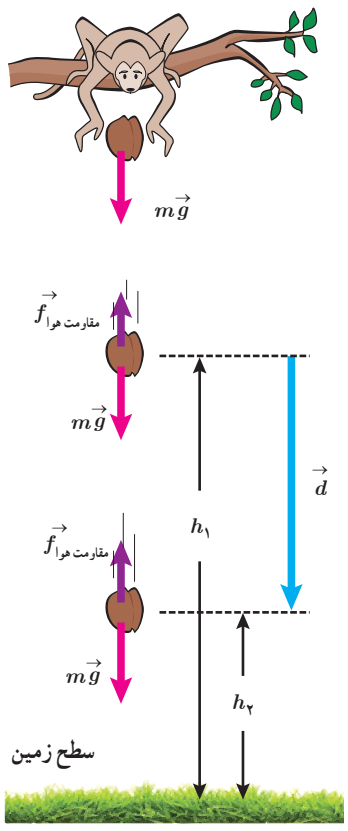
به این ترتیب، کار نیروی وزن را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد :

$$W_{\text{وزن}} = -(U_2 - U_1) = -\Delta U \qquad (۶ــ۲)$$

رابطهٔ ۲ــ۶ نشان می‌دهد کار نیروی وزن برابر با منفیِ تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است. همچنین توجه کنید که علامت منها در جلوی ΔU در رابطهٔ ۲ــ۶ اهمیت زیادی دارد. هنگامی که جسمی روبه 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 رابطهٔ ۲ــ۶ 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 سامانهٔ جسم ــ زمین است.



شکل ۲ــ۶ نیروهای وارد شده به جسمی که به طرف زمین سقوط می‌کند.

تمرین ۲ ــ ۱۰

برای جسمی به جرم m که رو به بالا حرکت می‌کند و از سطح زمین دور می‌شود نشان دهید کار نیروی وزن، همچنان از رابطهٔ ۲ــ۶ به دست می‌آید. فرض کنید که جسم به اندازهٔ 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 سامانهٔ جسم ــ 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 رابطهٔ $U = mgh$ 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 سامانهٔ جسم ــ زمین، انرژی پتانسیل گرانشی جسم نیز می‌گویند.)

هنگامی که با انرژی پتانسیل گرانشی سر و کار داریم می‌توانیم $h = ۰$ را در هر ارتفاعی انتخاب کنیم؛ زیرا اگر مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را انتقال دهیم، مقدارهای $h_۱$ و $h_۲$ تغییر می‌کنند و همین طور مقدارهای $U_۱$ و $U_۲$. ولی باید توجه داشته باشیم که این انتقال مبدأ، تأثیری بر اختلاف ارتفاع $h_۲ - h_۱$ یا بر اختلاف انرژی پتانسیل گرانشی $U_۲ - U_۱ = mg(h_۲ - h_۱)$ ندارد.

کمیتی که در فیزیک اهمیت دارد تغییر انرژی پتانسیل گرانشی (ΔU) بین دو نقطه است نه مقدار U در یک نقطهٔ خاص. در نتیجه همان‌طور 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 ۲ــ ۸

شکل زیر، کوه نوردی به جرم ۷۲/۰kg را نشان می‌دهد که در حال صعود به قلهٔ زردکوه بختیاری به ارتفاع ۴/۲۲km از سطح آزاد دریاست. تغییر انرژی پتانسیل گرانشی کوه نورد در ۱/۲۵ کیلومتری پایان ارتفاع صعود چقدر است؟ مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را (الف) سطح دریا و (ب) قلهٔ کوه بگیرید. ($g = ۹/۸۱ \mathrm{m/s^۲}$)

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

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

$$h_۱ = ۲/۹۷ \times ۱۰^۳ \mathrm{m} \quad \text{و} \quad h_۲ = ۴/۲۲ \times ۱۰^۳ \mathrm{m}$$

$$\Delta U = mg(h_۲ - h_۱) = (۷۲/۰\mathrm{kg})(۹/۸۱\mathrm{m/s^۲})(۴/۲۲ \times ۱۰^۳\mathrm{m} - ۲/۹۷ \times ۱۰^۳\mathrm{m}) = ۸/۸۳ \times ۱۰^۵\mathrm{J}$$

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

$$h_۱ = -۱/۲۵ \times ۱۰^۳\mathrm{m} \quad \text{و} \quad h_۲ = ۰$$

$$\Delta U = mg(h_۲ - h_۱) = (۷۲/۰\mathrm{kg})(۹/۸۱\mathrm{m/s^۲})[۰ - (-۱/۲۵ \times ۱۰^۳\mathrm{m})] = ۸/۸۳ \times ۱۰^۵\mathrm{J}$$

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

مثال ۲ــ۹

جسم ساکنی به جرم m را مانند شکل روبه رو، با دستمان از ارتفاع $h_۱$ به ارتفاع $h_۲$ 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 قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی (رابطهٔ ۲ــ۴) داریم :

$$W_t = W_{\text{وزن}} + W_{\text{دست}} = K_۲ - K_۱$$

از آنجا که جسم در ابتدا و انتهای مسیر ساکن است، تغییر انرژی جنبشی آن صفر است ($\Delta K = ۰$). به این ترتیب داریم :

$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{دست}} = ۰ \Rightarrow W_{\text{دست}} = - W_{\text{وزن}}$$

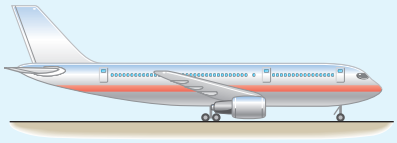
با توجه به رابطهٔ ۲ــ۵ می‌توانیم کار نیروی وزن را با استفاده از تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی به دست آوریم.

$$W_{\text{وزن}} = - \Delta U = - (mgh_۲ - mgh_۱)$$

به این ترتیب، کار نیروی دست برابر است با :

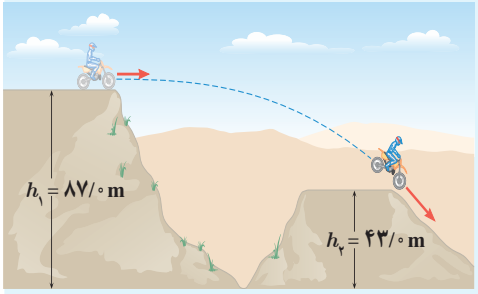
$$W_{\text{دست}} = -(- \Delta U) = + (mgh_۲ - mgh_۱)$$

تمرین ۲ ــ ۱۱



انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل گرانشی (نسبت به زمین) یک هواپیمای مسافربری به جرم $۷/۵۰ \times ۱۰^۴ \text{kg}$ که با تندی ۸۶۴km/h در ارتفاع $۹/۶۰ \times ۱۰^۳ \text{m}$ حرکت می‌کند چقدر است؟ مقدار این انرژی‌ها را با هم مقایسه کنید.

تمرین ۲ ــ ۱۲



جرم موتور سواری با موتورش ۱۴۷kg است. این موتورسوار، پرشی مطابق شکل روبه‌رو انجام می‌دهد.

الف) انرژی پتانسیل گرانشی موتور سوار را روی هر یک از تپه‌ها حساب کنید ($۹/۸۱ \text{m/s}^۲$).

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

شکل ۲ــ۷ 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.

انرژی پتانسیل کشسانی

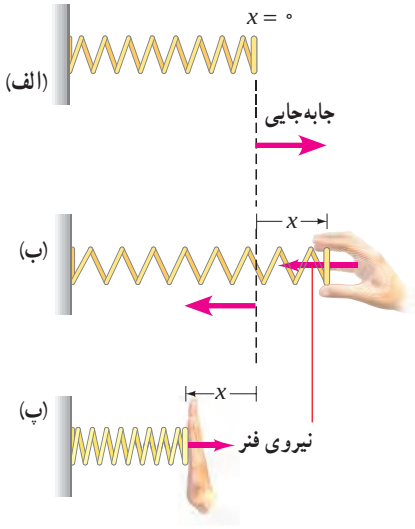
در علوم هفتم با انرژی پتانسیل وابسته به اجسام کشسان، مانند فنر و نوارهای لاستیکی آشنا شدید. در این بخش تنها به بررسی انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جسم ــ فنر می‌پردازیم. فنرها را به شکل‌ها و اندازه‌های متفاوتی می‌سازند (شکل ۲ــ۷) و در بیشتر وسایل و ابزارهای مورد استفاده ما در زندگی روزمره کاربرد دارند. آنها را می‌توان در اتومبیل‌ها، قطارها، اغلب ساعت‌ها، برخی از اسباب بازی‌ها و ... مشاهده کرد (شکل ۲ــ۸).

(الف) (ب) (پ)

شکل ۲ــ۸ کاربرد فنر در الف) ساعت ب) اتومبیل پ) قطار

شکل ۲ــ۹ 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 اندازهٔ x از مکان تعادلش، نیرویی در خلاف جهت جابه‌جایی به دست شخص وارد می‌شود (شکل‌های ۲ــ۹ ب و پ). یعنی کار نیروی فنر در این جابه‌جایی، منفی و تغییر انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جسم‌ــفنر مثبت است. با توجه به آنچه در رابطهٔ ۲ــ۶ دیدیم در مورد تغییر انرژی پتانسیل کشسانی فنر نیز، مشابه تغییر انرژی پتانسیل گرانشی می‌توان نوشت :

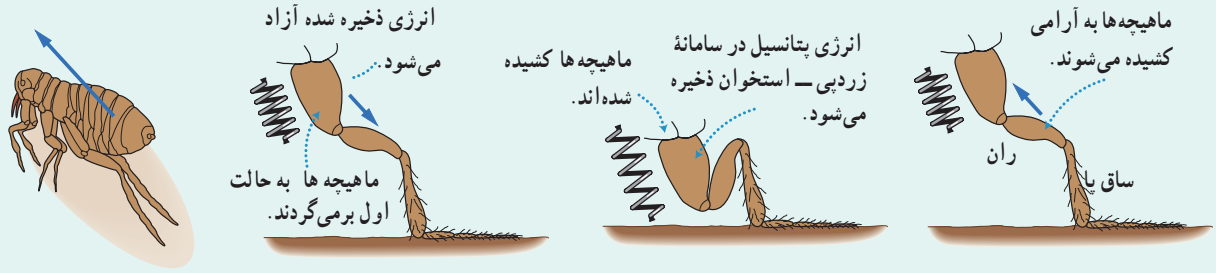
$$W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} \qquad (۲ــ۷)$$



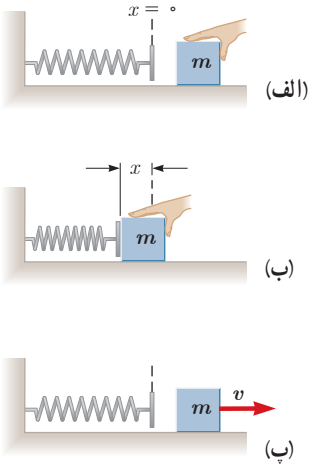
شکل ۲ــ۹ الف) فنر در حال تعادل. ب) و پ) با کشیدن و فشردن فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در سامانهٔ دست ــ فنر ذخیره می‌شود.

خوب است بدانید

حشرهٔ کک به داشتن توانایی پرش شگفت آور شهرت دارد؛ زیرا می‌تواند بیش از صد برابر ارتفاع پیکر خود بپرد. نتایج پژوهش‌هایی که روی نحوهٔ حرکت حشره کک انجام شده، نشان می‌دهند ۱/۰ms طول می‌کشد تا این حشره به تندی بیشینهٔ خود، یعنی حدود ۱/۰m/s برسد. در این مدت کک می‌تواند تا ارتفاع ۳/۵cm 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 ۰/۵۰mg است.



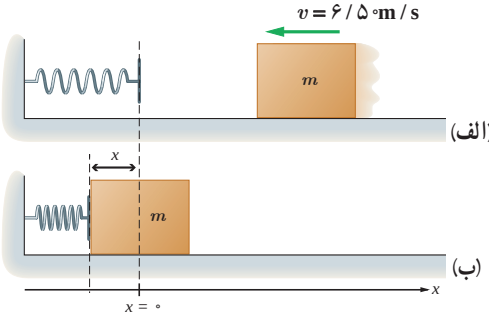
مثال مفهومی ۲ــ۱۰



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 درحال تعادل نشان می‌دهد که نه فشرده و نه کشیده شده است و انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جسم ــ فنر صفر است. در شکل ب، جسمی‌به جرم m فنر را فشرده می‌کند. با توجه به فشردگی فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در سامانهٔ جسم ــ 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 سامانهٔ فنرــجسم کاسته و انرژی جنبشی جسم افزوده می‌شود.

مثال ۲ــ۱۱



جسمی به جرم $۴/۲۰ \times ۱۰^{۲}\,g$ مطابق شکل روبه‌رو با تندی $۶/۵۰\,m/s$ 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 سامانهٔ جسمــفنر $۵/۶۰\,J$ باشد، کار نیروی فنر چقدر است؟

پ) با استفاده از قضیهٔ کارــ انرژی جنبشی، کار نیروی اصطکاک را وقتی جسم از موقعیت شکل (الف) به موقعیت شکل (ب) می‌رود حساب کنید.

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱، انرژی جنبشی جسم در موقعیت الف برابر است با :

$$K_{۱} = \frac{۱}{۲}mv^{۲} = \frac{۱}{۲}(۰/۴۲۰\,kg)(۶/۵۰\,m/s)^{۲} = ۸/۸۷\,J$$

ب) با توجه به رابطهٔ ۲ــ۷ کار نیروی فنر برابر است با :

$$W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} = -(U_{۲} - U_{۱}) = -(۵/۶۰ - ۰) = ۵/۶۰\,J$$

پ) از قضیهٔ کارــ انرژی جنبشی (رابطهٔ ۲ــ۴) کار نیروی اصطکاک را به‌دست می‌آوریم :

$$W_{\text{فنر}} + W_{\text{اصطکاک}} + W_{\text{وزن}} + W_{\text{عمودی سطح}} = K_{۲} - K_{۱}$$

$$-۵/۶۰\,J + W_{\text{اصطکاک}} + ۰ + ۰ = ۰ - ۸/۸۷\,J \Rightarrow W_{\text{اصطکاک}} = -۳/۲۷\,J$$

فعالیت ۲ــ۱

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 آهستهٔ فیلم در اختیار دارید، فیلمی‌از این فعالیت تهیه کنید و آن را به‌طور آهسته مشاهده کنید.

۲ــ۵ پایستگی انرژی مکانیکی

شکل ۲ــ۱۰ جسمی‌را 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 رابطهٔ ۲ــ۶، 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 قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی (رابطهٔ ۲ــ۴) داریم :

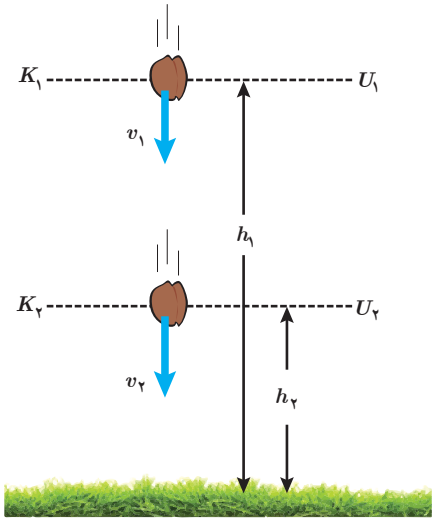
$$W_t = W_{\text{وزن}} = K_2 - K_1$$

از مقایسهٔ دو رابطهٔ اخیر می‌توان نوشت :

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

که می‌توان آن را به صورت زیر نیز بازنویسی کرد :

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 \qquad (۸ــ۲)$$



شکل ۲ــ۱۰ با نزدیک‌تر شدن جسم به زمین، انرژی پتانسیل گرانشی کاهش و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد.

کریستیان هویگنس (۱۶۹۵ــ۱۶۲۹م)، 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 ادامهٔ 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 سیارهٔ زحل را مشاهده و گزارش کرد.

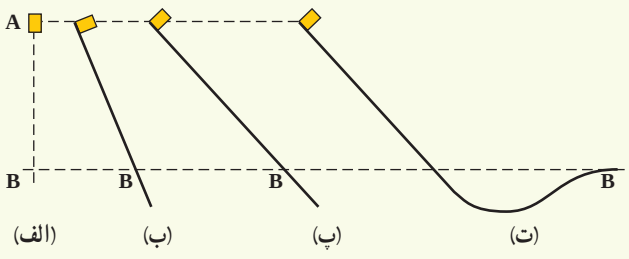
این رابطه نشان می‌دهد مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی جسم در نقطه‌های مختلف مسیر حرکت با هم برابر است. مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی هر جسم را انرژی مکانیکی آن می‌نامیم و با E نشان می‌دهیم ($E = K + U$). به این ترتیب، از رابطهٔ ۲ــ۸ نتیجه می‌شود :

$$E_1 = E_2 \qquad (۹ــ۲)$$

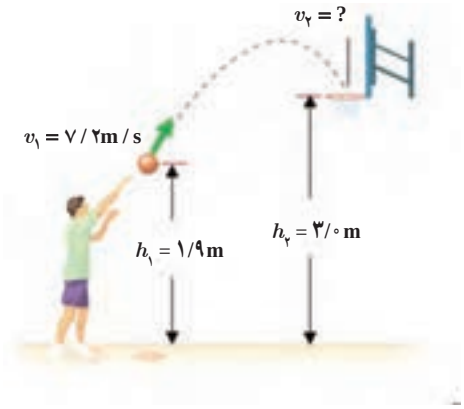
چون نقطه‌های (۱) و (۲) در مسیر حرکت جسم در شکل ۲ــ۱۰ اختیاری‌اند، نتیجه می‌گیریم با نادیده گرفتن نیروی مقاومت هوا، انرژی مکانیکی در تمام نقاط مسیر مقدار یکسانی دارد و پایسته می‌ماند. این نتیجه، اصل پایستگی انرژی مکانیکی نام دارد و برای شرایطی که بتوان اثر ناشی از نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا را نادیده گرفت، کاربرد دارد.

پرسش ۲ــ۴

شکل روبه‌رو، چهار وضعیت متفاوت را برای حرکت جسمی‌نشان 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 نقطهٔ B برای هر چهار وضعیت با هم مقایسه کنید.



مثال ۲ــ ۱۲



شکل روبه‌رو ورزشکاری را در حال پرتاپ توپ بسکتبالی با تندی $v_۱ = ۷/۲ m/s$ به طرف سبد نشان می‌دهد. تندی توپ هنگام رسیدن به دهانهٔ 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، پایستگی انرژی مکانیکی برقرار است. لذا از رابطهٔ ۲ــ۸ می‌توان نوشت :

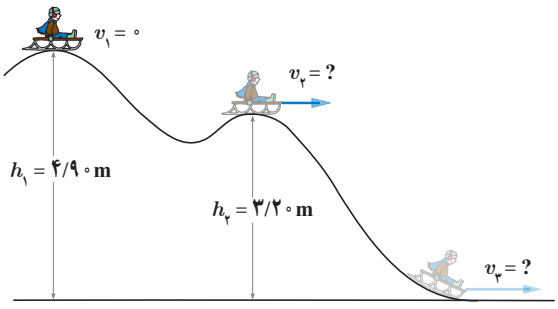
$$K_۱ + U_۱ = K_۲ + U_۲ \Rightarrow \frac{۱}{۲}mv_۱^۲ + mgh_۱ = \frac{۱}{۲}mv_۲^۲ + mgh_۲$$

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

$$\frac{۱}{۲}(۷/۲ m/s)^۲ + (۹/۸۱ m/s^۲)(۱/۹ m) = \frac{۱}{۲}v_۲^۲ + (۹/۸۱ m/s^۲)(۳/۰ m)$$

با حل معادلهٔ بالا، تندی توپ در دهانهٔ سبد برابر $v_۲ = ۵/۵ m/s$ به دست می‌آید.

مثال ۲ــ ۱۳



سورتمه سواری از ارتفاع $h_۱ = ۴/۹۰ m$ بالای سطح زمین و روی مسیری بدون اصطکاک، از حال سکون شروع به حرکت می‌کند.

الف) تندی سورتمه را در ارتفاع $h_۲$ به دست آورید.

ب) تندی سورتمه را هنگامی‌که 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، پایستگی انرژی مکانیکی برقرار است؛ لذا از رابطهٔ ۲ــ۸ می‌توان نوشت :

$$K_۱ + U_۱ = K_۲ + U_۲ \Rightarrow \frac{۱}{۲}mv_۱^۲ + mgh_۱ = \frac{۱}{۲}mv_۲^۲ + mgh_۲$$

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

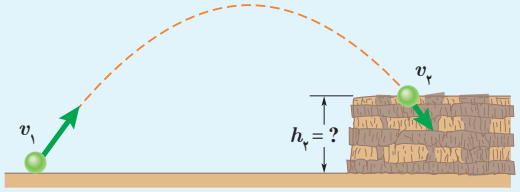
$$۰ + (۹/۸۱ m/s^۲)(۴/۹۰ m) = \frac{۱}{۲}v_۲^۲ + (۹/۸۱ m/s^۲)(۳/۲۰ m) \Rightarrow v_۲ = ۵/۷۷ m/s$$

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 $v_۳ = ۹/۸۰ m/s$ به دست می‌آید. به‌جای این کار می‌توانستید انرژی مکانیکی وضعیت دوم و وضعیت سوم سورتمه سوار را مساوی یکدیگر قرار دهید.

تمرین ۲ــ ۱۳

در مثال ۲ــ۱۲، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در ارتفاع $h_۱$ بگیرید و بر این اساس تندی توپ را هنگام رسیدن به دهانهٔ سبد حساب کنید.

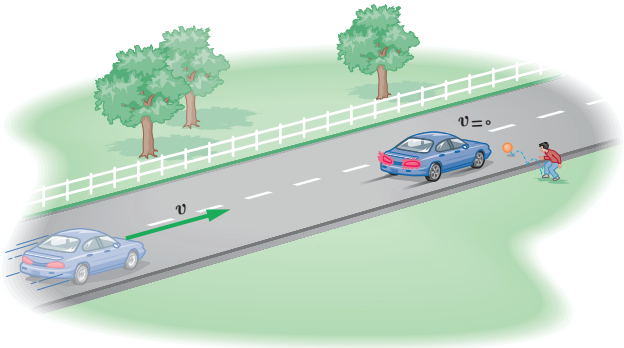
تمرین ۲ ــ ۱۴



توپی مطابق شکل از سطح زمین با تندی $v_1 = 42/0\ m/s$ به طرف صخره‌ای پرتاب می‌شود.

اگر توپ با تندی $v_2 = 24/0\ m/s$ به بالای صخره برخورد کند، ارتفاع h_2 را به دست آورید. مقاومت هوا را هنگام حرکت توپ نادیده بگیرید.

۲ــ۶ کار و انرژی درونی



شکل ۲ــ۱۱ 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 به‌وجود می‌آید (شکل ۲ــ۱۱). 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 تشکیل‌دهندهٔ 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. به‌طوری‌که هرچه تعداد ذرات سازندهٔ یک جسم و انرژی هر ذرهٔ 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 این‌گونه موارد، اصطلاحاً می‌گوییم انرژی تلف شده است. در واقع، همان‌طورکه اشاره شد، در این حالت انرژی از بین نرفته 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.

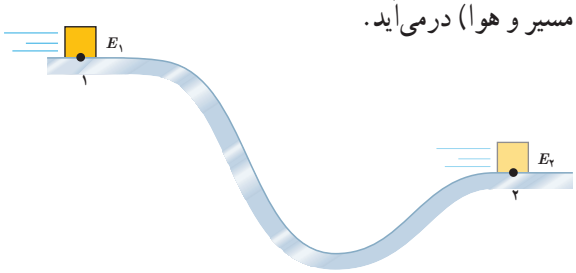
پرسش ۲ــ۴

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

شکل ۲ــ۱۲ جسمی‌را 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[1] :

$$W_f = E_2 - E_1 \qquad (۲ــ۱۰)$$

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 ۲ــ۱۲ وقتی نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا درحین حرکت جسم، روی آن کار انجام دهند انرژی مکانیکی جسم پایسته نیست.

قانون پایستگی انرژی : در یک سامانهٔ منزوی[2]، 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.

یولیوس فون مایر (۱۸۷۸ــ۱۸۱۴م)

قانون پایستگی انرژی بیانی از ثبات در طبیعت است. انرژی کل، کمیتی است که پایسته می‌ماند؛ درحالی که کمیت‌های دیگر می‌توانند تغییر کنند. اولین اظهارنظر 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 (۱۸۸۹ــ۱۸۱۸م)

مثال ۲ــ ۱۴

از بالونی که در ارتفاع ۴۵/۰ متری سطح زمین و با تندی ۴/۲۰m/s در پرواز است، بسته‌ای به جرم ۲۵/۰kg رها می‌شود و با تندی ۲۳/۶m/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 :

$$E_1 = K_1 + U_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1$$

$$= \frac{1}{2}(25/0\,\text{kg})(4/20\,\text{m/s})^2 + (25/0\,\text{kg})(9/81\,\text{m/s}^2)(45/0\,\text{m}) = 1/13\times10^4\,\text{J}$$

$$E_2 = K_2 + U_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

$$= \frac{1}{2}(25/0\,\text{kg})(23/6\,\text{m/s})^2 + 0 = 6/96\times10^3\,\text{J}$$

با جایگذاری مقادیر انرژی مکانیکی بسته در رابطهٔ ۲ــ۱۰ ، کار انجام شده توسط نیروی مقاومت هوا بر روی بسته برابر است با :

$$W_f = E_2 - E_1 = 6/96\times10^3\,\text{J} - 1/13\times10^4\,\text{J} = -4/3\times10^3\,\text{J}$$

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

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

تمرین ۲ــ۱۵

توپی به جرم ۰/۴۵kg با تندی $v_1 = 8/0\,m/s$ از نقطهٔ A می‌گذرد (شکل روبه‌رو). نیروی مقاومت هوا و نیروی اصطکاک در سطح تماس توپ با زمین، ۲۰ درصد انرژی جنبشی توپ را تا رسیدن به نقطهٔ B تلف می‌کنند. تندی توپ را در این نقطه به دست آورید.

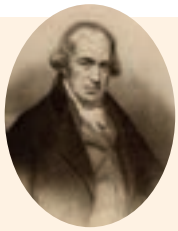
۲ــ۷ توان

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 جادهٔ 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 وگوهای روزمره، معمولاً واژهٔ 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. هنگامی‌که کار W در بازهٔ زمانی Δt انجام می‌شود، کار انجام شده در واحد زمان یا توان متوسط $\overline{P}$ به صورت زیر تعریف می‌شود :

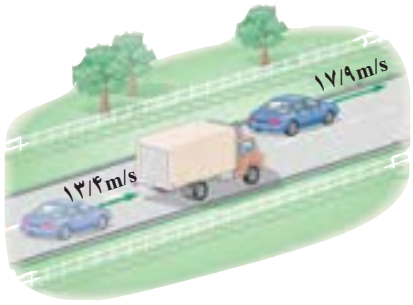
$$\overline{P} = \frac{W}{\Delta t} \qquad (۲ــ۱۱)$$

یکای SI توان، وات (W) است که به احترام جیمز وات مخترع انگلیسی نام‌گذاری شده است. مطابق تعریف توان (رابطهٔ ۲ــ۱۱)، یک وات برابر است با یک ژول بر ثانیه ($1W = 1J/s$). استفاده از یکاهای بزرگ‌تر توان، مانند کیلووات (kW) و مگاوات (MW) نیز متداول است. یکای قدیمی توان، به نام اسب بخار ($1hp = 746W$) هنوز نیز استفاده می‌شود[1]. 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.



جیمز وات (۱۸۱۹ــ۱۷۳۶م) مخترع و مهندس اسکاتلندی، فعالیت حرفه‌ای خود را با اصلاح و تکمیل ماشین‌بخار 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 ۵۰۰ دستگاه از آن، در سراسر انگلستان مورد استفاده قرار گرفت. مقدار اسب بخار ($1hp = 746W$) از آزمایش‌هایی به دست آمده که توسط وات انجام شده است. نتیجهٔ این آزمایش‌ها این بود که یک اسب می‌تواند در بالا بردن زغال سنگ از معدن در هر دقیقه ۳۳۰۰۰ فوت ــ پوند (ft ــ lbs) کار انجام دهد. هر فوت ــ پوند تقریباً معادل ۱/۳۶ ژول است.

مثال ۲ــ۱۵



شکل روبه‌رو خودرویی به جرم $1/30 \times 10^3 kg$ را نشان می‌دهد که برای سبقت گرفتن از کامیونی، در مسیری افقی و در مدت ۳/۰۰s تندی خود را از $v_1 = 13/4\,m/s$ به $v_2 = 17/9\,m/s$ تغییر داده است. توان متوسط موتور خودرو برای انجام این کار، دست کم چقدر باید باشد؟ نیروهای اتلافی را نادیده بگیرید.

۱ــ یکای hp از سرحرف عبارت horse power به معنای اسب بخار گرفته شده است.

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۲ــ۴، کار کل انجام شده توسط موتور خودرو، برابر تغییر انرژی جنبشی آن است. به‌این ترتیب، با به‌دست آوردن انرژی جنبشی خودرو در دو وضعیت داده شده و محاسبهٔ کار کل موتور خودرو داریم :

$$W_t = K_۲ - K_۱ = \frac{۱}{۲}mv_۲^۲ - \frac{۱}{۲}mv_۱^۲$$

$$= \frac{۱}{۲}m(v_۲^۲ - v_۱^۲) = \frac{۱}{۲}(۱/۳۰\times۱۰^۳\,\text{kg})[(۱۷/۹\,\text{m/s})^۲ - (۱۳/۴\,\text{m/s})^۲] = ۹/۱۶\times۱۰^۴\,\text{J}$$

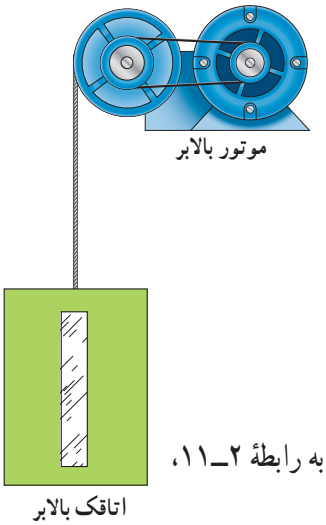
با جایگذاری مقدار به دست آمده در رابطهٔ ۲ــ۱۱، کمترین توان متوسط موتور خودرو برای انجام این کار برابر است با :

$$\overline{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{۹/۱۶\times۱۰^۴\,\text{J}}{۳/۰۰\,\text{s}} = ۳/۰۵\times۱۰^۴\,\text{W} = ۴۰/۹\,\text{hp}$$

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

مثال ۲ــ۱۶

جرم اتاقک بالابری به همراه بار آن ۵۰۰kg است (شکل روبه‌رو). اگر این بالابر در مدت ۱۰/۰s از طبقهٔ همکف به طبقهٔ دوم در ارتفاع ۶/۲۰m برود، توان متوسط موتور این بالابر چند اسب بخار است؟ نیروهای اتلافی را نادیده بگیرید.



پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۲ــ۴، 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 :

$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{موتور}} = K_۲ - K_۱$$

$$-mg(h_۲ - h_۱) + W_{\text{موتور}} = ۰ - ۰$$

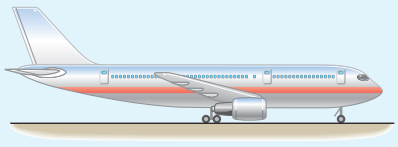
$$W_{\text{موتور}} = mg(h_۲ - h_۱) = (۵۰۰\,\text{kg})(۹/۸۱\,\text{m/s}^۲)(۶/۲۰\,\text{m} - ۰) = ۳/۰۴\times۱۰^۴\,\text{J}$$

در محاسبهٔ بالا، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را سطح زمین (طبقهٔ همکف) گرفته‌ایم. با توجه به رابطهٔ ۲ــ۱۱، توان متوسط موتور بالابر برابر است با :

$$\overline{P} = \frac{W_{\text{موتور}}}{\Delta t} = \frac{۳/۰۴\times۱۰^۴\,\text{J}}{۱۰/۰\,\text{s}} = ۳/۰۴\times۱۰^۳\,\text{W} = ۴/۰۸\,\text{hp}$$

تمرین ۲ــ۱۶

هر یک از دو موتور جت یک هواپیمای مسافربری بوئینگ ۷۶۷، پیشرانه‌ای (نیروی جلوبر هواپیما) برابر $۱/۹۷\times۱۰^۵\,\text{N}$ ایجاد می‌کند. اگر هواپیما در هر دقیقه ۱۵/۶km در امتداد این نیرو حرکت کند، توان متوسط هر یک از موتورهای هواپیما چند اسب بخار است؟



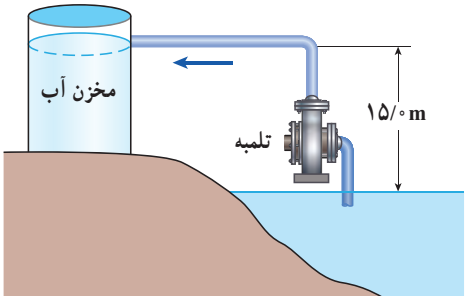
بازده : در هر سامانه تنها بخشی از انرژی ورودی (انرژی مصرفی سامانه) به انرژی موردنظر ما تبدیل می‌شود. برای مثال، وقتی موتور بالابری کار می‌کند بخشی از انرژی الکتریکی ورودی به‌کار مکانیکی تبدیل می‌شود و اتاقک بالابر را جابه‌جا می‌کند. بخش دیگری از انرژی الکتریکی ورودی به‌صورت انرژی‌های ناخواسته‌ای مانند گرم‌تر شدن اجزای موتور و کابل بالابر در می‌آید. شکل ۲ــ۱۳ طرح واره‌ای است که این نوع تبدیل انرژی‌ها در سامانه را نشان می‌دهد.

شکل ۲ــ۱۳ همواره بخشی از انرژی ورودی به سامانه، به انرژی تلف شده یا کار غیرمفید تبدیل می‌شود.

همان طورکه طرح واره شکل ۲ــ۱۳ 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 رابطهٔ زیر می‌توان درصد بازدهٔ هر سامانه را به سادگی محاسبه کرد.

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \times ۱۰۰ \qquad (۱۲ــ۲)$$

مثال ۲ــ ۱۷



تلمبه‌ای با توان ورودی ۱۵/۴kW در هر ثانیه ۷۰/۰ لیتر آب دریاچه‌ای به چگالی $۱/۰۰ \times ۱۰^{۳}\text{kg/m}^{۳}$ را مطابق شکل روبه‌رو تا ارتفاع ۱۵/۰ متری مخزنی می‌فرستد. بازدهٔ تلمبه چند درصد است؟

پاسخ : انرژی الکتریکی ورودی به تلمبه برابر است با

$$E_{\text{ورودی}} = (۱۵/۴ \times ۱۰^{۳}\text{W})(۱/۰۰\text{s}) = ۱/۵۴ \times ۱۰^{۴}\text{J}$$

جرم هر لیتر آب دریاچه ۱/۰۰kg و کار مفید تلمبه برابر است با :

$$E_{\text{خروجی}} = mg(h_۲ - h_۱) = (۷۰/۰\text{kg})(۹/۸۱\text{N/kg})(۱۵/۰\text{m} - ۰) = ۱/۰۳ \times ۱۰^{۴}\text{J}$$

در محاسبهٔ بالا، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را سطح آب دریاچه گرفته‌ایم. با توجه به رابطهٔ ۲ــ۱۲، درصد بازدهٔ تلمبه برابر است با :

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{۱/۰۳ \times ۱۰^{۴}\text{J}}{۱/۵۴ \times ۱۰^{۴}\text{J}} \times ۱۰۰ = ۶۶/۹٪$$

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

تمرین ۲ ـ ۱۷

آب ذخیره شده در پشت سد یک نیروگاه برق آبی، از ارتفاع ۹۰/۰ متری روی پره های توربینی می‌ریزد و آن را می‌چرخاند. با چرخش توربین، مولد می‌چرخد و انرژی الکتریکی تولید می‌شود (شکل روبه رو). اگر ۸۵ درصد کار نیروی گرانش به انرژی الکتریکی تبدیل شود، درهر ثانیه چند متر مکعب آب باید روی توربین بریزد تا توان الکتریکی خروجی مولد نیروگاه به ۲۰۰MW برسد؟ جرم هر متر مکعب آب را $۱۰^{۳}kg \times ۱/۰۰$ در نظر بگیرید.

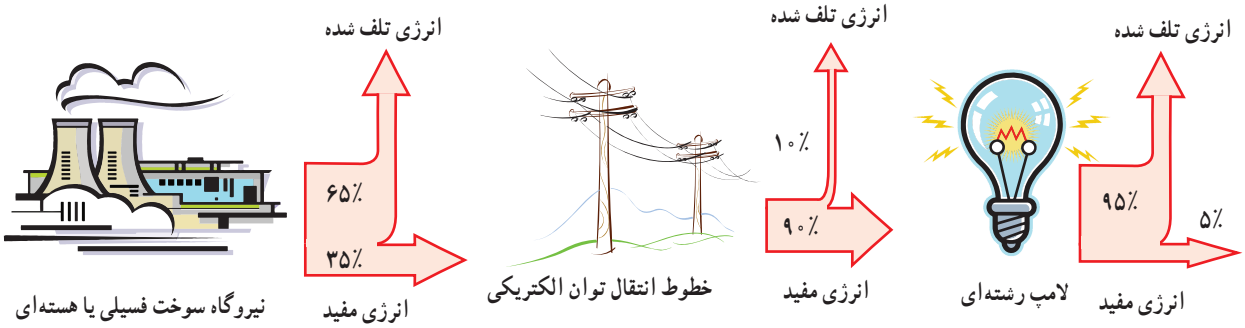
فعالیت ۲ـ ۲

شکل زیر طرح واره‌ای از درصد انرژی مفید و انرژی تلف شده در یک نیروگاه سوخت فسیلی یا هسته‌ای را از آغاز تا مصرف در یک لامپ رشته‌ای نشان می‌دهد.

الف) یک نیروگاه سوخت فسیلی را در نظر بگیرید که با مصرف گازوئیل، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. با سوختن هر لیتر گازوئیل ۳۴/۲ مگاژول انرژی گرمایی تولید می‌شود. برای اینکه یک لامپ رشته‌ای ۱۰۰ واتی در طول یک ماه به مدت ۱۸۰ ساعت روشن بماند (به‌طور میانگین هر شبانه روز ۶ ساعت)، چقدر گازوئیل باید در نیروگاه مصرف شود؟

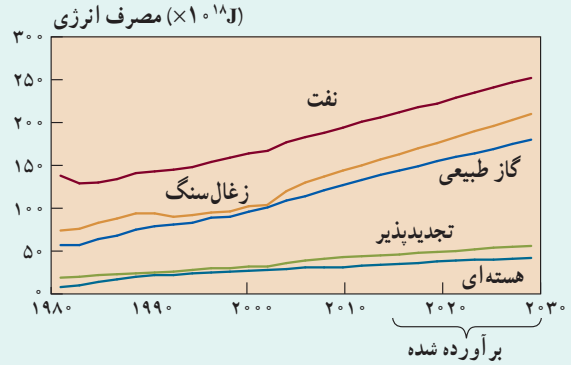
ب) با توجه به نتیجه قسمت الف، درک خود از هشدار معروف «لامپ اضافی خاموش!» را بیان کنید.

پ) اگر در سراسر ایران، هر خانه در طول یک ماه، معادل انرژی الکتریکی مصرف شده در قسمت الف، صرفه‌جویی کند، مرتبهٔ بزرگی گازوئیل صرفه‌جویی شده را تخمین بزنید.



خوب است بدانید

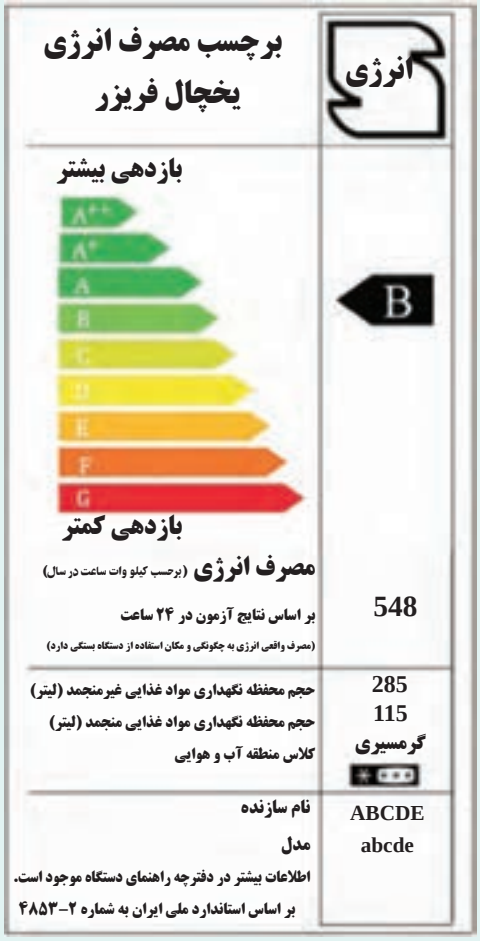
بهینه‌سازی مصرف انرژی : امروزه انرژی در همهٔ عرصه‌های زندگی بشر و همچنین توسعهٔ زیرساخت‌های صنعتی و اقتصادی نقش محوری ایفا می‌کند و یکی از ارکان استقلال و اقتدار سیاسی کشورها محسوب می‌شود. افزایش روز افزون مصرف انواع مختلف انرژی در جهان، هم اینک به یکی از چالش‌های فراروی بشر تبدیل شده است (شکل روبه‌رو). این امر به‌ویژه پس از بحران انرژی در دههٔ ۱۹۷۰ میلادی،



کل مصرف انرژی از منابع مختلف. همان‌طور که دیده می‌شود طی ۱۵ سال آینده مصرف انرژی جهان از منابع مختلف رشد چشمگیری خواهد داشت. در این میان بهره برداری از سوخت‌های فسیلی بیش از سایر منابع انرژی است.

متخصصان حوزهٔ انرژی را به بررسی و ارائهٔ راهکارهایی برای استفاده و مصرف بهینهٔ انرژی واداشته است.

همان‌طور که دیده می‌شود بهینه‌سازی مصرف انرژی از نظر اقتصادی نه تنها یک ضرورت است؛ بلکه از جنبهٔ 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 قرارگرفته است، تعیین ملاک‌هایی برای مصرف انرژی کلیهٔ 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 روبه رو).



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

فعالیت ۲ـ 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 برحسب وات و اسب بخار بیان کنید.

۲ــ۱ انرژی جنبشی

۱ تقریباً بیشتر شهاب‌سنگ‌هایی که وارد جوّ زمین می‌شوند به دلیل اصطکاک زیاد با ذرات تشکیل دهندهٔ جوّ، به دمای بالایی می‌رسند و می‌سوزند. شکل روبه رو شهاب سنگی به جرم $۱/۳۵ \times ۱۰^{۵}\text{kg}$ را نشان می‌دهد که با تندی $۴/۱۲\text{km/s}$ وارد جوّ زمین شده است. انرژی جنبشی این شهاب سنگ را به دست آورید. این انرژی را با انرژی جنبشی یک هواپیمای مسافربری به جرم $۷/۲۵ \times ۱۰^{۴}\text{kg}$ که با تندی ۹۳۶km/h در حرکت است مقایسه کنید.

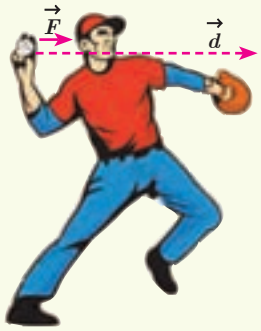
۲ حدود ۵۰۰۰۰ سال پیش شهاب سنگی در نزدیک آریزونای آمریکا به زمین برخورد کرده و چاله‌ای بزرگ از خود به جای گذاشته است (شکل روبه رو). با اندازه گیری‌های جدید (۲۰۰۵ میلادی) برآورد شده است که جرم این شهاب سنگ حدود $۱/۴۰ \times ۱۰^{۸}\text{kg}$ بوده و با تندی $۱۲/۰\text{km/s}$ به زمین برخورد کرده است.

انرژی جنبشی این شهاب سنگ هنگام برخورد به زمین چقدر بوده است؟ (خوب است بدانید انرژی آزاد شده توسط هر تُن TNT برابر $۴/۱۸ \times ۱۰^{۹}\text{J}$ است.)

۲ــ۲ و ۲ــ۳ کار انجام شده توسط نیروی ثابت و کار و انرژی جنبشی

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

(ب) (الف)



۴ ورزشکاری سعی می‌کند توپ بیسبالی به جرم ۱۴۵g را با بیشترین تندی ممکن پرتاب کند. به این منظور، ورزشکار نیرویی به بزرگی $F = ۷۵/۰\text{N}$ تا لحظهٔ پرتاب توپ و در امتداد جابه‌جایی $(d = ۱/۴۵\text{m})$ بر آن وارد می‌کند (شکل روبه‌رو). تندی توپ هنگام جدا شدن از دست ورزشکار چقدراست؟

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

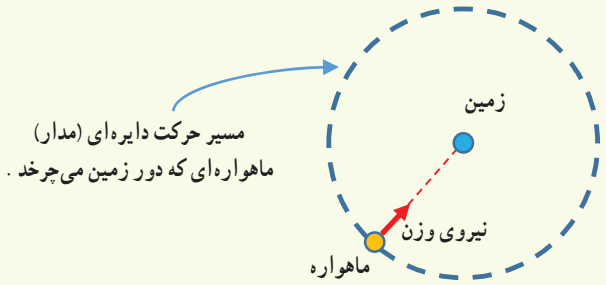
۶ برای آنکه نیروی خالصی، بتواند تندی جسم را از صفر به v برساند باید مقدار کار W را روی آن انجام دهد. اگر قرار باشد تندی این جسم از صفر به $۳v$ برسد کاری که روی جسم باید انجام شود چند برابر W است؟

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 گلولهٔ 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)

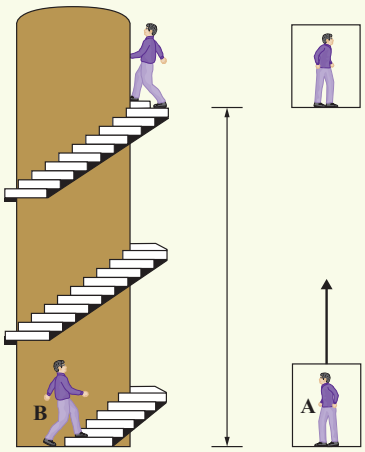


(ب)

۲ـ۴ 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 طبقهٔ 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 طبقهٔ سوم ساختمان مسافت کمتری پیموده است.

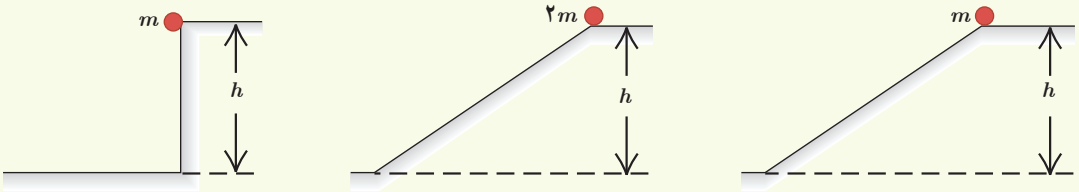
پ) کار نیروی وزن برای هر دو شخص در طول مسیر یکسان است.

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

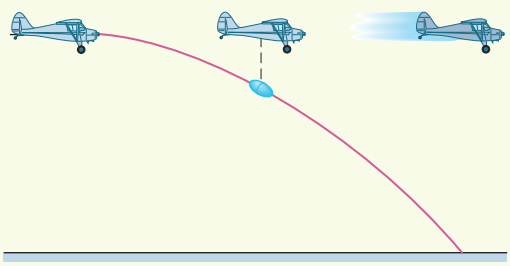
۱۲ در سه شکل زیر اجسامی از حالت سکون و ارتفاع h نسبت به سطح افق رها می‌شوند و نیروی اصطکاک و مقاومت هوا بر آنها وارد نمی‌شود. در کدام حالت، جسم

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

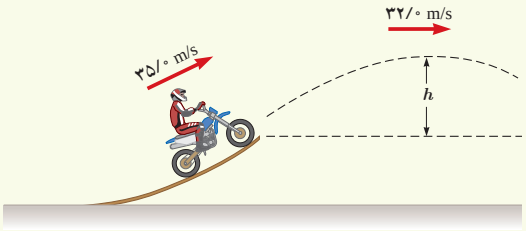
ب) تا هنگام رسیدن به پایین مسیر، بیشترین مقدار کار نیروی وزن روی آن انجام شده است؟



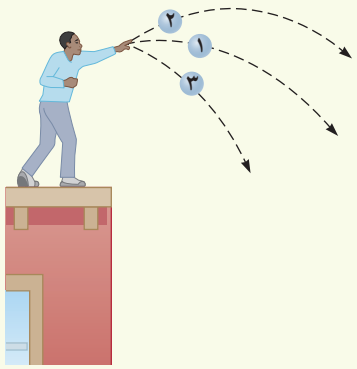
۱۳ در شکل روبه‌رو هواپیمایی که در ارتفاع ۲۲۵m از سطح زمین و با تندی ۱۹۸km/h پرواز می‌کند، بسته‌ای را برای کمک به آسیب دیدگان زلزله رها می‌کند. تندی بسته هنگام برخورد به زمین چقدر است؟ (از تأثیر مقاومت هوا روی حرکت بسته چشم‌پوشی کنید.)



۱۴ موتورسواری از انتهای سکویی مطابق شکل روبه‌رو، پرشی را با تندی ۳۵/۰m/s انجام می‌دهد. اگر تندی موتورسوار در بالاترین نقطهٔ مسیرش به ۳۲/۰m/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 روبه رو). 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 ۴۵/۰g از دهانهٔ تفنگی با تندی ۱/۲۲km/s و ارتفاع ۱/۶۲m از سطح زمین شلیک می‌شود. اگر گلوله با تندی ۰/۴۲۵km/s به زمین برخورد کند،

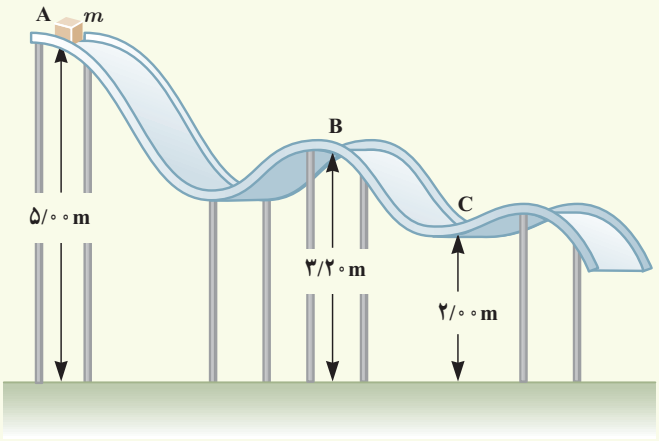
الف) در مدت حرکت گلوله کار نیروی مقاومت هوا چقدر است؟

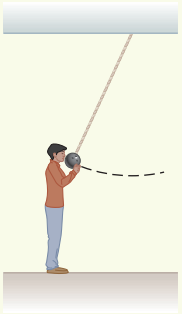
ب) مقدار به‌دست آمده در قسمت (الف) را با کار نیروی وزن مقایسه کنید.

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

الف) تندی جسم را در نقطهٔ B

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





۱۸ شکل روبه‌رو 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 تجربهٔ ساده ولی هیجان‌انگیز را درصورت امکان در کلاستان انجام دهید.)

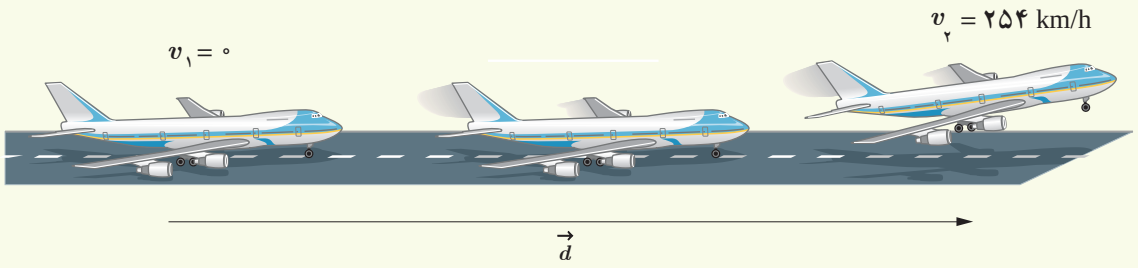
ب) اگر دانش‌آموز هنگام رها کردن گلوله، آن را هُل دهد، هنگام برگشت آن، چه اتفاقی می‌افتد؟

۲ــ۷ توان

۱۹ بالابری با تندی ثابت، باری به جرم $۶/۸۰ \times ۱۰^{۲}\text{kg}$ را در مدت ۱۸۶s تا ارتفاع ۷۸/۴m بالامی‌برد. 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 ۷۸/۵kg، در مدت زمان ۸۴/۰s از تعداد ۵۰ پله بالا می‌رود. توان متوسط مفید او چند وات است؟ ارتفاع هرپله را ۲۸/۵cm 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 $۲/۰۵ \times ۱۰^{۳}\text{m}$ جابه‌جایی در امتداد باند هواپیما، به تندی برخاستن $v_۲ = ۲۵۴\text{km/h}$ 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 این‌مدت،

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 $1/40\times10^{4}\,km$ خطوط لوله در نقاط مختلف کشور توزیع می‌شود. این خطوط در طول مسیر خود از مراکز انتقال متعددی می‌گذرند تا توان لازم را برای ادامهٔ راه به‌دست آورند. شکل زیر یکی از این مراکز را نشان می‌دهد که در ارتفاع $2/05\times10^{3}\,m$ 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 (81/2cm) توسط دو دستگاه پمپ (تلمبه) تا ارتفاع $2/70\times10^{3}\,m$ از سطح دریای آزاد فرستاده می‌شود. اگر بازده هر یک از پمپ‌های این مرکز ۲۸ درصد باشد[1] توان هر یک از آنها بر حسب مگاوات (MW) و اسب بخار (hp) چقدر است؟ (چگالی مواد نفتی را $8/60\times10^{2}\,kg/m^{3}$ بگیرید.)

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

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

فصل ۳

ویژگی‌های فیزیکی مواد

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

آشنایی با ویژگی‌های فیزیکی مواد در تمام شاخه‌های علوم، مهندسی و پزشکی اهمیت زیادی دارد. مطالعهٔ 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 می کنیم.

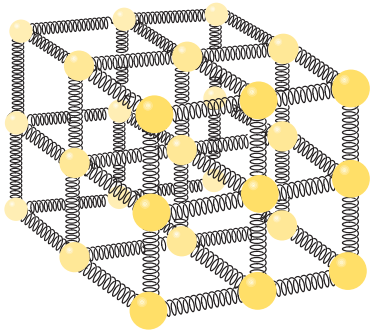
۳ــ۱ حالت‌های ماده

شکل ۳ــ۱ چهار حالت ماده در این تصویر وجود دارد. یخ(جامد)، آب(مایع)، هوا(گاز) و خورشید(پلاسما)

سال‌های قبل در درس علوم دیدید که به هر چیزی که فضا را اشغال کند (حجم داشته باشد) ماده می‌گوییم. مواد از ذره‌های ریزی به نام اتم یا مولکول ساخته شده‌اند. اندازهٔ اتم‌ها حدود یک تا چند انگستروم ($1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$) است و اندازهٔ مولکول‌ها به این بستگی دارد که از چند اتم ساخته شده باشند. اندازهٔ برخی از درشت مولکول‌ها، مانند بَسپارها (پلیمرها)، می‌تواند تا ۱۰۰۰ انگستروم نیز باشد. ذره‌های سازندهٔ مواد همواره در حرکت‌اند و به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. حالت ماده به چگونگی حرکت این ذره‌ها و اندازهٔ نیروی بین آنها بستگی دارد.

جامد، مایع و گاز سه حالت (فاز) آشنای ماده هستند[1] که در این فصل به بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی آنها خواهیم پرداخت. حالت چهارم ماده، پلاسما نامیده می‌شود که اغلب در دماهای خیلی بالا به وجود می‌آید. مادهٔ درون ستارگان و بیشتر فضای بین ستاره‌ای، آذرخش، شفق‌های قطبی، آتش و مادهٔ داخل لولهٔ تابان لامپ‌های مهتابی از پلاسما تشکیل شده است (شکل ۳ــ۱).

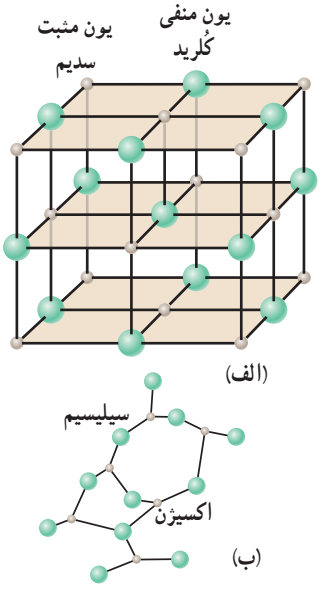
جامد : هزاران سال است که بشر از مواد جامد بهره می‌گیرد. اصطلاح‌های عصر حجر، عصر برنز، و عصر آهن اهمیت مواد جامد را در توسعهٔ تمدن‌های پیشین نشان می‌دهد. تجربهٔ روزمره نشان می‌دهد که جسم جامد، حجم و شکل معینی دارد. ذرات جسم جامد به سبب نیروهای الکتریکی که به یکدیگر وارد می‌کنند در کنار یکدیگر می‌مانند. این ذرات در مکان‌های معینی نسبت به یکدیگر قرار دارند و در اطراف این مکان‌ها، نوسان‌های بسیار کوچکی دارند.



شکل ۳ــ۲ مدلی از ساختار یک جامد فلزی که از میلیاردها میلیارد بخش، مانند این تشکیل شده است.

وقتی جامدی مانند یک تکه آهن، گرما می‌گیرد محدوده و دامنهٔ این نوسان‌ها بیشتر می‌شود و جسم جامد منبسط می‌شود. برای درک بهتر ساختار جسم جامد، معمولاً مدلی مطابق شکل ۳ــ۲ ارائه می‌دهند و فرض می‌کنند که ذرات آن توسط فنرهایی به یکدیگر متصل‌اند. اگر این ذرات نسبت به وضعیت تعادل، به هم نزدیک‌تر یا از هم دورتر شوند، نیروی کشسانی بین فنرها آنها را به وضع تعادل بر می‌گرداند و جسم جامد، شکل و اندازهٔ اولیه‌اش را حفظ می‌کند.

اتم‌های برخی از جامدها در طرح‌های منظمی مانند شکل‌های ۳ــ۳ــ الف کنار هم قرار می‌گیرند. جامدهایی را که در یک الگوی سه‌بعدی تکرارشونده از این واحدهای منظم ساخته می‌شود **جامد بلورین** می‌نامیم. فلزها، نمک‌ها، الماس، یخ و بیشتر مواد معدنی جزو جامدهای بلورین‌اند. وقتی مایعی را به آهستگی سرد کنیم اغلب جامدهای بلورین تشکیل می‌شوند. در این *فرایند سردسازی آرام*، ذرات سازندهٔ مایع فرصت کافی دارند تا در طرح‌های منظم خود را مرتب کنند.



شکل ۳ــ۳ (الف) ساختار بلورین NaCl، که در آن یون‌های سدیم و یون‌های کلرید به صورت یک در میان در گوشه‌های یک مکعب قرار گرفته‌اند. (ب) ذرات سازندهٔ یک جامد بی شکل، مانند شیشه که در طرحی نامنظم در کنار هم قرار گرفته‌اند.

ذرات سازندهٔ **جامدهای بی‌شکل (آمُورف)** برخلاف جامدهای بلورین، در طرح‌های منظمی کنار هم قرار ندارند. وقتی مایعی به سرعت سرد شود معمولاً جامد بی‌شکل به وجود می‌آید. 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 می‌مانند. شیشه، مثالی از یک جامد بی‌شکل است (شکل ۳ــ۳ــ ب).

۱ــ در این کتاب تمایزی بین فاز (phase) و حالت (state) ماده قائل نشده‌ایم.

فعالیت ۳ـ۱

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 می گیرند تا بدون سوراخ شدن فلز، بر روی آن نقش و نگارهای متنوعی ایجاد کنند.

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 ۳ـ۴). 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 ۳ـ۵) و برخورد آنها با ذرات سازندهٔ نمک و جوهر، این گونه مواد در آب پخش می‌شوند.

شکل ۳ـ۴ ذرات سازندهٔ جوهر به تدریج در آب پخش می‌شوند.

شکل ۳ـ۵ طرحی از حرکت نامنظم و کاتوره‌ای یک مولکول آب

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 ده‌ها 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.

۱ـ Friedrich Reinitzer (1827-1927)

شکل ۳ــ۷ حرکت نامنظم ذرات گاز درون یک بادکنک

گاز : 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[1]. فاصلهٔ میانگین مولکول‌های گاز در مقایسه با اندازهٔ آنها، خیلی بیشتر است. مثلاً اندازهٔ مولکول‌های هوا بین ۱ تا ۳ آنگستروم است در حالی که فاصلهٔ میانگین آنها در شرایط معمولی در حدود ۳۵Å است (شکل ۳ــ۶).

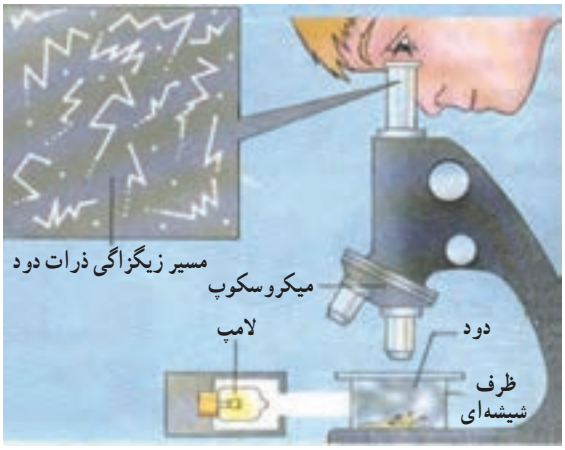
فعالیت ۳ــ۲

یک سرنگ، مثلاً ۱۰ سی سی، اختیار کنید. پیستون آن را بکشید تا هوا وارد سرنگ شود. انگشت خود را محکم روی دهانهٔ 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 تراکم‌پذیری گازها و مایع‌ها می‌گیرید؟ توضیح دهید.

حرکت براونی : شکل ۳ــ۷ 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 می نامند.

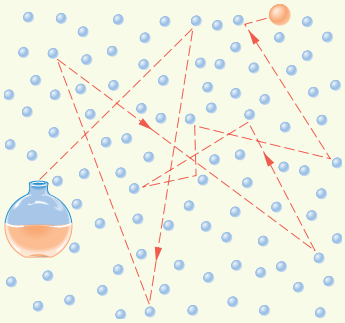
مشاهدهٔ بیشتر توسط میکروسکوپ نشان می‌دهد که ذره‌های دود برخوردهای اندکی با یکدیگر دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت باید ذرات دیگری که قابل مشاهده نیستند با آنها برخورد کرده و مسیر حرکت آنها را تغییر داده باشند. این ذره‌های مشاهده‌ناپذیر، همان مولکول‌های هوا هستند. حرکت زیگزاگی و نامنظم ذره‌های دود نشانگر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



شکل ۳ــ۷ آزمایشی برای مشاهدهٔ حرکت براونی ذرات دود درون یک ظرف شیشه‌ای

۱ــ تندی مولکول‌های هوا در دمای اتاق حدود ۵۰۰ m/s است.

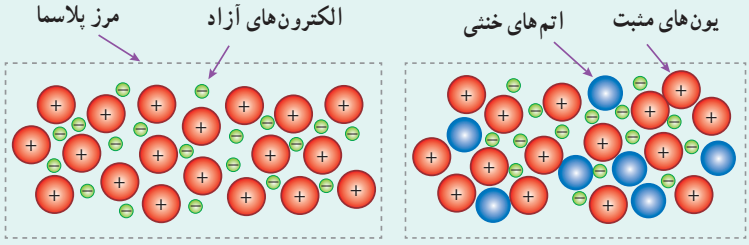
پرسش ۳ـ۱



الف) وقتی درِ شیشهٔ 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 پدیدهٔ پخش در گازها سریع‌تر از مایع‌ها رخ می‌دهد؟

ب) هوای اطراف کرهٔ زمین، آمیزه‌ای از نیتروژن (۷۸ درصد)، اکسیژن (۲۱درصد)، کربن‌دی‌اکسید، 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 کرهٔ زمین توضیح دهید.

خوب است بدانید



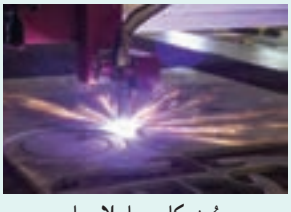
(ب) پلاسمای کامل ــ یونیده (الف) پلاسمای ضعیف ــ یونیده

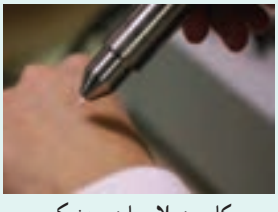
اگر این مطلب را زیر نور لامپ مهتابی می‌خوانید برای یافتن پلاسما لازم نیست راه دوری بروید. مادهٔ داخل لولهٔ تابان لامپ مهتابی، پلاسماست. وقتی گازی تا دماهای خیلی زیاد (چندین هزار درجهٔ سلسیوس به بالا) گرم شود، یک یا چند الکترون از هر اتم آزاد می‌شود. مادهٔ حاصل، مجموعه‌ای از الکترون‌های آزاد، یون‌ها و 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).

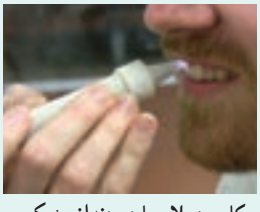
قسمت عمده‌ای از جهان قابل مشاهده، از پلاسما تشکیل شده است. خورشید، ستارگان و بیشتر فضای بینِ ستاره‌ای، برخی از لایه‌های بالایی جو زمین، آذرخش، شفق‌های قطبی و شعله‌های آتش از جنس پلاسما هستند. پلاسما به طور طبیعی روی زمین به ندرت یافت می‌شود. در انفجارهای هسته‌ای و شیمیایی، راکتورهای همجوشی هسته‌ای و ... 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 تخلیهٔ الکتریکی تابش می‌کند، سال‌هاست به عنوان چشمه‌های نور در زندگی روزمرهٔ ما به کار می‌روند.

پلاسما، بر خلاف 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 جملهٔ این کاربردها می‌توان به نمایشگرهای صفحه تخت، ابزارهای جوش، برش و سوراخ‌کاری، چشمه‌های نور و مبدل‌های انرژی، سوزن‌های پلاسمایی و ... اشاره کرد (شکل‌های زیر). در چند دههٔ اخیر، فیزیک پلاسما به یکی از رشته‌های روبه رشد و پرکاربرد فیزیک تبدیل شده است.

جوشکاری با پلاسما


بُرش‌کاری با پلاسما

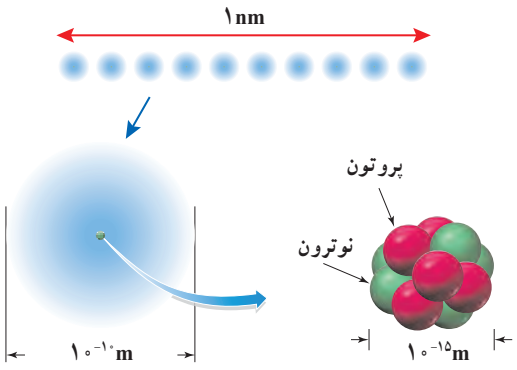

کاربرد پلاسما در پزشکی


کاربرد پلاسما در دندانپزشکی

۳ـ۲ 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 می‌کوشیم 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*[1] گرفته شده و به معنای یک میلیاردم است. پس یک نانومتر (۱nm) برابر یک میلیاردم متر یا 10^{-9} متر است. برای اینکه تصوری از این مقیاس داشته باشید، می‌توان گفت طول ده اتم کربن درکنار یکدیگر، تقریباً برابر با یک نانومتر است. (شکل ۳ـ۸).



شکل ۳ـ۸ ابعاد هستهٔ اتم کربن در حدود یک فمتومتر، قطر اتم کربن در حدود یک انگستروم و طول ۱۰ اتم کربن که کنار هم قرار گرفته باشند حدود یک نانومتر است.

تمرین ۳ـ۱

در مکعبی به ابعاد یک نانومتر، چه تعداد اتم را می‌توان جای داد؟ اگر ابعاد مکعب ۱۰ نانومتر باشد چطور؟ قطر هر اتم را $1/0\times10^{-10}$m فرض کنید.

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

نقطهٔ ذوب طلا (۱۰۶۴°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 ۱۰۶۴°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 قطعهٔ 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 ۴۲۷°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

(۱۹۸۸ـ۱۹۱۸میلادی)، یکی از فیزیک‌دانان مشهور قرن بیستم است که در آمریکا به‌دنیا آمد. وی در سال ۱۹۶۵ جایزهٔ 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 نانوفضا (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، همهٔ کتاب‌هایی که در طول تاریخ نوشته شده‌اند را می‌توان در مکعبی به ضلع ۰/۲ میلی متر، ذخیره کرد (همان‌گونه که از عنوان سخنرانی او پیداست). فاینمن همچنین در سخنرانی خود، پیش‌بینی کرد که با کوچک شدن مواد تا گسترهٔ 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 پرسش نهایی باکی ندارم. آیا می‌توانیم اتم‌ها را تا کوچک‌ترین مقیاس به ترتیب دلخواهمان مرتب کنیم؟»

۱ـ dwarf

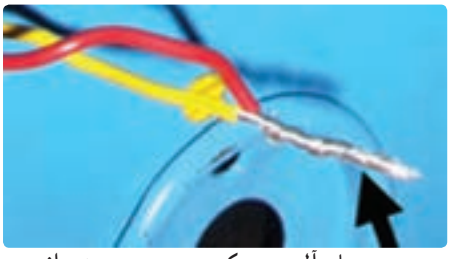
پرسش ۳ـ۲

به نظر شما چرا در کتاب‌های مرجع دمای ذوب طلا را $1064^{\circ}C$ 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 نقطهٔ ذوب طلا، با کم‌شدن اندازهٔ آن تقریباً ثابت می‌ماند. اما اگر اندازهٔ 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 : نقطهٔ 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.

نکتهٔ 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 همهٔ 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 نانولایه‌ها نیز همچون نانو ذره‌ها، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

مثال مفهومی ۳ـ۱



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[1] تبدیل می‌شود. از آنجا که آلومینیم اکسید، عایق بسیار خوبی است و رسانای الکتریسیته نیست پس چرا وقتی دو سرِ 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 مرتبهٔ 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!

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

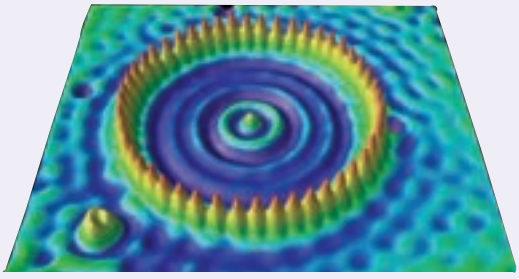
فعالیت ۳ــ۳

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 نتیجهٔ 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 جایزهٔ 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 مرتبهٔ نانونیوتون تا پیکونیوتون، مورد استفاده قرار داد.

(الف)



(ب)

۳ــ۳ نیروهای بین مولکولی

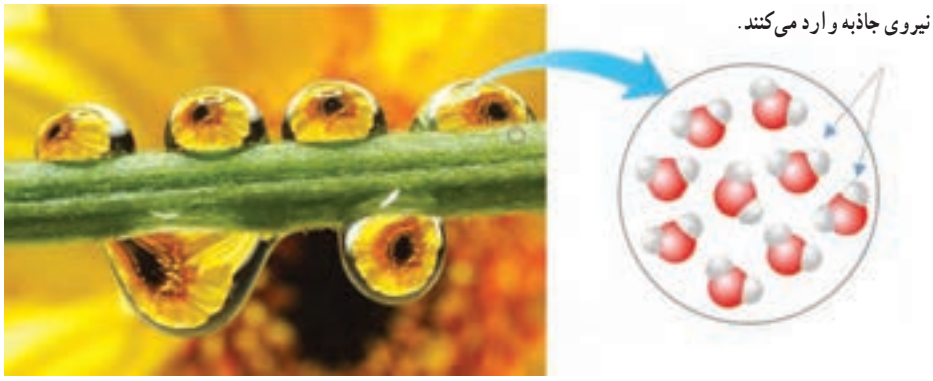
پیش از این با انجام فعالیت ۳ــ۲ دیدید که متراکم کردن آب درون سرنگ عملاً امکان‌پذیر نیست. برای توجیه پدیده‌هایی مشابه این، باید به نیروهای بین مولکولی در یک مایع توجه کنیم. به‌طورکلی، نیروهای بین مولکول‌های همسان مانند نیروهای بین مولکول‌های آب را نیروی **هم‌چسبی** می‌نامیم (شکل ۳ــ۹). وقتی سعی می‌کنیم فاصلهٔ بین مولکول‌های مایع را کم کنیم نیروی دافعهٔ بزرگی بین آنها ظاهر می‌شود که از تراکم‌پذیری مایع جلوگیری می‌کند. همین‌طور وقتی مولکول‌های مایع را کمی از هم دور کنیم، نیروی جاذبهٔ بین آنها ظاهر می‌شود. این جاذبه در قطرهٔ آب آویزان از شاخهٔ درخت دیده می‌شود.

نیروهای بین مولکولی کوتاه‌بُرد هستند، یعنی وقتی فاصلهٔ بین مولکول‌ها چند برابر فاصلهٔ بین‌مولکولی شود، نیروهای بین مولکولی بسیار کوچک و عملاً صفر خواهند شد.

۱ــ Atomic Force Microscope (AFM)

۲ــ Scanning Tunneling Microscope (STM)

مولکول‌های آب به یکدیگر
نیروی جاذبه وارد می‌کنند.

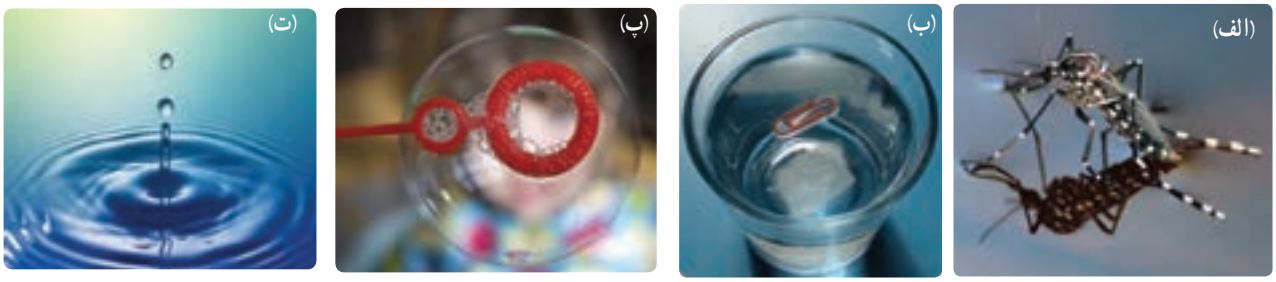


شکل ۳ــ۹ قطره‌های شبنمی که روی شاخ و برگ درختان در نور خورشید صبحگاهی می‌درخشند، نشانه‌ای از نیروی جاذبهٔ بین مولکول‌های آب است.

پرسش ۳ــ۳

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

کشش سطحی : نشستن یا راه رفتن برخی حشره‌ها روی سطح آب (شکل ۳ــ۱۰ــ الف)، شناور ماندن گیرهٔ فلزی کاغذی روی سطح آب (شکل ۳ــ۱۰ــ ب) و تشکیل حباب‌های آب و صابون (شکل ۳ــ۱۰ــ 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 پوستهٔ 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 ۳ــ۱۰ــ 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 ۳ــ۱۰ (الف) نشستن حشره روی سطح آب، (ب) قرارگرفتن گیرهٔ فلزی روی سطح آب، (پ) تشکیل حباب‌های آب و صابون و (ت) قطره‌های کروی آب در حال سقوط آزاد، جلوه‌هایی از کشش سطحی هستند.

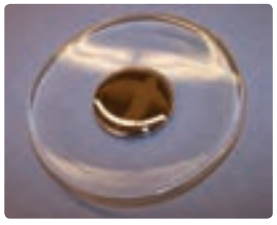
فعالیت ۳ـ۴

الف) سعی کنید یک سوزن ته گرد یا گیرهٔ 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.

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



شکل ۳ـ۱۱ (الف) پخش آب روی سطح شیشه (ب) قطره‌ای شدن جیوه روی سطح شیشه

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 ۳ـ۱۱ـ الف می‌بینیم که آب، سطح شیشهٔ 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 ۳ـ۱۱ـ 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.)

پرسش ۳ـ۴

شکل روبه‌رو خروج قطره‌های روغن با دمای متفاوت را از دهانهٔ 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 ۳ـ۵

یک طرف یک تکه شیشهٔ کوچک (با ابعادی حدود ۱۰ cm در ۱۰ cm) را کمی بالاتر از شعلهٔ 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 شدهٔ 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. مشاهدهٔ 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.)

فعالیت ۳ــ۶

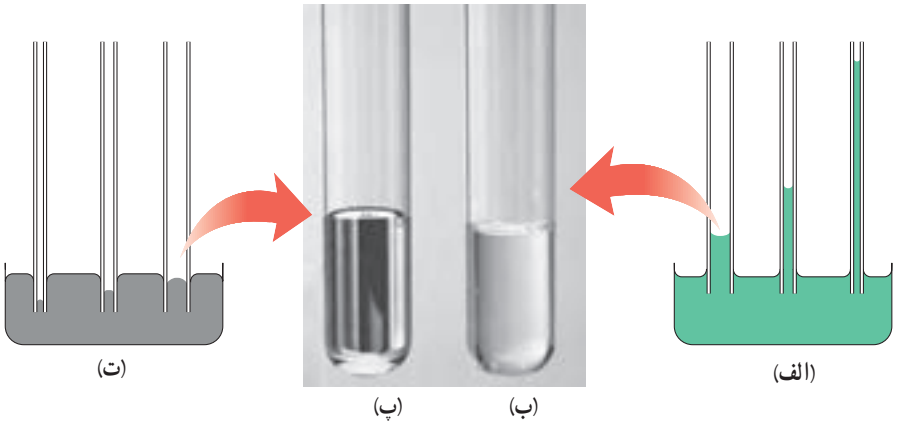
این فعالیت به شما کمک می‌کند تا درک بهتری از نیروی دگرچسبی به دست آورید. به این منظور از یک لیوان پر از آب، یک کارت بانکی و تعدادی وزنه چند گرمی یا سکه‌های پول استفاده کنید. ابتدا مطابق شکل الف، کارت را طوری روی لبهٔ لیوان قرار دهید که تنها نیمی از آن با آب در تماس باشد. وزنه‌های چند گرمی را روی قسمتی از کارت قرار دهید که با آب در تماس نیست (ابتدا وزنه ۵ گرمی، سپس ۱۰ گرمی و...). نتیجهٔ مشاهدهٔ 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. نتیجهٔ مشاهده خود را در گروه خود به بحث بگذارید.

(الف) (ب) (پ)

اثر مویینگی : لوله‌هایی که قطر داخلی آنها حدود یک دهم میلی‌متر (۰/۱ mm ~) باشد، معمولاً لولهٔ مویین نامیده می‌شوند. واژهٔ مویین به معنی «مُو مانند» است. آزمایش نشان می‌دهد اگر چند لولهٔ مویین شیشه‌ای و تمیز را وارد یک ظرف آب کنیم، آب در لوله‌های مویین بالا می‌رود و سطح آن بالاتر از سطح آب ظرف قرار می‌گیرد. همچنین هرچه قطر لولهٔ مویین کمتر باشد ارتفاع ستون آب در آن بیشتر است. افزون بر اینها سطح آب در بالای لوله‌های مویین فرورفته است.

اگر همین آزمایش‌ها را با جیوه انجام دهیم مشاهده می‌کنیم که جیوه در لوله‌های مویین مقداری بالا می‌رود ولی سطح آن پایین‌تر از سطح جیوهٔ ظرف قرار می‌گیرد. همچنین هرچه قطر لولهٔ مویین کمتر باشد ارتفاع ستون جیوه در آن کمتر است. افزون بر اینها سطح جیوه در لولهٔ مویین برآمده است. اثر مویینگی در لوله‌های با قطر داخلی بزرگ‌تر از لوله‌های مویین نیز قابل مشاهده است. شکل‌های ۳ــ۱۲ــ الف و ب، اثر مویینگی را برای آب و شکل‌های ۳ــ۱۲ــ پ و ت اثر مویینگی را برای جیوه، در چنین لوله‌هایی نشان می‌دهد.



(الف) (ب) (پ) (ت)

شکل ۳ــ۱۲ (الف) و (ب) اثر مویینگی برای آب (پ) و (ت) اثر مویینگی برای جیوه

برای توجیه فیزیکی تفاوت اثر مویینگی آب و جیوه، باید به نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی توجه کرده و اندازهٔ 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 ۳ــ۱۲ــ 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 ۳ــ۱۲ــ ت سطح جیوه در لولهٔ مویین پایین‌تر از سطح جیوه درون ظرف قرار می‌گیرد.

فعالیت ۳ــ۷

در ساختن دیوارهای ساختمان باید اثر مویینگی در نظر گرفته شود، زیرا تراوش آب از منفذهای مویین 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.

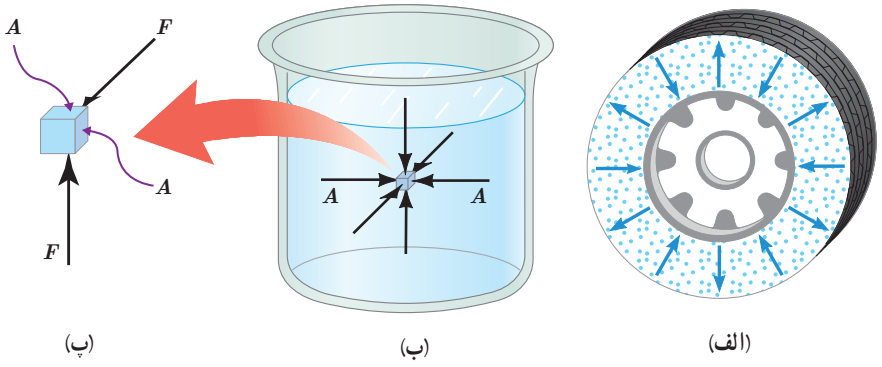
تحقیق کنید در معماری سنتی ایران به جای قیراندود کردن، چگونه از نفوذ آب به داخل سازه‌ها جلوگیری می‌کردند.

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

۳ــ۴ فشار در شاره‌ها

وقتی شاره‌ای (مایع یا گاز) ساکن است، به هر سطحی که با آن در تماس باشد، مانند جدارهٔ یک ظرف یا سطح جسمی که در شاره غوطه‌ور است، نیرویی عمودی وارد می‌کند (شکل ۳ــ۱۳). 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 ۳ــ۱۳ (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 اندازهٔ نیروی عمودی وارد بر این سطح به مساحت آن تعریف می‌شود :

$$P=\frac{F}{A} \qquad (۱ـ۳)$$

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

$$۱\text{Pa}=۱\text{N}/۱\text{m}^۲$$

مثال ۳ـ۲

یک زیردریایی تفریحی در اعماق اقیانوسی به آرامی حرکت می‌کند (شکل روبه‌رو). این زیردریایی تعدادی پنجرهٔ کوچک دایره‌ای‌شکل به شعاع ۰/۴۰ m دارد.

اگر فشار آب در محل هر یک از این پنجره‌ها برابر $۹/۰\times۱۰^۵\text{Pa}$ باشد، بزرگی نیروی عمودی که آب بر سطح خارجی یکی از این پنجره‌ها وارد می‌کند چقدر است؟

پاسخ : مساحت پنجره برابر است با :

$$A=\pi r^۲=۳/۱۴\times(۰/۴۰\,\text{m})^۲=۰/۵۰\,\text{m}^۲$$

به این ترتیب از رابطهٔ (۳ـ۱) داریم :

$$F=PA=(۹/۰\times۱۰^۵\text{Pa})\times(۰/۵۰\,\text{m}^۲)=۴/۵\times۱۰^۵\text{N}$$

این نیرو تقریباً معادل وزن جسمی به جرم $۴/۵\times۱۰^۴\text{kg}$ است!

محاسبهٔ 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 ۳ـ۱۴ دیدید که با افزایش عمق از سطح شاره، فشار ناشی از شاره نیز افزایش می‌یابد. در ادامه می‌خواهیم یک رابطهٔ کلی برای محاسبهٔ فشار در هر نقطهٔ دلخواه درون یک شارهٔ ساکن به دست آوریم. به این منظور، فرض می‌کنیم شتاب گرانش g و چگالی شاره یکنواخت و برابر ρ باشد.

شکل ۳ـ۱۴ با باز کردن در بطری، آب از سوراخ‌های ایجادشده در بطری، با فشار متفاوت خارج می‌شود. سرعت خروج آب از کدام سوراخ بیشتر است؟

در شکل ۳ـ۱۵ـ 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 ۳ـ۱۵ـ ب نشان داده شده است. چون شاره در حال تعادل است، نیروها متوازن‌اند و برایند آنها صفر است. بنابراین از قانون دوم نیوتون برای نیروهای در راستای قائم داریم :

$$F_۲=F_۱+mg$$

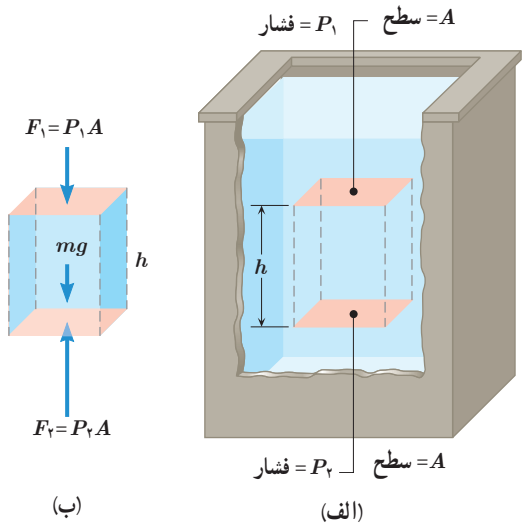
$$P_۲A=P_۱A+mg$$

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

$$P_۲=P_۱+\rho gh \qquad (۲_۳)$$

معمولاً رابطهٔ ۳ــ۲ را بر حسب عمق از سطح شاره بیان می‌کنند (شکل ۳ــ۱۶). به این منظور نقطهٔ ۱ را در سطح شاره می‌گیرند که فشار برابر $P_۰$ است[۱]. نقطهٔ ۲ را در هر جایی درون شاره می‌توان گرفت. فشار در این نقطه را با p نمایش دهیم. به این ترتیب داریم :

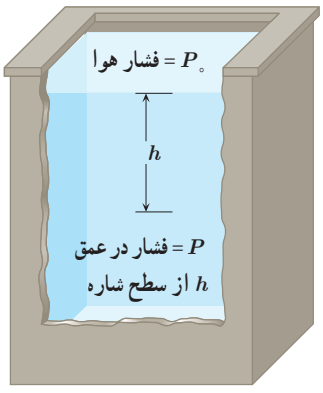
$$P=P_۰+\rho gh \qquad (۳_۳)$$



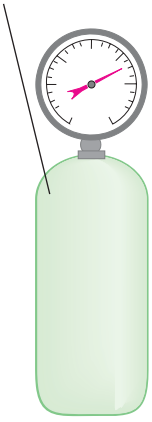
شکل ۳ــ۱۵ (الف) بخشی از شاره ساکن (ب) نیروهای وارد بر این بخش از شاره در راستای قائم.

این رابطه نشان می‌دهد فشار در عمق h از سطح شاره، به اندازهٔ ρgh از فشار $P_۰$ در سطح شاره بیشتر است. همان‌طور که خواهیم دید فشار در سطح دریای آزاد، حدود $۱/۰۱۳\times۱۰^۵$ پاسکال (Pa) است و به آن ۱ اتمسفر (atm) نیز می‌گویند. رابطه‌های ۳ــ۲ و ۳ــ۳ برای همهٔ 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 ۳ــ۱۷، اختلاف فشار در نقاط مختلف داخل محفظه ناچیز است.

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



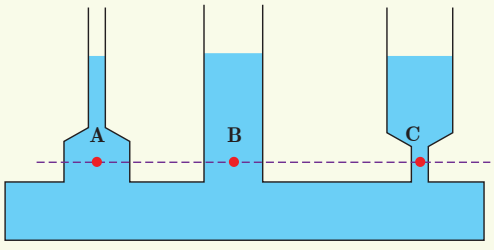
شکل ۳ــ۱۶



شکل ۳ــ۱۷

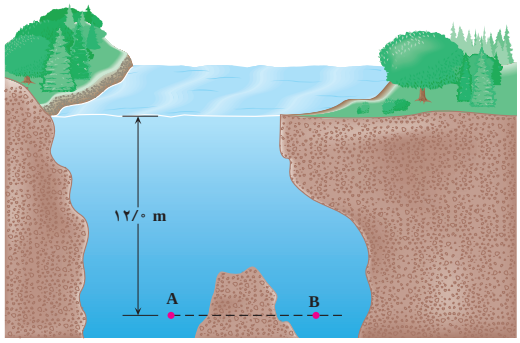
پرسش ۳ــ۵

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 رابطهٔ ۳ــ۳ توضیح دهید.



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

مثال ۳ـ۳



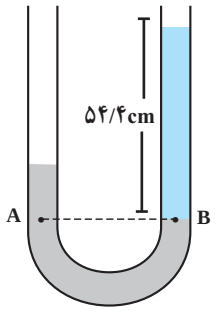
نقاط A و B در عمق یکسانی از سطح آب یک دریاچه قرار گرفته‌اند. فشار در نقطهٔ A چقدر است؟ در نقطهٔ B چطور؟
چگالی آب دریاچه را $۱/۰۰\times۱۰^{۳}\,kg/m^{۳}$ و فشار هوا در سطح دریاچه را $۱/۰۱\times۱۰^{۵}\,Pa$ در نظر بگیرید.

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۳ـ۳، فشار در نقطهٔ A برابر است با :

$$P = P_{۰} + \rho gh = ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}(Pa) + (۱/۰۰ \times ۱۰^{۳}\ kg/m^{۳})(۹/۸۱\ N/kg)\ (۱۲/۰m) = ۲/۱۹ \times ۱۰^{۵}Pa$$

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

مثال ۳ـ۴



در یک لولهٔ U شکل، مقداری جیوه قرار دارد. در شاخهٔ سمت راست لوله آن‌قدر آب می‌ریزیم تا ارتفاع آب به ۵۴/۴cm 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، هم ترازند، بنابراین $P_A = P_B$ است.
به این ترتیب می‌توان نوشت :

$$P_{۰} + \rho_m g h_m = P_{۰} + \rho_w g h_w \Rightarrow \rho_m h_m = \rho_w h_w$$

$$(۱۳/۶\times۱۰^{۳}kg/m^{۳}) \times h_m = (۱/۰۰\times۱۰^{۳}kg/m^{۳})\times ۵۴/۴cm \Rightarrow h_m = ۴/۰۰cm$$

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

مثال ۳ـ۵

اختلاف بین فشار هوای بالا و پایین برج آزادی، با ارتفاع ۴۵ متر، چقدر است؟ چگالی هوا را تقریباً $۱/۰kg/m^{۳}$ بگیرید.

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۳ـ۲ داریم :

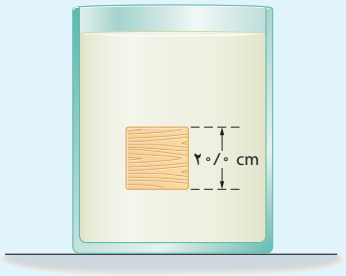
$$P_{۲} = P_{۱} + \rho gh \Rightarrow P_{۲} - P_{۱} = \rho gh$$

$$= (۱/۰kg/m^{۳})(۹/۸۱N/kg)(۴۵m) = ۴/۴\times۱۰^{۲}Pa$$

تمرین ۳ــ ۲

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 پردهٔ گوش این شناگر وارد می‌شود چند نیوتون است؟ فشار هوای محیط را $1/01 \times 10^5 Pa$ بگیرید.

تمرین ۳ــ ۳

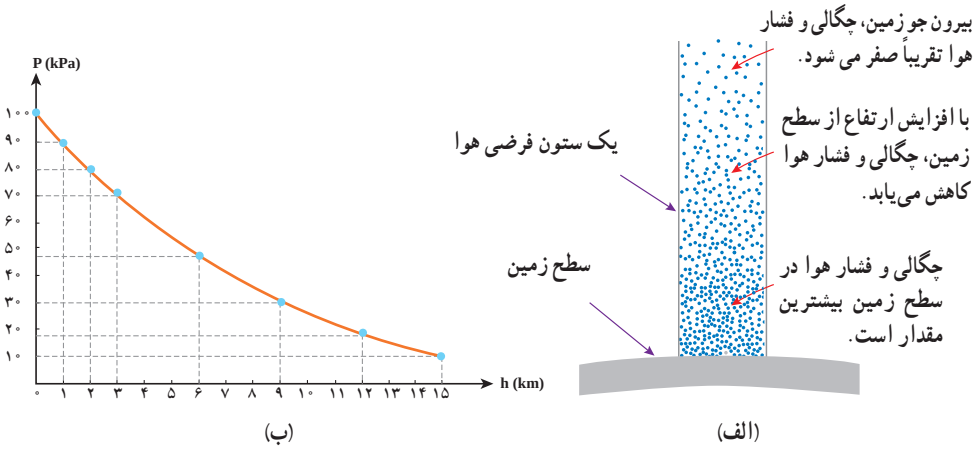


جسمی مکعبی به طول ضلع ۲۰/۰cm درون شاره‌ای غوطه‌ور و در حال تعادل است (شکل روبه رو). فشار در بالا و زیر جسم به ترتیب برابر ۱۰۵/۰ و ۱۰۶/۸ کیلوپاسکال است.

چگالی شاره چند کیلوگرم بر متر مکعب است؟ (راهنمایی : از رابطهٔ ۳ــ۲ استفاده کنید.)

برای محاسبهٔ اختلاف فشار بین دو نقطه از هوا که اختلاف ارتفاع قابل توجهی دارند، دیگر نمی‌توان از رابطهٔ ۳ــ۲ استفاده کرد. برای مثال، اختلاف فشار قلهٔ دماوند و سطح دریا با استفاده از این رابطه، حدود ۷۴ kPa به دست می‌آید در حالی که مقدار واقعی آن نزدیک به ۵۰ 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 ۳ــ۱۸ــ الف). محاسبه‌های دقیق‌تر نشان می‌دهند که تغییر فشار برحسب ارتفاع از سطح زمین، مطابق نمودار شکل ۳ــ۱۸ــ ب است. نیروی جاذبهٔ زمین سبب می‌شود که لایه‌های زیرین هوا نسبت به لایه‌های بالایی هوا متراکم‌تر شوند. درنتیجه هرچه به سطح زمین نزدیک‌تر می‌شویم، چگالی و فشار هوا بیشتر می‌شود.



شکل ۳ــ۱۸ (الف) با افزایش ارتفاع از سطح زمین، چگالی و فشار هوا کاهش می‌یابد. (ب) نمودار فشار هوا برحسب ارتفاع از سطح دریای آزاد.

تمرین ۳ــ۴

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

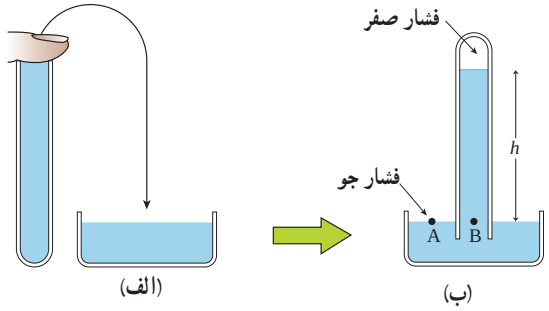
$$1\,bar = 1/000 \times 10^5\,N/m^2 = 1/000 \times 10^5 Pa$$

یک ستون به سطح مقطع $1m^2$ در نظر بگیرید که از سطح دریای آزاد تا بالاترین بخش جوّ زمین ادامه می‌یابد (شکل روبه‌رو). اگر فشار هوا را در سطح دریا 1bar در نظر بگیریم، چند کیلوگرم هوا در این ستون فرضی وجود دارد؟ با توجه به شکل ۳ــ۱۸ــ 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 توریچلّی فیزیک‌دان ایتالیایی اختراع شد.

جوسنج شامل یک لولهٔ شیشه‌ای بلند (به طول تقریبی ۸۰ سانتی‌متر) با یک سر بسته است که از جیوه پر شده (شکل ۳ــ۱۹ــالف) و سپس در یک ظرف محتوی جیوه به طور وارون قرار گرفته است (شکل ۳ــ۱۹ــ ب)[1]. فضای خالی بالای ستون جیوه تنها محتوی بخار جیوه است که فشار آن ناچیز بوده و در عمل برابر صفر فرض می‌شود.

اونجلیستا توریچلّی (۱۶۴۷ــ۱۶۰۸م) یکی از فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانان ایتالیایی و از شاگردان گالیله بود. هرچند توریچلّی 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. توریچلی همچنین به کمک این ابزار ساده توانست در بالای ستون جیوهٔ درون لوله، خلأ نسبی ایجاد کند که به خلأ توریچلّی شناخته می‌شود.



شکل ۳ــ۱۹ جوسنج جیوه‌ای که برای اندازه‌گیری فشار جو به کار می‌رود.

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

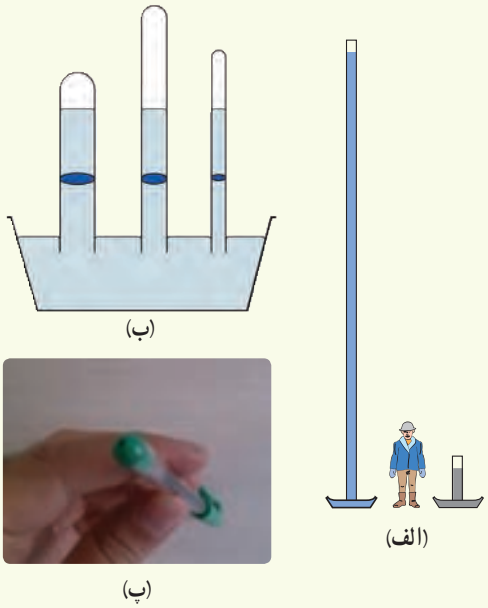
$$P_A = P_B \Rightarrow P_0 = 0 + \rho gh \Rightarrow P_0 = \rho gh \qquad (۳ــ۴)$$

بنابراین جوسنج، فشار جو را به طور مستقیم از روی ارتفاع ستون جیوه نشان می‌دهد که در سطح دریای آزاد این ارتفاع حدود 760mm است. به همین دلیل در بسیاری موارد فشار اندازه‌گیری شده برحسب میلی‌متر جیوه (mmHg) یا سانتی‌متر جیوه (cmHg) بیان می‌شود[2].

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

۲ــ به افتخار توریچلّی، 1mmHg را یک تور (torr) می‌نامند.

پرسش ۳ـ۶


(ب)

(الف)

(پ)

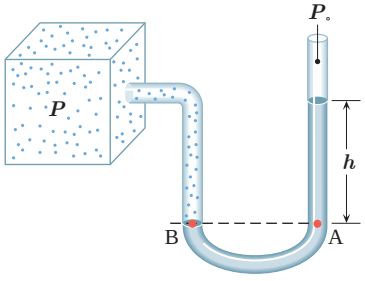
الف) توضیح دهید چرا توریچلّی در آزمایش خود ترجیح داد به جای آب از جیوه استفاده کند؟ (ممکن است شکل الف بتواند در پاسخ به این پرسش به شما کمک کند.)

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 ورقهٔ کاغذ پخش می‌شود. در بدنهٔ لاکی یا درپوش بالایی این نوع قلم‌های خودکار، سوراخ‌ریزی ایجاد می‌کنند (شکل پ). دلیل این کار را توضیح دهید.

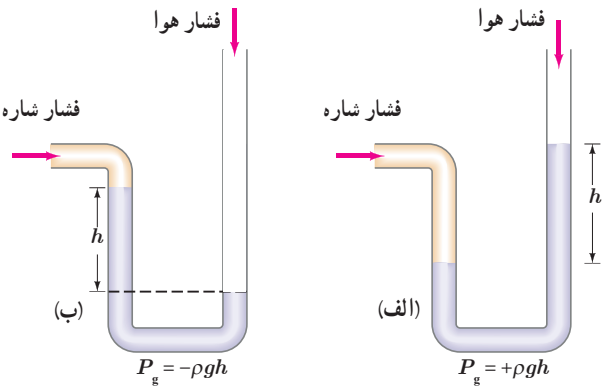
فشارسنج (مانومتر) : یکی از وسیله‌های ساده برای اندازه‌گیری فشار یک شارهٔ محصور، فشارسنج U شکل است. شکل ۳ـ۲۰ لولهٔ باز U شکلی را نشان می‌دهد که حاوی مایعی به چگالی ρ، اغلب جیوه یا آب است. انتهای راست لوله، باز و با فشار جو p_0 در ارتباط است. انتهای چپ لوله، به ظرفی که فشار P آن باید اندازه‌گیری شود وصل شده است. فشار در نقطهٔ A برابر $P_0+\rho gh$ است. فشار در نقطهٔ B برابر P است. چون نقاط A و B هم‌ترازند، فشار آنها با یکدیگر برابر است. به این ترتیب داریم :

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



شکل ۳ـ۲۰ فشارسنج با لولهٔ باز که برای اندازه‌گیری فشار یک شارهٔ محصور استفاده می‌شود.

در رابطهٔ 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[1]. بدین ترتیب در شکل ۳ـ۲۰ فشار پیمانه‌ای را به سادگی می‌توان از رابطهٔ $P_g = \rho gh$ به دست آورد. اگر فشار شاره بیشتر از فشار جو باشد، فشار پیمانه‌ای مثبت است (شکل ۳ـ۲۱ـ الف). در خلأ نسبی و شاره‌ای که فشار آن کمتر از فشار جو است، فشار پیمانه‌ای منفی است (شکل ۳ـ۲۱ـ ب).



شکل ۳ـ۲۱ (الف) فشار شاره بیشتر از فشار جو است. (ب) فشار شاره کمتر از فشار جو است.

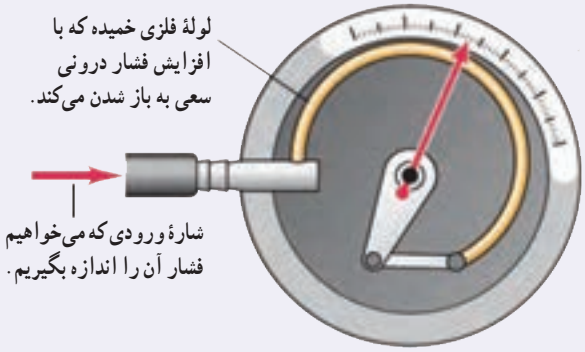
۱ـ اندیس g از سر حرف واژهٔ gauge به معنای پیمانه گرفته شده است.

فعالیت ۳ــ۸

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 فشارسنج ها برای اندازه‌گیری فشار یک شاره، از یک لولهٔ خمیدهٔ 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 شارهٔ درون لوله سبب تغییر شکل لوله و در نتیجه حرکت عقربه روی صفحهٔ مدرج می‌شود. این فشارسنج‌ها که به *فشارسنج بوردون*[۱] شناخته می‌شوند معمولاً برای اندازه‌گیری فشار در مخزن‌های گاز و همچنین اندازه‌گیری فشار باد لاستیک وسیله‌های نقلیه به کار می‌روند.



مثال ۳ــ۶

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 ۰/۷۶۰m تعریف می‌شود (در دمای $0\,^{\circ}C$ و به ازای $g = 9/81 N/kg$). هر اتمسفر، معادل چند پاسکال است؟ چگالی جیوه را برابر $1/36 \times 10^4 kg/m^3$ بگیرید.

پاسخ : رابطهٔ ۳ــ۴، فشار جو را بر حسب ارتفاع ستون جیوه به ما می‌دهد. با جایگذاری مقادیر داده شده در این رابطه داریم :

$$P_0 = \rho gh = (1/36 \times 10^4 kg/m^3)(9/81\ N/kg)(0/760 m) = 1/01 \times 10^5 Pa$$

همان‌طور که دیده می‌شود ۱atm تنها اندکی از ۱bar بیشتر است.

مثال ۳ــ۷

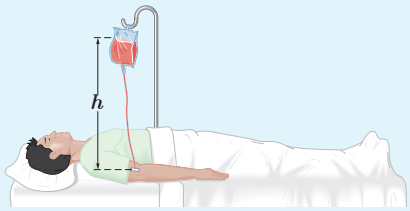
عمیق‌ترین قسمت خلیج فارس با عمقی حدود ۹۳ متر در نزدیکی جزیرهٔ تنب بزرگ قرار دارد. فشار پیمانه‌ای در این عمق چند پاسکال است؟ چگالی آب خلیج فارس را $1028 kg/m^3$ بگیرید.

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

$$P - P_0 = \rho gh = (1028 kg/m^3)(9/81 N/kg)(93 m) = 9/4 \times 10^5 Pa$$

۱ــ Bourdon gauge

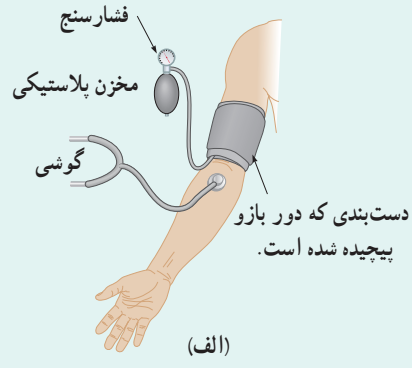
تمرین ۳ــ۵

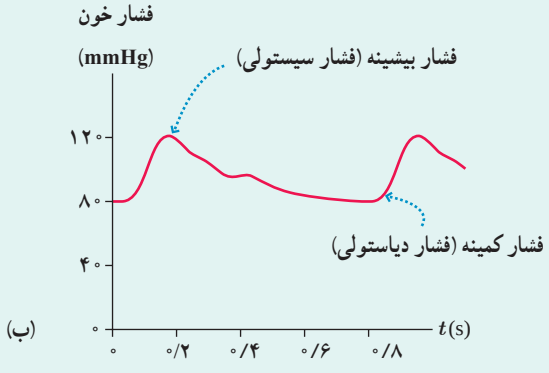


شکل روبه‌رو یک کیسهٔ پلاستیکی حاوی محلولی را نشان می‌دهد که در حال تزریق به یک بیمار است. سوزن سرنگی را به قسمت خالی از مایع بالای این کیسه وارد می‌کنند طوری که فشار هوا در این بخش از کیسه همواره با فشار هوای بیرون برابر بماند. اگر فشار پیمانه‌ای در سیاهرگ ۱۳۳۰ پاسکال باشد، ارتفاع کمینهٔ h چقدر باشد تا محلول در سیاهرگ نفوذ کند؟ چگالی محلول را $1045\ kg/m^3$ بگیرید.

خوب است بدانید

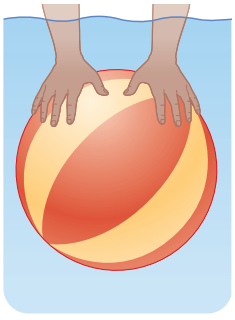
شکل الف فشارسنجی را نشان می‌دهد که برای اندازه‌گیری فشار خون به کار می‌رود. با چندین بار فشردن مخزن پلاستیکیِ پر از هوا، فشار دست‌بند افزایش می‌یابد تا جریان خون در سرخرگ اصلی دست در بازو متوقف شود. سپس دریچهٔ مخزن باز شده، و شخص اندازه‌گیرنده با گوشی به صدای عبور خون از سرخرگ گوش می‌کند. وقتی فشاری که دست‌بند به سرخرگ اصلی دست وارد می‌کند در حال کاهش باشد، درست زمانی که فشار به زیر بیشینهٔ 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 می توان آن را با گوشی شنید. فشارسنج طوری درجه‌بندی شده است که فشار را بر حسب mmHg نشان می‌دهد، و مقدار به دست آمده حدود ۱۲۰mmHg برای قلب معمولی است. با کاهش بیشتر فشار دست‌بند، صداهای متناوب هنوز شنیده می‌شود تا فشار به زیر فشار کمینهٔ قلب (فشار دیاستولی) فرو افتد. در این وضعیت صداهای مداومی شنیده می‌شود. در قلب عادی، این گذار در فشاری حدود ۸۰mmHg رخ می‌دهد. فشار خون را معمولاً بر حسب نسبت فشار سیستولی به فشار دیاستولی بیان می‌کنند، که برای قلب سالم ۱۲۰/۸۰ است.





۳ــ۵ شناوری و اصل ارشمیدس

ممکن است بارها تجربه کرده باشید که وقتی توپی را وارد آب می‌کنید، پس از حذف نیروی دست، توپ به طرف بالا جهیده و روی آب شناور می‌شود (شکل ۳ــ۲۲ــ الف). همچنین شناورماندن کشتی‌های فولادی روی آب، پدیده‌ای آشناست با وجود آنکه می‌دانیم چگالی فولاد حدود ۸ برابر چگالی آب است (شکل ۳ــ۲۲ــ ب). افزون بر اینها، جابه‌جا کردن یک جسم سنگین غوطه‌ور داخل آب، خیلی آسان‌تر از انجام همین کار در خارج آب است (شکل ۳ــ۲۲ــ پ). پیش از پرداختن به دلایل این پدیده‌ها، فعالیت صفحهٔ بعد را انجام دهید.



(الف)

(ب)

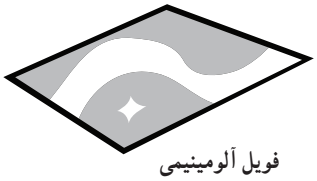
(پ)

شکل ۳ــ۲۲ (الف) وارد کردن توپ داخل آب (ب) کشتیرانی در دریای خزر (بندر امیرآباد)، (پ) جابه‌جا کردن یک غواص غوطه‌ور با یک دست

فعالیت ۳ــ۹

درون یک ظرف مقداری آب بریزید. یک فویل آلومینیمی به ابعاد تقریبی ۲۰ cm × ۲۰ cm اختیار کنید و آن را مچاله کنید. پیش‌بینی کنید با قرار دادن فویل مچاله شده روی سطح آب، چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید.

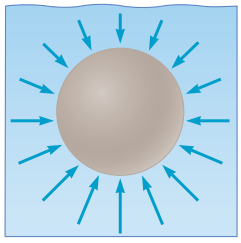
اکنون فویل مچاله شده را آن قدر فشار دهید تا تقریباً مشابه یک توپ کروی شود. اگر این توپ آلومینیمی را روی سطح آب قرار دهید، پیش‌بینی کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید. پیش‌بینی‌ها و نتایج مشاهدهٔ (آزمایش) خود را در گروهتان به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.



فویل آلومینیمی

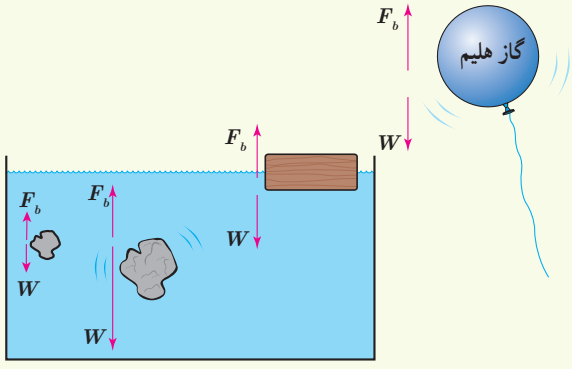
فویل آلومینیمی مچاله‌شده

ارشمیدس دانشمند یونانیِ 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**[1] از طرف شاره وارد می‌شود. دلیل این نیرو برای جسمی غوطه‌ور درون شاره به طور کیفی در شکل ۳ــ۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۲۳ پیکان‌ها نشان می‌دهند که نیروهای ناشی از فشار وارده بر جسم، به دلیل افزایش عمق، در زیر آن بزرگ‌ترند.

پرسش ۳ــ۷

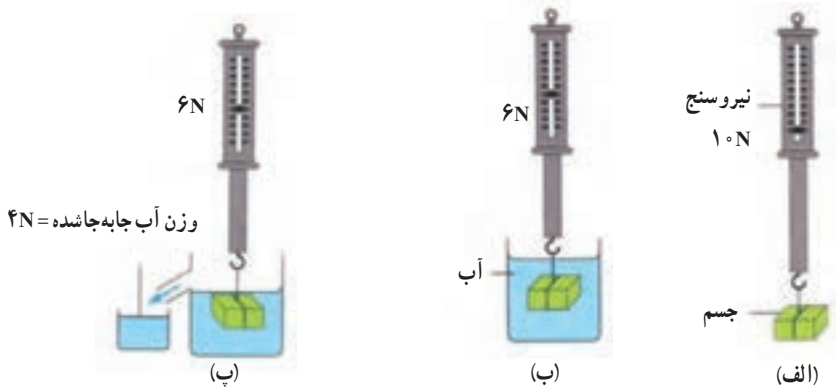


در شکل روبه‌رو، نیروی شناوری F_b و نیروی وزن W وارد بر چند جسم نشان داده شده است. با توجه به نیروی خالص وارد بر هر جسم، وضعیت آن را به کمک یکی از واژه‌های شناوری، غوطه‌وری، فرورفتن و بالا رفتن توصیف کنید.

۱ــ buoyant force

اصل ارشمیدس را به سادگی می‌توان به طور تجربی بررسی کرد. شکل ۳ــ۲۴ــ الف یک جسم فلزی آویزان شده به یک نیروسنج را نشان می‌دهد که وزن آن ۱۰ نیوتون است. وقتی این جسم مطابق شکل ۳ــ۲۴ــ 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.

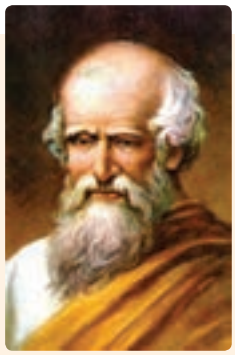
اگر ظرفی لوله‌دار مطابق شکل ۳ــ ۲۴ــ پ تهیه کنید به طوری که تا سطح لوله دارای آب باشد، با فروکردن جسم درون آن، آب اضافی از طریق لوله به ظرف دیگری می‌ریزد. وزن آب خارج شده ۴ نیوتون است که دقیقاً برابر نیروی شناوری است که از طرف آب به جسم وارد می‌شود.



شکل ۳ــ۲۴ 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 شارهٔ جابه‌جا شده توسط جسم برابر است[1].

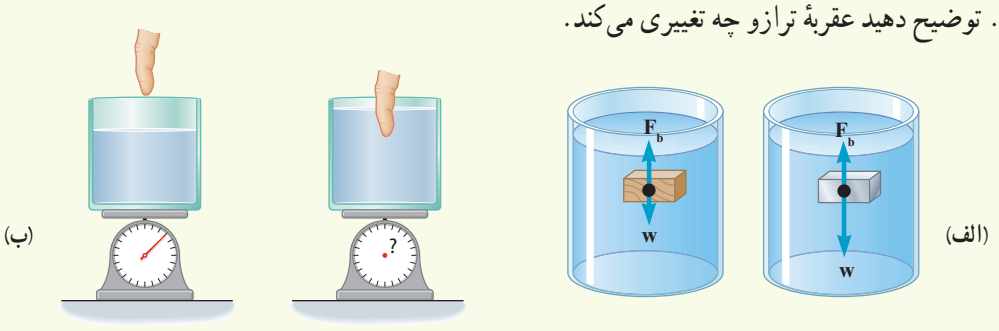


ارشمیدس (۲۱۲ــ۲۸۷ قبل از میلاد) از دانشمندان بزرگ دوران یونان باستان است. شهرت ارشمیدس، بیشتر برای کشف نیروی شناوری است. وی کتابی در مورد اجسام شناور دارد که دربرگیرندهٔ نُه قضیه است. ارشمیدس این قضایا را بر اساس برهان خُلف اثبات می‌کرد؛ یعنی ابتدا خلاف آنها را درست می‌پنداشت و آنگاه نشان می‌داد با توجه به شرایط، فرض او نادرست بوده است. همچنین ارشمیدس در روش خود برای حل مسائل، از آرمانی‌سازی و ساده‌سازی پدیده‌ها بهره می‌گرفت.

پرسش ۳ــ۸

۱ــ 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.

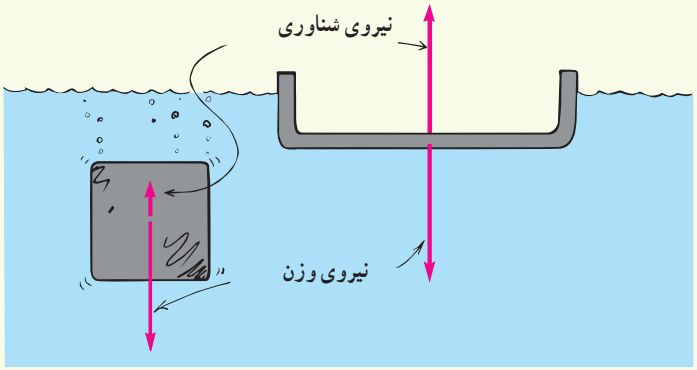
۲ــ شکل (ب) ظرفی محتوی آب را نشان می‌دهد که روی یک ترازوی عقربه‌ای قرار دارد. شخصی انگشت خود را وارد آب می‌کند. توضیح دهید عقربهٔ ترازو چه تغییری می‌کند.



۱ــ حل هرگونه مسئلهٔ عددی مبتنی بر این بیان، خارج از اهداف برنامهٔ درسی کتاب است. در ارزشیابی از این قسمت، تنها پرسش‌های توصیفی و فعالیت‌های عملی می‌تواند مطرح شود.

۳ــ جرم قطعه‌های آهنی در شکل (پ) با یکدیگر برابر است. دریافت خود را از این شکل بیان کنید.

۴ــ توضیح دهید چرا یک کشتی هوایی که با گاز هلیم (که چگالی آن کمتر از چگالی هواست) پر شده است نمی تواند به طور نامحدود به بالا رفتن ادامه دهد.

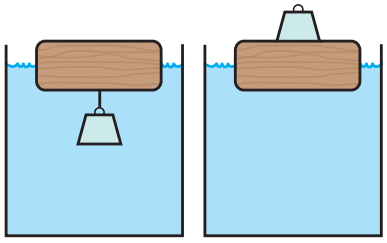


(پ)

(ت)

فعالیت ۳ــ ۱۰

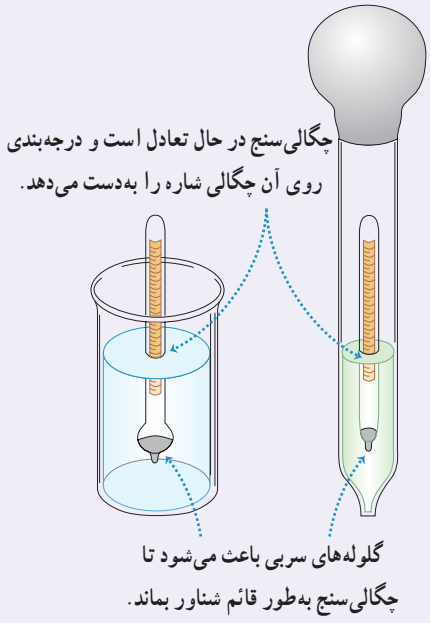
یک قطعهٔ چوبی را روی آب درون ظرفی قرار دهید. یک وزنهٔ آهنی را یک بار روی چوب قرار دهید (شکل الف) و بار دیگر از زیر چوب آویزان کنید (شکل ب). پیش‌بینی کنید در کدام تجربه، چوب بیشتر در آب فرو می‌رود؟ آزمایش را انجام دهید. پیش‌بینی‌ها و نتایج مشاهدهٔ (آزمایش) خود را در گروهتان به بحث بگذارید و نتیجه را به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



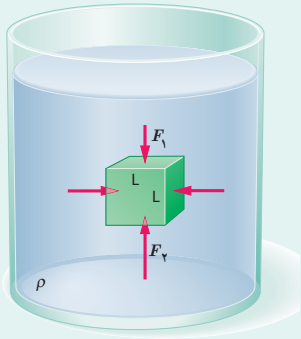
(الف) (ب)

فناوری و کاربرد

یک کاربرد عملی شناوری، چگالی‌سنج است که برای اندازه‌گیری چگالی مایع‌ها به کار می‌رود (شکل الف). ساقهٔ چگالی‌سنج تا جایی درون شاره فرو می‌رود که وزن شارهٔ جابه‌جا شده درست برابر وزن آن شود. چگالی‌سنج در مایع‌های چگال‌تر نسبت به مایع‌های کم‌چگال، کمتر فرو می‌رود. چگالی مایع از روی درجه‌بندی ساقهٔ چگالی سنج 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 لولهٔ بزرگ را در مایع فرو می‌برند و محفظهٔ پلاستیکی بالای آن را می‌فشارند تا هوا خارج شود و سپس رها می‌کنند. مایع درون لولهٔ بزرگ بالا می‌رود، و چگالی‌سنج در این نمونهٔ مایع شناور می‌ماند.



خوب است بدانید



برای بررسی عامل فیزیکی نیروی شناوری، جسمی مکعبی‌شکل به ضلع L را در نظر بگیرید که درون شارهٔ 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 :

$$F_1 = P_1 A \quad و \quad F_2 = P_2 A$$

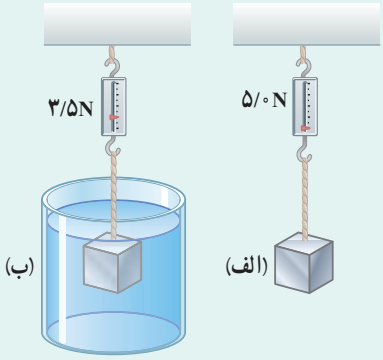
با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۲ و با توجه به اینکه در این رابطه $L = h$ است، می‌توان نوشت :

$$F_2 = P_2 A = (P_1 + \rho g L)A = P_1 A + \rho g A L = F_1 + \rho V g$$

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

$$F_b = F_2 - F_1 = \rho V g \qquad (۱)$$

این رابطه همان اصل ارشمیدس است. مطابق این رابطه، هرگاه جسمی درون شارهٔ 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 ۵/۰N نشان می‌دهد (شکل الف). وقتی این جسم را داخل آب فرو می‌بریم نیروسنج عدد ۳/۵N 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 ۱/۵N است. بنابراین با توجه به رابطهٔ ۱ حجم جسم برابر است با :

$$F_b = \rho V g \Rightarrow ۱/۵\text{N} = (۱/۰۰\times۱۰^۳ \text{kg/m}^۳)V(۹/۸۱\text{N/kg}) \Rightarrow V = ۱/۵ \times ۱۰^{-۴}\text{m}^۳$$

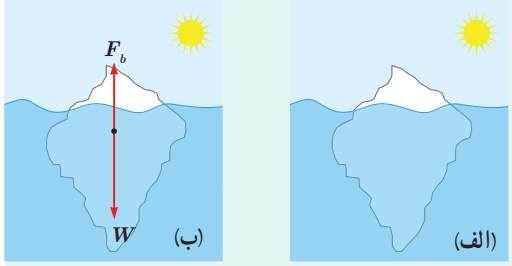
چون نیروسنج وزن جسم را ۵/۰N می‌خواند، جرم آن برابر است با :

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

اگر چگالی جسم را با $\rho_\circ$ نشان دهیم از رابطهٔ ۱ــ۱ داریم :

$$\rho_\circ = \frac{m}{V} = \frac{۰/۵۱\text{kg}}{۱/۵\times۱۰^{-۴}\text{m}^۳} = ۳/۴\times۱۰^۳\ \text{kg/m}^۳$$

مثال ۲: کوه یخی درون اقیانوسی شناور است (شکل الف). اگر چگالی آب اقیانوس $۱۰۳۰\text{kg/m}^۳$ و چگالی کوه یخ $۹۱۷\text{kg/m}^۳$ 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 $\rho_\circ$ و حجم آب جابه‌جا شده را $V_\circ$ بگیریم، از رابطهٔ ۱ و رابطهٔ بالا می‌توان نوشت :

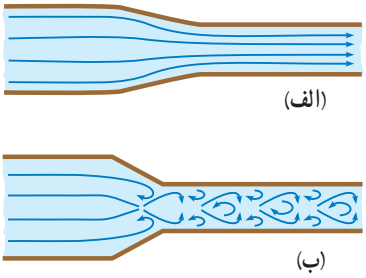
$$\rho_\circ V_\circ g = \rho_i V_i g \Rightarrow V_\circ = \frac{\rho_i}{\rho_\circ} V_i \Rightarrow V_\circ = \frac{۹۱۷ kg/m^۳}{۱۰۳۰ kg/m^۳} V_i = ۰/۸۹۰ V_i$$

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.

۳ــ۶ شارهٔ در حرکت و اصل برنولی

تا اینجا به بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی شاره‌های ساکن پرداختیم. اکنون آماده‌ایم تا یک شارهٔ در حال حرکت را بررسی کنیم. وقتی شاره‌ای حرکت می‌کند، این حرکت می‌تواند یکنواخت و لایه‌ای (شکل ۳ــ۲۵ــ الف) یا متلاطم و آشوبناک (شکل ۳ــ۲۵ ــ ب) باشد. درست مانند هوا، که گاهی به صورت نسیمی ملایم و گاهی به صورت طوفانی پر انرژی می‌وزد.

هنگام حرکت آب در شلنگ، جریان تُند و سریع آب در یک رودخانه (شکل ۳ــ۲۶ــ الف)، حرکت خون درون رگ‌ها، حرکت هوا درون سامانه‌های گرمایش و سرمایش، جریان دود در هوا (شکل ۳ــ۲۶ــ ب) پدیده‌های جالبی رخ می‌دهد. بررسی این پدیده‌ها اغلب می‌تواند بسیار پیچیده باشد. برای پرهیز از این پیچیدگی‌ها، مدل آرمانی و ساده‌شده‌ای از یک شارهٔ 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)

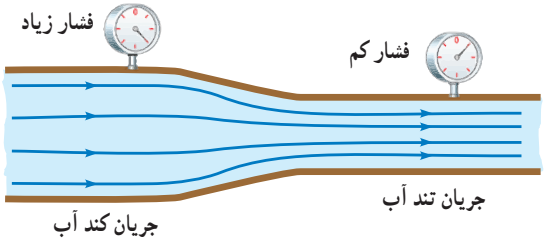
شکل ۳ــ۲۵ (الف) حرکت لایه‌ای شاره. نقش کلی جریان شاره، با گذر زمان تغییر نمی‌کند. (ب) حرکت متلاطم شاره. نقش کلی جریان شاره و مسیر حرکت ذرات آن، به طور مدام تغییر می‌کند.

(ب) (الف)

شکل ۳ــ۲۶ (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 سر چوب عود، در ابتدا لایه‌ای است و سپس در بالا متلاطم می‌شود.

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

شکل ۳ــ۲۷ 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 اندازهٔ سطح مقطع لوله، جریان آب کُند یا تند می‌شود.



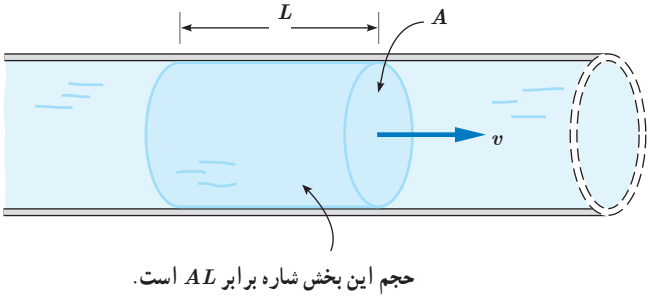
شکل ۳ــ۲۷ آب با جریان لایه‌ای، در لوله‌ای با دو سطح مقطع متفاوت حرکت می‌کند. با کاهش سطح مقطع لوله، جریان آب تندتر می‌شود و فشار آن کاهش می‌یابد.

دانیل برنولی (۱۷۸۲ــ۱۷۰۰م) 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 گسترهٔ وسیعی از پدیده‌های مختلف را تا کنون در اختیار بشر قرار داده است.

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 شاره، با افزایش تندی شاره، فشار آن کاهش می‌یابد.

آهنگ جریان شاره : شکل ۳ــ۲۸ جریان یکنواخت شاره‌ای را نشان می‌دهد که با تندی v درون لوله‌ای با سطح مقطع A در حرکت است.



شکل ۳ــ۲۸ آهنگ جریان شاره درون یک لوله، به صورت نسبت حجم شاره جابه‌جا شده به زمان تعریف می‌شود.

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

$$\text{آهنگ جریان شاره} = \frac{\text{حجم شاره}}{\text{زمان}} = \frac{AL}{t} = Av \qquad (۵ــ۳)$$

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

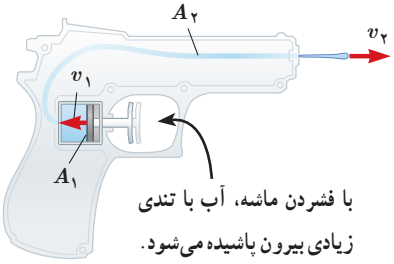
معادلهٔ پیوستگی : شکل ۳ــ۲۹ شاره‌ای با جریان لایه‌ای را نشان می‌دهد که در لوله‌ای با دو سطح مقطع متفاوت، در حرکت است. در حالت پایا و در مدت زمان یکسان، جرم یکسانی از شاره، از هر سطح مقطع دلخواه لوله می‌گذرد.

شکل ۳ــ۲۹ در یک شاره تراکم‌ناپذیر، مقدار شاره‌ای که در زمان t از سطح مقطع A_1 می‌گذرد درست برابر مقدار شاره‌ای است که در همین زمان از سطح مقطع A_2 می‌گذرد.

از این موضوع، به سادگی می‌توان به معادلهٔ پیوستگی برای شارهٔ تراکم‌ناپذیر دست یافت که به صورت زیر بیان می‌شود :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad (۶ــ۳)$$

مثال ۳ــ۸



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

اگر $A_1 = ۱/۰\,cm^2$، $A_2 = ۱/۰\,mm^2$ و $v_1 = ۰/۱۵\,cm/s$ باشد تندی خروج آب را به دست آورید.

پاسخ : با توجه به فرض‌های مسئله، از معادلهٔ پیوستگی به سادگی می‌توان تندی خروج آب از تفنگ را به‌دست آورد. از معادلهٔ ۳ــ۶ داریم :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

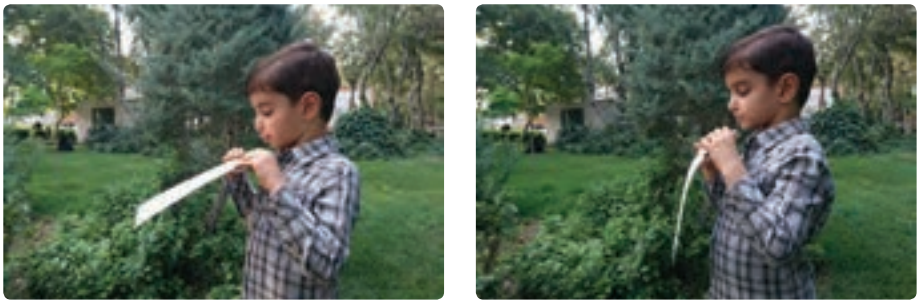
$$(۱/۰\,cm^2)(۰/۱۵\,cm/s) = (۱/۰ \times ۱۰^{-۴}\,cm^2) v_2$$

به این ترتیب تندی خروج آب برابر $v_2 = ۰/۱۵ \times ۱۰^4\,cm/s = ۱۵\,m/s$ است.

پرسش ۳ــ۹

وقتی شیر آبی را کمی باز کنید و آب به آرامی جریان یابد، مشاهده می‌شود که باریکهٔ آب با نزدیک‌ترشدن به زمین، باریک‌تر می‌شود (شکل روبه‌رو). دلیل این پدیده را با توجه به معادلهٔ 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 ۳ــ۳۰ 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.

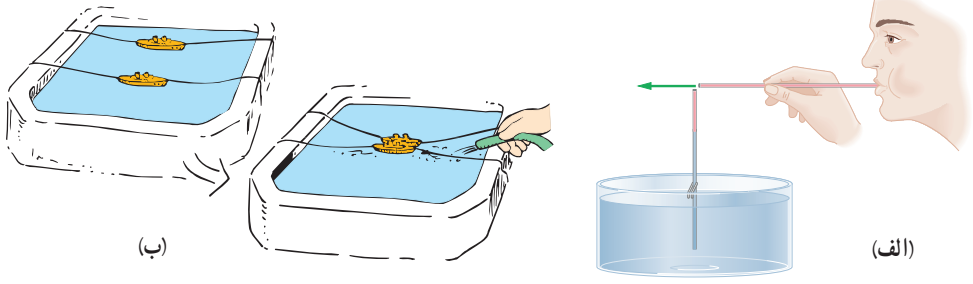


شکل ۳ــ۳۰ تندی جریان هوا در بالای کاغذ بیشتر از زیر آن است. با توجه به اصل برنولی، فشار هوا در بالای کاغذ کمتر از زیر آن است.

فعالیت ۳ــ۱۱

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.

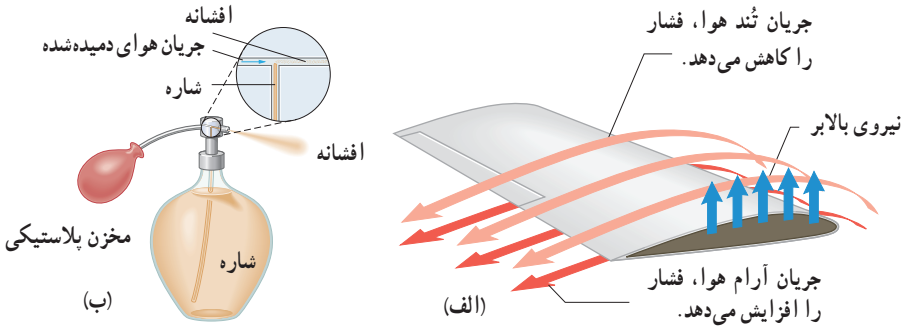
ب) این فعالیت را می‌توانید در ظرف شویی آشپزخانهٔ منزلتان یا یک تشت بزرگ در حیاط مدرسه انجام دهید. مطابق شکل یک جفت قایق اسباب بازی را روی سطح آب قرار داده و شُل کنار هم ببندید. سپس جریانی از آب را بین آنها برقرار کنید. به حرکت قایق‌ها نسبت به یکدیگر توجه کنید (شکل ب). با توجه به اصل برنولی توضیح دهید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



(ب) (الف)

شکل ۳ــ۳۱ــ 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[1]. شکل ۳ــ ۳۱ــ 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.

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



شکل ۳ــ۳۱ کاربرد اصل برنولی در (الف) بال هواپیما برای ایجاد نیروی بالابر خالص، (ب) سم‌پاش‌ها و شیشه‌های عطر برای افشانه کردن سم و عطر

پرسش ۳ــ۱۰

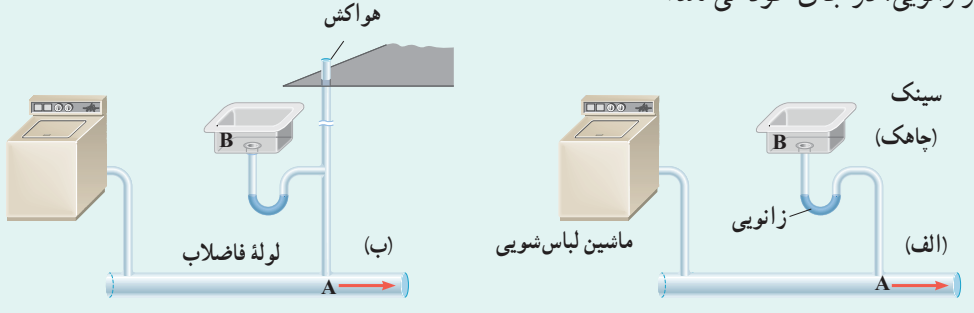
الف) روزهایی که باد می وزد، ارتفاع موج‌های دریا یا اقیانوس بالاتر از ارتفاع میانگین می‌شود. با اصل برنولی چگونه می‌توان افزایش ارتفاع موج را توضیح داد؟

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

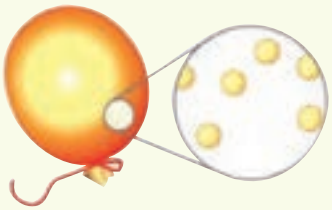
یک مثال عملی از کاربرد اصل برنولی در لوله کشی ساختمان، در شکل زیر نشان داده شده است. ابتدا فرض کنید لولهٔ هواکش در نظر گرفته نشده باشد (شکل الف). جمع شدن آب در زانویی زیر سینک، مشابه یک درپوش عمل می‌کند. این درپوش، مانع از آن می‌شود که گاز تولیدشده در لولهٔ فاضلاب، از خروجی سینک بالا آمده و وارد آشپزخانه شود. اما وقتی ماشین لباس‌شویی آب حاصل از شست‌وشو را به درون لولهٔ فاضلاب تخلیه می‌کند، طبق اصل برنولی فشار در این لوله (نقطهٔ A) به کمتر از فشار هوا کاهش می‌یابد. از آنجا که فشار در خروجی چاهک (نقطهٔ B) برابر فشار هواست، این اختلاف فشار، آب جمع شده در زانویی را که مشابه یک درپوش عمل می‌کند، خالی کرده و به درون لولهٔ 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 لولهٔ هواکش، که با هوای بیرون ساختمان مرتبط است، این مشکل رفع می‌شود (شکل ب). زیرا وقتی آب ماشین لباس‌شویی در لولهٔ فاضلاب تخلیه می‌شود، کاهش فشار در لوله سبب می‌شود تا هوا از طریق هواکش وارد شود. این هوای ورودی، فشار در لولهٔ هواکش و در طرف سمت راست لولهٔ تخلیهٔ سینک را نزدیک به فشار جو نگه می‌دارد، به طوری که آب جمع شده در زانویی، در جای خود می‌ماند.

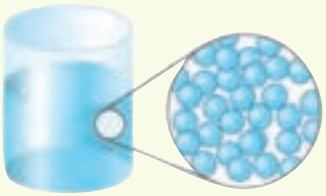


۳ـ۱ حالت‌های ماده

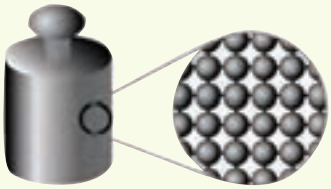
۱ دریافت خود را از شکل‌های زیر بر اساس مفاهیمی که از سه حالت معمول ماده فراگرفته‌اید بیان کنید.



(الف)



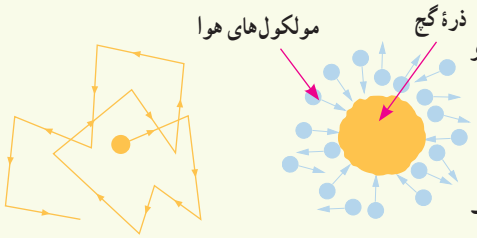
(ب)



(پ)

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

۳ هنگام پاک‌کردن تختهٔ 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 و سبک‌تر از ذره‌های گچ هستند و توسط میکروسکوپ هم دیده نمی‌شوند. توضیح دهید چگونه این تجربهٔ ساده، شاهدی بر وجود مولکول‌های هواست.

۴ توضیح دهید چرا

الف) پدیدهٔ 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 دهانهٔ آن نیز کاملاً بسته شده باشد، باز هم رفته‌رفته کم باد می‌شود.

۳ـ۲ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو

۵ هر یک از موارد زیر را توضیح دهید.

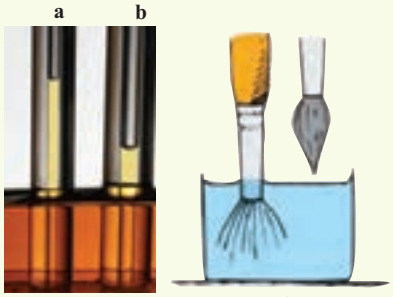
الف) علوم و فناوری نانو

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

پ) تفاوت نانو ذره و نانو لایه

۳ـ۳ نیروهای بین مولکولی

۶ شیشه‌گران برای چسباندن تکه‌های شیشه به یکدیگر، آنها را آن‌قدر گرم می‌کنند که نرم شوند. این کار را با توجه به کوتاه‌بُرد بودن نیروی جاذبهٔ بین مولکولی توضیح دهید.



۷ الف) توضیح دهید چرا وقتی قلم‌مویی را از آب بیرون می‌کشیم (شکل الف)، موهای آن به‌هم می‌چسبند. (اشاره : به پدیدهٔ کشش سطحی در مایع‌ها توجه کنید.)

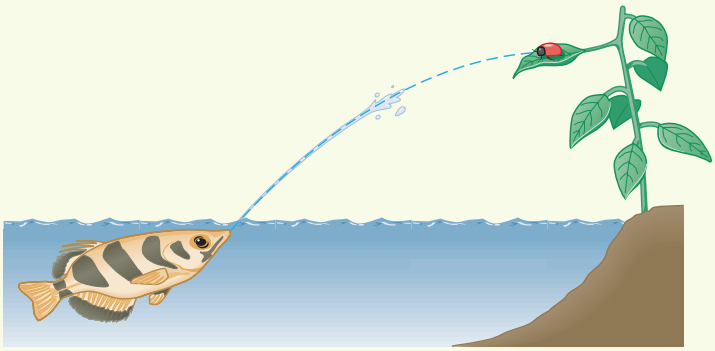
ب) شکل (ب) دو لولهٔ مویین هم‌جنس را نشان می‌دهد که درون مایعی قرار دارند. چرا ارتفاع مایع درون لولهٔ b از دو لولهٔ دیگر کمتر است؟ با توجه به شکل، نیروی هم‌چسبی مایع را با نیروی دگرچسبی مایع و لوله‌های مویین مقایسه کنید.

۸ تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر در کشورهای غرب ایران، پدیدهٔ خطرناک ریزگردها را به مناطق وسیعی از کشورمان گسترش داده است. چگالی ریزگردها در حالتی که ته‌نشین شده باشد تقریباً دو برابر چگالی آب است.

الف) چرا بادهای نسبتاً ضعیف قادرند توده‌های بزرگی از ریزگردها را به‌حرکت درآورند در حالی که توفان‌های شدید دریایی تنها مقدار اندکی آب را به‌صورت قطره‌های ریز به طرف بالا می‌پاشند؟

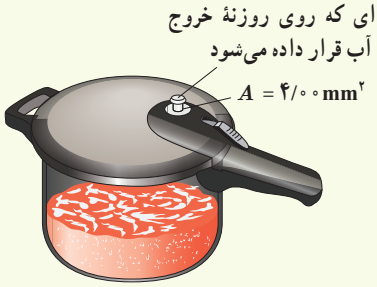
ب) بررسی کنید برای مقابله با این پدیده و مهار آن، چه تدابیری را می‌توان اندیشید.

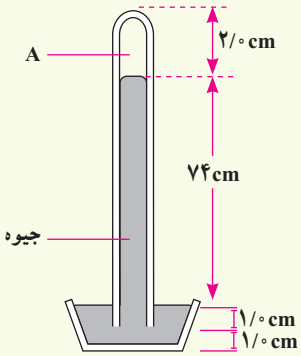
۹ نوعی ماهی به نام ماهی کمان‌گیر با جمع کردن آب در دهان خود و پرتاب آن به‌سوی حشراتی که در بیرون از آب، روی گیاهان نشسته‌اند، آنها را شکار می‌کند و می‌خورد (شکل الف). هدف‌گیری آنها به اندازه‌ای دقیق است که معمولاً در این کار اشتباه نمی‌کنند. کدام ویژگی فیزیکی آب این امکان را به ماهی کمان‌گیر برای شکار می‌دهد؟



۳ـ۴ فشار در شاره‌ها

۱۰ مساحت روزنهٔ خروج بخار آب، روی درب زودپزی $۴/۰۰\,mm^۲$ است (شکل روبه‌رو). جرم وزنه‌ای که روی این روزنه باید گذاشت چقدر باشد تا فشار داخل آن در $۲atm$ نگه داشته شود؟ فشار بیرون دیگ زودپز را $۱atm$ بگیرید.





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

الف) در ناحیهٔ 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؟

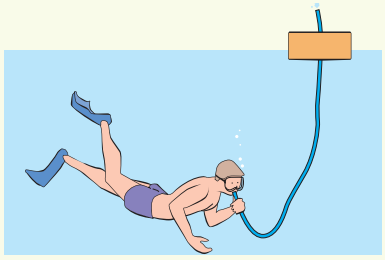
ت) اگر این جوسنج را بالای کوهی ببریم چه تغییری در ارتفاع ستون جیوهٔ درون لوله رخ می‌دهد؟ دلیل آن را توضیح دهید.

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

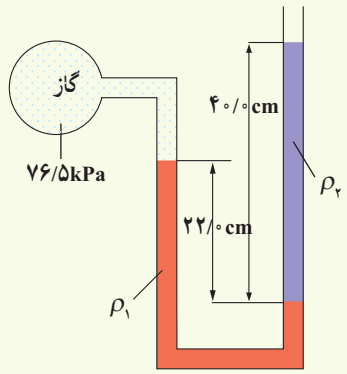
فریدون شهر : ۲۶۱۲m سمیرم : ۲۴۳۴m بروجن : ۲۲۶۵m شهرکرد : ۲۰۷۲m

با توجه به نمودار شکل ۳ــ۱۸ــ ب، فشار تقریبی هوا را در این چهار شهر بنویسید.

ب) چگالی میانگین هوا تا ارتفاع ۳ کیلومتری از سطح دریای آزاد حدود $\overline{\rho}=۱/۰۱\,kg/m^۳$ است. با استفاده از رابطه $P=P_۰-\overline{\rho}gh$ فشار هوا را در این شهرها حساب کنید و مقادیر به‌دست آمده را با نتیجه قسمت الف مقایسه کنید.

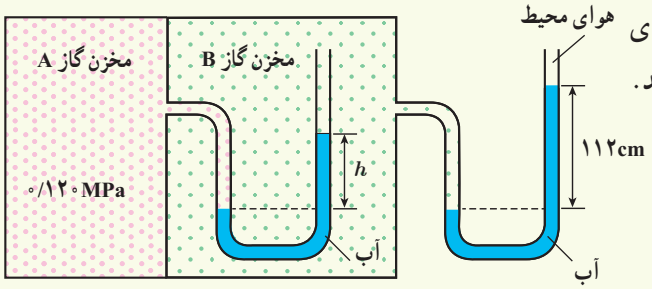


۱۳ غواص‌ها می‌توانند با قرار دادن یک سر لوله‌ای در دهان خود، در حالی که سر دیگر آن از آب بیرون است، تا عمق بیشینه‌ای در آب فرو روند و نفس بکشند (شکل روبه‌رو). با گذشتن از این عمق، اختلاف فشار درون و بیرون ریهٔ غواص افزایش می‌یابد و غواص را ناراحت می‌کند. چون هوای درون ریه از طریق لوله با هوای بیرون ارتباط دارد، فشار هوای درون ریه، همان فشار جوّ است در حالی که فشار وارد بر قفسهٔ سینهٔ او، همان فشار در عمق آب است. در عمق ۶/۱۵m از سطح آب، اختلاف فشار درون ریهٔ غواص با فشار وارد بر قفسهٔ سینهٔ 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 زیاد می‌شود.)



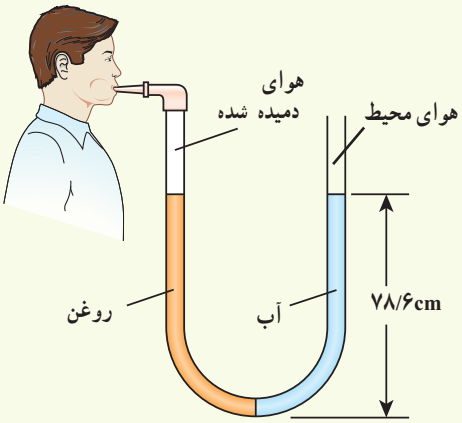
۱۴ درون لولهٔ U شکلی که به یک مخزن محتوی گاز وصل شده است جیوه ($\rho_۱ = ۱۳/۶ \times ۱۰^۳ kg/m^۳$) و مایعی با چگالی نامعلوم $\rho_۲$ وجود دارد (شکل روبه‌رو).

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



۱۵ در شکل روبه‌رو مقدار h چند سانتی‌متر است؟ فشار هوای محیط را ۱۰۱kPa و چگالی آب را $۱/۰۰ \times ۱۰^۳ kg/m^۳$ بگیرید.

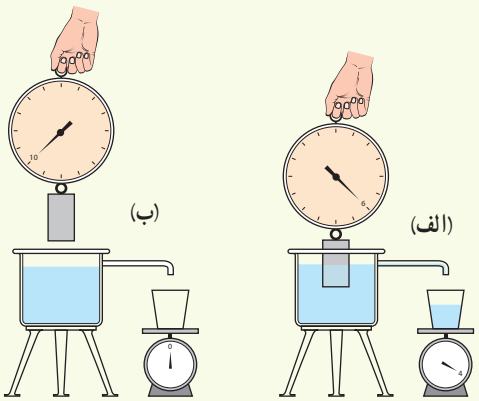
۱۶ لولهٔ U شکلی را در نظر بگیرید که محتوی حجم مساوی از آب و روغن است (شکل روبه‌رو). با توجه به اطلاعات روی شکل، فشار پیمانه‌ای هوای درون ریهٔ شخصی که از شاخهٔ سمت چپ لوله درون آن دمیده، چقدر است؟ چگالی روغن را $0/805 kg/m^3$ بگیرید.



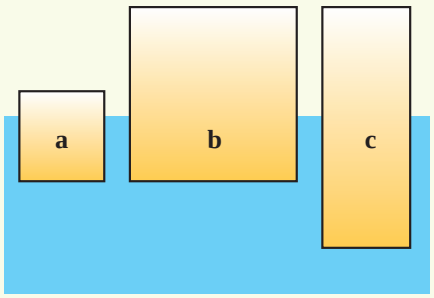
۳ـ۵ شناوری و اصل ارشمیدس

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 نوشابهٔ معمولی فرو می‌رود. با استفاده از اصل ارشمیدس، این نتیجه را توضیح دهید. (اشاره : چگالی شیرین‌کننده‌های 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.

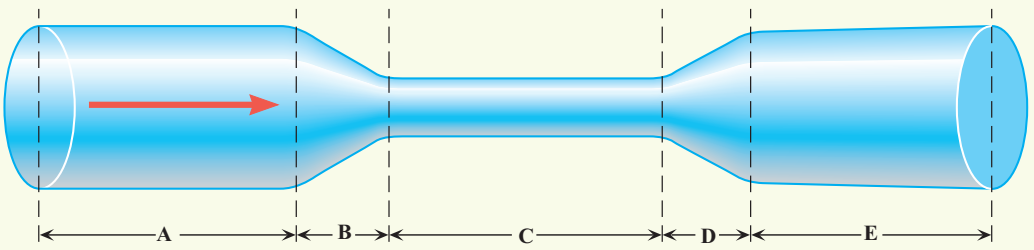


۲۰ توضیح دهید چرا نیروی شناوری برای جسمی که در یک شاره قرار دارد رو به بالاست.

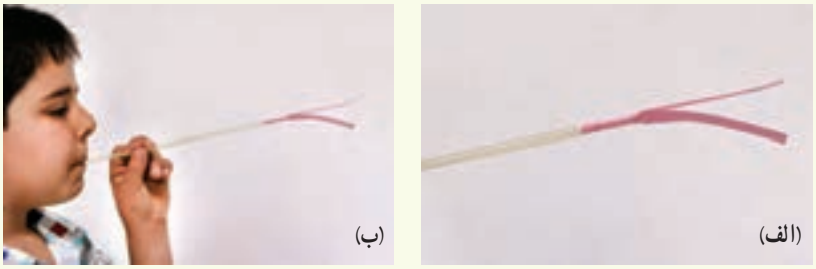
۲۱ توضیح دهید چه موقع نیروی شناوری وارد بر یک شناگر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

۳ـ۶ شارهٔ در حرکت و اصل برنولی

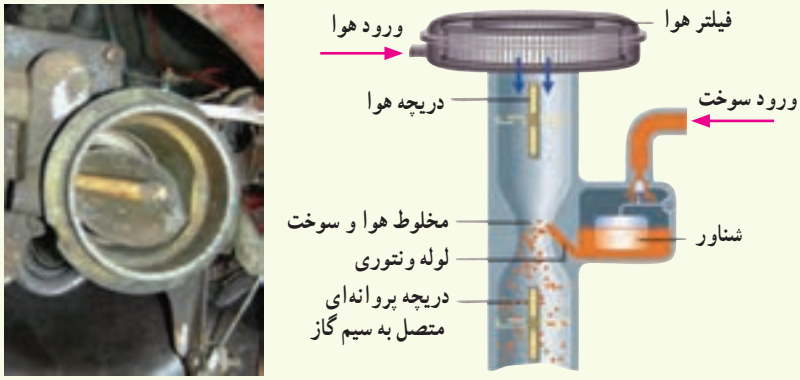
۲۲ در لوله‌ای پر از آب مطابق شکل زیر، آب از چپ به‌راست در جریان است. روی این لوله ۵ قسمت (A، B، C، D و E) نشان شده است.
الف) در کدام یک از قسمت‌های لوله، تندی آب، در حال افزایش، در حال کاهش، یا ثابت است؟
ب) تندی آب را در قسمت‌های A ، C و E لوله با یکدیگر مقایسه کنید.



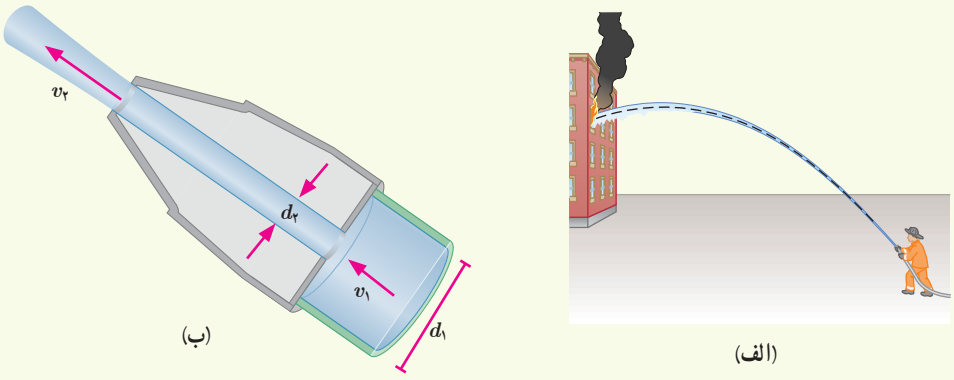
۲۳ دو نوار کاغذی به طول تقریبی ۱۰cm را مطابق شکل (الف) به انتهای یک نی نوشابه بچسبانید. وقتی مطابق شکل (ب) به درون نی دمیده می‌شود نوارهای کاغذی به‌طرف یکدیگر جذب می‌شوند. با توجه به اصل برنولی دلیل این پدیده را توضیح دهید.



۲۴ شکل زیر کاربراتور یک موتور بنزینی قدیمی‌را نشان می‌دهد. حجم هوایی که وارد کاربراتور می‌شود توسط دریچهٔ پروانه‌ای 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 می‌یابد و خودرو می‌تواند سریع‌تر حرکت کند.

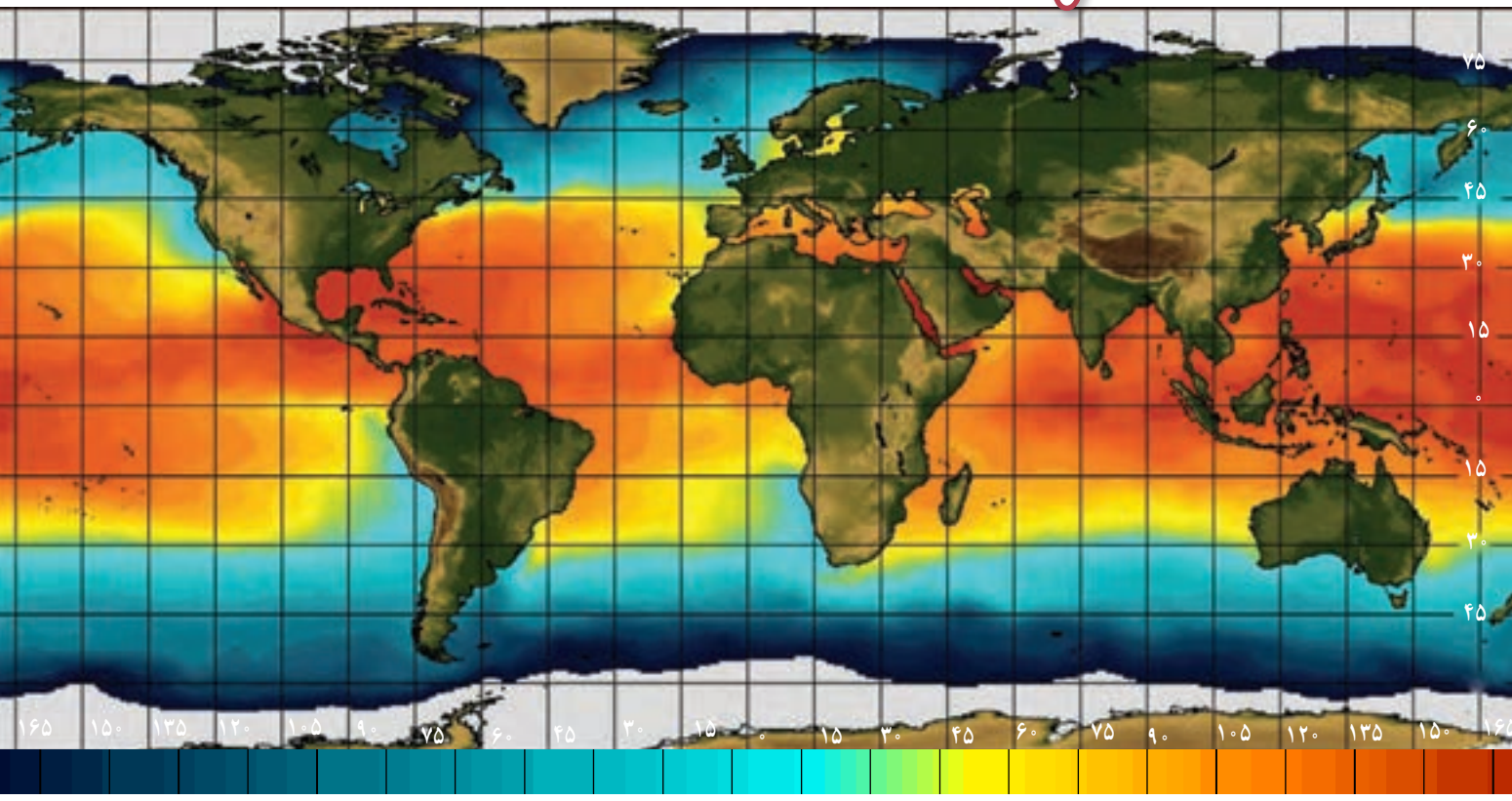


۲۵ شکل (الف) آتش‌نشانی را درحال خاموش کردن آتش از فاصلهٔ نسبتاً دوری نشان می‌دهد. نمایی بزرگ‌شده از شیر بسته‌شده به‌انتهای لولهٔ آتش‌نشانی در شکل (ب) نشان داده شده است. اگر آب با تندی $v_1 = 1/50\,m/s$ از لوله وارد شیر شود و قطر ورودی شیر $d_1 = 9/60\,cm$ و قطر قسمت خروجی آن $d_2 = 2/50\,cm$ باشد، تندی خروج آب را از شیر پیدا کنید.



فصل ۴

دما و گرما



هواشناسان براساس تصویرهای ماهواره‌ای وضعیت هوا را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از بخش‌های عمدهٔ گزارش آنها، اعلام دمای مناطق مختلف زمین است. این تصویر ماهواره‌ای، دمای سطح کرهٔ زمین را در یک لحظهٔ خاص از یک روز نمایش می‌دهد. رنگ‌ها نشان‌دهندهٔ گسترهٔ دمایی از ۶۳°C- تا ۳۷°C است.

چگونه آب می‌تواند آتش را خاموش کند؟ چرا آتش‌نشان‌ها لباس‌های براق روشن می‌پوشند؟ چرا پارچهٔ خیسی 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 باغ های میوه می‌توان از یخ‌زدن آنها در شبی سرد جلوگیری کرد؟ چرا بیشتر پل‌ها به صورت بخش‌هایی مجزا ساخته می‌شوند که فاصلهٔ کمی بین آنها وجود دارد؟ چگونه موهای خرس‌های قطبی می‌تواند آنها را از سرمای کشندهٔ قطب در امان نگه دارد؟ پاسخ این پرسش‌ها و بسیاری از پرسش‌های مشابه را می‌توان با بررسی مفهوم دما وگرما و اثرهای آن روی ماده به‌دست 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.

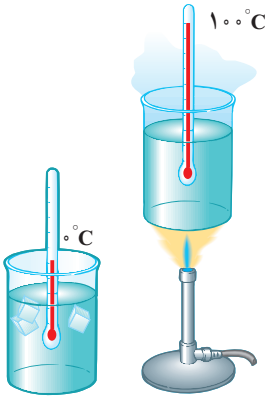
۴ـ۱ دما و دماسنجی

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 معیّن و حفظ آن در فنّاوری و صنعت و پژوهش‌های علمی، اهمیت فراوان دارد.

شکل ۴ـ۱ یک نمونه دماسنج الکلی

در کتاب‌های علوم خود دیدید دما کمّیتی 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 مشخصهٔ قابل اندازه‌گیری بهره بگیریم که با گرمی و سردی جسم تغییر می‌کند. به این ویژگی، اصطلاحاً **کمّیت دماسنجی** می‌گویند. تغییر کمّیت 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، کمّیت دماسنجی، ارتفاع مایع درون لولهٔ دماسنج است؛ زیرا به جز چند مورد استثنا تمام مواد با افزایش دما، منبسط و با کاهش آن منقبض می‌شوند. شکل ۴ـ۱ نمونه‌ای از یک دماسنج الکلی را نشان می‌دهد.

مقیاس‌های دما : یکی از مقیاس‌های متداول دما، مقیاس دما برحسب درجهٔ سلسیوس است. این مقیاس مبتنی بر دو نقطهٔ ثابت است : یکی دمایی که در آن آب خالص در فشار جوّ متعارف (۱atm) شروع به یخ‌زدن می‌کند و دیگری دمایی که آب خالص در فشار جوّ متعارف در حال جوشیدن است. به نقطهٔ اوّل، عدد صفر و به نقطهٔ دوم، عدد ۱۰۰ را اختصاص می‌دهند و فاصلهٔ بین این دو را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم می‌کنند و هر قسمت را ۱ درجه می‌نامند (شکل ۴ـ۲). قبلاً به چنین دماسنجی، دماسنج با مقیاس سانتی‌گراد[۲] گفته می‌شد. یکای درجهٔ سلسیوس را با نماد $^\circ C$ ، و دما برحسب درجهٔ سلسیوس را معمولاً با θ نمایش می‌دهند.



شکل ۴ـ۲ شکلی طرح‌وار از مقیاس‌بندی دما

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

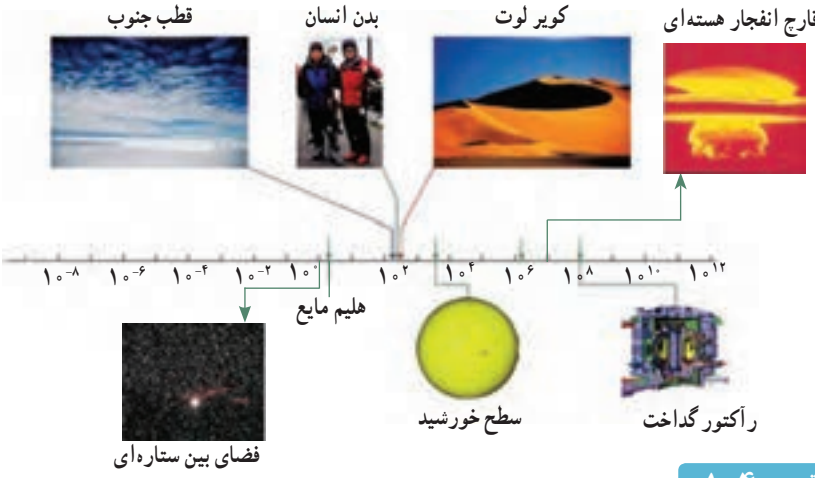
$$T = \theta + ۲۷۳/۱۵ \qquad (۱ـ۴)$$

بنا به رابطهٔ ۴ـ۱ صفرِ کلوین برابر $-۲۷۳/۱۵^\circ C$ است که این کمترین دمای ممکن نیز هست[۳]. اما برای دما، حدّ بالایی وجود ندارد. گسترهٔ برخی از دماهای مشهور در شکل ۴ـ۳ برحسب کلوین نشان داده شده است.

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

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

۳ـ صفرِ کلوین به طور دقیق برابر $-۲۷۳/۱۵^\circ C$ است ولی برای محاسبه‌های این کتاب همان مقدار تقریبی $-۲۷۳^\circ C$ در نظر گرفته می‌شود.



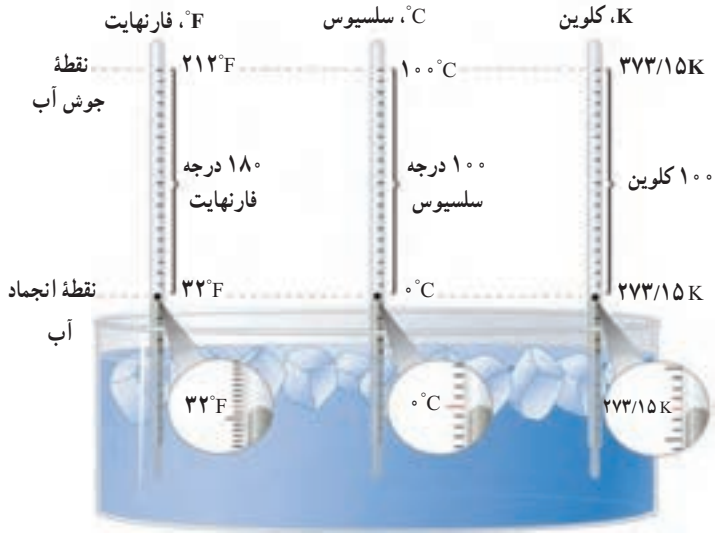
شکل ۴ـ۳ گسترهٔ برخی از دماها

تمرین ۴ـ۱

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

یکای رایج دیگر دما که هنوز هم در صنعت و هواشناسی کاربرد دارد، فارنهایت است. شکل ۴ـ۴ مقایسه‌ای از این سه یکای دما را نشان می‌دهد.

با کمی دقت متوجه می‌شویم که رابطهٔ مقیاس دمای فارنهایت (F) و سلسیوس (θ) به صورت $F=\frac{9}{5}\theta+32$ است.



شکل ۴ـ۴ مقایسهٔ یکاهای فارنهایت، سلسیوس و کلوین

تمرین ۴ـ۲

الف) دمای بدن یک انسان سالم تقریباً $37^{\circ}C$ است. این دما را برحسب کلوین و فارنهایت بنویسید.

ب) گرم‌ترین نقطهٔ روی زمین، ناحیه‌ای در کویر لوت است که دمای آن تا حدود $70^{\circ}C$ و سردترین نقطه در قطب جنوب است که دمای آن تا $-89^{\circ}C$ گزارش شده است. این دماها را برحسب کلوین و فارنهایت به‌دست آورید.

فعالیت ۴ـ۱

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

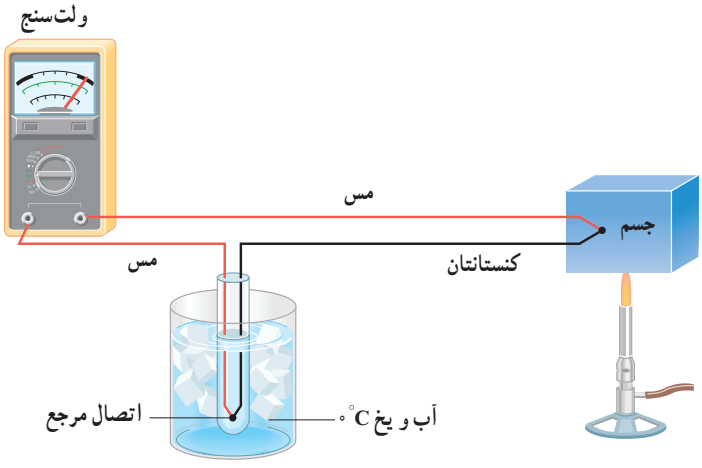
دماسنج‌های معیار[۱] : امروزه از انواع دماسنج‌ها در زندگی روزمره استفاده می‌شود. برخی از آنها در شکل‌های ۴ــ۵ نشان داده شده است.

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

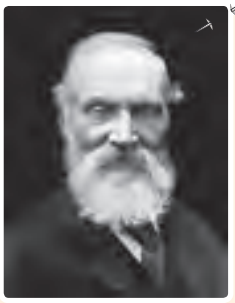
(ب) دماسنج تابشی که بر اساس آشکارسازی شدت تابش گرمایی خروجی از پوست کار می‌کند.

شکل ۴ــ۵

دانشمندان برای کارهای علمی، سه دماسنج را به‌عنوان دماسنج‌های معیار برای اندازه‌گیری گسترهٔ 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 ۴ــ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۶ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل



ویلیام تامسون کلوین[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 الکتریسیته و نیز فرمول‌بندی قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام داد و نقشی مهم در احیای رشتهٔ فیزیک در عصر مدرن ایفا کرد. با این حال، عمدهٔ شهرت کلوین به‌خاطر تعیین دقیق صفر مطلق برابر با $-273/15^{\circ}C$ است و این در حالی است که پیش از او *سَدی کارنوی* فرانسوی در سال ۱۸۲۴، یعنی همان سالی که کلوین زاده شد، مقدار ۲۶۷- را برای دمای صفر مطلق پیشنهاد داده بود. با این وصف، یکای دما در SI به افتخار این کار کلوین، به اسم او نامگذاری شده است. او همچنین به‌خاطر دستاوردهای علمی خود از سال ۱۸۹۲ به لُرد کلوین ملقب شد و اولین دانشمند بریتانیایی نام گرفت که به مجلس لُردها راه یافت. کلوین در ۱۷ دسامبر ۱۹۰۷ م. در سن ۸۳ سالگی در اسکاتلند دیده از جهان فرو بست.

۱ــ Standard Thermometer

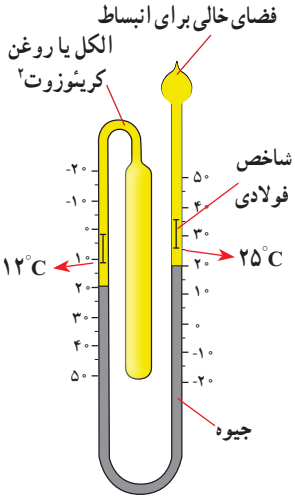
۲ــ William Thomson Baron Kelvin

شکل ۴ــ۷ 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. گسترهٔ دماسنجی یک ترموکوپل به جنس سیم‌های آن بستگی دارد؛ مثلاً در یکی از انواع ترموکوپل‌ها که جنس سیم‌ها از آلیاژهای خاصی[1] است، گسترهٔ دماسنجی از $-270^{\circ}C$ تا $1372^{\circ}C$ است. مزیّت 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 به‌کار رود که در بسیاری از وسایل صنعتی، گرمایشی و سرمایشی یافت می‌شود. شکل ۴ــ۷ روشی از اندازه‌گیری دما با دماسنج‌هایی از این دست را نشان می‌دهد.

فعالیت ۴ــ۲

نوع ویژه‌ای از دماسنج‌های مایعی که بیشینه و کمینهٔ دما را در یک مدت زمان معیّن نشان می‌دهد، دماسنج بیشینه ــ 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.



۴ــ۲ انبساط گرمایی

اگر درِ یک ظرف شیشه‌ای محکم باشد، معمولاً برای باز کردن درِ 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 مادهٔ پرکنندهٔ دندان همان مشخصه‌های انبساط گرمایی دندان را داشته باشد (شکل ۴ــ۸)، 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.

شکل ۴ــ۸ ماده‌ای که دندان را پر می‌کند باید همان مشخصه‌های گرمایی دندان را داشته باشد.

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

۲ــ creosote

پرسش ۴ــ۱

الف) چرا بهتر است قفل و کلید یک در، هم‌جنس باشند؟

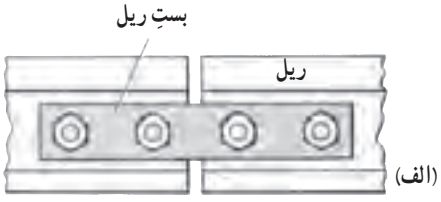
ب) چرا در برخی از فصل‌های سال، بعضی از درب‌ها در چارچوب خود گیر می‌کنند؟

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 پدیدهٔ انبساط در ساختن پل‌ها، ساختمان‌ها، خط‌آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

فعالیت ۴ــ۳

۱) شکل (الف) طرحی از دو قسمت متوالی خط‌آهن (ریل راه‌آهن)های قدیمی و شکل (ب) تصویر واقعی از آن را در گذشته نشان می‌دهد. اگر فاصلهٔ خالی بین این دو قسمت به حدّ کافی زیاد نمی‌بود، چه مشکلی پیش می‌آمد؟

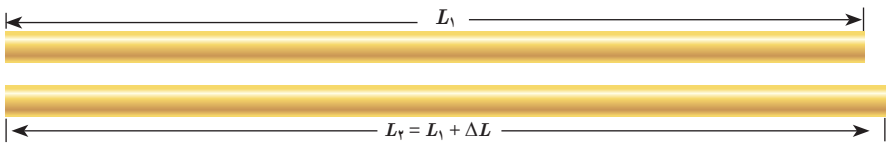
۲) امروزه بین قسمت‌های متوالی خطّ آهن فاصله‌ای در نظر گرفته نمی‌شود و این قسمت‌ها پشت سرهم جوشکاری می‌شوند. تحقیق کنید در این روش چگونه مشکل ناشی از انبساط در یک روز گرم تابستانی برطرف می‌شود؟



(الف)

(ب) بست ریل

انبساط طولی : میله‌ای فلزی به طول اوّلیهٔ $L = L_1$ را در نظر بگیرید. اگر دمای میله را به اندازهٔ ΔT افزایش دهیم، تجربه نشان می‌دهد که طول میله به اندازهٔ $\Delta L = L_2 - L_1$ افزایش می‌یابد (شکل ۴ــ۹).



شکل ۴ــ۹ انبساط گرمایی میله‌ای به طول اولیهٔ L_1

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هرچه تغییر دمای میلهٔ فلزی بیشتر باشد، افزایش طول بیشتر است و هرچه طول اوّلیهٔ میله بزرگ‌تر باشد، به ازای یک تغییر دمای مشخص افزایش طول بیشتر خواهد بود. همچنین اگر دمای دو میلهٔ 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 رابطهٔ زیر به‌دست آورد :

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \qquad (۴ــ۲)$$

به α ضریب انبساط طولی میله می‌گویند که به جنس میله بستگی دارد.

در رابطهٔ ۴ــ۲، ΔL و L_1 برحسب متر (m)، ΔT برحسب کلوین (K) یا درجهٔ سلسیوس (°C) و از آنجا یکای α، برکلوین (1/K) یا بر درجهٔ سلسیوس (1/°C) تعیین می‌شود.

ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۴ــ۱ 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 ۴ــ۱ ضریب انبساط طولی برخی اجسام

ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$	ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$
الماس	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶}$	مس	۱۷×۱۰^{-۶}
شیشهٔ پیرکس	$۳/۲ \times ۱۰^{-۶}$	برنج	۱۹×۱۰^{-۶}
شیشهٔ معمولی	$۹\text{ــ}۱۲ \times ۱۰^{-۶}$	آلومینیم	۲۳×۱۰^{-۶}
فولاد	$۱۱\text{ــ}۱۳ \times ۱۰^{-۶}$	سرب	۲۹×۱۰^{-۶}
بتون	$۱۰\text{ــ}۱۴ \times ۱۰^{-۶}$	یخ (در $۰^\circ C$)	۵۱×۱۰^{-۶}

مثال ۴ــ۱

طول یک پل معلق[۱] (شکل الف)، ۱۱۵۸ m است. این پل از نوعی فولاد با $\alpha = ۱۳ \times ۱۰^{-۶} / ^\circ C$ ساخته شده است. فرض کنید کمترین دمای ممکن $-۵۰^\circ C$ و بیشترین دمای ممکن $+۵۰^\circ C$ باشد. بیشترین تغییر طول ممکن پل چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۲ داریم :

$$\Delta L = \alpha L_۱ \Delta T = (۱۳ \times ۱۰^{-۶} / ^\circ C)(۱۱۵۸ m)(۱۰۰^\circ C) = ۱/۵ m$$

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/انگشتی*[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.

(الف) تصویری از یک پل معلق

(ب) نمونه‌ای از بست‌های انبساطی

(پ) نمونه‌ای دیگر از بست‌های انبساطی

۱ــ پل معلق فولادی مکیناک (Macinac) در میشیگان آمریکا

۲ــ Finger Expansion Joint

آزمایش ۴ــ۱

هدف : اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی

وسیله‌های موردنیاز : دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی، چند لولهٔ فلزی توخالی، ارلن با لولهٔ جانبی و درپوش، لولهٔ لاستیکی، دماسنج، مجموعه پایه و گیره و چراغ‌الکلی.

شرح آزمایش :

۱ــ طول لولهٔ توخالی موردنظر را اندازه بگیرید (L_1) و لوله را روی دستگاه نصب کنید.

۲ــ در ارلن مقداری آب بریزید و درپوش آن را بگذارید.

۳ــ دمای محیط را بخوانید (θ_1) و دماسنج را در جای نشان داده شده قرار دهید.

۴ــ ارلن را گرما دهید تا آب به جوش آید.

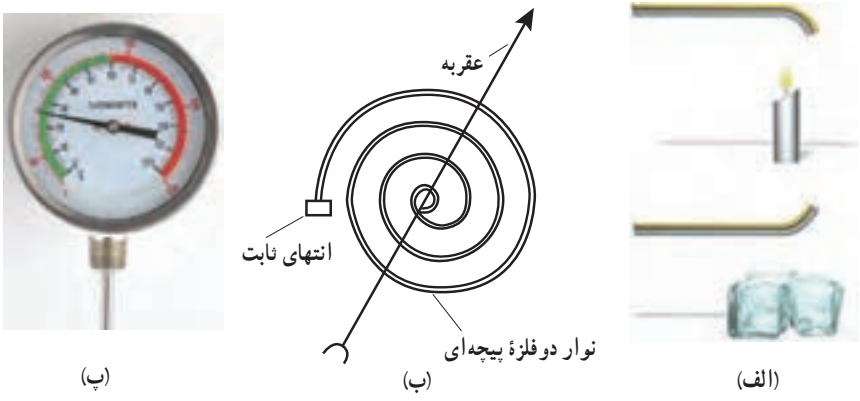
۵ــ آن‌قدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لولهٔ توخالی کاملاً گرم شود و سپس دمای دماسنج را بخوانید (θ_2).

۶ــ افزایش طول میلهٔ توخالی را با ریزسنج متصل به دستگاه اندازه بگیرید (ΔL).

۷ــ با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۲ ضریب انبساط طولی را به‌دست آورید.

۸ــ می‌توانید این آزمایش را برای میله‌های توخالی دیگر، تکرار کنید.

دماسنج نواری دوفلزه : نوار دوفلزه (بی‌متال[1]) از دو تیغهٔ 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 ۴ــ۱۰ (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 ۴ــ۱۰ (ب)، طرحی از این دماسنج را که در آن از یک نوار دوفلزهٔ پیچه‌ای استفاده شده است، نشان می‌دهد و شکل ۴ــ۱۰ (پ)، تصویری واقعی از این نوع دماسنج است.

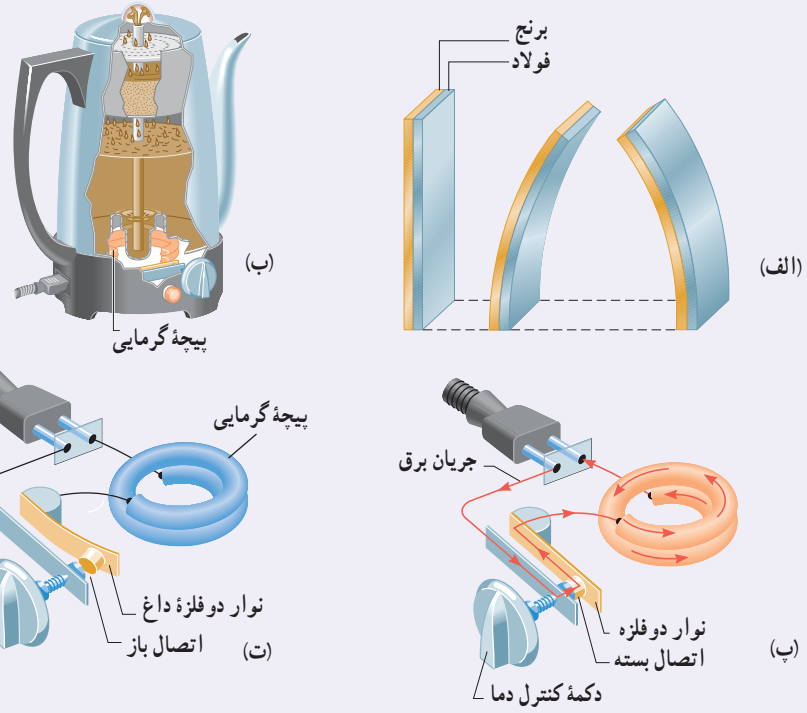


شکل ۴ــ۱۰ (الف) با گرم و سرد شدن، نوار دوفلزه در جهت‌های مخالفی خم می‌شود.
(ب) یک نوار دوفلزهٔ پیچه‌ای (پ) یک دماسنج نواری واقعی

۱ــ bi_metal

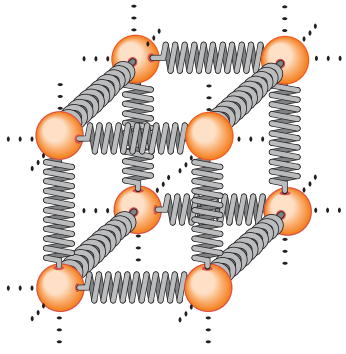
فناوری و کاربرد

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، تیغهٔ با ضریب انبساط بیشتر، کمان خارجی و تیغهٔ دیگر کمان داخلی را تشکیل می‌دهد (شکل ۴ــ۱۱ 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 ۴ ــ ۱۱ 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 ۴ ــ ۱۱ ب). در مدار سادهٔ نشان‌داده شده در شکل ۴ــ۱۱پ، عبور جریان الکتریکی از کتری برقی باعث گرم‌شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازهٔ معینی برسد، بر اثر خم‌شدن نوار، جریان قطع شده و کتری برقی خاموش می‌شود (شکل ۴ ــ ۱۱ ت). با خاموش‌شدن 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 ۴ــ۱۱ الف) تیغهٔ 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.

توجیه انبساط گرمایی، مبتنی بر دیدگاه میکروسکوپی است. انبساط گرمایی یک جسم پیامد تغییر فاصلهٔ بین اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل‌دهندهٔ آن است. برای درک این مدل، چگونگی رفتار اتم‌ها در یک مادهٔ جامد را درنظر بگیرید. همان‌گونه که در فصل ۳ دیدیم، می‌توان اتم‌ها را ذراتی درنظر گرفت که با فنرهایی به اتم‌های مجاور متصل شده‌اند (شکل۴ــ۱۲). اتم‌ها پیرامون مکان‌های تعادل خود با دامنهٔ کم، نوسان می‌کنند. می‌توان نشان داد با افزایش دمای جامد، فاصلهٔ متوسط بین اتم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، جسم جامد منبسط می‌شود.



شکل ۴ــ۱۲ در جامدها، نیروی بین اتمی مثل فنر عمل می‌کند.

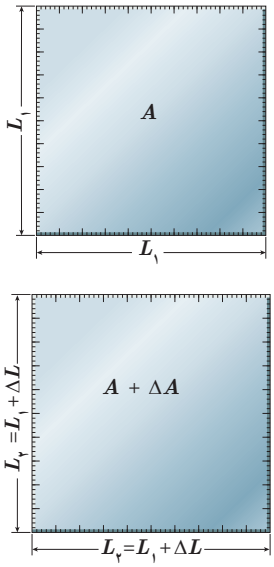
در مایع با افزایش دما حرکت کاتوره‌ای اتم‌ها و مولکول‌ها بیشتر می‌شود. این افزایش حرکت‌ها باعث دورشدن اتم‌ها و مولکول‌ها از هم می‌شود و حجم مایع افزایش می‌یابد.

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 همهٔ ابعاد آن به تناسب افزایش می‌یابد.

در اینجا ابتدا به انبساط سطحی می‌پردازیم. اگر مساحت اولیهٔ جسم جامد A_1 و افزایش دما ΔT باشد، افزایش مساحتی به اندازهٔ ΔA پیدا می‌کند (شکل ۴ــ۱۳). نشان داده می‌شود که این افزایش مساحت از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T \qquad (۴ــ۳)$$

در این رابطه، α ضریب انبساط طولی جسم جامد با یکای بر کلوین $(1/K)$ یا بر درجهٔ سلسیوس $(1/^\circ C)$ است، یکای ΔA و A_1، مترمربع (m^2) و یکای ΔT، کلوین (K) یا درجهٔ سلسیوس $(^\circ C)$ است.



شکل ۴ــ۱۳ انبساط گرمایی یک ورقه مربعی به ضلع $L = L_1$

فعالیت ۴ــ۴

ورقه‌ای فلزی و مستطیلی‌شکل به اضلاع a_1 و b_1 را درنظر بگیرید. بر اثر افزایش دمای ΔT، طول اضلاع مستطیل به اندازهٔ Δa و Δb افزایش می‌یابند. اگر ضریب انبساط طولی ورقه α باشد، نشان دهید که افزایش مساحت این ورقه با تقریب مناسب از رابطهٔ $\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$ به دست می‌آید.

مثال ۴ــ۲

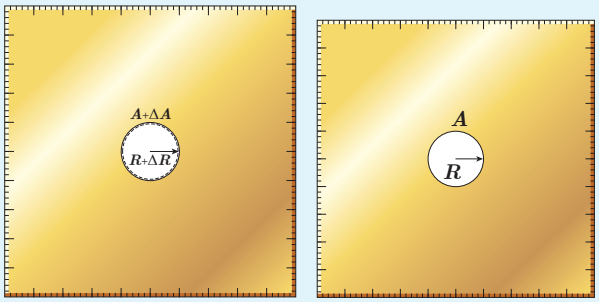
مساحت یک ورقهٔ مسی $2500\ cm^2$ است. اگر دمای این ورقه را $50^\circ C$ افزایش دهیم، مساحت آن چقدر افزایش خواهد یافت؟

پاسخ : از رابطهٔ ۴ــ۳ استفاده می‌کنیم. ضریب انبساط طولی مس با استفاده از جدول ۴ــ۱ برابر $17 \times 10^{-6}/^\circ C$ است؛ بنابراین داریم :

$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T = 2(1/7 \times 10^{-5}/^\circ C)(2500\ cm^2)(50^\circ C) = 4/3\ cm^2$$

تمرین ۴ــ۳

شکل‌های (الف) و (ب) نشان می‌دهند که وقتی روی یک ورقهٔ 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، $200^\circ C$ افزایش یابد، افزایش مساحت حفره چقدرخواهد شد؟



(الف) (ب)

اکنون به انبساط حجمی می‌پردازیم. همان‌طور که گفتیم حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. اگر حجم اولیهٔ جسم (جامد یا مایع) V_1 و افزایش دما ΔT باشد، جسم افزایش حجمی به اندازهٔ ΔV پیدا می‌کند که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$\Delta V=\beta V_1 \Delta T \qquad (۴_۴)$$

در این رابطه، β ضریب انبساط حجمی جامد یا مایع است. یکای ΔV و V_1 مترمکعب (m^3)، یکای ΔT ، کلوین (K) یا درجهٔ سلسیوس ($^\circ C$) و از آنجا یکای β، بر کلوین ($1/K$) یا بر درجهٔ سلسیوس ($1/^\circ C$) است.

انبساط طولی بیشترجامدها 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.

$$\beta_{\text{جامد}} = ۳\alpha \qquad (۵_۴)$$

چون مایع‌ها شکل معینی ندارند، انبساط آنها را فقط به‌صورت حجمی بررسی می‌کنیم. در جدول ۴ــ۲ ضریب انبساط حجمی برخی مایع‌ها داده شده است.

جدول۴ــ۲ ضریب انبساط حجمی چند مایع

ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
جیوه	$۰/۱۸ \times ۱۰^{-۳}$
گلیسیرین	$۰/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$
روغن زیتون	$۰/۷۰ \times ۱۰^{-۳}$
پارافین	$۰/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$
بنزین	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$
اتانول	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۳}$
اسید استیک	$۱۱/۰ \times ۱۰^{-۳}$
بنزن	$۱۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$
کلروفرم	$۱۲/۷ \times ۱۰^{-۳}$
استون	$۱۴/۳ \times ۱۰^{-۳}$
اتر معمولی	$۱۶/۰ \times ۱۰^{-۳}$
آمونیاک	$۲۴/۵ \times ۱۰^{-۳}$

مثال ۴ــ۳

در یک روز داغ تابستان که دمای هوا $۴۰/۰^\circ C$ است، شخصی باکِ (مخزن) ۵۵ لیتری اتومبیل خود را از بنزین کاملاً پر می‌کند. فرض کنید بنزین از منبعی در زیرزمین با دمای $۱۲^\circ C$ 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 هم‌دما شدن با محیط داشته است، دمای نهایی آن را $۴۰/۰^\circ C$ در نظر می‌گیریم.

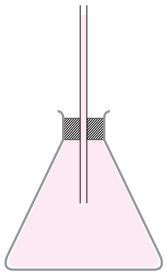
اکنون با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۴ و جدول ۴ــ۲ برای ضریب انبساط حجمی بنزین خواهیم داشت :

$$\Delta V=\beta V_1 \Delta T = (۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}/^\circ C)(۵۵L)(۴۰/۰^\circ C - ۱۲^\circ C) = ۱/۵L$$

بنابراین، در کمال تعجب درمی‌یابیم که ۱/۵ لیتر بنزین روی زمین ریخته است.

نکتهٔ مهم در استفاده از رابطهٔ ۴ــ۴ این است که باید یکای ΔV و V_1 یکسان باشد. مقایسهٔ ضریب انبساط حجمی جامدها با ضریب انبساط حجمی مایعات نشان می‌دهد انبساط حجمی جامدها عموماً از مایعات بسیار کمتر است و به‌همین دلیل در بسیاری از محاسبات می‌توان از مقدار افزایش حجم جامد در مقابل مقدار افزایش حجم مایع صرف‌نظر کرد.

مثال ۴ـ۴



ارلنی شیشه‌ای را که در دمای $۲۰/۰^\circ C$ گنجایشی برابر با $۲۰۰/۰cm^۳$ دارد، مطابق شکل با گلیسیرین در همان دما پر کرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسیرین را به $۶۰/۰^\circ C$ برسانیم

الف) آیا گلیسیرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

ب) اگر پاسخ قسمت (الف) مثبت است، حجم گلیسیرین سرریز شده چقدر است؟

پاسخ :

الف) افزایش حجم گلیسیرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطه‌های ۴ـ۴ و ۴ـ۵ محاسبه می‌کنیم.

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} = \beta_{\text{گلیسیرین}} V_۱ \Delta T = (۴۹ \times ۱۰^{-۵}/^\circ C)(۲۰۰/۰cm^۳)(۶۰/۰^\circ C - ۲۰/۰^\circ C) = ۳/۹cm^۳$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_۱ \Delta T = (۳\alpha_{\text{شیشه}}) V_۱ \Delta T = (۳\times ۹ \times ۱۰^{-۶}/^\circ C)(۲۰۰/۰cm^۳)(۶۰/۰^\circ C - ۲۰/۰^\circ C) = ۰/۲cm^۳$$

در این محاسبه از جدول‌های ۴ـ۲ و ۴ـ۱ برای ضریب انبساط حجمی گلیسیرین و ضریب انبساط طولی شیشه استفاده کرده‌ایم؛ چون افزایش حجم گلیسیرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسیرین از ظرف سرریز می‌شود.

ب) حجم گلیسیرین سرریز شده برابر است با

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (۳/۹cm^۳ - ۰/۲cm^۳) = ۳/۷cm^۳$$

فعالیت ۴ـ۵

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با آن بتوانید حجم گلیسیرین سرریز شده در مثال ۴ـ۴ را اندازه بگیرید. سپس از روی آن، ضریب انبساط حجمی گلیسیرین را تعیین کنید.

تمرین ۴ـ۴

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. رابطهٔ چگالی با تغییر دما به صورت $\rho_۲ = \rho_۱/(۱+\beta\Delta T)$ است که در آن $\rho_۱$ و $\rho_۲$ به ترتیب چگالی ماده در دماهای $T_۱$ و $T_۲$ ، β ضریب انبساط حجمی و $\Delta T = T_۲ - T_۱$ است.

الف) رابطهٔ چگالی با تغییر دما را به دست آورید.

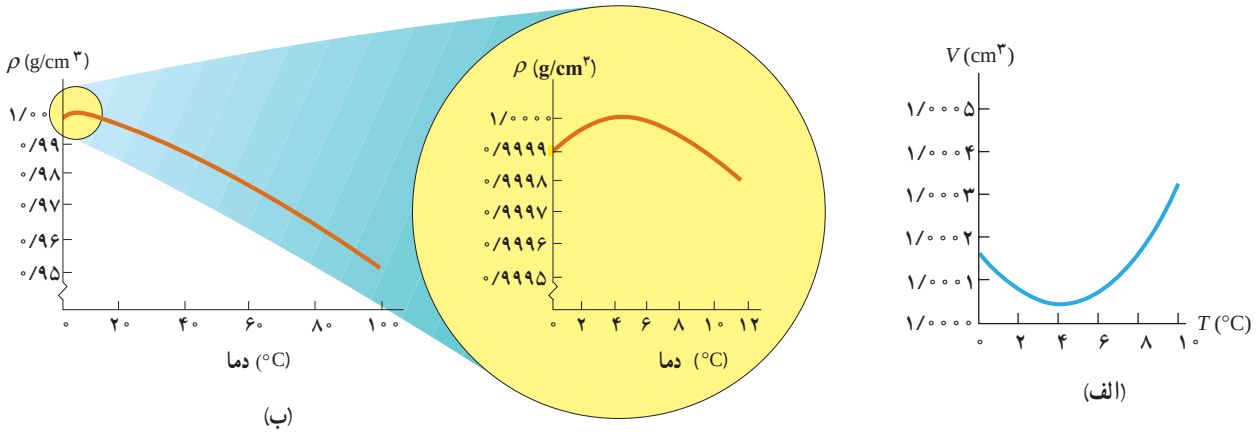
ب) نشان دهید با تقریب مناسبی می‌توان چگالی جسم را از رابطهٔ $\rho_۲ = \rho_۱(۱-\beta\Delta T)$ نیز به دست آورد.

مثال ۴ـ۵

یک قطعه سرب را در دمای اتاق در نظر بگیرید. اگر دمای این قطعه را $۲۰۰^\circ C$ افزایش دهیم، چگالی آن چند برابر می‌شود؟

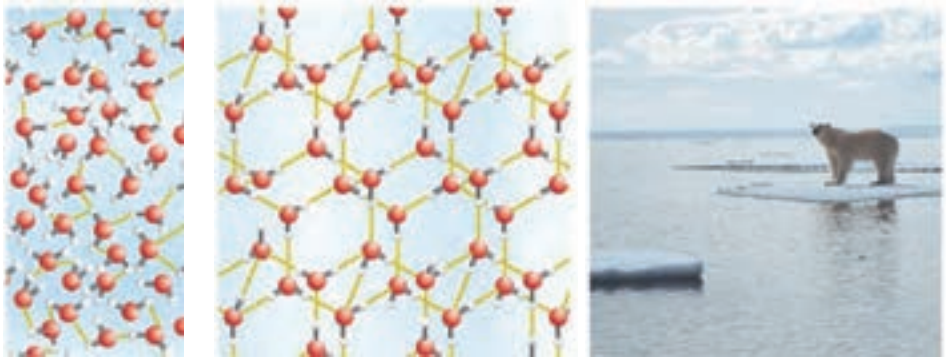
$$\rho_۲ = \rho_۱(۱-\beta\Delta T) \Rightarrow \frac{\rho_۲}{\rho_۱} = (۱-۳\alpha\Delta T) = ۱ - (۳ \times ۲۹ \times ۱۰^{-۶}/^\circ C)(۲۰۰^\circ C) = ۰/۹۸$$

انبساط غیرعادی آب : در زمستان‌های سرد، سطح آب آبگیرها و دریاچه‌های کوچک یخ می‌زند و به تدریج یخ ضخیم‌تر می‌شود؛ اما در ته آبگیرها، دمای آب بالاتر از $0^\circ C$ 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 می یابد، ولی رفتار آب در محدودهٔ دمایی $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ متفاوت است؛ یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴ــ۱۴ (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 محدودهٔ $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ دیده می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، دربازهٔ دمایی $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ با افزایش دما، حجم آب کاهش و چگالی آن افزایش می‌یابد. پس از دمای $4^\circ C$ 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 $10^\circ C$ اندکی کمتر شود، چگالی آب نسبت به آب زیر خود افزایش می‌یابد و این آب، پایین می‌رود. این رفتار تا رسیدن به دمای $4^\circ C$ ادامه می‌یابد؛ ولی همان‌طور که دیدیم در دمای پایین‌تر از $4^\circ C$، 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 ۴ــ۱۵ــ الف). بنابراین، در حالی که آب زیر دریاچه هنوز مایع است و دمایی 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 ۴ــ۱۴ (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، به‌طوری که مولکول‌ها در بعضی نواحی خیلی به هم نزدیک‌اند و در نواحی دیگر، بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۴ــ۱۵ــ ب). وقتی آب از یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، دیگر شبکهٔ بلوری وجود ندارد و آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد (شکل ۴ــ۱۵ــ پ). در محدودهٔ دماهای $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ بقایای ساختار مولکولی یخ هنوز در آب وجود دارد و موجب رفتار غیرعادی آب می‌شود.



(پ) (ب) (الف)

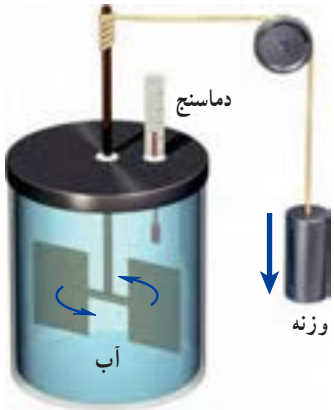
شکل ۴ــ۱۵ (الف) آب در حالت مایع چگال‌تر از یخ است و در نتیجه یخ بر روی آب شناور می‌ماند. (ب) مولکول‌های آب در یخ تشکیل یک شبکهٔ بلوری می‌دهند. (پ) آب در حالت مایع تشکیل شبکهٔ بلوری نمی‌دهد.

فعالیت ۴ــ۶

وقتی آب در یک ظرف روباز یخ می‌بندد معمولاً یک برآمدگی مرکزی ایجاد می‌شود. در این مورد تحقیق کنید.

۴ــ۳ گرما

همان طور که در درس علوم دورهٔ اوّل 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 به‌سرعت 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 ۴ــ۱۶ نشان داده شده است، دریافتند آنچه که در چنین فرایندهایی رُخ 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 می شود. به این انرژی انتقال یافته بر اثر اختلاف دمای دو جسم، گرما گفته می‌شود.



شکل ۴ــ۱۷ نمونه‌ای از آزمایش ژول : در این آزمایش نشان داده می‌شود کار نیروی وزن برابر با مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای آب است.

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،

۱ــ Sir Benjamin Thomson, Count Rumford

۲ــ James Prescott Joule

کالری[1] 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 ۴ــ۱۷).

شکل ۴ــ۱۷ 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 نمی شود.

پرسش ۴ــ۲

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 کدام‌یک از آنها بیشتر از دمای هوای اتاق است؟ دمای کدام‌یک کمتر از دمای هوای اتاق است؟

پ) در شکل ۴ــ۱۷ 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 مبادلهٔ گرما، دمایش به اندازهٔ ΔT تغییر کند، Q متناسب با ΔT است که ضریب این تناسب را با C نشان می‌دهند، به‌طوری‌که :

$$Q = C\,\Delta T \qquad (۴ــ۶)$$

به C، **ظرفیت گرمایی** جسم گفته می‌شود که به جنس جسم و جرم آن بستگی دارد. در رابطهٔ ۴ــ۶ یکای Q، ژول (J) و یکای ΔT، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای C، ژول بر کلوین (J/K) می‌شود.

۱ــ ۱ cal=۴/۱۸۶۰ J

وقتی می‌گوییم ظرفیت گرمایی یک جسم ۲۰۰۰ J/K است، یعنی اگر به آن جسم ۲۰۰۰ J گرما بدهیم، دمای آن ۱K افزایش پیدا می‌کند. توجه کنید که منظور از ظرفیت، این نیست که جسم، توانایی محدودی در مبادلهٔ گرما دارد؛ بلکه تا وقتی که اختلاف دما باشد، مبادلهٔ گرما ادامه می‌یابد. مقادیر 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 ۴ــ۱۸).

شکل ۴ــ۱۸ تصویری از سواحل قشم. آب دریا به دلیل داشتن ظرفیت گرمایی زیاد، دمای هوا را متعادل نگه می‌دارد، اما دمای خودش تغییر محسوسی نمی‌کند.

جدول ۴ــ۳ ــ گرماهای ویژهٔ برخی از مواد *

	مادّه	گرمای ویژه (J/kg.K)
عناصر جامد	سرب	۱۲۸
	تنگستن	۱۳۴
	نقره	۲۳۶
	مس	۳۸۶
	آلومینیم	۹۰۰
جامدهای دیگر	برنج	۳۸۰
	نوعی فولاد (آلیاژ آهن با ۲٪ کربن)	۴۵۰
	استیل ضدزنگ	۴۹۰
	گرانیت	۷۹۰
	بتون	۸۰۰
	شیشه	۸۴۰
	یخ	۲۲۲۰
مایعات	جیوه	۱۴۰
	اتانول	۲۴۳۰
	آب دریا	۳۹۰۰
	آب	۴۱۸۷

* تمام مواد غیر از یخ در دمای $20^{\circ}C$

گرمای ویژه : تجربه نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی اجسامی که از مادّهٔ 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 درجهٔ 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 رابطهٔ ۴ــ۶ چنین می‌شود :

$$Q = mc\Delta T \qquad (۴ــ۷)$$

در رابطهٔ ۴ــ۷ یکای Q، ژول (J) و یکای m، کیلوگرم (kg) و یکای ΔT، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای c در SI، ژول بر کیلوگرم ـ کلوین (J/kg.K) است.

گرمای ویژهٔ یک جسم به جنس مادّهٔ تشکیل دهندهٔ آن بستگی دارد. گرمای ویژهٔ برخی از مواد در جدول ۴ــ۳ داده شده است.

مثال ۴ــ۶

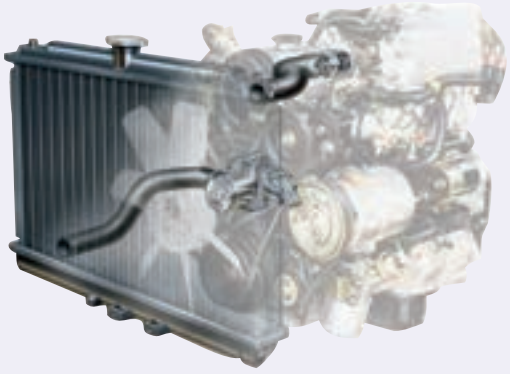
مقدار $2/00\ L$ آب با دمای $20/0^{\circ}C$ در اختیار داریم. چقدر گرما لازم است تا دمای این آب را به نقطهٔ جوش آن (در دمای $100^{\circ}C$) برسانیم؟

پاسخ : براساس چگالی آب، جرم $1/00\ L$ آب برابر $1/00\ kg$ است و از جدول ۴ــ۳ گرمای ویژهٔ آب $4187\ J/kg.^{\circ}C$ است. بنابراین، گرمای لازم برای گرم کردن $2/00\ kg$ آب، از $20/0^{\circ}C$ تا نقطهٔ جوش آب، برابر است با

$$Q = m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}}\, \Delta T = (2/00\,kg)(4187\,J/kg.^{\circ}C)(100/0^{\circ}C - 20/0^{\circ}C) = 6/70 \times 10^{5}\,J$$

فناوری و کاربرد

استفاده از آب در دستگاه‌های گرم‌کننده و خنک‌کننده : در جدول ۴ــ۳ دیدیم که گرمای ویژهٔ آب از سایر مواد بیشتر است. این نشان می‌دهد که وقتی یک کیلوگرم آب به اندازهٔ یک درجهٔ سلسیوس تغییر دما دهد، در مقایسه با سایر مواد، گرمای بیشتری با محیط اطراف خود مبادله می‌کند. از این خاصیت آب برای گرم کردن فضای خانه‌ها به وسیلهٔ شوفاژ استفاده می‌شود. آبِ گرم شده در مخزن به وسیلهٔ پمپ (تلمبه) و از طریق لوله به رادیاتور می‌رسد. آب در رادیاتور که با هوای سرد در تماس است، سرد می‌شود و بخشی از انرژی درونی خود را از دست می‌دهد و بار دیگر، از طریق لوله‌های برگشت، به مخزن برمی‌گردد و در هر چرخه باز همین عمل تکرار می‌شود. از آب برای خنک کردن موتور خودروها نیز استفاده می‌شود (شکل ۴ــ۱۹). بدین منظور، در محفظهٔ سیلندر و سرسیلندر، مسیرهای عبور آب درنظر گرفته شده است که به وسیلهٔ واترپمپ (تلمبهٔ آب)، آب به سرعت در درون این مسیرها گردش می‌کند و گرما را از موتور به رادیاتور اتومبیل می‌برد. در اثر عبور هوا از میان پره‌های رادیاتور، هوا با آب درون رادیاتور تبادل گرمایی می‌کند، آب انرژی خود را از دست می‌دهد و دوباره به موتور برمی‌گردد و این عمل تکرار می‌شود.



شکل ۴ــ۱۹ تصویری از سیستم خنک‌کنندهٔ خودرو

پرسش ۴ــ۳

چند گوی فلزی از جنس‌های مختلف، مثلاً از آلومینیم، فولاد، برنج، مس، سرب و ...، را اختیار می‌کنیم که همگی جرم یکسانی داشته باشند. گوی‌ها را توسط ریسمان‌هایی داخل ظرف آبی قرار می‌دهیم که آب آن درحال جوشیدن است و پس از مدتی گوی‌ها را بیرون آورده و آنها را روی یک ورقهٔ پارافین قرار می‌دهیم. به‌نظر شما کدام گوی، پارافین بیشتری را ذوب می‌کند و علت آن چیست؟ این آزمایش را نخستین بار فیزیک‌دان ایرلندی، جان تیندال[1] (۱۸۹۳ــ۱۸۲۰م.) طراحی و اجرا کرد.

گوی‌ها بسته به جنس خود، ورقهٔ پارافین را در زمان‌های متفاوت ذوب می‌کنند.

۱ــ John Tyndall

شکل ۴ــ۲۰ یک مول هوا، یک مول آب، یک مول نمک طعام در کنار هم

مول و عدد آووگادرو : همان‌طور 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 $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ از اجزای سازندهٔ آن ماده است که به آن عدد آووگادرو گفته می‌شود؛ مثلاً یک مول آلومینیم به معنای $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ اتم آلومینیم است و یک مول آلومینیم‌اکسید به معنای $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ مولکول آلومینیم‌اکسید 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 :

$$n = \frac{m}{M} \qquad (۸ــ۴)$$

که در آن n برحسب مول (mol)، m برحسب کیلوگرم (kg) و M برحسب کیلوگرم بر مول (kg/mol) است؛ مثلاً شکل ۴ــ ۲۰ یک مول از سه نمونه مواد در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

مثال ۴ــ۷

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 ۰/۲۰۰ g است. چه تعداد اتم کربن در این الماس وجود دارد؟ جرم مولی کربن ۱۲/۰۱۱ g/mol است.

پاسخ : نخست با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۸ تعداد مول اتم کربن موجود در الماس را به‌دست می‌آوریم :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{(۴۴/۵ \times ۰/۲۰۰)\text{g}}{(۱۲/۰۱۱)\text{g/mol}} = ۰/۷۴۱\text{mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از کربن به تعداد عدد آووگادرو اتم کربن وجود دارد، نتیجه می‌گیریم :

(تعداد اتم کربن) = (تعداد مول) (عدد آووگادرو)

$$= (۰/۷۴۱\text{mol})(۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}\ \text{اتم}/\text{mol}) = ۴/۴۶ \times ۱۰^{۲۳}\ \text{اتم}$$

گرمای ویژهٔ 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 ویژهٔ 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 ۱K افزایش یابد (با این کمیت در فصل ۵ بیشتر آشنا خواهیم شد).

اگر گرمای ویژهٔ مولی مواد مختلف را با هم مقایسه کنیم، به نظم شگفت‌انگیزی پی‌می‌بریم و درمی‌یابیم برای بیشتر فلزها، مقدار آن تقریباً مساوی با ۲۵ J/mol.K است. این نظم با آنکه تقریبی است به نام قاعدهٔ «دولن و پتی[۱]» 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.

۱ــ Rule of Dulong–Petit

دمای تعادل : اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرارگیرند ، پس از مدتی همدما می‌شوند، یعنی دمای آنها به مقدار یکسانی می‌رسد. به این دما، **دمای تعادل** می‌گویندکه می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی، آن را محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند و بقیهٔ 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 رابطهٔ (۴ ــ۷) نیز درمی‌یابیم که با افزایش دما، مقدار مثبتی برای Q به‌دست می‌آید و با کاهش دما، مقداری منفی برای Q به‌دست می‌آید. بنا به قانون پایستگی انرژی، همان‌قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند، پس جمع جبری این Qها صفر می‌شود :

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots = 0 \qquad (۴ــ۹)$$

هرگاه چند جسم متفاوت با گرماهای ویژهٔ c_1، c_2، c_3 و ... به جرم‌های m_1، m_2، m_3 و ... با دماهای اولیهٔ θ_1، θ_2، θ_3 و ... را در تماس با یکدیگر قرار دهیم با استفاده از رابطهٔ (۴ــ ۹) معادله‌ای به دست می‌آوریم که می‌توان دمای تعادل θ را از آن محاسبه کرد.

$$m_1 c_1(\theta - \theta_1) + m_2 c_2(\theta - \theta_2) + m_3 c_3(\theta - \theta_3) + \ldots = 0 \qquad (۴ــ۱۰)$$

مثال ۴ــ ۸

شخصی $0/300\,kg$ آب $70/0^\circ C$ را در یک لیوان آلومینیمی $0/120$ کیلوگرمی که دمای آن $20/0^\circ C$ 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 مبادلهٔ گرمایی با محیط نداریم، با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۹ داریم :

$$Q_{\text{آب}} + Q_{\text{آلومینیم}} = 0$$

اکنون با استفاده از رابطهٔ ۴ــ ۷ ($Q = mc\Delta\theta$) خواهیم داشت :

$$m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}}\, (\theta - \theta_{1\,\text{آب}}) + m_{\text{آلومینیم}}\, c_{\text{آلومینیم}}\, (\theta - \theta_{1\,\text{آلومینیم}}) = 0$$

که در آن θ دمای تعادل مجموعه است. با استفاده از گرماهای ویژهٔ آب و آلومینیم از جدول ۴ــ ۳ خواهیم داشت :

$$(0/300\,kg)(4187\,J/kg.^\circ C)(\theta - 70/0^\circ C) + (0/120\,kg)(9/00\times 10^2\,J/kg.^\circ C)(\theta - 20/0^\circ C) = 0$$

و از آنجا پس از اندکی محاسبهٔ جبری برای دمای تعادل به $\theta = 66/0^\circ C$ می‌رسیم.

از معادلهٔ ۴ــ۱۰ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژهٔ یک جسم نیز استفاده کنیم.

مثال ۴ــ۹

در ظرف عایقی حاوی ۰/۵۰۰kg آب ۲۰/۰°C، یک قطعه مس ۰/۱۰۰ کیلوگرمی به دمای ۵۰/۰°C و یک قطعه فلز دیگر به جرم ۰/۱۵۰kg و به دمای ۶۰/۰°C و گرمای ویژهٔ نامعلوم می‌اندازیم و دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل ۲۲/۰°C شده است. با چشم‌پوشی از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام، گرمای ویژهٔ فلز را حساب کنید.

پاسخ : دمای تعادل ۲۲/۰°C است و نیز با استفاده از سایرداده‌های این مثال و جدول۴ــ۳ داریم :

آب: $m_1=0/500\,kg$ ، $\theta_1=20/0\,^\circ C$ ، $c_1=4187\ J/kg.^\circ C$

مس: $m_2=0/100\,kg$ ، $\theta_2=50/0\,^\circ C$ ، $c_2=386\ J/kg.^\circ C$

فلز: $m_3=0/150\,kg$ ، $\theta_3=60/0\,^\circ C$ ، $c_3=?$

اکنون با استفاده از رابطهٔ ۴ــ ۱۰ خواهیم داشت :

$$m_1c_1(\theta-\theta_1)+m_2c_2(\theta-\theta_2)+m_3c_3(\theta-\theta_3)=0$$

$$(0/500\,kg)(4187J/kg.^\circ C)(22/0^\circ C-20/0^\circ C)+(0/100\,kg)(386J/kg.^\circ C)(22/0^\circ C-50/0^\circ C)$$

$$+(0/150\,kg)c_3(22/0^\circ C-60/0^\circ C)=0\Rightarrow c_3=545J/kg.^\circ C$$

تمرین ۴ــ۵

جسمی به جرم ۰/۲۵۰kg و دمای ۳/۰°C را درون ظرف عایقی حاوی ۰/۵۰۰kg آب ۲۵/۰°C می‌اندازیم. پس از چنددقیقه دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل ۲۱/۰°C می‌شود. گرمای ویژهٔ جسم را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام چشم‌پوشی کنید.

گرماسنج و گرماسنجی : گرماسنج که به آن کالری‌متر نیز می‌گویند شامل ظرفی است درپوش‌دار که به خوبی عایق‌بندی گرمایی شده است (شکل ۴ــ۲۱). این ظرف در آزمایش‌های گرماسنجی مانند تعیین گرمای ویژهٔ اجسام، به‌کار می‌رود. در گرماسنج مقداری آب با جرم معین می‌ریزیم و پس از هم‌دما شدن آب و گرماسنج، دمای آب را اندازه می‌گیریم. سپس جسمی را که می‌خواهیم گرمای ویژه‌اش را پیدا کنیم و جرم و دمای اولیهٔ آن معلوم است، درون گرماسنج قرار می‌دهیم. آنگاه به کمک همزن آب را به هم می‌زنیم تا مجموعه سریع‌تر به دمای تعادل برسد. پس از برقراری تعادل گرمایی، دمای تعادل را اندازه می‌گیریم.

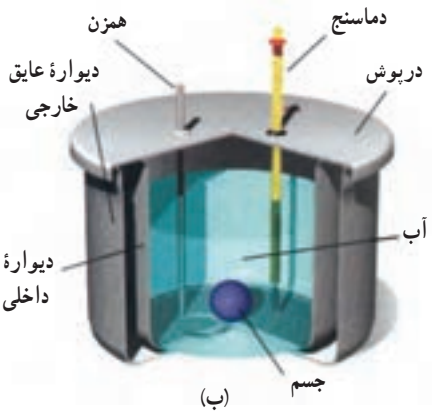
با استفاده از رابطه‌های (۴ــ ۹) و (۴ــ ۱۰) و با چشم‌پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادلهٔ گرما داریم :

$$Q_{آب}+Q_{جسم}+Q_{ظرف}=0$$

$$m_{آب}c_{آب}(\theta-\theta_{1آب})+m_{جسم}c_{جسم}(\theta-\theta_{1جسم})+m_{ظرف}c_{ظرف}(\theta-\theta_{1ظرف})=0$$

به کمک این رابطه می‌توانیم گرمای ویژهٔ جسم را به دست آوریم. معمولاً در مورد گرماسنج به جای آنکه جرم و گرمای ویژهٔ ظرف گرماسنج را جداگانه معلوم کنند، ظرفیت گرمایی ظرف گرماسنج را مشخص می‌کنند.

(الف)



(ب)

شکل ۴ــ۲۱ (الف) عکسی واقعی و (ب) طرحی از نمای داخلی یک گرماسنج

مثال ۴ــ ۱۰

برای اندازه‌گیری گرمای ویژهٔ فلزی با جنس نامعلوم، قطعه‌ای ۰/۶۰۰ کیلوگرمی از آن را تا $100/0^{\circ}C$ گرم می‌کنیم و سپس آن را در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی $1/80\times10^{2}\ J/K$ که حاوی ۰/۵۰۰kg آب با دمای اولیهٔ $17/3^{\circ}C$ است، می‌اندازیم. اگر دمای نهایی مجموعه $20/0^{\circ}C$ شود، گرمای ویژهٔ این فلز چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ (۴ــ ۱۰) و تعریف ظرفیت گرمایی داریم :

$$Q_{\text{آب}}+Q_{\text{فلز}}+Q_{\text{گرماسنج}}=0$$

$$m_{\text{آب}}c_{\text{آب}}(\theta-\theta_{1\ \text{آب}})+m_{\text{فلز}}c_{\text{فلز}}(\theta-\theta_{1\ \text{فلز}})+C_{\text{گرماسنج}}(\theta-\theta_{1\ \text{گرماسنج}})=0$$

اکنون با جای گذاری مقادیر خواهیم داشت :

$$(0/500\,kg)(4187\,J/kg.^{\circ}C)(20/0^{\circ}C-17/3^{\circ}C)+(0/600\,kg)\,c_{\text{فلز}}(20/0^{\circ}C-100/0^{\circ}C)$$

$$+(1/80\times10^{2}\,J/^{\circ}C)(20/0^{\circ}C-17/3^{\circ}C)=0$$

پس از عملیات جبری، گرمای ویژهٔ فلز $128\ J/kg.^{\circ}C$ به‌دست می‌آید. اگر به جدول ۴ــ۳ نگاه کنیم درمی‌یابیم که این گرمای ویژه بسیار نزدیک به گرمای ویژهٔ سرب است و احتمالاً جنس مادهٔ نامعلوم سرب بوده است.

آزمایش ۴ــ ۲

هدف : تعیین گرمای ویژهٔ فلزی با جنس نامعین

وسیله‌های موردنیاز : گرماسنج با ظرفیت گرمایی معین، یک جسم کوچک فلزی (مثل یک وزنهٔ فلزی قلاب‌دار)، دماسنج، ترازو، بِشر شیشه‌ای، چراغ گازی، سه‌پایه و شعله‌پخش‌کن، انبر.

شرح آزمایش :

۱ــ مقداری آب با جرم معلوم را درون گرماسنج بریزید و صبر کنید تا دمای گرماسنج و آب، یکسان شود. این دما راا‌ندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۲ــ جرم جسم فلزی را به کمک ترازو اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۳ــ جسم فلزی رادرون بشر قرار دهید، مقداری آب روی آن بریزید و سپس مجموعه راروی چراغ گازی روشن بگذارید.

۴ــ صبر کنید تا آب چند دقیقه بجوشد. دمای آب را در این حالت اندازه بگیرید. این دما، همان دمای جسم فلزی نیز هست.

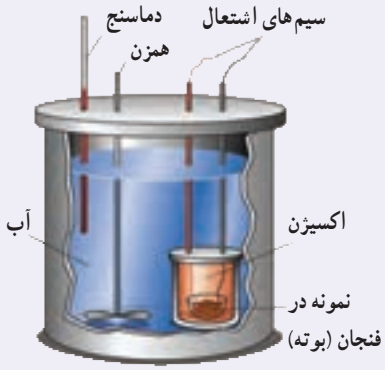
۵ــ جسم داغ شده را توسط انبر به سرعت درون گرماسنج بیندازید.

۶ــ آب درون گرماسنج را با همزن آن به هم بزنید و دمای تعادل راا‌ندازه گرفته و یادداشت کنید.

۷ــ با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۱۰ گرمای ویژهٔ جسم فلزی را به‌دست آورید.

فناوری و کاربرد

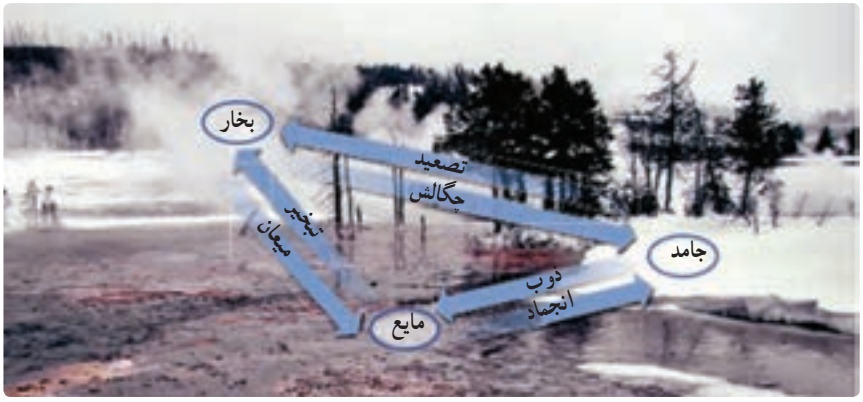
گرماسنج بمبی[۱] : گرماسنج بمبی نوعی گرماسنج است که از آن برای تعیین ارزش غذایی مواد با اندازه‌گیری انرژی آزاد شدهٔ آنها در حین سوختن استفاده می‌شود. نمونه‌ای که جرم آن به دقت اندازه‌گیری شده است در ظرف سربسته‌ای که محتوی اکسیژن است (که اصطلاحاً به آن بمب گفته می‌شود) قرار داده می‌شود (شکل ۴ــ۲۲). سپس این محفظه در آب یک گرماسنج قرار داده می‌شود و توسط جریان الکتریکی عبوری از یک سیم نازک، نمونهٔ داخل آن سوزانده می‌شود. با اندازه‌گیری تغییر دمای آب، انرژی حاصل از احتراق مادهٔ موردنظر را به دست می‌آورند که تقریباً معادل انرژی آزادشده از آن ماده است.



شکل ۴ــ۲۲ اجزای یک گرماسنج بمبی

۴ــ۴ 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 ۴ــ۲۳ 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 ۴ــ۲۳ 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 به طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود، یا در صبح‌های بسیار سرد زمستان، برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشهٔ پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است.

در ادامه تغییر حالت‌های جامد ــ مایع، و مایع ــ بخار را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم.

۱ــ Bomb Calorimeter

۲ــ در مباحث پیشرفته‌تر فیزیک، بخار و گاز تعاریف متفاوتی دارند، ولی در این کتاب هر دو به یک معنا گرفته شده‌اند.

تغییر حالت جامد ــ 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 **نقطهٔ 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 نقطهٔ ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع وقتی این مواد را گرم می‌کنیم، پیش از ذوب شدن خمیری‌شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به‌تدریج ذوب می‌شوند.

معمولاً افزایش فشار وارد بر جسم سبب بالا رفتن نقطهٔ ذوب جسم می‌شود. اما در برخی مواد مانند یخ، افزایش فشار به کاهش نقطهٔ ذوب می‌انجامد که این در مورد یخ بسیار ناچیز است.

فعالیت ۴ــ۷

نقطهٔ ذوب یخ در فشار ۱atm برابر $0^{\circ}C$ است. برای آب نقطه‌ای موسوم به نقطهٔ سه‌گانه وجود دارد که در آن سه حالت یخ، آب و بخار در تعادل‌اند. دمای این نقطه $0/01^{\circ}C$ است. تحقیق کنید برای رسیدن به این نقطه به چه فشاری نیاز است.

در نقطهٔ سه‌گانهٔ آب، سه فاز آب در تعادل‌اند.

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 ۴ــ۲۴) مثالی مشهور از این دست است.

شکل ۴ــ۲۴ تصویری از یخ در حال ذوب

فعالیت ۴ــ۸

برف و یخ دو شکل آشنای حالت جامد آب هستند، اما با وجود این، ظاهر متفاوتی دارند. دلیل این امر را تحقیق کنید.

خوب است بدانید

اسپری کردن باغ های میوه : گاهی اوقات گیاهان را با آب اسپری می‌کنند تا آنها را از یخ زدن در سرمایی سخت محافظت کنند. این محافظت ناشی از لایهٔ 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 نقطهٔ انجماد سرد می‌شود و سپس یخ می‌بندد. لازمهٔ 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 $-۲^{\circ}C$ تا $۰^{\circ}C$ 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 به‌درستی 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 به‌طور جزئی یخ زده‌اند، لایهٔ یخی غیر شفاف درست می‌کنند. به همین دلیل باغبان‌ها در طول شب، مدام شفافیت یخ روی گیاهان را بررسی می‌کنند.

جدول ۴ــ۴ــ نقطهٔ ذوب و گرمای نهان ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

مادّه	نقطهٔ ذوب ($^{\circ}C$)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)
هیدروژن	−۲۵۹	۵۸/۶
اکسیژن	−۲۱۸	۱۳/۸
ازت	−۲۱۰	۲۵/۵
جیوه	−۳۹	۱۱/۸
یخ	۰	۳۳۳/۷
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۴	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

انجماد یک مایع و تبدیل آن به یک جامد، عکس فرایند ذوب شدن است و لازمهٔ 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 منتقل‌شده 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 ویژهٔ ذوب می‌گویند که به‌اختصار آن را گرمای نهان ذوب می‌نامیم و آن را با L_F نشان می‌دهیم[۱] .

$$L_F = \frac{Q}{m} \qquad (۴ــ۱۱)$$

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 ($Q>۰$) :

$$Q = +mL_F$$

و اگر تغییر فاز از مایع به جامدانجام شود، جسم گرما از دست می‌دهد ($Q<۰$) :

$$Q = -mL_F$$

گرمای نهان ذوب و نقطهٔ ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقدارها برای برخی از مواد در جدول ۴ــ۴ داده شده است.

۱ــ اندیس F حرف اول واژهٔ انگلیسی «Fusion» است که پیشتر به معنای ذوب به کار می‌رفت. با اینکه هم‌اکنون از واژه «melting» برای ذوب استفاده می‌شود، همچنان از F برای نشان دادن ذوب استفاده می‌گردد.

فعالیت ۴ـ۹

تحقیق کنید وجود ناخالصی در مایع چه تأثیری بر نقطهٔ انجماد آن دارد.

مثال ۴ـ۱۱

فلز گالیم (Ga) یکی از چند عنصری است که در دماهای پایین ذوب می‌شود. دمای ذوب این فلز $29/8^{\circ}C$ و گرمای نهان ذوب آن $80/4\ kJ/kg$ است. یک قطعهٔ $10/0$ گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطهٔ ذوب خود به طور کامل ذوب شود؟ (از تبادل گرما بین فلز و هوای محیط چشم‌پوشی می‌شود.)

پاسخ : با استفاده از رابطه ۴ـ۱۱ داریم :

$$Q = mL_F = (10/0\times10^{-3}kg)(80/4\times10^{3}J/kg) = 804J$$

مثال ۴ـ۱۲

یک جواهرساز برای ساختن جواهری می‌خواهد از $500/0\ kg$ نقره برای ریختن در قالب‌های جواهر استفاده کند. به این منظور او باید نقره را ذوب کند. اگر دمای اولیهٔ نقره همان دمای اتاق و برابر $20/0^{\circ}C$ باشد، چقدر گرما باید به این مقدار نقره داده شود؟

پاسخ : مرحله‌های این فرایند به‌طور طرح‌وار در شکل زیر رسم شده است.

$0/500\ kg$ نقره $20/0^{\circ}C$	Q_1	$0/500\ kg$ نقره در نقطهٔ ذوب $960^{\circ}C$	Q_2	$0/500\ kg$ نقرهٔ مذاب $960^{\circ}C$

که در آن

$$Q_1 = m_{\text{نقره}}\, c_{\text{نقره}}\, \Delta\theta = (0/500\,kg)(236J/kg.^{\circ}C)(960/0^{\circ}C - 20/0^{\circ}C) = 1/11\times10^{5}J$$

$$Q_2 = m_{\text{نقره}}\, L_F = (0/500\,kg)(88/3kJ/kg) = 0/442\times10^{5}J$$

که در آن از گرمای ویژه و گرمای نهان ذوب نقره مندرج در جدول‌های ۴ـ۳ و ۴ـ۴ استفاده کردیم. اکنون گرمای کل با جمع کردن Q_1 و Q_2 به‌دست می‌آید :

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1/11\times10^{5}J + 0/442\times10^{5}J = 1/55\times10^{5}J = 155kJ$$

آزمایش ۴ـ۳

هدف : تعیین گرمای نهان ذوب یخ

وسیله‌های 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 :

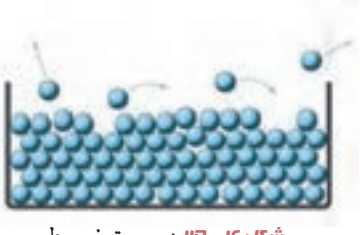
۱ــ ۲۰۰ cc آب در بشر بریزید و آن را روی سه‌پایه قرار دهید. چراغ گاز را روشن کنید تا دمای آب دست‌کم به ۶۰ °C برسد.

۲ــ آب گرم را درون گرماسنج بریزید و پس از مدتی دمای تعادل آب و گرماسنج را با دماسنج اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۳ــ قطعه یخی به جرم تقریبی ۰/۰۵۰ kg را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای ۰/۰ °C) بیرون آورده و جرم آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید.

۴ــ یخ را درون گرماسنج بیندازید و صبر کنید تا کاملاً ذوب شود. اینک دمای تعادل را اندازه بگیرید.

۵ــ با استفاده از اعداد به‌دست آمده، گرمای ذوب یخ (L_F) را حساب کنید.



شکل ۴ــ ۲۵ در حین تبخیر سطحی، مولکول‌های پرانرژی‌تر از سطح مایع می‌گریزند.

تغییر حالت مایع ــ بخار : دیدیم که به تبدیل مایع به بخار تبخیر[1] 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**[2] گفته می‌شود. تا پیش از رسیدن به نقطهٔ جوش مایع، تبخیر به‌طور پیوسته‌ای از سطح مایع رخ می‌دهد. در پدیدهٔ تبخیر سطحی، تندی برخی از مولکول‌های مایع به حدّی می‌رسد که می‌توانند از سطح مایع فرار کنند (شکل ۴ــ ۲۵). تجربه نشان می‌دهد آهنگ رخ دادن این فرایند به عواملی از جمله دما و مساحت سطح مایع بستگی دارد.

فعالیت ۴ــ 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 ــ که از آن گرما تلف می‌شود ــ به حجم داخلی بدن ــ که در آن گرما تولید می‌شود ــ نسبتاً کم است. بنابراین، آنها غالباً دستگاه‌های ویژه‌ای برای خلاص شدن از این گرمای ناخواسته دارند؛ مثلاً سگ‌ها با نفس‌نفس 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 به‌گونه‌ای دیگر عمل می‌کند و با عرق کردن گرما از دست می‌دهد. در واقع عرق کردن سبب می‌شود که لایهٔ آبی روی پوست بدن تشکیل شود. این لایهٔ آب با جذب گرمای مورد نیاز برای تبخیر سطحی از بدن، بدن را خنک می‌کند.

۱ــ Vaporization

۲ــ Evaporation

شکل ۴ــ۲۶ 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[1] است. به این دمای مشخص، نقطهٔ 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 فرومی‌پاشند 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 ۴ــ۲۶). 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 فشارجوّ متعارف (۱atm)، ۱۰۰°C است. در جوشیدن، کلّ مایع در فرایند تبخیر شرکت می‌کند. به فرایند تبخیر تا پیش از رسیدن به نقطهٔ جوش، تبخیر سطحی و به فرایند تبخیر در نقطهٔ جوش، اصطلاحاً جوشیدن می‌گویند، در حالی‌که هر دو فرایند، تبخیرند.

فعالیت ۴ــ۱۱

از تفاوت نقطهٔ جوش اجسام مختلف در صنعت، استفادهٔ زیادی می‌شود. تحقیق کنید چگونه از این ویژگی برای جدا کردن محصولات نفتی استفاده می‌شود؟

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[2] نشان می‌دهیم.

$$L_V = \frac{Q}{m} \qquad (۴ــ۱۲)$$

گرمای نهان تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. جدول ۴ــ۵ برخی از مقدارهای L_V را نشان می‌دهد که به طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به دست آمده است.

جدول ۴ــ۵ مقادیر L_V برای آب در دماهای مختلف*

دما (°C)	L_V (kJ/kg)
۰	۲۴۹۰
۱۵	۲۴۵۴
۵۰	۲۳۷۴
۱۰۰	۲۲۵۶
۱۵۰	۲۱۱۵
۲۰۰	۱۹۴۰

* مقادیر تا ۱۰۰°C در فشار ۱atm است.

پرسش ۴ــ۴

چرا در جدول ۴ــ۵ گرمای تبخیر آب با افزایش دمای آن کاهش می‌یابد؟

۱ــ Boiling

۲ــ زیرنویس V حرف اول واژهٔ انگلیسی Vaporization به معنای تبخیر است.

گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم m که گرمای تبخیر آن L_V است از رابطهٔ $Q = +mL_V$ به دست می‌آید. علامت مثبت نشان دهندهٔ آن است که مایع هنگام تبخیر گرما می‌گیرد.

جدول ۴ــ۶ نقطهٔ جوش و گرمای نهان تبخیر برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر

مادّه	نقطهٔ جوش ($^\circ C$)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیم	−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
گلیسیرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

مثال ۴ــ 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 $50^\circ C$ ثابت مانده باشد، تعیین کنید برای تبخیر $0/200\,kg$ از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۴ــ ۱۲ و استفاده از جدول ۴ــ ۵ داریم :

$$Q = +mL_V = +(0/200\,kg)(2374\times10^3\,J/kg) = 4/75\times10^5\,J$$

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای نهان تبخیر مایع در نقطهٔ جوش آن سروکار داریم و البته نقطهٔ جوش هر مایع به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطهٔ جوش آن می‌شود. جدول ۴ــ۶ نقطهٔ 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 به‌داخل 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 بادِ بادگیر خارج می‌شود.

پرسش ۴ــ۵

الف) چرا غذا در دیگ زودپز، زودتر پخته می‌شود؟

ب) دلیل دیرتر پخته شدن تخم‌مرغ در ارتفاعات چیست؟ کوهنوردان برای رفع این مشکل چه کاری انجام می‌دهند؟

مثال ۴ــ۱۴

۲/۰ لیتر آب را درون یک کتری برقی با توان الکتریکی ۱/۵kW می‌ریزیم و آن را روشن می‌کنیم.

الف) از شروع جوشیدن تا تبخیر همهٔ 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 ۴ــ ۱۲ و جدول ۴ــ ۶ داریم :

$$Q = mL_V = (۲/۰\,\text{kg})(۲۲۵۶\times۱۰^{۳}\,\text{J/kg}) = ۴/۵\times۱۰^{۶}\,\text{J}$$

ب) آن‌گاه با استفاده از رابطهٔ توان خواهیم داشت :

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{۴/۵\times۱۰^{۶}\,\text{J}}{۱/۵\times۱۰^{۳}\,\text{J/s}} = ۳/۰\times۱۰^{۳}\,\text{s} = ۵۰\,\text{min}$$

برای اندازه‌گیری گرمای نهان تبخیر در نقطهٔ جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش ۴ــ ۴ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

آزمایش ۴ــ۴

هدف : تعیین گرمای نهان تبخیر آب

وسیله‌های مورد نیاز : بشر ۲۰۰cc، دماسنج، سه‌پایه، توری، پایه و گیره، چراغ گاز، زمان‌سنج، آب و ترازو

شرح آزمایش :

۱ــ جرم بشر خالی را اندازه‌گیری کنید و مقدار معیّنی آب (مثلاً ۰/۲۰۰kg) در آن بریزید.

۲ــ توری را روی سه‌پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و بشر را روی توری قرار دهید.

۳ــ دماسنج را به کمک پایه و گیره طوری درون بشر قرار دهید تا مخزن آن کمی پایین‌تر از سطح آب باشد.

۴ــ در لحظه‌ای که دمای آب به $\theta_۱ = ۷۰\,^{\circ}\text{C}$ می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید ($t_۱ = ۰\,\text{s}$).

۵ــ صبر کنید تا آب به‌جوش آید. زمان ($t_۲$) و دما ($\theta_۲$) را ثبت کنید.

۶ــ با استفاده از رابطهٔ $P(t_۲-t_۱) = mc(\theta_۲-\theta_۱)$ و جای‌گذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب (P) را به‌دست آورید.

۷ــ گرما دادن را آن‌قدر 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).

۸ــ زمان ($t_۳$) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن کردن آن جرم آب بخار شده (m') را به‌دست آورید.

۹ــ گرمای تبخیر را با استفاده از رابطهٔ $P(t_۳-t_۲) = m'\,L_V$ به‌دست آورید.

تمرین ۴ــ۶

قطعه یخی به جرم ۱/۰kg و دمای اولیهٔ ۲۰°C− را آن قدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار ۱۰۰°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 رابطهٔ $Q=-mL_V$ محاسبه می‌شود. علامت منفی نشان‌دهندهٔ 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 ۴ــ۱۲

در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق کنید.

مثال ۴ــ۱۵

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی روی شیشهٔ پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره‌قطره می‌شود. اگر دمای شیشه حدود ۰°C باشد برای آنکه ۵۰g آب روی شیشه تشکیل شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

پاسخ : با استفاده از جدول ۴ــ۶ و رابطهٔ ۴ــ۱۲ داریم :

$$Q=-mL_V=-(۵۰\times۱۰^{-۳}\,\text{kg})(۲۴۹۰\times\frac{۱۰^{۳}\,\text{J}}{\text{kg}})=-۱/۲\times۱۰^{۵}\,\text{J}$$

در این عمل، $۱/۲\times۱۰^{۲}\,\text{kJ}$ گرما به شیشه داده می‌شود.

فعالیت ۴ــ۱۳

در فرایندهای تغییر حالت (تغییر فاز) دما تغییر نمی‌کند، اما انرژی درونی ماده تغییر می‌کند. در این‌باره تحقیق کنید.

۴ــ۵ روش‌های انتقال گرما

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 سهٔ این ساز و کارها دخالت داشته باشند (شکل ۴ــ۲۷).

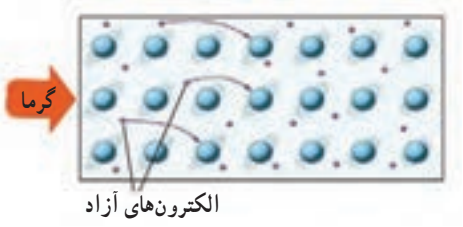
اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. انتقال گرما، از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم هم‌دما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر ساز وکار هریک از این روش‌ها می‌پردازیم.

شکل ۴ــ۲۷ هر سه روش انتقال گرما را در این تصویر مشاهده می‌کنید.

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 ۴ــ۲۸). به جهت نبودِ 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.

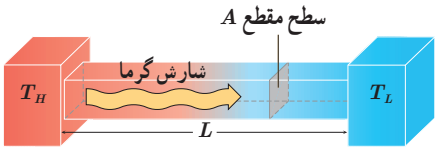
شکل ۴ــ۲۸ در نافلزات گرما صرفاً از طریق ارتعاش اتم‌ها انتقال می‌یابد. در شکل، این انتقال ارتعاشات توسط فنرها شبیه‌سازی شده است.

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 ۴ــ ۲۹). بنابراین، در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرما بیشتر از اتم‌هاست.



شکل ۴ــ۲۹ الکترون‌های آزاد با برخورد به یکدیگر و اتم‌ها موجب رسانش بهتری برای گرما می‌شوند.

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 ۴ــ 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.

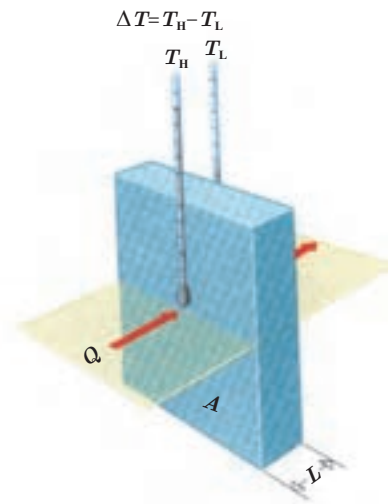


شکل ۴ــ۳۰ میله‌ای به طول L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_L و T_H قرار گرفته است.

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 :

$$H = \frac{Q}{t} = k\frac{A(T_H - T_L)}{L} \qquad (۴ــ۱۳)$$

در این رابطه، k رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. در SI، یکای رسانندگی گرمایی J/s.m.K یا وات بر متر ــ کلوین (W/m.K) است. جدول ۴ــ ۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ ۳۱ تیغه‌ای به ضخامت L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_L و T_H قرار گرفته است.

جدول ۴ــ ۷ رسانندگی گرمایی برخی از مواد

ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)
پشم شیشه	۰/۰۵	یخ	۲
چوب پنبه	۰/۰۴	سرب	۳۵
هوای خشک	۰/۰۲۴	آهن	۸۰
انواع چوب	۰/۱ تا ۰/۲	آلومینیم	۲۳۵
آب	۰/۶	نقره	۴۲۰
آجر	۰/۶ تا ۰/۸	مس	۴۰۰
انواع شیشه	۰/۶ تا ۱		

اگرچه رابطهٔ ۴ــ ۱۳ برای میله بیان شده است، ولی برای تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع A و ضخامت L نیز برقرار است (شکل ۴ــ 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 ۴ــ۶

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 ۴ــ۱۶

طول و عرض شیشهٔ پنجرهٔ اتاقی ۲/۰ m و ۱/۵m و ضخامت آن ۵/۰ mm است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است. ۳/۰ °C− و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است، ۲/۰ °C+ است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟ (k =۱ W/m.K)

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۱۳ داریم :

$$H = k\frac{A(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن k =۱W/m.K، A= (۱/۵m)(۲/۰m)=۳/۰m^2، ΔT= ۵/۰°C =۵/۰K و L=۰/۰۰۵m در رابطهٔ بالا خواهیم داشت :

$$H = (1\,W/m.K)\frac{(3/0\,m^2)(5/0\,^\circ C)}{0/005\,m} = 3\times10^3\,W$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری ۳kW می‌شود.

مثال ۴ـ ۱۷

برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشهٔ پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایهٔ میانی هوا جایگزین می‌کنند. طول و عرض شیشهٔ دوجدارهٔ پنجرهٔ اتاقی به ترتیب ۲/۰ m و ۱/۵m، ضخامت هر یک از دو لایهٔ شیشه‌ای آن ۵mm و ضخامت لایهٔ میانی هوا ۱۲mm است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است $-۳/۰^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است $+۲/۰^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت، با عدد به دست‌آمده در مثال قبل مقایسه کنید. فرض کنید می‌توان مجموعه شیشهٔ دوجداره و هوای بین آن را مانند تیغه یا پره‌ای با همان مساحت و ضخامت لایهٔ هوا در نظر گرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً برابر با رسانندگی گرمایی هواست.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۱۳ داریم :

$$H = kA\frac{(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت :

$$H = (۰/۰۲۴W/m.K)\frac{(۳/۰m^{۲})(۵/۰^{\circ}C)}{۰/۰۱۲m} = ۳۰W$$

توجه کنید که در این محاسبه از رسانندگی گرمایی هوا، $k = ۰/۰۲۴W/m.K$ استفاده شد.

همان‌طور که می‌بینید عدد به دست آمده، تفاوت زیادی با عدد به‌دست آمده در مثال قبل دارد (۱۰۰ بار کوچک‌تر است) که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

تمرین ۴ـ ۷

مساحت استخری با کف تخت، ۸۲۰ مترمربع و عمق آن ۲/۰ متر است. در یک روز گرم دمای سطح آب $۲۵^{\circ}C$ و دمای کف آب $۱۲^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی از سطح استخر به کف آن چقدر است؟

فعالیت ۴ـ ۱۴

موهای خرس قطبی توخالی هستند. تحقیق کنید این موضوع چه نقشی در گرم نگه‌داشتن بدن خرس در سرمای قطب دارد؟

تصویری بسیار بزرگ شده از موی یک خرس قطبی

همرفت : وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چگونه همهٔ 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 ۴ـ۵

هدف : مشاهده پدیده همرفت

وسیله‌های موردنیاز : لولهٔ همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پتاسیم‌پرمنگنات یا جوهر، چراغ الکلی یا گازی

شرح آزمایش :

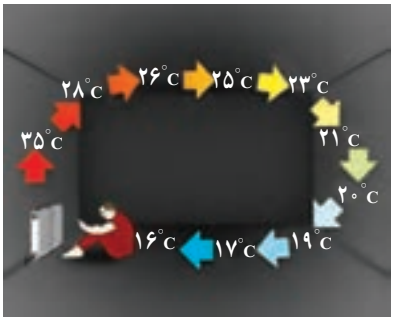
۱ـ لوله را از آب سرد پرکنید و به آرامی چند دانهٔ پتاسیم پرمنگنات (یا چند قطره جوهر) را از دهانهٔ لوله به‌داخل آن بریزید.

۲ـ یکی از شاخه‌های قائم لوله را مطابق شکل روی شعله بگیرید و در همان لحظه شاخهٔ قائم دیگر لوله را با دست لمس کنید.

۳ـ دستتان را از شاخهٔ 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 شاخهٔ قائم لوله را لمس کنید.

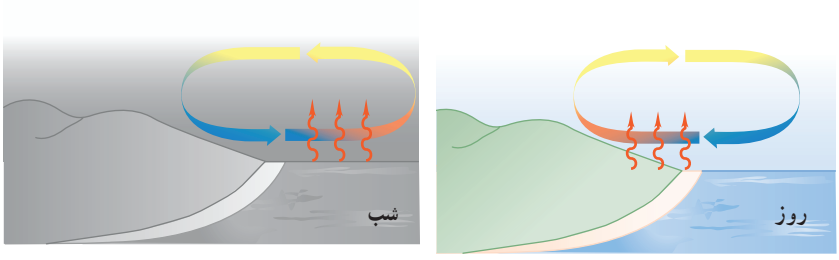
۴ـ مشاهدات خود را بنویسید و با بحث درگروه، دلیل هر یک از مشاهدات را توضیح دهید.

همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، بر خلاف 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؛ بدین‌ترتیب 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. گرم‌شدن هوای داخل اتاق به وسیلهٔ بخاری و رادیاتور شوفاژ (شکل ۴ـ۳۲)، گرم‌شدن آب درون قابلمه (شکل ۴ـ۳۳)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۴ـ۳۴)، 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 ۴ـ۳۲ گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت

شکل ۴ـ۳۳ گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت

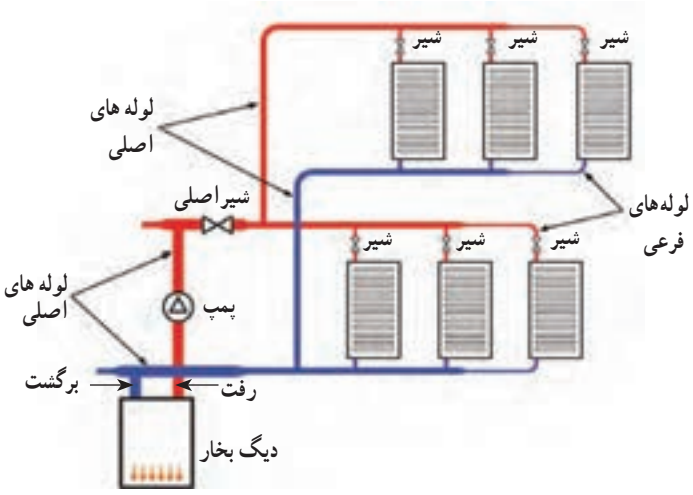


شکل ۴ـ۳۴ روز : زمین ساحل گرم‌تر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی دریا به سمت ساحل می‌شود. شب : زمین ساحل سردتر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی ساحل به سمت دریا می‌شود.

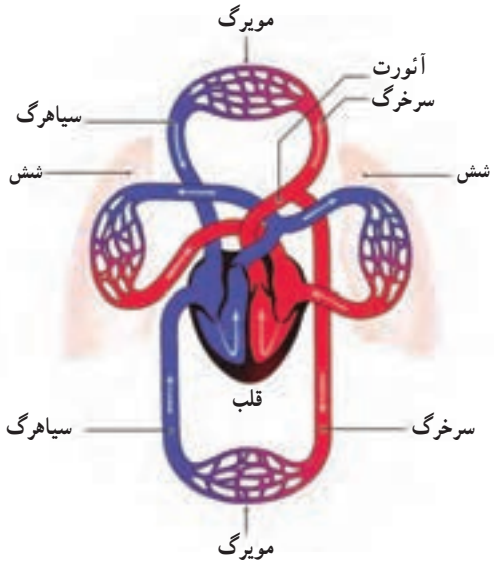
پرسش ۴ــ ۷

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 گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۴ــ۳۵)، سیستم خنک‌کنندهٔ موتور اتومبیل و نیز گرم و سرد شدن بخش‌های مختلف بدن بر اثر گردش جریان خون (شکل ۴ــ۳۶) در بدن جانوران خونگرم مثال‌هایی عینی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.



شکل ۴ ـ ۳۵ طرحی از سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها



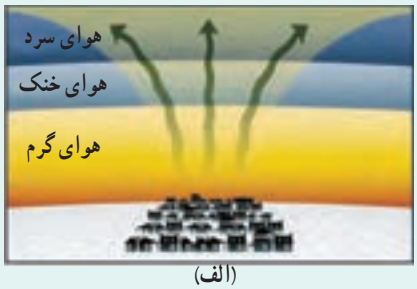
شکل ۴ ـ ۳۶ طرحی از دستگاه گردش خون که در آن قلب همچون تلمبه‌ای باعث همرفت واداشتهٔ خون می‌شود.

فعالیت ۴ــ ۱۵

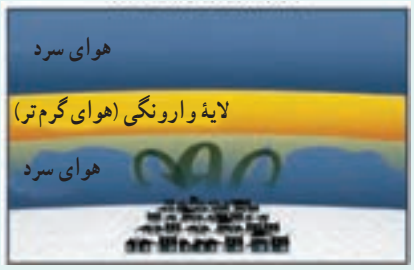
چهار بطری شیشه‌ای یکسان، دو رنگ جوهر قرمز و آبی، دو کارت ویزیت مقوایی و آب بسیار سرد و بسیار گرم تهیه کنید. در دو تا از بطری‌ها جوهر آبی و در دو بطری دیگر جوهر قرمز بریزید. سپس بطری‌های آبی را با آب خیلی سرد و بطری‌های قرمز را با آب خیلی گرم پر کنید. اکنون در حالی که دهانهٔ یک بطری قرمز را با کارت ویزیت گرفته‌اید، دهانهٔ آن را دقیقاً روی دهانهٔ یک بطری آبی قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. همین آزمایش را به طور معکوس نیز انجام دهید؛ یعنی این‌بار، یک بطری آبی رنگ که دهانهٔ آن با کارت پوشیده شده است را روی دهانهٔ بطری قرمز رنگ قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. مشاهدات خود را توضیح دهید. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

خوب است بدانید

وارونگی هوا[۱] : 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 به‌تدریج 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 بدین‌ترتیب چرخش هوایی بر اثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهد (شکل الف).



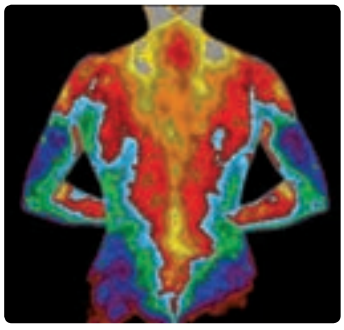
(الف)



(ب)

الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در : الف) شرایط عادی و ب) شرایطی که وارونگی هوا رخ می‌دهد.

واروگی هوا معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود و در آن همرفت طبیعی در جوّ زمین متوقف می‌گردد. در چنین شب‌هایی، لایهٔ هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایهٔ هوای گرم بالاتر قرار می‌گیرد. این لایهٔ هوای گرم، پیش از این، بر اثر پدیدهٔ همرفت در یک روز عادی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایهٔ هوای سرد مجاور زمین، باعث می‌شود پدیدهٔ همرفتی بین این لایهٔ بسیار سرد و لایهٔ هوای گرم بالای آن رخ ندهد. بدین‌ترتیب، مانع از چرخش هوا بر اثر پدیدهٔ همرفت در سطح زمین می‌گردد. به این پدیده، وارونگی هوا می‌گویند. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلایندهٔ شهری واقع در لایهٔ هوای سرد مجاور زمین، که عمدتاً ناشی از تردد خودروها و کارخانجات دودزاست، 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 لایهٔ سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جوّ 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[۲] نیز گفته می‌شود.



شکل ۴ــ۳۷ تصویری دمانگاشت از بدن یک فرد معمولی. سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای $22^{\circ}C$ به دلیل تابش گرمایی با آهنگی در حدود $100\,W$ 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.

تابش گرمایی : همهٔ ما تجربهٔ گرم‌شدن در آفتاب را داریم. با نزدیک‌کردن دستمان به اجسام گرمی مانند رادیاتور گرم شوفاژ، یا زیرِ لامپ رشته‌ای روشن نیز تجربهٔ مشابهی خواهیم داشت. آیا با نزدیک‌کردن دستتان به زیرِ لامپ رشته‌ای، گرما با روش رسانش، یا همرفت به دستتان 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 تولیدکنندهٔ مربوط به خود را دارد. ما در این بخش، به تابش الکترومغناطیسی گسیل‌شده از مواد

۱ــ Air Inversion

۲ــ Temperature Inversion

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 $500\,^{\circ}C$ عمدتاً به‌صورت تابش فروسرخ است که نامرئی است. برای آشکارسازی تابش‌های فروسرخ از ابزاری موسوم به دمانگار[1] استفاده می‌کنیم و به تصویر به‌دست آمده از آن دمانگاشت[2] می‌گوییم. شکل ۴ــ 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.

شکل ۴ــ۳۸ درون مکعب لسلی، آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.

تابش گرمایی از سطح هر جسم علاوه بر دما به مساحت، میزان صیقلی‌بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۴ــ۳۸). 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 پدیده های زیستی نیز کاربردهای فراوانی دارد که در اینجا به دو نمونه از آنها اشاره می‌شود.

شکل ۴ــ۳۹ اینها اندام‌های حفره‌ای هستند که گرما را آشکار می‌کنند.

الف) شکارِ تابش فروسرخ : نوعی از مارهای زنگی اندام‌هایی حفره‌ای بر روی پوزهٔ خود دارند که نسبت به تابش فروسرخ حساس‌اند (شکل ۴ــ۳۹). این مارها اغلب در سیاهی شب شکار می‌کنند. در واقع اندام‌های حفره‌ای به آنها کمک می‌کند که طعمه‌های خونگرم خود را به واسطهٔ تابش فروسرخ‌شان در تاریکی و سرمای شب مشاهده کنند.

شکل ۴ــ۴۰ کلم اسکانک برف اطراف خود را آب کرده است.

ب) کلم اسکانک[3] : کلم اسکانک (شکل ۴ــ۴۰) 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 ۴ــ ۱۶

رادیومتر وسیله‌ای است که از یک حباب شیشه‌ای تشکیل شده است که درون آن چهار پرهٔ فلزی قائم قرار دارد که می‌توانند حول یک محور (سوزن عمودی) بچرخند. دو وجهِ هر چهار پره، یک در میان سفید و سیاه است. وقتی این وسیله کنار یک چشمهٔ 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.

۱ــ Thermograph

۲ــ Thermogram

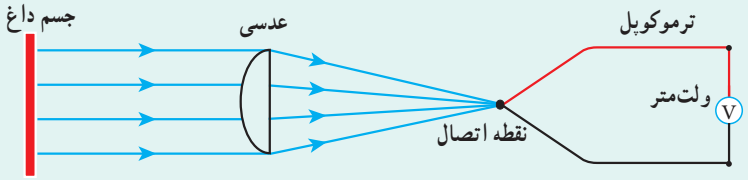
۳ــ Skunk Cabage

از تابش گرمایی می‌توان به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری دمای اجسام استفاده کرد. به روش‌های اندازه‌گیری دما مبتنی بر تابش گرمایی، تفسنجی[1] و به ابزارهای اندازه‌گیری دما به این روش، تفسنج[2] می‌گویند. تفسنج بر خلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرد. تفسنجی، به‌خصوص در اندازه‌گیری دماهای بالای $1100^{\circ}C$ اهمیت ویژه‌ای دارد. تفسنجِ تابشی و تفسنجِ نوری، تفسنج‌هایی برای اندازه‌گیری این دماها هستند و تفسنجِ نوری به عنوان دماسنج معیار برای اندازه‌گیری این دماها انتخاب شده است.

خوب است بدانید

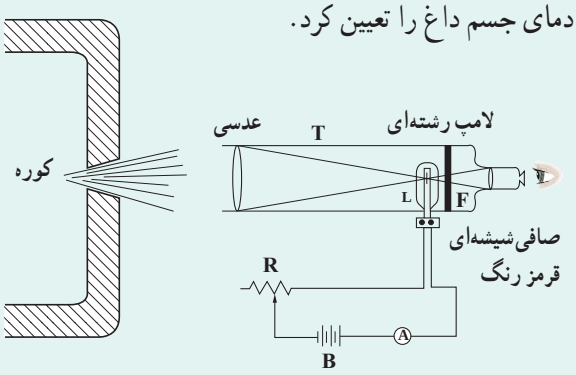
تفسنج‌های اندازه‌گیری دماهای بالا

الف) تفسنج تابشی : این تفسنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل‌شده 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 اندازه گیری دمای اجسام خیلی داغ با دمای بیش از $1200\,K$ (مانند کوره‌ها) به کار می‌رود. اساس کار این تفسنج، مقایسهٔ 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 لولهٔ آن یک صافی شیشه‌ای قرمزرنگ F و یک لامپ الکتریکی کوچک L قرار دارد. نور تابیده شده از کوره، توسط عدسی دوربین روی رشتهٔ لامپ متمرکز می‌شود و ناظری که به درون دوربین نگاه می‌کند، رشتهٔ تیرهٔ لامپ را بر زمینهٔ نور کوره می‌بیند. رشتهٔ لامپ به باتری B و مقاومت متغیر R متصل شده است. با تغییر دادن مقاومت متغیر R ، جریان رشتهٔ لامپ را به‌تدریج افزایش می‌دهیم تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به طوری که رشتهٔ لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



(ب) تفسنج نوری و طرحی از ساختار آن

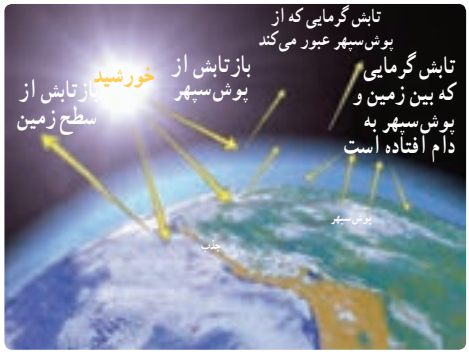
۱ ــ Pyrometry

۲ ــ Pyrometer

خوب است بدانید

یخ بستن بر اثر تابش : در بعضی نواحی که یخچال رایج نیست، برای ساختن یخ، آب را در کاسه‌ای کم‌عمق 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 نقطهٔ 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 نقطهٔ 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 نقطهٔ انجماد آب است. در طول شب، تبادلی 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 نقطهٔ انجماد آب نباشد، آب ممکن است بر اثر این فرایند تابشی آنقدر گرما از دست بدهد تا یخ بزند.

اثر گلخانه‌ای[1] : بخشی از نور خورشید با عبور از جوّ زمین به سطح آن می‌رسد و بخش عمدهٔ 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 جذب‌کنندهٔ بسیار خوبی برای امواج فروسرخ هستند، در لایهٔ پوش‌سپهر[2] جوّ زمین، باعث کدرشدن این لایه برای تابش‌های فروسرخ می‌شود. این لایه بخش عمدهٔ تابش گرمایی حاصل از زمین را جذب می‌کند. خودِ این لایه نیز تابش گرمایی می‌کند. بخشی از تابش گرمایی لایهٔ پوش‌سپهر 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 دام‌افتادن تابش گرمایی بین لایهٔ پوش‌سپهر و سطح زمین اثر گلخانه‌ای می‌گویند و به گازهای موجود در لایهٔ پوش‌سپهر که سبب این پدیده می‌شوند گازهای گلخانه‌ای می‌گویند[3]. اگر لایهٔ پوش‌سپهر 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 ۴ـ۴۱).



شکل ۴ـ۴۱ جذب، بازتابش و تابش گرمایی در جو و سطح زمین و اثر گلخانه‌ای

با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در پوش‌سپهر، اثر گلخانه‌ای تشدید می‌شود و بدین ترتیب، دمای زمین افزایش می‌یابد. در چند دههٔ اخیر به دلیل فعالیت‌های مختلف صنعتی و افزایش آلاینده‌هایی مثل CO_2 در جوّ زمین، غلظت گازهای گلخانه‌ای در لایهٔ پوش‌سپهر 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 انرژی های بازتابیده از سطح زمین و تابش گرمایی زمین برابر است. همین برابری در خارجی‌ترین سطح جوِّ زمین نیز وجود دارد.

---

۱ ـ Greenhouse effect

۲ ـ پوش‌سپهر یا استراتوسفر، لایه‌ای حدوداً در فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۸ کیلومتری سطح زمین است.

۳ ـ چون اصطلاح اثر گلخانه‌ای اغلب برای به دام افتادن تابش گرمایی توسط جو زمین به کار می‌رود، به غلط پنداشته می‌شود که گرم‌بودن گلخانه نیز ناشی از به دام افتادن تابش‌های گرمایی است. در حالی که دلیل گرم بودن گلخانه‌ها، عدم جریان هوا در آنها است.

۴ـ۶ قوانین گازها

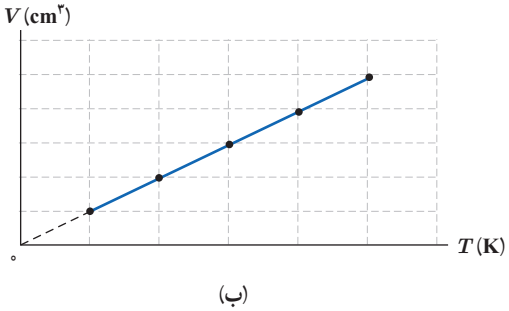
شکل ۴ـ۴۲ سرد شدن هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه مچاله شدن مخزن شده است.

شکل ۴ـ۴۳ با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لولهٔ مارپیچ بالا می‌رود.

روی برخی از اسپری‌ها نوشته شده است "از قرار دادن اسپری در آتش خودداری شود". با داغ‌کردن 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 نوشابهٔ 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 مچاله می‌شود. شکل ۴ـ۴۲ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل مچاله شده است. همچنین شکل ۴ـ۴۳ 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 نیمهٔ خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع این مخزن را به طرف پایین می‌راند. این کار سبب می‌شود مایع رنگی مخزن پایینی از لولهٔ باریکِ مارپیچ که انتهای پایینی آن درون این مخزن قرار دارد بالا رود. هر چه دستتان گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را در برگیرد، 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، گی لوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطهٔ 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 فراگرفته‌ایم. اما در مورد گازها چطور؟ آیا حجم گازها نیز متناسب با دما تغییر می‌کند؟ چون گازها به سادگی متراکم می‌شوند باید به فشار گاز نیز فکر کنیم. ژاک شارل[1] دانشمند فرانسوی (۱۸۲۳ـ۱۷۴۶ م.) به‌طور تجربی دریافت که اگر فشارِ مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود حجم آن مستقیماً با افزایش دما (بر حسب کلوین) افزایش و با کاهش دما، کاهش می‌یابد. شکل ۴ـ ۴۴ الف، نوعی از آزمایش او و شکل ۴ـ۴۴ ب، نتیجه‌ای از آن آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴ـ۴۴ الف) اسبابی برای تحقیق اثر دما برحجم مقدار ثابتی از گاز که در فشار ثابت نگه داشته شده است. ب) نمودار V برحسب T برای یک گاز وقتی فشار و مقدار گاز ثابت باشد.

نتیجهٔ این آزمایش را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{V}{T} = \text{ثابت} \qquad \text{(فشار و جرم ثابت)} \quad (۱۴ـ۴)$$

در این رابطه V حجم گاز و T دمای گاز برحسب کلوین است.

۱ـ Jacques Charles

فعالیت ۴ــ 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 به‌آرامی گرم می‌کنیم. توضیح دهید کدام‌یک از کمیت‌های دما، حجم، فشار و مقدار هوای درون سرنگ تغییر می‌کند و تغییر آنها چگونه است؟

مثال ۴ــ۱۸

در آزمایشی، دمای مقدار معینی گاز اکسیژن را در فشار ثابت از $۲۷^{\circ}C$ به $۸۷^{\circ}C$ می‌رسانیم. اگر حجم گاز ابتدا $۲/۰L$ باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

پاسخ : در این آزمایش، جرم و فشار گاز ثابت مانده است. پس بنا به رابطهٔ ۴ــ ۱۴ داریم :

$$\frac{V_۱}{T_۱}=\frac{V_۲}{T_۲}$$

با استفاده از داده‌های مثال، می‌دانیم :

$$T_۱=(۲۷+۲۷۳)K=۳۰۰K \quad ، \quad V_۱=۲/۰L$$

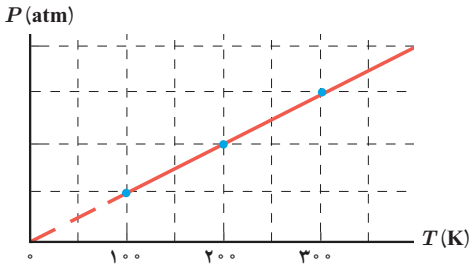
$$T_۲=(۸۷+۲۷۳)K=۳۶۰K \quad ، \quad V_۲=?$$

بنابراین

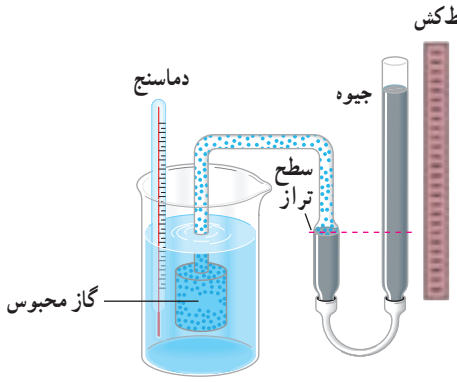
$$\frac{۲/۰}{۳۰۰}=\frac{V_۲}{۳۶۰}\Rightarrow V_۲=۲/۴L$$

بررسی گاز در حجم ثابت : شیمیدان فرانسوی ژوزف لوئیس‌گی لوساک[۱] (۱۸۵۰ــ۱۷۷۸ م.) در سال ۱۸۰۲ 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 ۴ــ۴۵). شکل ۴ــ۴۶ نوعی از آزمایش او را برای بررسی تغییر فشار و دمای گاز، در حجم ثابت نشان می‌دهد.

$$\frac{P}{T}=\text{ثابت} \qquad \text{(حجم و جرم ثابت)} \qquad (۴ــ۱۵)$$



شکل ۴ــ۴۵ رابطهٔ بین فشار و دمای یک گاز، در حجم ثابت



شکل ۴ــ۴۶ آزمایشی‌ساده برای اندازه‌گیری فشار گاز در دماهای مختلف (در حجم ثابت)

۱ــ Joseph Louis Gay–Lussac

مثال ۴ــ ۱۹

راننده‌ای پیش از حرکت، فشار لاستیک اتومبیل خود را با یک فشارسنج اندازه می‌گیرد و برای آن مقدار ۲۱۴ kPa را به دست می‌آورد. در این زمان، دما برابر با ۱۵°C است. پس از چند ساعت رانندگی، توقف می‌کند و فشار لاستیک را دوباره اندازه می‌گیرد. اینک فشار ۲۴۱kPa 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 ۱atm =۱۰۱ kPa 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 ۴ــ۱۵ باید فشار هوای محیط را به فشارهای پیمانه‌ای اضافه کنیم. پس داریم :

$$P_۱ = ۲۱۴\ \text{kPa} + ۱۰۱\ \text{kPa} = ۳۱۵\ \text{kPa}$$

$$P_۲ = ۲۴۱\ \text{kPa} + ۱۰۱\ \text{kPa} = ۳۴۲\ \text{kPa}$$

همچنین توجه کنید که دماها باید برحسب کلوین باشد. بنابراین، برای دمای اولیه داریم :

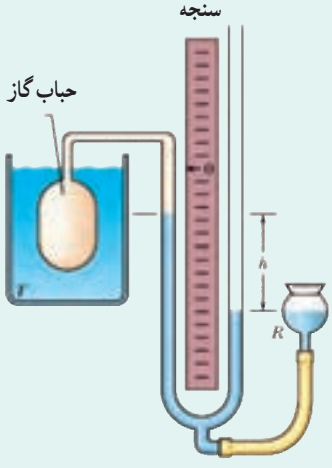
$$T_۱ = (۱۵ + ۲۷۳)\text{K} = ۲۸۸\ \text{K}$$

اکنون با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۴ــ۱۵ خواهیم داشت :

$$\frac{P_۲}{T_۲} = \frac{P_۱}{T_۱} \quad , \quad T_۲ = \left(\frac{۳۴۲\ \text{kPa}}{۳۱۵\ \text{kPa}}\right)(۲۸۸\text{K}) = ۳۱۳\text{K} = (۳۱۳ - ۲۷۳)^\circ\text{C} = ۴۰^\circ\text{C}$$

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 پرشده 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 شاخهٔ سمت چپ لولهٔ Uشکل، در مقابل صفرِ خط‌کش نگه داشت تا حجم گاز ثابت باقی 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 نقطهٔ سه‌گانهٔ آب[۱] را به عنوان مرجع اندازه‌گیری دما انتخاب کرده‌اند. نقطهٔ سه‌گانهٔ آب، نقطه‌ای است که در آن سه فاز آب (آب مایع، یخ و بخار آب) در تعادل‌اند. به این نقطه دمای ۲۷۳/۱۶ K را 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 نقطهٔ سه‌گانهٔ آب به ترتیب، مقادیر T_{tr} و P_{tr} را اختصاص می‌دهند (توجه کنید P_{tr} آن فشاری نیست که برای رسیدن به نقطهٔ سه‌گانه لازم است، بلکه فشار گاز موردنظر در نقطهٔ سه‌گانه است). با توجه به خطی بودن رابطهٔ فشار و دما داریم :

$$T = T_{tr}\left(\frac{P}{P_{tr}}\right) = (۲۷۳/۱۶\text{K})\left(\frac{P}{P_{tr}}\right)$$

یعنی با دانستن فشار گاز در دمای مورد نظر و در نقطهٔ سه گانهٔ آب، به‌راحتی می‌توان دمای مورد نظر را محاسبه کرد. اگر از

۱ ــ Triple Point of Water

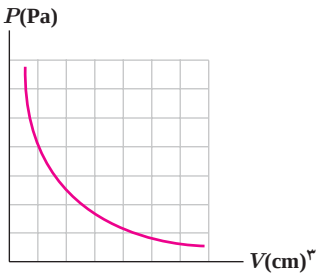
۲ ــ دقت کنید که این دما همان دمای صفر درجهٔ سلسیوس نیست و اندکی با آن متفاوت است.

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.

بررسی گاز در دمای ثابت: سومین قانون تجربی گازها، توسط دانشمند انگلیسی رابرت بویل[1] (۱۶۲۷ــ ۱۶۹۱ م.) در سال ۱۶۶۲ میلادی ارائه شد و دانشمند فرانسوی امه ماریوت[2] (۱۶۲۰ تا ۱۶۸۴م.) در سال ۱۶۷۶ میلادی به نتیجهٔ مشابهی رسید.

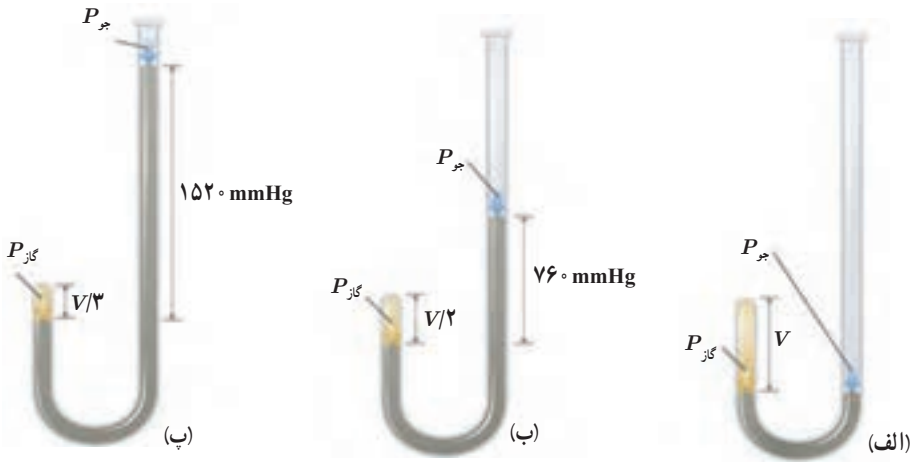
در واقع آنها دریافتند که اگر دمای مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود، فشار آن با حجمش رابطهٔ وارون دارد (شکل۴ــ ۴۷). به عبارتی، حاصل‌ضرب فشار و حجم گاز مقداری ثابت است.

$$PV = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و جرم ثابت)} \qquad (۴ــ ۱۶)$$



شکل ۴ــ ۴۷ نمودار فشار برحسب حجم گاز در دمای ثابت

شکل ۴ــ ۴۸ نوعی از آزمایش بویل را نشان می‌دهد.



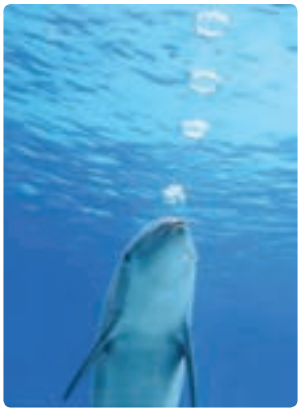
شکل ۴ــ ۴۸ الف) در ابتدا گاز در فشار ۱atm =۷۶۰ mmHg است توجه کنید که ارتفاع جیوه در هر دو شاخه یکسان است و دهانهٔ شاخهٔ سمت راست باز است. حجم گاز محبوس V است. ب) اگر جیوه به شاخهٔ سمت راست افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه ۷۶۰ mm گردد، فشار گاز برابر فشار جو (۷۶۰ mmHg) به علاوهٔ ۷۶۰ mmHg، یعنی برابر ۱۵۲۰ mmHg و حجم گاز محبوس $\frac{V}{۲}$ می‌شود. پ) اگر باز هم به شاخهٔ سمت راست جیوه افزوده شود به‌طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه ۱۵۲۰ mm گردد فشار کل وارد به گاز به ۲۲۸۰ mmHg می‌رسد و حجم گاز محبوس به $\frac{V}{۳}$ کاهش می‌یابد.

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 به‌نام «کالج نامرئی» شد که وظیفهٔ اصلی آن کشف حقایق علمی از راه و روش آزمایش بود. بویل تجربه‌گری ماهر بود و در نتیجهٔ تجربه‌ها و آزمایش‌های زیاد خود به کشف قانون بویل نایل آمد. او همچنین در مورد پدیدهٔ صوت، رنگ‌ها، بلورها و الکتریسیتهٔ 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 هزینهٔ انتشار کتاب مشهور نیوتون (اصول) را بر عهده گرفت. بویل در ۳۰ آوریل ۱۶۹۱، در سن ۶۴ سالگی در لندن درگذشت.

۱ــ Robert Boyle ۲ــ Edme Mariotte

مثال ۴ــ 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 ۱۰۱ kPa، دمای آب دریاچه در همه‌جا 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 رابطهٔ ۴ــ ۱۸ برای هوای درون حباب استفاده می‌کنیم :

$$P_۱ V_۱ = P_۲ V_۲$$

که در اینجا $P_۱$ و $V_۱$ به ترتیب، فشار و حجم هوای داخل حباب در محل ایجاد آن و $P_۲$ و $V_۲$ به ترتیب، فشار و حجم آن در سطح دریاچه است. بنابراین :

$$P_۱ = P_۰ + \rho g h \quad , \quad P_۲ = P_۰ \quad , \quad V_۲ = ۲ V_۱$$

با قرار دادن این روابط در رابطهٔ ۴ــ ۱۶ خواهیم داشت :

$$(P_۰ + \rho g h) V_۱ = P_۰ (۲ V_۱)$$

و از آنجا

$$h = \frac{P_۰}{\rho g} = \frac{۱۰۱ \times ۱۰^۳ \, \text{Pa}}{(۱/۰۰ \times ۱۰^۳ \, \text{kg/m}^۳)(۹/۸۱ \, \text{N/kg})} = ۱۰/۳ \, \text{m}$$

بنابراین، دلفین در عمق ۱۰/۳ m از سطح دریاچه، حباب را ایجاد کرده است.

فعالیت ۴ــ 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 دِسر 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 مولکول های آن N ثابت است :

$$\frac{V}{N} = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و فشار یکسان)}$$

همان‌طور که در بخش ۴ــ۳ دیدیم در یک مول از گاز به تعداد $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ (عدد آووگادرو) مولکول وجود دارد. بنابراین، $N = nN_A$ که در آن n تعداد مول و N_A همان عدد آووگادرو است. پس نتیجه می‌گیریم که رابطهٔ بالا را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$\frac{V}{n} = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و فشار یکسان)} \quad (۴ــ ۱۷)$$

۱ــ Amedeo Avogadro

قانون گازهای آرمانی (کامل) : همهٔ روابطی که برای گازها بیان کردیم در مورد گازهایی که به اندازهٔ کافی رقیق باشند، یا چگالی آنها به حدّ کافی کم باشد، با دقت خوبی برقرار است. به این گازها که مولکول‌های آنها به حدی از هم دورند که بر هم 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 :

$$\frac{PV}{nT} = \text{ثابت}$$

این مقدار ثابت را با R نشان می‌دهند و به آن ثابت جهانی گازها می‌گویند. آزمایش نشان می‌دهد که مقدار R برابراست با

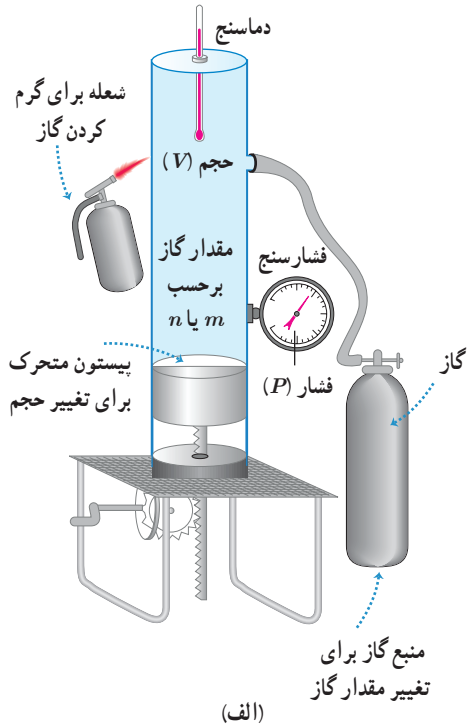
$$R = ۸/۳۱۴ \ \text{J/mol.K}$$

بنابراین، قانون گازهای کامل را می‌توان چنین نوشت :

$$PV = nRT \qquad (۴ــ۱۸)$$

که در آن P برحسب پاسکال (Pa)، V برحسب مترمکعب (m^3)، n برحسب مول (mol) و T برحسب کلوین (K) است. شکل ۴ــ۴۹ الف طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و شکل ۴ــ۴۹ ب تصویری واقعی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

(ب)



(الف)

شکل ۴ــ۴۹ــ الف) طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و ب) تصویری واقعی از آن

آمدئو آووگادرو : *آمدئو آووگادرو* در ۹ ژوئن ۱۷۷۶ در شهر تورین ایتالیا به دنیا آمد. پدرش قاضی مشهوری بود و علاقه داشت پسرش حرفهٔ 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 این‌رو به ریاضیات و فیزیک و شیمی روی آورد. در ۳۳ سالگی به مقام استادی فیزیک رسید. دو سال بعد، در سال ۱۸۱۱ نظریهٔ معروف مولکولی خود را در یک مجلهٔ 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، به‌شرط آنکه اندازه‌گیری در شرایط یکسانی از دما و فشار صورت گیرد. امروزه نظریهٔ 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، درحالی‌که دنیای علم آن روز به نبوغش پی نبرده بود.

مثال ۴ــ ۲۱

الف) تعداد مولکول‌های هوایی که در اتاقی به ابعاد ۴/۰۰ m ، ۶/۰۰ m ، ۳/۰۰ m در فشار ۱/۰۰ atm و دمای ۲۰°C وجود دارد چقدر است؟

ب) جرم هوای درون اتاق چقدر است؟ جرم مولی متوسط گازهای موجود در هوا، ۰/۰۲۹ kg/mol است.

پاسخ : توجه کنید که هوا به‌صورت تقریبی گاز آرمانی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین از قانون گازهای آرمانی (رابطهٔ ۴ــ 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.

$$P = ۱/۰۰\ \text{atm} = (۱/۰۰ \times ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵})\text{Pa} = ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}\ \text{Pa}$$

$$V = (۴/۰۰\text{m})(۶/۰۰\text{m})(۳/۰۰\text{m}) = ۷۲/۰\text{m}^{۳}$$

$$T = (۲۷۳ + ۲۰)\text{K} = ۲۹۳\text{K}$$

در نتیجه برای n داریم :

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}\text{Pa})(۷۲/۰\text{m}^{۳})}{(۸/۳۱۴\text{J/mol.K})(۲۹۳\text{K})} = ۲/۹۹ \times ۱۰^{۳}\ \text{mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از هوای درون اتاق به تعداد عدد آووگادرو، مولکول گاز وجود دارد، نتیجه می‌گیریم :

تعداد مولکول‌ها = (تعداد مول)(عدد آووگادرو) = (۲/۹۹ × ۱۰^۳ mol)(۶/۰۲ × ۱۰^۲۳ مولکول/mol) = ۱/۸۰ × ۱۰^۲۷ مولکول

ب) با استفاده از رابطهٔ ۴ــ ۸ ($n = m/M$) جرم هوای درون اتاق را محاسبه می‌کنیم :

$$m = nM = (۲/۹۹ \times ۱۰^{۳}\ \text{mol})(۰/۰۲۹\ \text{kg/mol}) = ۸۶/۷\ \text{kg}$$

مثال ۴ــ ۲۲

درون استوانه‌ای ۱۲L گاز اکسیژن با دمای ۷°C وجود دارد. فشار گاز درون استوانه را با فشارسنجی اندازه می‌گیریم. فشارسنج ۱۴atm را نشان می‌دهد. دمای گاز را به ۷۷°C و حجم آن را به ۲۵L می‌رسانیم. فشاری که فشارسنج در پایان نشان می‌دهد، چند اتمسفر است؟ فشار هوای بیرون استوانه ۱atm 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 :

$$\begin{cases} P_۱ = P_{g۱} + P_۰ = ۱۴ + ۱ = ۱۵\text{atm} \\ V_۱ = ۱۲\ \text{L} \\ T_۱ = \theta_۱ + ۲۷۳ = ۷ + ۲۷۳ = ۲۸۰\text{K} \end{cases} \qquad \begin{cases} P_۲ = ? \\ V_۲ = ۲۵\ \text{L} \\ T_۲ = \theta_۲ + ۲۷۳ = ۷۷ + ۲۷۳ = ۳۵۰\text{K} \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم :

$$\frac{P_۱V_۱}{T_۱} = \frac{P_۲V_۲}{T_۲} \Rightarrow \frac{۱۵ \times ۱۲}{۲۸۰} = \frac{P_۲ \times ۲۵}{۳۵۰} \Rightarrow P_۲ = ۹/۰\ \text{atm}$$

بنابراین، فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با

$$P_{g۲} = P_۲ - P_۰ = ۹/۰ - ۱/۰ = ۸/۰\ \text{atm}$$

۴ـ۱ دماسنجی

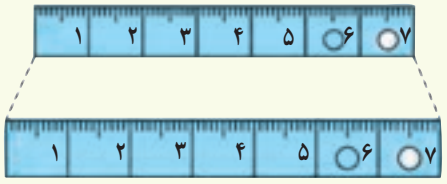
۱ دماهای زیر را بر حسب درجهٔ سلسیوس و فارنهایت مشخص کنید :

الف) ۰K ب) ۲۷۳K پ) ۳۷۳ K 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)

۴ـ۲ انبساط گرمایی

۳ شکل روبه‌رو، یک خط‌کش فلزی را که در آن سوراخی ایجاد شده است در دو دمای متفاوت نشان می‌دهد (برای روشن بودن مطلب، انبساط به‌صورت اغراق آمیزی رسم شده است.) از این شکل چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

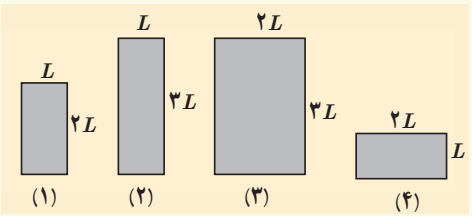


۴ شکل روبه‌رو چهار صفحهٔ فلزی هم‌جنس به اضلاع متفاوت را در یک دما نشان می‌دهد. اگر دمای همهٔ آنها را به اندازهٔ یکسان زیاد کنیم،

الف) ارتفاع کدام صفحه یا صفحه ها بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

ب) مساحت کدام یک بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

پ) اگر در هر چهارتای آنها روزنهٔ کوچک هم‌اندازه‌ای 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 ۲۵/۰ m ساخته شده است. این بخش‌ها در دمای ۱۰/۰°C، بتون‌ریزی و عمل آورده شده‌اند. برای جلوگیری از تاب برداشتن بتون در دمای ۵۰/۰°C، مهندسان باید چه فاصله‌ای را بین این قطعه‌ها در نظر بگیرند؟

$\alpha_{\text{بتون}} \simeq 14 \times 10^{-6} K^{-1}$

۶ یک ظرف آلومینیمی با حجم ۴۰۰ cm^3 در دمای ۲۰/۰°C به‌طور کامل از گلیسیرین پر شده است. اگر دمای ظرف و گلیسیرین به ۳۰/۰°C برسد، چقدر گلیسیرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

۷ مقداری بنزین در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع $h=10\,m$ ریخته شده است. در دمای ۱۰°C− فاصلهٔ بین سطح بنزین تا بالای ظرف برابر $\Delta h=50\,cm$ است. اگر از انبساط ظرف در نتیجهٔ 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 ۱۰°C− و در تابستان تا ۵۰°C+ برسد. جنس این لوله‌ها عموماً از فولاد با $\alpha \approx 10 \times 10^{-6} K^{-1}$ است.

طول خط لوله، بین دو ایستگاه تهران ــ اصفهان تقریباً ۲۳۰km است.

الف) در اثر این اختلاف دما این خط چقدر منبسط می‌شود؟

ب) چگونه می‌توان تأثیر این انبساط را برطرف کرد؟

۱۰ در یک روز گرم یک تانکر حامل سوخت با ۳۰,۰۰۰L بنزین بارگیری شده است. هوا در محل تحویل سوخت ۲۰/۰°C سردتر از محلی است که در آنجا سوخت بار زده شده است. راننده چند لیتر سوخت را در این محل تحویل می‌دهد؟

۴ــ۳ گرما

۱۱ برای گرم کردن ۲۰۰g آب جهت تهیهٔ چای، از یک گرمکن الکتریکی غوطه‌ور در آب استفاده می‌کنیم. روی برچسب گرمکن ۲۰۰W نوشته شده است. با نادیده گرفتن اتلاف گرما، زمان لازم برای رساندن دمای آب از ۳۰/۰°C به ۱۰۰°C را محاسبه کنید.

۱۲ دمای یک قطعه فلز ۰/۶۰ کیلوگرمی را توسط یک گرمکن ۵۰ واتی در مدت ۱۱۰s از ۱۸°C به ۳۸°C رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژهٔ فلز چه مقداری را به‌دست می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این پاسخ از مقدار واقعی گرمای ویژه فلز بیشتر باشد یا کمتر؟ توضیح دهید.

۱۳ گرماسنجی به جرم ۲۰۰ گرم از مس ساخته شده است. یک قطعهٔ ۸۰ گرمی از یک مادهٔ نامعلوم همراه با ۵۰ گرم آب به درون گرماسنج ریخته می‌شود. اکنون دمای این مجموعه ۳۰°C شده است. در این هنگام ۱۰۰ گرم آب ۷۰°C به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل ۵۲°C می‌شود. گرمای ویژهٔ قطعه را محاسبه کنید.

۴ ــ ۴ تغییر حالت‌های ماده

۱۴ یکی از روش‌های بالابردن دمای یک جسم، دادن گرما به آن است. اگر به جسمی گرما دهیم، آیا دمای آن حتماً بالا می‌رود؟ توضیح دهید.

۱۵ قبل از تزریق دارو یا سرُم به یک بیمار، محل تزریق را با الکل تمیز می‌کنند. این کار سبب احساس خنکی در محل تزریق می‌شود. علت را توضیح دهید.

۱۶ کدام گزینه دربارهٔ فرایند ذوب نادرست است؟

الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر مواد، سبب پایین‌رفتن نقطهٔ ذوب می‌شود.

ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب کاهش اندک نقطهٔ ذوب آن می‌شود.

پ) فرایند ذوب، عملی گرماگیر است.

ت) گرمایی که جسم جامد در نقطهٔ ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی‌شود.

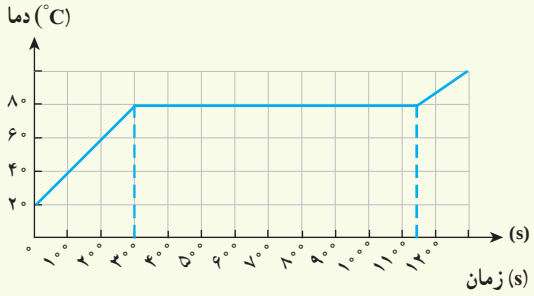
۱۷ کمترین گرمای لازم برای ذوب کامل ۲۰۰g نقره که در آغاز در دمای ۲۰/۰°C قرار دارد چقدر است؟ (فشار هوا را یک اتمسفر فرض کنید)

۱۸ یک راه برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد یک سالن سربسته در شب‌هنگام، وقتی که دمای زیر صفر پیش‌بینی شده است، قرار دادن تشت بزرگ پر از آب در سالن است. اگر جرم آب درون تشت ۱۵۰kg و دمای اولیهٔ آن ۲۰/۰°C باشد و همهٔ آن به یخ ۰/۰°C تبدیل شود، آب چقدر گرما به محیط پیرامونش می‌دهد؟

۱۹ یک گرمکن ۵۰ واتی به‌طورکامل در ۱۰۰ گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می‌شود.
الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از $20^{\circ}C$ به $25^{\circ}C$ می‌رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.
ب) چه مدت طول می‌کشد تا دمای آب درون گرماسنج از $25^{\circ}C$ به نقطهٔ جوش ($100^{\circ}C$) برسد؟
پ) چه مدت طول می‌کشد تا ۲۰ گرم آب در حال جوش درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۲۰ گرمکنی در هر ثانیه ۲۰۰/۰ ژول گرما می‌دهد. الف) چقدر طول می‌کشد تا این گرمکن ۰/۱۰۰ کیلوگرم آب $100^{\circ}C$ را به بخار آب $100^{\circ}C$ تبدیل کند؟ ب) این گرمکن در همین مدت، چه مقدار یخ $0^{\circ}C$ را می‌تواند به آب $0^{\circ}C$ تبدیل کند؟

۲۱ اگر به جسم جامدی که ابعاد آن به اندازهٔ کافی کوچک است با توان ثابتی گرما بدهیم نمودار دما ــ زمان آن به‌صورت کیفی مانند شکل روبه‌رو می‌شود. این نمودار در اینجا برای جسم جامدی به جرم ۵۰/۰ g رسم شده که توسط یک گرم‌کنِ ۱۰/۰ W گرم شده است.
الف) چقدر طول می‌کشد تا این جامد به نقطهٔ ذوب خود برسد؟
ب) گرمای ویژهٔ جامد و پ) گرمای نهان ذوب آن‌را محاسبه کنید.



۲۲ در چالهٔ کوچکی ۱/۰۰ kg آب $0^{\circ}C$ قرار دارد. اگر بر اثر تبخیر سطحی قسمتی از آب تبخیر شود و بقیهٔ آن یخ ببندد، جرم آب یخ‌زده چقدر می‌شود؟

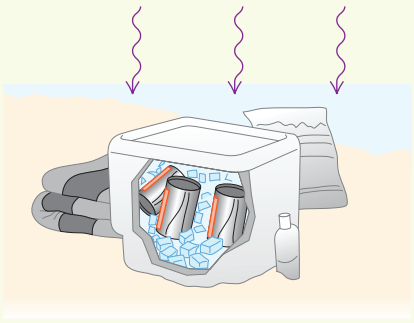
۲۳ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه‌های مهم کنترل دمای بدن است.
الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم ۵۰/۰ kg به اندازهٔ $1/00^{\circ}C$ کاهش یابد؟ گرمای نهان تبخیر آب در دمای بدن ($37^{\circ}C$) برابر $2/42\times10^{6}J/kg$ و گرمای ویژهٔ بدن در حدود $3480J/kg.K$ است. ب) حجم آبی که شخص باید برای جبران آب تبخیر شده بنوشد، چقدر است؟

۴ــ۵ روش‌های انتقال گرما

۲۴ اگر شما یک تیر چوبی و یک لولهٔ فلزی سرد را که هم‌دما هستند لمس کنید، چرا حس می‌کنید که لوله سردتر است؟ چرا ممکن است دست شما به لوله بچسبد؟

۲۵ یک پالتو چگونه شما را گرم نگه می‌دارد؟ چرا استفاده از چند لباس زیر پالتو این عمل را تشدید می‌کند؟

۲۶ شیشهٔ پنجره‌ای دارای عرض ۲/۰ متر، ارتفاع ۱/۰ متر و ضخامت ۴/۰ mm است.
الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است $2/0^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم داخل اتاق است $7/0^{\circ}C$ است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه (با $k \simeq 1/0 W/m.K$) به بیرون اتاق انتقال پیدا می‌کند؟
ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می‌شود؟



۲۷ جعبهٔ یخ‌دانی از جنس پلی‌استیرن با مساحت کل دیواره‌های $0/80m^2$ و ضخامت دیواره‌های 2/0 cm در اختیار دارید. اختلاف دمای سطح داخلی و خارجی یخ‌دان $20/0^{\circ}C$ است. در یک روز (24h) چقدر یخ آب می‌شود؟ رسانندگی گرمایی پلی‌استیرن برابر است با $k = 0/010 W/m.K$.

۲۸ دوقوری همجنس و هم‌اندازه را درنظر بگیرید که سطح بیرونی یکی سیاه‌رنگ و دیگری سفیدرنگ است. هر دو را با آب داغ با دمای یکسان پر می‌کنیم. آب کدام قوری زودتر خنک می‌شود؟

۴ـ۶ قوانین گازها

۲۹ گازی در دمای $20^{\circ}C$ دارای حجم $100/0 cm^3$ است. الف) این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا در فشار ثابت، حجم آن $200/0 cm^3$ شود؟ ب) این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم $50/0 cm^3$ خواهد شد؟

۳۰ هوایی با فشار $1/0 atm$ درون استوانهٔ یک تلمبه دوچرخه به طول $24 cm$ محبوس است. راه‌های ورودی و خروجی هوای استوانه تلمبه را می‌بندیم. اکنون

الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به $30/0 cm$ افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چقدر خواهد شد؟

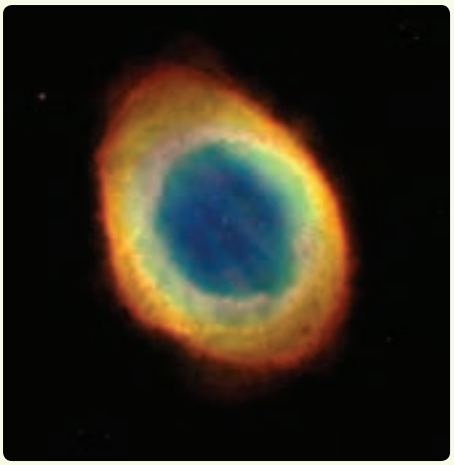
ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس $3/0 atm$ شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۳۱ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا $17^{\circ}C$ است، فشارسنج، فشار درون لاستیک را $2/00$ اتمسفر نشان می‌دهد. پس از یک رانندگی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه‌گیری می‌شود. اکنون فشارسنج، $2/30$ اتمسفر را نشان می‌دهد. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است؟ حجم لاستیک را ثابت و فشار جو را $1/00$ اتمسفر در نظر بگیرید.

۳۲ دما و فشار متعارف (STP)[1] برای گاز، دمای $0^{\circ}C = 273 K$ و فشار $1 atm = 1/013 \times 10^5 Pa$ معرفی می‌شود. حجم یک مول گاز کامل در دما و فشار متعارف چقدر است؟

۳۳ یک حباب هوا به حجم $0/20 cm^3$ در ته یک دریاچه به عمق $40/0 m$ قرار دارد که دما در آن‌جا $4/0^{\circ}C$ است. حباب تا سطح آب بالا می‌آید که در آنجا دما $20^{\circ}C$ است (دمای هوای حباب با دمای آب اطراف آن یکسان است). در لحظه‌ای که حباب به سطح آب می‌رسد حجم آن چقدر است؟ فشار هوا در سطح دریاچه را $1/01 \times 10^5 Pa$ درنظر بگیرید.

۳۴ سحابی سیاره‌ای[2]، ابری است حلقوی (شکل روبه‌رو) که عمدتاً از گاز هیدروژن با غلظت $1000/0$ مولکول بر سانتی‌متر مکعب و دمای $10000 K$ تشکیل شده است. فشار گاز در این سحابی را محاسبه کنید.



۱ـ Standard Temperature and Pressure

۲ـ Plantentary nebula

فصل ۵

ترمودینامیک

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 بازدهٔ این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کلّ 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. مطالعهٔ 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، به‌وجود می‌آورند.

در ترمودینامیک به مطالعهٔ رابطهٔ بین گرما و کار و تبدیل گرما به کار مکانیکی می‌پردازیم. پایستگی 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 وسیلهٔ 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 محدودهٔ علم ترمودینامیک می‌گنجد.

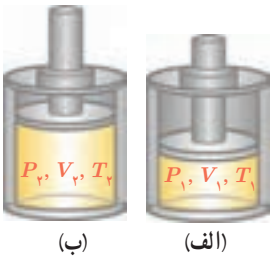
در ترمودینامیک تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً به شکل گاز یا مایع است و با محیط پیرامون خود گرما و کار مبادله می‌کند. این جسم را **دستگاه** و اجسام پیرامون دستگاه را که می‌توانند با آن تبادل انرژی داشته باشند، **محیط** می‌نامیم. مثلاً در موتور خودرو، مخلوط هوا و بخار بنزین دستگاه نامیده 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 درنظر گرفت (شکل۵ــ۱). در این بررسی، کتری و سیم گرمکن آن، اجزای محیط هستند.

شکل ۵ــ۱ آب درون کتری را می‌توان دستگاه ترمودینامیکی در نظر گرفت.

به طور ساده، منظور از دستگاه بخش مشخصی از مادّه است که تحولات و مبادلهٔ انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود. دستگاه می‌تواند مقدار مشخصی آب ، کلّ جوّ زمین یا حتی بدن یک موجود زنده باشد. نکتهٔ مهم آن است که بتوانیم مشخص کنیم چه ماده‌ای دستگاه و چه ماده‌ای محیط است. گسترهٔ ترمودینامیک فراتر از پدیده‌های گرمایی مربوط به گازهاست، ولی در این کتاب، بیشتر خود را به بررسی ترمودینامیک گازهای در حالت تعادل محدود می‌کنیم.

۵ــ۱ معادلهٔ حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۵ــ۲ 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 همهٔ 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 P، V 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 ۵ــ۲ــ 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 همهٔ نقاط گاز به مقادیر یگانه و جدید دیگری چون P_2 و T_2 برسد. به عبارت دیگر، اکنون متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دارای مقادیر یگانهٔ P_2 ، V_2 و T_2 هستند (شکل ۵ــ۲ــ ب).



(ب) (الف)

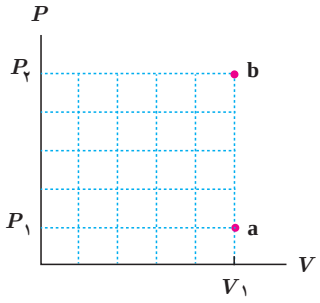
شکل ۵ــ۲ گاز داخل استوانه در حالت‌های (الف) اولیه و (ب) نهایی در تعادل ترمودینامیکی است.

خلاصه اینکه یک دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حالت تعادل ترمودینامیکی است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به‌طور خودبه‌خودی تغییر نکند.

متغیرهای ترمودینامیکی مستقل از یکدیگر نیستند و با هم رابطه دارند. رابطهٔ بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادلهٔ حالت** می‌نامند. اگر گاز آرمانی(کامل) باشد، معادلهٔ حالت آن ساده و مستقل از نوع گاز است و با قانون گازآرمانی (معادلهٔ ۴ــ۲۰)، یعنی $PV=nRT$ داده می‌شود.

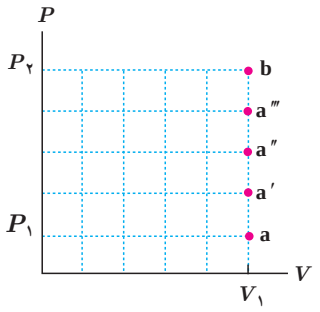
۵ــ۲ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار[1]

دیدیم حالت تعادل یک دستگاه را می‌توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P، V و T بیان کرد. همچنین دیدیم در اثر گرم شدن گاز یا جابه‌جا شدن پیستون، حالت تعادل گاز تغییر می‌کند. هنگامی که دستگاه از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر می‌رود، می‌گوییم یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.



شکل ۵ــ۳ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت تعادل a به حالت تعادل b رفته است.

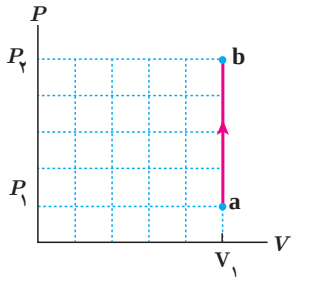
اکنون فرض کنید گاز در حالت اولیهٔ $P_۱$ ، $V_۱$ و $T_۱$ باشد. گاز را در حجم ثابت گرم می‌کنیم تا به حالت تعادل نهایی $P_۲$ ، $V_۱$ و $T_۲$ برسد. در این فرایند، حالت دستگاه در حجم ثابت از a به b تغییر کرده است (شکل۵ــ۳). اگر حالت‌های بین a و b غیرتعادلی باشند، برای این فرایند نمی‌توان نمودار رسم کرد؛ زیرا در این حالت‌ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای یگانه‌ای را نمی‌توان به کلّ گاز نسبت داد.



شکل ۵ــ۴ دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می‌دهد.

اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک گرمکن با دمای قابل تنظیم (منبع گرما) قرار می‌دهیم. ابتدا دمای منبع را برابر با دمای اولیهٔ دستگاه، یعنی $T_۱$، انتخاب می‌کنیم. تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی‌دهد. دمای منبع را اندکی افزایش می‌دهیم. گرمای کمی به گاز منتقل می‌شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر اندکی در حالت گاز ایجاد می‌شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می‌رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه a′ در شکل ۵ــ۴ نشان داده شده است. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقطه‌های a″ ، a‴ و ... به‌دست می‌آیند.

اگر گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک باشد، فرایند گرمادهی را می‌توان مانند شکل ۵ــ۵ رسم کرد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل بوده و سریع به تعادل می‌رسد. چنین فرایندی را **فرایند ایستاوار** می‌نامند. در ادامهٔ این فصل، فرایندهای مورد بررسی عمدتاً ایستاوار در نظر گرفته می‌شوند. برای رسم نمودارهای ایستاوار، چند نقطهٔ تعادلی را تعیین کرده و با وصل کردن آنها به یکدیگر نمودار ترمودینامیکی را رسم می‌کنیم.



شکل ۵ــ۵ نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم. وقتی فرایندی ایستاوار باشد، می‌توان برای آن نمودار رسم کرد.

۵ــ۳ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می‌گیرد و معمولاً فرض می‌شود که دستگاه در حین تبادل گرما، در تماس با یک **منبع گرما**[2] است.

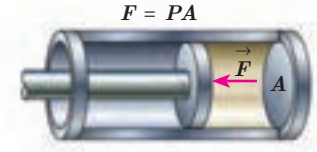
الف) گرما : در فصل ۴ دیدیم گرما انرژی‌ای است که به سبب اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می‌شود. محیط و دستگاه نیز هنگامی مبادلهٔ گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند. بنا به قرارداد،

۱ــ quasi ــ static
۲ــ 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 مبادلهٔ 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 دمایشان با دمای هوا برابر می‌شود، بی آنکه 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.

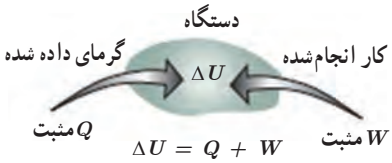
ب) کار : شکل ۵ــ۶ گازی را درون یک استوانه نشان می‌دهد. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و پیستون که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت چپ جابه‌جا می‌گردد. در این جابه‌جایی نیروی $\vec{F}$ که گاز به پیستون وارد می‌کند، کار انجام می‌دهد. مقدار این کار برابر با حاصل ضرب بزرگی نیروی $\vec{F}$ در اندازهٔ جابه‌جایی پیستون است. در این فرایند پیستون نیز روی گاز کار انجام می‌دهد که در بخش‌های بعد محاسبهٔ آن را خواهیم آموخت.



شکل ۵ــ۶ در شکل بالا $\vec{F}$ ، نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

۵ــ۴ انرژی درونی و قانون اوّل ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل‌دهندهٔ 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 ایستاوار با مبادلهٔ کار، گرما، یا هر دو با محیط از حالت اولیهٔ (۱) با انرژی درونی U_1 به حالت نهایی (۲) با انرژی درونی U_2 برسد، تغییر انرژی درونی[1]، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط بستگی دارد. اگر دستگاه در فرایندی ایستاوار، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود (شکل۵ــ۷)، این بستگی با رابطهٔ زیر نشان داده می‌شود :



شکل ۵ــ۷ قرارداد علامت‌ها برای قانون اوّل ترمودینامیک

$$\Delta U = Q + W \qquad (۱ــ۵)$$

که به آن قانون اوّل ترمودینامیک گویند و بیانگر اصل پایستگی انرژی است. توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای یک گاز رخ می‌دهد و از حالت اولیهٔ یکسان (P_1 و V_1 ، T_1) آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان (P_2 و V_2 ، T_2) می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز (ΔU) برابر است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می‌توانند متفاوت باشند.

در رابطهٔ ۵ــ۱ اگر W کار دستگاه روی محیط درنظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قرینهٔ کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به‌صورت $\Delta U = Q - W$ نوشته می‌شود.

۱ــ در برخی کتاب‌ها از جمله کتاب‌های شیمی، تغییر انرژی درونی با ΔE نشان داده شده است.

در رابطهٔ ۵ــ۱، گرمای Q می‌تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می‌تواند 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 ۵ــ۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه ۴۲۰J گرما از محیط می‌گیرد و انبساط می‌یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می‌دهد ۱۰۰J باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

پاسخ : چون دستگاه از محیط گرما گرفته است $Q=+420\,J$ و چون کار دستگاه روی محیط ۱۰۰J است پس کار محیط روی دستگاه $W=-100\,J$ می‌شود. با استفاده از قانون اوّل ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U = Q + W = 420\,J + (-100\,J) = 320\,J$$

خوب است بدانید

سوخت و ساز بدن و قانون اوّل ترمودینامیک

وقتی غذا می‌خوریم انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد غذایی به بدن ما انتقال می‌یابد. از طرفی وقتی فعالیتی انجام می‌دهیم انرژی درونی بدن کاهش می‌یابد و طبق قانون اول ترمودینامیک به کار و گرما تبدیل می‌شود. بنا به تعریف، آهنگ سوخت و ساز بدن، آهنگ تبدیل انرژی شیمیایی موادغذایی و اکسیژن به انرژی درونی بدن برای جبران کاهش انرژی درونی است و معمولاً برحسب کیلوکالری بر ساعت (kcal/h[1]) یا برحسب وات بیان می‌شود. جدول زیر آهنگ سوخت و ساز بدن را در برخی از فعالیت‌ها برای شخصی به جرم متوسط ۶۵kg نشان می‌دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط ۶۵kg

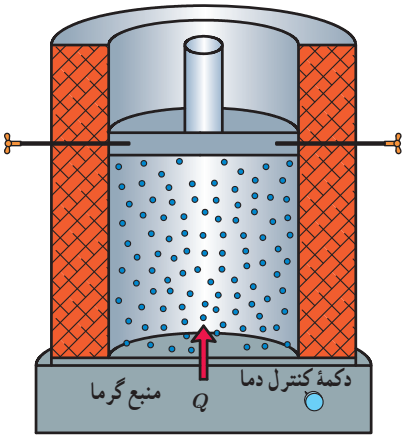
نوع فعالیت	آهنگ تقریبی سوخت‌وساز (kcal/h)	آهنگ تقریبی سوخت‌وساز (Watt)
خوابیدن	۶۰	۷۰
نشستن	۱۰۰	۱۱۵
فعالیت‌های سبک (خوردن، لباس پوشیدن و ...)	۲۰۰	۲۳۰
فعالیت‌های متوسط (تنیس، راه رفتن و ...)	۴۰۰	۴۶۰
دویدن (۱۵ km/h)	۱۰۰۰	۱۱۵۰
دوچرخه‌سواریِ سرعت	۱۱۰۰	۱۲۷۰

۱ــ در علوم تغذیه معمولاً kcal را با Cal نشان می‌دهند و آن را کالری بزرگ می‌خوانند. هر کالری بزرگ ۴/۱۸۶ کیلوژول است.

کنت رامفورد

کنت رامفورد با نام اصلی بنیامین تامپسون در سال ۱۷۵۳ میلادی در ماساچوست آمریکا، که آن زمان مستعمرهٔ انگلستان بود، به‌دنیا آمد. نخست به ارتش پیوست و در این دوران شروع به آزمایش‌هایی با باروت کرد و در قدرت مواد منفجره سلاح‌های جنگی تغییرات چشمگیری به‌وجود آورد و به همین‌خاطر به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد. چندی نگذشت که به مقام‌های وزارت جنگ، وزارت کشور و خزانه‌داری نائل آمد. در ژانویه سال ۱۷۹۸ در انجمن سلطنتی لندن سخنرانی‌ای درباره «ایجاد گرما با اثر مالش» ایراد کرد که بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. این سخنرانی جالب نتیجه مشاهداتی بود که سال‌ها پیش روی توپ جنگی انجام داده بود. کنت رامفورد اکتشافات و مشاهدات خود را در کتابی تحت عنوان «روش‌های انتقال گرما» چاپ و منتشر کرد و ثابت نمود نظریهٔ لاوازیه در مورد وجود شاره‌ای به‌نام کالریک، به‌عنوان عامل انتقال انرژی گرمایی نادرست است. رامفورد، یک مؤسسه علمی در لندن دایر کرد و هدف او از تأسیس این سازمان، تشویق مردم برای پژوهش‌های علمی بود. کارهایی که در این مؤسسه انجام می‌شد اکثراً عملی بود و گاهی نتایجی به‌دست می‌آمد که نشان می‌داد تجربیات عملی همواره از مطالعات نظری ناشی می‌گردد. بنیامین تامپسون در سال ۱۸۱۴ دیده از جهان فروبست. او نابغه و تجربه‌گر ماهری بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.

۵ــ۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی



شکل ۵ــ۸ دمای گاز را در فرایند هم‌حجم با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می‌دهیم.

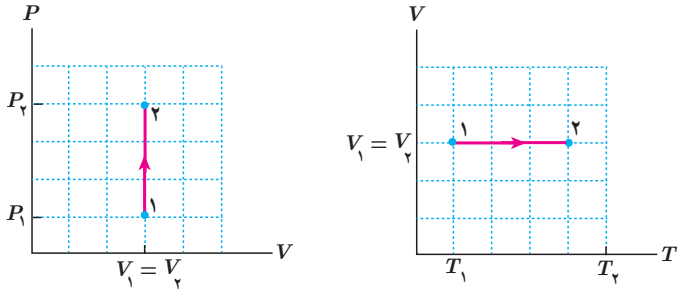
همان‌طور که گفتیم دستگاه‌های ترمودینامیکی می‌توانند فرایندهای مختلفی را طی کنند. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع‌تر است؛ از جمله : فرایند هم‌حجم[۱]، فرایند هم‌فشار[۲]، فرایند هم‌دما[۳] و فرایند بی‌دررو[۴]. در ادامه به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

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 ۵ــ۸)، طوری که دمای اولیهٔ منبع و گاز برابر باشد. دمای منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز طی یک فرایند ایستاوار، با گذار از حالت‌های تعادلی به حالت نهایی مورد نظر برسد.

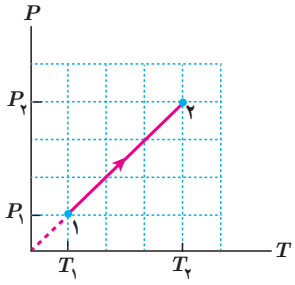
در شکل ۵ــ۹ نمودارهای VــT و PــV برای گرم کردن هم‌حجم یک گاز نشان داده شده است. در این فرایند دما و فشار گاز در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال، گاز به‌صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۵ــ۸ وارونه می‌شود.



شکل ۵ــ۹ نمودارهای VــT و PــV برای یک فرایند ایستاوار هم‌حجم.

مثال ۵ــ۲

نشان دهید نمودار PــT برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحهٔ PــT می‌گذرد.



پاسخ :چون گاز آرمانی است با استفاده از معادلهٔ حالت گاز آرمانی داریم :

$$P = \left(\frac{nR}{V}\right) T$$

چون (nR/V) ثابت است، رابطهٔ بالا معادلهٔ 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.

۱ــ Isochoric
۲ــ Isobaric
۳ــ Isothermal
۴ــ Adiabatic

پرسش ۵ــ۱

روی قوطی‌های اسپری، هشدار داده شده است که از انداختن آن در آتش خودداری کنید. علت این توصیه را براساس فرایند هم‌حجم توضیح دهید.

اکنون به تعیین گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم‌حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در فصل ۴ با گرمای ویژهٔ مولی آشنا شدیم. گرمای ویژهٔ 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 ۱K افزایش یابد.

$$C_V = \frac{Q}{n\Delta T}$$

بنابراین در فرایند هم حجم داریم :

$$Q = nC_V\Delta T \qquad (۵ــ۲)$$

یکای C_V در SI برابر J/mol.K است.

گرمای ویژه مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۵ــ۱ آمده است. می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در حجم ثابت با تقریب خوبی برای گازهای آرمانی تک اتمی برابر با $\frac{۳}{۲}R$ و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی برابر با $\frac{۵}{۲}R$ است.

جدول ۵ــ۱ گرمای ویژهٔ مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم برحسب J/mol.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_2S	۲۵/۴
N_2O	۲۸/۵
SO_2	۳۱/۳

مثال ۵ــ۳

به ۲/۰۰ مول از گازهای آرمانی He، O_2 و CO_2، در حجم ثابت، ۱۰۰/۰ ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟

پاسخ : با استفاده از رابطه ۵ــ۲ و جدول ۵ــ۱داریم :

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

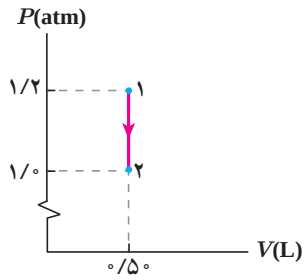
برای He،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰/۰\,J}{(۲/۰۰\,mol)(۱۲/۵\ J/mol.K)} = ۴/۰۰\,K$$

برای O_2،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰/۰\,J}{(۲/۰۰\,mol)(۲۱/۲\ J/mol.K)} = ۲/۳۶\,K$$

برای CO_2،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰/۰\,J}{(۲/۰۰\,mol)(۲۸/۵\ J/mol.K)} = ۱/۷۵\,K$$

مثال ۵ــ۴

شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم را در صفحهٔ $P-V$ 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 رابطهٔ ۵ــ۲ داریم :

$$Q = nC_V\Delta T = n\left(\frac{۳}{۲}R\right)\Delta T = \frac{۳}{۲}(nRT_۲ - nRT_۱) = \frac{۳}{۲}(P_۲V_۲ - P_۱V_۱)$$

$$= \frac{۳}{۲}\left[(۱/۰\times ۱۰^{۵}\,\mathrm{Pa})(۰/۵۰\times ۱۰^{-۳}\,\mathrm{m^۳}) - (۱/۲\times ۱۰^{۵}\,\mathrm{Pa})(۰/۵۰\times ۱۰^{-۳}\,\mathrm{m^۳})\right]$$

$$= -۱۵\,\mathrm{J}$$

گرمای مبادله شده $|Q| = ۱۵\,\mathrm{J}$ است. چون Q منفی شده است، گاز گرما از دست داده است.

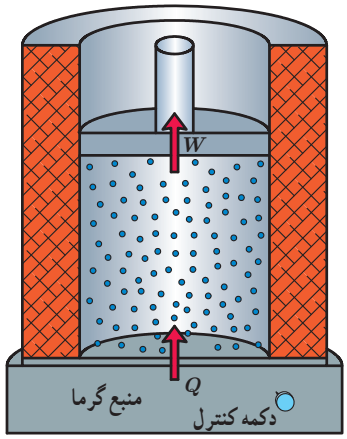
تمرین ۵ ــ ۱

دمای n مول گاز با گرمای ویژهٔ مولی در حجم ثابت C_V، در یک فرایند هم‌حجم از $T_۱$ به $T_۲$ رسیده است.

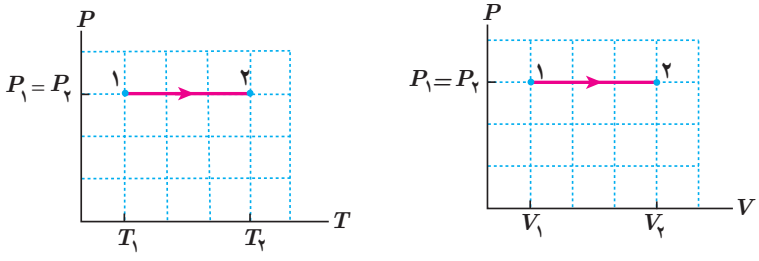
الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.

ب) اگر این گاز، گاز آرمانی و تک‌اتمی 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 درنظر بگیرید که مطابق شکل ۵ــ۱۰ داخل استوانه‌ای است که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است و دمای اولیهٔ گاز و منبع برابر است. گاز ابتدا در فشار و حجم $V_۱$ و $P_۱$ 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 درنتیجه 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 ۵ــ۱۱ رسم شده است.



شکل ۵ــ۱۰ گرم کردن گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم

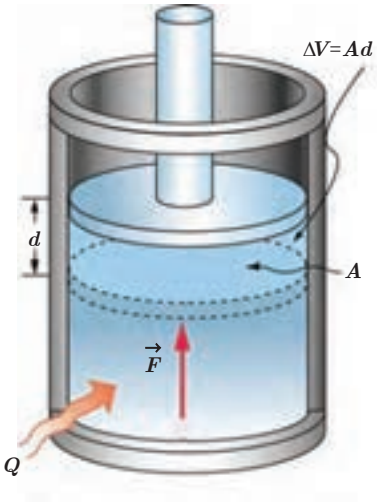


شکل ۵ــ۱۱ نمودارهای $P-T$ و $P-V$ برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

۱ــ 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 ≷ مشخص می‌کنیم.

تمرین ۵ــ۲

نشان دهید نمودار VــT برای فرایند هم‌فشارِ یک گاز آرمانی، خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد.



شکل ۵ــ۱۲ در این انبساط هم‌فشار، پیستون به‌اندازهٔ d رو به بالا جابه‌جا شده و گاز کاری برابر $P\Delta V$ روی پیستون انجام داده است.

در فرایند هم‌فشار، 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 A مساحت پیستون است. اگر در این فرایند پیستون به اندازهٔ d جابه‌جا شود (شکل ۵ــ۱۲)، 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 $\Delta V = V_2 - V_1$؛ 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 هم‌اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایهٔ گاز مجاور آن، هم‌اندازه و هم‌جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت :

$$\text{کار پیستون روی گاز} = \text{منفیِ کار گاز روی پیستون} = -P\,\Delta V$$

در این کتاب، کار محیط روی دستگاه (مثلاً در اینجا کار پیستون روی گاز) را با W نشان می‌دهیم. بنابراین، در فرایند هم‌فشار داریم :

$$W = -P\,\Delta V \qquad \text{(کار در فرایند هم‌فشار)} \quad (۵ــ۳)$$

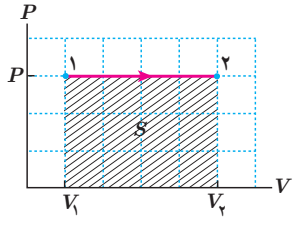
بنا به رابطهٔ فوق اگر گاز منبسط شود ($\Delta V>0$) کار محیط روی دستگاه (W) منفی و اگر گاز متراکم شود ($\Delta V<0$) کار محیط روی دستگاه (W) مثبت است.

تمرین ۵ــ۳

نشان دهید رابطهٔ ۵ــ۳ که برای یک انبساط هم‌فشار به‌دست آمده، برای یک تراکم هم‌فشار نیز برقرار است.

فعالیت ۵ــ۱

با توجه به نمودار شکل روبه‌رو، نشان دهید در فرایند هم‌فشار، مساحت سطح زیر نمودار $P-V$ برابر با قدرمطلق کار انجام شده است.



گرچه فعالیت ۵ــ۱ برای یک فرایند هم‌فشار است، ولی می‌توان نشان داد که نتیجهٔ آن در حالت کلی نیز برای هر فرایندی برقرار است و همواره قدرمطلق کار انجام شده برابر با مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحهٔ $P-V$ است.

مثال ۵ــ۵

گازی آرمانی به حجم ۱/۰۰۰ لیتر در فشار ثابت $1/00\times10^{5}\,Pa$ مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن به ۰/۹۰۰ لیتر می‌رسد. اگر دمای اولیهٔ گاز ۳۰۰/۰K باشد، دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟

پاسخ : چون گاز، آرمانی است و حجم آن به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم :

$$\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$$

در نتیجه

$$T_2=T_1\left(\frac{V_2}{V_1}\right)=(300/0\,K)(0/900)=2/70\times10^{2}\,K$$

کار انجام شدهٔ محیط روی گاز برابر است با

$$W=-P\,\Delta V=-(1/00\times10^{5}\,N/m^{2})(0/900-1/000)\times10^{-3}\,m^{3}=10/0\,J$$

مثال ۵ــ۶

گرمای تبخیر آب در نقطهٔ جوش $2/26\times10^{3}\,J/g$ است. اگر $1/00\,g$ (یا $1/00\,cm^{3}$) آب بر اثر جوشیدن در فشار جوّ متعارف[۱] ($1/01\times10^{5}\,Pa$) به $1/67\times10^{3}\,cm^{3}$ 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 می‌توان نوشت :

$$W=-P\Delta V=-(1/01\times10^{5}\,N/m^{2})(1/67\times10^{-3}\,m^{3}-1/00\times10^{-6}\,m^{3})=-1/69\times10^{2}\,J$$

ب) برای محاسبهٔ تغییر انرژی درونی آب، نخست گرمای داده شده به آن را به دست می‌آوریم :

$$Q=+mL_V=(1/00\,g)(2/26\times10^{3}\,J/g)=2/26\times10^{3}\,J$$

اینک با استفاده از قانون اوّل ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U=Q+W=2/26\times10^{3}\,J+(-1/69\times10^{2}\,J)=2/09\times10^{3}\,J$$

اکنون به محاسبهٔ گرمای مبادله شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. مانند آنچه که در مورد گرمای ویژهٔ مولی در حجم ثابت دیدیم، درمی‌یابیم که گرمای لازم برای تغییر دمای هم‌فشار یک گاز به اندازهٔ ΔT ، از رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$Q=nC_P\Delta T \qquad (۴ــ۵)$$

۱ــ Standard Atmospheric Pressure

که در آن C_P گرمای ویژهٔ مولی در فشار ثابت است. گرمای ویژهٔ مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۵ــ۲ آمده است.

می‌توان نشان داد که گرمای ویژهٔ مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، برای گازهای آرمانی تک‌اتمی برابر با $\frac{۵}{۲}R$ و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی $\frac{۷}{۲}R$ است.

جدول ۵ــ۲ گرمای ویژهٔ 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
$H_۲S$	۳۴/۲
$N_۲O$	۳۸/۸
$SO_۲$	۳۹/۹

مثال ۵ــ۷

گرمایی که ۱/۰۰L گاز آرمانی $O_۲$ در فشار جوّ متعارف ($۱/۰۱\times۱۰^۵ Pa$) و با دمای اولیهٔ ۳۰۰/۰K از دست می‌دهد تا دمایش به ۲۷۰/۰K برسد، چقدر است؟

پاسخ : تعداد مول گاز n با استفاده از قانون گازهای آرمانی برابر است با

$$n=\frac{PV}{RT}=\frac{(۱/۰۱\times۱۰^۵ Pa)(۱/۰۰\times۱۰^{-۳} m^۳)}{(۸/۳۱۴ J/mol.K)(۳۰۰K)}=۰/۰۴۰۵ mol$$

اکنون با استفاده از جدول ۵ــ۲ و رابطهٔ ۵ــ۴ داریم :

$$Q=nC_P(T_۲-T_۱)$$
$$=(۰/۰۴۰۵ mol)(۲۹/۴ J/mol.K)(۲۷۰/۰K-۳۰۰/۰K)=-۳۵/۷J$$

گرمای مبادله شده $|Q|$=۳۵/۷J است و با توجه به اینکه Q منفی شده است، نتیجه می‌گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می‌دهد.

مثال ۵ــ۸

مقداری گاز تک‌اتمی آرمانی در یک انبساط هم‌فشار، ۱۰۰/۰J 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 رابطهٔ ۵ــ۴ به‌دست می‌آید :

$$Q=nC_P\Delta T=n(\frac{۵}{۲}R)\Delta T=\frac{۵}{۲}nR\Delta T$$

در رابطهٔ بالا $nR\Delta T$ مجهول است و باید آن را محاسبه کنیم. به این منظور از رابطهٔ کار در فرایند هم‌فشار استفاده می‌کنیم :

$$W=-P\Delta V=-P(V_۲-V_۱)=-(PV_۲-PV_۱)=-(nRT_۲-nRT_۱)=-nR\Delta T$$

از صورت مسئله می‌دانیم که گاز منبسط شده و ۱۰۰/۰J کار انجام داده است. بنابراین، $W=-۱۰۰/۰J$ است و درنتیجه داریم :

$$nR\Delta T=۱۰۰/۰J$$

با قراردادن این مقدار در رابطهٔ Q خواهیم داشت :

$$Q=\left(\frac{۵}{۲}\right)(nR\Delta T)=\left(\frac{۵}{۲}\right)(۱۰۰/۰\text{J})=۲۵۰/۰\text{J}$$

گرمای مبادله شده $|Q|=۲۵۰/۰\text{J}$ است. علامت مثبت Q نشان می‌دهد که گاز (دستگاه) گرما گرفته است.

ب) از قانون اوّل ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U=Q+W=۲۵۰/۰\text{J}+(-۱۰۰/۰\text{J})=۱۵۰/۰\text{J}$$

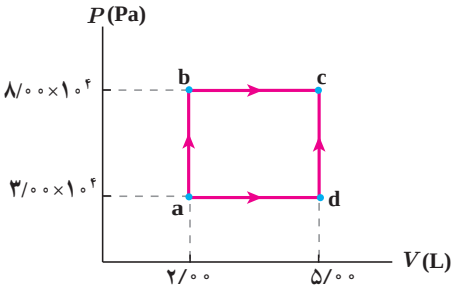
مثال ۵ــ۹

در شکل روبه‌رو، نمودار PــV برای یک گاز آرمانی نشان داده شده است.
در فرایند ab، ۱۵۰J و در فرایند bc، ۶۰۰J 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، $W_{ab}=۰$ و در نتیجه

$$\Delta U_{ab}=Q_{ab}=۱۵۰\text{J}$$

ب) فرایند bc در فشار ثابت رخ می‌دهد و بنابراین، کار انجام شده روی دستگاه برابر است با

$$W_{bc}=-P\Delta V=-P(V_c-V_b)=-(۸/۰۰\times۱۰^{۴}\text{Pa})(۳/۰۰\times۱۰^{-۳}\text{m}^{۳})=-۲۴۰\text{J}$$

در نتیجه کل کار انجام شده در فرایند abc برابر است با

$$W_{abc}=W_{ab}+W_{bc}=۰-۲۴۰\text{J}=-۲۴۰\text{J}$$

و از طرفی گرمای کل داده شده به دستگاه در فرایند abc برابر است با

$$Q_{abc}=Q_{ab}+Q_{bc}=۱۵۰\text{J}+۶۰۰\text{J}=۷۵۰\text{J}$$

با استفاده از قانون اوّل ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U_{abc}=Q_{abc}+W_{abc}=۷۵۰\text{J}-۲۴۰\text{J}=۵۱۰\text{J}$$

پ) می‌دانیم در فرایندهای مختلفی که از حالت اولیهٔ یکسان آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز یکسان است. بنابراین :

$$\Delta U_{adc}=\Delta U_{abc}=۵۱۰\text{J}$$

از طرفی کل کار انجام شده در فرایند adc برابر است با :

$$W_{adc}=W_{ad}+W_{dc}=-P(V_d-V_a)+۰=-(۳/۰۰\times۱۰^{۴}\text{Pa})(۳/۰۰\times۱۰^{-۳}\text{m}^{۳})=-۹۰/۰\text{J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U_{adc}=Q_{adc}+W_{adc}$$

و در نتیجه

$$Q_{adc}=\Delta U_{adc}-W_{adc}=(۵۱۰\text{J})-(-۹۰/۰\text{J})=۶۰۰\text{J}$$

پ) فرایند هم‌دما : دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام‌دادن یک تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۵ــ۱۳ استوانهٔ حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرمایی با دمای ثابت و برابر با دمای اولیهٔ 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.

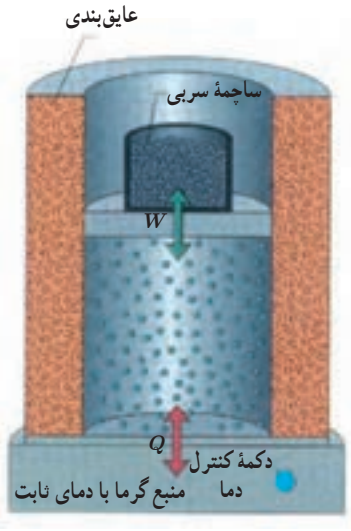
در فرایند هم‌دما، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اوّل ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم :

$$\Delta U = Q + W = 0$$

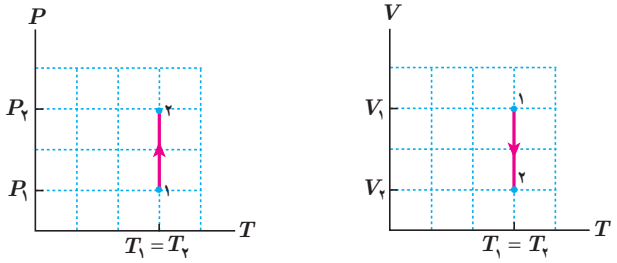
در نتیجه :

$$Q = -W$$

که چون در تراکم، کار انجام شدهٔ محیط روی گاز، W ، مثبت است، Q منفی می شود؛ یعنی در تراکم هم‌دما، گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای $V-T$ و $P-T$ این فرایند در شکل ۵ــ۱۴رسم شده است.



شکل ۵ــ۱۳ استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله‌های سربی، تراکمی هم‌دما رخ می‌دهد.



شکل ۵ــ۱۴ نمودارهای $P-T$ و $V-T$ برای یک فرایند تراکم هم‌دما

تمرین ۵ــ۴

مشابه آنچه که برای تراکم هم‌دما شرح دادیم، انبساط هم‌دمای گاز کامل را شرح دهید و علامت های Q و W را برای چنین فرایندی تعیین و نمودارهای $P-T$ و $V-T$ را برای آن رسم کنید.

فعالیت ۵ــ۲

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 ۵ــ۱۰

گازی آرمانی را در دمای ثابت از حالت اولیهٔ $V_1 = 4/0\,L$ و $P_1 = 1/0\,atm$ تا حالت نهایی با حجم $V_2 = 1/0\,L$ متراکم می‌کنیم.

الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هریک از حجم های $3/0\,L$، $2/0\,L$ و $1/0\,L$ حساب کنید و نمودار $P-V$ را با استفاده از روش نقطه یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

اگر مساحت سطح زیر این نمودار $5/5\times10^2\,J$ باشد، ب) W و پ) Q در این فرایند چقدر است؟

پاسخ : الف) چون گاز، آرمانی و فرایند هم‌دماست داریم :

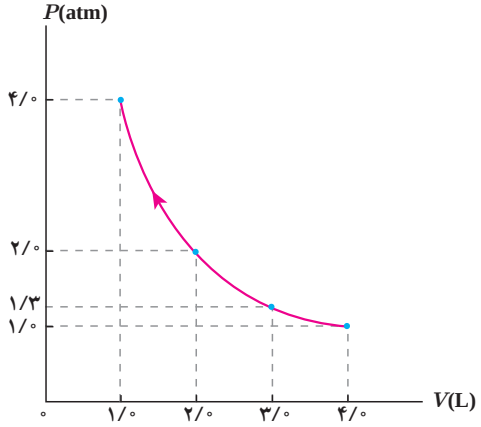
$$PV = nRT \Rightarrow P_۱V_۱ = P_۲V_۲ = \dots$$

$$V_۲ = ۳/۰\,\text{L} \Rightarrow (۱/۰)(۴/۰) = (P_۲)(۳/۰) \Rightarrow P_۲ = ۱/۳\ \text{atm}$$

$$V_۳ = ۲/۰\,\text{L} \Rightarrow (۱/۰)(۴/۰) = (P_۳)(۲/۰) \Rightarrow P_۳ = ۲/۰\ \text{atm}$$

$$V_۴ = ۱/۰\,\text{L} \Rightarrow (۱/۰)(۴/۰) = (P_۴)(۱/۰) \Rightarrow P_۴ = ۴/۰\ \text{atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار PــV را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم :



V(L)	P(atm)
۴/۰	۱/۰
۳/۰	۱/۳
۲/۰	۲/۰
۱/۰	۴/۰

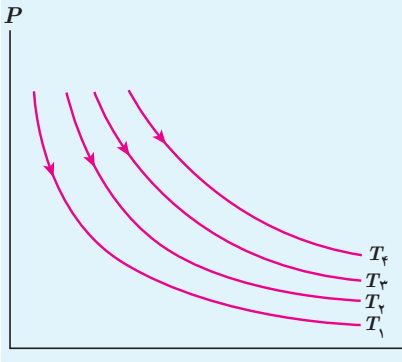
ب) قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر با مساحت سطح زیر نمودار PــV است. افزون بر این، چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است؛ یعنی :

$$W = +۵/۵ \times ۱۰^{۲}\,\text{J}$$

پ) برای فرایند هم‌دمای گاز کامل نشان دادیم $Q = -W$ است. بنابراین، برای Q داریم :

$$Q = -W = -۵/۵ \times ۱۰^{۲}\,\text{J}$$

تمرین ۵ ــ ۵



در شکل روبه‌رو، نمودار PــV مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز آرمانی در دماهای مختلف رسم شده است.

الف) نشان دهید : $T_۴ > T_۳ > T_۲ > T_۱$. (*راهنمایی:* خطی عمود بر محور V یا عمود بر محور P رسم کنید، به‌گونه‌ای 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، اندازهٔ 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 ۵ــ۱۵ 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 $Q = ۰$ است. در نتیجه، قانون اوّل ترمودینامیک برای این

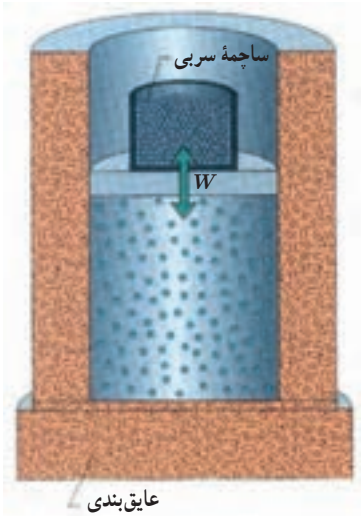
فرایند به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$\Delta U = W$$ (فرایند بی‌دررو) (۵ـ۵)

در انبساط بی‌دررویِ گاز آرمانی، کارِ محیط روی گاز (دستگاه) منفی است، در نتیجه $\Delta U < 0$ است و انرژی درونی گاز و دمای آن کاهش می‌یابد. در تراکم بی‌دررو، عکس این اتفاق رخ می‌دهد و انرژی درونی گاز و دمای آن افزایش می‌یابد.

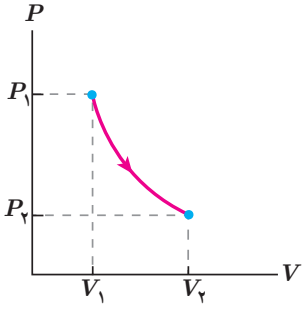


شکل ۵ـ۱۵ با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون، گاز درون استوانهٔ عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

فعالیت ۵ـ۳

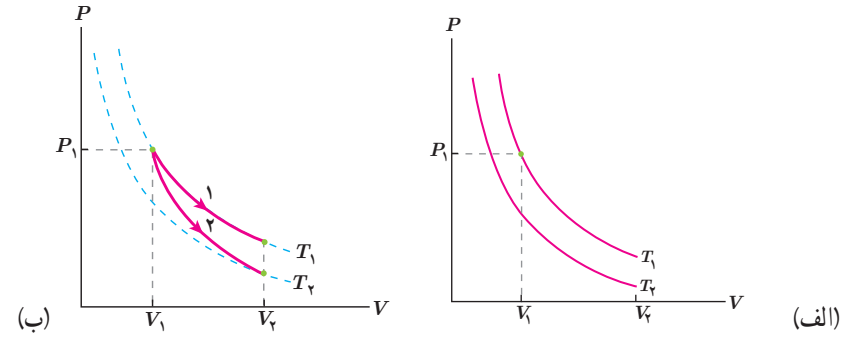
وقتی درِ یک نوشابهٔ گازدار خیلی سرد را سریع باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که هالهٔ رقیقی در اطراف دهانهٔ نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.

مثال ۵ـ۱۱



گازی آرمانی را با حجم V_1 و فشار P_1 درنظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار $P-V$ی آن خمی مشابه شکل روبه‌رو می‌شود که اندکی با خم یک فرایند هم‌دما متفاوت است. با فرض آنکه گاز در طی دو فرایند هم‌دما و بی‌دررو که از حجم و فشار یکسانی شروع می‌شوند، 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؟

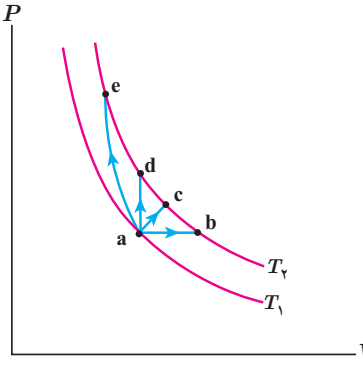
پاسخ : در شکل (الف) دو منحنی هم‌دما، با استفاده از نتیجهٔ تمرین ۵ـ۵ برای دماهای T_1 و T_2 ، ($T_1 > T_2$) رسم شده است. در فرایند هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند. بنابراین، در انبساط هم‌دمای مسیر ۱ در شکل(ب) همواره $T = T_1$ است، ولی همان‌طور که پیش‌تر گفتیم در انبساط بی‌دررو، دمای گاز آرمانی کاهش می‌یابد، پس گاز باید از مسیری مانند مسیر ۲ به دمایی پایین‌تر، مثل دمای T_2 در شکل(ب) برسد. از اینجا همچنین نتیجه می‌شود که چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیشتر است، مقدار کار برای این فرایند بیشتر است.



تمرین ۵ــ۶

مثال ۵ــ۱۱ را با فرض آنکه گاز به‌جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

مثال ۵ــ۱۲



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 رابطهٔ $\Delta U = nC_V\Delta T$ به‌دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید $C_P - C_V = R$

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 همهٔ 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 هم حجم 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 :

$$\Delta U_{\text{هم‌فشار}} = \Delta U_{\text{هم‌حجم}}$$

$$Q_{\text{هم‌فشار}} + W_{\text{هم‌فشار}} = Q_{\text{هم‌حجم}} + W_{\text{هم‌فشار}}$$

$$nC_P\Delta T + (-P\Delta V) = nC_V\Delta T + 0$$

اما می‌دانیم برای گاز آرمانی $PV = nRT$ است و بنابراین، در فرایند هم‌فشار $P\Delta V = nR\Delta T$ است. بنابراین، $nC_P\Delta T - nR\Delta T = nC_V\Delta T$ است. 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 ۵ــ۱۲، کاربردهای فراوانی در ترمودینامیک گازهای آرمانی دارد.

مثال ۵ــ ۱۳

مقدار ۵/۰۰mol از یک گاز آرمانی تک‌اتمی با فشار و حجم اولیهٔ P_1 و V_1 و دمای اولیهٔ $T_1=300/0K$ را تا حجم نهایی V_2 یک‌بار به‌صورت هم‌دما و بار دیگر به‌صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. در انبساط بی‌دررو دمای مطلق گاز به ۲۸۵/۰K می‌رسد.

الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی‌دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم‌دماست؟

ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی‌دررو را حساب کنید.

پاسخ : الف) با استفاده از قانون گازهای آرمانی داریم :

$$\left(\frac{P_2V_2}{T_2}\right)_{\text{بی‌دررو}}=\left(\frac{P_2V_2}{T_2}\right)_{\text{هم‌دما}}$$

با توجه به اینکه حجم نهایی در دو فرایند یکسان است، داریم :

$$\left(\frac{P_2}{T_2}\right)_{\text{بی‌دررو}}=\left(\frac{P_2}{T_2}\right)_{\text{هم‌دما}} \Rightarrow \frac{P_{2\ \text{بی‌دررو}}}{P_{2\ \text{هم‌دما}}}=\frac{T_{2\ \text{بی‌دررو}}}{T_{2\ \text{هم‌دما}}}=\frac{285/0K}{300/0K}=0/95$$

ب) در مثال ۵ــ۱۲ دیدیم برای گاز آرمانی در فرایند بی‌دررو $W=nC_V\Delta T$ است. بنابراین،

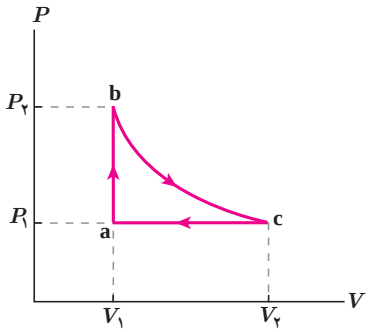
$$W_{\text{بی‌دررو}}=nC_V\Delta T=n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T=(5/00\text{mol})\left(\frac{3}{2}\times 8/314\text{J/mol.K}\right)(-15/0\text{K})=-935\text{J}$$

پرسش ۵ــ ۲

سرنگ آتش‌زنه[1] استوانهٔ 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 بی‌دررو‌ی هوای محبوس، تکهٔ کاغذ مشتعل می‌شود. معمولاً از کاغذ نیتروسلولز در این آزمایش استفاده می‌شود که نقطهٔ اشتعال بسیار پایینی دارد. چرا کاغذ در این فرایند آتش می‌گیرد؟

۵ــ۶ چرخهٔ ترمودینامیکی

دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۵ــ۱۶، از سه فرایند هم حجم ab، فرایند bc و فرایند هم‌فشار ca تشکیل شده است. مجموعهٔ این فرایندها یک چرخهٔ ترمودینامیکی را تشکیل داده است.



شکل ۵ــ۱۶ چرخهٔ ترمودینامیکی، حلقهٔ بسته‌ای را در صفحهٔ $P-V$ تشکیل می‌دهد.

در واقع در چرخهٔ ترمودینامیکی، دستگاه پس از طی چند فرایند مختلف به حالت اولیهٔ خود بازمی‌گردد؛ چون در چرخهٔ ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ($\Delta U=0$). بنابراین، از قانون اوّل ترمودینامیک برای چرخه‌های ترمودینامیکی داریم :

$$Q=-W \qquad \text{(چرخهٔ ترمودینامیکی)} \quad (5ــ6)$$

---

[1]- The Fire Syring

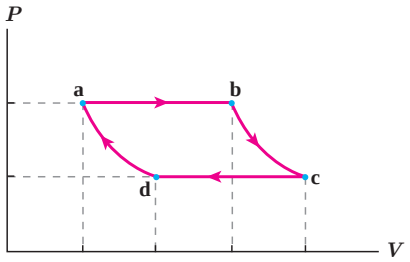
فعالیت ۵ــ۴

شکل روبه‌رو یک چرخهٔ 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.



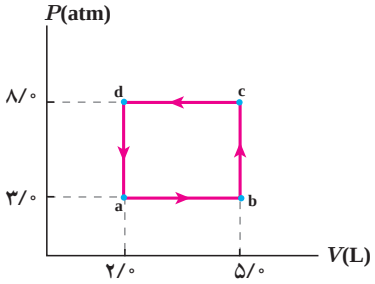
با انجام فعالیت ۵ــ۴ دریافتیم اندازهٔ کار انجام‌شده در چرخه برابر با مساحت سطح داخل چرخه در صفحهٔ P_V است و می‌توان نشان داد در چرخه‌های ساعتگرد در صفحهٔ P_V کار انجام‌شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه‌های پادساعتگرد، مثبت است.

مثال ۵ــ۱۴

گازی چرخهٔ 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 انجام شده روی گاز، برابر با مساحت سطح داخل چرخه است :

$$|W| = S_{abcd} = (۸/۰ - ۳/۰) \times ۱۰^{۵}\,N/m^{۲} \times (۵/۰ - ۲/۰) \times ۱۰^{-۳}\,m^{۳} = ۱/۵ \times ۱۰^{۳}\,J$$

چون چرخه در صفحهٔ P_V پاد ساعتگرد است، داریم :

$$W = +۱/۵ \times ۱۰^{۳}\,J$$

با توجه به رابطهٔ ۵ــ۶ می‌توان نوشت :

$$Q = -W = -۱/۵ \times ۱۰^{۳}\,J$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط $|Q| = ۱/۵ \times ۱۰^{۳}\,J$ است و علامت منفیِ Q نشان می‌دهد در این چرخه، گاز به محیط گرما داده است.

۵ــ۷ ماشین‌های گرمایی

تا حدود سه قرن پیش، انرژی مکانیکی موردنیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوان‌ها 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 موردنیاز انسان از طریق **ماشین‌های گرمایی** به‌دست می‌آید. ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کارتبدیل می‌کنند. از این ماشین‌ها درمواردی 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 شبکهٔ برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد و از این طریق، انرژی موردنیاز انسان در محل کار و زندگی تأمین می‌شود.

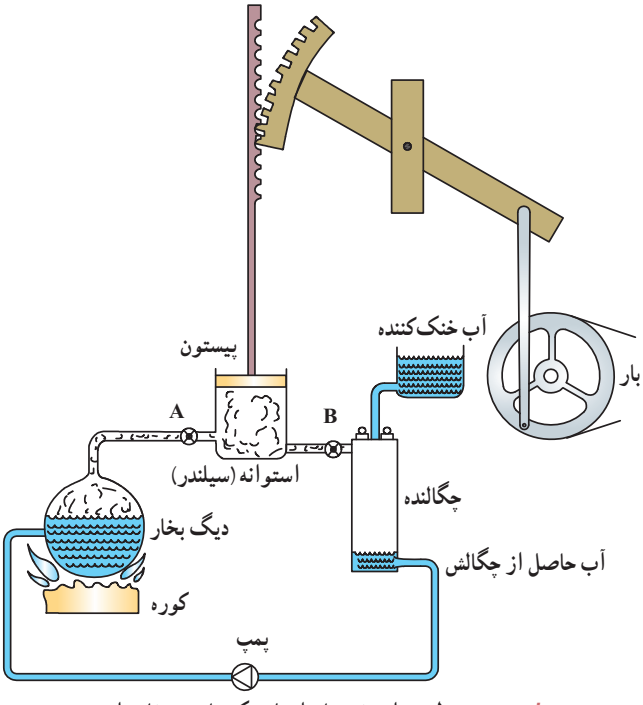
از نظر تاریخی نخستین ماشین‌های گرمایی، **ماشین های برون‌سوز** مانند ماشین بخار بوده است. نوع دیگری از ماشین‌ها نیز وجود دارند که به‌خصوص در موتور خودروها استفاده می‌شوند و با سوخت‌هایی چون بنزین و گازوئیل کار می‌کنند که به آنها **ماشین‌های درون‌سوز** می‌گویند.

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 اولیهٔ خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از این ماشین‌ها در یک چرخهٔ 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[1] است که از آن برای بیرون کشیدن آب از معادن استفاده می‌شد. انواع روزآمدتر این ماشین‌ها ماشین استرلینگ[2] و ماشین بخار[3] است. در ادامه به توضیح نمونهٔ ساده‌ای از ماشین‌های بخار می‌پردازیم که توسط جیمز وات (۱۸۱۹ــ ۱۷۳۶م.) طراحی شد.

ماشین بخار وات[4] : در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۵ــ۱۷ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام‌دادن چند فرایند مختلف، که به توضیح آنها می‌پردازیم ، به حالت اولیهٔ 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 برون سوز محسوب می‌شود. با باز شدن شیر A بخار حاصل از دیگ بخار با فشار وارد استوانه (سیلندر) می شود 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 می شود و به این ترتیب، دیگ بخار مسدود می‌گردد. همزمان شیر B باز می‌شود و بدین‌ترتیب، بخار از استوانه خارج و وارد محفظهٔ چگالنده می‌گردد. با ورود بخار به چگالنده، پیستون پایین می‌آید و هنگامی که پیستون به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد، شیر B بسته و



شکل ۵ــ۱۷ طرحی از بخش‌های اصلی یک ماشین بخار وات شامل دیگ بخار، سیلندر، پیستون، چگالنده و پمپ

۱ــ Newcomen engine
۲ــ Stirling engine
۳ــ Steam engine
۴ــ 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 بدین‌ترتیب، بخاری که وارد محفظهٔ چگالنده می‌گردد، به مایع تبدیل می‌گردد(توجه کنید که آب خنک‌کننده 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 چرخهٔ یک ماشین بخار دشوار است. اما با برخی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخهٔ رانکین[۱]) رسید. منظور از چرخهٔ آرمانی چرخه‌ای است که فرایندهای آن ایستاوار و بدون اصطکاک و هرگونه اتلافی باشد. همان‌طور که در ماشین بخار وات دیدیم دستگاه (آب) درهر 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 ۵ــ۵

در مورد ماشین‌های بخاری که امروزه در نیروگاه‌های گرمایی (حرارتی) استفاده می‌شوند و نحوهٔ کارکرد آنها تحقیق کنید و نتیجه تحقیق را در کلاس ارائه نمایید.

فعالیت ۵ــ۶

قایق پوت‌ــپوت[۲]، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب‌بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

ب) ماشین‌های گرمایی درون سوز

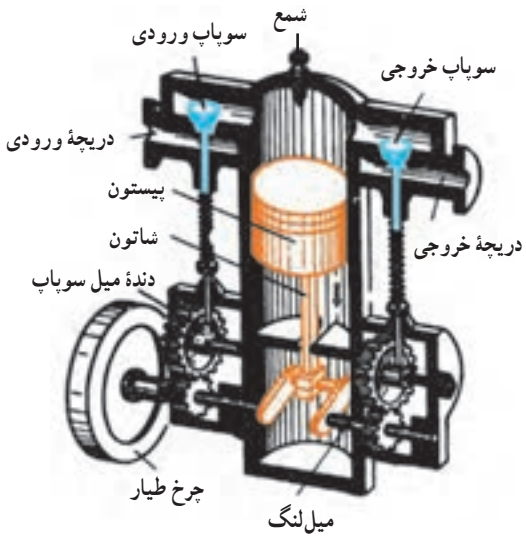
موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماها، برخی کشتی‌ها، قطارها و مولدهای کوچک برق(ژنراتور) درون سوزند. ماشین‌های گرمایی درون سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی[۳] می‌پردازیم.

۱ــ این چرخه توسط مهندس اسکاتلندی ویلیام رانکین (۱۸۷۲ــ ۱۸۲۰م.) ارائه شد.

۲ــ put_put

۳ــ gasoline engine

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 ۵ــ۱۸ 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 لولهٔ خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.



شکل ۵ــ۱۸ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

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[1] می‌گویند. این فرایندها به‌طور طرح وار در شکل ۵ــ۲۰ نشان داده شده است.

۱ــ ضربهٔ مکش : با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچهٔ ورودی وارد استوانه می‌شود. همان‌طور که شکل ۵ ــ۱۹ 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[2] می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچهٔ ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا داخل استوانه محبوس می‌گردد.

شکل ۵ــ۱۹ حجم فضای بالای پیستون در ابتدا V_1 و در انتها rV_1 است.

۲ــ ضربهٔ 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 درنظر گرفت. در نتیجه، در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

۳ــ 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.

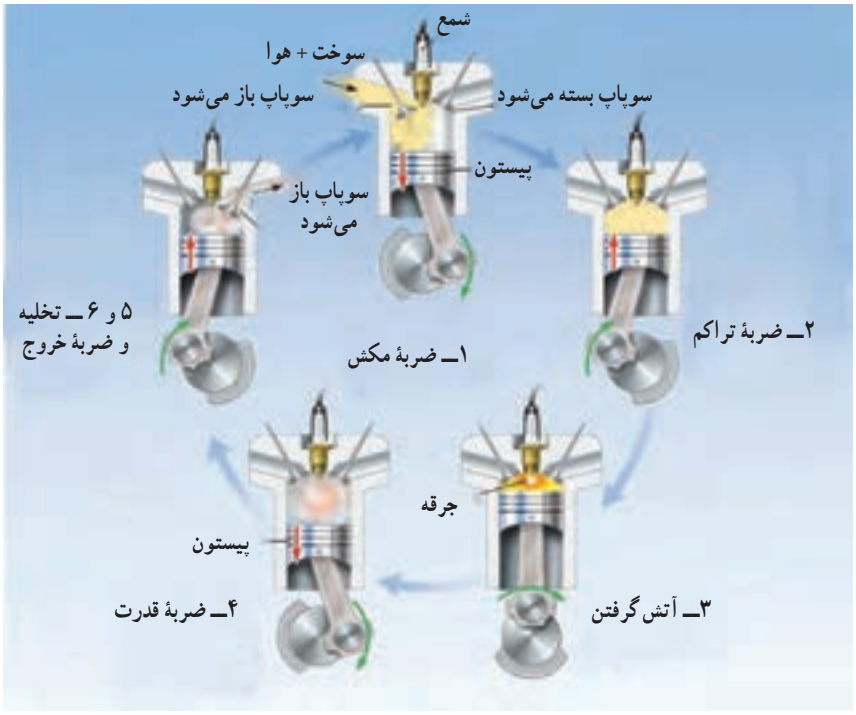
۴ــ ضربهٔ قدرت : در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از V_1 به V_2 می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو درنظر گرفت. درنتیجه در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

۵ــ تخلیه : درحالی‌که پیستون در پایین ترین وضعیت (حجم V_2) قرار دارد، سوپاپ دریچهٔ خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچهٔ خروجی خارج می‌شود، تا اینکه فشار گاز داخل استوانه با فشار جو یکسان شود. در این مرحله پیستون ساکن است.

۶ــ ضربهٔ خروج گاز : پیستون بالا می‌آید و بقیهٔ محصولات احتراق را بیرون می‌راند و حجم فضای بالای پیستون از V_2 به مقدار اولیه V_1 می‌رسد.

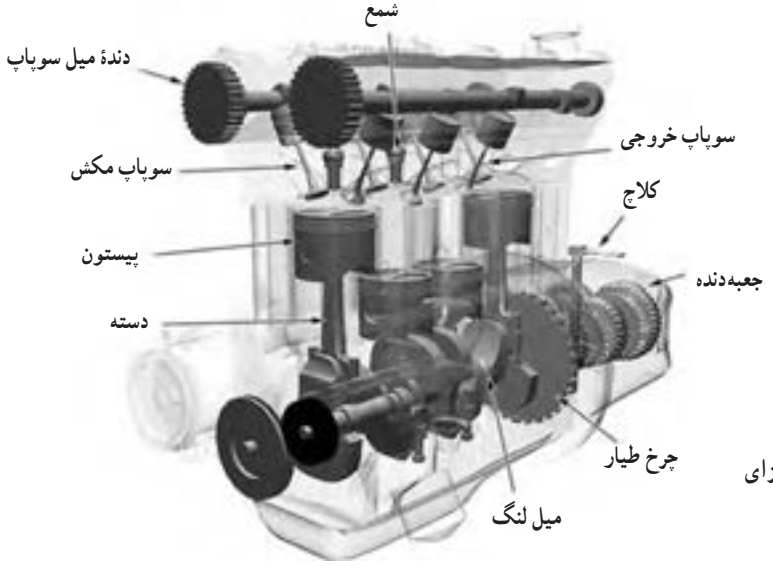
۱ــ Stroke

۲ــ Compression ratio or expansion ratio



شکل ۵ــ۲۰ مراحل مختلف در چرخهٔ موتورهای درون‌سوز

تحلیل دقیق چرخهٔ یک ماشین بنزینی دشوار است. اما با بعضی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخهٔ اتو[1]) رسید. در این ساده‌سازی‌ها می‌توان دستگاه را گازی کامل درنظر 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 ۵ــ۲۱ طرحی از اجزای یک ماشین بنزینی چهار سیلندر را نشان می‌دهد.



شکل ۵ــ۲۱ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

۱ــ Otto Cycle ــ موتورهای درون‌سوز بنزینی در سال ۱۸۷۶ توسط مهندس آلمانی «نیکلاس اُتو» ساخته شد و این چرخه به افتخار او چرخهٔ اُتو نامیده شده است. اما ایدهٔ موتورهای چهارضربه‌ای پیشتر در سال ۱۸۶۲ توسط مهندس فرانسوی «آلفونس روشا» مطرح شده‌بود.

خوب است بدانید

چرخهٔ اُتو : همان‌طور که در متن درس اشاره شد چگونگی عمل یک ماشین درون‌سوز بنزینی را می‌توان با فرض مجموعه‌ای از ساده‌سازی‌ها به‌طور تقریبی بیان کرد و بر اساس این فرض‌ها به چرخه‌ای موسوم به چرخه اُتو رسید و آن را در صفحهٔ $P-V$ رسم کرد. این فرض‌ها عبارت‌اند از :

۱ــ مادهٔ کاری (ماده‌ای که در ماشین به‌عنوان دستگاه درنظر گرفته می‌شود) هواست و مانند یک گاز آرمانی با ظرفیت گرمایی ثابت رفتار می‌کند.

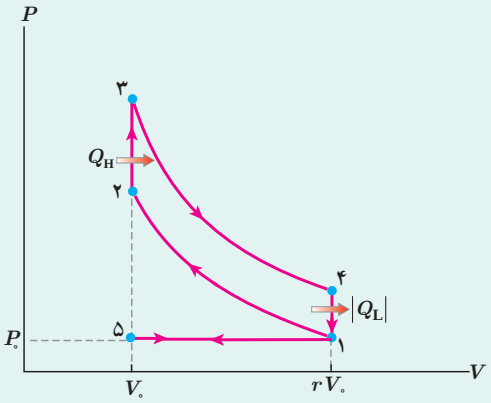
۲ــ تمام فرایندها ایستاوارند.

۳ــ هیچ اصطکاک یا تلاطمی وجود ندارد.

۴ــ هیچ اتلاف گرمایی از طریق دیواره‌های اتاقک احتراق نداریم.

۵ــ فرایندها برگشت‌پذیرند. (یعنی در پایان فرایند، هم دستگاه و هم محیط می‌توانند دقیقاً به حالت‌های اولیهٔ خود بازگردانده شود)

چرخه اتو در شکل زیر رسم شده است که مراحل آن عبارت‌اند از :



۱ ⟶ ۵ مکش ایستاوار در فشار ثابت جو.

۲ ⟶ ۱ تراکم بی‌دررو ی ایستاوار.

۳ ⟶ ۲ افزایش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۴ ⟶ ۳ انبساط بی‌دررو ی ایستاوار.

۱ ⟶ ۴ کاهش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۵ ⟶ ۱ خروج ایستاوار در فشار ثابت جو.

بازدهٔ 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 بازدهٔ هر ماشین به صورت زیر تعریف می‌شود :

(برای هر ماشینی)
$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}}$$

در ماشین‌های گرمایی، انرژی مفید خروجی همان کار $|W|$ و انرژی داده‌شده به ماشین، همان گرمای Q_H است. بنابراین، برای بازده هر ماشین گرمایی داریم :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \qquad \text{(برای هر ماشین گرمایی)} \qquad (۵ــ۷)$$

در بررسی هر یک از ماشین‌های برون‌سوز بخار و درون‌سوز بنزینی برای ساده‌سازی محاسبات، یک چرخهٔ آرمانی فرض می‌کنند که در آنها هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به‌طور ایستاوار انجام می‌شوند. در طی این چرخه‌ها مقداری گرما از یک منبع دمابالا[۱] گرفته شده (Q_H)، مقداری کار انجام می‌شود($|W|$) و

۱- High-temperature reservoir

مقداری گرما به یک **منبع دماپایین**[۱] داده می‌شود ($|Q_L|$). طرز کار همهٔ ماشین‌های گرمایی در شکل ۵ــ۲۲ به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است.

قانون اول ترمودینامیک $\Delta U = Q + W$ برای چرخهٔ ماشین‌های آرمانی به‌صورت زیر درمی‌آید :

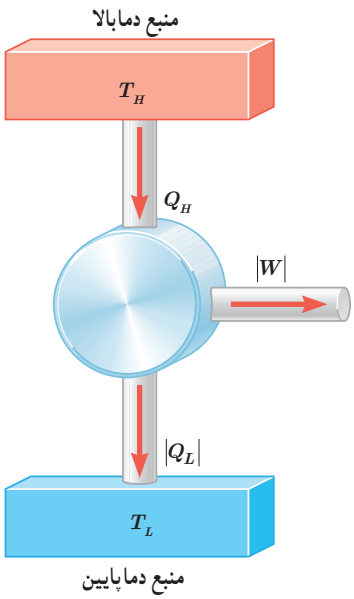
$$0 = Q_H + Q_L + W$$

در این رابطه، Q_H مثبت و Q_L و W ، منفی است. بنابراین :

$$Q_H = |W| + |Q_L| \qquad \text{(ماشین‌های گرمایی آرمانی)} \qquad (۵ــ۸)$$

در نتیجه بازده برای ماشین‌های گرمایی آرمانی چنین می‌شود :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \qquad \text{(برای ماشین‌های گرمایی آرمانی)} \qquad (۵ــ۹)$$



شکل ۵ــ۲۲ طرز کار طرح‌وار یک ماشین گرمایی آرمانی

بازدهٔ ماشین‌های گرمایی واقعی از بازده ماشین‌های آرمانی کمتر است. بازدهٔ 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.

مثال ۵ــ۱۵

بازدهٔ یک ماشین درون‌سوز بنزینی ۲۲/۰ 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 رابطهٔ ۵ــ۷ داریم

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \Rightarrow 0/220 = \frac{2/51 \times 10^3}{Q_H}$$

$$Q_H = 1/141 \times 10^4 \text{J} \simeq 1/14 \times 10^4 \text{J}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۸ داریم :

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 1/141 \times 10^4 \text{J} - 2/51 \times 10^3 \text{J} = 8/90 \times 10^3 \text{J}$$

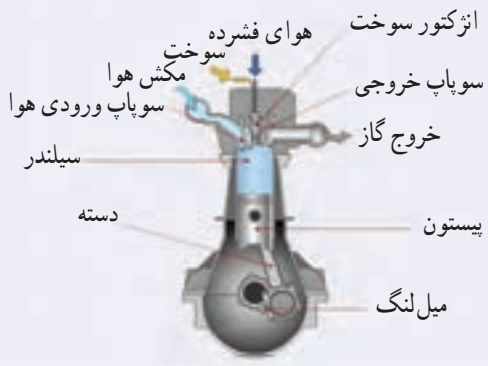
فناوری و کاربرد

نسبت تراکم ماشین‌ها : محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم r می‌توان به بازدهٔ 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 ضربهٔ 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 سدهٔ نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خودِ هوا به طور بی‌دررو متراکم و در

۱- Low-temperature reservoir

۲- Rudolf Christian Karl Diesel (۱۸۵۸-۱۹۱۳)

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 به‌طور هم‌فشار پیستون را به سمت پایین هل می‌دهد. بقیهٔ چرخه، یعنی ضربهٔ قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربهٔ خروج دقیقاً مانند ماشین بنزینی است. در تحلیل ماشین دیزل نیز مانند ماشین بنزینی از اثرهای اتلافی چشم‌پوشی می‌شود. نسبت تراکم برای ماشین‌های دیزل را حتی تا مقدار ۲۳ نیز می‌توان افزایش داد. شکل ۵ــ۲۳ طرحی از سیلندر و اجزای جانبی این ماشین را نشان می‌دهد.



شکل ۵ــ۲۳ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

۵ــ۸ 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 به‌کار وجود دارد؟ درواقع، هیچ یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همهٔ گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به‌عبارت 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[۲]؛ یعنی ممکن نیست بازدهٔ یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰درصد) شود. توجه داریم که اگر در چرخهٔ یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع دمابالا به کار تبدیل شود، قانون اوّل ترمودینامیک نقض نمی‌شود؛ اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است.

قضیهٔ کارنو: براساس قانون دوم ترمودینامیک بازدهٔ ماشین‌های گرمایی همواره از یک (۱۰۰درصد) کمتر است و اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازدهٔ ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع با دماهای T_H و T_L کار می‌کند چقدر است؟ و مادهٔ کاری (ماده‌ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) چه تأثیری بر این بازده دارد؟ پاسخ به این پرسش‌ها را *سدی کارنو* مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازدهٔ آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد و دریافت که بازدهٔ چنین ماشینی مستقل از مادّهٔ کاری است که چرخهٔ ماشین را طی می‌کند. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** می‌نامند.

نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد سدی کارنو[۱] در اوّل ژوئن ۱۷۹۶میلادی در پاریس و در خانواده‌ای که در آن علم و سیاست عجین شده بود، به‌دنیا آمد.

او نخستین پسر *لازار کارنو* یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. *لازار* بخش سوم نام فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدی کارنو در ۱۶سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون *آمپر*، *آرگو*، *گی ــ لوساک* و *پواسون* قرار گرفت. پس از فارغ‌التحصیلی در سال ۱۸۱۴ *سدی* به عنوان افسر وارد رشتهٔ مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکهٔ گرما» به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریهٔ بازدهٔ ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها *رودلف کلاسیوس* و *لردکلوین* با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام *آنتروپی* پرداختند. از این‌رو، از کارنو اغلب به‌عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در ۲۴ آگوست ۱۸۳۲میلادی در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

۱ــ Nicolas Leonard Sadi Caront

۲ــ در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلوین ــ پلانکِ قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.

محاسبه نشان می‌دهد که بازدهٔ ماشین کارنو از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad (۵ــ۱۰) \quad \text{(برای ماشین کارنو)}$$

که در آن T_L و T_H برحسب کلوین است. همان‌طور که می‌بینید بازدهٔ ماشین کارنو به جنس مادّه‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع دمابالا و دماپایین که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.

بنا به قضیهٔ کارنو، بازدهٔ یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای T_H و T_L کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازدهٔ ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$ است.

مثال ۵ــ۱۶

توربین بخار یک نیروگاه برق بین دماهای $T_H = ۸۰۰\,K$ و $T_L = ۳۰۰\,K$ کار می‌کند. بازدهٔ ماشین کارنویی که بین این دو دما کار می‌کند چقدر است؟

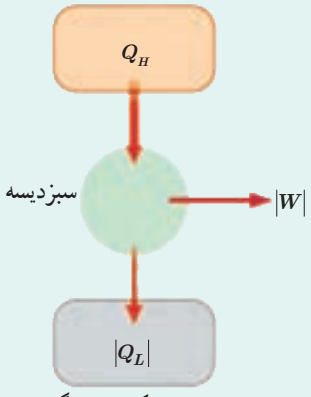
پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۰ داریم :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{۳۰۰\,K}{۸۰۰\,K} = ۰/۶۲۵$$

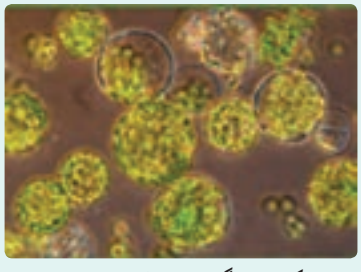
بازدهٔ واقعی توربین‌های بخار در عمل از این عدد کمتر و در حدود ۴۰درصد است.

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 گسترهٔ نور مرئی واقع است به دام می‌اندازند و به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. در واقع فوتوسنتز شامل دو مرحله است. در مرحلهٔ نخست، انرژیِ نور خورشید به دام می‌افتد و صرف تولید مولکول‌هایی می‌شود که این انرژی را به‌طور موقت ذخیره می‌کنند و در مرحلهٔ دوم انرژی شیمیایی ذخیره شده، صرف ساختن ترکیب‌های آلی می‌شود. شکل (الف) مرحلهٔ 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 سبزینه (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.

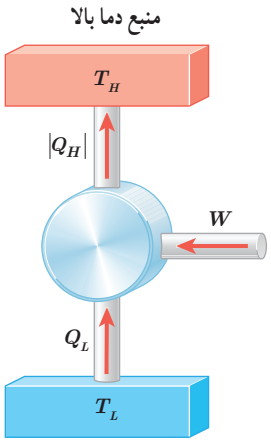


(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.


(ب) یک یاختهٔ گیاهی شامل سبزدیسه‌هاست.

۵ــ۹ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

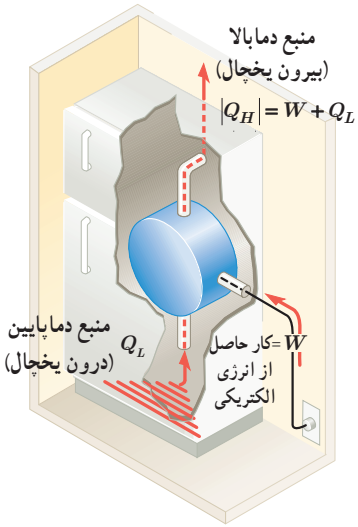
گرما همواره از جسمی با دمای بالا به جسمی با دمای پایین منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل به‌طور خودبه‌خود رخ نمی‌دهد. مثلاً اگر یک لیوان آب سرد در اتاق قرار داشته باشد گرما به‌طور خودبه‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود و ممکن نیست آب به‌طور خودبه‌خود سردتر شود. به‌عبارت دیگر: "ممکن نیست گرما به‌طور خودبه‌خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود." به این گزاره، **قانون دوم ترمودینامیک** به **بیان یخچالی** می‌گویند[1]. 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.)



شکل ۵ــ۲۴ طرز کار طرح‌وار یک یخچال آرمانی

یخچال وسیله‌ای است که این عمل را انجام می‌دهد و با استفاده از کار، گرما را از منبعی دماپایین می‌گیرد و به منبعی دمابالا می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخهٔ ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخهٔ محیط روی دستگاه (مادهٔ کاری) کار W را انجام می‌دهد. دستگاه گرمای Q_L را از منبع دماپایین می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع دمابالا می‌دهد. به‌عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به‌طور طرح‌وار در شکل ۵ــ۲۴ 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 ۵ــ۲۵).

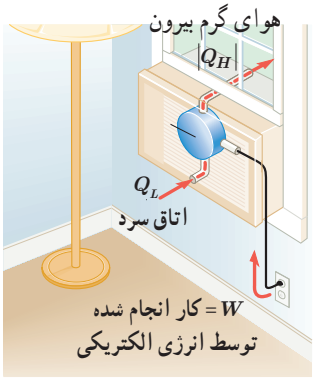


شکل ۵ــ۲۵ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی

طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولر گازی منبع دماپایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دمابالا، هوای بیرون اتاق است (شکل ۵ــ۲۶).

ضریب عملکرد یخچال: در هر یخچال می‌خواهیم با صرف کمترین کار ممکن، بیشترین گرما را از منبع دماپایین بگیریم. بنابراین، **ضریب عملکرد یخچال** (K) به‌صورت نسبت گرمای گرفته‌شده از منبع دماپایین (Q_L) به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد (W) تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_L}{W} \qquad \text{(برای هر یخچالی)} \qquad (۵ــ۱۱)$$



شکل ۵ــ۲۶ طرحی از طرز کار یک کولرگازی

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 چرخهٔ آرمانی را فرض می‌کنیم که در آن هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به‌طور ایستاوار انجام می‌شوند. اکنون قانون اوّل ترمودینامیک ($\Delta U = Q + W$) برای چرخهٔ یخچال آرمانی به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$۰ = Q_H + Q_L + W$$

۱ــ در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلاسیوسِ قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.

در این رابطه، Q_H منفی و Q_L و W مثبت است. بنابراین :

$$|Q_H| = W + Q_L \qquad \text{(برای یخچال آرمانی)} \qquad (۵ــ۱۲)$$

با قرار دادن W از رابطهٔ (۵ــ۱۲) در رابطهٔ ضریب عملکرد (معادلهٔ ۵ــ۱۱)، ضریب عملکرد یخچال‌های آرمانی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} \qquad \text{(برای یخچال‌های آرمانی)} \qquad (۵ــ۱۳)$$

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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

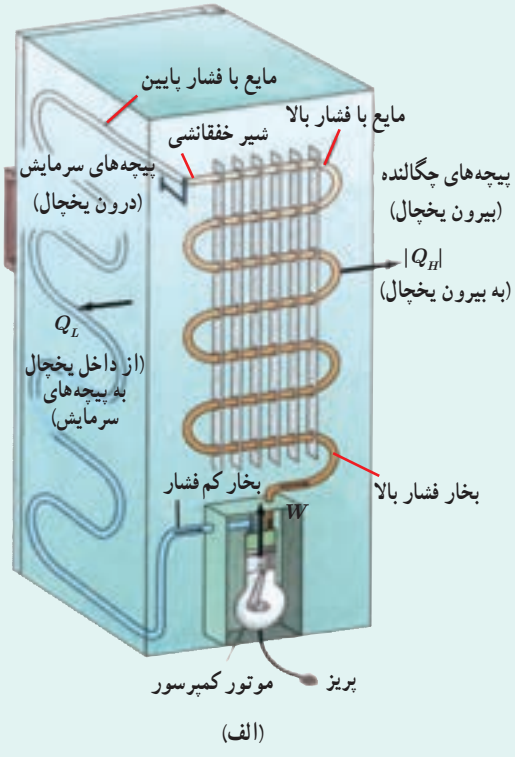
$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \qquad \text{(برای یخچال کارنو)} \qquad (۵ــ۱۴)$$

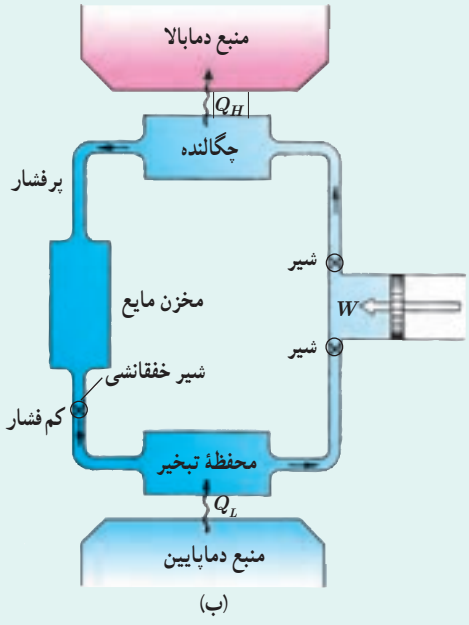
در این رابطه T_L و T_H به‌ترتیب، دمای منبع‌های دماپایین و دمابالا برحسب کلوین است.

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 داده‌شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارت‌اند از : چگالنده، پیچه‌های سرمایش (محفظهٔ تبخیر)، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقانشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). چگالنده با منبع دما بالا (هوای بیرون یخچال) و محفظهٔ تبخیر با منبع دما پایین (محتویات داخل یخچال) در تماس است. در یخچال‌های قدیمی‌تر ماده‌ای که چرخهٔ ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است، اما این گاز از جمله گازهایی است که به لایهٔ اُزن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به مایع در فشار زیاد تبدیل می‌شود و در محفظهٔ تبخیر به‌صورت گاز در فشار کم درمی‌آید.





(ب)

طرز کار یخچال خانگی به‌طور مختصر به شرح زیر است : کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظهٔ تبخیر به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع دماباﻻ (اتاق) بیشتر شده است، گرمای $|Q_H|$ را به این منبع می‌دهد، مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر خفقانشی می‌گذرد به‌شدت سرد می‌شود، به‌طوری که از منبع دماپایین (هوا، غذا و یخ داخل یخچال) هم سردتر می‌شود و از آن گرمای Q_L را می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظهٔ تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.

پرسش ۵ــ۳

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 می‌کند، یا در آب و هوای گرم؟

مثال ۵ــ۱۷

فرض کنید در هر چرخهٔ یک یخچال فرضی، دستگاه ۸/۰kJ گرما از منبع دماپایین بگیرد و کمپرسور ۲/۰kJ کار روی دستگاه انجام دهد. با فرض آرمانی بودن یخچال،

الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟

ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۲ داریم :

$$|Q_H| = W + Q_L = ۲/۰\text{kJ} + ۸/۰\text{kJ} = ۱۰/۰\text{kJ}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۱ داریم :

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{۸/۰\text{kJ}}{۲/۰\text{kJ}} = ۴/۰$$

مثال ۵ــ۱۸

توان یک یخچال ۱۰۰/۰وات و ضریب عملکردآن ۴/۰۰ است. با فرض آرمانی بودن یخچال،

الف) چه مدت طول می‌کشد تا در این یخچال ۱/۰۰kg آب ۲۵/۰ °C به یخ ۱۰/۰°C− تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می‌شود؟ $L_F = ۳/۳۵ \times ۱۰^۵\ \text{J/kg}$ و $c_{\text{یخ}} = ۲/۱۰ \times ۱۰^۳\ \text{J/kg.K}$ و $c_{\text{آب}} = ۴/۲۰ \times ۱۰^۳\ \text{J/kg.K}$.

پاسخ : الف) گرمای Q_L که آب از دست می‌دهد، برابر است با

$$Q_L = mc_{\text{آب}}|\Delta\theta| + mL_F + mc_{\text{یخ}}|\Delta\theta| = (۱/۰۰\text{kg})(۴/۲۰\times۱۰^{۳}\,\text{J/kg.}^{\circ}\text{C})(۲۵/۰^{\circ}\text{C})$$
$$+(۱/۰۰\text{kg})(۳/۳۵\times۱۰^{۵}\,\text{J/kg}) + (۱/۰۰\text{kg})(۲/۱۰\times۱۰^{۳}\,\text{J/kg.}^{\circ}\text{C})(۱۰/۰^{\circ}\text{C}) = ۴/۶۱\times۱۰^{۵}\,\text{J}$$

اکنون با استفاده از رابطهٔ **۵ــ۱۱** برای ضریب عملکرد یخچال داریم :

$$W = \frac{Q_L}{K} = \frac{۴/۶۱\times۱۰^{۵}\,\text{J}}{۴/۰۰} = ۱/۱۵\times۱۰^{۵}\,\text{J}$$

حال با استفاده از رابطهٔ توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به‌دست می‌آید :

$$t = \frac{W}{P} = \frac{۱/۱۵\times۱۰^{۵}\,\text{J}}{۱۰۰/۰\,\text{J/s}} = ۱/۱۵\times۱۰^{۳}\,\text{s}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ **۵ـ۱۲** برای یخچال آرمانی داریم :

$$|Q_H| = W + Q_L = ۱/۱۵\times۱۰^{۵}\,\text{J} + ۴/۶۱\times۱۰^{۵}\,\text{J} = ۵/۷۶\times۱۰^{۵}\,\text{J}$$

۵ــ۴ انرژی درونی و قانون اوّل ترمودینامیک

۱ ظرفی شامل ۳/۰kg آب است. با هم زدن آب داخل ظرف، ۴۰kJ کار روی آن انجام می‌دهیم و در این مدت ۳۱kJ گرما از ظرف به بیرون منتقل می‌شود. انرژی درونی آب چقدر تغییر می‌کند؟

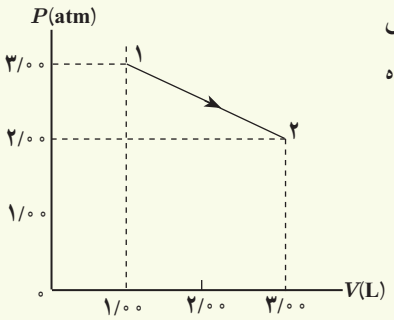
۵ــ۵ برخی فرایندهای ترمودینامیکی

۲ الف) در فرایند هم‌حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟ ب) در فرایند هم‌فشار چگونه می‌توان حجم گاز را افزایش یا کاهش داد؟

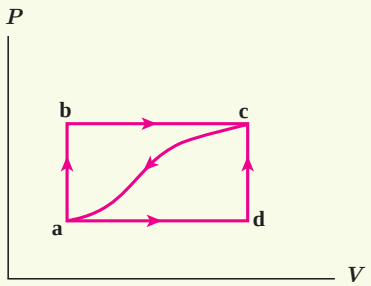
۳ ته یک سرنگ را که دستهٔ آن می‌تواند آزادانه حرکت کند مسدود می‌کنیم، آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به‌تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

۴ حجم ۰/۵۰ مول از یک گاز آرمانی تک‌اتمی ۸/۳ لیتر و فشار آن ۱/۵ 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 به‌جای گرما دادن به گاز، مقداری گرما از گاز بگیریم تا حجم آن در طی یک فرایند هم‌فشار 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 نقطهٔ (۱) برابر ۴۵۶J و در نقطهٔ (۲) برابر ۹۱۲J باشد، چقدر گرما مبادله شده است؟ آیا گاز گرما گرفته است یا از دست داده است؟



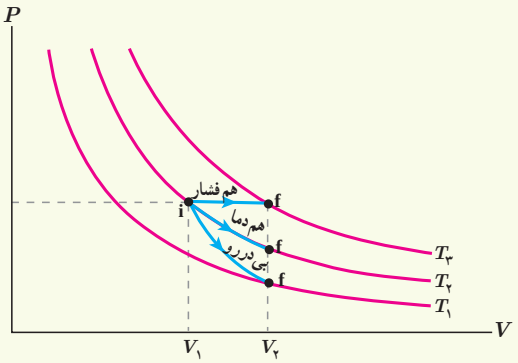
۶ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر، ۹۰ ژول گرما می‌گیرد و ۷۰ ژول کار انجام می‌دهد. الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟ ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز در مقایسه با مسیر abc بیشتر است یا کمتر؟ گرمای داده 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 ۱۲/۰g گاز اکسیژن (O_2) در فشار متعارف جو ($1/01\times10^5$Pa) از ۲۵/۰°C تا ۱۲۵°C گرم می‌شود. نسبت تغییر انرژی درونی گاز به گرمای داده شده به آن را به‌دست آورید؟

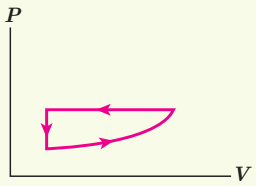
۸ یک مکعب آلومینیمی توپُر به ضلع ۲۰/۰cm از ۵۰/۰°C تا ۱۵۰/۰°C در فشار متعارف جو ($1/01\times10^5$Pa) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب و تغییر انرژی درونی آن را محاسبه کنید.

۹ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم‌فشار، هم‌دما و بی‌دررو از V_1 به حجم بزرگ‌تر V_2 می‌رسد.

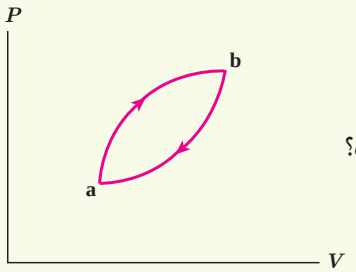


الف) اندازهٔ کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

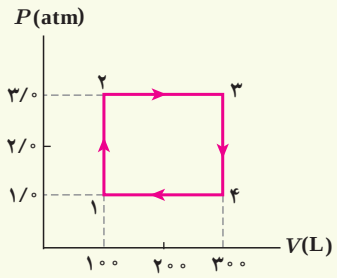
۵ـ۶ چرخهٔ ترمودینامیکی



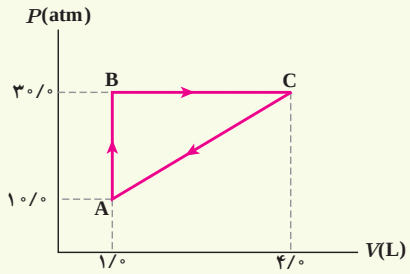
۱۰ برای چرخهٔ گازی که نمودار $P-V$ ی آن در اینجا نشان داده شده است، ΔU گاز، W و Q مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



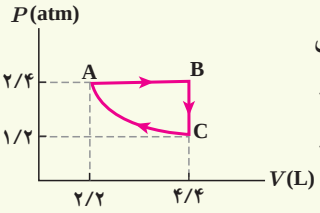
۱۱ شکل روبه‌رو چرخه‌ای را نشان می‌دهد که یک گاز طی کرده است.
الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است؟
ب) اگر مقدار گرمای مبادله شده در این چرخه ۴۰۰J باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



۱۲ یک گاز کامل دو اتمی چرخهٔ نشان داده شده در شکل زیر را می‌پیماید. دمای گاز در حالت (۱)برابر ۲۰۰K است. الف) دما در سه نقطهٔ دیگر چقدر است؟
ب) کار انجام شده درچرخه چقدر است؟
پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟
ت) در چه فرایندهایی گاز گرما از دست داده است؟

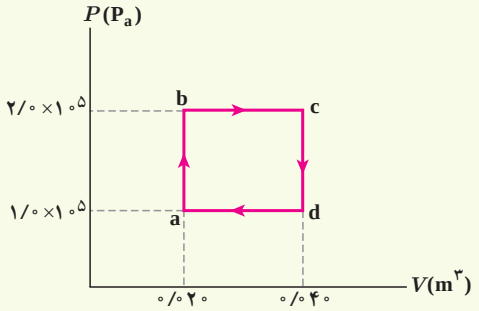


۱۳ گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای مبادله شده در این چرخه چند ژول است؟



۱۴ دستگاهی متشکل از ۰/۳۲mol گاز کامل تک‌اتمی حجمی برابر ۲/۲L را در فشار ۲/۴atm 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 به‌دست آورید.

۵ــ۷ ماشین‌های گرمایی



۱۵ یک مول از یک گاز کامل تک‌اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه‌ای را مطابق شکل روبه‌رو می‌پیماید. 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 ۱۰۰/۰ J گرما از منبع دما بالا می‌گیرد و ۶۰/۰ J گرما به منبع دما پایین می‌دهد. الف) بازده این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه ۰/۵۰۰ s طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟

۱۷ بازدهٔ یک ماشین آرمانی ۲۵/۰ درصد است و در هر چرخه $8/2 \times 10^{3}$J کار انجام می‌دهد. الف) Q_H و $|Q_L|$ را در هر چرخه ماشین به‌دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازدهٔ ماشین به ۳۰/۰ درصد افزایش یابد، Q_H و $|Q_L|$ به ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟

۱۸ یک ماشین‌بخار در هر دقیقه $1/5\times10^{5}$MJ گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و $9/0\times10^{4}$ MJ گرما در چگالنده از دست می‌دهد. 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 درون‌سوز در هر چرخه ۸/۰۰kJ گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و ۲/۰۰kJ کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت $5/0\times10^{4}$ J/g است و ماشین در هر ثانیه ۴۰/۰ چرخه را می‌پیماید. کمیت‌های زیر را حساب کنید.

الف) بازده ماشین ، ب) با فرض آرمانی بودن ماشین، گرمای تلف شده در هرچرخه، پ) سوخت مصرف شده در هرچرخه و ت) توان ماشین.

۵ــ۸ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

۲۰ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه‌های جوش (در فشار متعارف جو) و انجماد آب کار می‌کند و بازدهٔ آن ۷۰/۰ درصد است. آیا ادعای این مخترع می‌تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

۲۱ می‌خواهیم بازده یک ماشین کارنو را افزایش دهیم. با مثالی عددی بررسی کنید آیا بهتر است که دمای منبع دمابالا را افزایش دهیم یا دمای منبع دماپایین را به همان مقدار کاهش دهیم؟

۲۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع‌های با دمای ۳۰۰K و ۴۰۰K کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از :

ماشین A $W=-۴۰\text{J}$, $Q_L=-۱۷۵۰\text{J}$, $Q_H=۲۰۰۰\text{J}$

ماشین B $W=-۴۰۰\text{J}$, $Q_L=-۲۰۰\text{J}$, $Q_H=۵۰۰\text{J}$

ماشین C $W=-۴۰۰\text{J}$, $Q_L=-۲۰۰\text{J}$, $Q_H=۶۰۰\text{J}$

ماشین D $W=-۱۰\text{J}$, $Q_L=-۹۰\text{J}$, $Q_H=۱۰۰\text{J}$

با فرض آرمانی بودن این چهار ماشین :

الف) کدام‌یک از ماشین‌ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می‌کنند؟

ب) کدام‌یک از ماشین‌ها قابل ساخت هستند؟

۲۳ یک ماشین کارنو بین دماهای ۲۸۰/۰K و ۳۶۰/۰K کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه ۷۵۰/۰J گرما از منبع دمابالا می‌گیرد.
الف) در هر چرخه $|W|$ چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع دما پایین داده می‌شود؟

۵ـ۹ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

۲۴ قرار است نیم ساعت دیگر مهمانی برای شما برسد درحالی که هیچ یخی را برای نوشابهٔ خود آماده نکرده‌اید. به سرعت ۱/۰۰ L آبِ ۱۰/۰°C را در قالب‌های یخ می‌ریزید و در فریزر قرار می‌دهید. آیا در زمانی که مهمان می‌رسد، یخ خواهید داشت؟ ضریب عملکرد یخچال ۴/۰ و توان آن ۱۱۰/۰ W است. (فرض کنید همهٔ توان الکتریکی یخچال صرف سرد کردن و یخ زدن آب می‌شود.)

۲۵ یک کولر گازی در هر دقیقه $۹/۰ \times ۱۰^{۴}$J گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت $۱/۳ \times ۱۰^{۵}$J 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 ۲۵۰/۰ 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 ۲۲/۰°C است. دمای داخل یخچال در ۵/۰°C– ثابت نگه داشته شده است. کمترین مقدار انرژی الکتریکی که باید به یخچال داده شود تا یخ صفر درجهٔ سلسیوس تشکیل شود، چقدر است؟

واژه نامه

آهنگ	Rate
آهنگ جریان	Flow Rate
اثر گلخانه‌ای	Greenhouse Effect
ارقام بامعنا	Significant Figures
استوانه (سیلندر)	Cylinder
اصطکاک ایستایی	Static Friction
اصل	Principle
اصل ارشمیدس	Archimedes' Principle
اصل برنولی	Bernoulli Principles
انبساط	Expansion
انبساط حجمی	Volume Expansion
انبساط طولی	Linear Expansion
انبساط گرمایی	Thermal Expansion
انجماد	Freezing
اندازه‌گیری	Measurement
انرژی پتانسیل	Potential Energy
انرژی پتانسیل گرانشی	Gravitational Potential
انرژی	Energy
انرژی پتانسیل کشسانی	Elastic Potential Energy
انرژی جنبشی	Kinetic Energy
انرژی درونی	Internal Energy
انقباض	Contraction
بازه زمانی	Time Interval
بازده	Efficiency
برایند	Resultant
بردار	Vector
بست انبساطی	Expansion Joint
بلورین	Crystalline
پایستگی انرژی	Conservation of Energy
پخش	Diffusion
پدیده های فیزیکی	Physical Phenomena
پلاسما	Plasma
پیستون	Piston
پیشوندهای یکا	Unit Prefixes
تابش گرمایی	Thermal Radiation
تبخیر	Vaporization
تبخیر سطحی	Evaporation
تجربی	Experimental
تخمین(برآورد)	Estimate
تراکم پذیری	Compressibility
ترشوندگی	Wetting
تصعید	Sublimation
تعادل گرمایی	Thermal Equilibrium
تَف سنج	Pyrometer
تَف سنج نوری	Optical Pyrometer
تلاطم	Turbulent
تندی	Speed
تندی برخاستن	Takeoff Speed
تندی متوسط	Average Speed
توان	Power
ثابت جهانی گازها	Gas Universal Constant
جابه‌جایی	Displacement
جامد	Solid
جامدهای بلورین	Crystalline Solid
جامدهای بی‌شکل	Amorphous Solid
جرم	Mass
جریان تلاطمی	Turbulent Flow
جریان لایه‌ای	Laminar Flow
جسم شناور	Floating Object
جسم غوطه‌ور	Submerged Object
جوّ زمین	Earth Atmosphere
جو سنج	Barometer
جوشیدن	Boiling
چرخه	Cycle
چرخهٔ اُتو	Otto Cycle
چسبندگی (وکشسانی)	Viscosity
چشمه	Source
چگالش	Condensation
چگالنده	Condenser
چگالی	Density
حالت (فاز)	Phase
حرکت	Motion

حرکت براونی	Brownian Motion
خطا	Error
دانش بنیادی	Fundamental Knowledge
درستی (صحت)	Accuracy
دریچه (سوپاپ)	Valve
دستگاه بین‌المللی یکاها	International System Units
دستگاه ترمودینامیکی	Thermodynamics System
دستگاه متریک	Metric System
دقت	Precision
دگرچسبی	Adhesion
دما	Temperature
دماپا	Thermostat
دماسنج	Thermometer
دماسنج طبی	Thermometer Clinical
دماسنج کمینه- بیشینه	Maximum – Minimum Thermometer
دماسنج معیار	Standard Thermometer
دمانگاشت	Thermograph
دینامیک	Dynamics
دیگ بخار	Boiler
ذرّات بنیادی	Elementary Particles
ذوب	Fusion
رسانش گرمایی	Thermal Conduction
رطوبت	Humidity
ریزسنج	Micrometer
سال نوری	Light Year
سامانه مکان‌یابی جهانی	Global Positioning System(GPS)
سحابی سیاره‌ای	Planetary Nebula
سرعت	Velocity
سرنگ آتش‌زنه	The Fire Syringe
سوپاپ (دریچه)	Valve
شاره	Fluid
شبنم	Dew
شتاب	Acceleration
شمع	Spark Plug
ضربهٔ تخلیه	Exhaust Stroke
ضربهٔ تراکم	Compression Stroke
ضربهٔ قدرت	Power Stroke
ضربهٔ مکش	Intake Stroke

ضریب (عامل) تبدیل	Conversion Factor
ضریب عملکرد	Coefficient of Performance
ظرفیت گرمایی	Heat Capacity
عایق	Insulator
عدم قطعیت	Uncertainty
علوم نانو	Nanoscience
فرایند ایستاوار	Quasi–Static Process
فرایند بی‌دررو	Adiabatic Process
فرایند ترمودینامیکی	Thermodynamics Process
فرایند خفقانشی	Throttling Process
فرایند هم‌حجم	Isochoric process
فرایند هم‌دما	Isothermal process
فرایند هم‌فشار	Isobaric process
فشار	Pressure
فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای)	Gauge Pressure
فشار متعارف جو	Standard Atmospheric Pressure
فشارسنج	Manometer
فناوری	Technology
فنر	Spring
قاعدهٔ دولن ـ پتی	Rule of Dulong–Petit
قانون اول ترمودینامیک	First Law of Thermodynamics
قانون دوم ترمودینامیک	Second Law of Thermodynamics
قانون‌های نیوتون	Newtons Laws
قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی	Work – kinetic Energy Theorem
قضیهٔ کارنو	Carnot Theorem
قیراط	Carat
کار	Work
کشش سطحی	Surface Tension
کمیّت‌های فیزیکی	Physical Quantity
کارگرانشی	Gravitational Work
کمیت دماسنجی	Temperature Quantity
کمیت ماکروسکوپی	Macroscopic Quantity
کمیت‌های برداری	Vector Quantities
کمیت‌های نرده‌ای	Scalar Quantities
کولیس	Caliper
کهکشان	Galaxy
گاز آرمانی (کامل)	Ideal Gas
گرانش	Gravitation

گرما	Heat
گرماسنج	Calorimeter
گرماسنج بمبی	Bomb Calorimeter
گرمای نهان	Latent Heat
گرمای ویژه	Specific Heat
گرمای ویژهٔ مولی	Molar Specific Heat
گره (دریایی ـ هوایی)	Knot
لولهٔ مویین	Capillary Tube
لولهٔ ونتوری	Venturi Tube
ماشین بخار	Steam engine
ماشین بنزینی	Gasoline Engine
ماشین دیزل	Diesel Engine
ماشین کارنو	Carnot Engine
ماشین گرمایی	Heat Engine
ماشین گرمایی برون سوز	External Combustion Engine
ماشین گرمایی درون سوز	Internal Combustion
محیط	Environment
مدل	Model
مدل سازی	Modeling
مرتبه بزرگی	Order–of Magnitude
مرحلهٔ آتش گرفتن	Explosion Step
مرحلهٔ تخلیه	Exhaust Step
مرحلهٔ تخلیه	Exhaust Step
معادله پیوستگی	Equation of Continuity
معادلهٔ حالت	Equation of State
مقدار تقریبی	Approximate Value
مقیاس دماسنجی	Temperature Scale
مقیاس نانو	Nano–Scale
منبع دمابالا	High–temperature Reservoir
منبع دماپایین	Low–temperature Reservoir
منبع گرما	Heat Reservoir
مویینگی	Capillarity
میعان	Liquefaction
میل لنگ	Crank
نانو ذره	Nanoparticle
نانو لایه	Nanolayer
نانوفنّاوری	Nanotechnology
نرده‌ای	Scalar
نسبت تراکم	Compression Ratio
نظریهٔ فیزیکی	Physical Theory
نقطهٔ انجماد	Freezing Point
نقطهٔ جوش	Boiling Point
نقطهٔ ذوب	Melting Point
نقطهٔ سه‌گانه	Triple Point
نماد	Abbreviation
نمادگذاری علمی	Scientific Notation
نوار دوفلزه	Bi–Metal Strip
نیرو	Force
نیروسنج	Spring Balance
نیروی رانشی	Repulsive Force
نیروی ربایشی	Attractive Force
نیروهای اتلافی	Dissipative Forces
نیروی شناوری	Buoyant Force
وارونگی هوا(دما)	Air (Temperature) Inversion
وزن	Weight
هم چسبی	Cohesion
همرَفت	Convection
همرَفت واداشته	Forced Convection
یکا	Unit
یکاهای اصلی	Base Units
یکاهای فرعی	Derived Units
یخچال	Refrigerator
یکای نجومی	Astronomical Unit

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, 9 th 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.Zizewitz, 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

۱ــ فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹ ، مؤسسه نشر علوم نوین.

۲ــ مبانی فیزیک(جلد اول) مکانیک، گرما و شاره ها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.

۳ــ مبانی فیزیک (جلد اول و دوم) ریموند سروی وکریس ووئیل، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول۱۳۹۴، انتشارات فاطمی.

۴ــ مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی ، ۱۳۸۱–۱۳۸۷، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.

۵ــ دوره درسی فیزیک گ.س.لند سبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴ ، انتشارات فاطمی.

۶ــ نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول۱۳۹۱، انتشارات آراکس.

۷ــ 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.

۸ــ اصول فیزیک (جلد اول)، هانس اوهانیان، ترجمه یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اوّل، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.

۹ــ فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸ ، انتشارات فاطمی.

۱۰ــ فیزیک پایه، ویراست سوم، فرانک بلت، ترجمه محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.

۱۱ــ به علوم نانو خوش آمدید (به همراه DVD)، ویژه دوره آموزش متوسطه، اندرو اس مَدن و دیگران، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و معصومه قاسمی، چاپ سوم ۱۳۹۵، انتشارات مدرسه.

عکاس شروع فصل اوّل : آقای محمد یزدی راد