

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# فیزیک (۱)

رشتهٔ ریاضی و فیزیک

پایهٔ دهم

دورهٔ دوم متوسطه



وزارت آموزش و پرورش  
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

- نام کتاب: فیزیک (۱) پایه دهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۰۲۰۹
- پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
- مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
- شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: سید هدایت سجادی، سیروان مردوخ و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه‌ریزی)  
احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر و محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی  
(اعضای شورای برنامه‌ریزی و تألیف) - سید اکبر میرجعفری و کاظم بهنیا (ویراستار ادبی)
- مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
- شناسه افزوده آماده‌سازی: لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (نگاشتارگر [طراح گرافیک] و صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسین فیروزآباد، کبری اجابتی، سیف‌الله بیگ محمد دلیوند، شاداب ارشادی، زینت بهشتی شیرازی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی) تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)  
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
- نشانی سازمان: وبگاه: [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir) و [www.irtextbook.ir](http://www.irtextbook.ir)
- ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹
- چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
- سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ سوم ۱۳۹۷

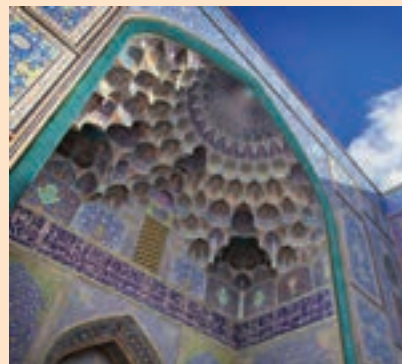
شابک ۹۷۸-۹۶۴-۵-۲۷۴۲-۹  
ISBN: 978-964-05-2742-9



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



- ۱-۱ فیزیک : دانش بنیادی ..... ۲
- ۲-۱ مدل سازی در فیزیک ..... ۵
- ۳-۱ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی ..... ۶
- ۴-۱ اندازه‌گیری و دستگاه بین‌المللی یکاها ..... ۷
- ۵-۱ اندازه‌گیری : خطا و دقت ..... ۱۴
- ۶-۱ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک ..... ۱۸
- ۷-۱ چگالی ..... ۲۱
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۲۳



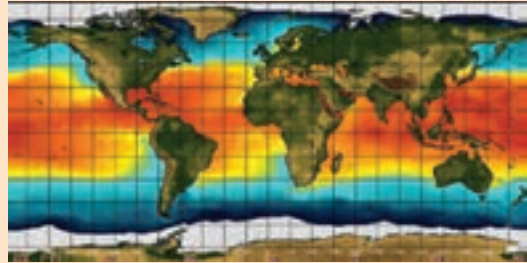
- ۱-۲ انرژی جنبشی ..... ۲۸
- ۲-۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت ..... ۲۹
- ۳-۲ کار و انرژی جنبشی ..... ۳۵
- ۴-۲ کار و انرژی پتانسیل ..... ۳۹
- ۵-۲ پایداری انرژی مکانیکی ..... ۴۵
- ۶-۲ کار و انرژی درونی ..... ۴۷
- ۷-۲ توان ..... ۴۹
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۵۴



- ۱-۳ حالت‌های ماده ..... ۶۰
- ۲-۳ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو ..... ۶۴
- ۳-۳ نیروهای بین‌مولکولی ..... ۶۶
- ۴-۳ فشار در شماره‌ها ..... ۷۰
- ۵-۳ شناوری و اصل ارشمیدس ..... ۷۸
- ۶-۳ شماره در حرکت و اصل برنولی ..... ۸۲
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ..... ۸۷



- ۱-۴ دما و دماسنجی ..... ۹۲
- ۲-۴ انبساط گرمایی ..... ۹۵
- ۳-۴ گرما ..... ۱۰۴
- ۴-۴ تغییر حالت‌های ماده ..... ۱۱۲
- ۵-۴ روش‌های انتقال گرما ..... ۱۲۱
- ۶-۴ قوانین گازها ..... ۱۲۹
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ ..... ۱۳۷



- ۱-۵ معادلهٔ حالت ..... ۱۴۲
- ۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار ..... ۱۴۳
- ۳-۵ تبادل انرژی ..... ۱۴۳
- ۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک ..... ۱۴۴
- ۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی ..... ۱۴۶
- ۶-۵ چرخهٔ ترمودینامیکی ..... ۱۵۷
- ۷-۵ ماشین‌های گرمایی ..... ۱۵۸
- ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی) ..... ۱۶۴
- ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها ..... ۱۶۶
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵ ..... ۱۷۰



### توجه

با توجه به اینکه نسبت‌های مثلثاتی در فصل دوم درس ریاضی سال دهم آموزش داده می‌شود لذا همکاران ارجمند می‌توانند در صورت صلاحدید، ابتدا به آموزش فصل سوم (ویژگی‌های فیزیکی مواد) پردازند و آنگاه فصل دوم (کار، انرژی و توان) را آموزش دهند.

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

### الف) سخنی با دانش آموزان عزیز

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

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

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

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

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

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

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

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

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

• گام اول؛ شناسایی مفهوم‌های مرتبط: نخست تشخیص دهید که چه مفهوم‌های فیزیکی به مسئله مربوط اند، اگرچه در این مرحله هیچ محاسبه‌ای وجود ندارد؛ اما گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه‌حل مسئله همین مرحله است. در این مرحله باید متغیر هدف مسئله – یعنی کمیتی را که سعی در یافتن مقدار آن دارید – شناسایی کنید. این کمیت می‌تواند انرژی جنبشی یک توپ در حال حرکت، فشار هوا در قله یک 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 در مورد چگونگی به کار بردن آنها تصمیم بگیرید. اگر لازم می‌دانید طرح و مدلی از وضعیتی رسم کنید که توسط مسئله توصیف شده است.

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

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

## ب) سخنی با دبیران ارجمند

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

• نظام‌مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی به عنوان نشانه‌های الهی کشف و گزارش کند و نتایج آن را برای حل مسائل حال و آینده در ابعاد فردی و اجتماعی در قالب اندیشه یا ابزار ارائه دهد / به کار گیرد.

• با ارزیابی رفتارهای متفاوت در ارتباط با خود و دیگران در موقعیت‌های گوناگون زندگی، رفتارهای سالم را انتخاب کند/ گزارش کند/ به کار گیرد.

• با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به کارگیری این علم را در حل مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توانمندی‌های علوم تجربی را در حل این مسائل گزارش کند.

• با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره‌گیری از علم تجربی، بتواند اندیشه‌هایی مبتنی بر تجارب شخصی، برای مشارکت در فعالیت‌های علمی ارائه دهد و در این فعالیت‌ها با حفظ ارزش‌ها و اخلاق علمی مشارکت کند.

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

### قدردانی

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

<http://physics-dept.talif.sch.ir>

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری



# فیزیک و اندازه‌گیری

## فصل ۱



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

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

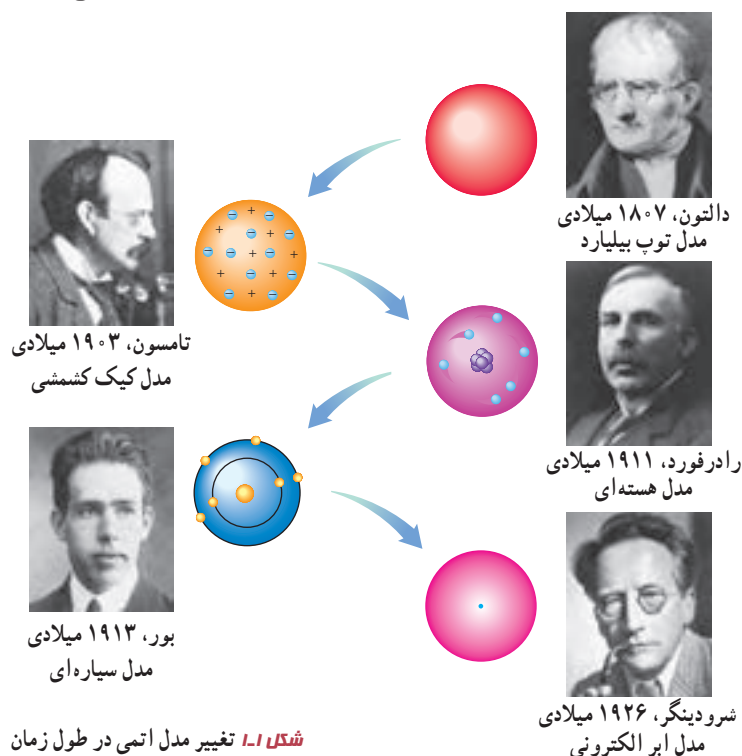
## ۱-۱ فیزیک: دانش بنیادی

مطالعه و یادگیری فیزیک به این دلیل اهمیت دارد که فیزیک از بنیادی‌ترین دانش‌ها و شالوده‌ تمامی مهندسی‌ها و فناوری‌هایی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در زندگی ما نقش دارند. فیزیک‌دانان، پدیده‌های گوناگون طبیعت را مشاهده می‌کنند و می‌کوشند الگوها و نظم‌های خاصی میان این پدیده‌ها بیابند. دانشمندان فیزیک برای توصیف و توضیح پدیده‌های مورد بررسی، اغلب از قانون، مدل و نظریه 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، نظریه اتمی با توجه به مشاهده‌ها و کسب اطلاعات جدید در خصوص رفتار اتم‌ها، بارها اصلاح شد (شکل ۱-۱).



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



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

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



خواجه نصیرالدین طوسی  
(۱۲۷۴-۱۲۰۱ م)



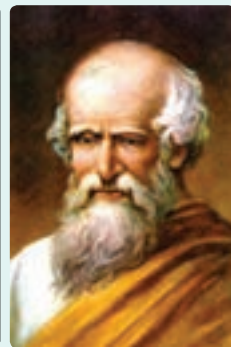
ابوعلی سینا  
(۱۰۳۷-۹۸۰ م)



ابوریحان بیرونی  
(۱۰۴۸-۹۷۳ م)



ابن هیشم  
(۱۰۴۰-۹۶۵ م)



ارشمیدس  
(۲۸۷ تا ۲۱۲ قبل از میلاد)



برج کج پیزا واقع در فلورانس ایتالیا



گالیلئو گالیله  
(۱۶۴۲-۱۵۶۴ م)

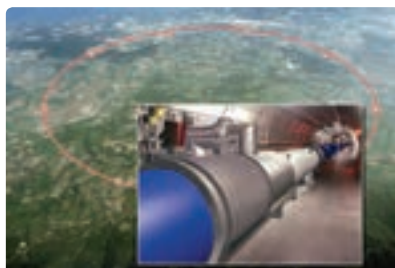
در کتاب‌های تاریخ علم، روایت کرده‌اند که گالیله جسم‌های سبک و سنگین را از بالای برج کج پیزا رها کرد تا دریابد که آیا زمان سقوط آنها یکسان است یا متفاوت. گالیله تشخیص داد که تنها یک بررسی تجربی می‌تواند به این پرسش پاسخ دهد. وی با تعمق زیاد روی نتیجه آزمایش‌های خود، گام بلندی به سوی این اصل برداشت که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

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

۱- تمامی مطالب «خوب است بدانید» در تمامی فصل‌های کتاب، جزء ارزشیابی نیستند.



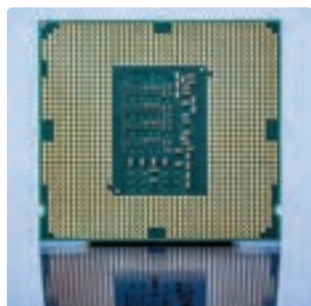
(ب)



(ب)



(الف)



(ج)



(ث)



(ت)

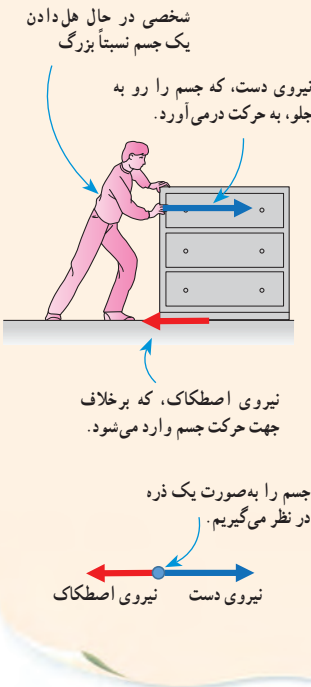
**شکل ۱-۱ الف** جُونو (Juno)، کاوشگری که ناسا به سوی مشتری (برجیس)، بزرگ‌ترین سیاره منظومه شمسی پرتاب کرد و پس از پنج سال، در اوایل تابستان ۱۳۹۵ به مداری نزدیک این سیاره رسید. این مدارگرد که به ابزارهای پیشرفته‌ای مجهز شده، اطلاعاتی دربارهٔ جو مشتری، ویژگی‌های مغناطیسی و گرانشی و همچنین چگونگی شکل‌گیری این سیاره به زمین ارسال می‌کند. (ب) نشتاب‌دهنده ذرات سازندهٔ اتم در تونلی به طول ۲۷ کیلومتر که در عمق ۱۷۵ متری زمین و در مرز کشورهای فرانسه و سوئیس ساخته شده است. در این مرکز پژوهشی بیش از ۳۰۰۰ دانشمند و فیزیک‌دان مشغول به کارند. بزرگ‌ترین دستاورد این آزمایشگاه تانکون، کشف ذرهٔ بوزون هیگز است که خبر تأیید آن در تابستان ۱۳۹۱ اعلام شد. (پ) سامانهٔ موقعیت‌یابی 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 لُو (maglev)، یکی از دستاوردهای فیزیک ابررساناست. 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 به صورت شناور درآید و با تندی‌ای فراتر از ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت حرکت کند. (ث) این عکس نمای بزرگ شده 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 به کار رفته است.<sup>۱</sup>

## فعالیت ۱-۱

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

۱- مطالب آمده در شرح قسمت‌های مختلف شکل ۱-۲ جزء ارزشیابی نیست.

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

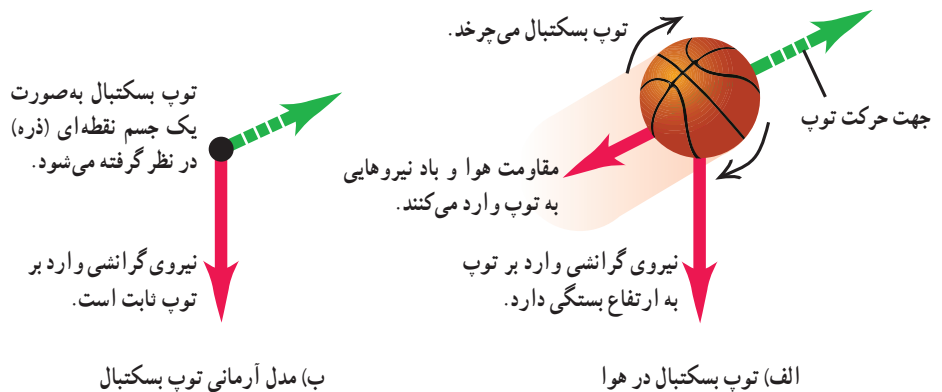


پدیده‌هایی مانند پرتاب توپ، افتادن برگ درخت، تشکیل رنگین‌کمان، آذرخش و ... ممکن است برای ما عادی شده باشند؛ ولی بررسی و تحلیل آنها در فیزیک معمولاً با پیچیدگی‌هایی همراه است. به همین دلیل فیزیک‌دانان برای بررسی پدیده‌ها، از مدل‌سازی استفاده می‌کنند. مدل‌سازی در فیزیک فرایندی است که طی آن یک پدیده فیزیکی،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

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

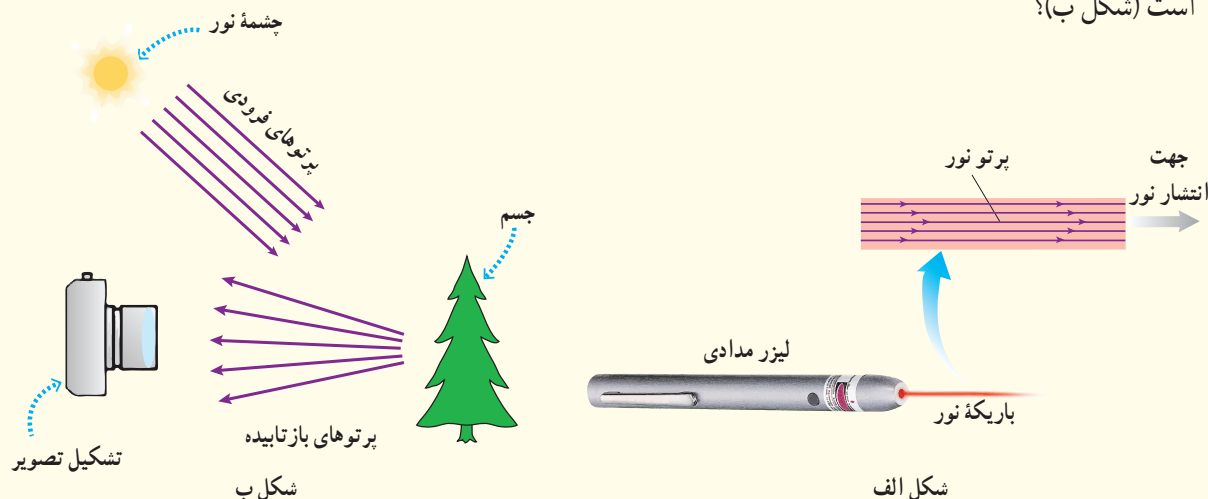
با مدل‌سازی حرکت توپ، می‌توانیم تا حدود زیادی این پیچیدگی‌ها را کاهش دهیم و بررسی و تحلیل حرکت توپ را به‌طور ساده، امکان‌پذیر سازیم. با چشم پوشیدن از اندازه و شکل توپ، آن را به‌صورت یک جسم نقطه‌ای یا ذره در نظر می‌گیریم. همچنین با فرض اینکه توپ در خلأ حرکت می‌کند، از مقاومت هوا و اثر وزش باد صرف‌نظر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

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



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

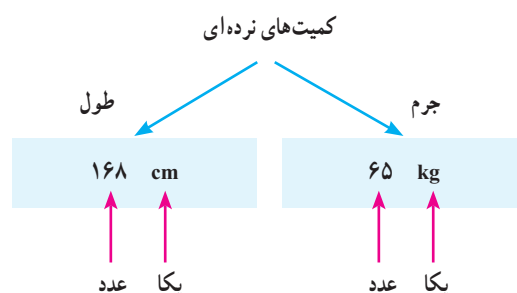
شکل الف براساس آنچه در علوم سال هشتم در زمینه نورشناسی خواندید آمده است. اجزای این شکل را توضیح دهید و بگویید که در آن، چه چیزی مدل سازی شده است. این مدل سازی چگونه در تشکیل تصویر در یک دوربین عکاسی به کار رفته است (شکل ب)؟



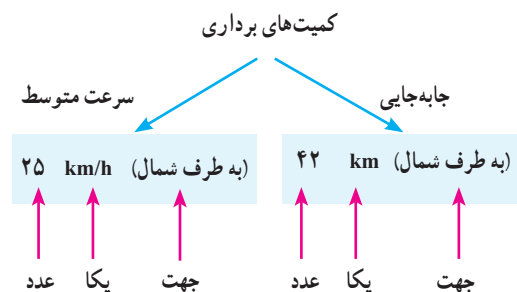
### ۳-۱ اندازه گیری و کمیت های فیزیکی

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

برای بیان برخی از کمیت های فیزیکی، تنها از یک عدد و یکای مناسب آن استفاده می شود. این گونه کمیت ها، **کمیت نرده ای** نامیده می شوند. برای مثال، وقتی می گوئیم جرم و طول قد شخصی به ترتیب،  $65 \text{ kg}$  و  $168 \text{ cm}$  است، از دو کمیت فیزیکی نرده ای برای توصیف این شخص استفاده کرده ایم (شکل ۱-۴). برای بیان برخی دیگر از کمیت های فیزیکی، افزون بر یک عدد و یکای مناسب آن، لازم است به جهت آن نیز اشاره کنیم. این دسته از کمیت ها را، **کمیت برداری** می نامند. با برخی از این کمیت ها مانند جابه جایی، سرعت، شتاب و نیرو در علوم سال نهم آشنا شدید. برای مثال، وقتی می گوئیم جابه جایی دوچرخه سواری  $42 \text{ km}$  به طرف شمال و سرعت متوسط آن  $25 \text{ km/h}$  به طرف شمال است، از دو کمیت برداری برای توصیف حرکت این دوچرخه سوار استفاده کرده ایم (شکل ۱-۵). برای نوشتن کمیت های برداری، مانند نیرو  $\vec{F}$  و شتاب  $\vec{a}$ ، از علامت پیکان بالای نماد آن کمیت استفاده می کنیم. اگر علامت پیکان بالای یک کمیت برداری نیاید، مانند  $F$  و  $a$ ، تنها اندازه آن کمیت برداری (شامل عدد و یکا) بیان شده است.



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



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

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

جدول ۲-۱ چند مثال از یکاهای فرعی که در فصل‌های این کتاب استفاده شده‌اند		
یکای فرعی	یکای SI	کمیت
m/s	m/s	تندی و سرعت
m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	شتاب
kg m/s <sup>2</sup>	نیوتون (N)	نیرو
kg/ms <sup>2</sup>	پاسکال (Pa)	فشار
kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	ژول (J)	انرژی

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

در سال ۱۹۷۱ میلادی، مجمع عمومی اوزان و مقیاس‌ها، هفت کمیت را به‌عنوان کمیت اصلی انتخاب کرد که اساس دستگاه بین‌المللی یکاها را تشکیل می‌دهند (جدول ۱-۱). یکای این کمیت‌ها را یکاهای اصلی می‌نامند. سایر یکاهای دیگر را که برحسب یکاهای اصلی بیان می‌شوند، یکاهای فرعی می‌نامند. تعداد کمیت‌های فیزیکی، آن‌چنان زیاد است که تعیین یکای مستقل برای 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، آن‌گاه یکای تندی متوسط در SI، متر بر ثانیه (m/s) خواهد شد. به این ترتیب، یکای فرعی متر بر ثانیه (m/s)، با یکاهای

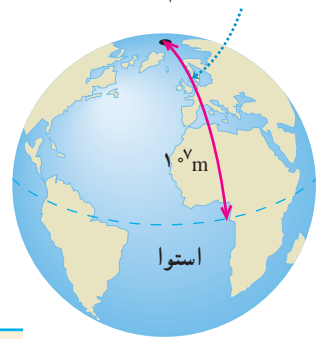
اصلی طول (m) و زمان (s) مرتبط می‌شود. در جدول ۲-۱ نمونه‌هایی از یکاهای فرعی آمده است که در این کتاب از آنها استفاده می‌کنیم. همان‌طور که در این جدول نیز دیده می‌شود برای برخی از یکاهای پرکاربرد فرعی، نامی مخصوص قرار داده‌اند، مثلاً یکای نیرو (kgm/s<sup>2</sup>) را نیوتون (N) نامیده‌اند. در این صورت گفته می‌شود: یکای SI نیرو، نیوتون است. معرفی این یکاهای خاص در SI، ضمن احترام به فعالیت‌های علمی دانشمندان گذشته، سبب سهولت در گفتار و نوشتار نیز می‌شود.

### خوب است بدانید

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

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

متر در آغاز به صورت یک ده میلیونیوم این فاصله تعریف شد

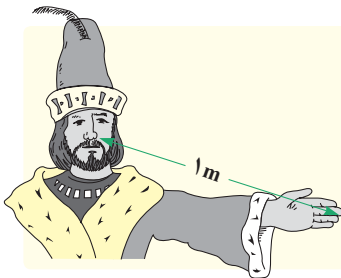


شکل ۱-۷ اولین تعریف متر در سال ۱۷۹۱ میلادی

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

جدول ۱-۳ مقادیر تقریبی برخی طول‌های اندازه‌گیری شده

طول (m)	جسم	طول (m)	جسم
$9 \times 10^1$	طول زمین فوتبال	$2/8 \times 10^{11}$	فاصله منظومه شمسی تا نزدیک‌ترین کهکشان
$5 \times 10^{-3}$	طول بدن نوعی مگس	$4 \times 10^{16}$	فاصله منظومه شمسی تا نزدیک‌ترین ستاره
$1 \times 10^{-4}$	اندازه ذرات کوچک گرد و خاک	$9 \times 10^{15}$	یک سال نوری
$1 \times 10^{-5}$	اندازه باخته‌های بیشتر موجودات زنده	$1/50 \times 10^{11}$	شعاع مدار میانگین زمین به دور خورشید
$2 \times 10^{-6}$	اندازه بیشتر میکروب‌ها	$3/84 \times 10^8$	فاصله میانگین ماه از زمین
$1/06 \times 10^{-10}$	قطر اتم هیدروژن	$6/40 \times 10^6$	شعاع میانگین زمین
$1/75 \times 10^{-15}$	قطر هسته اتم هیدروژن (قطر پروتون)	$3/6 \times 10^7$	فاصله ماهواره‌های مخابراتی از زمین



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

## پوشش ۱-۲

### تمرین ۱-۱

الف) یکای نجومی<sup>۲</sup> برابر میانگین فاصله زمین تا خورشید است ( $1 \text{ AU} \approx 1/50 \times 10^{11} \text{ m}$ ). فاصله زمین (منظومه شمسی) تا نزدیک‌ترین ستاره بعد از خورشید، بر حسب یکای نجومی چقدر است؟  
 ب) مسافتی را که نور در مدت یک سال در خلأ می‌پیماید یک سال نوری می‌نامند و آن را با نماد ly نمایش می‌دهند<sup>۳</sup>. اخترشناسان دورترین اجرام شناخته شده از منظومه شمسی هستند و به عبارتی در دورترین محل قابل مشاهده کیهان قرار دارند. فاصله اخترشناسان از منظومه شمسی  $1/00 \times 10^{26}$  متر برآورد شده است. این فاصله را بر حسب سال نوری بیان کنید. تندی نور را در خلأ<sup>۴</sup>  $3/00 \times 10^8$  متر بر ثانیه بگیرید.

۱- نیازی به حفظ کردن این تعریف تخصصی نیست.

۲- Astronomical Unit

۳- light year

۴- Quasars





**شکل ۱-۷** استاندارد ملی کیلوگرم که نسخه دقیق‌تری از استاندارد بین‌المللی سیور فرانسه است. این نمونه، در مرکز اندازه‌شناسی در سازمان ملی استاندارد ایران نگاه‌داری می‌شود.

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

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

**جدول ۵-۱** مقادیر تقریبی برخی از بازه‌های زمانی اندازه‌گیری شده

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

**زمان:** در طول سال‌های ۱۲۶۸ تا ۱۳۴۶ ه.ش، یکای زمان، ثانیه (s) به صورت  $\frac{1}{86400}$  میانگین روز خورشیدی تعریف می‌شد<sup>۲</sup>. استاندارد کنونی زمان که از سال ۱۳۴۶ ه.ش به کار گرفته شد براساس دقت بسیار زیاد ساعت‌های اتمی تعریف شده است که در کتاب‌های پیشرفته‌تر فیزیک می‌توانید با آن آشنا شوید<sup>۳</sup>.

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

## فعالیت ۲-۱

در خصوص چگونگی اندازه‌گیری زمان از دوران باستان تا عصر حاضر مطالبی را به طور مستند تهیه کنید<sup>۴</sup>.

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

۱- 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.

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

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

۴- خوب است نگاهی به وبگاه موزه علوم و فناوری [www.irstm.ir](http://www.irstm.ir) نیز داشته باشید.

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

**تبدیل یکاها:** اغلب در حل مسئله‌های فیزیک، لازم است یکای کمیتی را تغییر دهیم. برای مثال، ممکن است لازم باشد کیلوگرم (kg) را به میکروگرم ( $\mu\text{g}$ )، یا متر بر ثانیه (m/s) را به کیلومتر بر ساعت (km/h) تبدیل کنیم. این کار با روش تبدیل زنجیره‌ای انجام می‌شود. در این روش، اندازه کمیت را در یک ضریب تبدیل (نسبتی از یکاها که برابر عدد یک است) ضرب می‌کنیم. برای مثال، چون ۱ m برابر  $100\text{ cm}$  است، داریم:

$$\frac{1\text{ m}}{100\text{ cm}} = 1 \quad \text{و} \quad \frac{100\text{ cm}}{1\text{ m}} = 1$$

بنابراین، هر دو کسر بالا را که برابر یک هستند می‌توان به‌عنوان ضریب تبدیل به کار برد (ذکر یکاها در صورت و مخرج کسر الزامی است). از آنجا که ضرب کردن هر کمیت در عدد یک، اندازه آن کمیت را تغییر نمی‌دهد، هرگاه ضریب تبدیلی را مناسب بدانیم می‌توان از آن استفاده کرد. برای مثال، یکای cm را در  $85\text{ cm}$ ، به‌صورت زیر به یکای m تبدیل می‌کنیم:

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

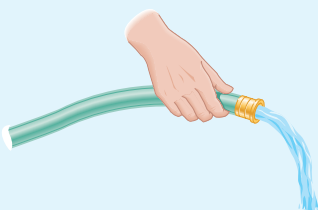
← ضریب تبدیل

همچنین در مثالی دیگر، تبدیل یکای کمیت  $36\text{ km/h}$  را بر حسب یکای m/s به‌صورت زیر انجام

می‌دهیم:

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

## تمرین ۱-۲



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

خروار، من تبریز، سیر، مثقال، نخود و گندم از جمله یکاهای قدیمی ایرانی برای اندازه‌گیری جرم است<sup>۱</sup>. این یکاها به صورت زیر به یکدیگر مرتبط اند:

$$۱ \text{ خروار} = ۱۰۰ \text{ من تبریز}$$

$$۱ \text{ من تبریز} = ۴۰ \text{ سیر} = ۶۴۰ \text{ مثقال}$$

$$۱ \text{ مثقال} = ۲۴ \text{ نخود} = ۹۶ \text{ گندم}$$

با توجه به اینکه هر مثقال اندکی بیش از  $\frac{4}{6}$  گرم است، هر کدام از این یکاها را برحسب گرم و کیلوگرم بیان کنید.

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

را با  $a$  و جرم را با  $m$  نشان می‌دهیم. همچنین برای بیان ارتباط بین کمیت‌های فیزیکی، از روابط و معادله‌ها استفاده می‌کنیم. یکی از این رابطه‌های فیزیکی، قانون دوم نیوتون،  $F = ma$ ، است که در علوم سال نهم با آن آشنا شدید. هنگام استفاده از این رابطه و جایگذاری اندازه هر کمیت در آن، باید به سازگاری یکاها در دو طرف رابطه توجه کنیم. اگر بخواهیم حاصل دو طرف رابطه برحسب یکاهای SI بیان شود باید یکای کمیت‌های داده شده را نیز به یکاهای SI تبدیل کنیم. برای مثال، اگر جرم جسمی  $۳۲۵\text{g}$  و شتاب آن  $۱/۷۵\text{m/s}^2$  باشد، برای سازگاری یکاها در دو طرف معادله، باید یکای جرم جسم را به کیلوگرم تبدیل کنیم. در این صورت مقدار حاصل را می‌توان برحسب یکای نیوتون بیان کرد.

$$F = ma = (۰/۳۲۵ \text{ kg})(۱/۷۵ \text{ m/s}^2) = ۰/۵۶۹ \text{ N}$$

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

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

یکای اصلی آن کمیت مواجه شویم، از پیشوندهایی استفاده می‌کنیم که در جدول ۱-۶ فهرست شده‌اند. همان‌طور که از ضرایب تبدیل جدول پیداست هر پیشوند، توان معینی از  $۱۰$  را نشان می‌دهد که به صورت یک عامل ضرب به کار می‌رود (به بزرگ و کوچک بودن حروف نمادها توجه کنید). یعنی وقتی پیشوندی به یکایی افزوده می‌شود، آن یکا در ضریب مربوطه ضرب می‌شود، مثلاً یک میکرومتر ( $۱\mu\text{m}$ ) که به آن میکرون نیز می‌گویند برابر  $۱ \times 10^{-6}\text{m}$  است یا سه مگاوات ( $۳\text{MW}$ ) برابر  $۳ \times 10^6\text{W}$  است.

۱- در تمامی فصل‌های کتاب، به‌خاطر سپردن یکاهای قدیمی ضرورتی ندارد و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

جدول ۱-۶ پیشوندهای یکاها

ضریب	پیشوند	نماد	ضریب	پیشوند	نماد
$10^{24}$	یوتا	Y	$10^{-24}$	یوکتو	y
$10^{21}$	زتا	Z	$10^{-21}$	زپتو	z
$10^{18}$	اِگزا	E	$10^{-18}$	آتو	a
$10^{15}$	پتا	P	$10^{-15}$	فمتو	f
$10^{12}$	ترا	T	$10^{-12}$	پیکو	p
$10^9$	گیگا (جیگا)	G	$10^{-9}$	نانو	n
$10^6$	میگا	M	$10^{-6}$	میکرو	$\mu$
$10^3$	کیلو	k	$10^{-3}$	میلی	m
$10^2$	هکتو	h	$10^{-2}$	سانتی	c
$10^1$	دکا	da	$10^{-1}$	دسی	d

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

### نمادگذاری علمی: درباره‌ی اندازه‌گیری‌ها با مقدارهای

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

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

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

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

نمونه	اندازه کمیت (شامل عدد و یکا)	بیان به صورت نمادگذاری علمی
حجم بنزین مصرفی در ایران در سال ۱۳۹۴	۲۶۰۰۰۰۰۰۰۰۰ L	$2.6 \times 10^{10}$ L
تندی نور در هوا	۳۰۰۰۰۰۰۰۰ m/s	$3 \times 10^8$ m/s
طول کل خطوط انتقال نفت خام، گاز و سایر فراورده‌های سوختی در ایران	۳۸۹۰۰۰۰۰۰ m	$3.89 \times 10^7$ m
حجم یک بشکه نفت	۱۵۹ L	$1.59 \times 10^2$ L
قطر موی انسان	۰/۰۰۰۰۰۸۰۱ m	$8.01 \times 10^{-6}$ m
قطر اتم هیدروژن	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۰۶ m	$1.06 \times 10^{-10}$ m

مثال ۱-۱

مقدار بار الکتریکی الکترون  $1.6 \times 10^{-19} \mu\text{C}$  است. مقدار این بار را برحسب کولن و با نمادگذاری علمی بنویسید.

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

$$1.6 \times 10^{-19} \mu\text{C} = 1.6 \times 10^{-25} \text{C} = 1/60 \times 10^{-19} \text{C}$$

پرسش ۳-۱

کدام گزینه جرم یک زنبور عسل ( $15 \text{ kg} / 100000$ ) را به صورت نمادگذاری علمی درست بیان می‌کند؟





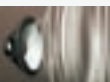
$15 \times 10^{-5} \text{kg}$

$1/5 \times 10^{-4} \text{kg}$

$15 \times 10^{-2} \text{kg}$

تمرین ۳-۱

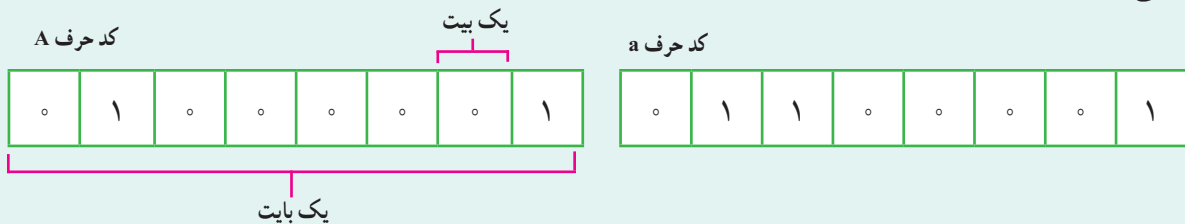
با توجه به پیشوندهای یکاهای SI و نمادگذاری علمی جدول زیر را کامل کنید.

	قطر میانگین یک گویچه (گلبول) قرمز	$7/0 \times 10^{-6} \text{m}$	..... mm	..... $\mu\text{m}$
	قطر هسته اتم اورانیوم	$1/75 \times 10^{-14} \text{m}$	..... pm	..... fm
	جرم یک گیره کاغذ	$1/0 \times 10^{-4} \text{kg}$	..... g	..... mg
	زمانی که نور مسافت $3/0$ متر را در هوا طی می‌کند.	$1/0 \times 10^{-9} \text{s}$	..... $\mu\text{s}$	..... ns
	زمانی که صوت مسافت $35/0$ متر را در هوا طی می‌کند.	$1/0 \times 10^{-3} \text{s}$	..... ms	..... $\mu\text{s}$

خوب است بدانید

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

به دسته‌های ۸ تایی از بیت‌ها، بایت می‌گویند ( $1\text{B} = 8\text{b}$ ). یک بایت می‌تواند نشان‌دهنده یک کاراکتر (یک حرف، یک عدد صحیح بین ۰ تا ۹، یا یک علامت نشانه‌گذاری و غیره) باشد. برای مثال، کد حرف A و a به صورت‌های زیر است:



با کمی دقت متوجه می‌شویم که هر بایت می‌تواند ۲۵۶ ترکیب ۸ تایی از صفرها و یک‌ها بسازد که هر کدام نماینده یک نویسه (کاراکتر) هستند. پیشوندهای بزرگ‌تر یکای بنیادی اطلاعات به صورت 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  $2^{10} = 1024$  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.

$2^{10} \text{ b} = 1024 \text{ b} = 1 \text{ kb}$	کیلوبیت
$2^{20} \text{ b} = 1024 \text{ kb} = 1 \text{ Mb}$	مگابیت
$2^{30} \text{ b} = 1024 \text{ Mb} = 1 \text{ Gb}$	گیگابیت
$2^{40} \text{ b} = 1024 \text{ Gb} = 1 \text{ Tb}$	ترابیت
$2^{50} \text{ b} = 1024 \text{ Tb} = 1 \text{ Pb}$	پتابیت
$2^{60} \text{ b} = 1024 \text{ Pb} = 1 \text{ Eb}$	اگزابیت
$2^{70} \text{ b} = 1024 \text{ Eb} = 1 \text{ Zb}$	زتتابیت
$2^{80} \text{ b} = 1024 \text{ Zb} = 1 \text{ Yb}$	یوتتابیت



## ۵-۱ اندازه‌گیری: خطا و دقت

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

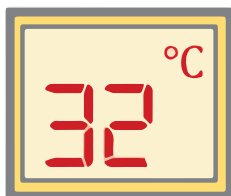
**۱- دقت وسیله اندازه‌گیری:** یکی از عوامل مهم در دقت اندازه‌گیری، دقت و حساسیت وسیله اندازه‌گیری است. برای مثال، دقت خط‌کشی که تا میلی‌متر مدرج شده، بیشتر از دقت خط‌کشی است که تا سانتی‌متر مدرج شده است. بنابر یک قاعده کلی، خطای اندازه‌گیری توسط خط‌کش و سایر وسیله‌های درجه‌بندی شده،  $\pm \frac{1}{p}$  کمیته تقسیم‌بندی مقیاس آن وسیله است و برای وسیله‌های رقمی (دیجیتال) مثبت و منفی یک واحد از آخرین رقمی است که می‌خوانند. به این ترتیب، خطای اندازه‌گیری خط‌کشی که تا سانتی‌متر مدرج شده، برابر  $\pm 0.5 \text{ cm}$  (شکل ۱-۸ الف)، خط‌کشی که تا میلی‌متر درجه‌بندی شده برابر  $\pm 0.5 \text{ mm}$  (شکل ۱-۸ ب)، خطای دماسنج رقمی در شکل ۱-۸ پ، که  $26.8^\circ \text{C}$  را می‌خواند برابر  $\pm 0.1^\circ \text{C}$  و خطای دماسنج رقمی شکل ۱-۸ ت، که  $32^\circ \text{C}$  را می‌خواند برابر  $\pm 1^\circ \text{C}$  است.

دقت ابزارهای اندازه‌گیری مدرج، برابر کمیته درجه‌بندی آن ابزار است. برای مثال، دقت خط‌کشی که کمیته درجه‌بندی آن مطابق شکل زیر تا میلی‌متر است برابر  $1 \text{ mm}$  و خطای آن  $\pm 0.5 \text{ mm}$  است.

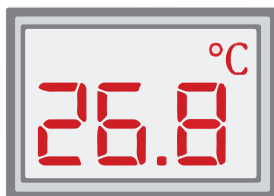
کمیته درجه‌بندی این خط‌کش،  $1 \text{ mm}$  است.



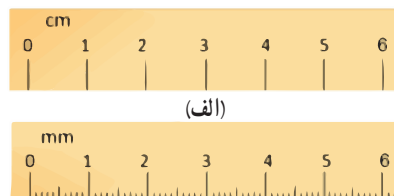
دقت این خط‌کش  $1 \text{ mm}$  و خطای اندازه‌گیری توسط آن  $\pm 0.5 \text{ mm}$  است.



(ت)



(ب)

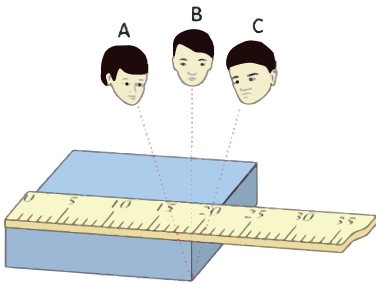


(الف)



(ب)

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



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

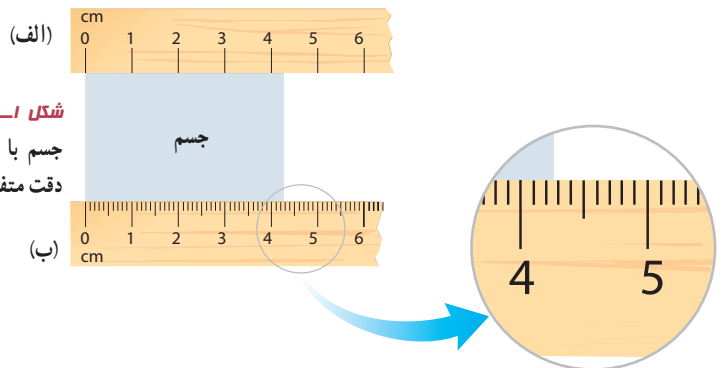
**۲- مهارت شخص آزمایشگر:** یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار روی دقت اندازه‌گیری، مهارت‌های شخص آزمایشگر است. یکی از این مهارت‌ها، نحوه خواندن نتیجه اندازه‌گیری است. شکل ۹-۱ تأثیر اختلاف منظر در خواندن نتیجه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. خواندن نتیجه اندازه‌گیری از منظرهای A و C خطا را افزایش می‌دهد در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

**۳- تعداد دفعات اندازه‌گیری:** برای کاهش خطا در اندازه‌گیری هر کمیت، معمولاً اندازه‌گیری آن را چند بار تکرار می‌کنند. میانگین عددهای حاصل از اندازه‌گیری به‌عنوان نتیجه اندازه‌گیری گزارش می‌شود. البته در میان عددهای متفاوت، اگر یک یا دو عدد اختلاف زیادی با بقیه داشته باشند در میانگین‌گیری به حساب نمی‌آیند (شکل ۱-۱۰).



**شکل ۱-۱۰** نتایج اندازه‌گیری شده حول اندازه واقعی. هر نشانه قرمز رنگ، نشان‌دهنده نتیجه یک اندازه‌گیری است.

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



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

خط‌کش شکل ۱-۱۱ الف، برحسب سانتی‌متر مدرج شده است و خطای اندازه‌گیری آن  $\pm 0.5$  سانتی‌متر است. به نظر شما خط‌کش الف چه طولی را نشان می‌دهد؟  $4.2/3$  یا  $4.3/2$  سانتی‌متر؟ از آنجا که خط‌کش الف برحسب میلی‌متر مدرج نشده است، لذا عددهای ۲ و ۳ قطعی نیستند و آنها را حدس می‌زنیم. در این حالت نتیجه اندازه‌گیری شامل دو رقم بامعناست و آخرین رقم سمت راست، حدسی یا غیرقطعی است. به این ترتیب، نتیجه اندازه‌گیری به صورت زیر ثبت و گزارش می‌شود:

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

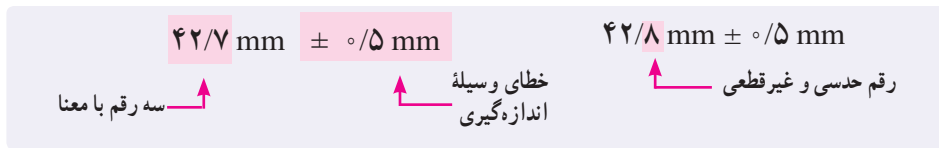
↑ دو رقم بامعنا
↑ خطای وسیله اندازه‌گیری
↑ رقم حدسی و غیرقطعی

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  $0.2^\circ\text{C}$  و دقت آن  $0.1^\circ\text{C}$  است.

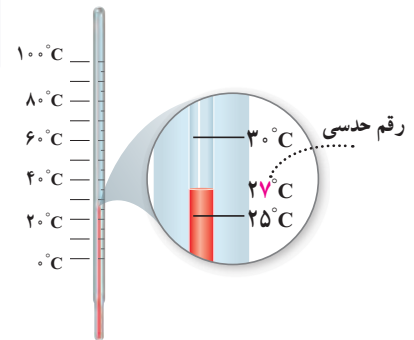
خطای اندازه‌گیری در ابزارهای رقمی، برابر مثبت و منفی دقت آن ابزار است. به این ترتیب نتیجه اندازه‌گیری دما توسط دماسنج شکل بالا را باید به صورت زیر گزارش کنیم:

$(31.2 \pm 0.1)^\circ\text{C}$

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



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

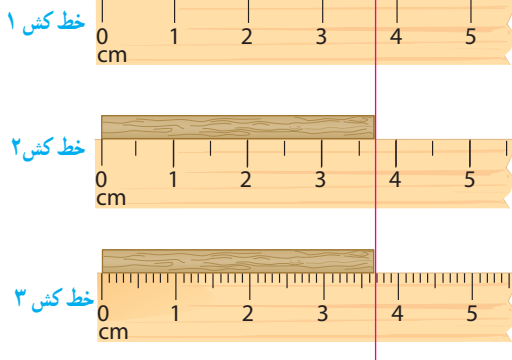


شکل ۱-۱۲ اندازه‌گیری دما با دماسنج

## مثال ۱-۲

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

پاسخ:



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

**خط‌کش ۲:** کمیته درجه‌بندی این خط‌کش، برابر  $0/5 \text{ cm}$  و در نتیجه دقت آن نیز برابر  $0/5 \text{ cm}$  است. مطابق قاعده‌ای که اشاره

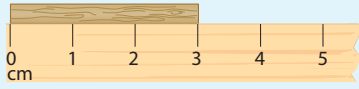
کردیم، خطای اندازه‌گیری توسط این خط‌کش به صورت  $\pm 0/25 \text{ cm}$  بیان می‌شود که باید به صورت  $\pm 0/3 \text{ cm}$  گرد شود. بنابراین می‌توان نتیجه اندازه‌گیری توسط این خط‌کش را  $3/7 \text{ cm} \pm 0/3 \text{ cm}$  بیان کرد. اگر نتیجه اندازه‌گیری را به صورت  $3/7 \text{ cm} \pm 0/25 \text{ cm}$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

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

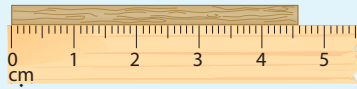


تمرین ۴-۱

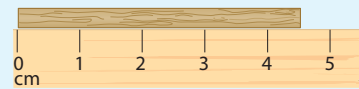
۱- در هر یک از شکل‌های (الف) تا (پ)، طول جسم را چقدر گزارش می‌کنید؟ در گزارش خود، هم عدد غیرقطعی و هم خطای وسیله را مشخص کنید.



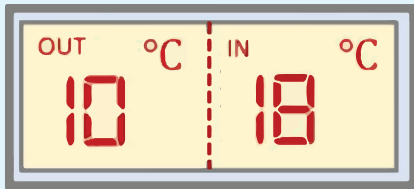
(ب)



(ب)



(الف)



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

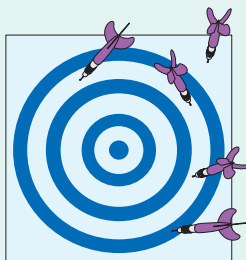
۳- نتیجه اندازه‌گیری توسط دماسنج شکل ۱-۱۲ را به همراه خطای آن بنویسید.

فعالیت ۴-۱

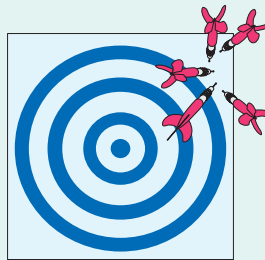
الف) آزمایشی طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان جرم و حجم یک قطره آب را اندازه‌گیری کرد.  
 ب) تکه‌ای سیم لاک‌پلاستیکی یا نخ قرقره به طول تقریبی یک متر تهیه کنید. آزمایشی طراحی و اجرا کنید که به کمک یک خط‌کش میلی‌متری بتوان قطر این سیم یا نخ را اندازه‌گیری کرد.

خوب است بدانید

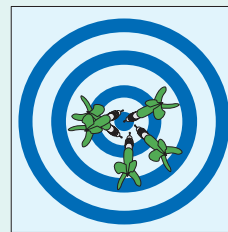
**تفاوت دقت و درستی:** دقت همواره به معنای صحت و درستی نیست. برای مثال، یک ساعت رقمی معمولی که  $17:35:10$  را نشان می‌دهد بسیار دقیق است (زمان را تا ثانیه اعلام می‌کند)، ولی اگر این ساعت چند دقیقه آهسته کار کند، دیگر مقداری که نشان می‌دهد درست نیست. از سوی دیگر، یک ساعت قدیمی دیواری ممکن است زمان صحیح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



(ب)



(ب)



(الف)

## ۶-۱ تخمین مرتبه بزرگی در فیزیک

آیا تاکنون از خود پرسیده‌اید که چگونه می‌توان تعداد کهکشان‌ها و ستارگان کیهان، جرم آب اقیانوس‌ها، جرم جو زمین، یا تعداد درختان روی زمین را برآورد کرد؟ یا چگونه می‌توان تعداد ضربان‌هایی را برآورد کرد که قلب یک شخص در طول عمرش می‌زند؟ یا تعداد موهای سر یک شخص را چگونه می‌توان تخمین زد؟ یا چگونه می‌توان تعداد اتم‌های اکسیژن در بدن یک فرد  $60$  کیلوگرمی را برآورد کرد؟

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

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

نوعی از تخمین که در فیزیک کاربرد زیادی دارد، برآورد یا تخمین مرتبه بزرگی نامیده می‌شود. عبارت مرتبه بزرگی، اغلب برای ارجاع به توان‌های  $10^0$  به کار می‌رود، زیرا نتیجه نیز به صورت توانی از  $10^0$  بیان می‌شود. لازم است توجه شود که در حل مسئله‌ها به روش تخمین مرتبه بزرگی، برخی اوقات ممکن است مرتبه بزرگی پاسخ، با پاسخ واقعی مسئله، یک یا دو مرتبه بزرگی متفاوت باشد. در تخمین مرتبه بزرگی، ابتدا همه اعداد به صورت نمادگذاری علمی ( $x \times 10^n$ ) نوشته می‌شوند و آنگاه از قاعده زیر استفاده می‌کنیم:

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

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

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

این عدد کوچک‌تر از  $5$  است و به صورت  $10^{-4}$  گرد می‌شود.

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

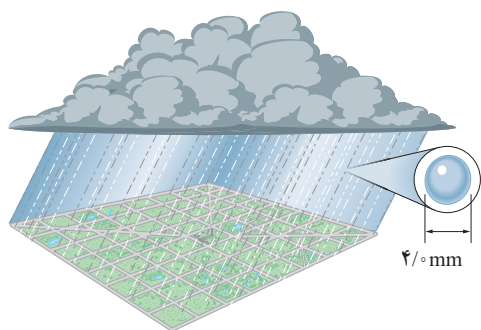
این عدد بزرگ‌تر از  $5$  است و به صورت  $10^5$  گرد می‌شود.

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

این عدد کوچک‌تر از  $5$  است و به صورت  $10^2$  گرد می‌شود.

## مثال ۱-۳

شهر رشت با مساحتی حدود  $18$  کیلومتر مربع در زمینی مسطح و هموار در شمال ایران واقع است. در یک روز طوفانی حدود  $1\%$  میلی‌متر باران در این شهر باریده است. مرتبه بزرگی تعداد قطره‌های باران را در این روز طوفانی تخمین بزنید.



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

به این ترتیب داریم:

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

$$d = 4/0 \text{ mm} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

به این ترتیب حجم باران باریده شده برابر است با:

$$V_1 = Ad \sim (10^8 \text{ m}^2)(4 \times 10^{-3} \text{ m}) = 4 \times 10^5 \text{ m}^3$$

اگر هر قطره باران را به صورت کُرهای به قطر  $4/0 \text{ mm}$  فرض کنیم (شکل

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

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (2/0 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \sim 10^{-8} \text{ m}^3$$

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

$$\frac{V_1}{V_2} \sim \frac{4 \times 10^5 \text{ m}^3}{10^{-8} \text{ m}^3} = 4 \times 10^{13}$$

#### مثال ۴-۱

مرتبه بزرگی حجم خونی را که قلب یک نفر در طول عمرش به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند، برحسب لیتر تخمین بزنید. قلب در هر ضربان (beat) به طور میانگین  $70 \text{ cm}^3$  خون به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند.

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

• با توجه به جدول ۴-۱، قلب یک شخص سالم در هر  $1/8 \text{ s}$  یک بار خون را به سرخرگ آئورت پمپ می‌کند که با توجه به تخمین مرتبه بزرگی، مقدار آن را بر حسب توانی از  $10^0$  به صورت  $10^0 \text{ s}$  گرد می‌کنیم.

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

• هر لیتر (L) برابر با  $10^3 \text{ cm}^3$  است.

• از جدول ۴-۱ داریم هر سال تقریباً برابر  $3 \times 10^7$  ثانیه است. با توجه به تخمین مرتبه بزرگی و برحسب توانی از  $10^0$ ، یک سال را به صورت  $10^7$  ثانیه گرد می‌کنیم.

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

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

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

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

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

## مثال ۱-۵



جو زمین که ضخامت آن به مقیاس رسم نشده است.

اطراف کره زمین، لایه‌ای از هوا وجود دارد. به این لایه که از گازهای متفاوتی تشکیل شده است، جو زمین گفته می‌شود (شکل روبه‌رو). مرتبه بزرگی جرم جو زمین را تخمین بزنید. فشار جو را در تمام نقاط سطح زمین  $10^5$  فرض کنید.

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

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

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

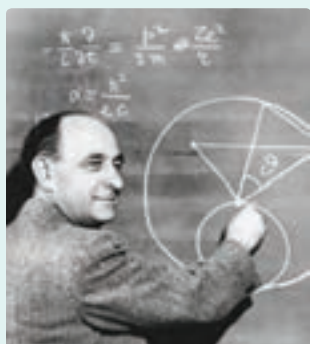
$$mg \sim 10^{20} \text{ N} \Rightarrow m \sim 10^{19} \text{ kg} \quad (\text{تخمین مرتبه بزرگی جرم کل جو زمین})$$

## تمرین ۱-۵

الف) مرتبه بزرگی حجم بخار بنزینی را که در هر شبانه روز وارد هوای شهر تهران می‌شود، بر حسب لیتر تخمین بزنید.  
ب) تحقیق کنید در کشورهای دوستدار محیط‌زیست، چه تدابیری می‌اندیشند تا این بخار، که برای محیط‌زیست و همچنین سلامتی انسان‌ها بسیار مضر است، وارد هوا نشود.

**راهنمایی:** برای به دست آوردن مرتبه بزرگی این تخمین، ابتدا باید راه‌هایی را مورد توجه قرار دهید که سبب تولید بخار بنزین و ورود آن به هوا می‌شود. یکی از راه‌های تولید بخار بنزین و ورود آن به هوا به صورت زیر است:  
وقتی بنزین خودرویی به تدریج مصرف می‌شود بالای بنزین درون باک، بخار بنزین تشکیل می‌شود. وقتی خودرو برای سوخت‌گیری دوباره به جایگاه پمپ بنزین می‌رود، با ورود بنزین به باک، بخار بنزین از آن خارج و به هوای بیرون رانده می‌شود.

## خوب است بدانید



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

۷-۱ چگالی

جدول ۱-۸ چگالی برخی مواد متداول

ماده	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	ماده	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )
یخ	$0.917 \times 10^3$	آب	$1.000 \times 10^3$
آلومینیم	$2.70 \times 10^3$	گلیسرین	$1.26 \times 10^3$
آهن	$7.86 \times 10^3$	اتیل الکل	$0.806 \times 10^3$
مس	$8.92 \times 10^3$	بنزن	$0.879 \times 10^3$
نقره	$10.5 \times 10^3$	جیوه	$13.6 \times 10^3$
سرب	$11.3 \times 10^3$	هوا	۱/۲۹
اورانیم	$19.1 \times 10^3$	هلیوم	$1.79 \times 10^{-1}$
طلا	$19.3 \times 10^3$	اکسیژن	۱/۴۳
پلاتین	$21.4 \times 10^3$	هیدروژن	$8.99 \times 10^{-2}$

داده‌های این جدول در دمای صفر درجه (°C) سلسیوس و فشار یک اتمسفر اندازه‌گیری و گزارش شده‌اند.

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

در علوم سال هفتم دیدید که اگر ماده همگنی دارای جرم  $m$  و حجم  $V$  باشد، چگالی  $\rho$  آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

یکای چگالی در SI کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m<sup>۳</sup>) است. در جدول ۱-۸ چگالی برخی مواد داده شده است.

تمرین ۱-۶

یکی دیگر از یکاهای متداول چگالی، گرم بر سانتی متر مکعب (g/cm<sup>۳</sup>) است. به روش تبدیل زنجیره‌ای نشان دهید:

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

پرسش ۱-۴

چگالی بنزین  $6/80 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$  است. توضیح دهید چرا آب مایع مناسبی برای خاموش کردن بنزین شعله‌ور نیست.

مثال ۱-۶

فلز آسمیم ( $\rho = 22/5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) یکی از چگال‌ترین مواد یافت شده روی زمین است. جرم قطعه‌ای از این ماده به حجم  $23/0 \text{ cm}^3$ ، چند کیلوگرم است؟

**پاسخ:** از رابطه ۱-۱ داریم:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V = (22/5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \times (23/0 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 0/518 \text{ kg}$$

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

تمرین ۱-۷

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

## تمرین ۱-۸

جرم و وزن تقریبی هوای درون کلاستان را پیدا کنید.

## فعالیت ۱-۵



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

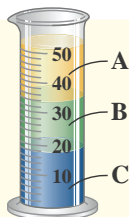
اگر پرتقال را بدون پوست درون ظرف محتوی آب بیندازیم دوباره پیش بینی کنید چه اتفاقی می افتد؟ آزمایش را مطابق شکل (ب) انجام دهید و نتیجه مشاهده خود را با توجه به مفهوم چگالی توضیح دهید. در آزمایش (الف) پرتقال جرم بیشتری دارد و اصطلاحاً سنگین تر است. آیا سنگین تر بودن یک جسم دلیلی بر فرو رفتن آن در آب است؟ توضیح دهید.

## فعالیت ۱-۶



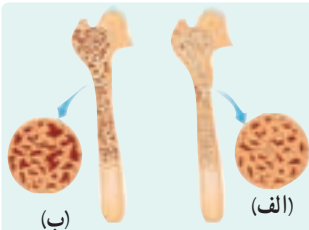
الف) جرم و حجم تعدادی جسم جامد را اندازه بگیرید. در صورتی که شکل جسم ها منظم باشد، ابعاد آنها را به کمک کولیس یا ریزسنج اندازه بگیرید. اگر جسم جامد شکل نامنظمی داشته باشد، از روشی که در شکل روبه رو نشان داده شده است حجم آن را اندازه بگیرید. ب) با استفاده از سرنگ مدرج بزرگ و ترازوی با دقت مناسب، چگالی برخی از مایع های در دسترس مانند شیر، روغن، مایع ظرفشویی و... را اندازه بگیرید. قبل و بعد از پرکردن سرنگ، جرم آن را اندازه بگیرید و به این روش جرم مایع را تعیین کنید.

## پرسش ۱-۵



سه مایع مخلوط نشدنی A، B و C که چگالی های متفاوتی دارند درون استوانه ای شیشه ای ریخته شده اند. این سه مایع عبارت اند از: گیوه (با چگالی  $13/6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )، روغن زیتون (با چگالی  $9/2 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ ) و آب (با چگالی  $1/0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) است. جنس هر یک از مایع های A، B و C درون استوانه را مشخص کنید.

## خوب است بدانید



کاهش چگالی استخوان که در پزشکی به نام پوکی استخوان شناخته می شود علت اصلی شکستگی های مفصل ران و لگن در بیشتر افراد مسن است. به همین دلیل تشخیص به موقع و پیشگیری از پیشرفت آن اهمیت زیادی دارد. چگالی سنجی استخوان یا چگالی سنجی روشی است که با استفاده از آن می توان میزان سختی استخوان های بدن را تعیین کرد.

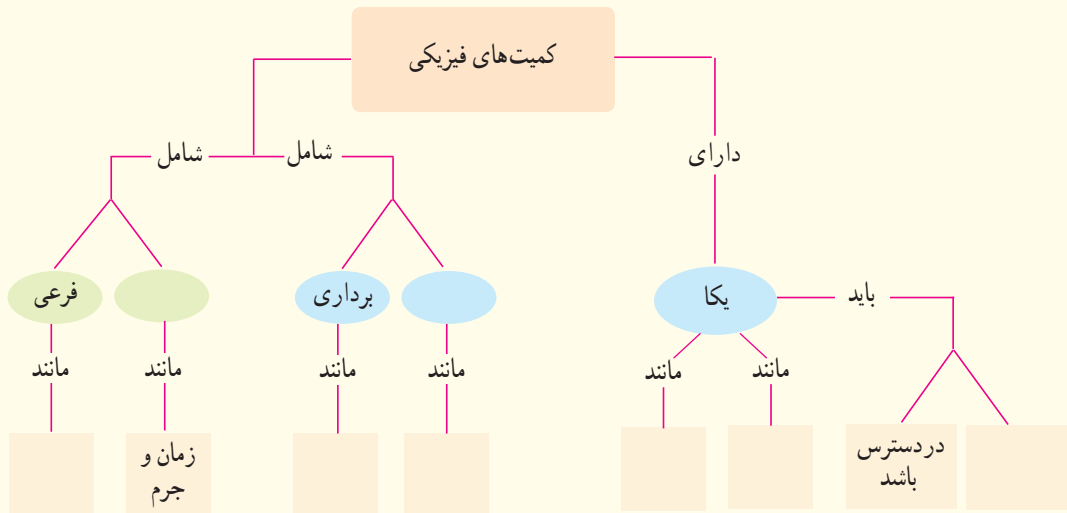
امروزه مشخص شده است که میزان فعالیت بدنی از دوران نوجوانی، مصرف کلسیم (که منبع آن لبنیات است) و عوامل وراثتی نقش مهمی در تراکم استخوان دارد. شکل (الف) استخوانی را در حالت طبیعی و شکل (ب) در حالتی که دچار کاهش چگالی و پوکی شده است نشان می دهد.

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

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

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

- ۳ نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



- ۴ سعی کنید با نگاه کردن، طول برخی از اجسامی را که در محیط اطرافتان هستند، بر حسب سانتی‌متر یا متر برآورد کنید. سپس طول آنها را با 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 گاليله در برخی از کارهایش از ضربان نبض خود به عنوان زمان‌سنج استفاده کرد. شما نیز چند پدیده تکرارشونده در طبیعت را نام ببرید که می‌توانند به عنوان ابزار اندازه‌گیری زمان به کار روند.



- ۷ الف) هر میکروقرن، تقریباً چند دقیقه است؟  
ب) یک میلیارد ثانیه دیگر، تقریباً چند سال پیرتر می‌شوید؟
- ۸ هکتار، از جمله یکاهای متداول مساحت است. هر هکتار برابر ۱۰ هزار متر مربع است.  
الف) اگر زمین را کره‌ای یکنواخت به شعاع ۶۴۰۰ کیلومتر در نظر بگیریم (شکل روبه‌رو)، مساحت آن چند هکتار است؟  
ب) تحقیق کنید مساحت کل سرزمین ایران، شامل خشکی و دریا، چند هکتار است؟ این مساحت چند درصد از مساحت کره زمین است؟

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



۱۰ سریع‌ترین رشد گیاه متعلق به گیاهی موسوم به هِسپروئوکا است که در مدت ۱۴ روز،  $\frac{3}{7}$  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 به طوری که  $1\text{ ft} = 12\text{ in}$  است. ارتفاع هواپیمایی را که در فاصله ۳۰۰۰۰ پا از سطح آزاد دریاها در حال پرواز است برحسب متر به دست آورید. هر اینچ  $\frac{2}{54}$  سانتی‌متر است.



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

۱۳ تندی شناورها در دریا بر حسب یکایی به نام گره بیان می‌شود. هر گره دریایی برابر  $\frac{1}{5144}$  متر بر ثانیه است. تاریخچه گره دریایی به حدود ۴۰۰ سال پیش باز می‌گردد، زمانی که ملوانان تندی متوسط کشتی خود را با استفاده از وسیله‌ای به نام تندی‌سنج شناور اندازه می‌گرفتند. این وسیله، شامل طنابی بود که در فواصل مساوی، گره‌ای روی آن زده شده بود. در حین کشیده شدن طناب به دریا، تعداد گره‌های رد شده از دست ملوان در یک زمان معین شمرده می‌شد و تندی متوسط کشتی را به دست می‌آوردند. پس از آن، ملوان‌ها از واژه «گره» برای بیان تندی متوسط کشتی استفاده می‌کنند.

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

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



۱- هر مایل در خشکی ۱۶۰۹ متر است.

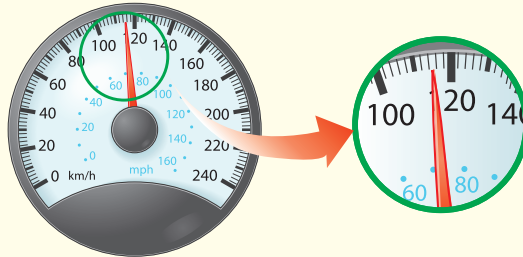




۱۴ ذرع و فرسنگ از جمله یکاهای قدیمی ایرانی برای طول است. هر ذرع ۱۰۴ سانتی متر و هر فرسنگ ۶۰۰۰ ذرع است. قشم، بزرگ‌ترین جزیرهٔ خلیج فارس است که مساحت آن از بیش از بیست کشور جهان بزرگ‌تر است. طول این جزیره حدود ۱۲۰ کیلومتر برآورد شده است. این طول را بر حسب ذرع و فرسنگ بیان کنید.

### ۵- اندازه‌گیری: خطا و دقت

۱۵ شکل زیر، صفحهٔ تندی سنج<sup>۱</sup> یک خودرو را نشان می‌دهد. تندی خودرو چند کیلومتر بر ساعت است؟ رقم غیرقطعی و خطای تندی سنج را در گزارش مشخص کنید.



۱۶ 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 به دو صورت مدرج و رقمی (دیجیتال) ساخته می‌شوند. در درس آزمایشگاه علوم، با نحوهٔ کار کولیس و ریزسنج مدرج و ثبت نتیجهٔ اندازه‌گیری (شامل دقت ابزار و خطای آن) توسط آنها آشنا خواهید شد. شکل‌های (الف) و (ب)، به ترتیب یک ریزسنج و یک کولیس رقمی را نشان می‌دهد. رقم غیرقطعی و خطای هر یک از این وسیله‌ها را مشخص کنید.



(ب)



(الف)

### ۶- 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.

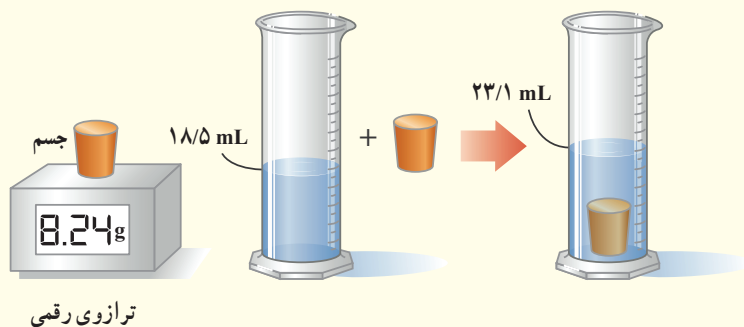
## ۲-۱ چگالی

۱۹ الف) قطعه‌ای فلزی به شما داده شده است و ادعا می‌شود که از طلای خالص ساخته شده است. چگونه می‌توانید درستی این ادعا را بررسی کنید؟

ب) بزرگ‌ترین شمش طلا با حجم  $10^4 \text{ cm}^3 \times 1/573$  و جرم  $250 \text{ kg}$  توسط یک شرکت ژاپنی ساخته شده است (شکل زیر). چگالی این شمش طلا را به دست آورید.  
پ) نتیجه به دست آمده در قسمت (ب) را با چگالی طلا در جدول ۱-۸ مقایسه کنید و دلیل تفاوت این دو عدد را بیان کنید.



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



ترازوی رقمی

۲۱ الف) ستاره‌های کوتوله سفید بسیار چگال هستند و چگالی آنها در SI حدود  $10^9$  میلیون است. اگر شما یک قوطی کبریت از ماده تشکیل دهنده این ستاره‌ها در اختیار داشتید، جرم آن چند کیلوگرم می‌شد؟ ابعاد و حجم قوطی کبریت را خودتان تخمین بزنید!  
ب) اگر جمعیت کره زمین ۷ میلیارد نفر، جرم میانگین هر نفر  $60 \text{ kg}$  و ماده تشکیل دهنده انسان‌ها از جنس ستاره‌های کوتوله سفید فرض شود (فرضی ناممکن!)، ابعاد یک اتاق چقدر باشد تا همه انسان‌ها در آن جای گیرند؟



خانم زهرا نعمتی، نخستین بانوی ایرانی برنده نشان طلا از مسابقات جهانی پارالمپیک (۲۰۱۲ لندن و ۲۰۱۶ ریو). به نظر شما این قهرمان جهان، چقدر انرژی صرف کشیدن کمان می‌کند؟ مقدار این انرژی و تندی تیری را که از کمان رها می‌شود چگونه می‌توان حساب کرد؟

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

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

## ۱-۲ انرژی جنبشی

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

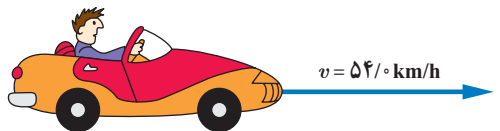
$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-2)$$



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

یکاهای SI جرم و تندی به ترتیب کیلوگرم (kg) و متربرثانیه (m/s) است. بنابراین، یکای SI انرژی جنبشی (و هر نوع دیگری از انرژی)  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  است که به افتخار جیمز ژول، فیزیک‌دان انگلیسی، ژول (J) نامیده می‌شود. انرژی جنبشی کمیته نرده‌ای و همواره مثبت است؛ این کمیت تنها به جرم و تندی جسم بستگی دارد و به جهت حرکت جسم وابسته نیست.

## مثال ۱-۲



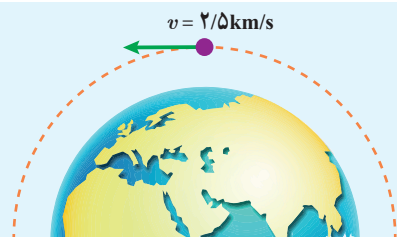
جرم خودرویی به همراه راننده‌اش  $840 \text{ kg}$  است. این خودرو با تندی  $54 \text{ km/h}$  در حرکت است، انرژی جنبشی آن چند ژول است؟  
پاسخ: با توجه به اطلاعات داده شده داریم:

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

با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۱-۲ داریم:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(840 \text{ kg})(15 \text{ m/s})^2 = 9.45 \times 10^4 \text{ J}$$

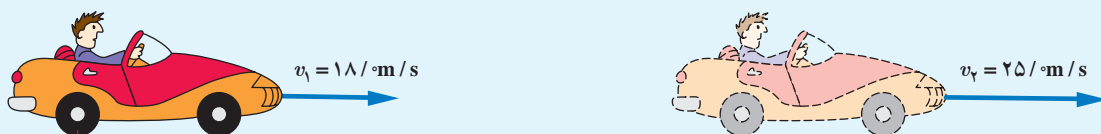
## تمرین ۱-۲



ماهواره‌ای به جرم  $220 \text{ kg}$ ، با تندی ثابت  $2.5 \text{ km/s}$  دور زمین می‌چرخد. انرژی جنبشی ماهواره را برحسب ژول و مگاژول حساب کنید.

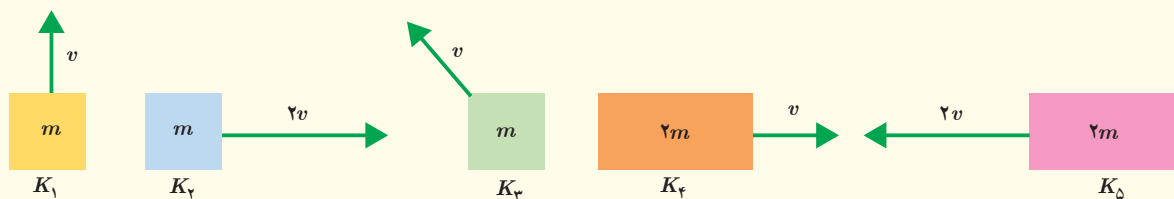
## تمرین ۲-۲

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



۱- همان‌طور که از علوم نهم به یاد دارید برای سادگی، تندی لحظه‌ای را به اختصار تندی می‌نامیم.

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



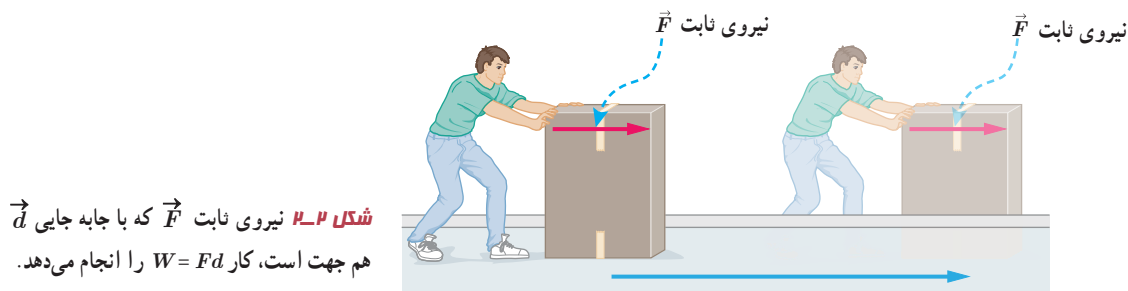
لایب‌نیس (۱۷۱۶-۱۶۴۶م)

لایب نیس فیلسوف و ریاضی دان آلمانی نخستین دانشمندی بود که به اهمیت انرژی جنبشی در فیزیک پی برد. لایب نیس استدلال می کرد که در طبیعت حاصل ضرب جرم در مربع تندی پایسته است. وی نام این مفهوم جدید را نیروی زنده نامید. سال ها پیش از لایب نیس، رنه دکارت (۱۶۵۰-۱۵۹۶م)، فیلسوف، ریاضی دان و فیزیک دان فرانسوی ادعا کرده بود حاصل ضرب جرم در سرعت که امروزه تکانه نامیده می شود، در طبیعت کمیتی پایسته است.

معرفی واژه انرژی به جای اصطلاح نیروی زنده را به توماس یانگ (۱۸۲۹-۱۷۷۳م) فیزیک دان انگلیسی نسبت داده اند، هر چند از اصطلاح جدید وی در ابتدا چندان استقبال نشد. او در کتابی که در سال ۱۸۰۷ میلادی به چاپ رساند، پیشنهاد کرد که به منظور تمایز بهتر میان مفاهیم نیرو و انرژی، به جای نیروی زنده از واژه انرژی استفاده شود. در سال ۱۸۶۷ میلادی، لرد کیلین و پیتر تیت دو فیزیک دان اسکاتلندی در جلد اول رساله فلسفه طبیعی، اصطلاح امروزی انرژی جنبشی را برای انرژی جسم در حال حرکت به کار بردند و ضریب یک دوم را هم که لایب نیس در نظر نگرفته بود، وارد کردند.

۲-۲ کار انجام شده توسط نیروی ثابت

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



جسم در جهت نیرو، به اندازه  $d$  جابه جا شده است.

$$W = Fd$$

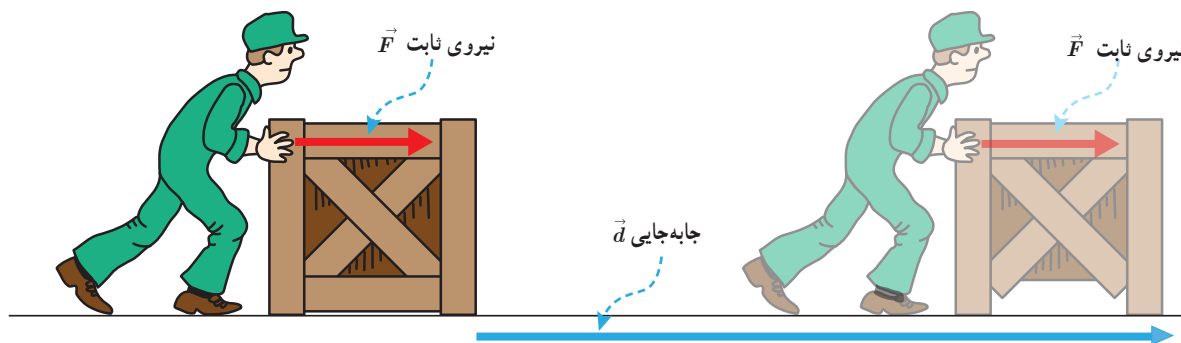
(۲-۲)

۱ - vis viva (living force)

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

## مثال ۲-۲

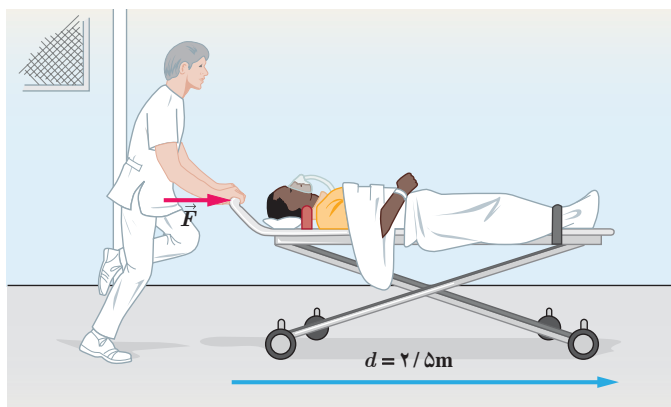
شکل زیر کارگری را در حال هل دادن جعبه‌ای با نیروی ثابت  $250\text{ N}$  نشان می‌دهد. اگر جعبه  $14\text{ m}$  در امتداد نیرو جابه‌جا شود، کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟



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

$$W = Fd = (250\text{ N})(14\text{ m}) = 3.5 \times 10^3\text{ J}$$

## مثال ۳-۲



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

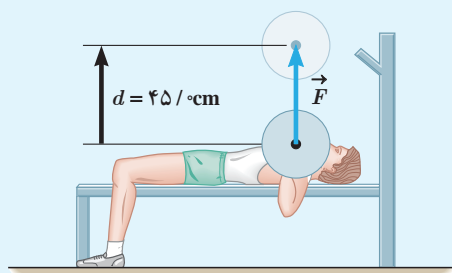
(الف) اندازه نیروی  $\vec{F}$  چقدر است؟  
(ب) اگر تخت  $1.0\text{ m}$  در جهت این نیرو جابه‌جا شود، کار انجام شده توسط نیروی  $\vec{F}$  را حساب کنید.

**پاسخ:** (الف) جرم کل بیمار و تخت برابر  $87\text{ kg}$  است. با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

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

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

$$W = Fd = (52\text{ N})(1.0\text{ m}) = 5.2 \times 10^1\text{ J}$$



ورزشکاری وزنه‌ای به جرم  $65\text{kg}$  را به طور یکنواخت،  $45\text{cm}$  بالای سر خود می‌برد (شکل روبه‌رو). کاری که این ورزشکار روی وزنه انجام داده است را محاسبه کنید. اندازه شتاب گرانش زمین را  $g = 9.8\text{N/kg}$  بگیرید.

### مهارت‌های ریاضی (یادآوری از ریاضی سال‌های هشتم و نهم)

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

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

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

همچنین در ریاضی سال نهم دیدید که در یک مثلث قائم الزاویه، مانند مثلث  $OAB$  در شکل بالا، توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس را برای زاویه‌ای مانند

$\theta$  به صورت زیر تعریف می‌کنند:

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

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

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

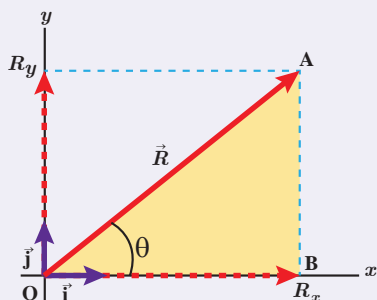
به این ترتیب، مؤلفه‌های بردار  $\vec{R}$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

با جایگذاری رابطه‌های (۳) در رابطه (۱) می‌توان یک بردار را بر حسب توابع

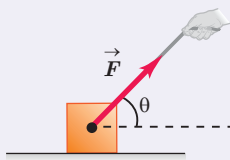
مثلثاتی سینوس و کسینوس نوشت. به این ترتیب داریم:

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



مقادیر سینوس و کسینوس به ازای چند زاویهٔ پرکاربرد

$\theta$	$\sin \theta$	$\cos \theta$
$0^\circ$	0	1
$30^\circ$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
$45^\circ$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
$60^\circ$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$
$90^\circ$	1	0
$180^\circ$	0	-1



برای مثال وقتی جسمی را مطابق شکل روبه‌رو با نیروی  $\vec{F}$  می‌کشیم، مؤلفهٔ افقی این نیرو  $F \cos \theta$  و مؤلفهٔ قائم آن  $F \sin \theta$  است که در آن اندازهٔ نیروی  $\vec{F}$  است.

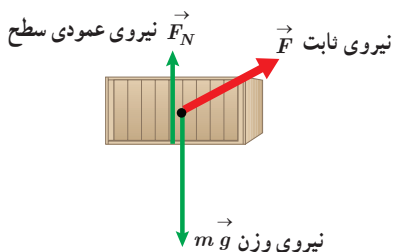
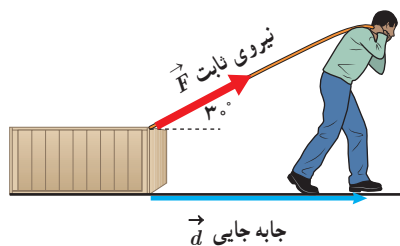
همان‌طور که تا اینجا دیدید، تعریف کار بر اساس رابطه ۲-۲ تنها برای حل مسئله‌هایی به کار می‌رود که نیرو و جابه‌جایی در یک جهت باشند. اگر مطابق شکل ۳-۲ نیروی وارد شده به جسم با جابه‌جایی زاویه  $\theta$  بسازد، در این حالت نیروی  $\vec{F}$  دارای دو مؤلفه است؛ یکی موازی با جابه‌جایی و دیگری عمود بر آن. 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = (F \cos \theta) d \quad (۳-۲)$$



**شکل ۳-۲** نیروی ثابت  $\vec{F}$  با جابه‌جایی  $\vec{d}$  زاویه  $\theta$  می‌سازد و کار  $W = (F \cos \theta) d$  را روی جسم انجام می‌دهد.

### مثال ۲-۴



شکل روبه‌رو شخصی را نشان می‌دهد که جعبه‌ای را با نیروی ثابت  $200\text{ N}$  روی سطحی هموار و با اصطکاک ناچیز، به اندازه  $10\text{ m}$  جابه‌جا می‌کند.

الف) کار انجام شده توسط این نیرو چقدر است؟

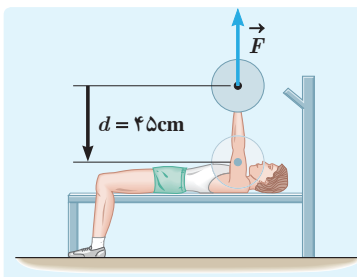
ب) نیروهای دیگری را که بر جسم وارد می‌شود مشخص کنید. کاری را که هر کدام از این نیروها روی جسم انجام می‌دهند حساب کنید.

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

$$W = (F \cos \theta) d = (200\text{ N} \times \frac{\sqrt{3}}{2})(10\text{ m}) = 1732\text{ J}$$

ب) نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر جابه‌جایی عمودند (شکل روبه‌رو) و کاری روی جسم انجام نمی‌دهند. (توجه کنید که:  $\cos 90^\circ = 0$ )

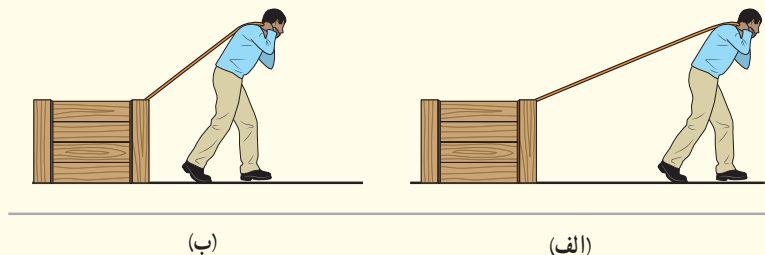
### تمرین ۲-۴



تمرین ۳-۲ 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 روبه‌رو). توضیح دهید که در این دو حالت، چه تفاوتی بین مقادیر به دست آمده برای کار انجام شده توسط ورزشکار وجود دارد.



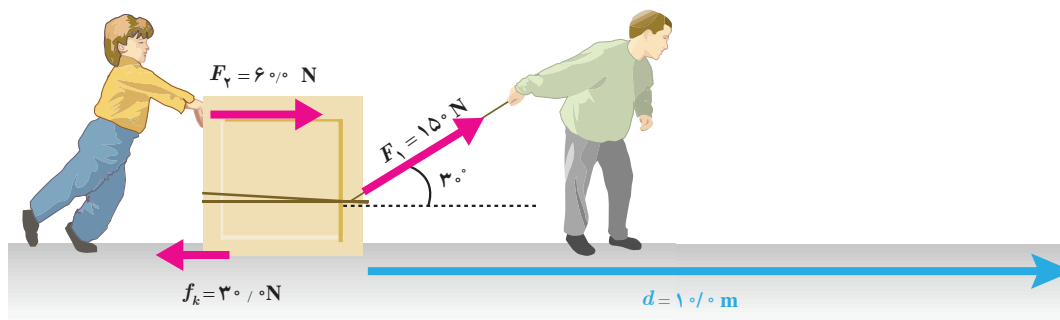
شخصی جسمی را یک بار با طنابی بلند (شکل الف) و بار دیگر با طنابی کوتاه‌تر (شکل ب) روی سطحی هموار می‌کشد. اگر جابه‌جایی و کاری که این شخص در هر دو بار روی جعبه انجام می‌دهد یکسان باشد، توضیح دهید در کدام حالت، شخص نیروی بزرگ‌تری وارد کرده است. اصطکاک را در هر دو حالت، ناچیز فرض کنید.



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

مثال ۲-۵

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



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

## پاسخ:

در شکل زیر نیروهایی که در امتداد جابه‌جایی بر جسم وارد می‌شود نشان داده شده است. کار انجام شده توسط هر نیرو را به طور جداگانه محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه کار نیروی  $F_1$ ، اطلاعات داده شده و  $\cos \theta = \cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$  را در رابطه ۲-۳ جایگذاری می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

$$W_1 = (F_1 \cos \theta)d = (150 \text{ N} \times \sqrt{3}/2)(10 \text{ m}) = 1/30 \times 10^3 \text{ J}$$

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

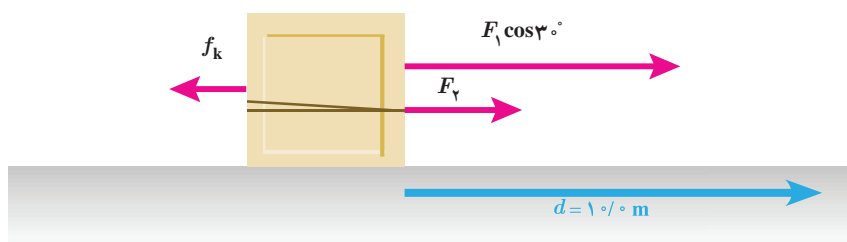
$$W_2 = F_2 d = (60 \text{ N})(10 \text{ m}) = 600 \text{ J}$$

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

$$W_3 = (f_k \cos \theta)d = (30 \text{ N} \times (-1))(10 \text{ m}) = -300 \text{ J}$$

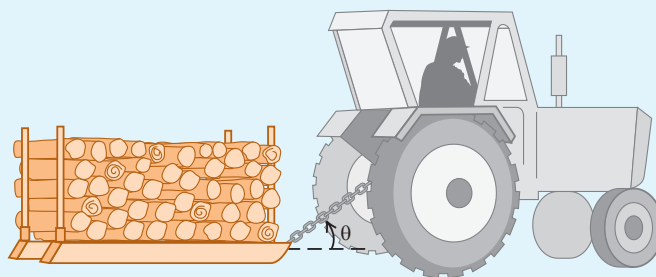
همان‌طور که گفتیم کار کل ( $W_t$ ) انجام شده با جمع جبری مقدار کار انجام شده توسط تک تک نیروها برابر است. توجه کنید که کار نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه صفر است. به این ترتیب داریم:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = 1/30 \times 10^3 \text{ J} + 600 \text{ J} + (-300 \text{ J}) = 1/60 \times 10^3 \text{ J}$$

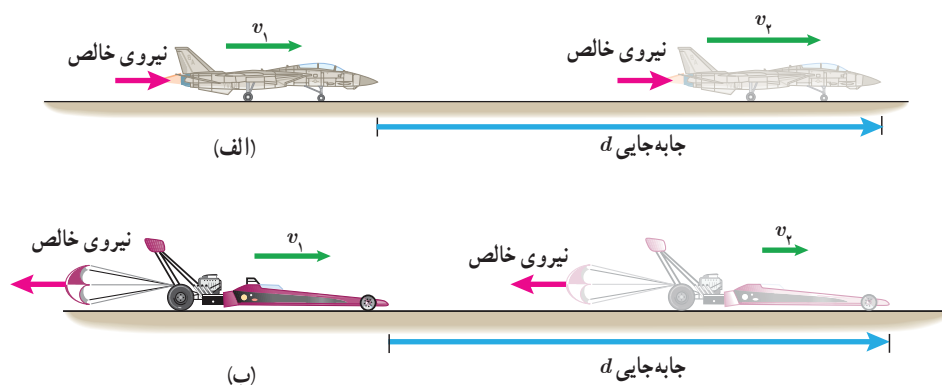


## تمرین ۲-۵

کشاورزی توسط تراکتور، سورت‌های پراز هیزم را در راستای یک زمین هموار به اندازه  $20 \text{ m}$  جابه‌جا می‌کند (شکل زیر). وزن کل سورت‌ها و بار آن  $mg = 15000 \text{ N}$  است. تراکتور نیروی ثابت  $F_1 = 5500 \text{ N}$  را در زاویه  $\theta = 45^\circ$  بالای افق به سورت‌ها وارد می‌کند. نیروی اصطکاک جنبشی  $f_k = 3500 \text{ N}$  است که برخلاف جهت حرکت به سورت‌ها وارد می‌شود. کار کل انجام شده روی سورت‌ها را به دو روش محاسبه کنید.



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



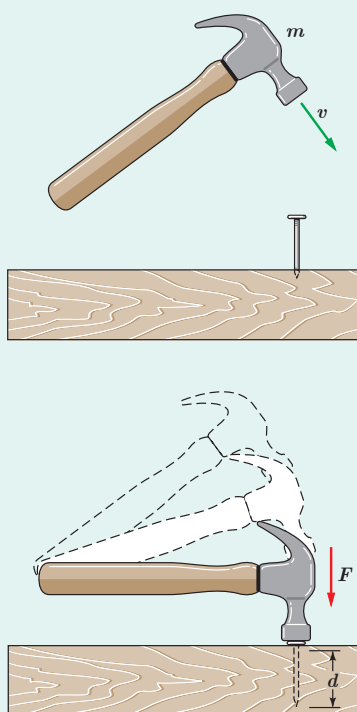
**شکل ۲-۴ الف** کار مثبت روی هواپیما انجام شده و انرژی جنبشی آن افزایش یافته است. **ب** کار منفی روی خودرو انجام شده و انرژی جنبشی آن کاهش یافته است.

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

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

هنگامی که  $W_i > 0$  است انرژی جنبشی جسم افزایش می‌یابد (انرژی جنبشی پایانی بزرگ‌تر از انرژی جنبشی آغازی  $K_1$  است) و جسم در پایان جابه‌جایی تندتر از آغاز آن حرکت می‌کند. هنگامی که  $W_i < 0$  است، انرژی جنبشی جسم کاهش می‌یابد ( $K_2 < K_1$ ) و تندی آن پس از جابه‌جایی کمتر است. هنگامی که  $W_i = 0$  است انرژی جنبشی جسم در دو نقطه آغازی و پایانی یکسان ( $K_2 = K_1$ ) و تندی آن نیز در این دو نقطه برابر است. توجه کنید که قضیه کار-انرژی جنبشی نه تنها برای حرکت یک جسم روی مسیری مستقیم معتبر است، بلکه اگر جسم روی هر مسیر خمیده‌ای نیز حرکت کند، می‌توان از آن استفاده کرد (تمرین ۲-۷ را ببینید).

۱- اثبات این قضیه جزء اهداف برنامه درسی این کتاب نیست.



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

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

## مثال ۲-۶



توپ فوتبالی به جرم  $450\text{ g}$  از نقطه پناستی با تندی  $20\text{ m/s}$  به طرف دروازه شوت می‌شود (شکل روبه‌رو). توپ با تندی  $18\text{ m/s}$  به دستان دروازه‌بان برخورد می‌کند. کار کل انجام شده روی توپ را که سبب کاهش تندی آن شده است محاسبه کنید.

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

$$K_i = \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}(0.45\text{ kg})(20\text{ m/s})^2 = 90\text{ J}$$

$$K_f = \frac{1}{2}mv_f^2 = \frac{1}{2}(0.45\text{ kg})(18\text{ m/s})^2 = 72\text{ J}$$

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

$$W_t = K_f - K_i = 72\text{ J} - 90\text{ J} = -18\text{ J}$$

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



چتربازی به جرم کل  $750 \text{ kg}$ ، از بالونی که در ارتفاع  $800 \text{ m}$  از سطح زمین است، با تندی  $1/20 \text{ m/s}$  به بیرون بالون می‌پرد. اگر او با تندی  $4/80 \text{ m/s}$  به زمین برسد، کار نیروی مقاومت هوا روی چترباز را در طول مسیر سقوط محاسبه کنید. شتاب گرانش زمین را  $9/80 \text{ m/s}^2$  بگیرید.

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

$$K_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}(750 \text{ kg})(1/20 \text{ m/s})^2 = 54 \text{ J}$$

$$K_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}(750 \text{ kg})(4/80 \text{ m/s})^2 = 864 \text{ J}$$

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

$$W_t = K_2 - K_1 \Rightarrow W_{\text{وزن}} + W_{\text{مقاومت هوا}} = 864 \text{ J} - 54 \text{ J} = 810 \times 10^2 \text{ J}$$

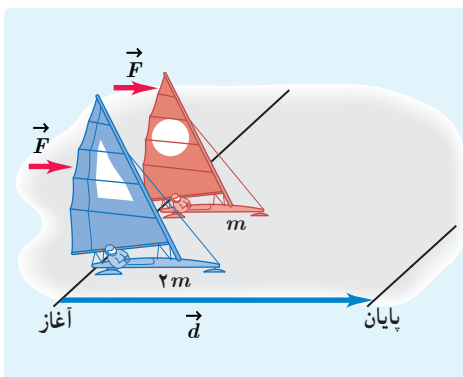
با پیدا کردن کار نیروی وزن ( $mg$ ) و جایگذاری آن در عبارت بالا، کار نیروی مقاومت هوا را به دست می‌آوریم. از رابطه ۲-۲ داریم:

$$W_{\text{وزن}} = mgd = (750 \text{ kg})(9/80 \text{ m/s}^2)(800 \text{ m}) = 5880 \times 10^2 \text{ J}$$

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

$$5880 \times 10^2 \text{ J} + W_{\text{مقاومت هوا}} = 810 \times 10^2 \text{ J} \Rightarrow W_{\text{مقاومت هوا}} = -5870 \times 10^2 \text{ J}$$

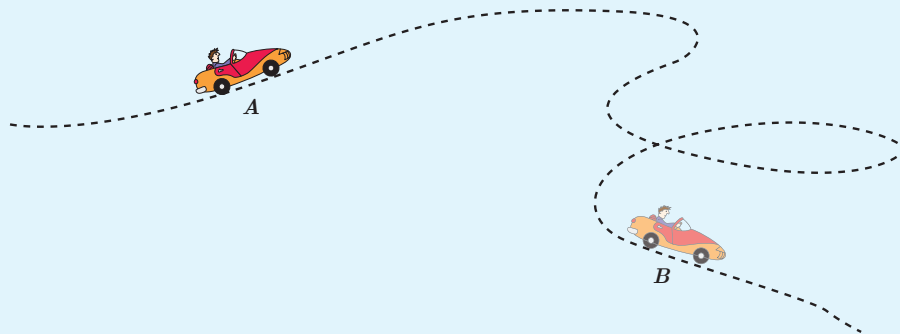
توجه کنید برای اینکه چترباز به طور ایمن و با تندی نسبتاً کمی به زمین برسد، کار نیروی مقاومت هوا اثر کار نیروی وزن را تقریباً خنثی کرده است.



دو قایق بادبانی مخصوص حرکت روی سطوح یخ‌زده، دارای جرم‌های  $m$  و  $2m$ ، روی دریاچه افقی و بدون اصطکاک قرار دارند و نیروی ثابت و یکسان  $\vec{F}$  با وزیدن باد به هر دو وارد می‌شود (شکل روبه‌رو). هر دو قایق از حال سکون شروع به حرکت می‌کنند و از خط پایان به فاصله  $d$  می‌گذرند. انرژی جنبشی و تندی قایق‌ها را درست پس از عبور از خط پایان، با هم مقایسه کنید.

## تمرین ۲-۷

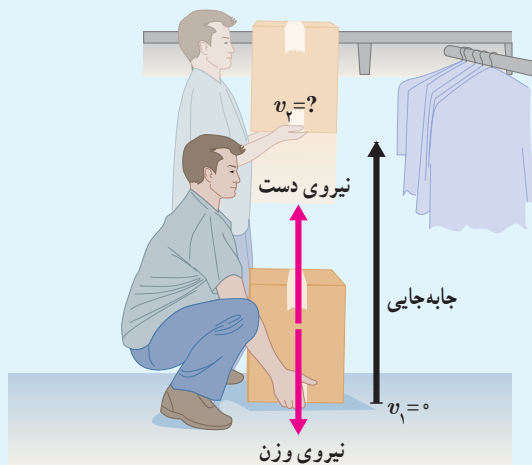
جرم یک خودروی الکتریکی به همراه راننده اش  $840 \text{ kg}$  است. وقتی این خودرو از موقعیت  $A$  به موقعیت  $B$  می‌رود، کار کل انجام شده روی خودرو  $73500 \text{ J}$  است. اگر تندی خودرو در موقعیت  $A$  برابر  $54 \text{ km/h}$  باشد، تندی آن در موقعیت  $B$  چند متر بر ثانیه است؟



## تمرین ۲-۸

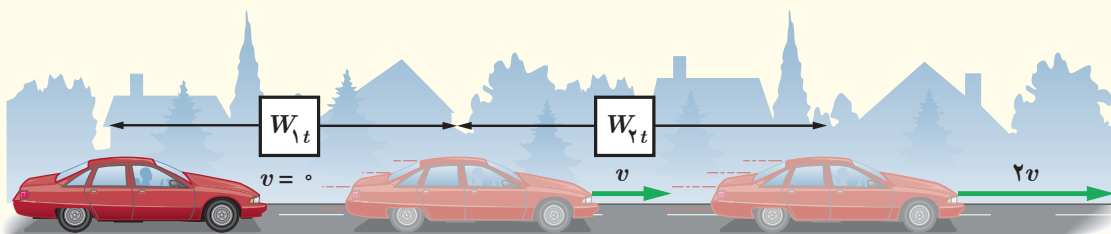
شکل روبه رو شخصی را نشان می‌دهد که با وارد کردن نیروی ثابت  $150 \text{ N}$ ، جعبه ای به جرم  $10 \text{ kg}$  را از حال سکون در امتداد قائم جابه جا می‌کند.

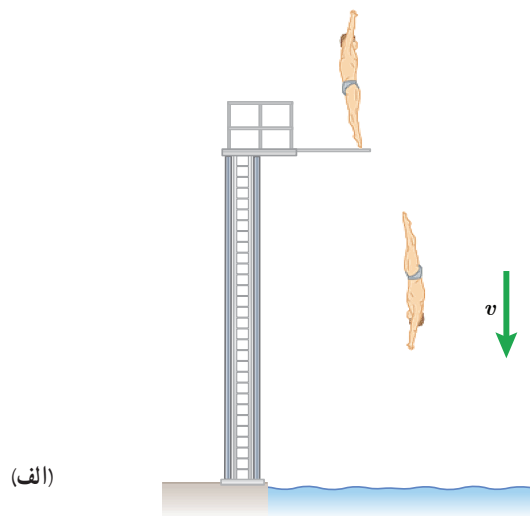
الف) کار انجام شده توسط شخص و کار انجام شده توسط نیروی وزن را روی جعبه در ارتفاع  $1/5 \text{ m}$  به طور جداگانه حساب کنید.  
ب) کار کل انجام شده روی جعبه تا ارتفاع  $1/5 \text{ m}$  چقدر است؟  
پ) با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی، تندی نهایی جعبه را در ارتفاع  $1/5 \text{ m}$  حساب کنید.



## پرسش ۲-۳

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

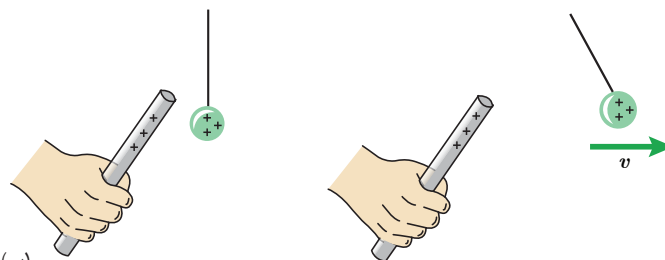




(الف)



(ب)



(پ)

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

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

### خوب است بدانید

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

## انرژی پتانسیل گرانشی

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

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

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

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

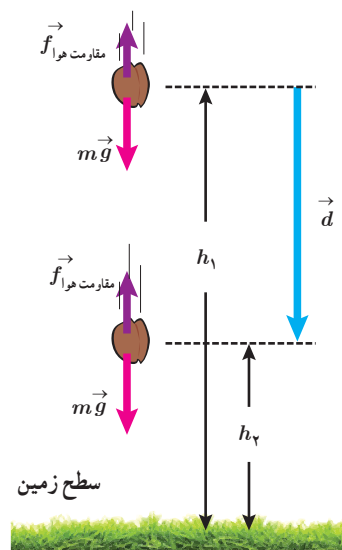
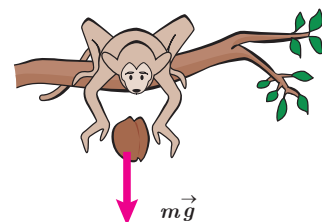
به این ترتیب، کار نیروی وزن را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

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



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

## تمرین ۹-۲

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



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

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

کمیتی که در فیزیک اهمیت دارد تغییر انرژی پتانسیل گرانشی ( $\Delta U$ ) بین دو نقطه است نه مقدار  $U$  در یک نقطه 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 ۲-۸

شکل زیر، کوه نوردی به جرم  $72 \text{ kg}$  را نشان می‌دهد که در حال صعود به قله زردکوه بختیاری به ارتفاع  $4200 \text{ m}$  از سطح آزاد دریاست. تغییر انرژی پتانسیل گرانشی کوه نورد در  $1200$  متری پایان ارتفاع صعود چقدر است؟ مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را (الف) سطح دریا و (ب) قله کوه بگیرید. ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )

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



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

$$h_1 = 3000 \text{ m} \quad \text{و} \quad h_2 = 4200 \text{ m}$$

$$\Delta U = mg(h_2 - h_1) = (72 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(4200 \text{ m} - 3000 \text{ m}) \approx 1.1 \times 10^5 \text{ J}$$

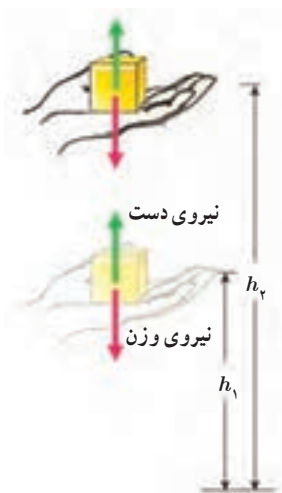
حال اگر مطابق فرض (ب)، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در قله کوه فرض کنیم، خواهیم داشت:

$$h_1 = -1200 \text{ m} \quad \text{و} \quad h_2 = 0$$

$$\Delta U = mg(h_2 - h_1) = (72 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)[0 - (-1200 \text{ m})] \approx 1.1 \times 10^5 \text{ J}$$

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

## مثال ۲-۹



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

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

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

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

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

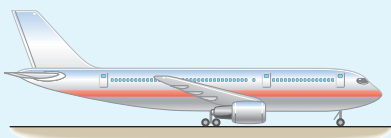
با توجه به رابطه ۲-۵ می‌توانیم کار نیروی وزن را با استفاده از تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی به دست آوریم.

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

به این ترتیب، کار نیروی دست برابر است با:

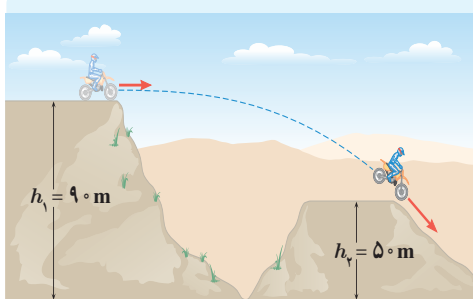
$$W_{\text{دست}} = -(-\Delta U) = +(mgh_2 - mgh_1)$$

## تمرین ۲-۱۰



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

## تمرین ۲-۱۱



جرم موتور سواری با موتورش  $150 \text{ kg}$  است. این موتورسوار، پرشی مطابق شکل روبه‌رو انجام می‌دهد.

الف) انرژی پتانسیل گرانشی موتور سواری را روی هر یک از تپه‌ها حساب کنید ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ).

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

## انرژی پتانسیل کشسانی

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



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



(ب)

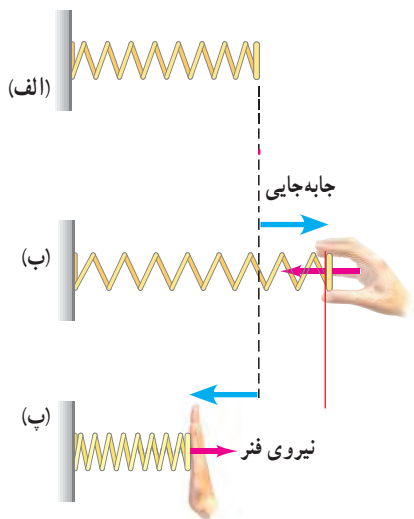


(ب)



(الف)

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



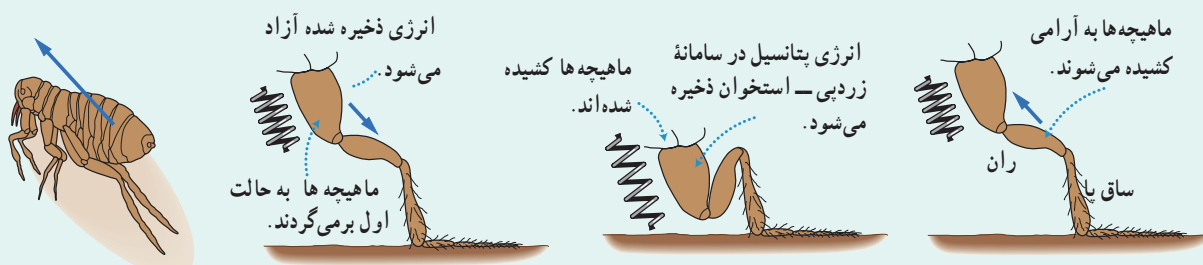
شکل ۹-۲ الف فنری را در وضعیت تعادلش نشان می‌دهد که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده شده است. با کشیدن یا فشردن فنر به اندازه  $x$  از مکان تعادلش، نیرویی در خلاف جهت جابه‌جایی به دست شخص وارد می‌شود (شکل‌های ۹-۲ ب و پ). یعنی کار نیروی فنر در این جابه‌جایی، منفی و تغییر انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جسم-فنر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

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

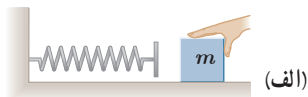
شکل ۹-۲ الف فنر در حال تعادل. (ب و پ) با کشیدن و فشردن فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در سامانه دست- فنر ذخیره می‌شود.

خوب است بدانید

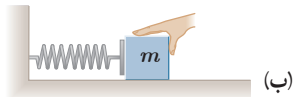
حشره کک به داشتن توانایی پرش شگفت آور شهرت دارد؛ زیرا می‌تواند بیش از صد برابر ارتفاع پیکر خود بپرد. نتایج پژوهش‌هایی که روی نحوه حرکت حشره کک انجام شده، نشان می‌دهند  $10^0 \text{ ms}$  طول می‌کشد تا این حشره به تندی پیشینه خود، یعنی حدود  $10^0 \text{ m/s}$  برسد. در این مدت کک می‌تواند تا ارتفاع  $3/5 \text{ cm}$  بپرد. شکل‌های زیر به ترتیب الگوی پرش کک را براساس ذخیره و آزاد شدن انرژی پتانسیل کشسانی در پاهای آن نشان می‌دهد. جرم کک حدود  $5 \text{ mg}$  است.



## مثال مفهومی ۲-۱۰



(الف)



(ب)

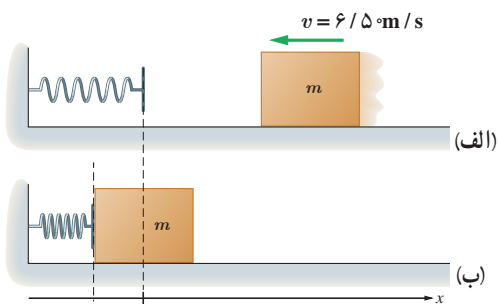


(پ)

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

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

## مثال ۲-۱۱



(الف)

(ب)

جسمی به جرم  $420 \text{ g}$  مطابق شکل رو به رو با تندی  $6/5 \text{ m/s}$  به فنری برخورد کرده و آن را فشرده می‌کند.

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

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

$$K_1 = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0/420 \text{ kg})(6/5 \text{ m/s})^2 = 8/87 \text{ J}$$

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

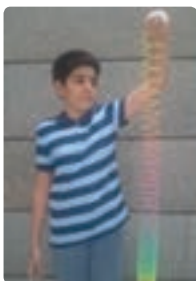
$$W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} = -(U_2 - U_1) = -(5/60 - 0) = -5/60 \text{ J}$$

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

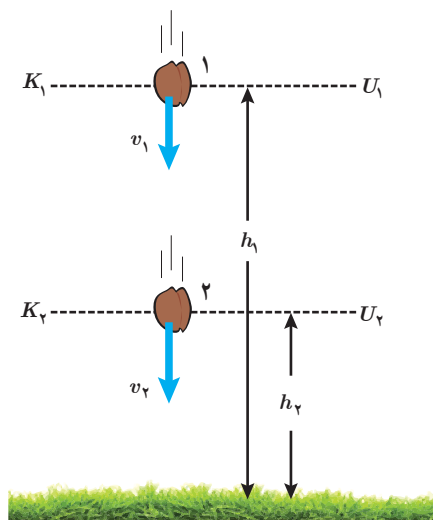
$$W_{\text{فنر}} + W_{\text{اصطکاک}} + W_{\text{وزن}} + W_{\text{عمودی سطح}} = K_2 - K_1$$

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

## فعالیت ۲-۱



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



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

$$W_{\text{وزن}} = -(U_2 - U_1)$$

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

$$W_t = W_{\text{وزن}} = K_2 - K_1$$

از مقایسه دو رابطه اخیر می‌توان نوشت:

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

که می‌توان آن را به صورت زیر نیز بازنویسی کرد:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 \quad (۸-۲)$$

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

$$E_1 = E_2 \quad (۹-۲)$$

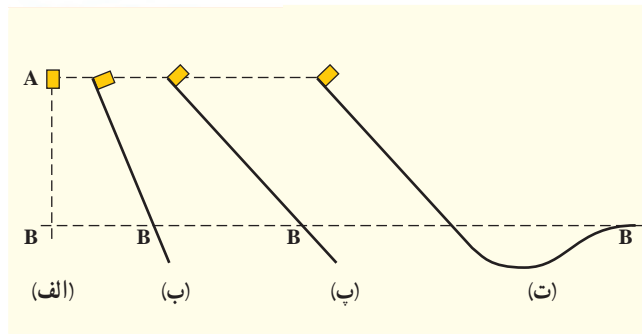
چون نقطه‌های (۱) و (۲) در مسیر حرکت جسم در شکل ۲-۱ اختیاری‌اند، نتیجه می‌گیریم با نادیده گرفتن نیروی مقاومت هوا، انرژی مکانیکی در تمام نقاط مسیر یکسانی دارد و پایسته می‌ماند. این نتیجه، اصل پایستگی انرژی مکانیکی نام دارد و برای شرایطی که بتوان اثر ناشی از نیروهایی مانند اصطکاک و مقاومت هوا را نادیده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

شکل ۲-۱ با نزدیک تر شدن جسم به زمین، انرژی پتانسیل گرانشی کاهش و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد.



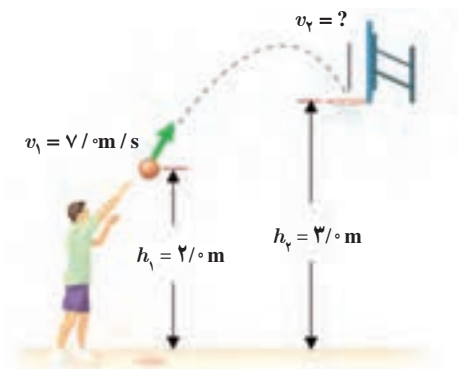
کریستیان هویگنس (۱۶۹۵-۱۶۲۹م)، فیزیک‌دان، اخترشناس و ریاضی‌دان هلندی، نخستین دانشمندی بود که در قرن هفدهم، پایستگی انرژی مکانیکی را برای حرکت یک جسم بر اثر گرانش زمین بیان کرد. هویگنس در ادامه فعالیت‌های گالیله در خصوص آونگ، قوانین آونگ ساده را ارائه داد و ساعت‌های آونگی را اختراع کرد. وی همچنین ساخت عدسی‌های تلسکوپ را بهبود بخشید و برای نخستین بار حلقه‌های سیاره زحل را مشاهده و گزارش کرد.

پوشش ۲-۴



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

## مثال ۲-۱۲



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

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

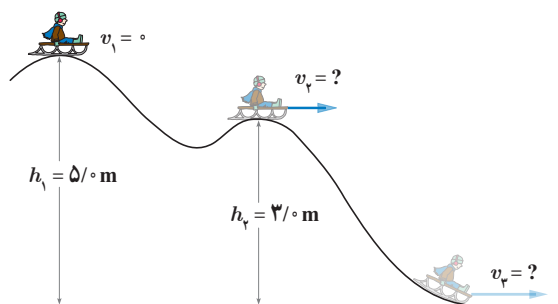
$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

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

$$\frac{1}{2}(7/2 \text{ m/s})^2 + (9/8 \text{ m/s}^2)(2/0 \text{ m}) = \frac{1}{2}v_2^2 + (9/8 \text{ m/s}^2)(3/0 \text{ m})$$

با حل معادله بالا، تندی توپ در دهانه سبد تقریباً برابر  $v_2 = 5/4 \text{ m/s}$  به دست می‌آید.

## مثال ۲-۱۳



سورتمه سواری از ارتفاع  $h_1 = 5/0 \text{ m}$  بالای سطح زمین و روی مسیری بدون اصطکاک، از حال سکون شروع به حرکت می‌کند.

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

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

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

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

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

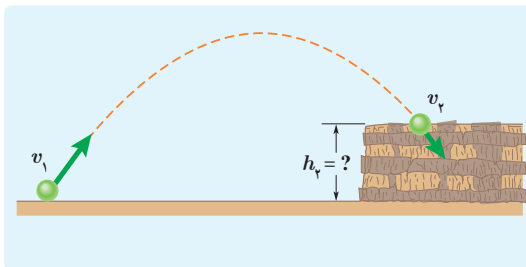
$$0 + (9/8 \text{ m/s}^2)(5/0 \text{ m}) = \frac{1}{2}v_2^2 + (9/8 \text{ m/s}^2)(3/0 \text{ m}) \Rightarrow v_2 = 6/3 \text{ m/s}$$

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

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

## تمرین ۲-۱۲

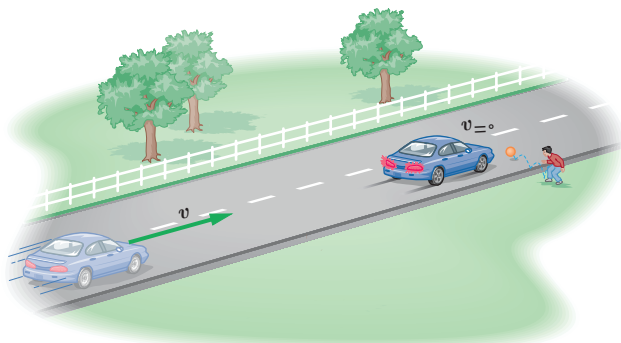
در مثال ۲-۱۲، مبدأ انرژی پتانسیل گرانشی را در ارتفاع  $h_1$  بگیرید و بر این اساس تندی توپ را هنگام رسیدن به دهانه سبد حساب کنید.



تویی مطابق شکل از سطح زمین با تندی  $v_1 = 40 \text{ m/s}$  به طرف  
صخره‌ای پرتاب می‌شود.

اگر توپ با تندی  $v_2 = 25 \text{ m/s}$  به بالای صخره برخورد کند، ارتفاع  
 $h_1$  را به دست آورید. مقاومت هوا را هنگام حرکت توپ نادیده بگیرید.

## ۲-۶ کار و انرژی درونی



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

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

نامیده می‌شود. انرژی درونی یک جسم، مجموع انرژی‌های ذره‌های تشکیل دهنده آن است.

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

در این گونه موارد، اصطلاحاً می‌گوییم انرژی تلف شده است. در واقع، همان‌طور که اشاره شد،  
در این حالت انرژی از بین 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 ۲-۴



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



یولیوس فون مایر  
(۱۸۷۸-۱۸۱۴م)

قانون پایستگی انرژی بیانی از ثبات در طبیعت است. انرژی کل، کمی است که پایسته می ماند؛ درحالی که کمیت های دیگر می توانند تغییر کنند. اولین اظهار نظر درباره 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 هم ارز یکدیگرند؛ یعنی می توانند به یکدیگر تبدیل شوند و مجموع آنها ثابت بماند. قانون پایستگی انرژی مایر و ژول، دو شاخه مهم فیزیک، به نام ترمودینامیک و مکانیک را وحدت بخشید.



جیمز پریسکات ژول  
(۱۸۸۹-۱۸۱۸م)

شکل ۲-۱۲ جسمی را نشان می دهد 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 می کنند. اگر کار انجام شده توسط این نیروها که معمولاً به نیروهای اتلافی نیز شناخته می شوند را با  $W_f$  نمایش دهیم در این صورت  $W_f = E_2 - E_1$  است.<sup>۱</sup>

این رابطه نشان می دهد با حضور نیروهای اتلافی، انرژی مکانیکی جسم یا سامانه پایسته نمی ماند و تغییر می کند. همان طور که پیش از این نیز اشاره کردیم این کاهش انرژی مکانیکی به صورت افزایش انرژی درونی جسم و محیط اطراف آن (سطح مسیر و هوا) در می آید.

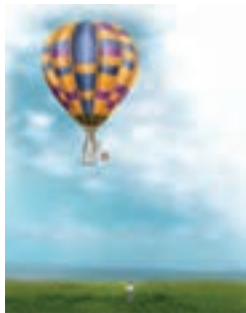


### شکل ۲-۱۳ وقتی نیروهایی مانند اصطکاک

و مقاومت هوا در حین حرکت جسم، روی آن کار انجام دهند انرژی مکانیکی جسم پایسته نیست.

**قانون پایستگی انرژی:** در یک سامانه منزوی<sup>۲</sup>، مجموع کل انرژی ها پایسته می ماند. انرژی را نمی توان خلق یا نابود کرد و تنها می توان آن را از یک شکل به شکل دیگر تبدیل کرد. این بیان، که براساس آزمایش های بسیاری بنا شده است قانون پایستگی انرژی نامیده می شود و تاکنون هیچ مورد استثنایی برای آن یافت نشده است.

## مثال ۲-۱۴



از بالونی که در ارتفاع  $50$  متری سطح زمین و با تندی  $40 \text{ m/s}$  در پرواز است، بسته ای به جرم  $3 \text{ kg}$  رها می شود و با تندی  $25 \text{ m/s}$  به زمین برخورد می کند. کار انجام شده توسط نیروی مقاومت هوا بر روی بسته را از لحظه رها شدن تا هنگام رسیدن به زمین حساب کنید.

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

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

$$= \frac{1}{2}(3 \text{ kg})(40 \text{ m/s})^2 + (3 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(50 \text{ m}) = 14940 \text{ J} \approx 1.5 \times 10^4 \text{ J}$$

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

$$= \frac{1}{2}(3 \text{ kg})(25 \text{ m/s})^2 + 0 = 9375 \text{ J} \approx 9.4 \times 10^3 \text{ J}$$

با جایگذاری مقادیر انرژی مکانیکی بسته در رابطه  $W_f = E_2 - E_1$ ، کار انجام شده توسط نیروی مقاومت هوا بر روی بسته

برابر است با:

$$W_f = E_2 - E_1 = 9375 \text{ J} - 14940 \text{ J} = -5565 \text{ J} \approx -5.6 \times 10^3 \text{ J}$$

۱- در حالت کلی، به جز نیروهای مانند نیروی گرانشی (که برای آنها انرژی پتانسیل تعریف می شود) و نیروهای اتلافی (نظیر اصطکاک و مقاومت هوا) ممکن است نیروهای دیگری نیز روی جسم کار انجام دهند. کار این نیروها به جمله دیگری در این رابطه می انجامد که بررسی آن خارج از برنامه درسی این کتاب است. معمولاً از حرف کوچک  $f$  برای نشان دادن نیروهای اتلافی مانند اصطکاک و مقاومت هوا استفاده می شود.

۲- به سامانه ای که نه از محیط اطراف انرژی بگیرد و نه به محیط اطراف انرژی دهد، سامانه منزوی گفته می شود.





تویی به جرم  $0.45 \text{ kg}$  با تندی  $v_1 = 18 \text{ m/s}$  از نقطه A می‌گذرد (شکل روبه‌رو). نیروی مقاومت هوا و نیروی اصطکاک در سطح تماس توپ با زمین،  $2^\circ$  درصد انرژی جنبشی اولیه توپ را تا رسیدن به نقطه B تلف می‌کنند. تندی توپ را در این نقطه به دست آورید.

۲-۲ 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 جاده کوهستانی بالا رود. در صورتی که برای پیمودن همین مسیر توسط خودرویی مشابه، ولی با موتور ضعیف‌تر، زمان طولانی‌تری لازم است.


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

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} \quad (2-1)$$

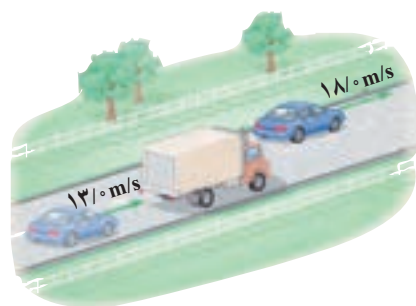
یکای SI توان، وات ( $W$ ) است که به احترام جیمز وات مخترع انگلیسی نام‌گذاری شده است. مطابق تعریف توان (رابطه ۲-۱)، یک وات برابر است با یک ژول بر ثانیه ( $1W = 1J/s$ ). استفاده از یکاهای بزرگ‌تر توان، مانند کیلووات ( $kW$ ) و مگاوات ( $MW$ ) نیز متداول است. یکای قدیمی توان، به نام اسب بخار ( $1hp = 746W$ ) هنوز نیز استفاده می‌شود. این یکا نخستین بار توسط وات برای ارزیابی توان خروجی اختراع جدیدش، ماشین بخار، معرفی شد. توان موتور بیشتر وسایل نقلیه با این یکا بیان می‌شود.

مثال ۲-۱۵

شکل روبه‌رو خودرویی به جرم  $1300 \text{ kg}$  را نشان می‌دهد که برای سبقت گرفتن از کامیونی، در مسیری افقی و در مدت  $3^\circ/s$  تندی خود را از  $v_1 = 13^\circ/m/s$  به  $v_2 = 18^\circ/m/s$  تغییر داده است. توان متوسط موتور خودرو برای انجام این کار، دست کم چقدر باید باشد؟ نیروهای اتلافی را نادیده بگیرید.



جیمزوات (۱۸۱۹-۱۷۳۶م) مخترع و مهندس اسکاتلندی، فعالیت حرفه‌ای خود را با اصلاح و تکمیل ماشین بخار نیوکامن آغاز کرد. پس از آن در سال ۱۷۶۹ میلادی، ماشین بخار دیگری طراحی کرد که نسبت به ماشین‌های بخار موجود، بازده و سرعت عمل بیشتری داشت. اختراع جدید وات، مورد استقبال زیادی قرار گرفت به طوری که ظرف چند سال پس از اختراع وی، حدود 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. نتیجه این آزمایش‌ها این بود که یک اسب می‌تواند در بالا بردن زغال سنگ از معدن در هر دقیقه ۳۳۰۰۰ فوت-بوند ( $ft-lbs$ ) کار انجام دهد. هر فوت-بوند تقریباً معادل  $1/36$  ژول است.



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

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

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

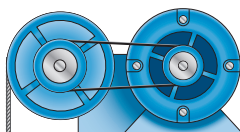
$$= \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2}(1300 \text{ kg})[(18 \text{ m/s})^2 - (13 \text{ m/s})^2] = 100750 \approx 1/0 \times 10^5 \text{ J}$$

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

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{100750 \text{ J}}{3/0 \text{ s}} \approx 3/4 \times 10^4 \text{ W} = 45 \text{ hp}$$

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

### مثال ۲-۱۶



موتور بالابر

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

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

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

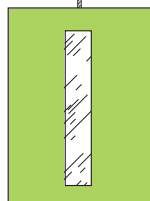
$$-mg(h_2 - h_1) + W_{\text{موتور}} = 0 - 0$$

$$W_{\text{موتور}} = mg(h_2 - h_1) = (500 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(6 \text{ m} - 0) = 29400 \text{ J} \approx 2/9 \times 10^4 \text{ J}$$

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

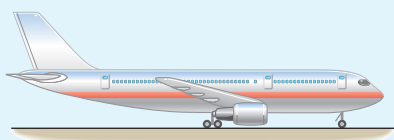
توان متوسط موتور بالابر برابر است با:

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{موتور}}}{\Delta t} = \frac{29400 \text{ J}}{10 \text{ s}} \approx 2/9 \times 10^3 \text{ W} = 3/9 \text{ hp}$$



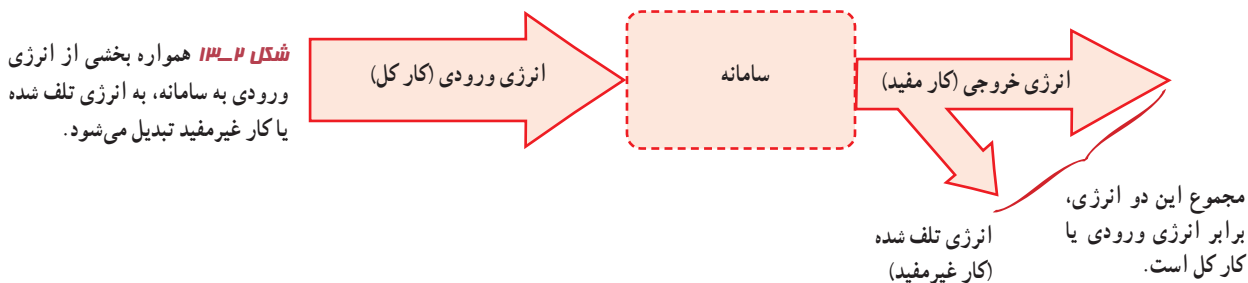
اتاقک بالابر

### تمرین ۲-۱۵



هر یک از دو موتور جت یک هواپیمای مسافربری، پیشرانده‌ای (نیروی جلوبر هواپیما) برابر  $2 \times 10^5 \text{ N}$  ایجاد می‌کند. اگر هواپیما در هر دقیقه  $15 \text{ km}$  در امتداد این نیرو حرکت کند، توان متوسط هر یک از موتورهای هواپیما چند اسب بخار است؟

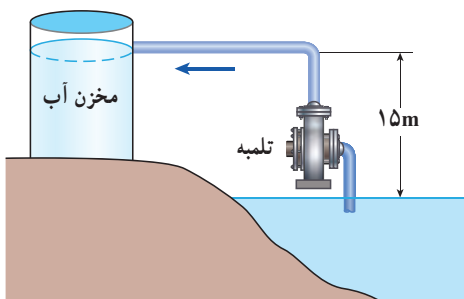
**بازده:** در هر سامانه تنها بخشی از انرژی ورودی (انرژی مصرفی سامانه) به انرژی موردنظر ما تبدیل می‌شود. برای مثال، وقتی موتور بالابری کار می‌کند بخشی از انرژی الکتریکی ورودی به کار مکانیکی تبدیل می‌شود و اتا‌فک بالابر را جابه‌جا می‌کند. بخش دیگری از انرژی الکتریکی ورودی به صورت انرژی‌های ناخواسته‌ای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



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

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \times 100 \quad (11-2)$$

### مثال ۱۷-۲



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

**پاسخ:** انرژی الکتریکی ورودی به تلمبه برابر است با

$$E_{\text{ورودی}} = (15000 \text{ W})(1/\text{s}) = 15000 \text{ J} \approx 1/5 \times 10^5 \text{ J}$$

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

$$E_{\text{خروجی}} = mg(h_2 - h_1) = (70 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})(15 \text{ m} - 0) = 10290 \text{ J} \approx 1/10 \times 10^5 \text{ J}$$

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

$$\text{بازده برحسب درصد} = \frac{10290 \text{ J}}{15000 \text{ J}} \times 100 \approx 68\%$$

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

## تمرین ۲-۱۶

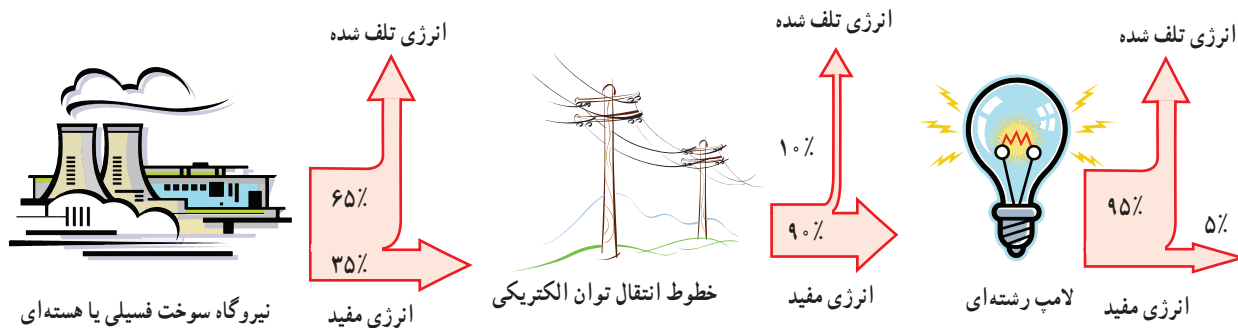


آب ذخیره شده در پشت سد یک نیروگاه برق آبی، از مسیری مطابق شکل روی پره های توربینی می‌ریزد و آن را می‌چرخاند. با چرخش توربین، مولد می‌چرخد و انرژی الکتریکی تولید می‌شود (شکل روبه رو). اگر ۸۵ درصد کار نیروی گرانش به انرژی الکتریکی تبدیل شود، در هر ثانیه چند متر مکعب آب باید روی توربین بریزد تا توان الکتریکی خروجی مولد نیروگاه به  $200\text{ MW}$  برسد؟ جرم هر متر مکعب آب را  $1000\text{ kg}$  در نظر بگیرید.

## فعالیت ۲-۲

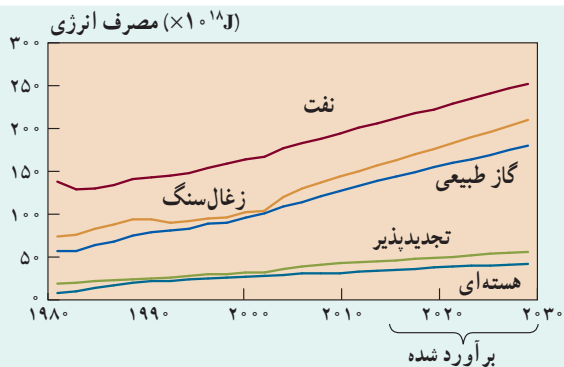
شکل زیر طرح واره‌ای از درصد انرژی مفید و انرژی تلف شده در یک نیروگاه سوخت فسیلی یا هسته‌ای را از آغاز تا مصرف در یک لامپ رشته‌ای نشان می‌دهد.

الف) یک نیروگاه سوخت فسیلی را در نظر بگیرید که با مصرف گازوئیل، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. با سوختن هر لیتر گازوئیل حدود ۳۵ مگاژول انرژی گرمایی تولید می‌شود. برای اینکه یک لامپ رشته‌ای  $100$  واتی در طول یک ماه به مدت  $180$  ساعت روشن بماند (به طور میانگین هر شبانه روز ۶ ساعت)، چقدر گازوئیل باید در نیروگاه مصرف شود؟  
 ب) با توجه به نتیجه قسمت الف، درک خود از هشدار معروف «لامپ اضافی خاموش!» را بیان کنید.  
 پ) اگر در سراسر ایران، هر خانه در طول یک ماه، معادل انرژی الکتریکی مصرف شده در قسمت الف، صرفه جویی کند، مرتبه بزرگی گازوئیل صرفه جویی شده را تخمین بزنید.



## فعالیت ۳-۲

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



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.

بهینه‌سازی مصرف انرژی: امروزه انرژی در همه عرصه‌های زندگی بشر و همچنین توسعه 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 دهه ۱۹۷۰ میلادی، متخصصان حوزه انرژی را به بررسی و ارائه راهکارهایی برای استفاده و مصرف بهینه انرژی واداشته است.

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

برچسب مصرف انرژی یخچال فریزر		انرژی
بازدهی بیشتر		B
بازدهی کمتر		
مصرف انرژی (بر حسب کیلو وات ساعت در سال)		
بر اساس نتایج آزمون در ۲۴ ساعت		
(مصرف واقعی انرژی به جگونی و مکان استفاده از دستگاه بستگی دارد)		
حجم محفظه نگهداری مواد غذایی غیر منجمد (لیتر)		
حجم محفظه نگهداری مواد غذایی منجمد (لیتر)		285
کلاس منطقه آب و هوایی		115
نام سازنده		گره‌سپری
مدل		ABCDEF
اطلاعات بیشتر در دفترچه راهنمای دستگاه موجود است.		abcde
بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۸۵۳-۲		

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

## ۲-۱ انرژی جنبشی



۱ تقریباً بیشتر شهاب‌سنگ‌هایی که وارد جو زمین می‌شوند به دلیل اصطکاک زیاد با ذرات تشکیل دهنده جو، به دمای بالایی می‌رسند و می‌سوزند. شکل روبه‌رو شهاب سنگی به جرم  $10^5 \text{ kg} \times 1/4$  را نشان می‌دهد که با تندی  $4 \times 10^3 \text{ km/s}$  وارد جو زمین شده است. انرژی جنبشی این شهاب سنگ را به دست آورید. این انرژی را با انرژی جنبشی یک هواپیمای مسافربری به جرم  $10^4 \text{ kg} \times 7/2$  که با تندی  $25 \times 10^3 \text{ m/s}$  در حرکت است مقایسه کنید.



۲ حدود ۵۰۰۰۰ سال پیش شهاب سنگی در نزدیک آریزونا، آمریکا به زمین برخورد کرده و چاله‌ای بزرگ از خود به جای گذاشته است (شکل روبه‌رو). با اندازه‌گیری‌های جدید (۲۰۰۵ میلادی) برآورد شده است که جرم این شهاب سنگ حدود  $10^8 \text{ kg} \times 1/4$  بوده و با تندی  $12 \times 10^3 \text{ km/s}$  به زمین برخورد کرده است. انرژی جنبشی این شهاب سنگ هنگام برخورد به زمین چقدر بوده است؟ (خوب است بدانید انرژی آزاد شده توسط هر تن TNT تقریباً برابر  $10^9 \text{ J} \times 4/2$  است.)

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

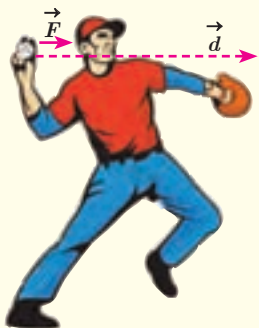
۳ در شکل‌های (الف) و (ب) جرم ارباب‌ها یکسان است. برای اینکه تندی ارباب‌ها از صفر به مقدار معین  $v$  برسد، کار انجام شده در هر دو حالت را باهم مقایسه کنید.



(ب)

(الف)

۴ ورزشکاری سعی می‌کند توپ بیسبالی به جرم  $15 \text{ g}$  را با بیشترین تندی ممکن پرتاب کند. به این منظور، ورزشکار نیرویی به بزرگی  $F = 75 \text{ N}$  تا لحظه پرتاب توپ و در امتداد جابه‌جایی ( $d = 1/5 \text{ m}$ ) بر آن وارد می‌کند (شکل روبه‌رو). با چشم‌پوشی از مقاومت هوا، تندی توپ هنگام جدا شدن از دست ورزشکار چقدر است؟



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

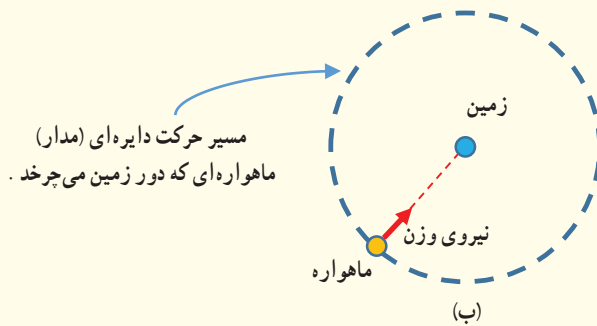
۶ برای آنکه نیروی خالصی، بتواند تندی جسم را از صفر به  $v$  برساند باید مقدار کار  $W$  را روی آن انجام دهد. اگر قرار باشد تندی این جسم از صفر به  $3v$  برسد کاری که روی جسم باید انجام شود چند برابر  $W$  است؟



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

۸ شخصی گلوله‌ای برفی به جرم  $150\text{g}$  را از روی زمین بر می‌دارد و تا ارتفاع  $180\text{cm}$  بالا می‌برد و سپس آن را با تندی  $12\text{m/s}$  پرتاب می‌کند. کار انجام شده توسط شخص روی گلوله برف چقدر است؟

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



(الف)

## ۲-۴ کار و انرژی پتانسیل

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

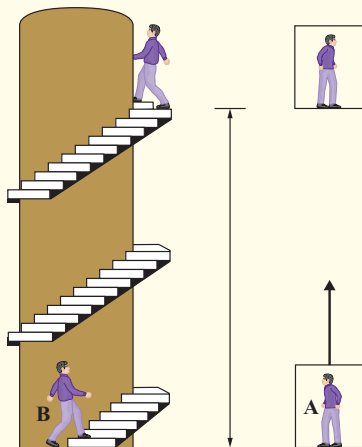
۱۱ دو شخص هم جرم  $A$  و  $B$  به طبقه سوم ساختمانی می‌روند. شخص  $A$  با آسان‌تر (آسانسور) و شخص  $B$  به آرامی از پله‌های ساختمان بالا می‌روند. گزاره‌های درست را با ذکر دلیل مشخص کنید.

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

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

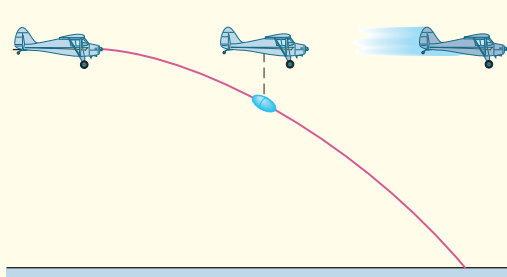
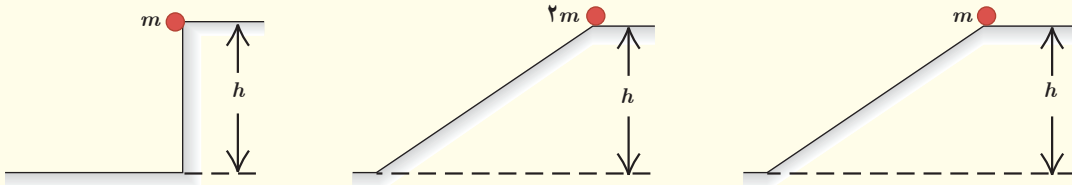
پ) کار نیروی وزن برای هر دو شخص در طول مسیر یکسان است.

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

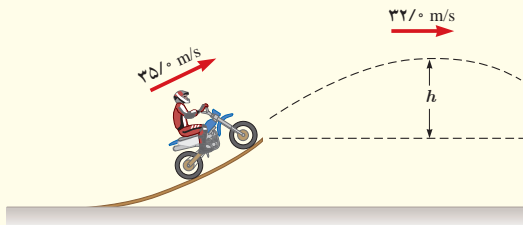


۲-۵ و ۲-۶ پایستگی انرژی مکانیکی و کار و انرژی درونی

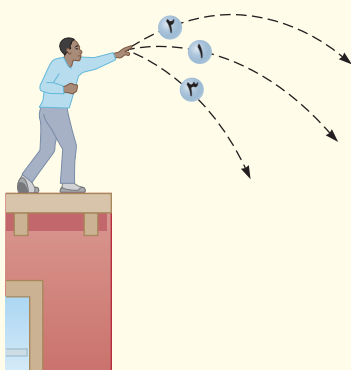
۱۲ در سه شکل زیر اجسامی از حالت سکون و ارتفاع  $h$  نسبت به سطح افق رها می‌شوند و نیروی اصطکاک و مقاومت هوا بر آنها وارد نمی‌شود. در کدام حالت، جسم (الف) بیشترین تندی را هنگام رسیدن به سطح افقی دارد؟  
(ب) تا هنگام رسیدن به پایین مسیر، بیشترین مقدار کار نیروی وزن روی آن انجام شده است؟



۱۳ در شکل روبه‌رو هواپیمایی که در ارتفاع  $300\text{m}$  از سطح زمین و با تندی  $50\text{m/s}$  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  $35\text{m/s}$  انجام می‌دهد. اگر تندی موتورسوار در بالاترین نقطه مسیرش به  $32\text{m/s}$  برسد، ارتفاع  $h$  را پیدا کنید. اصطکاک و مقاومت هوا را در طول مسیر حرکت موتورسوار نادیده بگیرید.



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

۱۶ گلوله‌ای به جرم  $5\text{g}$  از دهانه تفنگی با تندی  $1/5\text{km/s}$  و ارتفاع  $1/6\text{m}$  از سطح زمین شلیک می‌شود. اگر گلوله با تندی  $1/45\text{km/s}$  به زمین برخورد کند،

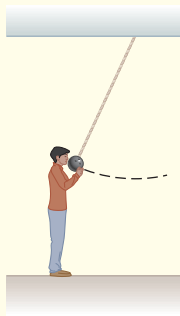
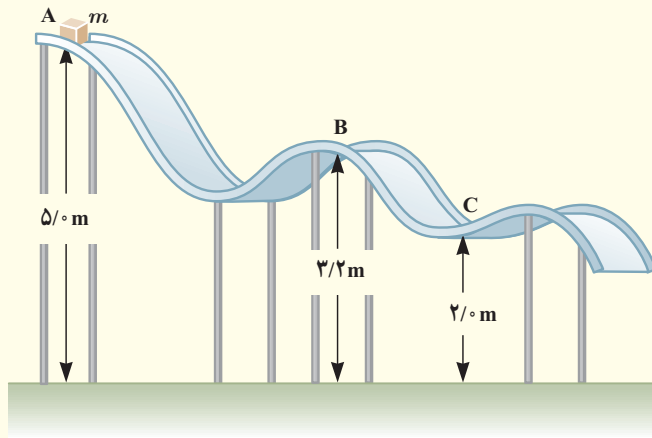
(الف) در مدت حرکت گلوله کار نیروی مقاومت هوا چقدر است؟  
(ب) مقدار به‌دست آمده در قسمت (الف) را با کار نیروی وزن مقایسه کنید.



۱۷ جسمی به جرم  $m = 12 \text{ kg}$  در نقطه A از حالت سکون رها می‌شود و در مسیری بدون اصطکاک سُر می‌خورد (شکل زیر). تعیین کنید:

الف) تندی جسم را در نقطه B

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



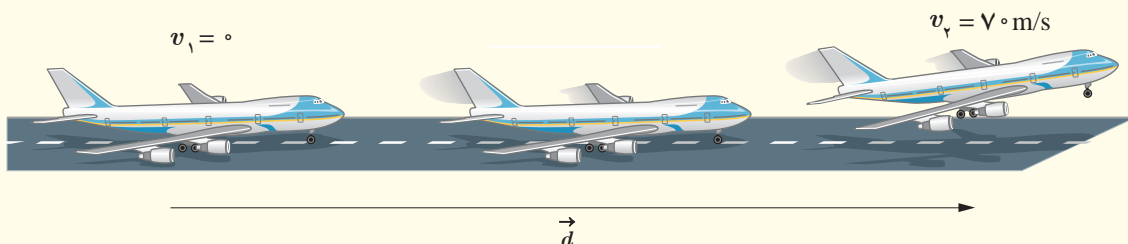
۱۸ شکل روبه‌رو گلوله‌ای را نشان می‌دهد که از سقف کلاسی آموزشی شده و دانش‌آموزی آن را از وضعیت تعادل خارج کرده و در برابر نوک بینی خود گرفته است. الف) وقتی دانش‌آموز گلوله را رها می‌کند هنگام برگشت به او برخورد نمی‌کند. چرا؟ (این تجربه ساده ولی هیجان‌انگیز را در صورت امکان در کلاستان انجام دهید). ب) اگر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

## ۲-۷ توان

۱۹ بالابری با تندی ثابت، باری به جرم  $650 \text{ kg}$  را در مدت ۳ دقیقه تا ارتفاع  $75 \text{ m}$  بالا می‌برد. اگر جرم بالابر  $320 \text{ kg}$  باشد، توان متوسط موتور آن چند وات و چند اسب بخار است؟

۲۰ شخصی به جرم  $72 \text{ kg}$  در مدت زمان  $9 \text{ s}$  از تعداد  $5^\circ$  پله بالا می‌رود. توان متوسط مفید او چند وات است؟ ارتفاع هر پله را  $3 \text{ cm}$  فرض کنید.

۲۱ شکل زیر هواپیمایی به جرم  $10^4 \times 7/2 \text{ kg}$  را نشان می‌دهد که از حال سکون شروع به حرکت می‌کند و پس از  $205 \text{ m}$  جابه‌جایی در امتداد باند هواپیما، به تندی برخاستن  $v_f = 70 \text{ m/s}$  می‌رسد.



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

یک دقیقه پس از برخاستن، هواپیما تا ارتفاع  $560\text{ m}$  از سطح زمین اوج می‌گیرد و تندی آن به  $140\text{ m/s}$  می‌رسد. در این مدت،  
ب) کار نیروی وزن چقدر است؟

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

۲۲ سالانه نزدیک به ۱۲۵ میلیارد لیتر مواد و فراورده‌های نفتی از طریق حدود  $14000\text{ km}$  خطوط لوله در نقاط مختلف کشور توزیع می‌شود. این خطوط در طول مسیر خود از مراکز انتقال متعددی می‌گذرند تا توان لازم را برای ادامه راه به دست آورند. شکل زیر یکی از این مراکز را نشان می‌دهد که در ارتفاع  $2050\text{ m}$  از سطح دریای آزاد قرار دارد. در این مرکز، در هر ثانیه یک متر مکعب مواد نفتی از طریق لوله‌ای با قطر  $32\text{ cm}$  اینچ ( $81/2\text{ cm}$ ) توسط دو دستگاه پمپ (تلمبه) تا ارتفاع  $2700\text{ m}$  از سطح دریای آزاد فرستاده می‌شود. اگر بازده هر یک از پمپ‌های این مرکز حدود ۲۸ درصد باشد<sup>۱</sup> توان هر یک از آنها بر حسب مگاوات (MW) و اسب بخار (hp) چقدر است؟ (چگالی مواد نفتی را  $860\text{ kg/m}^3$  بگیرید.)



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

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



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

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

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

## ۱-۳ حالت‌های ماده

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. اندازه اتم‌ها حدود یک تا چند انگستروم ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) است و اندازه مولکول‌ها به این بستگی دارد که از چند اتم ساخته شده باشند. اندازه برخی از درشت مولکول‌ها، مانند بسپارها (پلیمرها)، می‌تواند تا  $1000$  انگستروم نیز باشد. ذره‌های سازنده مواد همواره در حرکت‌اند و به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. حالت ماده به چگونگی حرکت این ذره‌ها و اندازه نیروی بین آنها بستگی دارد.

جامد، مایع و گاز سه حالت آشنای ماده هستند که در این فصل به بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی آنها خواهیم پرداخت. حالت چهارم ماده، پلازما نامیده می‌شود که اغلب در دماهای خیلی بالا به وجود می‌آید. ماده درون ستارگان و بیشتر فضای بین ستاره‌ای، آذرخش، شفق‌های قطبی، آتش و ماده داخل لوله تابان لامپ‌های مهتابی از پلازما تشکیل شده است (شکل ۱-۳).

**جامد:** هزاران سال است که بشر از مواد جامد بهره می‌گیرد. اصطلاح‌های عصر حجر، عصر برنز، و عصر آهن اهمیت مواد جامد را در توسعه تمدن‌های پیشین نشان می‌دهد. تجربه 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.

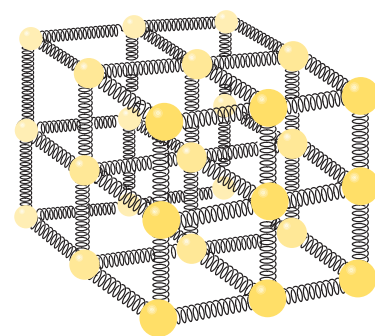
برای درک بهتر ساختار جسم جامد، معمولاً مدلی مطابق شکل ۲-۳ ارائه می‌دهند و فرض می‌کنند که ذرات آن توسط فنرهایی به یکدیگر متصل‌اند. اگر این ذرات نسبت به وضعیت تعادل، به هم نزدیک‌تر یا از هم دورتر شوند، نیروی کشسانی بین فنرها آنها را به وضع تعادل برمی‌گرداند و جسم جامد، شکل و اندازه اولیه‌اش را حفظ می‌کند.

اتم‌های برخی از جامدها در طرح‌های منظمی مانند شکل‌های ۳-۳-الف کنار هم قرار می‌گیرند. جامدهایی را که در یک الگوی سه‌بعدی تکرار شونده 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 سازنده مایع فرصت کافی دارند تا در طرح‌های منظم خود را مرتب کنند.

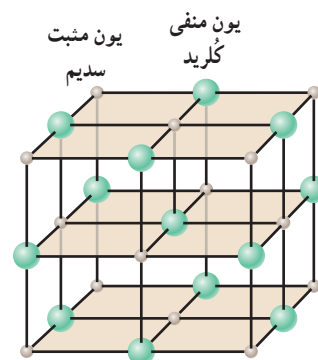
ذرات سازنده **جامدهای بی‌شکل (آمورف)** برخلاف جامدهای بلورین، در طرح‌های منظمی کنار هم قرار ندارند. وقتی مایعی به سرعت سرد شود معمولاً جامد بی‌شکل به وجود می‌آید. در این فرایند سردسازی سریع، ذرات فرصت کافی ندارند تا در طرحی منظم، مرتب شوند. بنابراین در طرح نامنظمی که در حالت مایع داشتند باقی می‌مانند.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



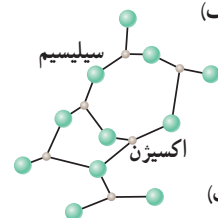
**شکل ۳-۱** چهار حالت ماده در این تصویر وجود دارد. یخ (جامد)، آب (مایع)، هوا (گاز) و خورشید (پلازما)



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



(الف)



(ب)

**شکل ۳-۳** (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 سازنده یک جامد بی‌شکل، مانند شیشه که در طرحی نامنظم در کنار هم قرار گرفته‌اند.



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



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



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

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

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

### خوب است بدانید

بلورهای مایع موادی هستند که ویژگی‌های فیزیکی آنها چیزی بین خواص مایع‌ها و بلورهای جامد است. این بلورها در سال ۱۸۸۸ میلادی توسط گیاه‌شناس و شیمی‌دان اتریشی به نام فردریک رینیتزر<sup>۱</sup> کشف شدند. شناخت رفتار فیزیکی بلورهای مایع تا دهه سال پس از کشف، برای دانشمندان کار ساده‌ای نبود. وقتی بلور مایعی بین دو لایه 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 دهه ۱۹۷۰ میلادی اولین دسته از بلورهای مایع پایدار به صورت تجاری ساخته و از آن در تولید صفحه‌های نمایشگرهای بلور مایع (LCD) استفاده شد. در سال ۱۹۹۱ میلادی پیر ژیل دو ژن، فیزیک‌دان فرانسوی به خاطر تحقیقاتش در یافتن روش‌های استفاده از بلورهای مایع، جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد. بخش کوچکی از کاربردهای بلور مایع در ابزارهای نشان داده شده در شکل روبه‌رو آمده است.



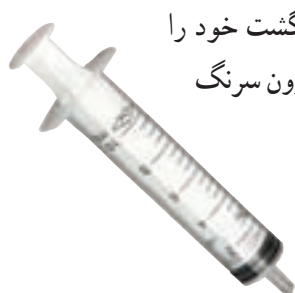
۱- Friedrich Reintzer (1827-1927)

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



شکل ۳-۶ حرکت نامنظم ذرات گاز درون یک بادکنک

### فعالیت ۲-۳

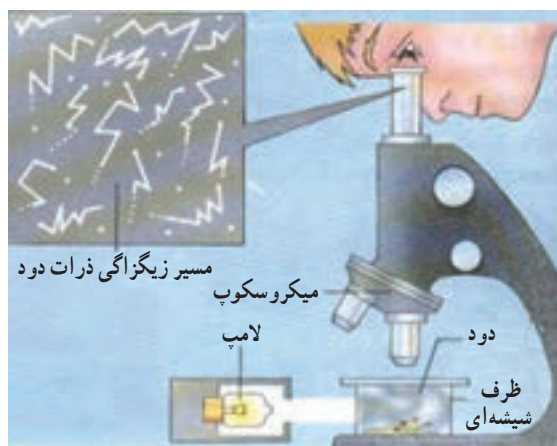


یک سرنگ، مثلاً  $10^\circ$  سی سی، اختیار کنید. پیستون آن را بکشید تا هوا وارد سرنگ شود. انگشت خود را محکم روی دهانه خروجی سرنگ قرار دهید و تا جایی که می‌توانید پیستون را حرکت دهید تا هوای درون سرنگ متراکم شود.

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

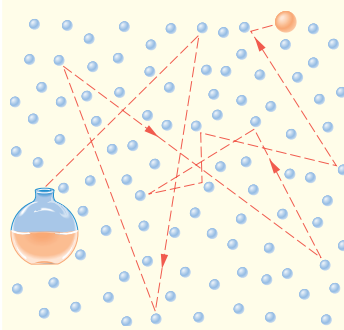
**حرکت براونی:** شکل ۳-۷ ظرفی شیشه‌ای محتوی ذرات دود را نشان می‌دهد که پرتوهای نور به آن می‌تابد. اگر با میکروسکوپ درون ظرف محتوی دود را مشاهده کنیم دیده می‌شود که ذره‌های دود به‌طور نامنظم و درهم و برهم و در یک مسیر زیگزاگی حرکت می‌کنند. این حرکت نامنظم و کاتوره‌ای ذرات دود را **حرکت براونی** می‌نامند.

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



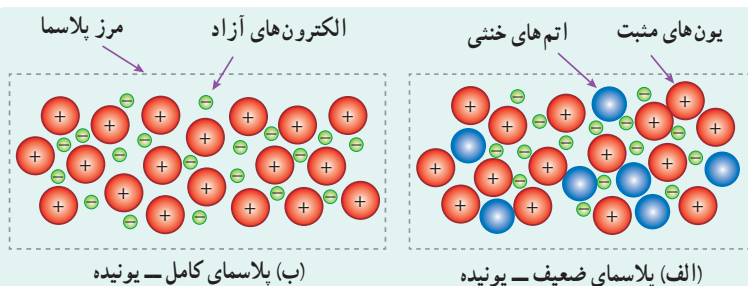
شکل ۳-۷ آزمایشی برای مشاهده حرکت براونی ذرات دود درون یک ظرف شیشه‌ای

۱- تندی مولکول‌های هوا در دمای اتاق حدود  $500 \text{ m/s}$  است.



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

خوب است بدانید



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

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

قسمت عمده‌ای از جهان قابل مشاهده، از پلاسما تشکیل شده است. خورشید، ستارگان و بیشتر فضای بین‌ستاره‌ای، 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، راکتورهای گداخت هسته‌ای و ... پلاسما را می‌توان به طور مصنوعی ایجاد کرد. افزون بر اینها پلاسمای درون لامپ‌های نئون و مهتابی (حاوی گازهای جیوه و آرگون)، که بر اثر تخلیه الکتریکی تابش می‌کند، سال‌هاست به عنوان چشمه‌های نور در زندگی روزمره ما به کار می‌روند.

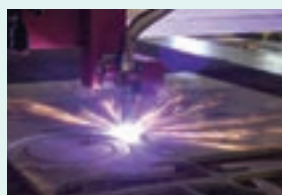
پلاسما، برخلاف گاز، رسانای بسیار خوب الکتریسیته و گرماست. بین ذرات پلاسما نیروی الکتریکی وجود دارد. ماهیت بلند بردن این نیرو، در رفتار پلاسما نقش مهمی ایفا می‌کند. توجه به ویژگی‌های خاص پلاسما و بهره‌مندی از آن، سبب کاربردهای فراوانی در صنعت، فناوری، پزشکی، دندانپزشکی و ... شده است. از جمله این کاربردها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



کاربرد پلاسما در دندانپزشکی



کاربرد پلاسما در پزشکی



برش کاری با پلاسما

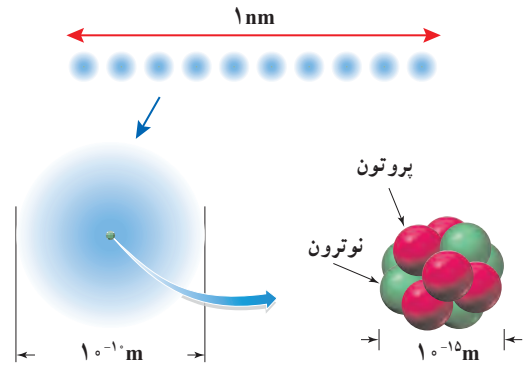


جوشکاری با پلاسما

## ۲-۳ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو

علم نانو یکی از شاخه‌های جدید علوم است که به دلیل تأثیر شگرفی که در فناوری ایفا می‌کند از توجه روزافزونی در دنیای امروز برخوردار است. ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. 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<sup>۱</sup> گرفته شده و به معنای یک میلیاردم است. پس یک نانومتر (۱nm) برابر یک میلیاردم متر یا  $10^{-9}$  متر است. برای اینکه تصویری از این مقیاس داشته باشید، می‌توان گفت طول ده اتم کربن در کنار یکدیگر، تقریباً برابر با یک نانومتر است. (شکل ۳-۸).



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

## تمرین ۱-۳

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

حال این پرسش مطرح می‌شود که چرا نام یک شاخه علم که در تمام علوم دیگر کاربرد دارد باید با پیشوند نانو آغاز شود؟ چه چیز ویژه‌ای در مورد این مقیاس طول وجود دارد؟ برای یافتن پاسخ ابتدا به موضوع زیر توجه کنید. نقطه ذوب طلا ( $1064^{\circ}\text{C}$ ) را می‌توان در هر کتاب مرجع مربوط به فلزها پیدا کرد و درستی آن را با قرار دادن یک قطعه طلا در کوره‌ای با دمای بالا تأیید کرد. وقتی دما به  $1064^{\circ}\text{C}$  می‌رسد طلای جامد تغییر حالت می‌دهد و به شکل توده‌ای از طلای مایع درمی‌آید. اگر این آزمایش را دوباره انجام دهیم، ولی به جای یک قطعه بزرگ طلا، که می‌توانیم آن را ببینیم و به راحتی لمس کنیم، قطعه‌ای را که قطر آن تنها چند نانومتر است در کوره بگذاریم و ذوب کنیم (بدیهی است برای انجام این کار به تجهیزات و روش‌های خاص نیاز داریم، اما شدنی است) با شگفتی درمی‌یابیم که دمای ذوب طلا فقط  $427^{\circ}\text{C}$  است. آیا اشتباه کرده‌ایم؟ آزمایش‌های بیشتر نشان می‌دهند که اشتباهی رخ نداده است. با این آزمایش در واقع در می‌یابیم که دمای ذوب ذره‌های طلا در مقیاس نانو، تفاوت زیادی با دمای ذوب طلا در اندازه‌های معمولی دارد.

## ریچارد فاینمن



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

در مقیاس نانو، در سال ۱۹۵۹ میلادی شروع شد، زمانی که فاینمن یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی در پایین وجود دارد»، در انجمن فیزیک آمریکا ایراد کرد. فاینمن به مفهوم مقیاس‌بندی علاقه‌مند بود و در این سخنرانی‌ها مجسم کرد که یک بیت اطلاعات را می‌توان در یک نانو فضا (به‌طور دقیق خوشه‌ای از  $125$  اتم) ذخیره کرد، که در آن زمان پیش‌بینی بسیار مهم و بی‌نهایت جسورانه‌ای بود. فاینمن برآورد کرد که در آن مقیاس از کوچک‌سازی، همه کتاب‌هایی که در طول تاریخ نوشته شده‌اند را می‌توان در مکعبی به ضلع  $1/2$  میلی‌متر، ذخیره کرد (همان‌گونه که از عنوان سخنرانی او پیداست). فاینمن همچنین در سخنرانی خود، پیش‌بینی کرد که با کوچک شدن مواد تا گستره مقیاس نانو، رفتار آنها تغییر می‌کند به طوری که می‌توان این تغییر رفتار را به یک مزیت تبدیل کرد. او در پایان سخنرانی‌اش می‌گوید: «من از بیان پرسش‌هایی باکی ندارم. آیا می‌توانیم اتم‌ها را تا کوچک‌ترین مقیاس به ترتیب دلخواه همان مرتب کنیم؟»



به نظر شما چرا در کتاب‌های مرجع دمای ذوب طلا را  $1064^{\circ}\text{C}$  ذکر کرده‌اند؟

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

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

### مثال مفهومی ۱-۳



سیم‌های آلومینیمی که روی هم پیچیده شده‌اند.

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

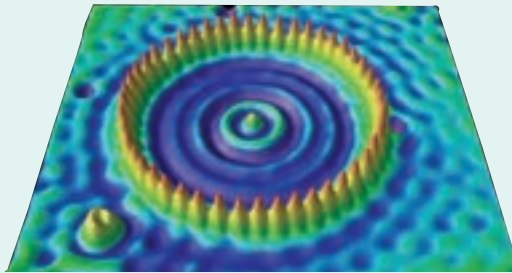
**پاسخ:** برای پاسخ به این پرسش باید به ضخامت لایه‌ای توجه کنیم که روی سطح آلومینیم تشکیل می‌شود. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که وقتی قطعه‌ای آلومینیمی در مجاورت هوا قرار می‌گیرد لایه‌ای بسیار نازک از اکسید آلومینیم روی سطح آن تشکیل می‌شود که ضخامت آن از مرتبه نانومتر است. در این مقیاس، ویژگی‌های الکتریکی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

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

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

### خوب است بدانید

شکل الف یک میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱</sup> (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<sup>۲</sup> (STM) در سال ۱۹۸۲ میلادی توسط دو فیزیک‌دان سوئیسی اختراع شد که جایزه نوبل فیزیک ۱۹۸۶ را برای آنها به همراه آورد. میکروسکوپ‌های نیروی اتمی بر خلاف میکروسکوپ‌های STM که تنها برای مواد رسانا قابل استفاده هستند برای تمامی مواد شامل: رسانا، نارسانا و حتی مواد غوطه‌ور در یک محلول نیز به کار می‌روند. با AFM همانند STM می‌توان تصاویری از سطح یک جسم فراهم کرد (شکل ب). افزون بر این، AFM را می‌توان برای اندازه‌گیری نیروهای فوق‌العاده کوچک، از مرتبه نانو نیوتون تا پیکونیوتون، مورد استفاده قرار داد.



(ب)



(الف)

### ۳-۳ نیروهای بین مولکولی

بیش از این با انجام فعالیت ۳-۲ 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. به طور کلی، نیروهای بین مولکول‌های همسان مانند نیروهای بین مولکول‌های آب را نیروی **هم‌چسبی** می‌نامیم (شکل ۳-۹). وقتی سعی می‌کنیم فاصله بین مولکول‌های مایع را کم کنیم نیروی دافعه بزرگی بین آنها ظاهر می‌شود که از تراکم‌پذیری مایع جلوگیری می‌کند. همین‌طور وقتی مولکول‌های مایع را کمی از هم دور کنیم، نیروی جاذبه بین آنها ظاهر می‌شود. این جاذبه در قطره آب آویزان از شاخه درخت دیده می‌شود.

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

۱- Atomic Force Microscope (AFM)

۲- Scanning Tunneling Microscope (STM)

مولکول‌های آب به یکدیگر نیروی جاذبه وارد می‌کنند.



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

### پرسش ۳-۳

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

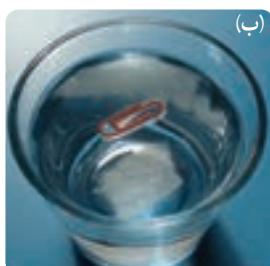
**کشش سطحی:** نشستن یا راه رفتن برخی حشره‌ها روی سطح آب (شکل ۳-۱۰ الف)، شناور ماندن گیره فلزی کاغذی روی سطح آب (شکل ۳-۱۰ ب) و تشکیل حباب‌های آب و صابون (شکل ۳-۱۰ پ) تنها نمونه‌هایی از وجود کشش سطحی هستند. کشش سطحی ناشی از هم‌چسبی مولکول‌های سطح مایع است و آن را می‌توان با نیروهای بین مولکولی توضیح داد.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



(ت)



(پ)



(ب)



(الف)

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

## فعالیت ۳-۴



الف) سعی کنید یک سوزن ته گرد یا گیره کاغذ را مطابق شکل روی سطح آب شناور کنید. برای این منظور می‌توانید از یک تکه دستمال کاغذی استفاده کنید.  
 ب) پس از شناور شدن سوزن یا گیره، سطح آب را به دقت مشاهده کنید و مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.  
 پ) اکنون یکی دو قطره مایع شوینده را به آرامی به آب درون ظرف بیفزایید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش کنید و دلیلی برای آن ارائه دهید.

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

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



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

## پرسش ۳-۴

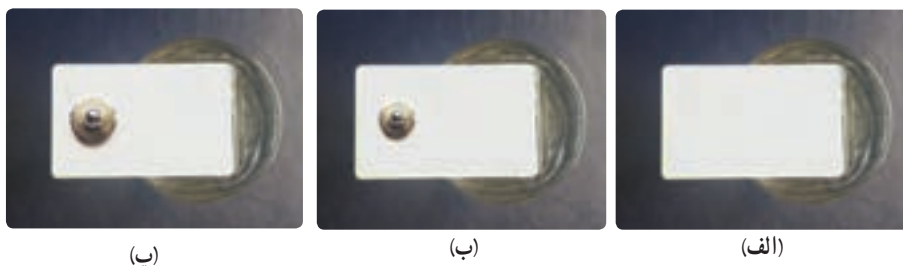
شکل روبه‌رو خروج قطره‌های روغن با دمای متفاوت را از دهانه دو قطره‌چکان نشان می‌دهد.  
 الف) توضیح دهید در کدام شکل دمای قطره‌های روغن کمتر است.  
 ب) افزایش دما چه تأثیری بر نیروی هم‌چسبی مولکول‌های یک مایع می‌گذارد؟  
 پ) چرا هنگام شستن ظروف، افزون بر استفاده از مایع ظرف‌شویی، ترجیح می‌دهیم از آب گرم نیز استفاده کنیم؟



## فعالیت ۳-۵

یک طرف یک تکه شیشه کوچک (با ابعادی حدود  $10\text{ cm}$  در  $10\text{ cm}$ ) را کمی بالاتر از شعله یک شمع بگیرید تا سطح شیشه به طور کامل دوداندود شود. شیشه را از طرف تمیز آن روی سطحی افقی قرار دهید و سپس روی سطح دوداندود شده آن چند قطره آب بریزید. آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.  
 بار دیگر سطح شیشه را به جای دوداندود کردن، با روغن چرب کنید و آزمایش را تکرار کنید. مشاهده خود را توضیح دهید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید. (پس از بحث کافی در خصوص این فعالیت، دوباره به تصویر و پرسش شروع فصل بازگردید و پاسخی قانع‌کننده ارائه دهید.)

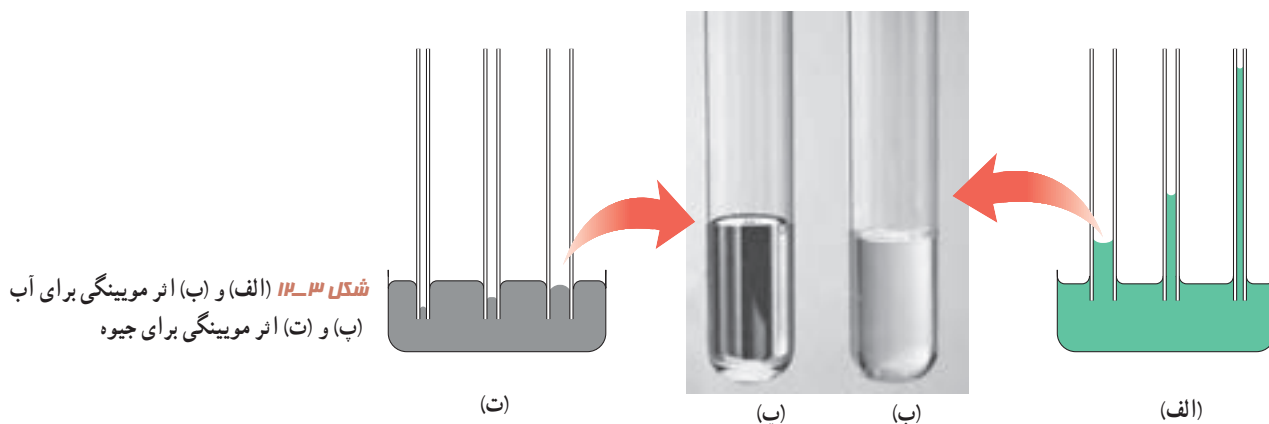
این فعالیت به شما کمک می‌کند تا درک بهتری از نیروی دگرچسبی به دست آورید. به این منظور از یک لیوان پر از آب، یک کارت بانکی و تعدادی وزنه چند گرمی یا سکه‌های پول استفاده کنید. ابتدا مطابق شکل الف، کارت را طوری روی لبه لیوان قرار دهید که تنها نیمی از آن با آب در تماس باشد. وزنه‌های چند گرمی را روی قسمتی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



### اثر موینگی: لوله‌هایی که قطر داخلی آنها حدود یک دهم میلی‌متر ( $1 \text{ mm} \sim$ ) باشد، معمولاً لوله

مویین نامیده می‌شوند. واژه مویین به معنی «مُو مانند» است. آزمایش نشان می‌دهد اگر چند لوله 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 لوله 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 جیوه ظرف قرار می‌گیرد. همچنین هرچه قطر لوله مویین کمتر باشد ارتفاع ستون جیوه در آن کمتر است. افزون بر اینها سطح جیوه در لوله مویین برآمده است. اثر موینگی در لوله‌های با قطر داخلی بزرگ‌تر از لوله‌های مویین نیز قابل مشاهده است. شکل‌های ۱۲-۳ الف و ب، اثر موینگی را برای آب و شکل‌های ۱۲-۳ پ و ت اثر موینگی را برای جیوه، در چنین لوله‌هایی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱ الف) و ب) اثر موینگی برای آب  
پ) و ت) اثر موینگی برای جیوه

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

### فعالیت ۳-۲



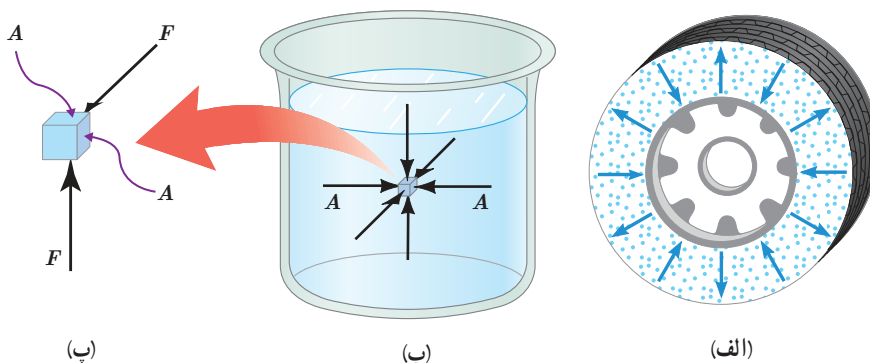
سازه‌های آبی شوشتر که از دوران هخامنشیان تا ساسانیان، جهت بهره‌گیری بیشتر از آب ساخته شده‌اند.

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

### ۳-۴ فشار در شاره‌ها

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

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



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

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

$$P = \frac{F}{A} \quad (۱-۳)$$

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

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

### مثال ۲-۳



یک زیردریایی تفریحی در اعماق اقیانوسی به آرامی حرکت می‌کند (شکل روبه‌رو). این زیردریایی تعدادی پنجره کوچک دایره‌ای شکل به شعاع  $0.4 \text{ m}$  دارد. اگر فشار آب در محل هر یک از این پنجره‌ها برابر  $9 \times 10^5 \text{ Pa}$  باشد، بزرگی نیروی عمودی که آب بر سطح خارجی یکی از این پنجره‌ها وارد می‌کند چقدر است؟

**پاسخ:** مساحت پنجره برابر است با:

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times (0.4 \text{ m})^2 = 0.5 \text{ m}^2$$

به این ترتیب از رابطه (۱-۳) داریم:

$$F = PA = (9 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (0.5 \text{ m}^2) = 4.5 \times 10^5 \text{ N}$$

این نیرو تقریباً معادل وزن جسمی به جرم  $4.5 \times 10^4 \text{ kg}$  است!

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

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

$$F_{\uparrow} = F_{\downarrow} + mg$$

$$P_{\uparrow} A = P_{\downarrow} A + mg$$



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

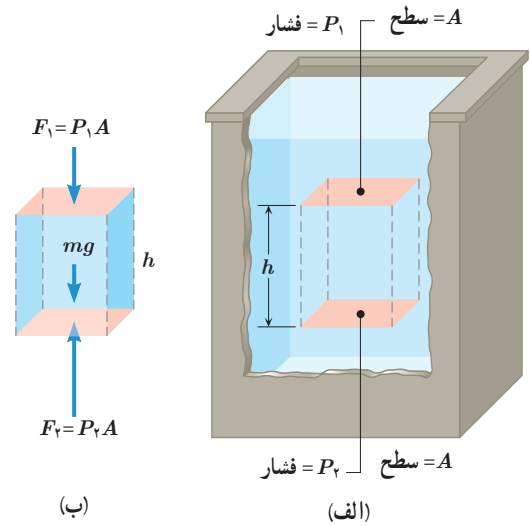
با جایگذاری  $m = \rho V = \rho Ah$  در رابطه اخیر و حذف  $A$  از طرفین تساوی داریم:

$$P_2 = P_1 + \rho gh \quad (2-3)$$

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

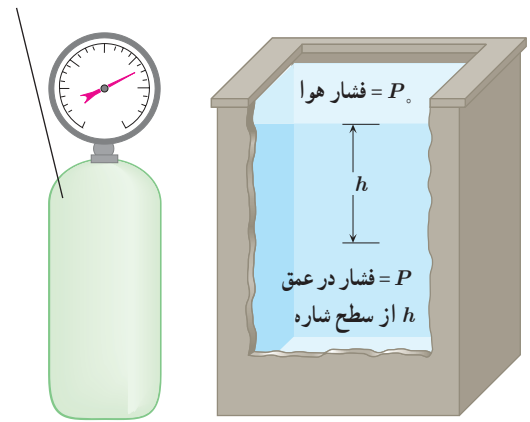
$$P = P_1 + \rho gh \quad (3-3)$$

این رابطه نشان می‌دهد فشار در عمق  $h$  از سطح شاره، به اندازه  $\rho gh$  از فشار  $P_1$  در سطح شاره بیشتر است. همان‌طور که خواهیم دید فشار در سطح دریای آزاد، حدود  $10^5 \times 10^3 \text{ Pa}$  پاسکال (Pa) است و به آن ۱ اتمسفر (atm) نیز می‌گویند. رابطه‌های ۲-۳ و ۳-۳ برای همه شاره‌های ساکن و در حال تعادل کاربرد دارد. یعنی هم برای مایع‌ها و هم برای گازها می‌توان از آن استفاده کرد. مثلاً می‌توان اختلاف فشار آب در عمق‌های متفاوت یک اقیانوس یا اختلاف فشار هوای بالا و پایین یک ساختمان را با استفاده از این رابطه‌ها حساب کرد. با توجه به اینکه چگالی گازها خیلی کم است، در محفظه‌های کوچک گاز، مانند شکل ۱۷-۳، اختلاف فشار در نقاط مختلف داخل محفظه ناچیز است.



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

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

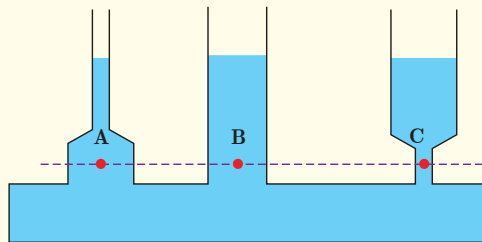


شکل ۱۷-۳

شکل ۱۶-۳

### پرسش ۳-۵

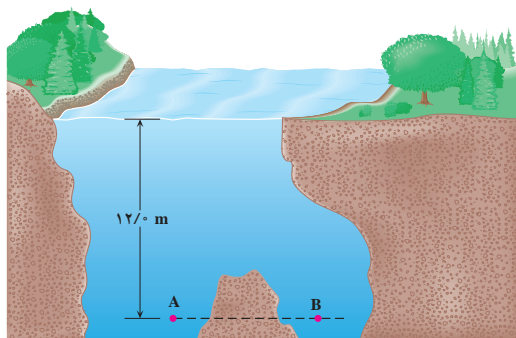
در علوم سال نهم دیدید که فشار در نقاط هم‌تراز یک مایع ساکن مانند نقاط A، B و C در شکل یکسان است و به شکل ظرف بستگی ندارد. سازگاری این موضوع را با رابطه ۳-۳ توضیح دهید.



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



مثال ۳-۳



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

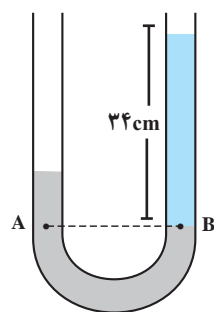
**پاسخ:** با توجه به رابطه ۳-۳، فشار در نقطه A برابر است با:

$$P = P_0 + \rho gh = 1.01 \times 10^5 (\text{Pa}) + (1000 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ N/kg})(12.0 \text{ m}) = 2.19 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

مثال ۳-۴

در یک لوله U شکل، مقداری جیوه قرار دارد. در شاخه سمت راست لوله آن قدر آب می‌ریزیم تا ارتفاع آب به  $34 \text{ cm}$  برسد (شکل روبه‌رو). اختلاف ارتفاع جیوه در دو شاخه چند سانتی‌متر است؟ (مقیاس‌ها در این شکل واقعی نیست.)



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

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

$$(13600 \text{ kg/m}^3) \times h_m = (1000 \text{ kg/m}^3) \times 34 \text{ cm} \Rightarrow h_m = 2.5 \text{ cm}$$

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

مثال ۳-۵



اختلاف بین فشار هوای بالا و پایین برج آزادی، با ارتفاع  $45$  متر، چقدر است؟ چگالی هوا را تقریباً  $1.0 \text{ kg/m}^3$  بگیرید.

**پاسخ:** با توجه به رابطه ۳-۲ داریم:

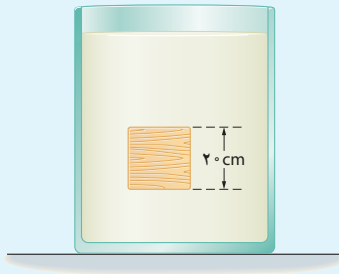
$$P_2 = P_1 + \rho gh \Rightarrow P_2 - P_1 = \rho gh$$

$$= (1.0 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ N/kg})(45 \text{ m}) = 441 \text{ Pa} \approx 4.4 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

## تمرین ۲-۳

شناگری در عمق ۵/۰ متری از سطح آب دریاچه‌ای شنا می‌کند. فشار در این عمق چقدر است؟ اگر مساحت پرده گوش را یک سانتی متر مربع ( $1\text{ cm}^2$ ) فرض کنیم، بزرگی نیرویی که به پرده گوش این شناگر وارد می‌شود چند نیوتون است؟ فشار هوای محیط را  $10^5\text{ Pa}$  بگیرد.

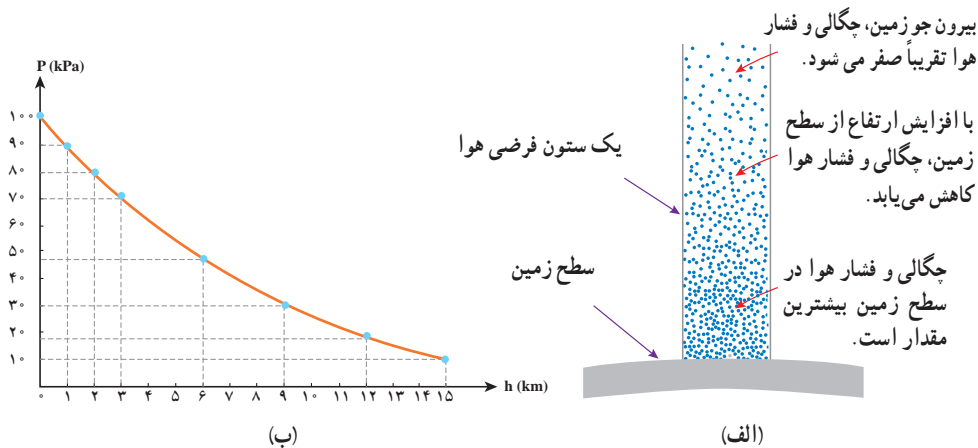
## تمرین ۳-۳



جسمی مکعبی به طول ضلع  $20\text{ cm}$  درون شاره‌ای غوطه‌ور و در حال تعادل است (شکل روبه رو). فشار در بالا و زیر جسم به ترتیب برابر  $10^5$  و  $10^6$  کیلوپاسکال است.

چگالی شاره چند کیلوگرم بر متر مکعب است؟ (راهنمایی: از رابطه ۲-۳ استفاده کنید.)

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



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



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

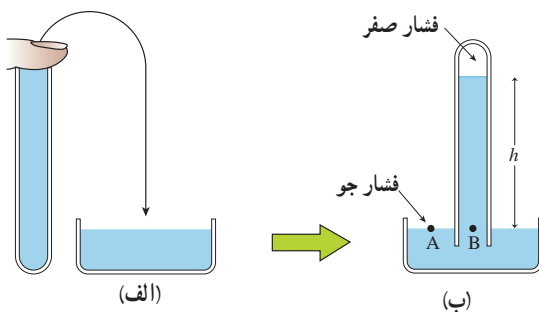
$$1 \text{ bar} = 1/0000 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1/0000 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

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

فشارسنج در سال ۱۶۴۳ میلادی توسط توریچلی فیزیک‌دان ایتالیایی اختراع شد.

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



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

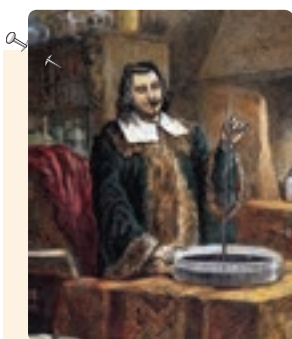
فشار در نقطه B برابر  $\rho gh$  و در نقطه A برابر  $P_0$  است. چون نقاط A و B هم‌ترازند، می‌توان نوشت:

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

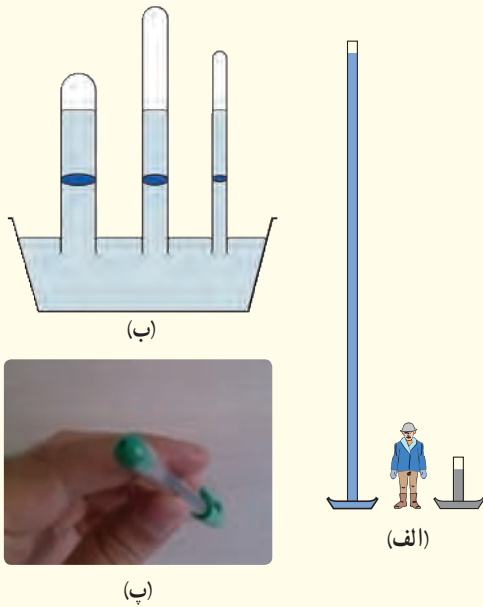
بنابراین فشارسنج هوا، فشار جو را به طور مستقیم از روی ارتفاع ستون جیوه نشان می‌دهد که در سطح دریای آزاد این ارتفاع حدود  $760 \text{ mm}$  است. به همین دلیل در بسیاری موارد فشار اندازه‌گیری شده برحسب میلی‌متر جیوه (mmHg) یا سانتی‌متر جیوه (cmHg) بیان می‌شود.<sup>۱</sup>

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

۲- به افتخار توریچلی،  $1 \text{ mmHg}$  را یک تور (torr) می‌نامند.



اونجلیستا توریچلی (۱۶۴۷-۱۶۰۸م) یکی از فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانان ایتالیایی و از شاگردان گالیله بود. هرچند توریچلی 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 جیوه درون لوله، خلأ نسبی ایجاد کند که به خلأ توریچلی شناخته می‌شود.

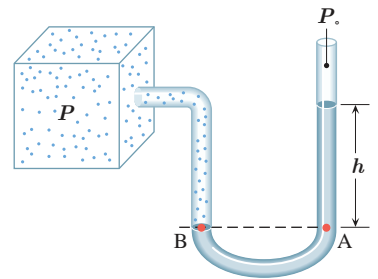


الف) توضیح دهید چرا تورچلی در آزمایش خود ترجیح داد به جای آب از جیوه استفاده کند؟ (ممکن است شکل الف بتواند در پاسخ به این پرسش به شما کمک کند.)

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

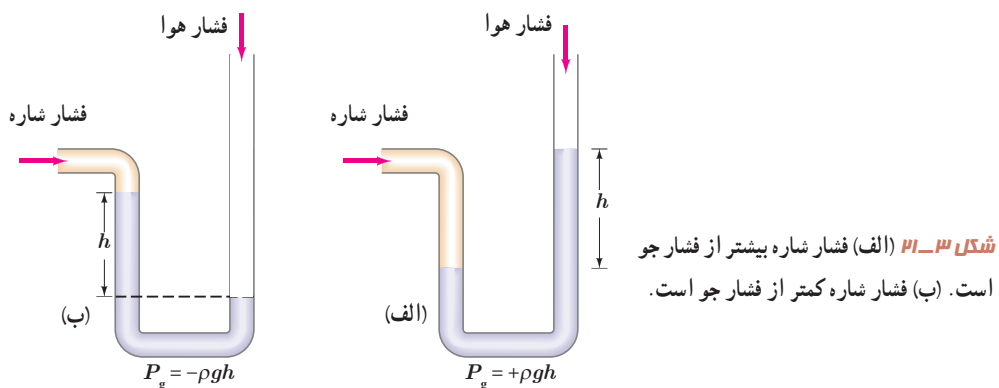
پ) در قلم خودکار، جوهر از طریق یک لوله وارد نوک قلم شده و در آنجا توسط یک گوی فلزی ضد زنگ غلتان، روی ورقه کاغذ پخش می‌شود. در بدنه لاکمی یا درپوش بالایی این نوع قلم‌های خودکار، سوراخ‌ریزی ایجاد می‌کنند (شکل پ). دلیل این کار را توضیح دهید.

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

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


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

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



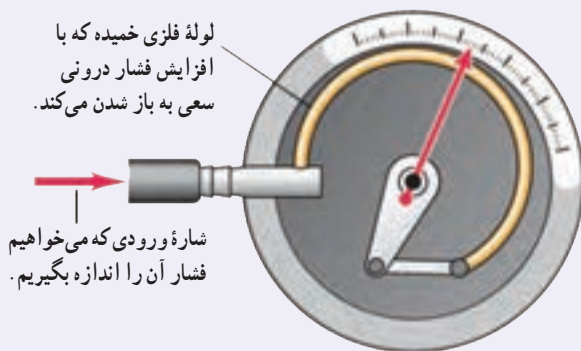
**شکل ۳-۲۱:** الف) فشار شماره بیشتر از فشار جو است. ب) فشار شماره کمتر از فشار جو است.

۱- نمایه g از سر حرف واژه gauge به معنای پیمانه (سنجه) گرفته شده است.

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

فناوری و کاربرد

**فشارسنج بوردون:** بسیاری از فشارسنج‌ها برای اندازه‌گیری فشار یک شاره، از یک لوله خمیده یک سر بسته و قابل انعطاف استفاده می‌کنند (شکل روبه‌رو). انتهای این لوله به عقربه‌ای متصل است که فشار را روی صفحه‌ای مدرج نشان می‌دهد. تغییر فشار پیمانه‌ای شاره درون لوله سبب تغییر شکل لوله و در نتیجه حرکت عقربه روی صفحه مدرج می‌شود. این فشارسنج‌ها که به فشارسنج بوردون شناخته می‌شوند معمولاً برای اندازه‌گیری فشار در مخزن‌های گاز و همچنین اندازه‌گیری فشار باد لاستیک وسیله‌های نقلیه به کار می‌روند<sup>۲</sup>.



مثال ۳-۶

یکی دیگر از یكاهای 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 ۷۶۰/۰ m تعریف می‌شود (در دمای ۰°C و به ازای  $g = ۹/۸ N/kg$ ). هر اتمسفر، معادل چند پاسکال است؟ چگالی جیوه را برابر  $۱۳۶۰۰ kg/m^3$  بگیرید.

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

$$P_0 = \rho gh = (۱۳۶۰۰ kg/m^3)(۹/۸ N/kg)(۰/۷۶m) = ۱۰۱۲۹۳ Pa \approx ۱/۰ \times ۱۰^5 Pa$$

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

مثال ۳-۷

عمیق‌ترین قسمت خلیج فارس با عمقی حدود ۹۳ متر در نزدیکی جزیره تنب بزرگ قرار دارد. فشار پیمانه‌ای در این عمق چند پاسکال است؟ چگالی آب خلیج فارس را  $۱۰۲۸ kg/m^3$  بگیرید.

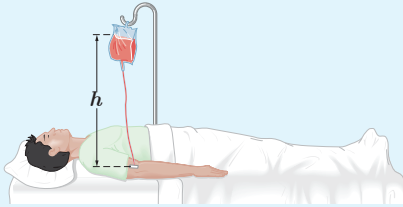
**پاسخ:** همان‌طور که دیدیم، فشار پیمانه‌ای برابر اختلاف فشار درون شاره با فشار جو است. به این ترتیب داریم:

$$P - P_0 = \rho gh = (۱۰۲۸ kg/m^3)(۹/۸ N/kg)(۹۳m) = ۹۳۶۹۱۹ Pa \approx ۹/۴ \times ۱۰^5 Pa$$

۱- Bourdon gauge

۲- در اغلب این فشارسنج‌ها از یکای psi برای نشان دادن فشار استفاده می‌کنند به طوری که  $۱ psi \approx ۶۹۰ Pa$  است. (psi به معنای پوند-نیرو بر اینچ مربع pound-force per square inch است.)

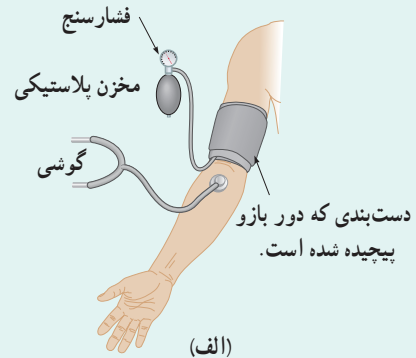
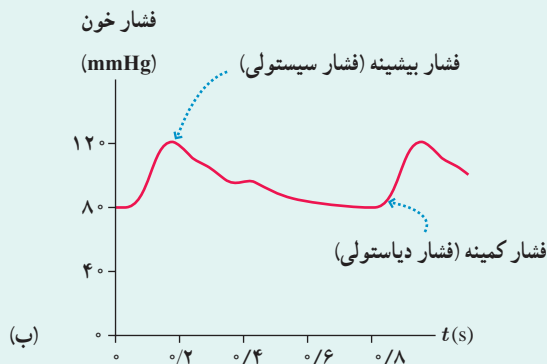
## تمرین ۳-۵



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

## خوب است بدانید

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



## ۳-۵ شناوری و اصل ارشمیدس

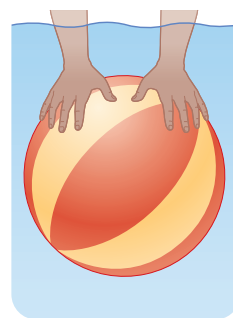
ممکن است بارها تجربه کرده باشید که وقتی تویی را وارد آب می‌کنید، پس از حذف نیروی دست، توپ به طرف بالا جهیده و روی آب شناور می‌شود (شکل ۳-۲۲ الف). همچنین شناور ماندن کشتی‌های فولادی روی آب، پدیده‌ای آشناست با وجود آنکه می‌دانیم چگالی فولاد حدود ۸ برابر چگالی آب است (شکل ۳-۲۲ ب). افزون بر اینها، جابه‌جا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



(ب)



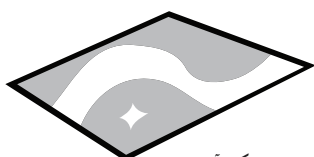
(ب)



(الف)

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

### فعالیت ۳-۹

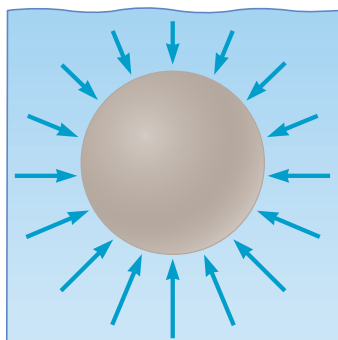


پوش‌برگ آلومینیومی



پوش‌برگ آلومینیومی مجاله‌شده

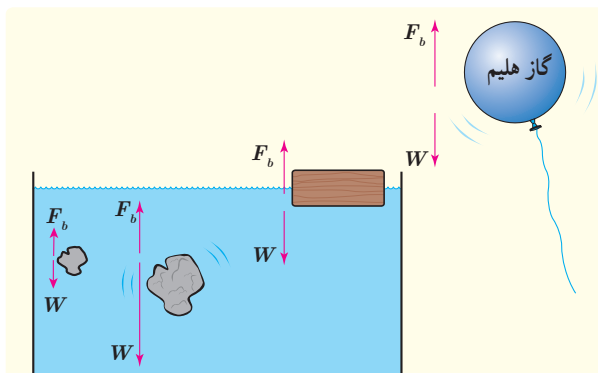
درون یک ظرف مقداری آب بریزید. یک پوش‌برگ (فویل) آلومینیومی به ابعاد تقریبی  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  اختیار کنید و آن را مجاله کنید. پیش‌بینی کنید با قرار دادن پوش‌برگ مجاله شده روی سطح آب، چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید. پوش‌برگ دیگری با همان ابعاد اختیار کنید و به جای مجاله کردن، آن را چندین بار (دست کم ۵ بار) روی هم تا کنید. اگر این پوش‌برگ چند لایه را، روی سطح آب قرار دهید، پیش‌بینی کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ آزمایش را انجام دهید. پیش‌بینی‌ها و نتایج مشاهده (آزمایش) خود را در گروهتان به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.



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

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

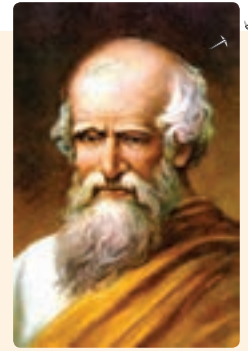
### پرسش ۳-۷



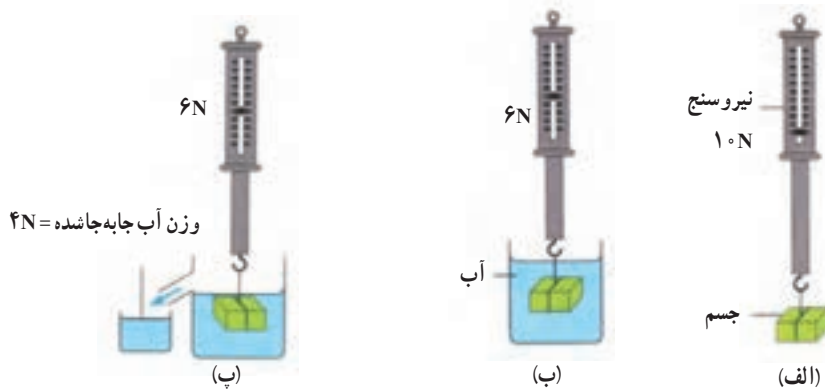
در شکل روبه‌رو، نیروی شناوری  $F_b$  و نیروی وزن  $W$  وارد بر چند جسم نشان داده شده است. با توجه به نیروی خالص وارد بر هر جسم، وضعیت آن را به کمک یکی از واژه‌های شناوری، غوطه‌وری، فرورفتن و بالارفتن توصیف کنید.

اصل ارشمیدس را به سادگی می‌توان به طور تجربی بررسی کرد. شکل ۳-۲۴ الف یک جسم فلزی آویزان شده به یک نیروسنج فنری را نشان می‌دهد که وزن آن  $10$  نیوتون است. وقتی این جسم مطابق شکل ۳-۲۴ ب به طور کامل درون آب قرار می‌گیرد، نیروسنج فنری عدد  $6$  نیوتون را نشان می‌دهد. در واقع این کاهش  $4$  نیوتونی عددی که نیروسنج فنری نشان می‌دهد، ناشی از نیروی شناوری است که از طرف شماره به جسم وارد شده است.

اگر ظرفی لوله‌دار مطابق شکل ۳-۲۴ پ تهیه کنید به طوری که تا سطح لوله دارای آب باشد، با فرو کردن جسم درون آن، آب اضافی از طریق لوله به ظرف دیگری می‌ریزد. وزن آب خارج شده  $4$  نیوتون است که دقیقاً برابر نیروی شناوری است که از طرف آب به جسم وارد می‌شود.



ارشمیدس (۲۱۲-۲۸۷ 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 در برگزیده‌ی نه قضیه است. ارشمیدس این قضایا را بر اساس برهان خلف 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 آرماتی‌سازی و ساده‌سازی پدیده‌ها بهره می‌گرفت.



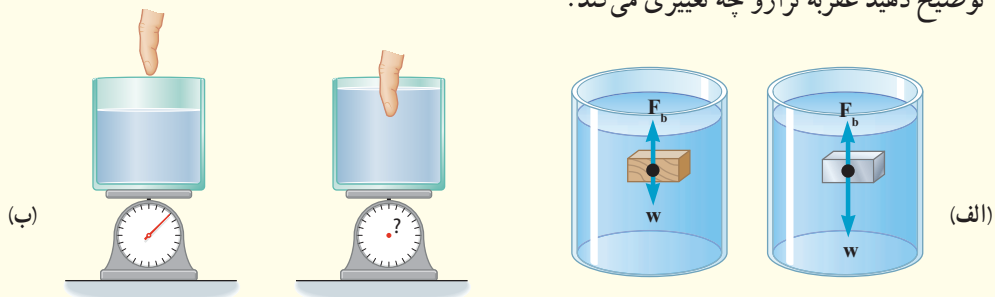
شکل ۳-۲۴ آزمایشی ساده برای تحقیق اصل ارشمیدس

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

وقتی تمام یا قسمتی از یک جسم در شماره‌ای فرو رود، شماره نیرویی بالاسو بر آن وارد می‌کند که با وزن شماره جابه‌جا شده توسط جسم برابر است.<sup>۱</sup>

### پرسش ۳-۸

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



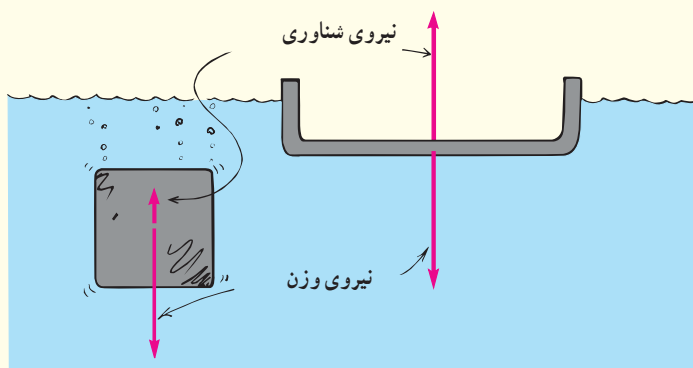
۱- حل هرگونه مسئله عددی مبتنی بر این بیان، خارج از اهداف برنامه درسی کتاب است. در ارزشیابی از این قسمت، تنها پرسش‌های توصیفی و فعالیت‌های عملی می‌تواند مطرح شود.



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

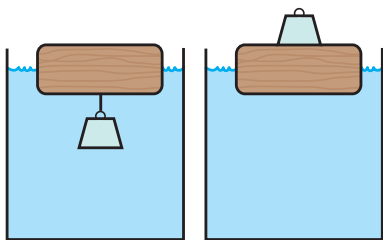


(ت)



(پ)

### فعالیت ۳-۱۰

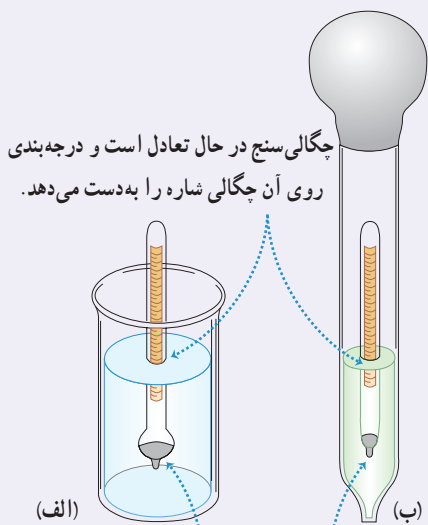


(ب)

(الف)

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

### فناوری و کاربرد



چگالی سنج در حال تعادل است و درجه‌بندی روی آن چگالی شاره را به دست می‌دهد.

(الف)

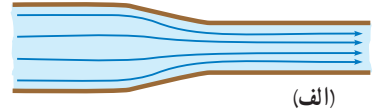
(ب)

گلوله‌های سربی باعث می‌شود تا چگالی سنج به طور قائم شناور بماند.

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

## ۳-۶ شاره در حرکت و اصل برنولی

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



(الف)



(ب)

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

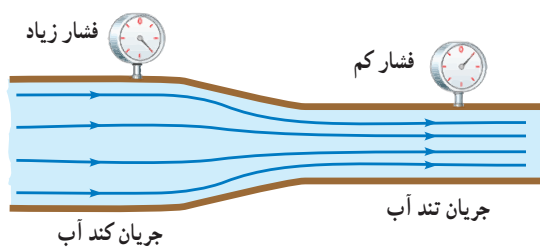


(ب)

(الف)

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

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



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

۱- معمولاً از واژه گران‌زوی (ویسکوزیته) برای اشاره به اصطکاک داخلی در شاره‌ها استفاده می‌شود.

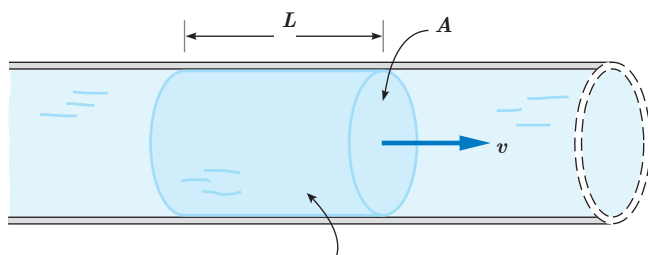


دانیل برنولی (۱۷۸۲-۱۷۰۰م) یکی از فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانان نامدار سوئیس است. پدر و برخی دیگر از اعضای فامیل وی، چهره‌های سرشناسی در دانش ریاضیات زمان خود بودند. هرچند برنولی در ریاضیات، پزشکی و آمار تلاش‌هایی داشته است اما دلیل اصلی شهرت وی، اصلی موسوم به اصل برنولی است که در اثر معروفش به نام هیدرودینامیکا به آن پرداخته است. این اصل امکان درک گستره وسیعی از پدیده‌های مختلف را تا کنون در اختیار بشر قرار داده است.

دانیل برنولی، فیزیک‌دان و ریاضی‌دان سوئیس، 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 شارش شاره:** شکل ۳-۲۸ جریان یکنواخت شاره‌ای را نشان می‌دهد که با تندی  $v$  درون لوله‌ای با سطح مقطع  $A$  در حرکت است.



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

حجم این بخش شاره برابر  $AL$  است.

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

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

توجه کنید که نسبت مسافت به زمان ( $L/t$ ) در حرکت یکنواخت شاره، برابر تندی شاره  $v$  است. **معادله پیوستگی:** شکل ۳-۲۹ 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.

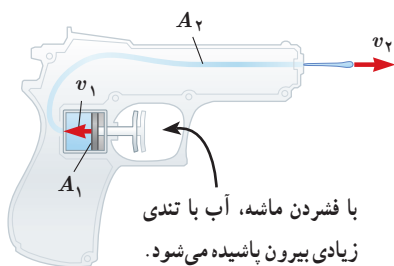


**شکل ۳-۲۹** در یک شاره تراکم‌ناپذیر، مقدار شاره‌ای که در زمان  $t$  از سطح مقطع  $A_1$  می‌گذرد درست برابر مقدار شاره‌ای است که در همین زمان از سطح مقطع  $A_2$  می‌گذرد.

از این موضوع، به سادگی می‌توان به **معادله پیوستگی** برای شاره تراکم‌ناپذیر دست یافت که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (۶-۳)$$

## مثال ۳-۸



با فشردن ماشه، آب با تندی زیادی بیرون پاشیده می‌شود.

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

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

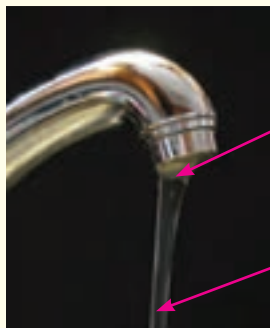
**پاسخ:** با توجه به فرض‌های مسئله، از معادله پیوستگی به سادگی می‌توان تندی خروج آب از تفنگ را به دست آورد. از معادله ۳-۶ داریم:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

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

به این ترتیب تندی خروج آب برابر  $v_2 = 0/15 \times 10^2 \text{ cm/s} = 15 \text{ cm/s}$  است.

## پرسش ۳-۹



سطح مقطع بیشتر

سطح مقطع کمتر

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

### کاربردهایی از اصل برنولی:

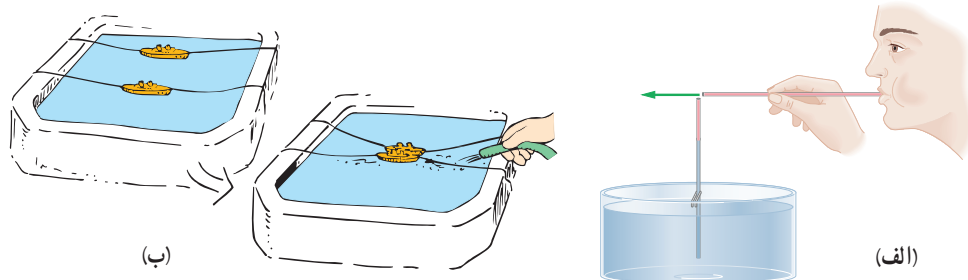
از بررسی نیروی بالابر وارده به بال‌های هواپیما گرفته تا بررسی حرکت کات‌دار توپ فوتبال و افشانه عطر، از اصل برنولی استفاده می‌شود. شکل ۳-۳۰ آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که در علوم ششم با آن آشنا شدید. وقتی یک ورق کاغذ را جلو دهانتان می‌گیرید و در سطح بالای آن می‌دمید، کاغذ به طرف بالا حرکت می‌کند. دلیل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



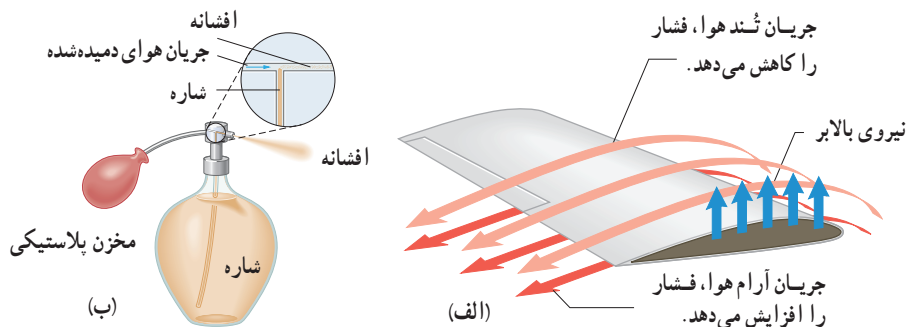
**شکل ۳-۳۰** تندی جریان هوا در بالای کاغذ بیشتر از زیر آن است. با توجه به اصل برنولی، فشار هوا در بالای کاغذ کمتر از زیر آن است.

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. مشاهده خود را گزارش کنید و دلیل آن را به کمک اصل برنولی توضیح دهید.

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



شکل ۳-۳۱ الف قسمتی از بال یک هواپیما را نشان می‌دهد. بال‌های هواپیما طوری طراحی شده‌اند که تندی هوا در بالای بال بیشتر از زیر آن است. در نتیجه، فشار هوای بالای بال، کمتر از فشار هوای زیر آن است. به این ترتیب نیروی بالابر خالصی به بال هواپیما وارد می‌شود. شکل ۳-۳۱ ب یک سم پاش 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 لوله فرو رفته در شماره می‌شود. در نتیجه شماره 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.

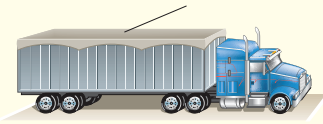


شکل ۳-۳۱ کاربرد اصل برنولی در الف) بال هواپیما برای ایجاد نیروی بالابر خالص، ب) سم پاش‌ها و شیشه‌های عطر برای افشانش سم و عطر

۱- 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.

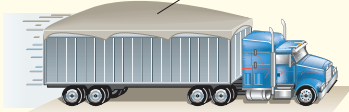
پوشش برزنتی صاف و تخت است.

کامیون در حال توقف



پوشش برزنتی پُف کرده است.

کامیون در حال حرکت



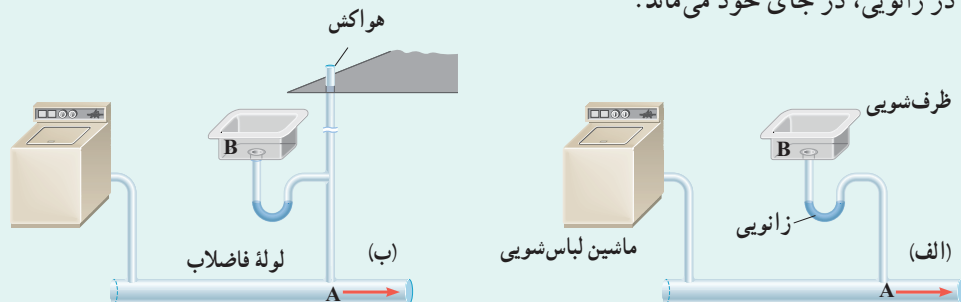
الف) روزهایی که باد می وزد، ارتفاع موج های دریا یا اقیانوس بالاتر از ارتفاع میانگین می شود. با اصل برنولی چگونه می توان افزایش ارتفاع موج را توضیح داد؟

ب) شکل روبه رو کامیونی را در دو وضعیت سکون و در حال حرکت نشان می دهد. با استفاده از اصل برنولی توضیح دهید چرا وقتی کامیون در حال حرکت است پوشش برزنتی آن پُف می کند.

### خوب است بدانید

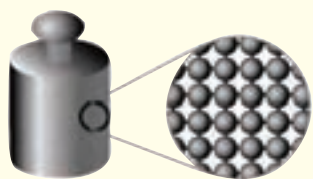
یک مثال عملی از کاربرد اصل برنولی در لوله کشی ساختمان، در شکل زیر نشان داده شده است. ابتدا فرض کنید لوله هواکش در نظر گرفته نشده باشد (شکل الف). جمع شدن آب در زانویی زیر ظرف شویی، مشابه یک درپوش عمل می کند. این درپوش، مانع از آن می شود که گاز تولید شده در لوله فاضلاب، از خروجی چاهک ظرف شویی بالا آمده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

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

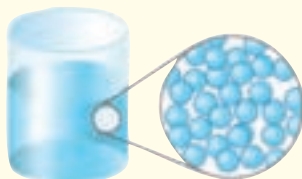


۳-۱ حالت‌های ماده

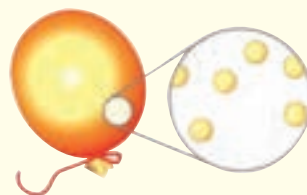
۱ دریافت خود را از شکل‌های زیر بر اساس مفاهیمی که از سه حالت معمول ماده فرا گرفته‌اید بیان کنید.



(ب)

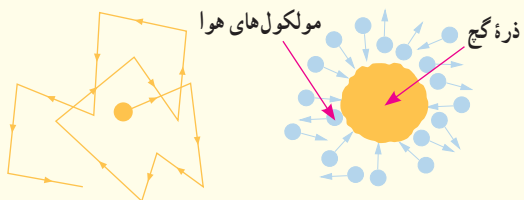


(ب)



(الف)

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



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

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

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

۴ توضیح دهید چرا

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

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

۳-۲ ویژگی‌های فیزیکی مواد در مقیاس نانو

۵ هر یک از موارد زیر را توضیح دهید.

(الف) علوم و فناوری نانو

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

(پ) تفاوت نانو ذره و نانو لایه

۳-۳ نیروهای بین مولکولی

۶ شیشه‌گران برای چسباندن تکه‌های شیشه به یکدیگر، آنها را آن قدر گرم می‌کنند که نرم شوند. این کار را با توجه به کوتاه‌برد بودن نیروی جاذبه بین مولکولی توضیح دهید.

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

(ب) شکل (ب) دو لوله موئین هم‌جنس را نشان می‌دهد که درون مایعی قرار دارند. چرا ارتفاع مایع

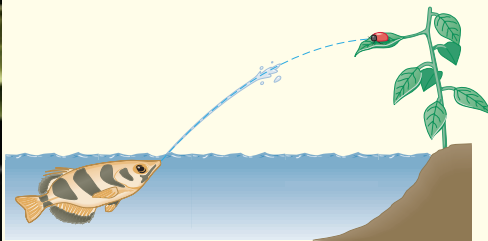
درون لوله b از لوله دیگر کمتر است؟ با توجه به شکل، نیروی هم‌چسبی مایع را با نیروی دگرچسبی مایع و لوله‌های موئین مقایسه کنید.



(ب)



(الف)



۸ تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر در کشورهای غرب ایران، پدیده 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 به حرکت درآورند در حالی که توفان‌های شدید دریایی تنها مقدار اندکی آب را به صورت قطره‌های ریز به طرف بالا می‌پاشند؟

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

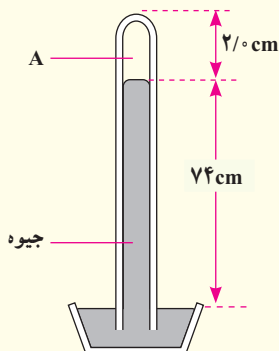
۹ نوعی ماهی به نام ماهی کمان‌گیر<sup>۱</sup> با جمع کردن آب در دهان خود و پرتاب آن به سوی حشراتی که در بیرون از آب، روی گیاهان نشسته‌اند، آنها را شکار می‌کند و می‌خورد (شکل الف). هدف‌گیری آنها به اندازه‌ای دقیق است که معمولاً در این کار اشتباه نمی‌کنند. کدام ویژگی فیزیکی آب این امکان را به ماهی کمان‌گیر برای شکار می‌دهد؟

### ۳-۴ فشار در شاره‌ها



۱۰ مساحت روزنه خروج بخار آب، روی درب یک زودپز  $4/0 \text{ mm}^2$  است (شکل روبه‌رو). جرم وزنه‌ای که روی این روزنه باید گذاشت چقدر باشد تا فشار داخل آن در  $2/0 \text{ atm}$  نگه داشته شود؟ فشار بیرون دیگ زودپز را  $1/0 \text{ atm}$  بگیرید.

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



الف) در ناحیه A چه چیزی وجود دارد؟

ب) چه عاملی جیوه را درون لوله نگه می‌دارد؟

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

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

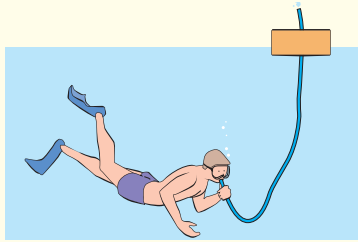
۱۲ الف) ارتفاع چهار شهر مرتفع ایران از سطح دریا، به شرح زیر است:

فریدون شهر:  $2612 \text{ m}$  سمیرم:  $2434 \text{ m}$  بروجن:  $2265 \text{ m}$  شهرکرد:  $2072 \text{ m}$

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

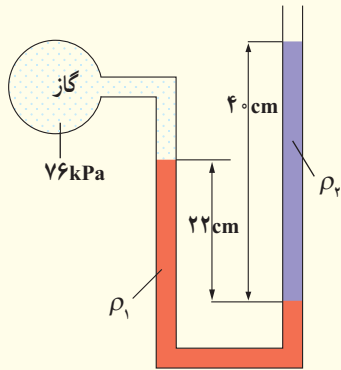
ب) چگالی میانگین هوا تا ارتفاع ۳ کیلومتری از سطح دریای آزاد حدود  $\rho = 1/0 \text{ kg/m}^3$  است. با استفاده از رابطه  $P = P_0 - \rho gh$  فشار هوا را در این شهرها حساب کنید و مقادیر به دست آمده را با نتیجه قسمت الف مقایسه کنید.



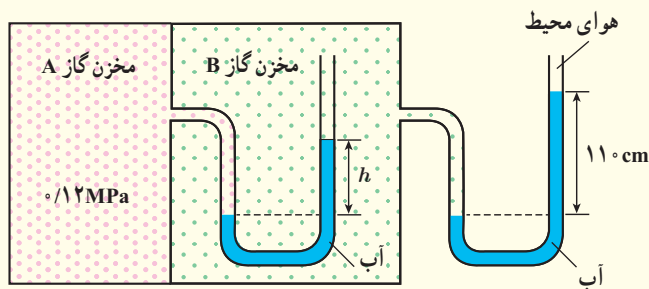


۱۳ غواص‌ها می‌توانند با قرار دادن یک سر لوله‌ای در دهان خود، در حالی که سر دیگر آن از آب بیرون است، تا عمق بیشینه‌ای در آب فرو روند و نفس بکشند (شکل روبه‌رو). با گذشتن از این عمق، اختلاف فشار درون و بیرون ریه غواص افزایش می‌یابد و غواص را ناراحت می‌کند. چون هوای درون ریه از طریق لوله با هوای بیرون ارتباط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

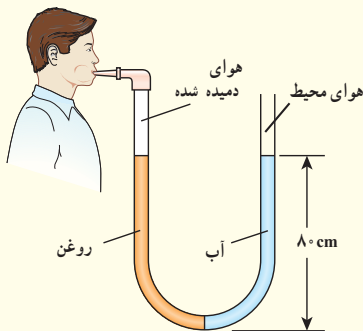
آب است. در عمق  $6/15\text{ m}$  از سطح آب، اختلاف فشار درون ریه غواص با فشار وارد بر قفسه سینه او چقدر است؟ (خوب است بدانید که غواص‌های مجهز به مخزن هوای فشرده می‌توانند تا عمق بیشتری در آب فرو روند، زیرا فشار هوای درون ریه آنها با افزایش عمق، همپای فشار آب بر سطح بیرونی بدن زیاد می‌شود.)



۱۴ درون لوله U شکلی که به یک مخزن محتوی گاز وصل شده است جیوه ( $\rho_1 = 13600\text{ kg/m}^3$ ) و مایعی با چگالی نامعلوم  $\rho_2$  وجود دارد (شکل روبه‌رو). اگر فشار هوای بیرون لوله U شکل  $101\text{ kPa}$  باشد، چگالی مایع را تعیین کنید.

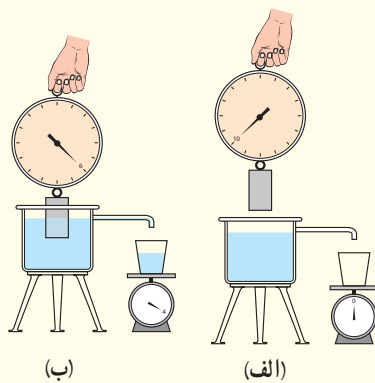


۱۵ در شکل روبه‌رو مقدار  $h$  چند سانتی‌متر است؟ فشار هوای محیط را  $101\text{ kPa}$  و چگالی آب را  $1000\text{ kg/m}^3$  بگیریید.



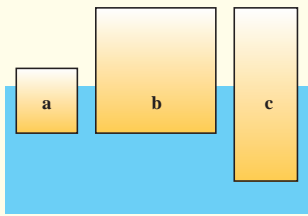
۱۶ لوله U شکلی را در نظر بگیرید که محتوی حجم مساوی از آب و روغن است (شکل روبه‌رو). با توجه به اطلاعات روی شکل، فشار پیمانه‌ای هوای درون ریه شخصی که از شاخه سمت چپ لوله درون آن دمیده، چقدر است؟ چگالی روغن را  $805\text{ kg/m}^3$  بگیریید.

### ۳-۵ شناوری و اصل ارشمیدس



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

۱۸ دریافت خود را از شکل‌های الف و ب بنویسید.

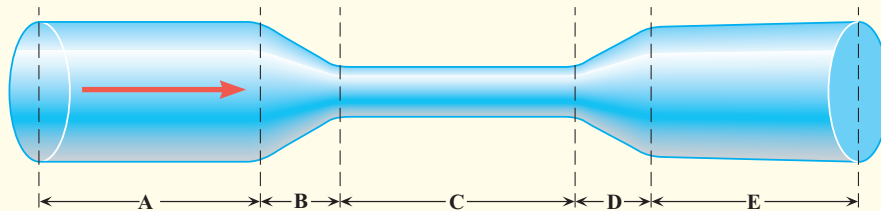


- ۱۹ سه جسم a، b و c با چگالی‌های متفاوت، مطابق شکل روبه‌رو درون آب شناورند. چگالی این سه جسم را با یکدیگر مقایسه کنید.
- ۲۰ توضیح دهید چرا نیروی شناوری برای جسمی که در یک شاره قرار دارد رو به بالاست.
- ۲۱ توضیح دهید چه موقع نیروی شناوری وارد بر یک شناگر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

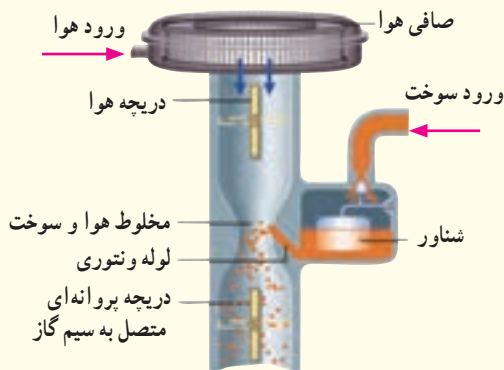
### ۳-۶ شاره در حرکت و اصل برنولی

۲۲ در لوله‌ای پر از آب مطابق شکل زیر، آب از چپ به راست در جریان است. روی این لوله ۵ قسمت (A، B، C، D و E) نشان داده شده است.

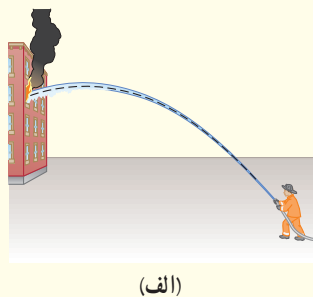
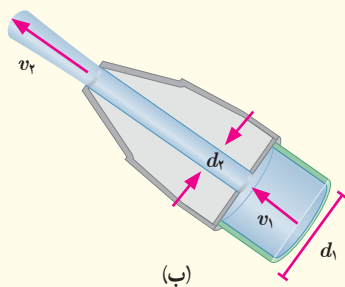
الف) در کدام یک از قسمت‌های لوله، تندی آب، در حال افزایش، در حال کاهش، یا ثابت است؟  
ب) تندی آب را در قسمت‌های A، C و E لوله با یکدیگر مقایسه کنید.



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

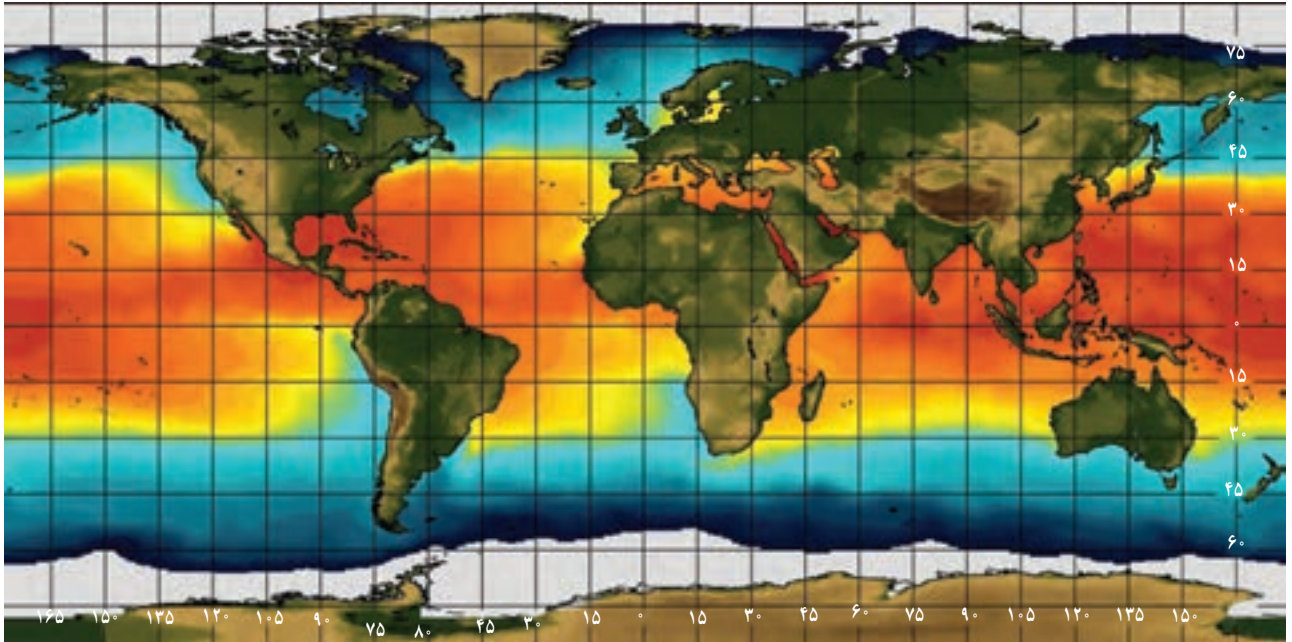


۲۴ شکل روبه‌رو کاربراتور یک موتور بنزینی قدیمی را نشان می‌دهد. حجم هوایی که وارد کاربراتور می‌شود توسط دریچه پروانه‌ای که به سیم گاز خودرو وصل شده، قابل تنظیم است. با توجه به کاربرد اصل برنولی در ساختمان یک کاربراتور، توضیح دهید چرا با فشردن بیشتر پدال گاز، دور موتور خودرو افزایش می‌یابد و خودرو می‌تواند سریع‌تر حرکت کند.



۲۵ شکل (الف) آتش‌نشانی را در حال خاموش کردن آتش از فاصله نسبتاً دوری نشان می‌دهد. نمایی بزرگ‌شده از شیر بسته‌شده به انتهای لوله آتش‌نشانی در شکل (ب) نشان داده شده است. اگر آب با تندی  $v_1 = 1/50 \text{ m/s}$  از لوله وارد شیر شود و قطر ورودی شیر  $d_1 = 9/6 \text{ cm}$  و قطر خروجی آن  $d_2 = 2/5 \text{ cm}$  باشد، تندی خروج آب را از شیر پیدا کنید.

## دما و گرما



هواشناسان براساس تصویرهای ماهواره‌ای وضعیت هوا را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از بخش‌های عمده گزارش آنها، اعلام دمای مناطق مختلف زمین است. این تصویر ماهواره‌ای، دمای آب روی سطح کره زمین را در یک روز خاص نمایش می‌دهد. رنگ‌ها نشان‌دهنده گستره دمایی از کمترین (بنفش) تا بیشترین (قرمز) است. عددهای محور افقی، طول جغرافیایی و عددهای محور عمودی عرض جغرافیایی را نشان می‌دهند.

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

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

## ۱-۴ دما و دماسنجی

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

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

**مقیاس‌های دما:** یکی از مقیاس‌های متداول دما، مقیاس دما برحسب درجه سلسیوس است. این مقیاس مبتنی بر دو نقطه ثابت است: یکی دمایی که در آن آب خالص در فشار جو متعارف (1 atm) شروع به یخ‌زدن می‌کند و دیگری دمایی که آب خالص در فشار جو متعارف در حال جوشیدن است. به نقطه اول، عدد صفر و به نقطه دوم، عدد ۱۰۰ را اختصاص می‌دهند و فاصله بین این دو را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم می‌کنند و هر قسمت را ۱ درجه می‌نامند (شکل ۲-۴). قبلاً به چنین دماسنجی، دماسنج با مقیاس سانتی‌گراد<sup>۲</sup> گفته می‌شد. یکای درجه سلسیوس را با نماد °C، و دما برحسب درجه سلسیوس را معمولاً با  $\theta$  نمایش می‌دهند.

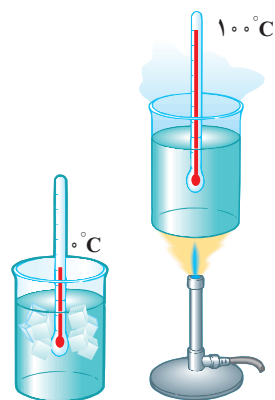
از سال ۱۹۵۴ میلادی، یکای دیگری به نام کلونین به عنوان مقیاس بین‌المللی دما انتخاب شد. این یکا، با نماد K نمایش داده می‌شود. دما برحسب کلونین را معمولاً با  $T$  نشان می‌دهند. رابطه میان دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلونین به صورت زیر است:

$$T = \theta + 273/15 \quad (1-4)$$

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



شکل ۱-۴ یک نمونه دماسنج الکی

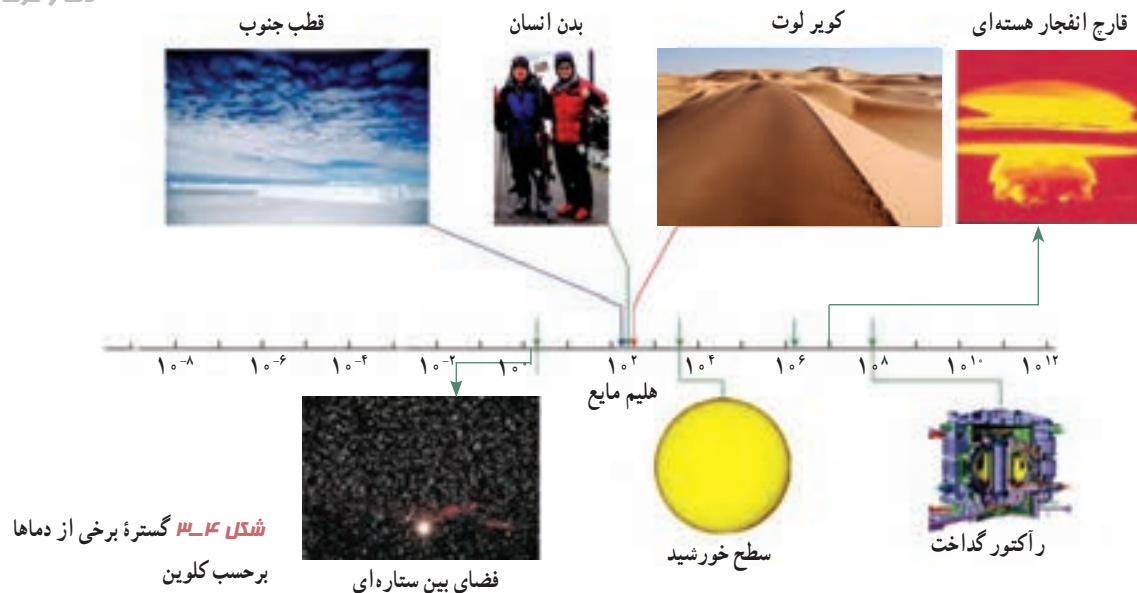


شکل ۲-۴ شکلی طرح‌وار از مقیاس‌بندی دما

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

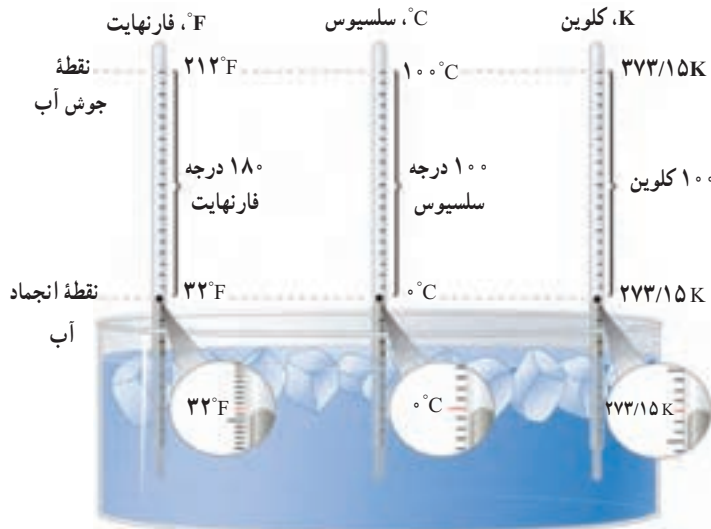
۲- برگرفته از centi به معنای یک‌صدم و grade به معنای درجه.

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



تمرین ۱-۴

نشان دهید که تغییر دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلون با هم برابر است ( $\Delta T = \Delta \theta$ ).



شکل ۴-۴ مقایسهٔ یكاهای فارنهایت، سلسیوس و کلون

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

تمرین ۲-۴

الف) دمای بدن یک انسان سالم تقریباً  $37^\circ\text{C}$  است. این دما را بر حسب کلون و فارنهایت بنویسید.  
 ب) گرم‌ترین نقطهٔ روی زمین، ناحیه‌ای در کویر لوت است که دمای آن تا حدود  $70^\circ\text{C}$  و سردترین نقطه در قطب جنوب است که دمای آن تا  $-89^\circ\text{C}$  گزارش شده است. این دماها را بر حسب کلون و فارنهایت به دست آورید.

فعالیت ۱-۴

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

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



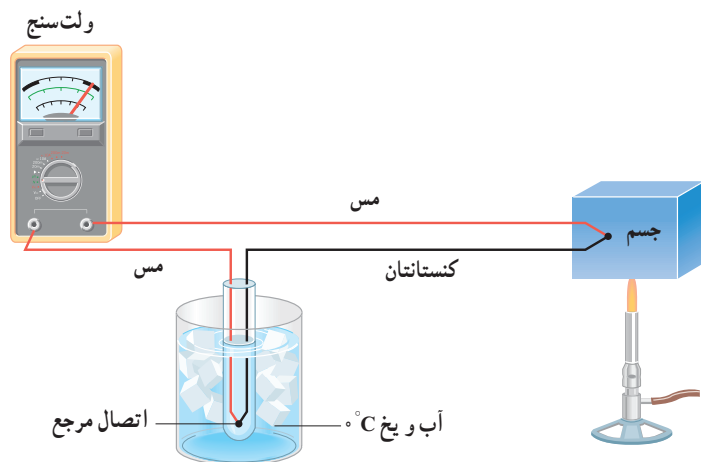
(ب) دماسنج تابشی که بر اساس آشکارسازی شدت تابش گرمایی کار می‌کند.



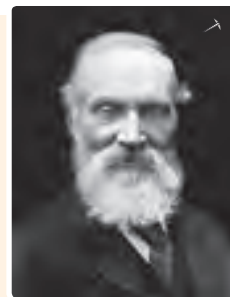
(الف) برخی از دماسنج‌ها که در اطراف خود مشاهده می‌کنید.

#### شکل ۴-۵

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



شکل ۴-۶ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل



#### ویلیام تامسون کلوین<sup>۲</sup>

ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و مهندس بریتانیایی در سال 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 ریاضی وار الکتریسته و نیز فرمول‌بندی قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام داد و نقشی مهم در احیای رشته فیزیک در عصر مدرن ایفا کرد. با این حال، عمده شهرت کلوین به خاطر تعیین دقیق صفر مطلق برابر با  $273/15^{\circ}\text{C}$  است و این در حالی است که پیش از او *سدی کارنوی* فرانسوی در سال ۱۸۲۴، یعنی همان سالی که کلوین زاده شد، مقدار  $267-$  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 به خاطر دستاوردهای علمی خود از سال ۱۸۹۲ به *لُرد کلوین* ملقب شد و اولین دانشمند بریتانیایی نام‌گرفت که به مجلس *لُردها* راه یافت. کلوین در سال ۱۹۰۷ م. در سن ۸۳ سالگی در اسکاتلند دیده از جهان فرو بست.

۱- Standard Thermometer

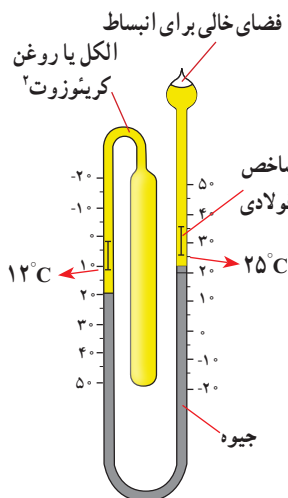
۲- William Thomson Baron Kelvin



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

مطابق این شکل، دو سیم رسانای غیر هم‌جنس مانند مس و کنستانتان از طرفی در دمای ذوب یخ نگه‌داشته شده، و از طرف دیگر در مکانی به هم متصل‌اند که می‌خواهیم دمای آن را به‌دست آوریم. این مجموعه با سیم‌های مسی رابط به یک ولت‌سنج بسته می‌شود. با تغییر دمای محل مورد اندازه‌گیری، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد، تغییر می‌کند. اگر آزمایش را چندین بار و برای دماهای متفاوت تکرار کنیم، می‌توانیم ولتاژهای مربوط به هر دمایی را مشخص کنیم. گستره دماسنجی یک ترموکوپل به جنس سیم‌های آن بستگی دارد؛ مثلاً در یکی از انواع ترموکوپل‌ها که جنس سیم‌ها از آلیاژهای خاصی<sup>۱</sup> است، گستره دماسنجی از  $27^{\circ}\text{C}$  تا  $1372^{\circ}\text{C}$  است. مزیت ترموکوپل این است که به دلیل جرم کوچک محل اتصال، خیلی سریع با دستگاهی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود به حالت تعادل گرمایی می‌رسد و به علاوه می‌تواند در مدارهای الکترونیکی به کار رود که در بسیاری از وسایل صنعتی، گرمایشی و سرمایشی یافت می‌شود. شکل ۷-۴ روشی از اندازه‌گیری دما با دماسنج‌هایی از این دست را نشان می‌دهد.

## فعالیت ۲-۴



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

## ۲-۴ انبساط گرمایی



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

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

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

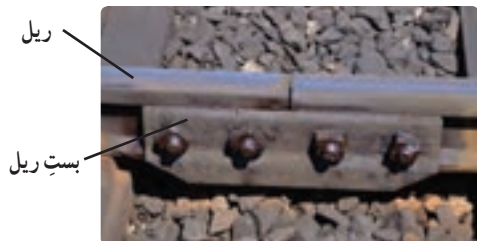
۲- creosote

## پرسش ۴-۱

الف) چرا بهتر است قفل و کلید یک در، هم جنس باشند؟  
 ب) چرا در برخی از فصل‌های سال، بعضی از درها در چارچوب خود گیر می‌کنند؟

بیشتر اجسام با افزایش دما حجمشان زیاد و با کاهش دما حجمشان کم می‌شود. همان‌طور که دیدیم این پدیده اساس ساخت بعضی از دماسنج‌هاست. بی‌توجهی به پدیده انبساط در ساختن پل‌ها، ساختمان‌ها، خط‌آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

## فعالیت ۴-۳



(الف)



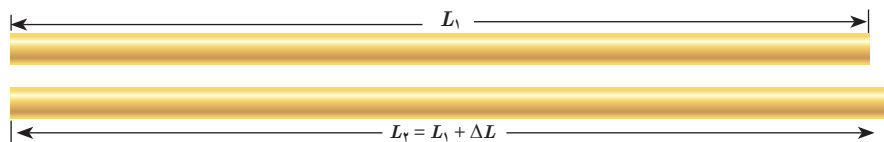
(ب)

۱) شکل (الف) تصویری واقعی از دو قسمت متوالی خط‌آهن (ریل راه‌آهن)‌های قدیمی را در گذشته نشان می‌دهد. اگر فاصله خالی بین این دو قسمت به حد کافی زیاد نمی‌بود، چه مشکلی پیش می‌آمد؟

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

**انبساط طولی:** میله‌ای فلزی به طول اولیه  $L_1$  را در نظر بگیرید. اگر دمای میله را به اندازه  $\Delta T$

افزایش دهیم، تجربه نشان می‌دهد که طول میله به اندازه  $L_2 = L_1 + \Delta L$  افزایش می‌یابد (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹ انبساط گرمایی

میله‌ای به طول اولیه  $L_1$

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هرچه تغییر دمای میله فلزی بیشتر باشد، افزایش طول بیشتر است و هرچه طول اولیه میله بزرگ‌تر باشد، به ازای یک تغییر دمای مشخص افزایش طول بیشتر خواهد بود. همچنین اگر دمای دو میله هم‌اندازه که جنس‌های آنها با هم متفاوت است را به یک اندازه افزایش دهیم، میزان افزایش طول آنها متفاوت است. بنابراین، در تغییرات دمایی به نسبت کوچک،  $\Delta L$  را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \quad (۴-۲)$$

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

در رابطه ۴-۲،  $\Delta L$  و  $L_1$  بر حسب متر (m)،  $\Delta T$  بر حسب کلوین (K) یا درجه سلسیوس ( $^{\circ}\text{C}$ ) و

از آنجا یکای  $\alpha$ ، بر کلوین ( $1/\text{K}$ ) یا بر درجه سلسیوس ( $1/^{\circ}\text{C}$ ) تعیین می‌شود.



ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۱-۴ داده شده است. توجه کنید که مقادیر داده شده برای  $\alpha$  در جدول بسیار کوچک است. همچنین ضریب انبساط طولی  $\alpha$  علاوه بر جنس ماده، به دما نیز اندکی وابسته است، اما به دلیل اینکه این وابستگی ناچیز است، معمولاً آن را در محاسبات معمولی نادیده می‌گیریم.

جدول ۱-۴ ضریب انبساط طولی برخی اجسام			
ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$	ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$	ماده
$17 \times 10^{-6}$	مس	$1/2 \times 10^{-6}$	الماس
$19 \times 10^{-6}$	برنج	$3/2 \times 10^{-6}$	شیشه پیرکس
$23 \times 10^{-6}$	آلومینیم	$9-12 \times 10^{-6}$	شیشه معمولی
$29 \times 10^{-6}$	سرب	$10-13 \times 10^{-6}$	فولاد
$51 \times 10^{-6}$	یخ (در $^{\circ}C$ )	$10-14 \times 10^{-6}$	بتون

### مثال ۱-۴

طول یک پل معلق<sup>۱</sup> (شکل الف)، در پایین‌ترین دمای منطقه ۱۱۵۸ m است. این پل از نوعی فولاد با  $\alpha = 13 \times 10^{-6} / ^{\circ}C$  ساخته شده است. فرض کنید کمترین دمای ممکن  $5^{\circ}C$  - و بیشترین دمای ممکن  $5^{\circ}C$  + باشد. بیشترین تغییر طول ممکن پل چقدر است؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = (13 \times 10^{-6} / ^{\circ}C)(1158m)(10^{\circ}C) = 1/5m$$

تغییر طول ۱/۵ m مقدار نسبتاً زیادی است. بدیهی است که در عمل نمی‌توان فضایی خالی به طول ۱/۵ m را برای این تغییر طول روی پل در نظر گرفت. برای رفع این مشکل از تعدادی بست/انبساطی/نگشتی<sup>۲</sup> که از جنس فلز هستند استفاده می‌کنند. شکل (ب)، نوعی از این بست‌ها و شکل (پ)، نمونه‌ای دیگر از این بست‌ها را نشان می‌دهد.



(پ) نمونه‌ای دیگر از بست‌های انبساطی



(ب) نمونه‌ای از بست‌های انبساطی



(الف) تصویری از یک پل معلق

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

۲- Finger Expansion Joint

## آزمایش ۴-۱



**هدف:** اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی  
**وسایله‌های موردنیاز:** دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی، چند لوله فلزی توخالی، ارلن با لوله جانبی و درپوش، لوله لاستیکی، دماسنج، مجموعه پایه و گیره و چراغ الکلی.  
**شرح آزمایش:**

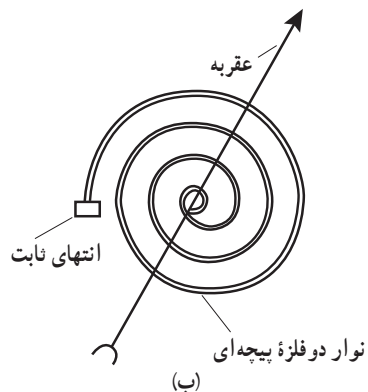
- ۱- طول لوله توخالی موردنظر را اندازه بگیرید ( $L_1$ ) و لوله را روی دستگاه نصب کنید.
- ۲- در ارلن مقداری آب بریزید و درپوش آن را بگذارید.
- ۳- دمای محیط را بخوانید ( $\theta_1$ ) و دماسنج را در جای نشان داده شده قرار دهید.
- ۴- ارلن را گرما دهید تا آب به جوش آید.
- ۵- آن قدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لوله توخالی کاملاً گرم شود و سپس دمای دماسنج را بخوانید ( $\theta_2$ ).
- ۶- افزایش طول میله توخالی را با ریزسنج متصل به دستگاه اندازه بگیرید ( $\Delta L$ ).
- ۷- با استفاده از رابطه ۴-۲ ضریب انبساط طولی را به دست آورید.
- ۸- می‌توانید این آزمایش را برای میله‌های توخالی دیگر، تکرار کنید.

### دماسنج نواری دوفلزه: نوار دوفلزه (بی‌متال<sup>۱</sup>) از دو تیغه فلزی متفاوت، مانند برنج و آهن ساخته

شده است که سرتاسر به هم جوش داده شده یا پرچ شده‌اند. هرگاه این نوار، گرم یا سرد شود، نوار مانند شکل ۴-۱۰ (الف) خم می‌شود (شکل با اندکی اغراق رسم شده است). از این ویژگی می‌توان برای دماسنجی و ساختن دماسنج استفاده کرد. به این نوع دماسنج‌ها، دماسنج نواری دوفلزه گفته می‌شود. شکل ۴-۱۰ (ب)، طرحی از این دماسنج را که در آن از یک نوار دوفلزه پیچیده‌ای استفاده شده است، نشان می‌دهد و شکل ۴-۱۰ (پ)، تصویری واقعی از این نوع دماسنج است.



(ب)



(ب)

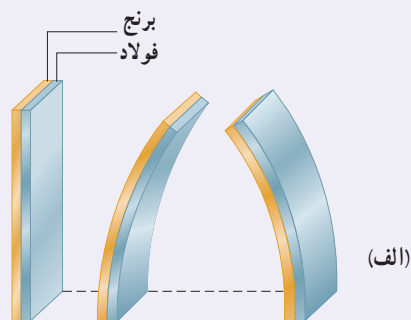
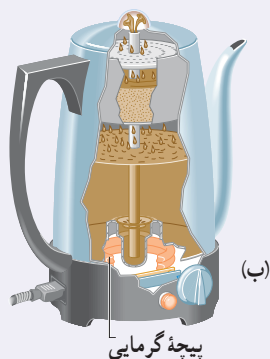


(الف)

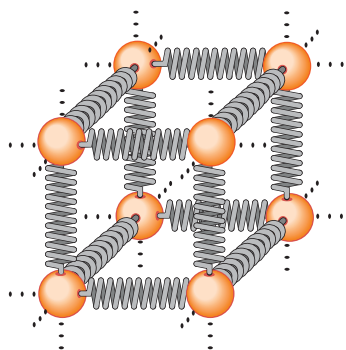
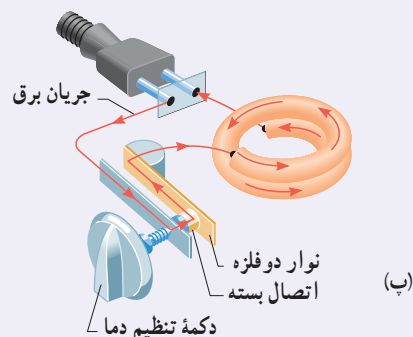
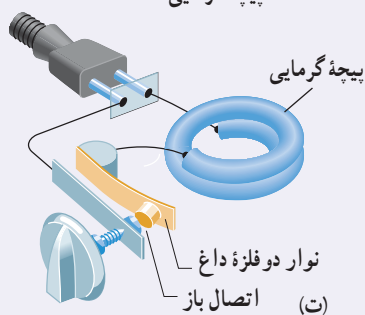
**شکل ۴-۱۰ (الف)** با گرم و سرد شدن، نوار دوفلزه در جهت‌های مخالفی خم می‌شود.

(ب) یک نوار دوفلزه پیچیده‌ای (پ) یک دماسنج نواری واقعی

**دماپا (ترموستات):** در دماسنج نواری دوفلزه دیدیم که یک نوار دوفلزه با افزایش یا کاهش دما خم می‌شود. این خم‌شدگی طوری است که در هنگام گرم‌شدن، تیغه با ضریب انبساط بیشتر، کمان خارجی و تیغه دیگر کمان داخلی را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۱-۴ الف). از این ویژگی برای ساخت نوعی دماپا (ترموستات) استفاده می‌شود. دماپاها در بسیاری از وسایل الکتریکی مانند یخچال، آبگرم‌کن، کتری برقی و ... کاربرد دارند (شکل ۱۱-۴ ب). در واقع دماپا کلیدی الکتریکی است که در آن، قطع و وصل جریان با استفاده از حسگرهای گرمایی انجام می‌شود. اغلب از نوارهای دوفلزه به عنوان حسگرهای گرمایی در دماپا استفاده می‌شود. در مدار ساده نشان‌داده شده در شکل ۱۱-۴ پ، عبور جریان الکتریکی از کتری برقی باعث گرم‌شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازه معینی برسد، بر اثر خم‌شدن نوار، جریان قطع شده و کتری برقی خاموش می‌شود (شکل ۱۱-۴ ت). با 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 ۱۱-۴ الف** تیغه دوفلزه با تغییر دما در جهت‌های مختلفی خم می‌شود، (ب) دماپا در یک کتری برقی، (پ) با برقرار شدن جریان الکتریکی، نوار دوفلزه گرم می‌شود. (ت) سپس نوار خم شده و اتصال را قطع می‌کند.

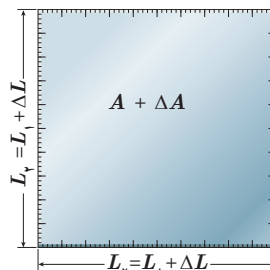
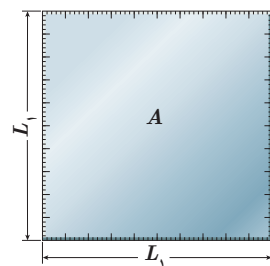


**شکل ۱۲-۴** در جامدها، نیروی بین اتمی مثل فنر عمل می‌کند.

توجیه انبساط گرمایی، مبتنی بر دیدگاه میکروسکوپی است. انبساط گرمایی یک جسم پیامد تغییر فاصله بین اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن است. برای درک این مدل، چگونگی رفتار اتم‌ها در یک ماده جامد را در نظر بگیرید. همان‌گونه که در فصل ۳ دیدیم، می‌توان اتم‌ها را ذراتی در نظر گرفت که با فنرهایی به اتم‌های مجاور متصل شده‌اند (شکل ۱۲-۴). اتم‌ها پیرامون مکان‌های تعادل خود با دامنه کم، نوسان می‌کنند. می‌توان نشان داد با افزایش دمای جامد، فاصله متوسط بین اتم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، جسم جامد منبسط می‌شود.

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

**انبساط سطحی و حجمی:** سطح و حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. تجربه نشان می‌دهد با انبساط جسم جامد، شکل آن عوض نمی‌شود و همه ابعاد آن به تناسب افزایش می‌یابد. در اینجا ابتدا به انبساط سطحی می‌پردازیم. اگر مساحت اولیه جسم جامد  $A_1$  و افزایش دما  $\Delta T$  باشد، افزایش مساحتی به اندازه  $\Delta A$  پیدا می‌کند (شکل ۴-۱۳). نشان داده می‌شود که این افزایش مساحت به طور تقریبی از رابطه زیر به دست می‌آید:



$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T \quad (4-3)$$

در این رابطه،  $\alpha$  ضریب انبساط طولی جسم جامد با یکای بر کلونین ( $1/K$ ) یا بر درجه سلسیوس ( $1/^\circ C$ ) است، یکای  $\Delta A$  و  $A_1$  مترمربع ( $m^2$ ) و یکای  $\Delta T$ ، کلونین (K) یا درجه سلسیوس ( $^\circ C$ ) است.

**شکل ۴-۱۳** انبساط گرمایی یک ورقه مربعی به ضلع  $L = L_1 + \Delta L$

#### فعالیت ۴-۴

ورقه‌ای فلزی و مستطیلی شکل به اضلاع  $a_1$  و  $b_1$  را در نظر بگیرید. بر اثر افزایش دمای  $\Delta T$ ، طول اضلاع مستطیل به اندازه  $\Delta a$  و  $\Delta b$  افزایش می‌یابند. اگر ضریب انبساط طولی ورقه  $\alpha$  باشد، نشان دهید که افزایش مساحت این ورقه با تقریب مناسب از رابطه  $\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$  به دست می‌آید.

#### مثال ۴-۲

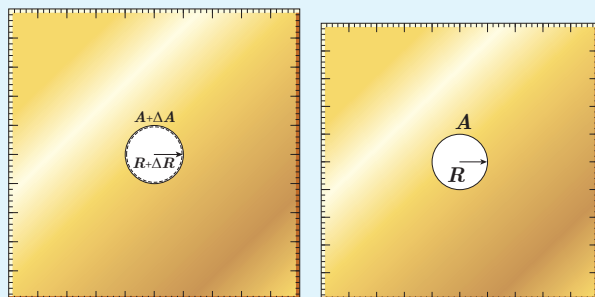
مساحت یک ورقه مسی  $2500 \text{ cm}^2$  است. اگر دمای این ورقه را  $5^\circ C$  افزایش دهیم، مساحت آن چقدر افزایش خواهد یافت؟

**پاسخ:** از رابطه ۴-۳ استفاده می‌کنیم. ضریب انبساط طولی مس با استفاده از جدول ۴-۱ برابر  $17 \times 10^{-6} / ^\circ C$  است؛

بنابراین داریم:

$$\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T = 2(17 \times 10^{-6} / ^\circ C)(2500 \text{ cm}^2)(5^\circ C) = 4/3 \text{ cm}^2$$

#### تمرین ۴-۳



(ب)

(الف)

شکل‌های (الف) و (ب) نشان می‌دهند که وقتی روی یک ورقه فلزی حفره‌ای دایره‌ای داشته باشیم و ورقه را گرم کنیم، قطر (یا مساحت) حفره بزرگ می‌شود. فرض کنید جنس ورقه، برنجی است و حفره‌ای به قطر یک اینچ ( $2/54 \text{ cm}$ ) درون آن ایجاد شده است. وقتی دمای ورقه،  $20^\circ C$  افزایش یابد، افزایش مساحت حفره چقدر خواهد شد؟

جدول ۲-۴ ضریب انبساط حجمی چند مایع در دمای حدود $20^{\circ}\text{C}$	ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
جیوه	$0.18 \times 10^{-3}$	
آب	$0.27 \times 10^{-3}$	
گلیسرین	$0.49 \times 10^{-3}$	
روغن زیتون	$0.70 \times 10^{-3}$	
پارافین	$0.76 \times 10^{-3}$	
بنزین	$1.00 \times 10^{-3}$	
اتانول	$1.09 \times 10^{-3}$	
استیک اسید	$1.10 \times 10^{-3}$	
بنزن	$1.25 \times 10^{-3}$	
کلروفرم	$1.27 \times 10^{-3}$	
استون	$1.43 \times 10^{-3}$	
اتر	$1.60 \times 10^{-3}$	
آمونیاک	$2.45 \times 10^{-3}$	

اکنون به انبساط حجمی می‌پردازیم. همان‌طور که گفتیم حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. اگر حجم اولیه جسم (جامد یا مایع)  $V_1$  و افزایش دما  $\Delta T$  باشد، جسم افزایش حجمی به اندازه  $\Delta V$  پیدا می‌کند که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T \quad (4-4)$$

در این رابطه،  $\beta$  ضریب انبساط حجمی جامد یا مایع است. یکای  $\Delta V$  و  $V_1$  مترمکعب ( $m^3$ )، یکای  $\Delta T$ ، کلوین (K) یا درجه سلسیوس ( $^{\circ}\text{C}$ ) و از آنجا یکای  $\beta$ ، بر کلوین ( $1/K$ ) یا بر درجه سلسیوس ( $1/^{\circ}\text{C}$ ) است.

انبساط طولی بیشتر جامدها در راستاهای مختلف، با ضریب انبساط طولی یکسان صورت می‌گیرد. می‌توان نشان داد که ضریب انبساط حجمی این جامدها با تقریب مناسبی سه برابر ضریب انبساط طولی آنهاست.

$$\beta_{\text{جامد}} = 3\alpha \quad (5-4)$$

چون مایع‌ها شکل معینی ندارند، انبساط آنها را فقط به صورت حجمی بررسی می‌کنیم. در جدول ۲-۴ ضریب انبساط حجمی برخی مایع‌ها داده شده است.

### مثال ۳-۴

در یک روز داغ تابستان که دمای هوا  $4^{\circ}\text{C}$  است، شخصی باک (مخزن) ۵۵ لیتری اتومبیل خود را از بنزین کاملاً پر می‌کند. فرض کنید بنزین از منبعی در زیرزمین با دمای  $12^{\circ}\text{C}$  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.)

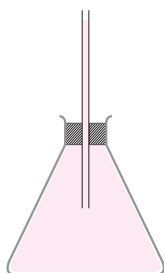
**پاسخ:** با توجه به اینکه بنزین، زمان کافی برای هم‌دما شدن با محیط داشته است، دمای نهایی آن را  $4^{\circ}\text{C}$  در نظر می‌گیریم. اکنون با استفاده از رابطه ۴-۴ و جدول ۲-۴ برای ضریب انبساط حجمی بنزین خواهیم داشت:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C})(55\text{L})(4^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}) = 1/5\text{L}$$

بنابراین، در کمال تعجب درمی‌یابیم که  $1/5$  لیتر بنزین روی زمین ریخته است.

نکته مهم در استفاده از رابطه ۴-۴ این است که باید یکای  $\Delta V$  و  $V_1$  یکسان باشد. مقایسه ضریب انبساط حجمی جامدها با ضریب انبساط حجمی مایعات نشان می‌دهد انبساط حجمی جامدها عموماً از مایعات بسیار کمتر است و به همین دلیل در بسیاری از محاسبات می‌توان از مقدار افزایش حجم جامد در مقابل مقدار افزایش حجم مایع صرف‌نظر کرد.

## مثال ۴-۴



ارلنی شیشه‌ای با ضریب انبساط طولی  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  را که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  گنجایشی برابر با  $200\text{ cm}^3$  دارد، مطابق شکل با گلیسرین در همان دما پر کرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسرین را به  $6^{\circ}\text{C}$  برسانیم (الف) آیا گلیسرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

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

پاسخ:

(الف) افزایش حجم گلیسرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطه‌های ۴-۴ و ۴-۵ محاسبه می‌کنیم.

$$\Delta V_{\text{گلیسرین}} = \beta_{\text{گلیسرین}} V_1 \Delta T = (49 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C})(200\text{ cm}^3)(6^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = 3/9\text{ cm}^3$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_1 \Delta T = (3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})(200\text{ cm}^3)(6^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = 0/2\text{ cm}^3$$

در این محاسبه از جدول ۴-۲ برای ضریب انبساط حجمی گلیسرین استفاده کرده‌ایم؛ چون افزایش حجم گلیسرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسرین از ظرف سرریز می‌شود.

(ب) حجم گلیسرین سرریز شده برابر است با

$$\Delta V_{\text{گلیسرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (3/9\text{ cm}^3 - 0/2\text{ cm}^3) = 3/7\text{ cm}^3$$

## فعالیت ۴-۵

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

## تمرین ۴-۴

افزایش دما که به طور معمول موجب افزایش حجم اجسام می‌شود، بر جرم آنها تأثیری ندارد. به همین دلیل انتظار داریم که چگالی اجسام با افزایش دما کاهش یابد. رابطه چگالی با تغییر دما به صورت  $\rho_2 = \rho_1 / (1 + \beta \Delta T)$  است که در آن  $\rho_1$  و  $\rho_2$  به ترتیب چگالی ماده در دماهای  $T_1$  و  $T_2$ ،  $\beta$  ضریب انبساط حجمی و  $\Delta T = T_2 - T_1$  است.

(الف) رابطه چگالی با تغییر دما را به دست آورید.

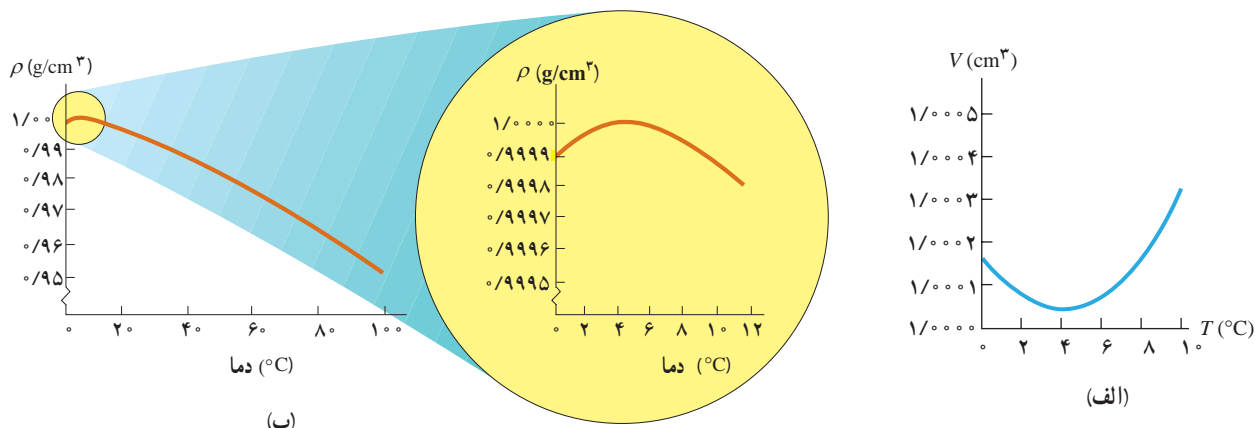
(ب) نشان دهید با تقریب مناسبی می‌توان چگالی جسم را از رابطه  $\rho_2 = \rho_1 (1 - \beta \Delta T)$  نیز به دست آورد.

## مثال ۴-۵

یک قطعه سرب را در دمای اتاق در نظر بگیرید. اگر دمای این قطعه را  $200^{\circ}\text{C}$  افزایش دهیم، چگالی آن چند برابر می‌شود؟

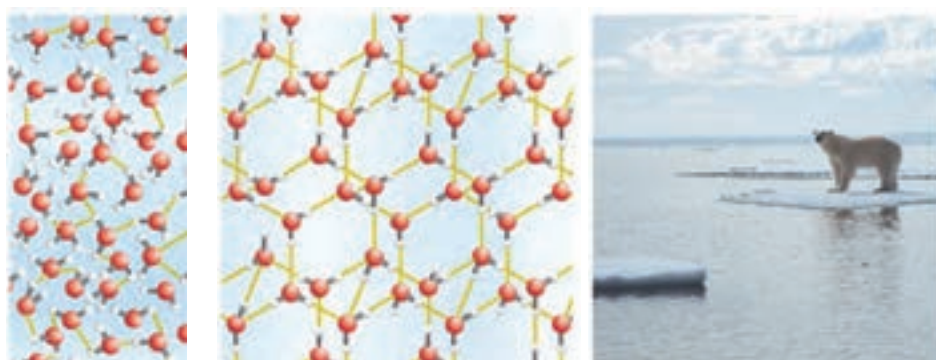
$$\rho_2 = \rho_1 (1 - \beta \Delta T) \Rightarrow \frac{\rho_2}{\rho_1} = (1 - 3\alpha \Delta T) = 1 - (3 \times 29 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})(200^{\circ}\text{C}) = 0/98$$

**انبساط غیرعادی آب:** در زمستان‌های سرد، سطح آب آبیگرها و دریاچه‌های کوچک یخ می‌زند و به تدریج یخ ضخیم‌تر می‌شود؛ اما در ته آبیگرها، دمای آب بالاتر از  $0^{\circ}\text{C}$  بوده و برای موجودات زنده‌ای که آنجا زندگی می‌کنند، نسبتاً گرم و مناسب است. در واقع حجم بیشتر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش و در نتیجه چگالی آنها افزایش می‌یابد، ولی رفتار آب در محدوده دمایی  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $4^{\circ}\text{C}$  متفاوت است؛ یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴-۱۴ (الف) و (ب)، به ترتیب نمودار حجم برحسب دما و نمودار چگالی برحسب دما را برای آب شیرین نشان می‌دهد که در آنها رفتار غیرعادی آب در محدوده  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $4^{\circ}\text{C}$  دیده می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، در بازه دمایی  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $4^{\circ}\text{C}$  با افزایش دما، حجم آب کاهش و چگالی آن افزایش می‌یابد. پس از دمای  $4^{\circ}\text{C}$  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  $10^{\circ}\text{C}$  اندکی کمتر شود، چگالی آب نسبت به آب زیر خود افزایش می‌یابد و این آب، پایین می‌رود. این رفتار تا رسیدن به دمای  $4^{\circ}\text{C}$  ادامه می‌یابد؛ ولی همان‌طور که دیدیم در دمای پایین‌تر از  $4^{\circ}\text{C}$ ، حجم آب افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد؛ یعنی سرد شدن بیشتر آب موجب می‌شود که چگالی آب سطح دریاچه نسبت به آب زیر آن کمتر شود و در نتیجه در سطح باقی بماند تا اینکه یخ بزند (شکل ۴-۱۵ الف). بنابراین، در حالی که آب زیر دریاچه هنوز مایع است و دمایی بیش از صفر درجه دارد، سطح آب یخ می‌زند. اگر آب دریاچه‌ها از پایین به بالا یخ می‌زد، اثرات زیست‌محیطی زاینباری در پی داشت و حیات گیاهی و جانوری در عمق دریاچه‌ها از بین می‌رفت.



شکل ۴-۱۴ (الف) تغییرات حجم یک گرم آب (شیرین) با دما، (ب) تغییرات چگالی آب (شیرین) با دما

رفتار شگفت‌انگیز آب را می‌توان با ساختار مولکول‌های آن در یخ توضیح داد. مولکول‌های آب در یخ شبکه‌ای بلوری تشکیل می‌دهند، به طوری که مولکول‌ها در بعضی نواحی خیلی به هم نزدیک‌اند و در نواحی دیگر، بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۴-۱۵ ب). وقتی آب از یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، ساختار شبکه‌ی بلوری درهم می‌شکند و آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد (شکل ۴-۱۵ پ). در محدوده دماهای  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $4^{\circ}\text{C}$  بقایای ساختار مولکولی یخ هنوز در آب وجود دارد و موجب رفتار غیرعادی آب می‌شود.



(ب)

(ب)

(الف)

**شکل ۴-۱۵** (الف) آب در حالت مایع چگال‌تر از یخ است و در نتیجه یخ بر روی آب شناور می‌ماند. (ب) مولکول‌های آب در یخ تشکیل یک شبکه بلوری می‌دهند. (ب) آب در حالت مایع تشکیل شبکه بلوری نمی‌دهد.

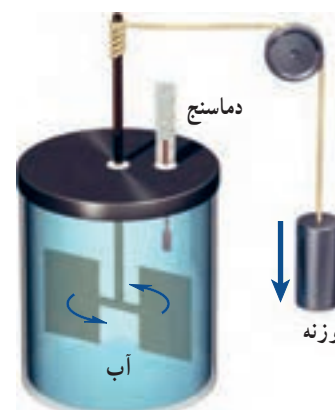
### فعالیت ۴-۶

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

### ۳-۴ گرما

همان‌طور که در درس علوم دوره اول متوسطه دیدید، اگر آب خیلی سرد را در لیوان بریزیم و سپس این لیوان را روی میز اتاق بگذاریم، آب گرم می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. به همین ترتیب، اگر آب داغ را در لیوان بریزیم و لیوان را روی میز بگذاریم، آب خنک می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. این گرم‌تر یا سردتر شدن در ابتدا به سرعت رخ می‌دهد و سپس با آهنگ کندتری ادامه می‌یابد تا اینکه دمای آب با دمای اتاق یکسان گردد. در این حالت که آب، لیوان و هوای اتاق در دمای یکسانی هستند، اصطلاحاً می‌گوییم **تعادل گرمایی** حاصل شده است. تا پیش از قرن نوزدهم، چنین مشاهداتی را با پذیرفتن موجودی به نام کالریک توجیه می‌کردند. به عبارتی فرض می‌کردند که چیزی به نام کالریک از جسم گرم به جسم سرد جریان می‌یابد. اما کنت رامفورد<sup>۱</sup> (۱۷۵۳ تا ۱۸۱۴م) و جیمز پرسکات ژول<sup>۲</sup> (۱۸۱۸ تا ۱۸۸۹م) در پی آزمایش‌های هوشمندانه‌ای که نمونه‌ای از آن در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است، دریافتند آنچه که در چنین فرایندهایی رخ می‌دهد، چیزی جز انتقال انرژی نیست. مثلاً در مثال آب داغ، انتقال انرژی از آب به محیط پیرامون، سبب کاهش دمای آب می‌شود. در حالت کلی هرگاه جسمی با دمای بیشتر در تماس گرمایی با جسمی با دمای کمتر قرار گیرد، بر اثر اختلاف دمای دو جسم، انرژی از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود. به این انرژی انتقال یافته بر اثر اختلاف دمای دو جسم، **گرما** گفته می‌شود.

توجه کنید اشاره کردن به گرمای موجود در یک جسم اشتباه است. گرما مربوط به انرژی در حال گذار است؛ بنابراین، عبارتهایی مانند گرمای یک جسم، نادرست است. گرما را با نماد  $Q$  نشان می‌دهند. چون گرما، انرژی انتقال یافته است، پس باید همان یکای انرژی (ژول) را داشته باشد. یکای دیگر گرما،



**شکل ۴-۱۷** نمونه‌ای از آزمایش ژول: در این آزمایش نشان داده می‌شود کار نیروی وزن برابر با مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای آب است.

۱- Sir Benjamin Thomson, Count Rumford

۲- James Prescott Joule



کالری 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 پتانسیل و جنبشی مربوط به حرکت‌های کاتوره‌ای اتم‌ها، مولکول‌ها و سایر اجزای میکروسکوپی داخل جسم گرم، و افزایش همین انرژی‌ها در داخل جسم سرد است تا آنکه دو جسم به تعادل گرمایی برسند (شکل ۴-۱۷).



شکل ۴-۱۷ وقتی دو جسم با دمای متفاوت را در تماس با یکدیگر قرار می‌دهیم، انرژی از جسم گرم به جسم سرد، منتقل می‌شود. با رسیدن به تعادل گرمایی، دیگر گرمایی منتقل نمی‌شود.

#### پوشش ۴-۲

الف) منظور از این جمله که «دماسنج‌ها دمای خودشان را اندازه‌گیری می‌کنند» چیست؟  
 ب) در یک کلاس درس میز، صندلی، دانش‌آموز، تخته، شیشه پنجره و ... وجود دارد. در یک روز زمستانی، دمای کدام یک از آنها بیشتر از دمای هوای اتاق است؟ دمای کدام یک کمتر از دمای هوای اتاق است؟  
 پ) در شکل ۴-۱۷ میانگین انرژی جنبشی ذرات دو جسم چگونه تغییر کرده است؟

**ظرفیت گرمایی:** اگر یک پارچ آب سرد را از داخل یخچال بیرون آوریم و در اتاق قرار دهیم، آب از محیط خود، گرما می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود. آزمایش نشان می‌دهد که گرمای گرفته‌شده توسط آب با تغییر دمای آب، متناسب است؛ یعنی هرچه آب سردتر باشد، مقدار گرمایی که می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود، بیشتر است. بنابراین، اگر جسمی با محیط اطراف خود گرمای  $Q$  را مبادله کند و در اثر این مبادله گرما، دمایش به اندازه  $\Delta T$  تغییر کند،  $Q$  متناسب با  $\Delta T$  است که ضریب این تناسب را با  $C$  نشان می‌دهند، به طوری که:

$$Q = C \Delta T \quad (۴-۶)$$

به  $C$ ، **ظرفیت گرمایی** جسم گفته می‌شود که به جنس جسم و جرم آن بستگی دارد. در رابطه ۴-۶ یکای  $Q$ ، ژول (J) و یکای  $\Delta T$ ، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای  $C$ ، ژول بر کلوین (J/K) می‌شود.

$$۱ \text{ cal} = ۴/۱۸۶۰ \text{ J}$$

وقتی می‌گوییم ظرفیت گرمایی یک جسم  $2000 \text{ J/K}$  است، یعنی اگر به آن جسم  $2000 \text{ J}$  گرما بدهیم، دمای آن  $1 \text{ K}$  افزایش پیدا می‌کند. توجه کنید که منظور از ظرفیت، این نیست که جسم، توانایی محدودی در مبادله گرما دارد؛ بلکه تا وقتی که اختلاف دما باشد، مبادله گرما ادامه می‌یابد. 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 ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸ تصویری از سواحل قسم. آب دریا به دلیل داشتن ظرفیت گرمایی زیاد، دمای هوا را متعادل نگه می‌دارد، اما دمای خودش تغییر محسوسی نمی‌کند.

**گرمای ویژه:** تجربه نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی اجسامی که از یک نوع ماده ساخته شده‌اند متناسب با جرم آنهاست. بنابراین، مناسب‌تر آن است که ظرفیت گرمایی واحد جرم اجسام را تعریف کنیم که به آن ظرفیت گرمایی ویژه یا به سادگی **گرمای ویژه** می‌گویند. گرمای ویژه هر جسم، مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از آن جسم داده شود تا دمای آن یک درجه سلسیوس (یا یک کلوین) افزایش یابد. گرمای ویژه را با  $c$  نشان می‌دهند و طبق تعریف، رابطه‌اش با ظرفیت گرمایی به صورت  $c = C/m$  است. در نتیجه رابطه ۴-۶ چنین می‌شود:

$$Q = mc\Delta T \quad (4-7)$$

در رابطه ۴-۷ یکای  $Q$ ، ژول (J) و یکای  $m$ ، کیلوگرم (kg) و یکای  $\Delta T$ ، کلوین (K) است؛ بنابراین، یکای  $c$  در SI، ژول بر کیلوگرم - کلوین ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ) است.

گرمای ویژه یک جسم به جنس ماده تشکیل دهنده آن و دما بستگی دارد. گرمای ویژه برخی از مواد در جدول ۴-۳ داده شده است.

جدول ۴-۳ - گرمای ویژه برخی از مواد*		
گرمای ویژه ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )	ماده	
۱۲۸	سرب	عناصر جامد
۱۳۴	تنگستن	
۲۳۶	نقره	
۳۸۶	مس	
۹۰۰	آلومینیم	
۳۸۰	برنج	جامدهای دیگر
۴۵۰	نوعی فولاد (آلیاژ آهن با ۲٪ کربن)	
۴۹۰	فولاد زنگ‌نزن	
۷۹۰	گرانیت	
۸۰۰	بتون	
۸۴۰	شیشه	
۲۲۲۰	یخ	مایعات
۱۴۰	جیوه	
۲۴۳۰	اتانول	
۳۹۰۰	آب دریا	
۴۱۸۷	آب	

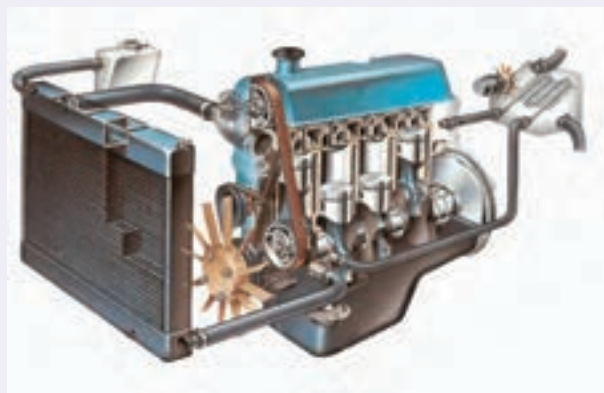
\* تمام مواد غیر از یخ در دمای  $20^\circ\text{C}$

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

**پاسخ:** براساس چگالی آب، جرم  $L$  آب برابر  $1\text{ kg}$  است و از جدول ۳-۴ گرمای ویژه آب  $4187\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$  است. بنابراین، گرمای لازم برای گرم کردن  $2\text{ kg}$  آب، از  $20^{\circ}\text{C}$  تا نقطه جوش آب، برابر است با

$$Q = m_{\text{آب}} c_{\text{آب}} \Delta T = (2\text{ kg})(4187\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C})(100^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = 67 \times 10^5\text{ J}$$

### استفاده از آب در دستگاه‌های گرم‌کننده و خنک‌کننده:



شکل ۴-۱۹ تصویری از سیستم خنک‌کننده خودرو

در جدول ۳-۴ دیدیم که گرمای ویژه آب از سایر مواد بیشتر است. این نشان می‌دهد که وقتی یک کیلوگرم آب به اندازه یک درجه سلسیوس تغییر دما دهد، در مقایسه با سایر مواد، گرمای بیشتری با محیط اطراف خود مبادله می‌کند. از این خاصیت آب برای گرم کردن فضای خانه‌ها به وسیله شوفاژ استفاده می‌شود. آب گرم شده در مخزن به وسیله 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 ۴-۱۹). بدین منظور، در محفظه سیلندر و سرسیلندر، مسیره‌های عبور آب در نظر گرفته شده است که به وسیله تلمبه آب (واتر پمپ)، آب به سرعت در درون این مسیره‌ها گردش می‌کند و گرما را از موتور به رادیاتور خودرو 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.



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

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 در حال جوشیدن است و پس از مدتی گوی‌ها را بیرون آورده و آنها را روی یک ورقه پارافین قرار می‌دهیم. به نظر شما کدام گوی، پارافین بیشتری را ذوب می‌کند و علت آن چیست؟ این آزمایش را نخستین بار فیزیک‌دان ایرلندی، جان تیندال<sup>۱</sup> (۱۸۹۳-۱۸۲۰ م.) طراحی و اجرا کرد.

۱- John Tyndall

**مول و عدد آووگادرو:** همان‌طور که در فصل ۱ کتاب شیمی خود دیدید، در بسیاری از موارد یکای مناسب برای تعیین مقدار یک ماده، مول (mol) است. مقدار ماده برحسب مول را با  $n$  نشان می‌دهند. یک مول از هر ماده به معنای  $6.02 \times 10^{23}$  از واحد سازنده آن ماده است که به آن عدد آووگادرو گفته می‌شود؛ مثلاً یک مول آلومینیم به معنای  $6.02 \times 10^{23}$  اتم آلومینیم است و یک مول آب به معنای  $6.02 \times 10^{23}$  مولکول آب است. بدیهی است که اگر جرم نمونه‌ای از ماده را با  $m$  و جرم یک مول از ماده را با  $M$  (که موسوم به جرم مولی است) نشان دهیم داریم:



شکل ۴-۲. یک مول هوا، یک مول آب، یک مول نمک طعام در کنار هم

$$n = \frac{m}{M} \quad (4-8)$$

که در آن  $n$  برحسب مول (mol)،  $m$  برحسب کیلوگرم (kg) و  $M$  برحسب کیلوگرم بر مول (kg/mol) است؛ مثلاً شکل ۴-۲ یک مول از سه نمونه مواد در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

#### مثال ۴-۲



شکل روبه‌رو، قطعه‌ای از الماس را نشان می‌دهد که از اتم‌های کربن درست شده است. جرم این الماس  $44/5$  قیراط است. یک قیراط معادل با  $0.200$  g است. چه تعداد اتم کربن در این الماس وجود دارد؟ جرم مولی کربن  $12/011$  g/mol است.

**پاسخ:** نخست با استفاده از رابطه  $4-8$  تعداد مول اتم کربن موجود در الماس را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{(44/5 \times 0/200) \text{g}}{(12/011) \text{g/mol}} = 0/741 \text{ mol}$$

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

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

$$= (0/741 \text{ mol})(6/02 \times 10^{23} \text{ اتم/mol}) = 4/46 \times 10^{23} \text{ اتم}$$

**گرمای ویژه مولی:** وقتی مقدار ماده به جای جرم برحسب مول بیان شود باید به جای ظرفیت گرمایی واحد جرم از ظرفیت گرمایی واحد مول ( $C/n$ ) استفاده کنیم که به آن ظرفیت گرمایی مولی یا **گرمای ویژه مولی** گفته می‌شود. در واقع گرمای ویژه مولی یک ماده، مقدار گرمایی است که باید به یک مول از آن ماده بدهیم تا در شرایط فیزیکی تعیین شده، دمای آن  $1$  K افزایش یابد (با این کمیت در فصل ۵ بیشتر آشنا خواهیم شد).

اگر گرمای ویژه مولی مواد بلورین مختلف را با هم مقایسه کنیم (در حجم ثابت)، به نظم شگفت‌انگیزی پی می‌بریم و درمی‌یابیم برای بیشتر فلزها، مقدار آن تقریباً مساوی با  $25 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  است.<sup>۱</sup> این نظم با آنکه تقریبی است به نام قاعده «دولن و پتی»<sup>۲</sup> 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.

۱- محدوده دمای برای فلزات مختلف، متفاوت است. مثلاً برای مس از  $500$  تا  $700$  کلین است.

**دمای تعادل:** اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند، پس از مدتی هم دما می‌شوند، یعنی دمای آنها به مقدار یکسانی می‌رسد. به این دما، **دمای تعادل** می‌گویند که می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی، آن را محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند و بقیه اجسام گرما می‌گیرند. بنا به قرارداد علامت  $Q$  برای اجسامی که گرما می‌گیرند مثبت ( $Q > 0$ ) و برای اجسامی که گرما می‌دهند منفی ( $Q < 0$ ) اختیار می‌شود؛ مثلاً از رابطه (۴-۷) نیز درمی‌یابیم که با افزایش دما، مقدار مثبتی برای  $Q$  به دست می‌آید و با کاهش دما، مقداری منفی برای  $Q$  به دست می‌آید. بنا به قانون پایستگی انرژی، همان قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند، پس جمع جبری این  $Q$ ها صفر می‌شود:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0 \quad (9-4)$$

هرگاه چند جسم متفاوت با گرمای ویژه  $c_1, c_2, c_3, \dots$  و به جرم‌های  $m_1, m_2, m_3, \dots$  و دماهای اولیه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  را در تماس با یکدیگر قرار دهیم با استفاده از رابطه (۴-۹) معادله‌ای به دست می‌آوریم که می‌توان دمای تعادل  $\theta$  را از آن محاسبه کرد.

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) + m_3 c_3 (\theta - \theta_3) + \dots = 0 \quad (10-4)$$

#### مثال ۴-۸

شخصی  $3 \text{ kg}$  آب  $70^\circ\text{C}$  را در یک لیوان آلومینیومی  $12^\circ\text{C}$  کیلوگرمی که دمای آن  $20^\circ\text{C}$  است می‌ریزد. دمای نهایی پس از آنکه آب و لیوان به تعادل گرمایی برسند چقدر است؟ فرض کنید هیچ گرمایی با محیط مبادله نمی‌شود.

**پاسخ:** با توجه به اینکه هیچ مبادله گرمایی با محیط نداریم، با استفاده از رابطه ۴-۹ داریم:

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

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

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

که در آن  $\theta$  دمای تعادل مجموعه است. با استفاده از گرمای ویژه آب و آلومینیم از جدول ۴-۳ خواهیم داشت:

$$(3 \text{ kg}) (4187 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (\theta - 70^\circ\text{C}) + (12 \text{ kg}) (900 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (\theta - 20^\circ\text{C}) = 0$$

و از آنجا پس از اندکی محاسبه جبری برای دمای تعادل به  $\theta = 66^\circ\text{C}$  می‌رسیم.

از معادله ۴-۱۰ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژه یک جسم نیز استفاده کنیم.

## مثال ۴-۹

در ظرف عایقی حاوی  $0.50 \text{ kg}$  آب  $20^\circ\text{C}$ ، یک قطعه مس  $0.100 \text{ kg}$  به دمای  $50^\circ\text{C}$  و یک قطعه فلز دیگر به جرم  $0.15 \text{ kg}$  و به دمای  $60^\circ\text{C}$  و ویژه نامعلوم می‌اندازیم و دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل  $22^\circ\text{C}$  شده است. با چشم‌پوشی از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام، گرمای ویژه فلز را حساب کنید.

**پاسخ:** دمای تعادل  $22^\circ\text{C}$  است و نیز با استفاده از سایر داده‌های این مثال و جدول ۳-۴ داریم:

$$\text{آب: } m_1 = 0.50 \text{ kg}, \theta_1 = 20^\circ\text{C}, c_1 = 4187 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$\text{مس: } m_p = 0.100 \text{ kg}, \theta_p = 50^\circ\text{C}, c_p = 386 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$\text{فلز: } m_f = 0.150 \text{ kg}, \theta_f = 60^\circ\text{C}, c_f = ?$$

اکنون با استفاده از رابطه ۴-۱ خواهیم داشت:

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_p c_p (\theta - \theta_p) + m_f c_f (\theta - \theta_f) = 0$$

$$(0.50 \text{ kg})(4187 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(22^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + (0.100 \text{ kg})(386 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(22^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})$$

$$+ (0.150 \text{ kg})c_f(22^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) = 0 \Rightarrow c_f = 545 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

## تمرین ۴-۵

جسمی به جرم  $0.25 \text{ kg}$  و دمای  $3^\circ\text{C}$  را درون ظرف عایقی حاوی  $0.50 \text{ kg}$  آب  $25^\circ\text{C}$  می‌اندازیم. پس از چند دقیقه دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل  $21^\circ\text{C}$  می‌شود. گرمای ویژه 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 ۴-۲۱). این ظرف در آزمایش‌های گرماسنجی مانند تعیین گرمای ویژه اجسام، به کار 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 اولیه 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 (۴-۹) و (۴-۱۰) و با چشم‌پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادله گرما داریم:

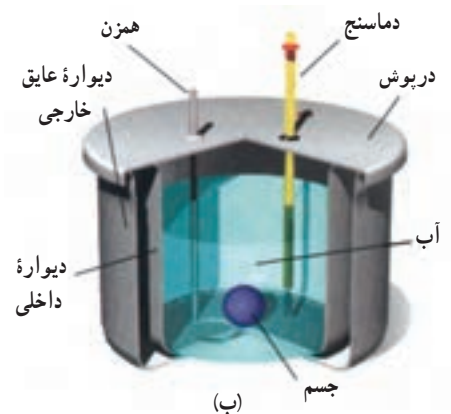
$$Q_{\text{آب}} + Q_{\text{جسم}} + Q_{\text{ظرف}} = 0$$

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

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



(الف)



(ب)

**شکل ۴-۲۱** الف) عکسی واقعی و ب) طرحی از نمای داخلی یک گرماسنج

برای اندازه‌گیری گرمای ویژه فلزی با جنس نامعلوم، قطعه‌ای  $۰/۶۰۰$  کیلوگرمی از آن را تا  $۱۰۰/۰^{\circ}\text{C}$  گرم می‌کنیم و سپس آن را در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی  $۱۰^۲ \times ۱/۸۰ \text{ J/K}$  که حاوی  $۰/۵۰۰ \text{ kg}$  آب با دمای اولیه  $۱۷/۳^{\circ}\text{C}$  است، می‌اندازیم. اگر دمای نهایی مجموعه  $۲۰/۰^{\circ}\text{C}$  شود، گرمای ویژه این فلز چقدر است؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه (۴-۱) و تعریف ظرفیت گرمایی داریم:

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

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

اکنون با جای گذاری مقادیر خواهیم داشت:

$$(۰/۵۰۰ \text{ kg})(۴۱۸۷ \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C})(۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۷/۳^{\circ}\text{C}) + (۰/۶۰۰ \text{ kg}) c_{\text{فلز}} (۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۰۰/۰^{\circ}\text{C})$$

$$+ (۱/۸۰ \times ۱۰^۲ \text{ J/C})(۲۰/۰^{\circ}\text{C} - ۱۷/۳^{\circ}\text{C}) = 0$$

پس از عملیات جبری، گرمای ویژه فلز  $۱۲۸ \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$  به دست می‌آید. اگر به جدول ۴-۳ نگاه کنیم درمی‌یابیم که این گرمای ویژه بسیار نزدیک به گرمای ویژه سرب است و احتمالاً جنس ماده نامعلوم سرب بوده است.

#### آزمایش ۴-۲



**هدف:** تعیین گرمای ویژه فلزی با جنس نامعین

**وسایله‌های موردنیاز:** گرماسنج با ظرفیت گرمایی معین، یک جسم کوچک فلزی (مثل یک وزنه فلزی قلاب‌دار)، دماسنج، ترازو، بشر شیشه‌ای، چراغ گازی، سه پایه و شعله‌پخش‌کن، انبر.

**شرح آزمایش:**

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

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

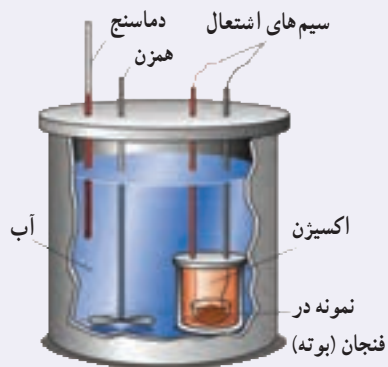
۳- جسم فلزی را درون بشر قرار دهید، مقداری آب روی آن بریزید و سپس مجموعه را روی چراغ گازی روشن بگذارید.

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

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

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

۷- با استفاده از رابطه (۴-۱) گرمای ویژه جسم فلزی را به دست آورید.

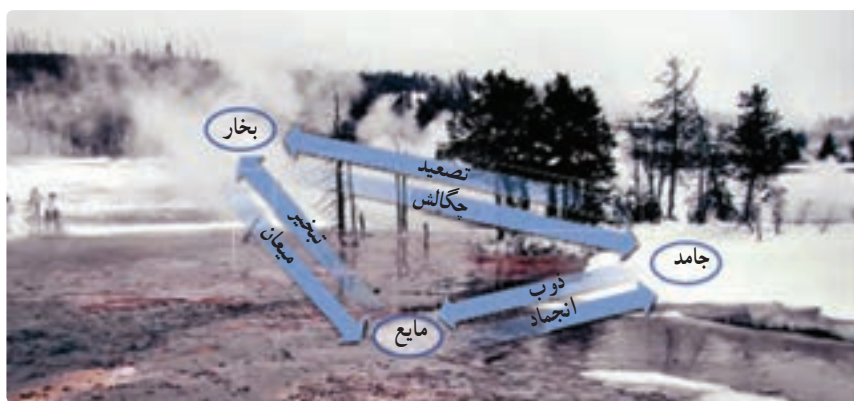


شکل ۴-۲۲ اجزای یک گرماسنج بمبی

**گرماسنج بمبی<sup>۱</sup>**: گرماسنج بمبی نوعی گرماسنج است که از آن برای تعیین ارزش غذایی مواد با اندازه‌گیری انرژی آزاد شده آنها در حین سوختن استفاده می‌شود. نمونه‌ای که جرم آن به دقت اندازه‌گیری شده است در ظرف سر بسته‌ای که محتوی اکسیژن است (که اصطلاحاً به آن بمب گفته می‌شود) قرار داده می‌شود (شکل ۴-۲۲). سپس این محفظه در آب یک گرماسنج قرار داده می‌شود و توسط جریان الکتریکی عبوری از یک سیم نازک، نمونه داخل آن سوزانده می‌شود. با اندازه‌گیری تغییر دمای آب، انرژی حاصل از احتراق ماده مورد نظر را به دست می‌آورند که تقریباً معادل انرژی آزاد شده از آن ماده است.

#### ۴-۴ تغییر حالت‌های ماده

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، موادی که در اطراف ما وجود دارند معمولاً در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز (بخار<sup>۲</sup>) یافت می‌شوند. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. برای مثال در شکل ۴-۲۳ انواع تغییر حالت‌هایی که برای سه حالت آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه‌اند.



شکل ۴-۲۳ تغییر حالت‌های مختلف آب که به‌طور هم‌زمان در این تصویر واقعی مشاهده می‌شود.

تبدیل جامد به مایع را **ذوب**، تبدیل مایع به بخار را **تبخیر** و تبدیل مایع به جامد را **انجماد** و تبدیل بخار به مایع را چگالش بخار به مایع یا **میعان** می‌نامیم. امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم و بدون گذر از حالت مایع صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، **تصعید** و تغییر حالت وارون آن، یعنی از بخار به جامد **چگالش بخار به جامد** گفته می‌شود. برای مثال، نفتالین در دمای اتاق به‌طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود، یا در صبح‌های بسیار سرد زمستان، برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشه پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است. در ادامه تغییر حالت‌های جامد - مایع، و مایع - بخار را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم.

۱- Bomb Calorimeter

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



**تغییر حالت جامد-مایع:** دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرما دادن را برای جامدهای خالص و بلورین ادامه دهیم، وقتی دمای جسم به مقدار مشخصی برسد، افزایش دما متوقف می‌شود و دما ثابت باقی می‌ماند. در این حالت، جسم شروع به ذوب شدن می‌کند و به مایع تبدیل می‌شود. این دمای ثابت را **نقطه ذوب** یا دمای گذار جامد به مایع می‌نامند، که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد. به استثنای چند مورد خاص، حجم جامدهای بلوری هنگام ذوب شدن افزایش می‌یابد؛ زیرا حجمی که بلور با آرایش منظم مولکول‌ها در حالت جامد اشغال می‌کند، نسبت به این حجم در حالت مایع که آرایش مولکولی نامنظمی دارد، کمتر است.

برخلاف جامدهای خالص و بلورین، جامدهای بی‌شکل مانند شیشه و جامدهای ناخالصی مانند قیر نقطه ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع وقتی این مواد را گرم می‌کنیم، پیش از ذوب شدن خمیری‌شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به تدریج ذوب می‌شوند.

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



در نقطه سه‌گانه آب، سه فاز آب در تعادل اند.

#### فعالیت ۴-۷

نقطه ذوب یخ در فشار ۱ atm برابر  $0^{\circ}\text{C}$  است. برای آب نقطه‌ای موسوم به نقطه سه‌گانه وجود دارد که در آن سه حالت یخ، آب و بخار در تعادل اند. دمای این نقطه  $0.01^{\circ}\text{C}$  است. تحقیق کنید برای رسیدن به این نقطه به چه فشاری نیاز است.



شکل ۴-۲۴ تصویری از یخ در حال ذوب

عمل ذوب، فرایندی گرماگیر است؛ یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود، زیرا مولکول‌های جامد باید از ساختار صلب قبلی خود رها شوند. این گرما، دمای جسم را تغییر نمی‌دهد؛ بلکه سبب تغییر حالت آن می‌شود. ذوب شدن یک قالب یخ و تبدیل آن به آب (شکل ۴-۲۴) مثالی مشهور از این دست است.

#### فعالیت ۴-۸



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



**اسپری کردن باغ‌های میوه:** گاهی اوقات گیاهان را با آب اسپری می‌کنند تا آنها را از یخ زدن در سرمای سخت محافظت کنند. این محافظت ناشی از لایه یخی نیست که روی گیاه تشکیل می‌شود. این محافظت ناشی از فرایندهایی است که پس از نشستن آب روی گیاه رخ می‌دهند؛ یعنی فرایندهایی که در آنها آب تا نقطه انجماد سرد می‌شود و سپس یخ می‌بندد. لازمه هر دو فرایند این است که آب به گیاه گرما بدهد. انرژی که به گیاه و سپس به هوا منتقل می‌شود می‌تواند دمای باغ را بین  $2^{\circ}\text{C}$  تا  $0^{\circ}\text{C}$  حفظ کند که این موجب بقای گیاهان می‌شود. باغبان از روی یخ تشکیل شده روی گیاهان می‌تواند بگوید که آیا اسپری کردن به گیاهان کمک کرده یا مضر بوده است. اگر اسپری کردن به درستی انجام شده باشد، قطرات پیش از یخ زدن روی گیاهان پخش می‌شوند و لایه‌ای شفاف درست می‌کنند. در غیر این صورت، تک تک قطراتی که به طور جزئی یخ زده‌اند، لایه یخی غیر شفاف درست می‌کنند. به همین دلیل باغبان‌ها در طول شب، مدام شفافیت یخ روی گیاهان را بررسی می‌کنند.

انجماد یک مایع و تبدیل آن به یک جامد، عکس فرایند ذوب شدن است و لازمه این فرایند گرفتن گرما از مایع است تا مولکول‌ها بتوانند در یک ساختار جدید قرار گیرند. در اینجا نیز تغییر حالت بدون تغییر دما رخ می‌دهد. گرمای منتقل شده برای تغییر حالت جسم از جامد به مایع یا از مایع به جامد، با جرم جسم نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم جسم را گرمای نهان ویژه ذوب می‌گویند که به اختصار آن را گرمای نهان ذوب می‌نامیم و آن را با  $L_F$  نشان می‌دهیم<sup>۱</sup>.

$$L_F = \frac{Q}{m} \quad (۱۱-۴)$$

گرمای نهان ذوب بستگی به جنس جسم دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم ( $\text{J/kg}$ ) است. بنابراین، وقتی نمونه‌ای به جرم  $m$  کاملاً تغییر فاز دهد گرمای منتقل شده برابر با  $Q = mL_F$  است.

وقتی تغییر فاز از جامد به مایع انجام می‌شود، جسم گرما می‌گیرد ( $Q > 0$ ):

$$Q = +mL_F$$

و اگر تغییر فاز از مایع به جامد انجام شود، جسم گرما از دست می‌دهد ( $Q < 0$ ):

$$Q = -mL_F$$

گرمای نهان ذوب و نقطه ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقادیر برای برخی از مواد در جدول ۴-۴ داده شده است.

جدول ۴-۴ نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطه ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )	گرمای نهان ذوب ( $\text{kJ/kg}$ )
هیدروژن	-۲۵۹	۵۸/۶
اکسیژن	-۲۱۸	۱۳/۸
نیتروژن	-۲۱۰	۲۵/۵
جیوه	-۳۹	۱۱/۸
یخ	۰	۳۳۲/۷
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۴	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

۱- اندیس F حرف اول واژه انگلیسی «Fusion» است که بیشتر به معنای ذوب به کار می‌رود. با اینکه هم‌اکنون از واژه «melting» برای ذوب استفاده می‌شود، همچنان از F برای

نشان دادن ذوب استفاده می‌گردد.

فعالیت ۹-۴

تحقیق کنید وجود ناخالصی در مایع چه تأثیری بر نقطه انجماد آن دارد.

مثال ۱۱-۴



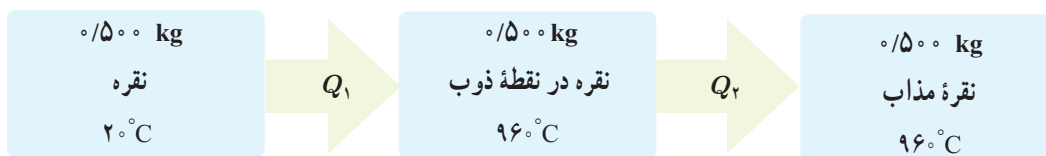
فلز گالیم (Ga) یکی از چند عنصری است که در دماهای پایین ذوب می‌شود. دمای ذوب این فلز  $29.8^{\circ}\text{C}$  و گرمای نهان ذوب آن  $8.0/4 \text{ kJ/kg}$  است. یک قطعه  $10\%$  گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطه ذوب خود به طور کامل ذوب شود؟ (از تبادل گرما بین فلز و هوای محیط چشم‌پوشی می‌شود.)

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱۱-۴ داریم:

$$Q = mL_F = (10\% \times 10^{-2} \text{ kg})(8.0/4 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 8.04 \text{ J}$$

مثال ۱۲-۴

یک جواهرساز برای ساختن جواهری می‌خواهد از  $0.500 \text{ kg}$  نقره برای ریختن در قالب‌های جواهر استفاده کند. به این منظور او باید نقره را ذوب کند. اگر دمای اولیه نقره همان دمای اتاق و برابر  $20^{\circ}\text{C}$  باشد، چقدر گرما باید به این مقدار نقره داده شود؟ **پاسخ:** مرحله‌های این فرایند به طور طرح‌وار در شکل زیر رسم شده است.



که در آن

$$Q_1 = m_{\text{نقره}} c_{\text{نقره}} \Delta\theta = (0.500 \text{ kg})(236 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C})(96^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = 1.11 \times 10^5 \text{ J}$$

$$Q_2 = m_{\text{نقره}} L_F = (0.500 \text{ kg})(88.3 \text{ kJ/kg}) = 0.442 \times 10^5 \text{ J}$$

که در آن از گرمای ویژه و گرمای نهان ذوب نقره مندرج در جدول‌های ۳-۴ و ۴-۴ استفاده کردیم. اکنون گرمای کل با جمع کردن  $Q_1$  و  $Q_2$  به دست می‌آید:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1.11 \times 10^5 \text{ J} + 0.442 \times 10^5 \text{ J} = 1.55 \times 10^5 \text{ J} = 155 \text{ kJ}$$

آزمایش ۳-۴

**هدف:** تعیین گرمای نهان ذوب یخ

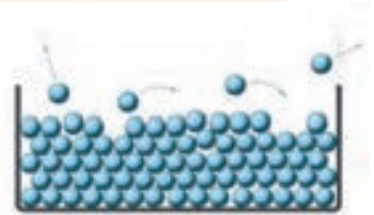
**وسایله‌های موردنیاز:** بشر شیشه‌ای با حجم  $400 \text{ cm}^3$ ، چراغ گازی، سه پایه، توری نسوز، ترازو، مقداری مخلوط آب و یخ، گرماسنج با ظرفیت گرمایی معلوم و دماسنج.

## شرح آزمایش :

- ۱-  $20^{\circ}\text{C}$  آب در بشر بریزید و آن را روی سه پایه قرار دهید. چراغ گاز را روشن کنید تا دمای آب دست کم به  $60^{\circ}\text{C}$  برسد.
- ۲- آب گرم را درون گرماسنج بریزید و پس از مدتی دمای تعادل آب و گرماسنج را با دماسنج اندازه بگیرید و یادداشت کنید.
- ۳- قطعه یخی به جرم تقریبی  $50\text{g}$  را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای  $0^{\circ}\text{C}$ ) بیرون آورده و جرم آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید.
- ۴- یخ را درون گرماسنج بیندازید و صبر کنید تا کاملاً ذوب شود. اینک دمای تعادل را اندازه بگیرید.
- ۵- با استفاده از اعداد به دست آمده، گرمای ذوب  $(L_F)$  را حساب کنید.

## تغییر حالت مایع — بخار : دیدیم که به تبدیل مایع به بخار تبخیر می‌گویند. خشک شدن لباس

خیسی که روی بند رخت آویخته شده است، یا خشک شدن سریع یک زمین خیس در هوای گرم تابستان مثال‌هایی از نوعی تبخیر هستند که به آن **تبخیر سطحی** گفته می‌شود. تا پیش از رسیدن به نقطه جوش مایع، تبخیر به طور پیوسته‌ای از سطح مایع رخ می‌دهد. در پدیده تبخیر سطحی، تندی برخی از مولکول‌های مایع به حدی می‌رسد که می‌توانند از سطح مایع فرار کنند (شکل ۴-۲۵). تجربه نشان می‌دهد آهنگ رخ دادن این فرایند به عواملی از جمله دما و مساحت سطح مایع بستگی دارد.



شکل ۴-۲۵ در حین تبخیر سطحی، مولکول‌های پر انرژی‌تر از سطح مایع می‌گریزند.

## فعالیت ۴-۱۰



- الف) بررسی کنید از دیدگاه مولکولی، افزایش دما و افزایش مساحت سطح مایع چگونه بر آهنگ تبخیر سطحی مایع اثر می‌گذارد؟
- ب) با بررسی تبخیر سطحی در شرایط مختلف سعی کنید از راه تجربه، عامل یا عامل‌های دیگری را پیدا کنید که بر آهنگ تبخیر سطحی مؤثر باشند.
- پ) تحقیق کنید کوزه‌های سفالی چگونه می‌توانند آب داخل خود را خنک کنند.

## خوب است بدانید



**تعریق و تنظیم دمای بدن :** برای جانوران بزرگ جثه، نسبت مساحت سطح بدن — که از آن گرما تلف می‌شود — به حجم داخلی بدن — که در آن گرما تولید می‌شود — نسبتاً کم است. بنابراین، آنها غالباً دستگاه‌های ویژه‌ای برای خلاص شدن از این گرمای ناخواسته دارند؛ مثلاً سگ‌ها با نفس نفس زدن و خرگوش کوهی که در تصویر نشان داده شده است، با فرستادن خون به گوش‌های نازک، بزرگ و پر از مویرگ خود این گرمای ناخواسته را از دست می‌دهند. بدن انسان‌ها به گونه‌ای دیگر عمل می‌کند و با عرق کردن گرما از دست می‌دهد. در واقع عرق کردن سبب می‌شود که لایه‌آبی روی پوست بدن تشکیل شود. این لایه‌آب با جذب گرمای مورد نیاز برای تبخیر سطحی از بدن، بدن را خنک می‌کند.



شکل ۴-۲۷ در هنگام جوشیدن، حباب‌ها از محل تشکیل خود به سمت سطح آزاد مایع بالا می‌روند.

وقتی مایعی را روی اجاقی قرار می‌دهیم، با گرم کردن مایع به دمای مشخصی می‌رسیم که در آن حباب‌های گاز از درون مایع بالا می‌آیند، که نشانه‌ای از آغاز فرایندی موسوم به **جوشیدن** است. به این دمای مشخص، نقطه جوش می‌گویند. در مورد آب، به محض اینکه حباب‌ها بالا می‌آیند به آب کمی سردتر می‌رسند و پیش از رسیدن به سطح آزاد آب با صدای تیزی فرو می‌باشند 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 می‌باشند (شکل ۴-۲۶). در این حالت است که می‌گوییم آب به «جوش کامل» رسیده است و آهنگ تبخیر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دماسنجی که مخزن آن درون آب قرار دارد دمای ثابتی را نشان می‌دهد که برای آب خالص در فشار جو متعارف (۱ atm)،  $100^{\circ}\text{C}$  است. در جوشیدن، کل مایع در فرایند تبخیر شرکت می‌کند. به فرایند تبخیر تا پیش از رسیدن به نقطه جوش، تبخیر سطحی و به فرایند تبخیر در نقطه جوش، اصطلاحاً جوشیدن می‌گویند، در حالی که هر دو فرایند، تبخیرند.

#### فعالیت ۴-۱۱

از تفاوت نقطه جوش اجسام مختلف در صنعت، استفاده زیادی می‌شود. تحقیق کنید چگونه از این ویژگی برای جدا کردن محصولات نفتی استفاده می‌شود؟

جدول ۴-۵ مقادیر  $L_V$  برای آب در دماهای مختلف<sup>۰</sup>

$L_V$ (kJ/kg)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
۲۴۹۰	۰
۲۴۵۴	۱۵
۲۳۷۴	۵۰
۲۲۵۶	۱۰۰
۲۱۱۵	۱۵۰
۱۹۴۰	۲۰۰

\* مقادیر تا  $100^{\circ}\text{C}$  در فشار ۱ atm است.

تجربه نشان می‌دهد که گرمای منتقل شده برای تبخیر هر مایع با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم مایع بخار شده را گرمای نهان ویژه تبخیر می‌نامیم که برای سادگی **گرمای نهان تبخیر** نامیده می‌شود و آن را با  $L_V$  نشان می‌دهیم.

$$L_V = \frac{Q}{m} \quad (۴-۱۲)$$

گرمای نهان تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. جدول ۴-۵ برخی از مقدارهای  $L_V$  را نشان می‌دهد که به طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به دست آمده است.

#### پوشش ۴-۴

چرا در جدول ۴-۵ گرمای نهان تبخیر آب با افزایش دمای آن کاهش می‌یابد؟

گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم  $m$  که گرمای تبخیر آن  $L_V$  است از رابطه  $Q = +mL_V$  به دست می‌آید. علامت مثبت نشان دهنده آن است که مایع هنگام تبخیر گرما می‌گیرد.

### مثال ۴-۱۳

معمولاً وقتی هوا را با بخاری‌های شعله‌ای گرم می‌کنند، برای حفظ رطوبت محیط، ظرف آبی را روی بخاری می‌گذارند. اگر دمای آب در یکی از این ظرف‌ها روی  $50^\circ\text{C}$  ثابت مانده باشد، تعیین کنید برای تبخیر  $200\text{ kg}$  از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

**پاسخ:** با توجه به رابطه ۴-۱۲ و استفاده از جدول ۴-۵ داریم:

$$Q = +mL_V = +(200\text{ kg})(2374 \times 10^3\text{ J/kg}) = 474800\text{ J}$$

جدول ۴-۶ نقطه جوش و گرمای نهان تبخیر برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر

ماده	نقطه جوش ( $^\circ\text{C}$ )	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیوم	-۲۶۹	۲۱
هیدروژن	-۲۵۳	۴۶۰
نیتروژن	-۱۹۶	۲۰۰
اکسیژن	-۱۸۳	۲۱۴
آمونیاک	-۳۵	۱۳۶۹
اتر	۳۵	۳۷۷
برم	۵۹	۱۹۳
کلروفرم	۶۲	۲۴۷
اتانول	۷۹	۸۴۶
بنزن	۸۰	۳۹۰
آب	۱۰۰	۲۲۵۶
ید	۱۸۴	۱۶۴
گلیسرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای نهان تبخیر مایع در نقطه جوش آن سروکار داریم و البته نقطه جوش هر مایع به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطه جوش آن می‌شود. جدول ۴-۶ نقطه جوش و گرمای نهان تبخیر مربوط به این نقطه را برای برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر نشان می‌دهد.

### خوب است بدانید



**بادگیرها:** از گذشته‌های بسیار دور در مناطق کویری ایران مانند یزد، کرمان، کاشان، طبس و... برای خنک کردن هوای داخل بناها از انواع مختلف بادگیرها استفاده می‌شده است. ساختمان یکی از انواع بادگیرها به شکل مکعب مستطیل است که در دو یا چهار طرف آن، شکاف‌هایی تعبیه شده است. جریان باد با برخورد به شکاف‌های رو به باد، توسط کانال‌هایی به درون ساختمان هدایت می‌شود و بدین ترتیب هوای بیرون به داخل ساختمان می‌رود، در حالی که بقیه هوا از کنار بادگیر عبور می‌کند و به علت اصل برنولی سبب کاهش فشار هوا در شکاف‌های پشت به باد بادگیر می‌شود. 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، خنک می‌شود. به عبارتی، گرما از دیواره‌های تونل، حوض آب یا هوا گرفته می‌شود تا آب از مایع به بخار تبدیل شود. سپس جریان هوای خنک شده از طریق کانال‌های دیگری از دهانه‌های پشت به باد بادگیر، بر اثر کاهش فشار در اطراف این دهانه‌ها، خارج می‌شود.

الف) چرا غذا در دیگ زودپز، زودتر پخته می‌شود؟  
 ب) دلیل دیرتر پخته شدن تخم مرغ در ارتفاعات چیست؟ کوهنوردان برای رفع این مشکل چه کاری انجام می‌دهند؟

## مثال ۴-۱۴

۲/۰ لیتر آب را درون یک کتری برقی با توان الکتریکی ۱/۵ kW می‌ریزیم و آن را روشن می‌کنیم.  
 الف) از شروع جوشیدن تا تبخیر همه آب درون کتری چقدر گرما به آب داده می‌شود؟  
 ب) چه مدت طول می‌کشد تا این فرایند انجام شود؟ فرض کنید تمام انرژی الکتریکی تبدیل شده به انرژی گرمایی، به آب می‌رسد.

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه ۴-۱۲ و جدول ۴-۶ داریم:

$$Q = mL_V = (2/0 \text{ kg})(2256 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 4/5 \times 10^6 \text{ J}$$

ب) آن گاه با استفاده از رابطه توان خواهیم داشت:

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{4/5 \times 10^6 \text{ J}}{1/5 \times 10^3 \text{ J/s}} = 3/0 \times 10^3 \text{ s} = 5 \text{ min}$$

برای اندازه‌گیری گرمای نهان تبخیر در نقطه جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش ۴-۴ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

## آزمایش ۴-۴

هدف: تعیین گرمای نهان تبخیر آب

وسایله‌های مورد نیاز: بشر ۲۰۰ cc، دماسنج، سه پایه، توری، پایه و گیره، چراغ گاز، زمان‌سنج، آب و ترازو

شرح آزمایش:



- جرم بشر خالی را اندازه‌گیری کنید و مقدار معینی آب (مثلاً ۲۰۰ g) در آن بریزید.
- توری را روی سه پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و بشر را روی توری قرار دهید.
- دماسنج را به کمک پایه و گیره طوری درون بشر قرار دهید تا مخزن آن کمی پایین‌تر از سطح آب باشد.
- در لحظه‌ای که دمای آب به  $\theta_1 = 70^\circ \text{C}$  می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید ( $t_1 = 0 \text{ s}$ ).
- صبر کنید تا آب به جوش آید. زمان ( $t_2$ ) و دما ( $\theta_2$ ) را ثبت کنید.
- با استفاده از رابطه  $P(t_2 - t_1) = mc(\theta_2 - \theta_1)$  و جای‌گذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب ( $P$ ) را به دست آورید.
- گرما دادن را آن قدر ادامه دهید تا مقدار قابل ملاحظه‌ای از آب بخار شود (تذکر: در طول گرمادادن باید شرایط چراغ و بشر ثابت بماند تا توان گرمادهی چراغ به آب تغییر نکند).
- زمان ( $t_2$ ) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن کردن آن جرم آب بخار شده ( $m'$ ) را به دست آورید.
- گرمای تبخیر را با استفاده از رابطه  $P(t_2 - t_1) = m' L_V$  به دست آورید.

## تمرین ۴-۶

قطعه یخی به جرم  $1\text{ kg}$  و دمای اولیه  $2^\circ\text{C}$  را آن قدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار  $100^\circ\text{C}$  شود. کل گرمای مورد نیاز برای این تبدیل چند کیلو ژول است؟

تبدیل بخار به مایع نیز در طبیعت رخ می‌دهد و گاهی قطره‌های مایعی از بخار روی سطوح جامد تشکیل می‌شود. به این پدیده، **میعان** گفته می‌شود. در واقع میعان، وارون فرایند تبخیر است. بنابراین، بخار گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. گرمای مربوط به میعان مقداری بخار به جرم  $m$  و گرمای نهان تبخیر  $L_V$  از رابطه  $Q = -mL_V$  محاسبه می‌شود. علامت منفی نشان‌دهنده آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد و باعث گرم شدن اجسام پیرامون خود می‌شود؛ مثلاً یکی از عواملی که موجب می‌شود در هوایی که رطوبت آن زیاد است، احساس گرمای بیشتری بکنیم، همین میعان بخار آب روی بدنمان است.

## فعالیت ۴-۱۲



در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق کنید.

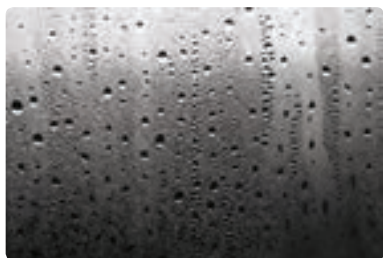
## مثال ۴-۱۵

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی روی شیشه پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره‌قطره می‌شود. اگر دمای شیشه حدود  $5^\circ\text{C}$  باشد برای آنکه  $5\text{ g}$  آب روی شیشه تشکیل شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

**پاسخ:** با استفاده از جدول ۴-۶ و رابطه ۴-۱۲ داریم:

$$Q = -mL_V = -(5 \times 10^{-3} \text{ kg})(2490 \times \frac{10^3 \text{ J}}{\text{kg}}) = -1/2 \times 10^5 \text{ J}$$

در این عمل،  $1/2 \times 10^5 \text{ kJ}$  گرما به شیشه داده می‌شود.



## فعالیت ۴-۱۳

در فرایندهای تغییر حالت (تغییر فاز) دما تغییر نمی‌کند، اما انرژی درونی ماده تغییر می‌کند. در این باره تحقیق کنید.



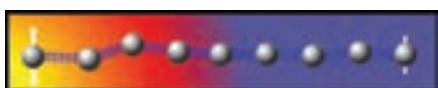
همان‌طور که در کتاب علوم هفتم دیدیم، شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارت‌اند از: رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی. در هر فرایند انتقال گرما، ممکن است هر سه این ساز و کارها دخالت داشته باشند (شکل ۴-۲۷).



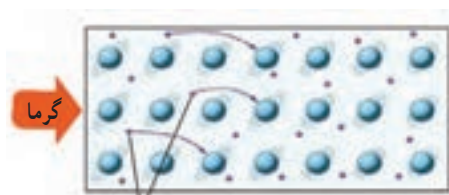
شکل ۴-۲۷ هر سه روش انتقال گرما را در این تصویر مشاهده می‌کنید.

اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. انتقال گرما، از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم هم‌دما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر ساز و کار هر یک از این روش‌ها می‌پردازیم.

**رسانش گرمایی:** بسیاری از ما این تجربه را داریم که انتهای قاشق فلزی درون ظرف غذای روی اجاق روشن را با دست گرفته و داغی آن را احساس کرده‌ایم. اما همچنین دیده‌ایم اجسامی دیگر مانند شیشه، چوب و... نیز می‌توانند گرما را تا حدودی انتقال دهند. رسانش گرمایی در این اجسام، به دلیل ارتعاش‌ها و گسترش این ارتعاش‌ها در طول آنهاست (شکل ۴-۲۸). به جهت نبود الکترون‌های آزاد، این اجسام، رساناهای گرمایی خوبی نیستند. به همین دلیل از برخی از این مواد در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا حتی‌الامکان از خروج گرما در زمستان و ورود آن در تابستان جلوگیری کنند. اما در فلزات افزون بر ارتعاش‌های اتمی، الکترون‌های آزاد نیز در انتقال گرما نقش دارند. بنابراین، نسبت به سایر اجسام، رساناهای گرمایی بسیار بهتری هستند. در واقع چون الکترون‌ها بسیار کوچک‌اند و به سرعت حرکت می‌کنند با برخورد با سایر الکترون‌ها و اتم‌ها سبب رسانش گرما می‌شوند (شکل ۴-۲۹). بنابراین، در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرما بیشتر از اتم‌هاست.

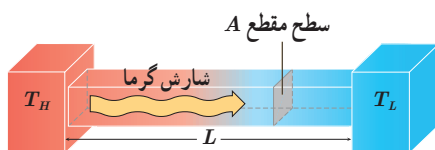


شکل ۴-۲۸ در نافلزات گرما صرفاً از طریق ارتعاش اتم‌ها انتقال می‌یابد. در شکل، این انتقال ارتعاشات توسط فنرها شبیه‌سازی شده است.



الکترون‌های آزاد

شکل ۴-۲۹ الکترون‌های آزاد با برخورد به یکدیگر و اتم‌ها موجب رسانش بهتری برای گرما می‌شوند.



شکل ۴-۳۰ میله‌ای به طول  $L$  و مقطع  $A$  بین دو منبع با دماهای  $T_H$  و  $T_L$  قرار گرفته است.

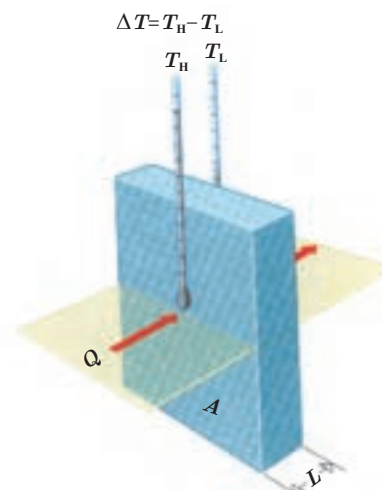
با شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال گرما به روش رسانش می‌توانیم گرمای منتقل شده از یک سر میله به سر دیگر آن را محاسبه کنیم. فرض کنید طول یک میله  $L$  و مساحت مقطع آن  $A$  باشد (شکل ۴-۳۰) و یک سر میله در دمای بالاتر  $T_H$  و سر دیگر آن در دمای پایین‌تر  $T_L$  قرار گرفته باشد. گرمایی که در مدت زمان  $t$  از انتهای با دمای بالاتر میله به انتهای با دمای پایین‌تر آن شارش می‌یابد، را با  $Q$  نشان می‌دهیم. نسبت  $\frac{Q}{t}$ ، آهنگ رسانش گرمایی نامیده می‌شود و آن را با  $H$  نشان می‌دهیم.

تجربه نشان می‌دهد که آهنگ رسانش گرمایی ( $H$ ) با مساحت سطح مقطع میله ( $A$ ) و اختلاف دمای دو انتهای میله ( $T_H - T_L$ ) نسبت مستقیم و با طول میله ( $L$ ) نسبت وارون دارد؛ یعنی:

$$H = \frac{Q}{t} = k \frac{A(T_H - T_L)}{L} \quad (۴-۱۳)$$

در این رابطه،  $k$  رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. در SI، یکای رسانندگی گرمایی  $J/s \cdot m \cdot K$  یا وات بر متر-کلوین ( $W/m \cdot K$ ) است. جدول ۴-۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۷ رسانندگی گرمایی برخی از مواد در دمای $20^\circ C$			
رسانندگی گرمایی ( $W/m \cdot K$ )	ماده	رسانندگی گرمایی ( $W/m \cdot K$ )	ماده
۲	یخ	۰/۰۵	پشم شیشه
۳۵	سرب	۰/۰۴	چوب پنبه
۸۰	آهن	۰/۰۲۴	هوای خشک
۲۳۵	آلومینیم	۰/۲ تا ۰/۱	انواع چوب
۲۹۰	طلا	۰/۶	آب
۴۰۰	مس	۰/۸ تا ۰/۶	آجر
۴۲۰	نقره	۱ تا ۰/۶	انواع شیشه



شکل ۴-۳۱ تیغه‌ای به ضخامت  $L$  و مقطع  $A$  بین دو منبع با دماهای  $T_L$  و  $T_H$  قرار گرفته است.

اگرچه رابطه ۴-۱۳ برای میله بیان شده است، ولی برای تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع  $A$  و ضخامت  $L$  نیز برقرار است (شکل ۴-۳۱). از لحاظ تجربی برای اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی مواد برای اجسام فلزی از میله و برای اجسام نافلزی از تیغه، یا بره استفاده می‌کنند.

#### پوشش ۴-۶

برخی آشپزها برای آنکه سیب‌زمینی زودتر آب‌پز شود، ابتدا چند سیخ کوچک فلزی درون سیب‌زمینی فرو می‌کنند و بعد آن را در آب انداخته و روی اجاق قرار می‌دهند. علت این کار آشپزها چیست؟

#### مثال ۴-۱۶

طول و عرض شیشه پنجره اتاقی  $2/0$  m و  $1/5$  m و ضخامت آن  $5/0$  mm است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است  $-3/0^\circ C$  و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است  $+2/0^\circ C$  است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟ ( $k = 1$  W/m.K) **پاسخ:** با استفاده از رابطه ۴-۱۳ داریم:

$$H = k \frac{A(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن  $k = 1$  W/m.K،  $A = (1/5\text{m})(2/0\text{m}) = 2/0\text{m}^2$ ،  $\Delta T = 5/0^\circ C = 5/0\text{K}$  و  $L = 5/0\text{m}$  در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$H = (1\text{W/m.K}) \frac{(2/0\text{m}^2)(5/0^\circ C)}{5/0\text{m}} = 3 \times 10^3\text{W}$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری  $3\text{kW}$  می‌شود.



برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشه پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایه میانی هوا جایگزین می‌کنند. طول و عرض شیشه دوجداره پنجره اتاقی به ترتیب  $2/0\text{ m}$  و  $1/5\text{ m}$ ، ضخامت هر یک از دو لایه شیشه‌ای آن  $5\text{ mm}$  و ضخامت لایه میانی هوا  $12\text{ mm}$  است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است  $3/0^\circ\text{C}$  و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است  $2/0^\circ\text{C}$  است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت، با عدد به دست آمده در مثال قبل مقایسه کنید. فرض کنید می‌توان مجموعه شیشه دوجداره و هوای بین آن را مانند تیغه یا بره‌ای با همان مساحت و ضخامت لایه هوا در نظر گرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً برابر با رسانندگی گرمایی هواست.

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۴-۱۳ داریم:

$$H = kA \frac{(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت:

$$H = (0/024\text{ W/m.K}) \frac{(3/0^\circ\text{C} - 2/0^\circ\text{C})}{0/012\text{ m}} = 30\text{ W}$$

توجه کنید که در این محاسبه از رسانندگی گرمایی هوا،  $k = 0/024\text{ W/m.K}$  استفاده شد.

همان‌طور که می‌بینید عدد به دست آمده، تفاوت زیادی با عدد به دست آمده در مثال قبل دارد ( $100$  بار کوچک‌تر است) که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

#### تمرین ۴-۷

مساحت استخری با کف تخت،  $820$  مترمربع و عمق آن  $2/0$  متر است. در یک روز گرم دمای سطح آب  $25^\circ\text{C}$  و دمای کف آب  $12^\circ\text{C}$  است. آهنگ رسانش گرمایی از سطح استخر به کف آن چقدر است؟

#### فعالیت ۴-۱۴



تصویری بسیار بزرگ شده از موی یک خرس قطبی

موهای خرس قطبی توخالی هستند. تحقیق کنید این موضوع چه نقشی در گرم نگه داشتن بدن خرس در سرمای قطب دارد؟

**همرفت:** وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چگونه همه آب آن در مدت نه چندان

زیادی گرم می‌شود؟ بخاری چگونه هوای داخل اتاق را گرم می‌کند؟

انتقال گرما در مایعات و گازها که معمولاً رساناهای گرمایی خوبی نیستند عمدتاً به روش همرفت،

یعنی همراه با جابه‌جایی بخشی از خود ماده، انجام می‌گیرد. همان‌طور که در کتاب علوم هشتم دیدید

این پدیده بر اثر کاهش چگالی شماره با افزایش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما به روش همرفت را

می‌توان به سادگی با انجام آزمایش نمایش داد.

## آزمایش ۴-۵



**هدف:** مشاهده پدیده همرفت

**وسایله‌های موردنیاز:** لوله همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پتاسیم پرمنگنات یا جوهر، چراغ الکلی یا گازی

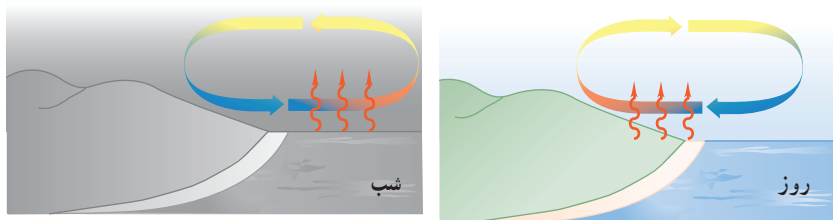
**شرح آزمایش:**

- ۱- لوله را از آب سرد پر کنید و به آرامی چند دانه پتاسیم پرمنگنات (یا چند قطره جوهر) را از دهانه لوله به داخل آن بریزید.
- ۲- یکی از شاخه‌های قائم لوله را مطابق شکل روی شعله بگیرید و در همان لحظه شاخه قائم دیگر لوله را با دست لمس کنید.
- ۳- دستتان را از شاخه قائم بردارید و در حالی که گرما دادن را ادامه می‌دهید به مایع درون لوله با دقت نگاه کنید. پس از چند دقیقه دوباره همان شاخه قائم لوله را لمس کنید.
- ۴- مشاهدات خود را بنویسید و با بحث در گروه، دلیل هر یک از مشاهدات را توضیح دهید.

همرفت می‌تواند در همهٔ شماره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، برخلاف رسانش گرمایی، انتقال گرما با انتقال بخش‌هایی از خود ماده صورت می‌گیرد و وقتی شماره در تماس با جسمی گرم‌تر از خود قرار گیرد، فاصلهٔ متوسط مولکول‌ها در بخشی از شماره که در تماس با جسم گرم است، افزایش می‌یابد؛ بدین ترتیب حجم آن زیاد می‌شود، در نتیجه چگالی این قسمت از شماره کاهش می‌یابد؛ چون اکنون چگالی این شمارهٔ انبساط‌یافته کمتر از شمارهٔ سردتر اطراف خود است. نیروی شناوری (بنا به اصل ارشمیدس) موجب بالا رفتن آن می‌شود. آن‌گاه مقداری از شمارهٔ سردتر اطراف آن، جایگزین شمارهٔ 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 ۴-۳۲)، گرم‌شدن آب درون قابلمه (شکل ۴-۳۳)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۴-۳۴)، انتقال گرما از مرکز خورشید به سطح آن و ... همگی بر اثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهند. همهٔ این مثال‌ها نمونه‌هایی از **همرفت طبیعی** است.



**شکل ۴-۳۲** گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت



**شکل ۴-۳۳** روز: زمین ساحل گرم‌تر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی دریا به سمت ساحل می‌شود. شب: زمین ساحل سردتر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی ساحل به سمت دریا می‌شود.

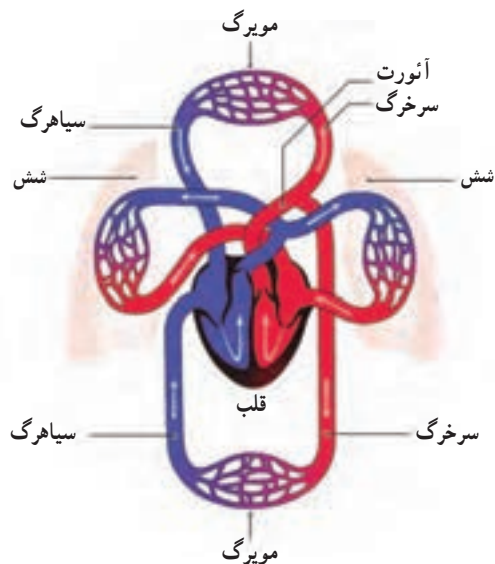


**شکل ۴-۳۳** آب گرم و با چگالی کمتر بالا می‌رود. آب سرد و چگال‌تر پایین می‌آید. جریان همرفتی

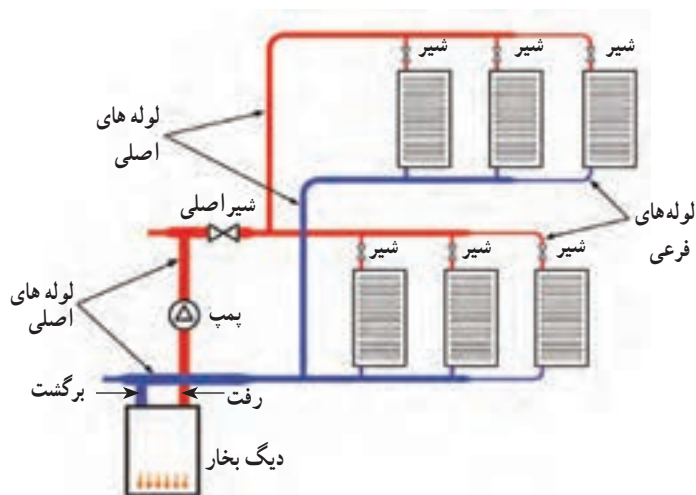
**شکل ۴-۳۴** گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت

به نظر شما چه ارتباطی بین انتقال گرما به روش همرفت و ضریب انبساط حجمی، برای یک مایع وجود دارد؟

نوع دیگری از همرفت، همرفت **واداشته** است که در آن شماره به کمک یک تلمبه (طبیعی یا مصنوعی) به حرکت واداشته می‌شود تا با این حرکت، انتقال گرما صورت پذیرد. سیستم گرم‌کننده مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۴-۳۵)، سیستم خنک‌کننده موتور اتومبیل و نیز گرم و سرد شدن بخش‌های مختلف بدن بر اثر گردش جریان خون (شکل ۴-۳۶) در بدن جانوران خونگرم مثال‌هایی عینی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.

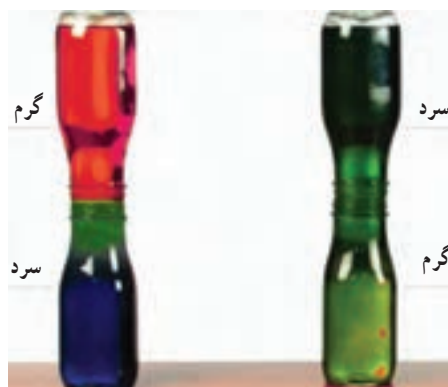


شکل ۴-۳۶ طرحی از دستگاه گردش خون که در آن قلب همچون تلمبه‌ای باعث همرفت واداشته خون می‌شود.



شکل ۴-۳۵ طرحی از سیستم گرم‌کننده مرکزی در ساختمان‌ها

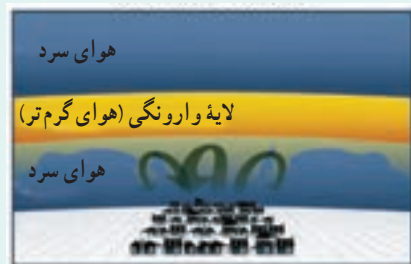
### فعالیت ۴-۱۵



چهار بطری شیشه‌ای یکسان، دو رنگ جوهر قرمز و آبی، دو کارت ویزیت مقوایی و آب بسیار سرد و بسیار گرم تهیه کنید. در دو تا از بطری‌ها جوهر آبی و در دو بطری دیگر جوهر قرمز بریزید. سپس بطری‌های آبی را با آب خیلی سرد و بطری‌های قرمز را با آب خیلی گرم پر کنید. اکنون در حالی که دهانه یک بطری قرمز را با کارت ویزیت گرفته‌اید، دهانه آن را دقیقاً روی دهانه یک بطری آبی قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. همین آزمایش را به طور معکوس نیز انجام دهید؛ یعنی این‌بار، یک بطری آبی رنگ که دهانه آن با کارت پوشیده شده است را روی دهانه یک بطری قرمز رنگ قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. مشاهدات خود را توضیح دهید. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



(الف)



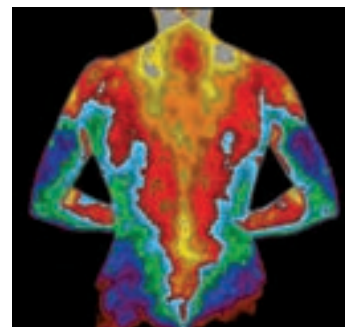
(ب)

الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در: (الف) شرایط عادی و (ب) شرایطی که وارونگی هوا رخ می‌دهد.

**وارونگی هوا<sup>۱</sup>:** در شرایط عادی، توزیع لایه‌های هوای اطراف زمین به این ترتیب است که هوای گرم در اطراف سطح زمین قرار دارد و هوای لایه‌های بالاتر از آن به تدریج سرد و سردتر است. بدیهی است که در این حالت شرایطی مثل همرفت طبیعی حاکم است؛ یعنی هوای گرم‌تر به بالا می‌رود و هوای سردتر و چگال‌تر پایین می‌آید و بدین ترتیب چرخش هوایی بر اثر پدیده همرفت رخ می‌دهد (شکل الف).

وارونگی هوا معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود و در آن همرفت طبیعی در جو زمین متوقف می‌گردد. در چنین شب‌هایی، لایه هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایه هوای گرم بالاتر قرار می‌گیرد. این لایه هوای گرم، پیش از این، بر اثر پدیده همرفت در یک روز عادی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایه هوای سرد مجاور زمین، باعث می‌شود پدیده همرفتی بین این لایه بسیار سرد و لایه هوای گرم بالای آن رخ ندهد. بدین ترتیب، مانع از چرخش هوا بر اثر پدیده همرفت در سطح زمین می‌گردد. به این پدیده، وارونگی هوا می‌گویند. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلاینده شهری واقع در لایه هوای سرد مجاور زمین، که عمدتاً ناشی از تردد خودروها و کارخانجات دودزا است، در این لایه حبس می‌شوند (شکل ب). وارونگی هوا تا وقتی تداوم دارد که بر اثر وزیدن باد لایه‌های هوای سرد و گرم جابه‌جا شود، یا با افزایش دمای قابل توجه لایه سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جو زمین از سر گرفته شود. با توجه به اینکه در این پدیده، الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در یک روز طبیعی بر هم می‌خورد، به این پدیده وارونگی دما<sup>۲</sup> نیز گفته می‌شود.

**تابش گرمایی:** همه ما تجربه گرم شدن در آفتاب را داریم. با نزدیک کردن دستمان به اجسام گرمی مانند رادیاتور گرم شوفاژ، یا زیر لامپ رشته‌ای روشن نیز تجربه مشابهی خواهیم داشت. آیا با نزدیک کردن دستتان به زیر 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 فرسرخ، نور مرئی، تابش فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای  $\gamma$  است. هر کدام از این امواج چشمه‌های تولیدکننده مربوط به خود را دارد. ما در این بخش، به تابش الکترومغناطیسی گسیل‌شده از مواد

**شکل ۴-۳۷** تصویری دمانگانت از بدن یک فرد. سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای  $22^{\circ}\text{C}$  به دلیل تابش گرمایی با آهنگی در حدود  $10\text{ W}$  گرما از دست می‌دهد در حالی که در همین شرایط به دلیل همرفت و رسانش در هوای مجاور سطح بدن، در مجموع با آهنگی در حدود  $100\text{ W}$  گرما از دست می‌دهد.

۱- Air Inversion

۲- Temperature Inversion



**شکل ۴-۳۸** درون مکعب لسلی، آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.



**شکل ۴-۳۹** اینها اندام‌های حفره‌ای هستند که گرما را آشکار می‌کنند.



**شکل ۴-۴۰** کلم اسکانک برف اطراف خود را آب کرده است.

بر اثر دمای آنها سروکار داریم. در واقع هر جسم در هر دمایی تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. به این نوع تابش، تابش گرمایی می‌گویند. نشان داده می‌شود که تابش گرمایی در دماهای زیر حدود  $50^{\circ}\text{C}$  عمدتاً به صورت تابش فروسرخ است که نامرئی است. برای آشکارسازی تابش‌های فروسرخ از ابزاری موسوم به **دمانگار**<sup>۱</sup> استفاده می‌کنیم و به تصویر به دست آمده از آن **دمانگاشت**<sup>۲</sup> می‌گوییم. شکل ۴-۳۷ تصویر دمانگاشتی از بدن یک شخص را نشان می‌دهد. توجه کنید که رنگ‌ها نمادین است و ناحیه‌های گرم‌تر با رنگ قرمز و ناحیه‌های سردتر با رنگ آبی مشخص شده است.

تابش گرمایی از سطح هر جسم علاوه بر دما به مساحت، میزان صیقلی بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۴-۳۸). سطوح صاف و درخشان با رنگ‌های روشن تابش گرمایی کمتری دارند، در حالی که تابش گرمایی سطوح تیره، ناصاف و مات بیشتر است. تابش گرمایی در پدیده‌های زیستی نیز کاربردهای فراوانی دارد که در اینجا به دو نمونه از آنها اشاره می‌شود.

**الف) شکار تابش فروسرخ:** نوعی از مارهای زنگی اندام‌هایی حفره‌ای بر روی پوزه خود دارند که نسبت به تابش فروسرخ حساس‌اند (شکل ۴-۳۹). این مارها اغلب در سیاهی شب شکار می‌کنند. در واقع اندام‌های حفره‌ای به آنها کمک می‌کند که طعمه‌های خونگرم خود را به واسطه تابش فروسرخ‌شان در تاریکی و سرمای شب مشاهده کنند.

**ب) کلم اسکانک<sup>۳</sup>:** کلم اسکانک (شکل ۴-۴۰) یکی از چندین گیاهی است که می‌تواند دمایش را تا بیشتر از دمای محیط بالا ببرد. این نوع کلم به خاطر بالا رفتن دمایش، انرژی خود را از طریق تابش فروسرخ از دست می‌دهد و می‌تواند برف اطرافش را در زمستان آب کند.

## فعالیت ۴-۱۶



پرتوسنج (رادیومتر) وسیله‌ای است که از یک حباب شیشه‌ای تشکیل شده است که درون آن چهار پره فلزی قائم قرار دارد که می‌توانند حول یک محور (سوزن عمودی) بچرخند. دو وجه هر چهار پره، یک در میان سفید و سیاه است. وقتی این وسیله کنار یک چشمه نور قرار گیرد، پره‌ها حول سوزن عمودی می‌چرخند و هر چه شدت نور بیشتر باشد، این چرخش سریع‌تر است. در مورد دلیل چرخش پره‌ها تحقیق کنید.

۱- Thermograph

۲- Thermogram

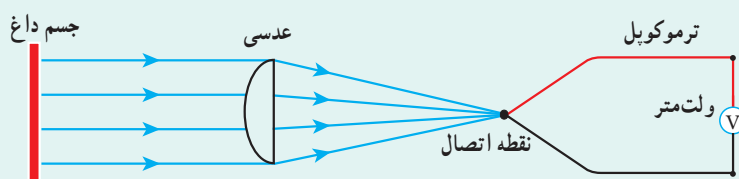
۳- Skunk Cabbage

از تابش گرمایی می‌توان به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری دمای اجسام استفاده کرد. به روش‌های اندازه‌گیری دما مبتنی بر تابش گرمایی، **تف‌سنجی**<sup>۱</sup> و به ابزارهای اندازه‌گیری دما به این روش، **تف‌سنج**<sup>۲</sup> می‌گویند. تف‌سنج برخلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرد. تف‌سنجی، به‌خصوص در اندازه‌گیری دماهای بالای  $1100^{\circ}\text{C}$  اهمیت ویژه‌ای دارد. تف‌سنج تابشی و تف‌سنج نوری، تف‌سنج‌هایی برای اندازه‌گیری این دماها هستند و تف‌سنج نوری به عنوان دماسنج معیار برای اندازه‌گیری این دماها انتخاب شده است.

خوب است بدانید

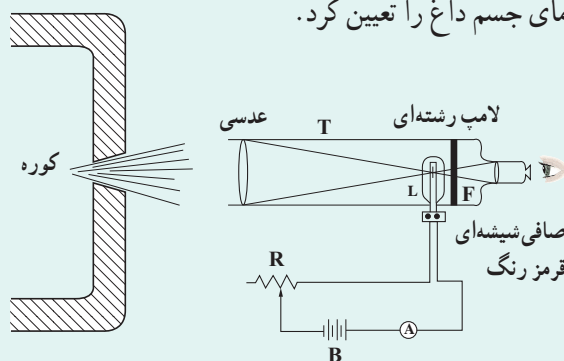
### تف‌سنج‌های اندازه‌گیری دماهای بالا

**الف) تف‌سنج تابشی:** این تف‌سنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل شده از جسم روی یک ترموکوپل اندازه می‌گیرد. می‌توان دمای جسم را از روی ولتاژ خروجی ترموکوپل تعیین کرد.



(الف) تف‌سنج تابشی و طرحی از ساختار آن

**ب) تف‌سنج نوری:** این تف‌سنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری دمای اجسام خیلی داغ با دمای بیش از  $1200\text{K}$  (مانند کوره‌ها) به کار می‌رود. اساس کار این تف‌سنج، مقایسه رنگ و شدت نور تابیده از کوره، با رنگ و شدت نور یک لامپ رشته‌ای است. این تف‌سنج از یک دوربین T تشکیل شده است که در لوله آن یک صافی شیشه‌ای قرمز رنگ F و یک لامپ الکتریکی کوچک L قرار دارد. نور تابیده شده از کوره، توسط عدسی دوربین روی رشته لامپ متمرکز می‌شود و ناظری که به درون دوربین نگاه می‌کند، رشته تیره لامپ را بر زمینه نور کوره می‌بیند. رشته لامپ به باتری B و مقاومت متغیر R متصل شده است. با تغییر دادن مقاومت متغیر R، جریان رشته لامپ را به تدریج افزایش می‌دهیم تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به طوری که رشته لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



(ب) تف‌سنج نوری و طرحی از ساختار آن



**یخ بستن بر اثر تابش:** در بعضی نواحی که یخچال رایج نیست، برای ساختن یخ، آب را در کاسه‌ای کم عمق می‌ریزند و در طول شب بیرون می‌گذارند. کف و اطراف کاسه، عایق‌بندی شده و روی آن باز است. بدیهی است که اگر دمای هوا به زیر نقطه انجماد آب برسد، آب یخ خواهد زد. اما گاهی در شب‌هایی که هوا صاف است ممکن است آب در هوایی که دمای آن قدری بالاتر از نقطه انجماد آب است نیز یخ ببندد. دلیل این پدیده آن است که در یک شب صاف، آسمان را می‌توان مثل یک سطح واحد در نظر گرفت که دمایش زیر نقطه انجماد آب است. در طول شب، تبدلی از تابش فروسرخ بین سطح آسمان و آب صورت می‌گیرد. گسیل تابشی آب که ابتدا دمایش بالاتر از نقطه انجماد است بیشتر از تابشی است که از آسمان جذب می‌کند و بنابراین آب سرد می‌شود. اگر دمای هوای اطراف آب خیلی بیشتر از نقطه انجماد آب نباشد، آب ممکن است بر اثر این فرایند تابشی آنقدر گرما از دست بدهد تا یخ بزند.

#### ۶-۴ قوانین گازها



**شکل ۴-۴۱** سرد شدن هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه محاله شدن مخزن شده است.

روی برخی از افشانه‌ها (اسپری‌ها) نوشته شده است "از قرار دادن افشانه در آتش خودداری شود". با داغ کردن قوطی افشانه، جنبش مولکولی گاز درون آن زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های آن افزایش می‌یابد و این می‌تواند حتی موجب ترکیدن قوطی شود. اگر در یک بطری نوشابه پلاستیکی و توخالی، اندکی آب داغ بریزیم و سپس آب را در بطری چرخانده و دور بریزیم و آن‌گاه در بطری را محکم ببندیم، بطری پس از مدتی محاله می‌شود. شکل ۴-۴۱ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل محاله شده است. همچنین شکل ۴-۴۲ یک اسباب‌بازی ساده را نشان می‌دهد که مخزن پایینی آن تا نیمه از یک مایع رنگی پر شده است. وقتی این مخزن را در دستتان می‌گیرید، فشار هوا و بخار مایع در نیمه خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع این مخزن را به طرف پایین می‌راند. این کار سبب می‌شود مایع رنگی مخزن پایینی از لوله باریک ماریچ که انتهای پایینی آن درون این مخزن قرار دارد بالا رود. هر چه دستتان گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را در برگرد، مایع در لوله بیشتر بالا می‌رود.

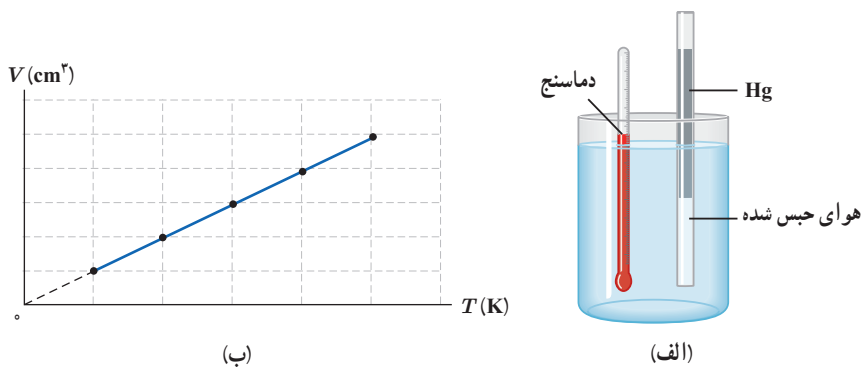
برای بررسی رفتار گاز می‌توان مقداری گاز را درون یک استوانه قرار داد و در هر لحظه دما، فشار و حجم آن را اندازه‌گیری کرد. دانشمندانی مانند بویل، ماریوت، شارل، گی لوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطه بین فشار، حجم، دما و مقدار گاز درون یک محفظه را بیابند.

**بررسی گاز در فشار ثابت:** تاکنون در مورد انبساط گرمایی جامدها و مایع‌ها مطالبی را فرا گرفته‌ایم. اما در مورد گازها چگونه؟ آیا حجم گازها نیز متناسب با دما تغییر می‌کند؟ چون گازها به سادگی مترکم می‌شوند باید به فشار گاز نیز فکر کنیم. ژاک شارل<sup>۱</sup> دانشمند فرانسوی (۱۸۲۳-۱۷۴۶ م.) به‌طور تجربی دریافت که اگر فشار 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 ۴-۴۳ الف، نوعی از آزمایش او و شکل ۴-۴۳ ب، نتیجه‌ای از آن آزمایش را نشان می‌دهد.



**شکل ۴-۴۲** با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لوله ماریچ بالا می‌رود.

<sup>۱</sup> Jacques Charles



**شکل ۴-۱۳** الف) اسبابی برای تحقیق اثر دما بر حجم مقدار ثابتی از گاز که در فشار ثابت نگاه داشته شده است. ب) نمودار  $V$  بر حسب  $T$  برای یک گاز، وقتی فشار و مقدار گاز ثابت باشد.

نتیجه این آزمایش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V}{T} = \text{ثابت}$$

(۱۴-۴) (فشار و جرم ثابت)

در این رابطه  $V$  حجم گاز و  $T$  دمای گاز بر حسب کلون است.



#### فعالیت ۴-۱۷

سرِ سرنگی را که بیستون آن آزادانه حرکت می‌کند به فشارسنجی می‌بندیم و آن را به طور افقی درون ظرف آبی می‌گذاریم و ظرف را به آرامی گرم می‌کنیم. توضیح دهید کدام یک از کمیت‌های دما، حجم، فشار و مقدار هوای درون سرنگ تغییر می‌کند و تغییر آنها چگونه است؟

#### مثال ۴-۱۸

در آزمایشی، دمای مقدار معینی گاز اکسیژن را در فشار ثابت از  $27^\circ\text{C}$  به  $87^\circ\text{C}$  می‌رسانیم. اگر حجم گاز ابتدا  $2/0\text{L}$  باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

**پاسخ:** در این آزمایش، جرم و فشار گاز ثابت مانده است. پس بنا به رابطه ۴-۱۴ داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$T_1 = (27 + 273)\text{K} = 300\text{K} \quad , \quad V_1 = 2/0\text{L}$$

$$T_2 = (87 + 273)\text{K} = 360\text{K} \quad , \quad V_2 = ?$$

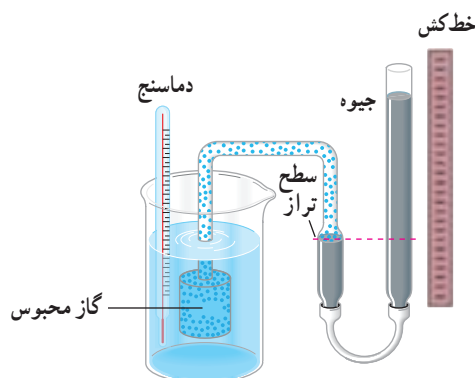
$$\frac{2/0}{300} = \frac{V_2}{360} \Rightarrow V_2 = 2/4\text{L}$$

با استفاده از داده‌های مثال، می‌دانیم:

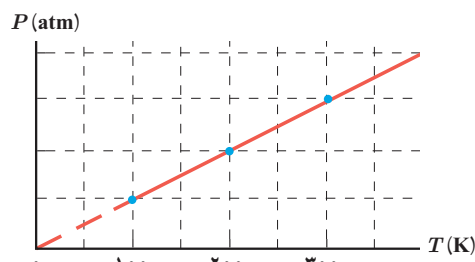
بنابراین

**بررسی گاز در حجم ثابت:** شیمی دان فرانسوی ژوزف لوئیس گی لوساک<sup>۱</sup> (۱۸۵۰-۱۷۷۸ 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 کلون) متناسب است (شکل ۴-۴۴). شکل ۴-۴۵ نوعی از آزمایش او را برای بررسی تغییر فشار و دمای گاز، در حجم ثابت نشان می دهد.

$$\frac{P}{T} = \text{ثابت} \quad (\text{حجم و جرم ثابت}) \quad (۴-۱۵)$$



شکل ۴-۴۵ آزمایش ساده برای اندازه گیری فشار گاز در دماهای مختلف (در حجم ثابت)



شکل ۴-۴۴ رابطه بین فشار و دمای یک گاز، در حجم ثابت

**مثال ۴-۱۹**

راننده ای پیش از حرکت، فشار لاستیک اتومبیل خود را با یک فشارسنج اندازه می گیرد و برای آن مقدار ۲۱۴ kPa را به دست می آورد. در این زمان، دما برابر با ۱۵°C است. پس از چند ساعت رانندگی، توقف می کند و فشار لاستیک را دوباره اندازه می گیرد. اینک فشار ۲۴۱ kPa شده است. اکنون دمای هوای داخل لاستیک چقدر است؟ از تغییر حجم کم هوای درون لاستیک چشم پوشی کنید و فرض کنید فشار هوای محیط برابر با ۱۰۱ kPa = ۱ atm باشد.

**پاسخ:** می دانیم که فشارسنجها، فشار پیمانه ای (سنجه ای) را اندازه می گیرند که برابر با اختلاف فشار مطلق با فشار هوای محیط است. بنابراین، برای استفاده از رابطه ۴-۱۵ باید فشار هوای محیط را به فشارهای پیمانه ای اضافه کنیم. پس داریم:

$$P_1 = 214 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 315 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 241 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 342 \text{ kPa}$$

همچنین توجه کنید که دماها باید بر حسب کلون باشد. بنابراین، برای دمای اولیه داریم:

$$T_1 = (15 + 273) \text{ K} = 288 \text{ K}$$

اکنون با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۴-۱۵ خواهیم داشت:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_1}{T_1} \quad , \quad T_2 = \left( \frac{342 \text{ kPa}}{315 \text{ kPa}} \right) (288 \text{ K}) = 313 \text{ K} = (313 - 273)^\circ \text{C} = 40^\circ \text{C}$$

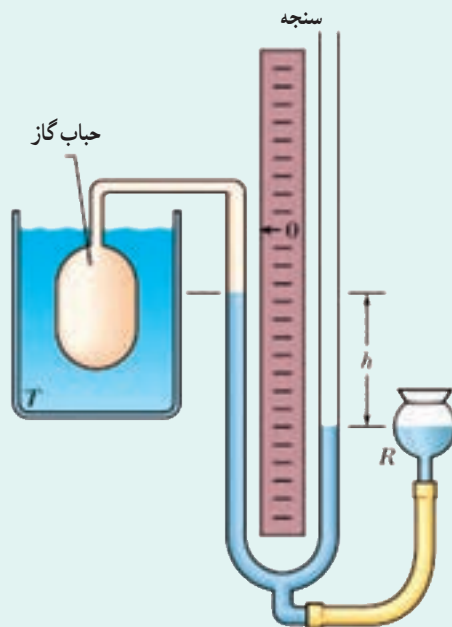
این پاسخی معقول است؛ زیرا پس از یک رانندگی طولانی، لاستیکها به میزان قابل توجهی گرم می شوند.

<sup>۱</sup> Joseph Louis Gay-Lussac

**دماسنج گازی حجم ثابت:** مطابق شکل، این دماسنج شامل یک حباب پر شده از گاز است که توسط لوله‌ای به یک فشارسنج جیوه‌ای متصل شده است. با بالا و پایین بردن مخزن R، همواره می‌توان سطح جیوه را در شاخه سمت چپ لوله U شکل، در مقابل صفر خط کش نگه داشت تا حجم گاز ثابت باقی بماند. با تغییر دما، فشار گاز تغییر می‌کند. دما با فشار نسبت مستقیم دارد و نمودار دما بر حسب فشار خطی است. برای استاندارد کردن درجه‌بندی دماسنج، در یک توافق بین‌المللی، نقطه‌ای موسوم به **نقطه سه‌گانه آب<sup>۱</sup>** را به عنوان مرجع اندازه‌گیری دما انتخاب کرده‌اند. نقطه سه‌گانه آب، نقطه‌ای است که در آن سه فاز آب (آب مایع، یخ و بخار آب) در تعادل‌اند. به این نقطه دمای  $273/16\text{K}$  را اختصاص داده‌اند.<sup>۲</sup> برای اندازه‌گیری دمای محیط، فشار گاز درون حباب را در این دما اندازه می‌گیرند و به آن دما و فشار به ترتیب، مقادیر  $T$  و  $P$  را اختصاص می‌دهند. به همین ترتیب، به دما و فشار گاز درون حباب در نقطه سه‌گانه آب به ترتیب، مقادیر  $T_{tr}$  و  $P_{tr}$  را اختصاص می‌دهند (توجه کنید  $P_{tr}$  آن فشاری نیست که برای رسیدن به نقطه سه‌گانه لازم است، بلکه فشار گاز موردنظر در نقطه سه‌گانه است). با توجه به خطی بودن رابطه فشار و دما داریم:

$$T = T_{tr} \left( \frac{P}{P_{tr}} \right) = (273/16\text{K}) \left( \frac{P}{P_{tr}} \right)$$

یعنی با دانستن فشار گاز در دمای مورد نظر و در نقطه سه‌گانه آب، به راحتی می‌توان دمای مورد نظر را محاسبه کرد. اگر از 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.



۱ – Triple Point of Water

۲ – دقت کنید که این دما همان دمای صفر درجه سلسیوس نیست و اندکی با آن متفاوت است.

**بررسی گاز در دمای ثابت:** سومین قانون تجربی گازها، توسط دانشمند انگلیسی رابرت بویل<sup>۱</sup> در سال ۱۶۶۲ میلادی ارائه شد و دانشمند فرانسوی امه ماریوت<sup>۲</sup> در سال ۱۶۷۶ میلادی به نتیجه مشابهی رسید.

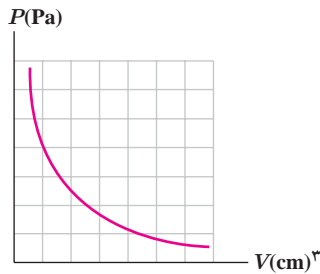
در واقع آنها دریافتند که اگر دمای مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود، فشار آن با حجمش رابطه وارون دارد (شکل ۴-۴۶). به عبارتی، حاصل ضرب فشار و حجم گاز مقداری ثابت است.



**رابرت بویل**

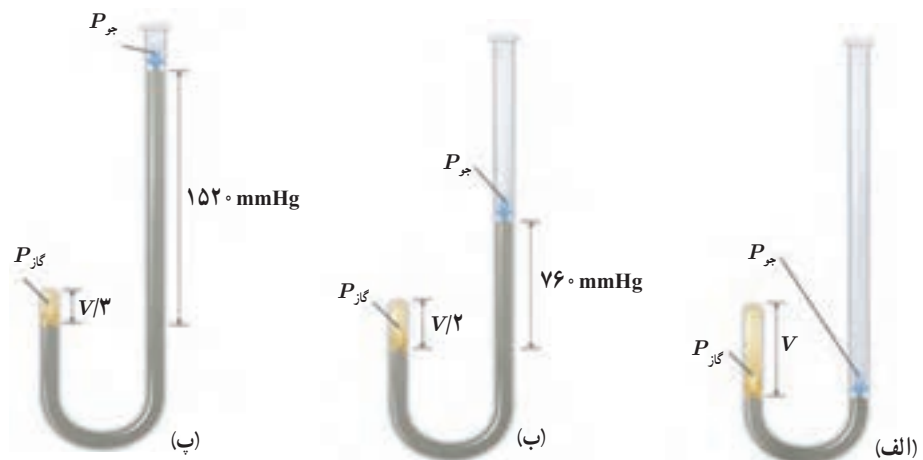
رابرت بویل در سال ۱۶۲۷ در شهر مونستر ایرلند به دنیا آمد. بویل در ۱۴ سالگی به ایتالیا سفر کرد و در آنجا تحت تأثیر اندیشه‌های گالیله قرار گرفت و در مراجعت به انگلستان وارد دانشگاه آکسفورد شد. او در آکسفورد عضو انجمن دانشجویی به نام «کالج نامرئی» شد که وظیفه اصلی آن کشف حقایق علمی از راه و روش آزمایش بود. بویل تجربه‌گری ماهر بود و در نتیجه تجربه‌ها و آزمایش‌های زیاد خود به کشف قانون بویل نایل آمد. او همچنین در مورد پدیده صوت، رنگ‌ها، بلورها و الکتریسیته ساکن نظریه‌های جالبی ارائه داد و حتی چیزی نمانده بود که به کشف عنصر اکسیژن نایل شود. او ضمن کارهای آزمایشگاهی خود پی برد که از ترکیب عناصر می‌توان مواد جدیدی ساخت. رابرت بویل علاوه بر کارهای علمی به امور اجتماعی و انسان‌دوستانه نیز پایبند بود و از جمله هزینه انتشار کتاب مشهور نیوتون (اصول) را برعهده گرفت. بویل در سال ۱۶۹۱ در لندن درگذشت.

(۴-۱۶) (دما و جرم ثابت)  $PV = \text{ثابت}$



شکل ۴-۴۷ نمودار فشار برحسب حجم گاز در دمای ثابت

شکل ۴-۴۷ نوعی از آزمایش بویل را نشان می‌دهد.



**شکل ۴-۴۷ الف)** در ابتدا گاز در فشار  $76 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm}$  است توجه کنید که ارتفاع جیوه در هر دو شاخه یکسان است و دهانه شاخه سمت راست باز است. حجم گاز محبوس  $V$  است. (ب) اگر جیوه به شاخه سمت راست افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه  $76 \text{ mmHg}$  گردد، فشار گاز برابر فشار جو ( $76 \text{ mmHg}$ ) به علاوه  $76 \text{ mmHg}$ ، یعنی برابر  $152 \text{ mmHg}$  و حجم گاز محبوس  $\frac{V}{2}$  می‌شود. (پ) اگر باز هم به شاخه سمت راست جیوه افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه  $152 \text{ mmHg}$  گردد فشار کل وارد به گاز به  $228 \text{ mmHg}$  می‌رسد و حجم گاز محبوس به  $\frac{V}{3}$  کاهش می‌یابد.

۱ - Robert Boyle

۲ - Edme Mariotte

## مثال ۴-۲۰



دلفینی حباب هوایی را در زیر دریاچه‌ای تفریحی ایجاد می‌کند. فرض کنید این حباب به سطح دریاچه می‌رسد و با رسیدن به سطح آب، حجم آن دو برابر می‌شود. عمقی که در آن حباب تشکیل شده است، چقدر بوده است؟ فرض کنید فشار هوا در سطح آب  $101 \text{ kPa}$ ، دمای آب دریاچه در همه جا یکسان است و فشار هوای داخل حباب همان فشار آب پیرامون آن است.

**پاسخ:** با توجه به اینکه بالا آمدن حباب در دمای یکسان آب دریاچه، رخ می‌دهد از رابطه ۴-۱۸ برای هوای درون حباب استفاده می‌کنیم:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

که در اینجا  $P_1$  و  $V_1$  به ترتیب، فشار و حجم هوای داخل حباب در محل ایجاد آن و  $P_2$  و  $V_2$  به ترتیب، فشار و حجم آن در سطح دریاچه است. بنابراین:

$$P_1 = P_0 + \rho gh \quad , \quad P_2 = P_0 \quad , \quad V_2 = 2V_1$$

با قرار دادن این روابط در رابطه ۴-۱۶ خواهیم داشت:

$$(P_0 + \rho gh) V_1 = P_0 (2V_1)$$

$$h = \frac{P_0}{\rho g} = \frac{101 \times 10^3 \text{ Pa}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ N/kg})} = 10.3 \text{ m}$$

و از آنجا

بنابراین، دلفین در عمق  $10.3 \text{ m}$  از سطح دریاچه، حباب را ایجاد کرده است.

## فعالیت ۴-۱۸

با وجود تلاش در جهت ثابت نگه داشتن فشار هوای درون هواپیما، همواره مقدار آن کمتر از فشار هوای روی زمین است. وقتی هواپیما بالا می‌رود و فشار هوا کم می‌شود، بسته‌های نوشیدنی یا دسر باد می‌کنند و حتی گاهی درشان باز می‌شود. با فرض ثابت بودن دما، این پدیده را توضیح دهید.

**قانون آووگادرو:** کمیت دیگری که در بررسی قوانین گازها باقی مانده است، جرم گاز و یا به طور

معادل تعداد مول گاز است. آمدئو آووگادرو<sup>۱</sup> (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶ م.) دانشمند ایتالیایی در سال ۱۸۱۱ میلادی بیان کرد که در دما و فشار یکسان، نسبت حجم گاز  $V$  به تعداد مولکول‌های آن  $N$  ثابت است:

$$\frac{V}{N} = \text{ثابت} \quad (\text{دما و فشار یکسان})$$

همان‌طور که در بخش ۴-۳ دیدیم در یک مول از گاز به تعداد  $6.02 \times 10^{23}$  (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 رابطه بالا را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{V}{n} = \text{ثابت} \quad (4-17) \quad (\text{دما و فشار یکسان})$$



**آمدئو آووگادرو: آمدئو آووگادرو**

در سال ۱۷۷۶ در شهر تورین ایتالیا به دنیا آمد. پدرش قاضی مشهوری بود و علاقه داشت پسرش حرفه او را پیشه کند. آمدئو فرد نابغه‌ای بود و در ۲۰ سالگی به دریافت دکترای حقوق نایل آمد. اما پس از سه سال کار و تجربه، دریافت که این حرفه خواسته‌هایش را برآورده نمی‌کند و از این‌رو به ریاضیات و فیزیک و شیمی روی آورد. در ۳۳ سالگی به مقام استادی فیزیک رسید. دو سال بعد، در سال ۱۸۱۱ نظریه معروف مولکولی خود را در یک مجله فرانسوی به چاپ رساند. اما این نظریه در زمان خود مورد توجه قرار نگرفت و به فراموشی سپرده شد. آووگادرو با کوشش فراوان توانست فرق بین اتم و مولکول را کشف کند. او همچنین بیان کرد که حجم مساوی از هر گاز دارای تعداد مولکول یکسانی است، به شرط آنکه اندازه‌گیری در شرایط یکسانی از دما و فشار صورت گیرد. امروزه نظریه آووگادرو به قانون آووگادرو معروف است و شهرتی عالم‌گیر دارد. آووگادرو بقیه عمرش را نیز صرف پژوهش و تدریس موضوع‌های علمی کرد و سرانجام در سال ۱۸۵۶ درگذشت، درحالی‌که دنیای علم آن روز به نبوغش پی نبرده بود.

**قانون گازهای آرمانی (کامل):** همه روابطی که برای گازها بیان کردیم در مورد گازهایی که به اندازه کافی رقیق باشند، یا چگالی آنها به حد کافی کم باشد، با دقت خوبی برقرار است. به این گازها که مولکول‌های آنها به حدی از هم دورند که برهم تأثیر چندانی نمی‌گذارند، گاز آرمانی (کامل) می‌گویند. در واقع این روابط برای گازهای واقعی که چگالی بالایی دارند نتایجی تقریبی دارد. این روابط را می‌توانیم در شکلی کلی موسوم به قانون گازهای آرمانی به صورت زیر ترکیب کنیم:

$$\frac{PV}{nT} = \text{ثابت}$$

این مقدار ثابت را با  $R$  نشان می‌دهند و به آن ثابت جهانی گازها می‌گویند. آزمایش نشان می‌دهد که مقدار  $R$  برابریست با

$$R = 8.314 \text{ J/mol.K}$$

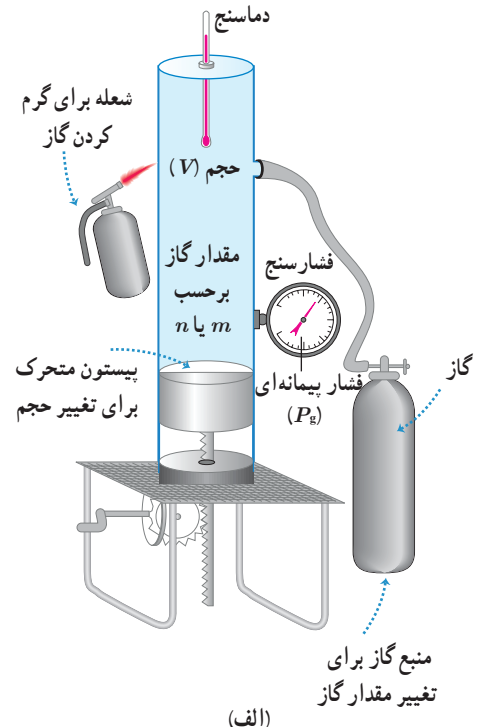
بنابراین، قانون گازهای کامل را می‌توان چنین نوشت:

$$PV = nRT \quad (۴-۱۸)$$

که در آن  $P$  برحسب پاسکال (Pa)،  $V$  برحسب مترمکعب ( $m^3$ )،  $n$  برحسب مول (mol) و  $T$  برحسب کلونین (K) است. شکل ۴-۴۸ الف طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و شکل ۴-۴۸ ب تصویری واقعی از این دستگاه را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۴۸ الف) طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و ب) تصویری واقعی از آن

## مثال ۴-۲۱

الف) تعداد مولکول‌های هوایی که در اتاقی به ابعاد  $4/00\text{ m}$ ،  $6/00\text{ m}$ ،  $3/00\text{ m}$  در فشار  $1/00\text{ atm}$  و دمای  $20^\circ\text{C}$  وجود دارد چقدر است؟ ( $R = 8/31\text{ J/mol}\cdot\text{K}$ )

ب) جرم هوای درون اتاق چقدر است؟ جرم مولی متوسط گازهای موجود در هوا،  $29\text{ kg/mol}$  است.

**پاسخ:** توجه کنید که هوا به صورت تقریبی گاز آرمانی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین از قانون گازهای آرمانی (رابطه ۴-۲۰) استفاده می‌کنیم.

الف) در استفاده از قانون گازهای آرمانی باید مقادیر فشار مطلق هوا برحسب پاسکال، دما برحسب کلوین و حجم برحسب مترمکعب جای‌گذاری شود.

$$P = 1/00\text{ atm} = (1/00 \times 1/01 \times 10^5)\text{Pa} = 1/01 \times 10^5\text{ Pa}$$

$$V = (4/00\text{ m})(6/00\text{ m})(3/00\text{ m}) = 72/0\text{ m}^3$$

$$T = (273 + 20)\text{K} = 293\text{K}$$

در نتیجه برای  $n$  داریم:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/01 \times 10^5\text{ Pa})(72/0\text{ m}^3)}{(8/31\text{ J/mol}\cdot\text{K})(293\text{K})} = 2/99 \times 10^3\text{ mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از هوای درون اتاق به تعداد عدد آووگادرو، مولکول گاز وجود دارد، نتیجه می‌گیریم: مولکول  $1/80 \times 10^{27} = (2/99 \times 10^3\text{ mol})(6/02 \times 10^{23}\text{ مولکول/mol})$  (عدد آووگادرو) (تعداد مول) = تعداد مولکول هوا  
ب) با استفاده از رابطه ۴-۸ ( $n = m/M$ ) جرم هوای درون اتاق را محاسبه می‌کنیم:

$$m = nM = (2/99 \times 10^3\text{ mol})(29\text{ kg/mol}) = 86/7\text{ kg}$$

## مثال ۴-۲۲

درون استوانه‌ای  $12\text{ L}$  گاز اکسیژن با دمای  $7^\circ\text{C}$  وجود دارد. فشار گاز درون استوانه را با فشارسنجی اندازه می‌گیریم. فشارسنج  $14\text{ atm}$  را نشان می‌دهد. دمای گاز را به  $77^\circ\text{C}$  و حجم آن را به  $25\text{ L}$  می‌رسانیم. فشاری که فشارسنج در پایان نشان می‌دهد، چند اتمسفر است؟ فشار هوای بیرون استوانه  $1\text{ atm}$  است. فرض کنید گاز درون استوانه، گاز آرمانی است.  
**پاسخ:** می‌دانیم فشارسنج، فشار پیمانه‌ای را نشان می‌دهد و در قانون گازهای کامل باید از فشار مطلق استفاده کنیم.  
بنابراین:

$$\begin{cases} P_1 = P_{g1} + P_0 = 14 + 1 = 15\text{ atm} \\ V_1 = 12\text{ L} \\ T_1 = \theta_1 + 273 = 7 + 273 = 280\text{ K} \end{cases} \quad \begin{cases} P_2 = ? \\ V_2 = 25\text{ L} \\ T_2 = \theta_2 + 273 = 77 + 273 = 350\text{ K} \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{15 \times 12}{280} = \frac{P_2 \times 25}{350} \Rightarrow P_2 = 9/0\text{ atm}$$

بنابراین، فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با

$$P_{g2} = P_2 - P_0 = 9/0 - 1/0 = 8/0\text{ atm}$$



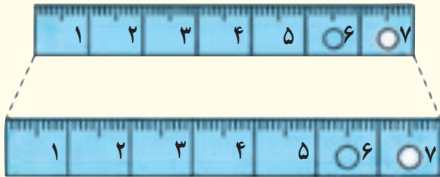
### ۴-۱ دماسنجی

۱) دماهای زیر را بر حسب درجه سلسیوس و فارنهایت مشخص کنید :

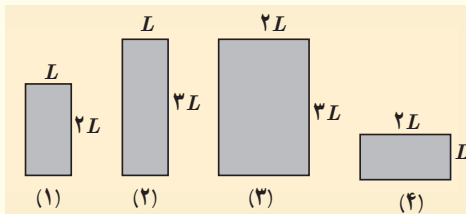
الف)  $0^\circ\text{K}$  (ب)  $273\text{K}$  (پ)  $373\text{K}$  (ت)  $546\text{K}$

۲) برای اندازه‌گیری دمای یک جسم توسط دماسنج به چه نکاتی باید توجه کنیم؟ (راهنمایی: به نکاتی که در فصل ۱ خواندید نیز توجه کنید)

### ۴-۲ انبساط گرمایی



۳) شکل روبه‌رو، یک خط کش فلزی را که در آن سوراخی ایجاد شده است در دو دمای متفاوت نشان می‌دهد (برای روشن بودن مطلب، انبساط به صورت اغراق آمیزی رسم شده است). از این شکل چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



۴) شکل روبه‌رو چهار صفحه فلزی هم جنس به اضلاع متفاوت را در یک دما نشان می‌دهد. اگر دمای همه آنها را به اندازه یکسان زیاد کنیم، الف) ارتفاع کدام صفحه یا صفحه‌ها بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟ ب) مساحت کدام یک بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

پ) اگر در هر چهار تایی آنها روزنه کوچک هم اندازه‌ای وجود داشته باشد، افزایش قطر چهار روزنه در اثر افزایش دمای یکسان را با هم مقایسه کنید.

۵) یک بزرگراه از بخش‌های بتونی به طول  $250\text{ m}$  ساخته شده است. این بخش‌ها در دمای  $10^\circ\text{C}$ ، بتون‌ریزی و عمل آورده شده‌اند. برای جلوگیری از تاب برداشتن بتون در دمای  $50^\circ\text{C}$ ، مهندسان باید چه فاصله‌ای را بین این قطعه‌ها در نظر بگیرند؟  
 $\alpha_{\text{بتون}} \approx 14 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

۶) یک ظرف آلومینیومی با حجم  $400\text{ cm}^3$  در دمای  $20^\circ\text{C}$  به‌طور کامل از گلیسرین پر شده است. اگر دمای ظرف و گلیسرین به  $30^\circ\text{C}$  برسد، چقدر گلیسرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

۷) مقداری بنزین در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع  $h=1\text{ m}$  ریخته شده است. در دمای  $10^\circ\text{C}$  فاصله بین سطح بنزین تا بالای ظرف برابر  $\Delta h=5\text{ cm}$  است. اگر از انبساط ظرف در نتیجه افزایش دما چشم‌پوشی شود، در چه دمایی بنزین از ظرف سرریز می‌شود؟



۸) در شکل روبه‌رو با کاهش دما، نوار دوفلزه به طرف پایین خم می‌شود. اگر یکی از نوارها، برنجی و نوار دیگر فولادی باشد؛ الف) نوار بالایی از چه جنسی است؟

ب) اگر نوارها را گرم کنیم به کدام سمت خم می‌شوند.



۹) طول خط‌های لوله‌های گاز، نفت و فراورده‌های نفتی در کشورمان که عمدتاً مواد سوختی را از جنوب کشور به مرکز و شمال منتقل می‌کند به چند هزار کیلومتر می‌رسد. دمای هوا در زمستان ممکن است تا  $10^\circ\text{C}$  - و در تابستان تا  $50^\circ\text{C}$  + برسد. جنس این لوله‌ها عموماً از فولاد با  $\alpha \approx 10 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

است. طول خط لوله، بین دو ایستگاه تهران - اصفهان تقریباً  $230 \text{ km}$  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 باری مخزنی حامل سوخت با  $30,000 \text{ L}$  بنزین بارگیری شده است. دمای هوا در محل تحویل سوخت  $20^\circ\text{C}$  کمتر از محلی، است که در آنجا سوخت بار زده شده است. راننده چند لیتر سوخت را در این محل تحویل می‌دهد؟

#### ۳-۴ گرما



۱۱ برای گرم کردن  $200 \text{ g}$  آب جهت تهیه چای، از یک گرمکن الکتریکی غوطه‌ور در آب استفاده می‌کنیم. روی برجسب گرمکن  $200 \text{ W}$  نوشته شده است. با نادیده گرفتن اتلاف گرما، زمان لازم برای رساندن دمای آب از  $30^\circ\text{C}$  به  $100^\circ\text{C}$  را محاسبه کنید.

۱۲ دمای یک قطعه فلز  $60^\circ\text{C}$  کیلوگرمی را توسط یک گرمکن  $50 \text{ W}$  در مدت  $110 \text{ s}$  از  $18^\circ\text{C}$  به  $38^\circ\text{C}$  رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژه فلز چه مقداری

را به دست می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این پاسخ از مقدار واقعی گرمای ویژه فلز بیشتر باشد یا کمتر؟ توضیح دهید.

۱۳ گرماسنجی به جرم  $200 \text{ g}$  گرم از مس ساخته شده است. یک قطعه  $80^\circ\text{C}$  گرمی از یک ماده نامعلوم همراه با  $50^\circ\text{C}$  گرم آب به درون گرماسنج ریخته می‌شود. اکنون دمای این مجموعه  $30^\circ\text{C}$  شده است. در این هنگام  $100 \text{ g}$  گرم آب  $70^\circ\text{C}$  به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل  $52^\circ\text{C}$  می‌شود. گرمای ویژه قطعه را محاسبه کنید.

#### 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 سرم 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 درباره فرایند ذوب نادرست است؟

الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر مواد، سبب پایین رفتن نقطه ذوب می‌شود.

ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب کاهش اندک نقطه ذوب آن می‌شود.

پ) فرایند ذوب، عملی گرماگیر است.

ت) گرمایی که جسم جامد در نقطه ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی‌شود.

۱۷ کمترین گرمای لازم برای ذوب کامل  $200 \text{ g}$  نقره که در آغاز در دمای  $20^\circ\text{C}$  قرار دارد چقدر است؟ (فشار هوا را یک اتمسفر فرض کنید)

۱۸ یک راه برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد یک سالن سرپسته در شب هنگام، وقتی که دمای زیر صفر پیش‌بینی شده است، قرار دادن تشت بزرگ پر از آب در سالن است. اگر جرم آب درون تشت  $15 \text{ kg}$  و دمای اولیه آن  $20^\circ\text{C}$  باشد و همه آن به یخ  $0^\circ\text{C}$  تبدیل شود، آب چقدر گرما به محیط پیرامونش می‌دهد؟

۱۹ یک گرمکن  $5^\circ$  واتی به طور کامل در  $10^\circ$  گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می شود.

الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از  $20^\circ\text{C}$  به  $25^\circ\text{C}$  می رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.

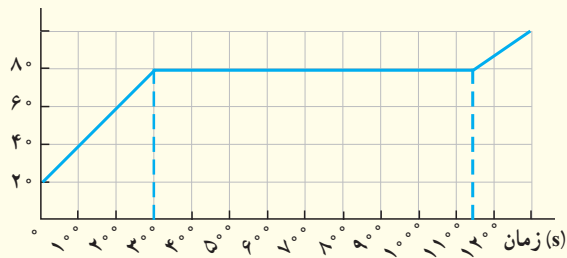
ب) چه مدت طول می کشد تا دمای آب درون گرماسنج از  $25^\circ\text{C}$  به نقطه جوش ( $100^\circ\text{C}$ ) برسد؟

پ) چه مدت طول می کشد تا  $20^\circ$  گرم آب در حال جوش درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۲۰ گرمکنی در هر ثانیه  $20\%$  ژول گرما می دهد. الف) چقدر طول می کشد تا این گرمکن  $100^\circ/1$  کیلوگرم آب  $100^\circ\text{C}$  را به بخار آب

$100^\circ\text{C}$  تبدیل کند؟ ب) این گرمکن در همین مدت، چه مقدار یخ  $0^\circ\text{C}$  را می تواند به آب  $0^\circ\text{C}$  تبدیل کند؟

دما ( $^\circ\text{C}$ )



۲۱ اگر به جسم جامدی که ابعاد آن به اندازه کافی کوچک است با توان

ثابتی گرما بدهیم نمودار دما-زمان آن به صورت کیفی مانند شکل روبه رو

می شود. این نمودار در اینجا برای جسم جامدی به جرم  $50\text{g}$  رسم

شده که توسط یک گرمکن  $10\text{W}$  گرم شده است.

الف) چقدر طول می کشد تا این جامد به نقطه ذوب خود برسد؟

ب) گرمای ویژه جامد و پ) گرمای نهان ذوب آن را محاسبه کنید.

۲۲ در چاله کوچکی  $100\text{kg}$  آب  $10^\circ\text{C}$  قرار دارد. اگر بر اثر تبخیر سطحی قسمتی از آب تبخیر شود و بقیه آن یخ ببندد، جرم

آب یخزده چقدر می شود؟

۲۳ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه های مهم تنظیم دمای بدن است.

الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم  $50\text{kg}$  به اندازه  $1^\circ\text{C}$  کاهش یابد؟ گرمای نهان تبخیر آب در دمای

بدن ( $37^\circ\text{C}$ ) برابر  $2420\text{J/kg}^\circ\text{C}$  و گرمای ویژه بدن در حدود  $3480\text{J/kg.K}$  است. ب) حجم آبی که شخص باید برای جبران آب

تبخیر شده بنوشد، چقدر است؟

## ۴-۵ روش های انتقال گرما

۲۴ اگر شما یک تیر چوبی و یک لوله فلزی سرد را که هم دما هستند لمس کنید، چرا حس می کنید که لوله سردتر است؟ چرا ممکن

است دست شما به لوله بچسبند؟

۲۵ یک پالتو چگونه شما را گرم نگه می دارد؟ چرا استفاده از چند لباس زیر پالتو این عمل را تشدید می کند؟

۲۶ شیشه پنجره ای دارای عرض  $2\text{m}$ ، ارتفاع  $1\text{m}$  و ضخامت  $4\text{mm}$  است.

الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است  $2^\circ\text{C}$  و دمای وجهی از شیشه که در تماس

با هوای گرم داخل اتاق است  $7^\circ\text{C}$  است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه

با  $k = 1\text{W/m.K}$  به بیرون اتاق انتقال پیدا می کند؟

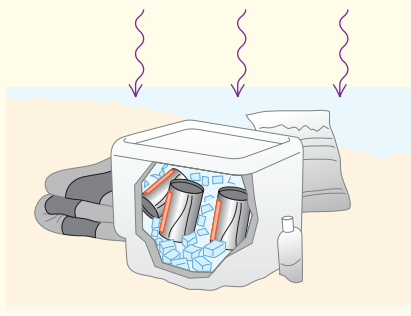
ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می شود؟

۲۷ جعبه یخدانی از جنس پلی استیرن با مساحت کل دیواره های  $8\text{m}^2$  و ضخامت

دیواره های  $2\text{cm}$  در اختیار دارید. اختلاف دمای سطح داخلی و خارجی یخدان

$20^\circ\text{C}$  است. در یک روز ( $24\text{h}$ ) چقدر یخ آب می شود؟ رسانندگی گرمایی

پلی استیرن برابر است با  $k = 0.1\text{W/m.K}$ .



۲۸ دو قوری همجنس و هم اندازه را در نظر بگیرید که سطح بیرونی یکی سیاه‌رنگ و دیگری سفیدرنگ است. هر دو را با آب داغ با دمای یکسان پر می‌کنیم. آب کدام قوری زودتر خنک می‌شود؟

#### ۴-۶ قوانین گازها

۲۹ گازی در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  دارای حجم  $100\text{ cm}^3$  است. الف) این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا در فشار ثابت، حجم آن  $200\text{ cm}^3$  شود؟ ب) این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم  $50\text{ cm}^3$  خواهد شد؟

۳۰ هوایی با فشار  $1\text{ atm}$  درون استوانه‌ای یک تلمبه دوچرخه به طول  $24\text{ cm}$  محبوس است. راه‌های ورودی و خروجی هوای استوانه تلمبه را می‌بندیم. اکنون:

الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به  $3\text{ cm}$  افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چقدر خواهد شد؟

ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس  $3\text{ atm}$  شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۳۱ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا  $17^{\circ}\text{C}$  است، فشارسنج، فشار درون لاستیک را  $200$  اتمسفر نشان می‌دهد. پس از یک رانندگی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه‌گیری می‌شود. اکنون فشارسنج،  $12/3$  اتمسفر را نشان می‌دهد. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است؟ حجم لاستیک را ثابت و فشار جو را  $100$  اتمسفر در نظر بگیرید.

۳۲ دما و فشار متعارف (STP) برای گاز، دمای  $273\text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$  و فشار  $101325\text{ Pa} = 1\text{ atm}$  معرفی می‌شود. حجم یک مول گاز کامل در دما و فشار متعارف چقدر است؟

۳۳ یک حباب هوا به حجم  $2\text{ cm}^3$  در ته یک دریاچه به عمق  $4\text{ m}$  قرار دارد که دما در آنجا  $4^{\circ}\text{C}$  است. حباب تا سطح آب بالا می‌آید که در آنجا دما  $20^{\circ}\text{C}$  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  $101325\text{ Pa}$  در نظر بگیرید.



موتور ماشین‌های بنزینی تا حدود ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کند. دانشمندان و مهندسان در پی کارآمدتر کردن این ماشین‌ها هستند. با این حال، حد بالایی برای بازده این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کل انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

## مقدمه

در موتور خودروها، از واکنش شیمیایی اکسیژن با بخار بنزین در سیلندرها، انرژی گرمایی تولید می‌شود. گاز داغ شده، پیستون‌ها را درون سیلندرها می‌فشارد و کار مکانیکی انجام می‌دهد و این کار باعث جابه‌جایی خودرو می‌شود. موتور خودروها، هواپیماها، قطارها، کشتی‌ها و نیروگاه‌های تولید برق براساس اصول ترمودینامیک طراحی و ساخته می‌شوند. مطالعه ترمودینامیک در قرن نوزدهم آغاز شده است. مهندسان طراح ماشین‌های گرمایی می‌خواستند بدانند قوانین فیزیک چه محدودیت‌هایی در عملکرد ماشین‌های بخار و ماشین‌های دیگری که با استفاده از انرژی گرمایی، انرژی مکانیکی تولید می‌کنند، به وجود می‌آورند. در ترمودینامیک به مطالعه رابطه بین گرما و کار و تبدیل گرما به کار مکانیکی می‌پردازیم. 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 وسیله گروهی از کمیت‌های مشاهده‌پذیر یا ماکروسکوپی که حتماً شامل دماست، توصیف می‌شود. مثلاً مهندسی که رفتار گازهای احتراقی در موتور یک خودرو را بررسی می‌کند، به کمک کمیت‌هایی مانند دما، فشار، حجم، گرمای ویژه و... رفتار گاز را توضیح می‌دهد، بدون آنکه درگیر جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های گاز شود. از این منظر بسیاری از مطالبی که در فصل پیش خواندیم در محدوده علم ترمودینامیک می‌گنجد.

در ترمودینامیک تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً به شکل گاز یا مایع است و با محیط پیرامون خود گرما و کار مبادله می‌کند. این جسم را **دستگاه** و اجسام پیرامون دستگاه را که می‌توانند با آن تبادل انرژی داشته باشند، **محیط** می‌نامیم. مثلاً در موتور خودرو، مخلوط هوا و بخار بنزین دستگاه نامیده می‌شود، در یخچال خانگی، گازی که در لوله‌های فلزی درون و بیرون یخچال جریان دارد و گرما را از درون یخچال به بیرون منتقل می‌کند، دستگاه نامیده می‌شود. همچنین آبی که در یک کتری برقی قرار می‌گیرد و به آن گرما داده می‌شود تا به بخار تبدیل شود را می‌توان دستگاه در نظر گرفت (شکل ۵-۱). در این بررسی، کتری، سیم گرمکن آن و هوا، اجزای محیط هستند.

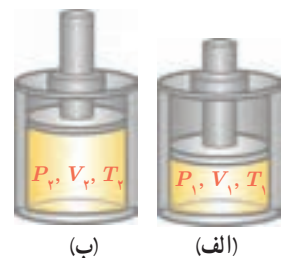


**شکل ۵-۱** آب درون کتری را می‌توان دستگاه ترمودینامیکی در نظر گرفت.

به طور ساده، منظور از دستگاه بخش مشخصی از ماده است که تحولات و مبادله انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود. دستگاه می‌تواند مقدار مشخصی آب، کلّ جو زمین یا حتی بدن یک موجود زنده باشد. نکته مهم آن است که بتوانیم مشخص کنیم چه ماده‌ای دستگاه و چه ماده‌ای محیط است. گستره ترمودینامیک فراتر از پدیده‌های گرمایی مربوط به گازهاست، ولی در این کتاب، بیشتر خود را به بررسی ترمودینامیک گازهای در حالت تعادل محدود می‌کنیم.

## ۱-۵ معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۵-۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی بدون اصطکاک مسدود شده است. پیستون می‌تواند درون استوانه حرکت کند (در اینجا دستگاه مورد بررسی، گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت ۱ (با حجم  $V_1$ ) نگه داشته شده باشد، دما و فشار آن در همه نقاط گاز یکسان خواهد بود؛ مثلاً برابر با  $T_1$  و  $P_1$ . در چنین وضعیت‌هایی می‌گوییم گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. این کمیت‌های  $T$ ،  $V$ ،  $P$  برای تعادل با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** گاز می‌نامیم. در حالت تعادل، متغیرهای ترمودینامیکی گاز، یک تک مقدار مشخص را دارند؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه‌ای در وضعیت شکل ۵-۲ الف قرار دارد این کمیت‌ها مقدارهای  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  را دارند. 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، باید منتظر ماند تا پس از مدتی فشار و دما در همه نقاط گاز به مقادیر جدید دیگری چون  $P_2$  و  $T_2$  برسد. به عبارت دیگر، اکنون متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دارای مقادیر  $P_2$ ،  $V_2$  و  $T_2$  هستند (شکل ۵-۲ ب). خلاصه اینکه یک



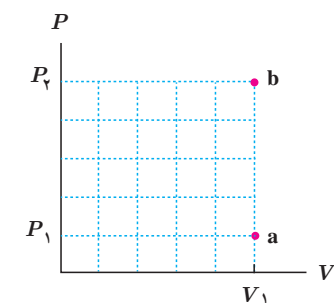
**شکل ۵-۲** گاز داخل استوانه در حالت‌های (الف) اولیه و (ب) نهایی در تعادل ترمودینامیکی است.

دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حالت تعادل ترمودینامیکی است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به طور خودبه خودی تغییر نکند.

متغیرهای ترمودینامیکی مستقل از یکدیگر نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می نامند. اگر گاز آرمانی (کامل) باشد، معادله حالت آن ساده و مستقل از نوع گاز است و با قانون گاز آرمانی (معادله ۴-۲)، یعنی  $PV=nRT$  داده می شود.

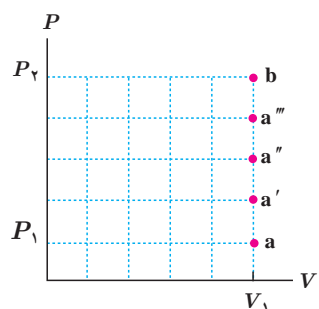
### ۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار

دیدیم حالت تعادل یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی  $P$ ،  $V$  و  $T$  بیان کرد. همچنین دیدیم در اثر گرم شدن گاز یا جابه جا شدن پیستون، حالت تعادل گاز تغییر می کند. هنگامی که دستگاه از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر می رود، می گوئیم یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.

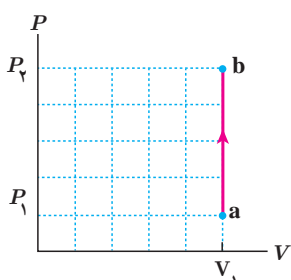


شکل ۳-۳ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت تعادل a به حالت تعادل b رفته است.

اکنون فرض کنید گاز در حالت اولیه  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  باشد. گاز را در حجم ثابت گرم می کنیم تا به حالت تعادل نهایی  $P_2$ ،  $V_1$  و  $T_2$  برسد. در این فرایند، حالت دستگاه در حجم ثابت از a به b تغییر کرده است (شکل ۳-۵). اگر حالت های بین a و b غیر تعادلی باشند، برای این فرایند نمی توان نمودار رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای یگانه ای را نمی توان به کل گاز نسبت داد. اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک گرمکن با دمای قابل تنظیم (منبع گرما) قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع را برابر با دمای اولیه دستگاه، یعنی  $T_1$ ، انتخاب می کنیم. تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. دمای منبع را اندکی افزایش می دهیم. گرمای کمی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر اندکی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه  $a'$  در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقطه های  $a''$ ،  $a'''$  و ... به دست می آیند. اگر گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک باشد، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۵-۵ رسم کرد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل بوده و سریع به تعادل می رسد. چنین فرایندی را **فرایند ایستاوار** می نامند. در ادامه این فصل، فرایندهای مورد بررسی عمده تاً ایستاوار در نظر گرفته می شوند. برای رسم نمودارهای ایستاوار، چند نقطه تعادلی را تعیین کرده و با وصل کردن آنها به یکدیگر نمودار ترمودینامیکی را رسم می کنیم.



شکل ۴-۴ دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می دهد.



شکل ۵-۵ نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم. وقتی فرایندی ایستاوار باشد، می توان برای آن نمودار رسم کرد.

### ۳-۵ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می گیرد و معمولاً فرض می شود که دستگاه در حین تبادل گرما، در تماس با یک **منبع گرما**<sup>۱</sup> است.

**الف) گرما:** در فصل ۴ دیدیم گرما انرژی ای است که به سبب اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می شود. محیط و دستگاه نیز هنگامی مبادله گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند. بنا به قرارداد،

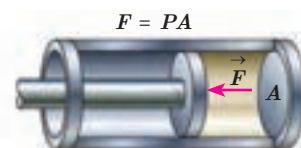
۱- quasi - static

۲- heat reservoir

گرمایی را که دستگاه می‌گیرد، با علامت مثبت، و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان می‌دهیم. در ترمودینامیک دستگاه با یک منبع گرما مبادله گرما می‌کند که در ادامه، آن را معرفی می‌کنیم.

**منبع گرما:** هرگاه یک استکان چای داغ یا یک قطعه یخ را در هوای اتاق بگذاریم، پس از مدتی چای خنک شده و یخ ذوب می‌شود و دمایشان با دمای هوا برابر می‌شود، بی‌آنکه دمای هوای اتاق تغییر محسوسی کند. در این مثال، هوای اتاق را برای چای یا قطعه یخ، اصطلاحاً منبع گرما می‌گویند. در حالت کلی، یک منبع گرما جسمی است که جرم آن در مقابل جرم دستگاهی که با آن تبادل گرما دارد، چنان بزرگ است که می‌تواند مقدار زیادی گرما بگیرد، یا از دست بدهد، بی‌آنکه تغییر دمای محسوسی بکند. در عمل (در آزمایشگاه)، منبع گرما می‌تواند وسیله‌ای باشد که تنظیم دمای آن توسط آزمایشگر صورت می‌گیرد و می‌تواند به دستگاه گرما بدهد، یا از آن گرما بگیرد.

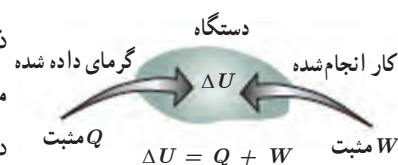
**(ب) کار:** شکل ۵-۶ گازی را درون یک استوانه نشان می‌دهد. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و پیستون که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت چپ جابه‌جا می‌گردد. در این جابه‌جایی نیروی  $\vec{F}$  که گاز به پیستون وارد می‌کند، کار انجام می‌دهد. مقدار این کار برابر با حاصل ضرب بزرگی نیروی  $\vec{F}$  در اندازه جابه‌جایی پیستون است. در این فرایند پیستون نیز روی گاز کار انجام می‌دهد که در بخش‌های بعد محاسبه آن را خواهیم آموخت.



شکل ۵-۶ در شکل بالا  $\vec{F}$ ، نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

## ۵-۴ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل‌دهنده 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، به طوری که با افزایش دما انرژی درونی گاز افزایش می‌یابد. هنگامی که دستگاه در یک فرایند ترمودینامیکی ایستاوار با مبادله کار، گرما، یا هر دو با محیط از حالت اولیه (۱) با انرژی درونی  $U_1$  به حالت نهایی (۲) با انرژی درونی  $U_2$  برسد، تغییر انرژی درونی  $\Delta U = U_2 - U_1$ ، 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 (شکل ۵-۷)، این بستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۵-۷ قرارداد علامت‌ها برای قانون اول ترمودینامیک

$$\Delta U = Q + W \quad (۱-۵)$$

که به آن قانون اول ترمودینامیک گویند و بیانگر قانون پایستگی انرژی است. توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای مقدار معینی از یک گاز رخ می‌دهد و از حالت اولیه یکسان  $(T_1, V_1)$  و  $(P_1)$  آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان  $(T_2, V_2, P_2)$  می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز  $(\Delta U)$  برابر است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می‌توانند متفاوت باشند.

در رابطه ۵-۱ اگر  $W$  کار دستگاه روی محیط در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قرینه کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به صورت  $\Delta U = Q - W$  نوشته می‌شود.

۱- در برخی کتاب‌ها از جمله کتاب‌های شیمی، تغییر انرژی درونی با  $\Delta E$  نشان داده شده است.



در رابطه ۱-۵، گرمای  $Q$  می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد.  $W$  نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ( $\Delta U > 0$ )، یا کاهش ( $\Delta U < 0$ ) یابد یا اینکه تغییر نکند ( $\Delta U = 0$ ).

مثال ۱-۵

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه  $420\text{ J}$  گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد  $100\text{ J}$  باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟  
**پاسخ:** چون دستگاه از محیط گرما گرفته است  $Q = +420\text{ J}$  و چون کار دستگاه روی محیط  $100\text{ J}$  است پس کار محیط روی دستگاه  $W = -100\text{ J}$  می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = 420\text{ J} + (-100\text{ J}) = 320\text{ J}$$



کنت رامفورد

کنت رامفورد با نام اصلی بنیامین تامپسون در سال ۱۷۵۳ میلادی در ماساچوست آمریکا، که آن زمان مستعمره انگلستان بود، به دنیا آمد. نخست به ارتش پیوست و در این دوران شروع به آزمایش های با باروت کرد و در قدرت مواد منفجره سلاح های جنگی تغییرات چشمگیری به وجود آورد و به همین خاطر به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد. چندی نگذشت که به مقام های وزارت جنگ، وزارت کشور و خزانه داری نائل آمد. در ژانویه سال ۱۷۹۸ در انجمن سلطنتی لندن سخنرانی ای درباره «ایجاد گرما بر اثر مالش» ایراد کرد که بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. این سخنرانی جالب نتیجه مشاهداتی بود که سال ها پیش روی توپ جنگی انجام داده بود. کنت رامفورد اکتشافات و مشاهدات خود را در کتابی تحت عنوان «روش های انتقال گرما» چاپ و منتشر کرد و ثابت نمود نظریه لاوازیه در مورد وجود شماره ای به نام کالریک، به عنوان عامل انتقال انرژی گرمایی نادرست است. رامفورد، یک مؤسسه علمی در لندن دایر کرد و هدف او از تأسیس این سازمان، تشویق مردم برای پژوهش های علمی بود. کارهایی که در این مؤسسه انجام می شد اکثراً عملی بود و گاهی نتایجی به دست می آمد که نشان می داد تجربیات عملی همواره از مطالعات نظری ناشی می گردد. بنیامین تامپسون در سال ۱۸۱۴ دیده از جهان فروست. او نابغه و تجربه گر ماهر بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.

خوب است بدانید

سوخت و ساز بدن و قانون اول ترمودینامیک



وقتی غذا می خوریم انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد غذایی به بدن ما انتقال می یابد. از طرفی وقتی فعالیت انجام می دهیم انرژی درونی بدن کاهش می یابد و طبق قانون اول ترمودینامیک به کار و گرما تبدیل می شود. بنا به تعریف، آهنگ سوخت و ساز بدن، آهنگ تبدیل انرژی شیمیایی مواد غذایی جذب شده و اکسیژن به انرژی درونی بدن برای جبران کاهش انرژی درونی است و معمولاً برحسب کیلوکالری بر ساعت ( $\text{kcal/h}^1$ ) یا برحسب وات بیان می شود. جدول زیر آهنگ سوخت و ساز بدن را در برخی از فعالیت ها برای شخصی به جرم متوسط  $65\text{ kg}$  نشان می دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط  $65\text{ kg}$

آهنگ تقریبی سوخت و ساز		نوع فعالیت
Watt	kcal/h	
70	60	خوابیدن
115	100	نشستن
230	200	فعالیت های سبک (خوردن، لباس پوشیدن و ...)
460	400	فعالیت های متوسط (تنیس، راه رفتن و ...)
1150	1000	دویدن ( $15\text{ km/h}$ )
1270	1100	دوچرخه سواری سرعت

۱- در علوم تغذیه معمولاً kcal را با Cal نشان می دهند و آن را کالری بزرگ می خوانند. هر کالری بزرگ  $4/186$  کیلوژول است.

## ۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

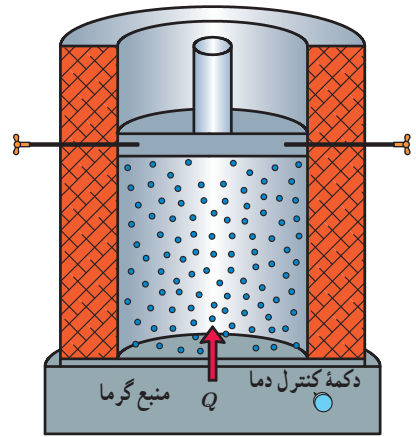
همان طور که گفتیم دستگاه‌های ترمودینامیکی می‌توانند فرایندهای مختلفی را طی کنند. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع‌تر است؛ از جمله: **فرایند هم‌حجم<sup>۱</sup>**، **فرایند هم‌فشار<sup>۲</sup>**، **فرایند هم‌دما<sup>۳</sup>** و **فرایند بی‌دررو<sup>۴</sup>**. در ادامه به 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.

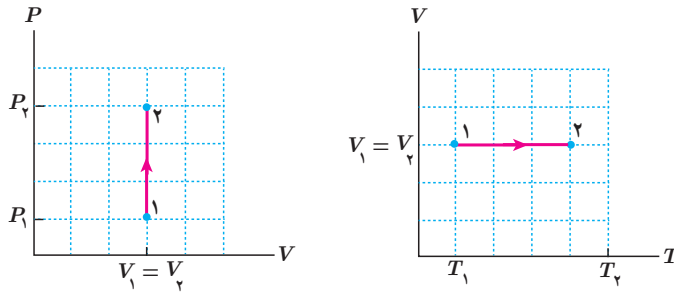
$$\Delta U = Q + W = Q + 0 = Q$$

برای بررسی این فرایند، گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می‌دهیم (شکل ۸-۵)، طوری که دمای اولیه 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 ۹-۵ نمودارهای  $V-T$  و  $P-V$  برای گرم کردن هم‌حجم یک گاز نشان داده شده است. در این فرایند دما و فشار گاز در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال، گاز به صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۸-۵ وارونه می‌شود.



**شکل ۸-۵** دمای گاز را در فرایند هم‌حجم با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می‌دهیم.



**شکل ۹-۵** نمودارهای  $V-T$  و  $P-V$  برای یک فرایند ایستاوار هم‌حجم.

## مثال ۲-۵

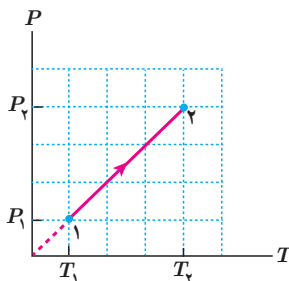
نشان دهید نمودار  $P-T$  برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحه  $P-T$  می‌گذرد.

**پاسخ:** چون گاز آرمانی است با استفاده از معادله حالت گاز آرمانی داریم:

$$P = \left(\frac{nR}{V}\right) T$$

چون  $(nR/V)$  ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات

می‌گذرد (شبیه خط  $y = ax$  در صفحه  $y-x$ ). با نقطه‌گذاری نیز می‌توان نمودار را رسم کرد.



۱ - Isochoric

۲ - Isobaric

۳ - Isothermal

۴ - Adiabatic

روی قوطی‌های افشانه (اسپری)، هشدار داده شده است که از انداختن آن در آتش خودداری کنید. علت این توصیه را براساس فرایند هم حجم توضیح دهید.

جدول ۵-۱ گرمای ویژه 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
CO	۲۰/۷
H <sub>۲</sub>	۲۰/۴
HCl	۲۱/۴
N <sub>۲</sub>	۲۰/۸
NO	۲۰/۹
O <sub>۲</sub>	۲۱/۲
Cl <sub>۲</sub>	۲۴/۸
CO <sub>۲</sub>	۲۸/۵
CS <sub>۲</sub>	۴۰/۹
H <sub>۲</sub> S	۲۵/۴
N <sub>۲</sub> O	۲۸/۵
SO <sub>۲</sub>	۳۱/۳

اکنون به تعیین گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در فصل ۴ با گرمای ویژه مولی آشنا شدیم. گرمای ویژه مولی یک گاز در حجم ثابت ( $C_V$ ) برابر است با مقدار گرمایی که باید به یک مول از آن گاز در حجم ثابت داده شود تا دمای آن ۱K افزایش یابد.

$$C_V = \frac{Q}{n\Delta T}$$

بنابراین در فرایند هم حجم داریم:

$$Q = nC_V\Delta T \quad (۲-۵)$$

یکای  $C_V$  در SI برابر J/mol.K است.

گرمای ویژه مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۵-۱ آمده است. می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برای گازهای آرمانی تک اتمی برابر با  $\frac{3}{2}R$  و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{5}{2}R$  است.

مثال ۵-۳

به ۲/۰۰ مول از گازهای آرمانی He، O<sub>۲</sub> و CO<sub>۲</sub>، در حجم ثابت، ۱۰۰ ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۵-۲ و جدول ۵-۱ داریم:

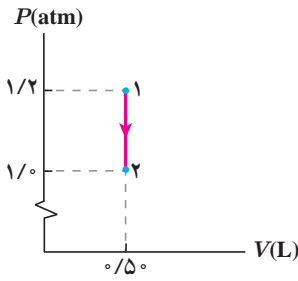
$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

$$\Delta T = \frac{۱۰۰\text{J}}{(۲/۰۰\text{ mol})(۱۲/۵\text{ J/mol.K})} = ۴/۰۰\text{K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{۱۰۰\text{J}}{(۲/۰۰\text{ mol})(۲۱/۲\text{ J/mol.K})} = ۲/۳۶\text{K} \quad \text{برای O}_۲,$$

$$\Delta T = \frac{۱۰۰\text{J}}{(۲/۰۰\text{ mol})(۲۸/۵\text{ J/mol.K})} = ۱/۷۵\text{K} \quad \text{برای CO}_۲,$$

## مثال ۴-۵



شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم را در صفحه  $P-V$  نشان می‌دهد. گاز را آرمانی و تک اتمی فرض کنید. در این فرایند گاز چقدر گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟  
( $1 \text{ atm} = 10^5 \times 10^5 \text{ Pa}$ )

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۲-۵ داریم:

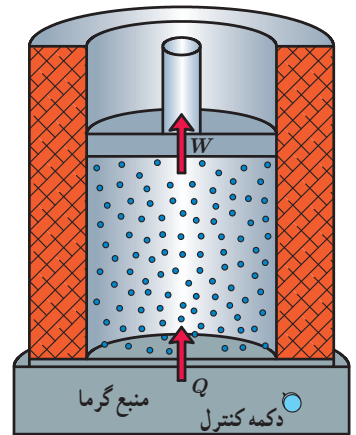
$$\begin{aligned} Q &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) \Delta T = \frac{3}{2} (nRT_2 - nRT_1) = \frac{3}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \\ &= \frac{3}{2} \left[ (1/10 \times 10^5 \text{ Pa})(0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 10^5 \text{ Pa})(0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \right] \\ &= -15 \text{ J} \end{aligned}$$

گرمای مبادله شده  $|Q| = 15 \text{ J}$  است. چون  $Q$  منفی شده است، گاز گرما از دست داده است.

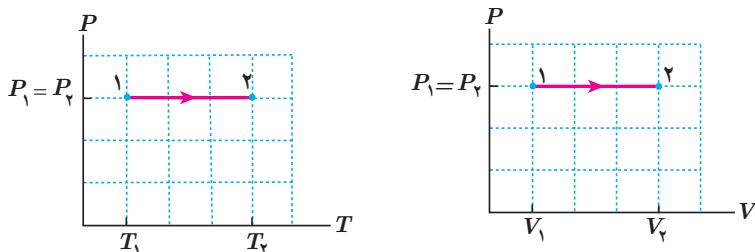
## تمرین ۱-۵

دمای  $n$  مول گاز با گرمای ویژه مولی در حجم ثابت  $C_V$ ، در یک فرایند هم‌حجم از  $T_1$  به  $T_2$  رسیده است. الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید. ب) اگر این گاز، گاز آرمانی و 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 در نظر بگیرید که مطابق شکل ۵-۱۰ داخل استوانه‌ای است که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است و دمای اولیه گاز و منبع برابر است. گاز ابتدا در فشار، حجم، و دمای  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است. دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه، مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود و دمای گاز کمی افزایش می‌یابد و در نتیجه گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به طرف بالا جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش، به‌صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته به طرف بالا حرکت می‌کند. در این فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودارهای  $P-T$  و  $P-V$  این فرایند در شکل ۵-۱۱ رسم شده است.



**شکل ۵-۱۰** گرم کردن گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم



**شکل ۵-۱۱** نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیستند و از این رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قسمتی از محور را برش می‌دهیم و آن را با نماد  $\hookrightarrow$  مشخص می‌کنیم.

نشان دهید نمودار  $V-T$  برای فرایند هم فشار یک گاز آرمانی، خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد.

در فرایند هم فشار، گرما و کار هردو مبادله می‌شود. در اینجا ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز  $P$  باشد با توجه به تعریف فشار ( $P=F/A$ )، گاز طی این فرایند نیروی ثابت  $F=PA$  را به پیستون وارد می‌کند که در آن  $A$  مساحت پیستون است. اگر در این فرایند پیستون به اندازه  $d$  جابه‌جا شود (شکل ۵-۱۲)، کاری که گاز روی پیستون انجام می‌دهد برابر است با

$$\text{کار گاز روی پیستون} = (F \cos \theta) d = (PA \cos 0^\circ) d = P(\Delta V)$$

ولی  $\Delta V$ ، 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 لایه گاز مجاور آن، هم‌اندازه و هم‌جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت:

$$-P \Delta V = \text{منفی کار گاز روی پیستون} = \text{کار پیستون روی گاز}$$

در این کتاب، **کار محیط روی دستگاه** (مثلاً در اینجا کار پیستون روی گاز) را با  $W$  نشان می‌دهیم.

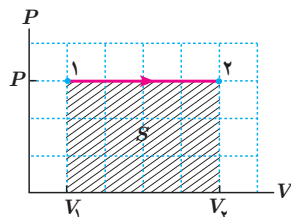
بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

$$W = -P \Delta V$$

(۳-۵) (کار در فرایند هم فشار)

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ( $\Delta V > 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) منفی و اگر گاز متراکم شود ( $\Delta V < 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) مثبت است.

نشان دهید رابطه ۳-۵ که برای یک انبساط هم فشار به دست آمده، برای یک تراکم هم فشار نیز برقرار است.



با توجه به نمودار شکل روبه‌رو، نشان دهید در فرایند هم فشار، مساحت سطح زیر نمودار  $P-V$  برابر با قدرمطلق کار انجام شده است.

گرچه فعالیت ۵-۱ برای یک فرایند هم فشار است، ولی می‌توان نشان داد که نتیجه آن در حالت کلی نیز برای هر فرایندی برقرار است و همواره قدرمطلق کار انجام شده برابر با مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه  $P-V$  است.

## مثال ۵-۵

گازی آرمانی به حجم  $۱/۰۰$  لیتر در فشار ثابت  $۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ Pa}$  مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن به  $۰/۹۰۰$  لیتر می‌رسد. اگر دمای اولیه گاز  $۳۰۰ \text{ K}$  باشد، الف) دمای نهایی گاز و ب) کار انجام شده روی آن چقدر است؟  
**پاسخ:** چون گاز، آرمانی است و حجم آن به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = (300 \text{ K})(0/900) = 2/70 \times 10^2 \text{ K} = 270 \text{ K}$$

در نتیجه

کار انجام شده محیط روی گاز برابر است با

$$W = -P \Delta V = -(1/00 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0/900 - 1/00) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 10 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمای مبادله شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. مانند آنچه که در مورد گرمای ویژه مولی در حجم ثابت دیدیم، درمی‌یابیم که گرمای لازم برای تغییر دمای هم‌فشار یک گاز به اندازه  $\Delta T$ ، از رابطه زیر داده می‌شود:

$$Q = nC_p \Delta T \quad (4-5)$$

که در آن  $C_p$  گرمای ویژه مولی در فشار ثابت است. گرمای ویژه مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۵-۲ آمده است.

می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در فشار ثابت، برای گازهای آرمانی تک‌اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$  و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی  $\frac{7}{2}R$  است.

## مثال ۵-۶

گرمایی که  $۱/۰۰ \text{ L}$  گاز آرمانی  $\text{O}_2$  در فشار جو متعارف ( $1/01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) و با دمای اولیه  $300 \text{ K}$  از دست می‌دهد تا دمایش به  $270 \text{ K}$  برسد، چقدر است؟ ( $R=8/31 \text{ J/mol.K}$ )

**پاسخ:** تعداد مول گاز  $n$  با استفاده از قانون گازهای آرمانی برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/01 \times 10^5 \text{ Pa})(1/00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/31 \text{ J/mol.K})(300 \text{ K})} = 4/05 \times 10^{-3} \text{ mol} = 0/0405 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۵-۲ و رابطه ۴-۵ داریم:

$$Q = nC_p(T_2 - T_1) \\ = (0/0405 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol.K})(270 \text{ K} - 300 \text{ K}) = -35/7 \text{ J}$$

گرمای مبادله شده  $|Q|=35/7 \text{ J}$  است و با توجه به اینکه  $Q$  منفی شده است، نتیجه می‌گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می‌دهد.

جدول ۵-۲ گرمای ویژه مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب  $\text{J/mol.K}$

گاز	$C_p$
Ar	20/8
He	20/8
Ne	20/8
CO	29/1
H <sub>2</sub>	28/8
HCl	29/1
N <sub>2</sub>	29/1
NO	29/8
O <sub>2</sub>	29/4
Cl <sub>2</sub>	33/9
CO <sub>2</sub>	36/9
CS <sub>2</sub>	45/7
H <sub>2</sub> S	34/2
N <sub>2</sub> O	38/8
SO <sub>2</sub>	39/9

مقداری گاز تک‌اتمی آرمانی در یک انبساط هم‌فشار،  $100\text{ J}$  کار انجام می‌دهد.

الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟

ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) گرمای مبادله شده از رابطه  $45$  به دست می‌آید:

$$Q = nC_P\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)\Delta T = \frac{5}{2}nR\Delta T$$

در رابطه بالا  $nR\Delta T$  مجهول است و باید آن را محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم‌فشار استفاده می‌کنیم:

$$W = -P\Delta V = -P(V_f - V_i) = -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) = -nR\Delta T$$

از صورت مسئله می‌دانیم که گاز منبسط شده و  $100\text{ J}$  کار انجام داده است. بنابراین،  $W = -100\text{ J}$  است و در نتیجه داریم:

$$nR\Delta T = 100\text{ J}$$

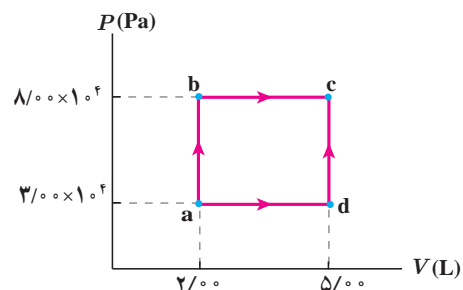
با قراردادن این مقدار در رابطه  $Q$  خواهیم داشت:

$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(100\text{ J}) = 250\text{ J}$$

گرمای مبادله شده  $Q = 250\text{ J}$  است. علامت مثبت  $Q$  نشان می‌دهد که گاز (دستگاه) گرما گرفته است.

ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = 250\text{ J} + (-100\text{ J}) = 150\text{ J}$$



در شکل روبه‌رو، نمودار  $P-V$  برای یک گاز آرمانی نشان داده شده است.

در فرایند  $ab$ ،  $150\text{ J}$  و در فرایند  $bc$ ،  $60\text{ J}$  گرما به دستگاه داده شده است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند  $ab$  چقدر است؟

ب) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند  $abc$  چقدر است؟

پ) گرمای داده شده به گاز در فرایند  $adc$  را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) چون در فرایند  $ab$  هیچ تغییر حجمی نداریم،  $W_{ab} = 0$  و در نتیجه

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 150\text{ J}$$

ب) فرایند  $bc$  در فشار ثابت رخ می‌دهد و بنابراین، کار انجام شده روی دستگاه برابر است با

$$W_{bc} = -P\Delta V = -P(V_c - V_b) = -(1.00 \times 10^4\text{ Pa})(3.00 \times 10^{-2}\text{ m}^3) = -240\text{ J}$$

در نتیجه کل کار انجام شده در فرایند  $abc$  برابر است با

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = 0 - 240\text{ J} = -240\text{ J}$$

و از طرفی گرمای کل داده شده به دستگاه در فرایند  $abc$  برابر است با

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 150\text{ J} + 60\text{ J} = 210\text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 210\text{ J} - 240\text{ J} = -30\text{ J}$$

پ) می‌دانیم در فرایندهای مختلفی که از حالت اولیه یکسان آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز یکسان است. بنابراین:

$$\Delta U_{\text{adc}} = \Delta U_{\text{abc}} = 51 \text{ J}$$

از طرفی کل کار انجام شده در فرایند adc برابر است با:

$$W_{\text{adc}} = W_{\text{ad}} + W_{\text{dc}} = -P(V_d - V_a) = -(3/0 \times 10^5 \text{ Pa})(3/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = -90 \text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U_{\text{adc}} = Q_{\text{adc}} + W_{\text{adc}}$$

و در نتیجه

$$Q_{\text{adc}} = \Delta U_{\text{adc}} - W_{\text{adc}} = (51 \text{ J}) - (-90 \text{ J}) = 141 \text{ J}$$

**پ) فرایند هم‌دما:** دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۱۳-۵ استوانه حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرمایی با دمای ثابت و برابر با دمای اولیه گاز قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه‌های فلزی روی پیستون به آهستگی کاهش داد. با افزودن تدریجی ساچمه‌ها، بر فشار گاز داخل استوانه افزوده می‌شود.

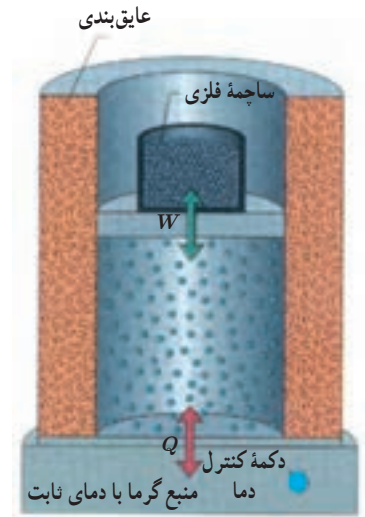
در فرایند هم‌دما، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W = 0$$

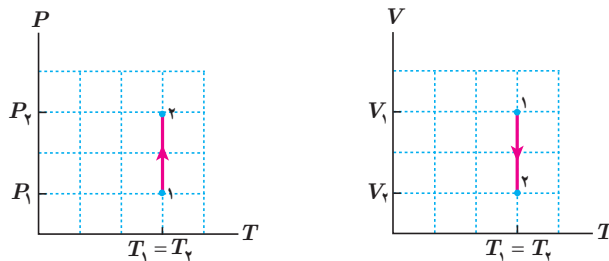
$$Q = -W$$

در نتیجه:

که چون در تراکم، کار انجام شده محیط روی گاز،  $W$ ، مثبت است،  $Q$  منفی می‌شود؛ یعنی در تراکم هم‌دما، گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  این فرایند در شکل ۱۴-۵ رسم شده است.



**شکل ۱۳-۵** استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی ساچمه‌ها، تراکمی هم‌دما رخ می‌دهد.



**شکل ۱۴-۵** نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  برای یک فرایند تراکم هم‌دما

## تمرین ۴-۵

مشابه آنچه که برای تراکم هم‌دما شرح دادیم، انبساط هم‌دمای گاز کامل را شرح دهید و علامت‌های  $Q$  و  $W$  را برای چنین فرایندی تعیین و نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  را برای آن رسم کنید.



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 ۵-۹

گازی آرمانی را در دمای ثابت از حالت اولیه  $V_1 = 4/0 \text{ L}$  و  $P_1 = 1/0 \text{ atm}$  تا حالت نهایی با حجم  $V_2 = 1/0 \text{ L}$  متراکم می‌کنیم. الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هر یک از حجم‌های  $1/0 \text{ L}$ ،  $2/0 \text{ L}$  و  $3/0 \text{ L}$  حساب کنید و نمودار  $P-V$  را با استفاده از روش نقطه‌یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

اگر مساحت سطح زیر این نمودار  $5/5 \times 10^2 \text{ J}$  باشد، ب)  $W$  و ب)  $Q$  در این فرایند چقدر است؟

پاسخ: الف) چون گاز، آرمانی و فرایند هم‌دماست داریم:

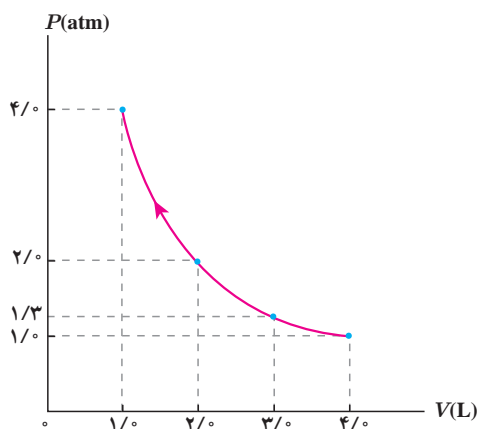
$$PV = nRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

$$V_2 = 3/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(3/0) \Rightarrow P_2 = 1/3 \text{ atm}$$

$$V_2 = 2/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(2/0) \Rightarrow P_2 = 2/0 \text{ atm}$$

$$V_2 = 1/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(1/0) \Rightarrow P_2 = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار  $P-V$  را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم:



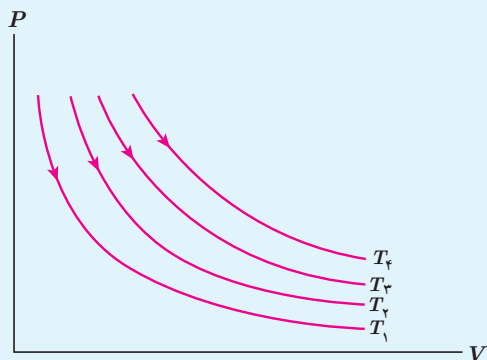
V(L)	P(atm)
4/0	1/0
3/0	1/3
2/0	2/0
1/0	4/0

ب) قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر با مساحت سطح زیر نمودار  $P-V$  است. افزون بر این، چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است؛ یعنی:

$$W = +5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

پ) برای فرایند هم‌دمای گاز کامل نشان دادیم  $Q = -W$  است. بنابراین، برای  $Q$  داریم:

$$Q = -W = -5/5 \times 10^2 \text{ J}$$



در شکل روبه‌رو، نمودار  $P-V$  مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز آرمانی در دماهای مختلف رسم شده است.

الف) نشان دهید:  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ . (راهنمایی: خطی عمود بر محور  $V$  یا عمود بر محور  $P$  رسم کنید، به گونه‌ای که هر چهار نمودار را قطع کند و سپس قانون گازهای آرمانی را برای نقطه‌های برخورد با منحنی‌ها به کار ببندید)

ب) در یک تغییر حجم معین، اندازه کار انجام شده در کدام فرایند بیشتر است؟

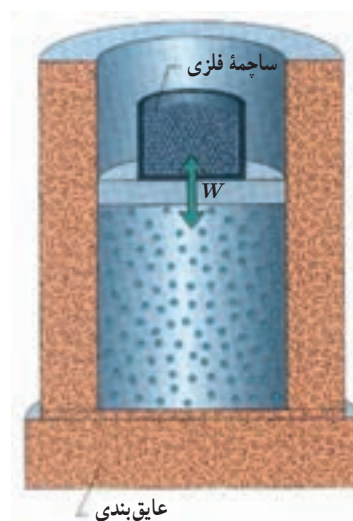
**ت) فرایند بی‌دررو:** در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط، گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن این فرایند یا باید دستگاه را مطابق شکل ۵-۱۵ کاملاً عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های فلزی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم و یا اینکه گاز را چنان به سرعت متراکم یا منبسط کنیم که گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نکند. بنابراین، در فرایند بی‌دررو  $Q = 0$  است. در نتیجه، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی‌آید:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$\Delta U = W$$

(۵-۵) (فرایند بی‌دررو)



**شکل ۵-۱۵** با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌ها روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

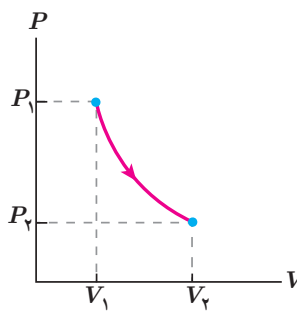
در انبساط بی‌درروی گاز آرمانی، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است، در نتیجه  $\Delta U < 0$  است و انرژی درونی گاز و دمای آن کاهش می‌یابد. در تراکم بی‌دررو، عکس این اتفاق رخ می‌دهد و انرژی درونی گاز و دمای آن افزایش می‌یابد.

## فعالیت ۳-۵

وقتی در یک نوشابه گازدار خیلی سرد را سریع باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که هاله رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.

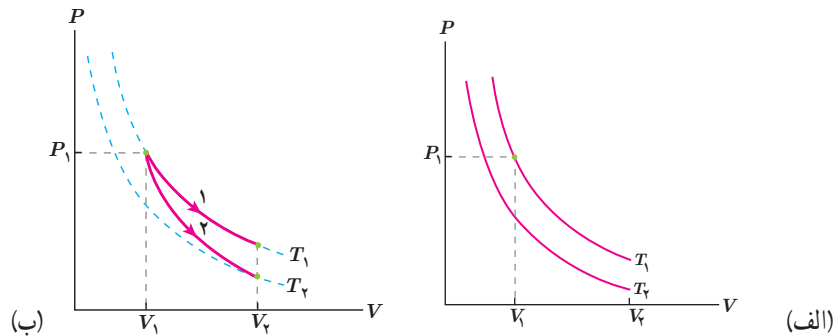


مثال ۵-۱۰



گازی آرمانی را با حجم  $V_1$  و فشار  $P_1$  در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار  $P-V$  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؟

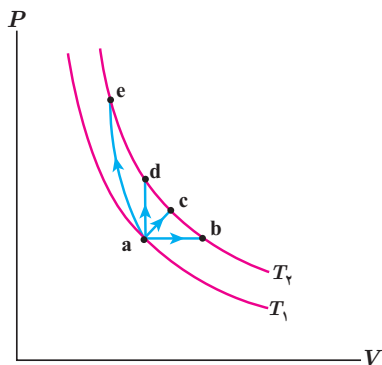
**پاسخ:** در شکل (الف) دو منحنی هم‌دما، با استفاده از نتیجه تمرین ۵-۵ برای دماهای  $T_1$  و  $T_2$  (الف) رسم شده است. در فرایند هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند. بنابراین، در انبساط هم‌دمای مسیر ۱ در شکل (ب) همواره  $T=T_1$  است، ولی همان‌طور که پیش‌تر گفتیم در انبساط بی‌دررو، دمای گاز آرمانی کاهش می‌یابد، 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 ۵-۶

مثال ۵-۱۰ را با فرض آنکه گاز به‌جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

مثال ۵-۱۱



در شکل روبه‌رو گازی آرمانی را از طریق چند فرایند مختلف، از جمله یک فرایند هم‌حجم، یک فرایند هم‌فشار و یک فرایند بی‌دررو از دمای  $T_1$  به دمای  $T_2$  رسانده‌ایم. الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  به‌دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

$$C_P - C_V = R$$

پ) کار انجام شده روی گاز را در فرایند بی‌دررو بیابید.

**پاسخ: الف)** همان طور که می دانیم انرژی درونی گاز آرمانی فقط به دمای گاز بستگی دارد. بنابراین، با توجه به اینکه دماهای اولیه و نهایی در همه فرایندها یکی است، تغییر انرژی درونی در هر چهار فرایند برابر است. پس کافی است تغییر انرژی درونی را در یکی از فرایندها حساب کنیم؛ در فرایند هم حجم کار انجام شده برابر صفر است. بنابراین، می توانیم 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 هم فشار و هم حجم را مساوی هم بگیریم:

$$\Delta U_{\text{هم فشار}} = \Delta U_{\text{هم حجم}}$$

$$Q_{\text{هم فشار}} + W_{\text{هم فشار}} = Q_{\text{هم حجم}} + W_{\text{هم حجم}}$$

$$nC_P \Delta T + (-P\Delta V) = nC_V \Delta T + 0$$

اما می دانیم برای گاز آرمانی  $PV = nRT$  است و بنابراین، در فرایند هم فشار  $P\Delta V = nR\Delta T$  است. بنابراین، 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 بی دررو به کار می بریم:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

و نیز با توجه به بند الف)،  $\Delta U = nC_V \Delta T$  است و بنابراین  $nC_V \Delta T = 0 + W$  و یا

$$W = nC_V \Delta T$$

نتایج مثال ۵-۱۱، کاربردهای فراوانی در ترمودینامیک گازهای آرمانی دارد.

### مثال ۵-۱۲

در یک فرایند بی دررو، دمای  $5/0^\circ \text{mol}$  گاز آرمانی تک اتمی از  $300^\circ \text{K}$  به  $285^\circ \text{K}$  می رسد.

الف) به نظر شما آیا حجم گاز افزایش پیدا کرده است یا کاهش؟

ب) کار انجام شده روی گاز در این فرایند را محاسبه کنید. ( $R = 8/31 \text{ J/mol.K}$ )

**پاسخ: الف)** با توجه به اینکه دمای گاز در فرایند بی دررو کاهش پیدا کرده است، پس حتماً فرایند انبساط بوده و حجم گاز افزایش پیدا کرده است.

ب) در مثال ۵-۱۱ دیدیم:

$$\Delta U_{\text{بی دررو}} = W = nC_V \Delta T$$

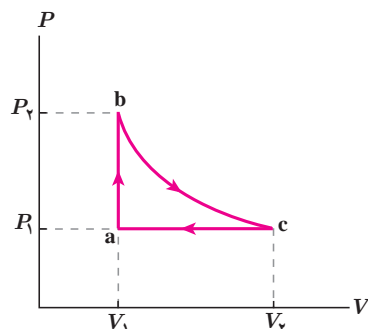
چون گاز تک اتمی است، خواهیم داشت:

$$W = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T = 5/0^\circ \text{mol} \left(\frac{3}{2} \times 8/31 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}\right) (-15^\circ \text{K}) = -9/3 \times 10^2 \text{ J}$$



سرنگ آتش‌زنه<sup>۱</sup> استوانه کوچکی است مجهز به پیستونی که کاملاً بر سطح داخلی استوانه منطبق است. در فضای محبوس داخل سرنگ، فقط هوا و تکه کوچکی از پنبه قرار دارد. با راندن سریع پیستون به داخل، و تراکم بی‌درروی هوای محبوس، تکه پنبه مشتعل می‌شود. (معمولاً از کاغذ نیتروسولوز در این آزمایش استفاده می‌شود که نقطه اشتعال بسیار پایینی دارد.) چرا پنبه در این فرایند آتش می‌گیرد؟

### ۶-۵ چرخه ترمودینامیکی



شکل ۱۷-۵ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته‌ای را در صفحه  $P-V$  تشکیل می‌دهد.

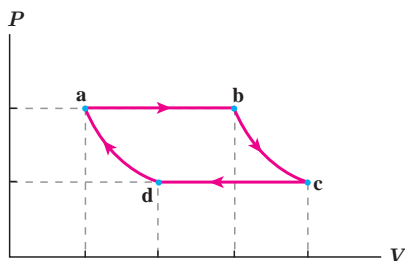
دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۱۶-۵، از سه فرایند هم‌حجم  $ab$ ، فرایند  $bc$  و فرایند هم‌فشار  $ca$  تشکیل شده است. مجموعه این فرایندها یک چرخه ترمودینامیکی را تشکیل داده است.

در واقع در چرخه ترمودینامیکی، دستگاه پس از طی چند فرایند مختلف به حالت اولیه خود بازمی‌گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ( $\Delta U=0$ ). بنابراین، از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه‌های ترمودینامیکی داریم:

$$Q = -W$$

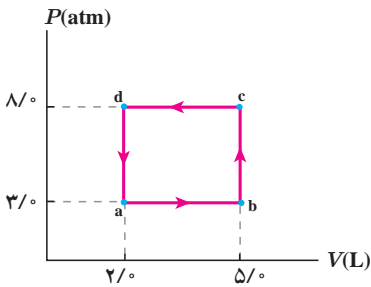
(۶-۵) (چرخه ترمودینامیکی)

### فعالیت ۴-۵



شکل روبه‌رو یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می‌دهد.  
الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.  
ب) نشان دهید مقدار کار کل انجام‌شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.  
پ) کار کل انجام‌شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۴-۵ در یافتیم اندازه کار انجام‌شده در چرخه برابر با مساحت سطح داخل چرخه در صفحه  $P-V$  است و می‌توان نشان داد در چرخه‌های ساعتگرد در صفحه  $P-V$  کار انجام‌شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه‌های پادساعتگرد، مثبت است.



گازی چرخهٔ ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را می‌پیماید.

الف) کار انجام شده 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:

$$|W| = S_{abcd} = (8/0 - 3/0) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5/0 - 2/0) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

چون چرخه در صفحهٔ  $P-V$  پاد ساعتگرد است، داریم:

$$W = +1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

با توجه به رابطهٔ ۵-۶ می‌توان نوشت:

$$Q = -W = -1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط  $|Q| = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$  است و علامت منفی  $Q$  نشان می‌دهد در این چرخه، گاز به

محیط گرما داده است.

## ۵-۲ ماشین‌های گرمایی

تا حدود سه قرن پیش، انرژی مکانیکی مورد نیاز 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 مورد نیاز انسان از طریق **ماشین‌های گرمایی** به‌دست می‌آید. ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می‌کنند. از این ماشین‌ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، خودرو، هواپیما و فضاپیما استفاده می‌شود. همچنین در نیروگاه‌ها کار حاصل از این ماشین‌ها نخست به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکهٔ برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد و از این طریق، انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی تأمین می‌شود. از نظر تاریخی نخستین ماشین‌های گرمایی، **ماشین‌های برون‌سوز** مانند ماشین بخار بوده است. نوع دیگری از ماشین‌ها نیز وجود دارند که به‌خصوص در موتور خودروها استفاده می‌شوند و با سوخت‌هایی چون بنزین و گازوئیل کار می‌کنند که به آنها **ماشین‌های درون‌سوز** می‌گویند.

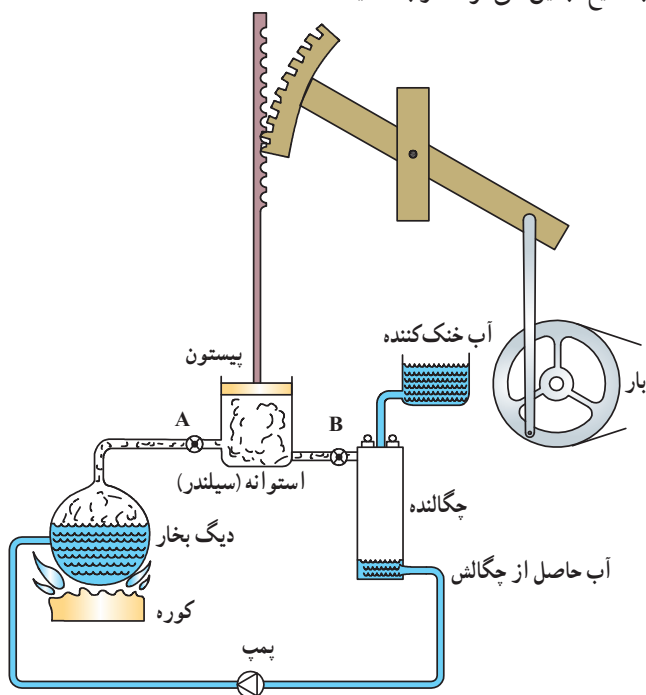
در ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند ترمودینامیکی، دستگاه مقداری گرما از محیط دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیهٔ خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از 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<sup>۱</sup> است که از آن برای بیرون کشیدن آب از معادن استفاده می‌شد. انواع روزآمدتر این ماشین‌ها ماشین استرلینگ<sup>۲</sup> و ماشین بخار<sup>۳</sup> است. در ادامه به توضیح نمونه ساده‌ای از ماشین‌های بخار می‌پردازیم که توسط جیمزوات (۱۸۱۹-۱۷۳۶ م.) طراحی شد.

**ماشین بخار وات<sup>۴</sup>:** در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام دادن چند فرایند مختلف، که به توضیح آنها می‌پردازیم، به حالت اولیه خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود؛ چون گرما توسط کوره، از بیرون، به آب داده می‌شود، ماشین بخار از نوع ماشین‌های برون‌سوز محسوب می‌شود. با باز شدن شیر A بخار حاصل از دیگ بخار با فشار وارد استوانه (سیلندر) می‌شود و به این ترتیب، پیستون را به بالا می‌راند در حالی که شیر B بسته است. وقتی پیستون به بالای استوانه می‌رسد شیر A بسته می‌شود و به این ترتیب، دیگ بخار مسدود می‌گردد. همزمان شیر B باز می‌شود و بدین ترتیب، بخار از استوانه خارج و وارد محفظه چگالنده می‌گردد. با ورود بخار به چگالنده، پیستون پایین می‌آید و هنگامی که پیستون به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد، شیر B بسته و به طور همزمان شیر A باز می‌شود و این مراحل دوباره تکرار می‌گردد. آب خنک کننده، چگالنده را همواره خنک نگه می‌دارد و بدین ترتیب، بخاری که وارد محفظه چگالنده می‌گردد، به مایع تبدیل می‌گردد (توجه کنید که

آب خنک کننده وارد چگالنده نمی‌شود، بلکه اطراف آن را خنک می‌سازد). مایع پس از خروج از چگالنده توسط یک پمپ (تلمبه) به دیگ بخار برگردانده می‌شود و این چرخه بی‌دری تکرار می‌شود. تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بخار دشوار است. اما با برخی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه رانکین<sup>۵</sup>) رسید. منظور از چرخه آرمانی چرخه‌ای است که فرایندهای آن ایستاوار و بدون اصطکاک و هرگونه اتلافی باشد. همان‌طور که در ماشین بخار وات دیدیم دستگاه (آب) در هر چرخه با دو منبع گرمای دیگ بخار و چگالنده، تبادل گرما می‌کند و کار خالصی انجام می‌دهد. دیگ بخار را که در دمای بالاتری قرار دارد، منبع با دمای بالاتر و چگالنده را منبع با دمای پایین‌تر می‌نامند. گرمایی را که دستگاه از منبع با دمای بالاتر می‌گیرد با  $Q_H$ ، و گرمایی را که دستگاه به منبع با دمای پایین‌تر می‌دهد با  $Q_L$ ، و کار خالص انجام‌شده توسط دستگاه در طی چرخه را با  $|W|$  نمایش می‌دهیم.



شکل ۱۷-۵ طرحی از بخش‌های اصلی یک ماشین بخار وات شامل دیگ بخار، سیلندر، پیستون، چگالنده و پمپ

۱- Newcomen engine

۲- Stirling engine

۳- Steam engine

۴- James Watt engine

۵- این چرخه توسط مهندس اسکاتلندی ویلیام رانکین (۱۸۷۲-۱۸۲۰ م.) ارائه شد.

## فعالیت ۵-۵



در مورد ماشین‌های بخاری که امروزه در نیروگاه‌های گرمایی (حرارتی) استفاده می‌شوند و نحوه کارکرد آنها تحقیق کنید و نتیجه تحقیق را در کلاس ارائه نمایید.

## فعالیت ۶-۵



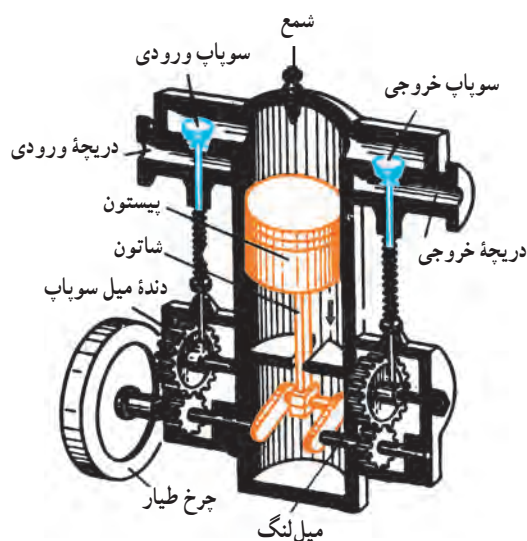
قایق پوت-پوت<sup>۱</sup>، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب‌بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

## 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<sup>۲</sup> می‌پردازیم.

**ماشین درون سوز بنزینی:** موتور ماشین بنزینی از یک یا چند استوانه (سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها داخل آنها حرکت می‌کنند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است. در این نوع موتور، بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته (شاتون) و میل لنگ به حرکت چرخشی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت چرخشی به چرخ‌ها، اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.

ماشین بنزینی چرخه‌ای را طی می‌کند که شامل شش فرایند است. از این شش فرایند، چهار فرایند همراه با حرکت پیستون اند که به آنها ضربه<sup>۳</sup> می‌گویند. این فرایندها به طور وار در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.



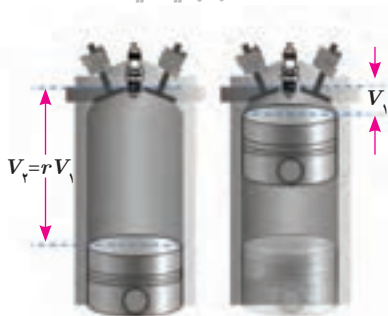
شکل ۱۸-۵ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

۱-put\_put

۲-gasoline engine

۳-stroke





شکل ۱۹-۵ حجم فضای بالای پیستون در ابتدا  $V_1$  و در انتها  $rV_1$  است.

**۱- ضربه مکش:** با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد استوانه می‌شود. همان‌طور که شکل ۵-۱۹ نشان می‌دهد وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن  $V_1$  و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا  $V_2 = rV_1$  است ( $r$  را نسبت تراکم یا نسبت انبساط می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا داخل استوانه محبوس می‌گردد.

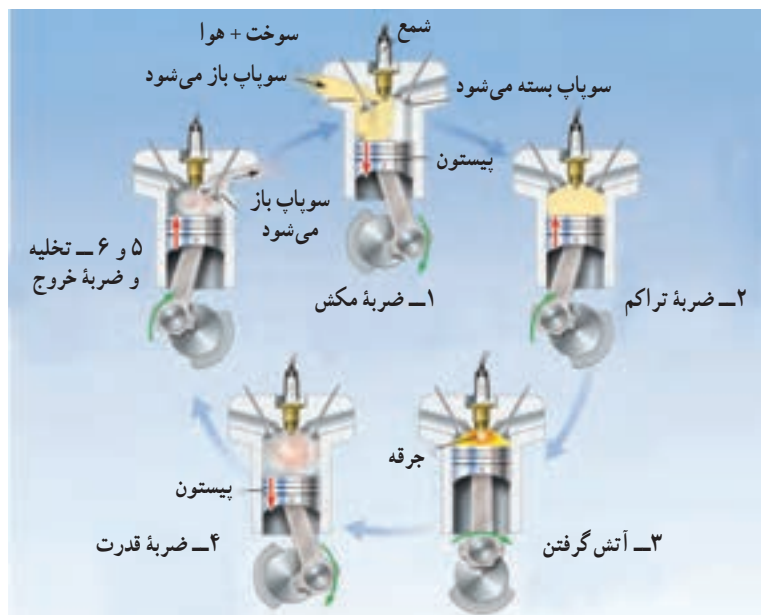
**۲- ضربه تراکم:** پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم  $V_1$  می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه، در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

**۳- آتش گرفتن:** هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت  $V_1$  تا مقدار زیادی بالا می‌رود؛ چون آتش گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می‌دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی‌گیرد، این موتورها را درون‌سوز می‌گویند.

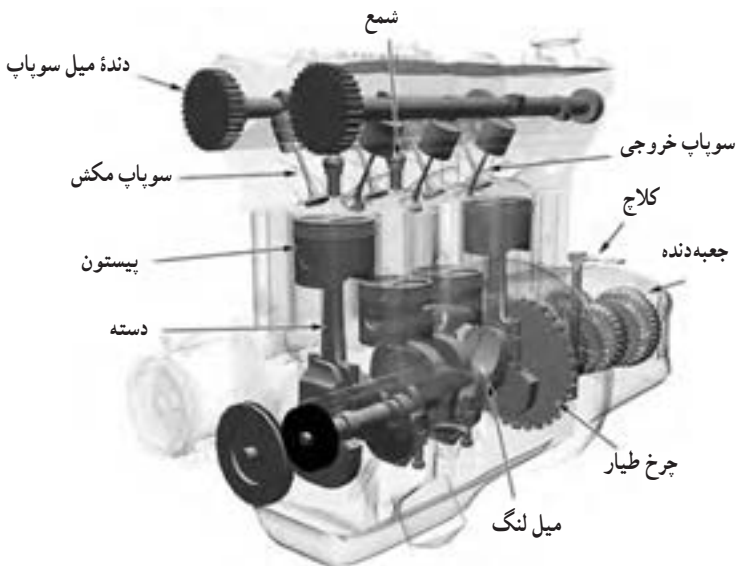
**۴- ضربه قدرت:** در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از  $V_1$  به  $V_2$  می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

**۵- تخلیه:** در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم  $V_2$ ) قرار دارد، سوپاپ دریچه خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود، تا اینکه فشار گاز داخل استوانه با فشار جو یکسان شود. در این مرحله پیستون ساکن است.

**۶- ضربه خروج گاز:** پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون می‌راند و حجم فضای بالای پیستون از  $V_2$  به مقدار اولیه  $V_1$  می‌رسد.



شکل ۲۰-۶ مراحل مختلف در جرقه موتورهای درون‌سوز



شکل ۵-۱۱ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بنزینی دشوار است. اما با بعضی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه اتو<sup>۱</sup>) رسید. در این ساده‌سازی‌ها می‌توان دستگاه را گازی آرمانی در نظر گرفت و بدین ترتیب، فرض کرد که گاز به جای مرحله آتش گرفتن، گرمای  $Q_H$  را از محیط (منبع با دمای بالا) دریافت می‌کند، به جای مرحله تخلیه و خروج گاز، گرمای  $Q_L$  را به محیط (منبع با دمای پایین) تحویل می‌دهد و سپس گاز سرد شده در فشار ثابت جو از استوانه خارج می‌شود. در طی این چرخه، کارخالص  $|W|$  را روی محیط انجام می‌دهد. شکل ۵-۲۱ طرحی از اجزای یک ماشین بنزینی چهار سیلندر را نشان می‌دهد.

### خوب است بدانید

**چرخه اتو:** 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 اتو رسید و آن را در صفحه  $P-V$  رسم کرد. این فرض‌ها عبارت‌اند از:

۱- ماده کاری (ماده‌ای که در ماشین به‌عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) هواست و مانند یک گاز آرمانی با ظرفیت گرمایی ثابت رفتار می‌کند.

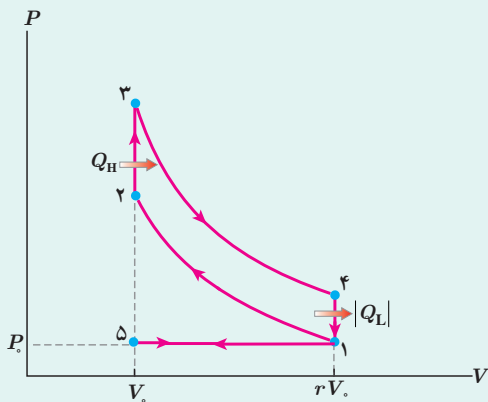
۲- تمام فرایندها ایستاوارند.

۳- هیچ اصطکاک یا تلاطمی وجود ندارد.

۴- هیچ اتلاف گرمایی از طریق دیواره‌های محفظه احتراق نداریم.

۵- فرایندها برگشت پذیرند. (یعنی در پایان هر فرایند، هم دستگاه و هم محیط می‌توانند دقیقاً به حالت‌های اولیه خود بازگردانده

شوند)



چرخه اتو در شکل روبه‌رو رسم شده است که مراحل آن عبارت‌اند از:

۱ → ۵ مکش ایستاوار در فشار ثابت جو.

۲ → ۱ تراکم بی‌درروی ایستاوار.

۳ → ۲ افزایش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۴ → ۳ انبساط بی‌درروی ایستاوار.

۱ → ۴ کاهش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۵ → ۱ خروج ایستاوار در فشار ثابت جو.

۱- Otto Cycle - موتورهای درون‌سوز بنزینی در سال ۱۸۷۶ توسط مهندس آلمانی «نیکلاس اتو» ساخته شد و این چرخه به افتخار او

چرخه اتو نامیده شده است. اما ایده موتورهای چهارضریه‌ای بیشتر در سال ۱۸۶۲ توسط مهندس فرانسوی «آلفونس روشا» مطرح شده بود.

**بازده ماشین گرمایی:** هدف از ساخت هر ماشین آن است که انرژی گرفته شده را تا بیشترین مقدار ممکن به انرژی مفید خروجی تبدیل کند. بنابراین بازده هر ماشین به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}} \quad (\text{برای هر ماشینی})$$

در ماشین های گرمایی، انرژی مفید خروجی همان کار  $|W|$  و انرژی داده شده به ماشین، همان گرمای  $Q_H$  است. بنابراین، برای بازده هر ماشین گرمایی داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (\text{برای هر ماشین گرمایی}) \quad (7-5)$$

در بررسی هر یک از ماشین های برون سوز بخار و درون سوز بنزینی برای ساده سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی فرض می کنند که در آنها هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به طور ایستوار انجام می شوند. در طی این چرخه ها مقداری گرما از یک منبع دمابالا گرفته شده ( $Q_H$ )، مقداری کار انجام می شود ( $|W|$ ) و مقداری گرما به یک منبع دماباین داده می شود ( $|Q_L|$ ). طرز کار همه ماشین های گرمایی در شکل ۲۲-۵ به طور طرح وار نشان داده شده است.

قانون اول ترمودینامیک  $\Delta U = Q + W$  برای چرخه ماشین های آرمانی به صورت زیر در می آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

در این رابطه،  $Q_H$  مثبت و  $Q_L$  و  $W$  منفی است. بنابراین:

$$Q_H = |W| + |Q_L|$$

در نتیجه بازده برای ماشین های گرمایی آرمانی چنین می شود:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \quad (\text{برای ماشین های گرمایی آرمانی}) \quad (8-5)$$

بازده ماشین های گرمایی واقعی از بازده ماشین های آرمانی کمتر است. بازده واقعی ماشین های درون سوز بنزینی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بازده ماشین های درون سوز دیزلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد، و بازده ماشین های برون سوز بخار ۳۰ تا ۴۰ درصد است.

**مثال ۵-۱۴**

بازده یک ماشین درون سوز بنزینی ۲۲/۰ درصد است. این ماشین در هر چرخه  $2/51 \times 10^3 \text{ J}$  کار انجام می دهد. الف) گرمای حاصل از سوخت و ب) گرمای خارج شده از موتور در هر چرخه چقدر است؟ ماشین را آرمانی فرض کنید.

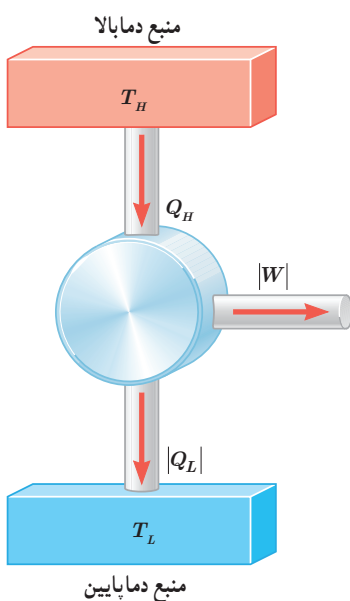
**پاسخ:** الف) با استفاده از رابطه ۷-۵ داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \Rightarrow 0.22 = \frac{2/51 \times 10^3}{Q_H}$$

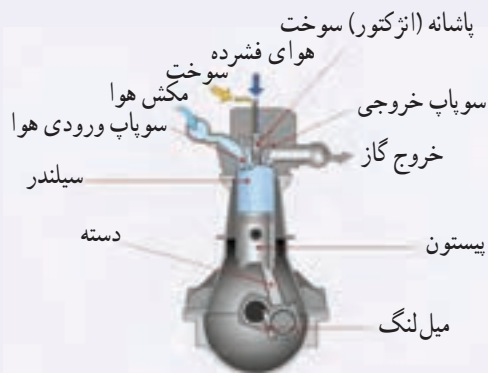
$$Q_H = 1/141 \times 10^4 \text{ J} \approx 1/14 \times 10^4 \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه  $Q_H = |W| + |Q_L|$  داریم:

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 1/141 \times 10^4 \text{ J} - 2/51 \times 10^3 \text{ J} = 8/90 \times 10^3 \text{ J}$$



شکل ۲۲-۵ طرز کار طرح وار یک ماشین گرمایی آرمانی



شکل ۲۳۳ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

### نسبت تراکم ماشین‌ها: محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت

تراکم  $r$  می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی رسید. اما در عمل ممکن نیست به هر نسبت تراکمی دست یافت؛ مثلاً نسبت تراکم ماشین‌های بنزینی معمولی تا حدود  $10^\circ$  و ماشین‌های بنزینی مدرن تا حدود  $14^\circ$  است. در نسبت‌های تراکم بالا، مخلوط سوخت و هوا در ضربه تراکم، چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل<sup>۱</sup> مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشین‌های در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا به طوری دررو متراکم و در نتیجه

داغ می‌شود تا اینکه بتواند گازوئیلی را که به داخل استوانه پاشیده می‌شود محترق کند (در این ماشین، شمع وجود ندارد). میزان پاشیده شدن گازوئیل طوری تنظیم می‌شود که احتراق تقریباً به طور هم فشار پیستون را به سمت پایین هل می‌دهد. بقیه چرخه، یعنی ضربه قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربه خروج دقیقاً مانند ماشین بنزینی است. در تحلیل ماشین دیزل نیز مانند ماشین بنزینی از اثرهای اتلافی چشم‌پوشی می‌شود. نسبت تراکم برای ماشین‌های دیزل را حتی تا مقدار  $23$  نیز می‌توان افزایش داد. شکل  $5-23$  طرحی از سیلندر و اجزای جانبی این ماشین را نشان می‌دهد.

### ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بخش قبل و در بررسی ماشین‌های گرمایی، دیدیم که همه 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 همه گرمای دریافتی به کار وجود دارد؟ در واقع، هیچ یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همه گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: "ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بیامید 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؛<sup>۲</sup> یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک ( $100^\circ$  درصد) شود. توجه داریم که اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع دمابالا به کار تبدیل شود، قانون اول ترمودینامیک نقض نمی‌شود؛ اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است.

۱- Rudolf Christian Karl Diesel (۱۸۵۸-۱۹۱۳)

۲- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلونین - پلانک قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.



**نیکلاس سدی کارنو**  
 نیکلاس لئونارد  
 سدی کارنو<sup>۱</sup> در  
 سال ۱۷۹۶ میلادی  
 در پاریس و در  
 خانواده‌ای که در آن  
 علم و سیاست عجین  
 شده بود، به دنیا آمد.

او نخستین پسر لایزر کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لایزر 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 ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی - لوساک و بوسون قرار گرفت. پس از فارغ التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدی به عنوان افسر وارد رشته مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکه گرما» به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریه بازده ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها رودلف کلاسیوس و لرد کلوین با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام آنتروپی پرداختند. از این رو، از کارنو اغلب به عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در سال ۱۸۳۲ میلادی در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

**قضیه کارنو:** بر اساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از یک (۱۰۰ درصد) کمتر است و اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع با دماهای  $T_H$  و  $T_L$  کار می‌کند چقدر است؟ و ماده کاری (ماده‌ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) چه تأثیری بر این بازده دارد؟ پاسخ به این پرسش‌ها را سدی کارنو مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد و دریافت که بازده چنین ماشینی مستقل از ماده کاری است که چرخه ماشین را طی می‌کند. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** می‌نامند.  
 محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (9-5) \quad (\text{برای ماشین کارنو})$$

که در آن  $T_L$  و  $T_H$  بر حسب کلون است. همان‌طور که می‌بینید بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع دما بالا و دمای پایین که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.  
 بنا به **قضیه کارنو**، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای  $T_H$  و  $T_L$  کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی کارنو  $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$  است.

**مثال ۵-۱۵**

توربین بخار یک نیروگاه برق بین دماهای  $T_H = 800 \text{ K}$  و  $T_L = 300 \text{ K}$  کار می‌کند. بازده ماشین کارنویی که بین این دو دما کار می‌کند چقدر است؟  
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۹-۵ داریم:

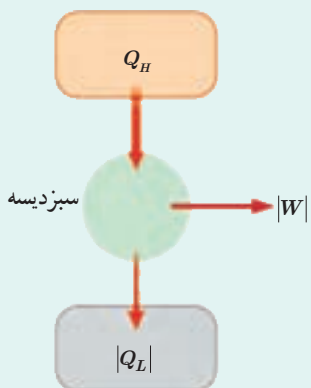
$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{800 \text{ K}} = 0.625$$

بازده واقعی توربین‌های بخار در عمل از این عدد کمتر و در حدود ۴۰ درصد است.

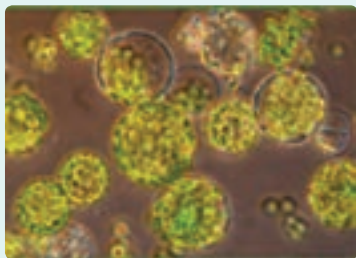
**خوب است بدانید**

**ترمودینامیک و فتوسنتز:** ترمودینامیک در پدیده‌های زیستی نیز کاربرد دارد. یکی از این کاربردها فتوسنتز است. در فتوسنتز، گیاهان درصد کوچکی از انرژی نور خورشید را که در بخشی از گستره نور مرئی واقع است به دام می‌اندازند و به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. در واقع فتوسنتز شامل دو مرحله است. در مرحله نخست، انرژی نور خورشید به دام می‌افتد و

۱- Nicolas Leonard Sadi Carnot



(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.



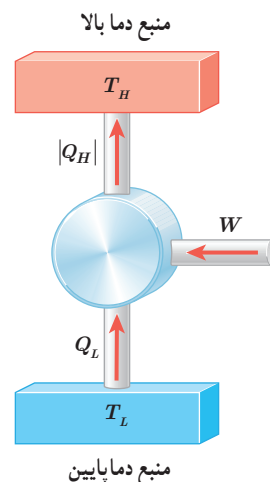
(ب) یک یاخته گیاهی شامل سبزدیسه‌هاست.

صرف تولید مولکول‌هایی می‌شود که این انرژی را به‌طور موقت ذخیره می‌کنند و در مرحله دوم انرژی شیمیایی ذخیره شده، صرف ساختن ترکیب‌های آلی می‌شود. شکل (الف) مرحله نخست فرایند فوتوسنتز را به گونه‌ای مشابه آنچه که یک ماشین گرمایی انجام می‌دهد نشان می‌دهد. انرژی حاصل از خورشید وارد گیاه می‌شود. سبزدیسه (کلروپلاست) گیاه (شکل ب) همچون یک ماشین گرمایی این انرژی را می‌گیرد و کار  $|W|$  را انجام می‌دهد و در همین زمان گرمای  $|Q_L|$  را به محیط، که همان هوا و خاک اطراف گیاه است، می‌دهد. در ماشین‌های گرمایی، ماشین کار را مثلاً به‌صورت چرخاندن یک چرخ انجام می‌دهد. در فوتوسنتز، سبزدیسه که شامل رنگیزه‌های 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.

## ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

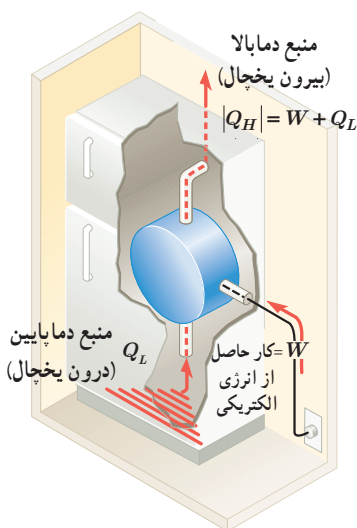
گرما همواره از جسمی با دمای بالا به جسمی با دمای پایین منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل به‌طور خودبه‌خود رخ نمی‌دهد. مثلاً اگر یک لیوان آب سرد در اتاق قرار داشته باشد گرما به‌طور خودبه‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود و ممکن نیست آب به‌طور خودبه‌خود سردتر شود. به‌عبارت دیگر: "ممکن نیست گرما به‌طور خودبه‌خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود." به این گزاره، **قانون دوم ترمودینامیک** به بیان **یخچالی** می‌گویند. 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 برعکس.)

**یخچال** وسیله‌ای است که این عمل را انجام می‌دهد و با استفاده از کار، گرما را از منبعی دمایی پایین می‌گیرد و به منبعی دمایی بالا می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخه ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه (ماده کاری) کار  $W$  را انجام می‌دهد. دستگاه گرمای  $Q_L$  را از منبع دمایی پایین می‌گیرد و گرمای  $|Q_H|$  را به منبع دمایی بالا می‌دهد. به‌عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به‌طور طرح‌وار در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است.

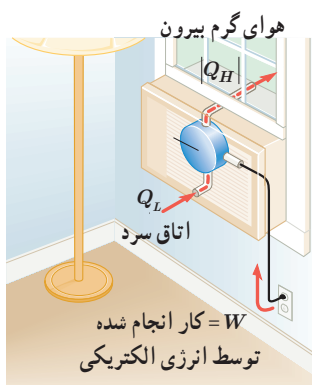


شکل ۵-۲۴ طرز کار طرح‌وار یک یخچال آرمانی

۱- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلاسیوس قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.



شکل ۵-۲۵ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی



شکل ۵-۲۷ طرحی از طرز کار یک کولرگازی

یخچال‌های خانگی، کولرهای گازی و تلمبه‌های گرمایی نمونه‌هایی از یخچال‌ها هستند؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار  $W$  توسط مترآکم‌ساز (کمپرسور) می‌شود، گرمای  $Q_L$  از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود و گرمای  $|Q_H|$  به هوای بیرون یخچال داده می‌شود (شکل ۵-۲۵). طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولر گازی منبع دم‌پایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دم‌بالا، هوای بیرون اتاق است (شکل ۵-۲۶).

**ضریب عملکرد یخچال:** در هر یخچال می‌خواهیم با صرف کمترین کار ممکن، بیشترین گرما را از منبع دم‌پایین بگیریم. بنابراین، **ضریب عملکرد یخچال** ( $K$ ) به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع دم‌پایین ( $Q_L$ ) به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد ( $W$ ) تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_L}{W} \quad (۱۰-۵) \quad (\text{برای هر یخچالی})$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد برای یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و برای کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است.

در بررسی یخچال‌ها، مانند ماشین‌های گرمایی برای ساده‌سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی را فرض می‌کنیم که در آن هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به‌طور ایستاوار انجام می‌شوند. اکنون قانون اول ترمودینامیک ( $\Delta U = Q + W$ ) برای چرخه یخچال آرمانی به صورت زیر درمی‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

در این رابطه،  $Q_H$  منفی و  $Q_L$  و  $W$  مثبت است. بنابراین:

$$|Q_H| = W + Q_L$$

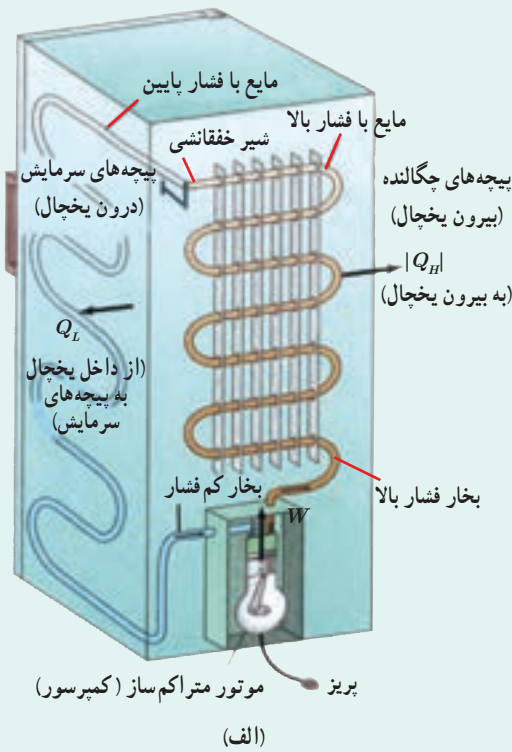
با قرار دادن  $W$  از رابطه بالا در رابطه ضریب عملکرد (معادله ۵-۱۰)، ضریب عملکرد یخچال‌های آرمانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} \quad (۱۱-۵) \quad (\text{برای یخچال‌های آرمانی})$$

مانند ماشین‌های گرمایی که بازده آنها حدّ بالایی دارد، برای ضریب عملکرد یخچال‌ها نیز حدّ بالایی وجود دارد. به این حدّ بالا، ضریب عملکرد **یخچال کارنو** گفته می‌شود و نشان داده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید.

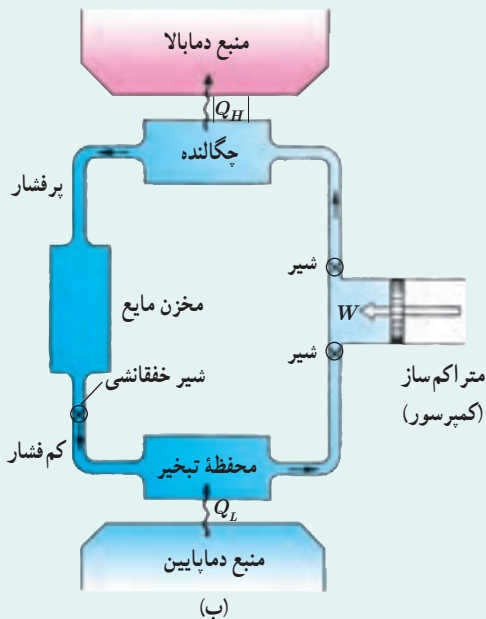
$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (۱۲-۵) \quad (\text{برای یخچال کارنو})$$

در این رابطه  $T_H$  و  $T_L$  به ترتیب، دمای منبع‌های دم‌پایین و دم‌بالا برحسب کلین است.



ساز و کار یخچال خانگی: یخچال خانگی یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌های خانگی را در اندازه‌های مختلف می‌سازند و آنها را با حجم داخلی مشخص می‌کنند؛ مثلاً یخچال ۹ فوت دارای حجم داخلی ۹ فوت مکعب یا حدود ۲۴۰ لیتر است.

در شکل (الف) یک یخچال خانگی و در شکل (ب) نمایش طرح‌وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارت‌اند از: چگالنده، پیچ‌های سرمایش (محفظه تبخیر)، متراکم‌ساز (کمپرسور) و شیر خفقا نشی (شیر فشار شکن). چگالنده با منبع دما بالا (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع دما پایین (محتویات داخل یخچال) در تماس است. در یخچال‌های قدیمی‌تر ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است، اما این گاز از جمله گازهایی است که به لایه ازن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به مایع در فشار زیاد تبدیل می‌شود و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم در می‌آید.



طرز کار یخچال خانگی به‌طور مختصر به شرح زیر است: کمپرسور با انجام کار  $W$  گاز را از محفظه تبخیر به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع دما بالا (اتاق) بیشتر شده است، گرمای  $|Q_H|$  را به این منبع می‌دهد، مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پر فشار از شیر خفقا نشی می‌گذرد به شدت سرد می‌شود، به طوری که از منبع دما پایین (هوای داخل یخچال) هم سردتر می‌شود و از آن گرمای  $Q_L$  را می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.

با فرض آنکه بتوان ضریب عملکرد یک یخچال را با ضریب عملکرد یخچال کارنو توصیف کرد، به گمان شما یک کولر گازی برای رساندن دمای اتاق به یک دمای معین، در آب و هوای معتدل بهتر کار می‌کند، یا در آب و هوای گرم؟



فرض کنید در هر چرخه یک یخچال فرضی، دستگاه  $۸/۰ \text{ kJ}$  گرما از منبع دما پایین بگیرد و کمپرسور  $۲/۰ \text{ kJ}$  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 رابطه  $|Q_H| = W + Q_L$  برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = ۲/۰ \text{ kJ} + ۸/۰ \text{ kJ} = ۱۰/۰ \text{ kJ}$$

ب) با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{۸/۰ \text{ kJ}}{۲/۰ \text{ kJ}} = ۴/۰$$

توان یک یخچال  $۱۰۰$  وات و ضریب عملکرد آن  $۴/۰$  است. با فرض آرمانی بودن یخچال،

الف) چه مدت طول می‌کشد تا در این یخچال  $۱/۰ \text{ kg}$  آب  $۲۵/۰^\circ \text{C}$  به یخ  $۰/۰^\circ \text{C}$  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  $c_{\text{آب}} = ۴/۲۰ \times ۱۰^۳ \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ )

پاسخ: الف) گرمای  $Q_L$  که آب از دست می‌دهد، برابر است با

$$Q_L = mc_{\text{آب}}|\Delta\theta| + mL_F = (۱/۰ \text{ kg})(۴/۲۰ \times ۱۰^۳ \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(۲۵/۰^\circ\text{C}) + (۱/۰ \text{ kg})(۳/۳۵ \times ۱۰^۵ \text{ J/kg}) = ۴/۴۰ \times ۱۰^۵ \text{ J}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۵-۱ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_L}{K} = \frac{۴/۴۰ \times ۱۰^۵ \text{ J}}{۴/۰} = ۱/۱۰ \times ۱۰^۵ \text{ J}$$

حال با استفاده از رابطه توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می‌آید:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{۱/۱۰ \times ۱۰^۵ \text{ J}}{۱۰۰/۰ \text{ J/s}} = ۱/۱۰ \times ۱۰^۳ \text{ s}$$

ب) با استفاده از رابطه  $|Q_H| = W + Q_L$  برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = ۱/۱۰ \times ۱۰^۵ \text{ J} + ۴/۴۰ \times ۱۰^۵ \text{ J} = ۵/۵۰ \times ۱۰^۵ \text{ J}$$

۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

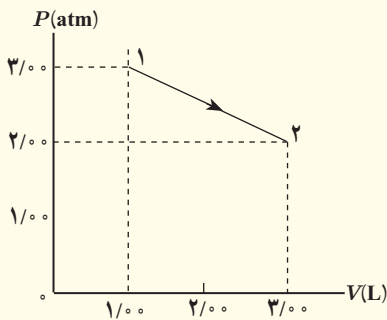
۱ ظرفی شامل  $3/0\text{ kg}$  آب است. با هم زدن آب داخل ظرف،  $40\text{ kJ}$  کار روی آن انجام می‌دهیم و در این مدت  $31\text{ kJ}$  گرما از ظرف به بیرون منتقل می‌شود. انرژی درونی آب چقدر تغییر می‌کند؟

۵-۵ برخی فرایندهای ترمودینامیکی

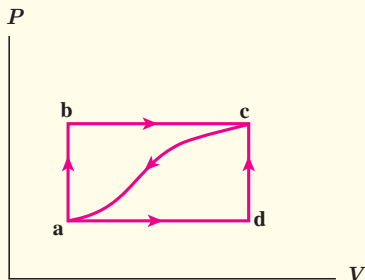
۲ الف) در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟  
ب) در فرایند هم فشار چگونه می‌توان حجم گاز را افزایش یا کاهش داد؟

۳ ته یک سرنگ را که دسته آن می‌تواند آزادانه حرکت کند مسدود می‌کنیم، آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

۴ حجم  $5/0^\circ\text{C}$  مول از یک گاز آرمانی تک اتمی  $8/3$  لیتر و فشار آن  $1/5$  اتمسفر است. الف) مقداری گرما به گاز می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید. ب) اگر به جای گرما دادن به گاز، مقداری گرما از گاز بگیریم تا حجم آن در طی یک فرایند هم فشار نصف شود، کار و گرمای مبادله شده در این فرایند چقدر می‌شود؟

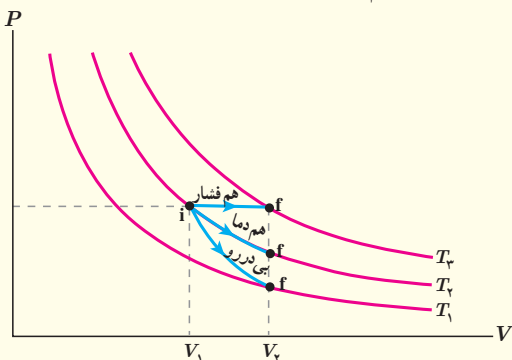


۵ نمودار  $P-V$  ی گازی رقیق در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. در این فرایند با فرض آنکه انرژی درونی در نقطه (۱) برابر  $456\text{ J}$  و در نقطه (۲) برابر  $912\text{ J}$  باشد، چقدر گرما مبادله شده است؟ آیا گاز گرما گرفته است یا از دست داده است؟



۶ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر،  $90^\circ$  ژول گرما می‌گیرد و  $70^\circ$  ژول کار انجام می‌دهد. الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟ ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز در مقایسه با مسیر abc بیشتر است یا کمتر؟ گرمای داده شده به گاز بیشتر است یا کمتر؟ پ) اگر گاز را از مسیر خمیده از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن انرژی بگیریم؟

۷  $12/0\text{ g}$  گاز اکسیژن ( $O_2$ ) در فشار متعارف جو ( $1/01 \times 10^5\text{ Pa}$ ) از  $25/0^\circ\text{C}$  تا  $125^\circ\text{C}$  گرم می‌شود. نسبت تغییر انرژی درونی گاز به گرمای داده شده به آن را به دست آورید؟

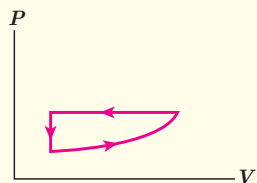


۸ یک مکعب آلومینیمی توپُر به ضلع  $20/0\text{ cm}$  از  $50/0^\circ\text{C}$  تا  $150/0^\circ\text{C}$  در فشار متعارف جو ( $1/01 \times 10^5\text{ Pa}$ ) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب و تغییر انرژی درونی آن را محاسبه کنید.

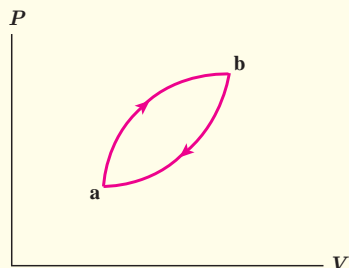
۹ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم فشار، هم دما و بی‌دررو از  $V_1$  به حجم بزرگ‌تر  $V_2$  می‌رسد.

الف) اندازه کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

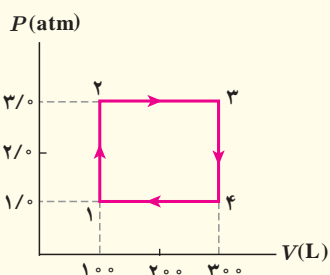
### ۵-۶ چرخه ترمودینامیکی



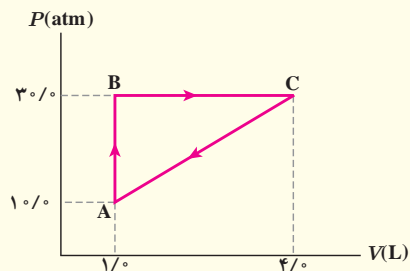
۱۰) برای چرخه گازی که نمودار  $P-V$  ی آن در اینجا نشان داده شده است،  $\Delta U$ ،  $W$  و  $Q$  مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



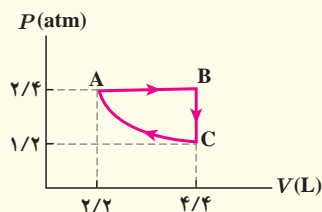
۱۱) شکل روبه‌رو چرخه‌ای را نشان می‌دهد که یک گاز طی کرده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است؟ ب) اگر مقدار گرمای مبادله شده در این چرخه  $400\text{ J}$  باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



۱۲) یک گاز کامل دو اتمی چرخه نشان داده شده در شکل روبه‌رو را می‌پیماید. دمای گاز در حالت (۱) برابر  $200\text{ K}$  است. الف) دما در سه نقطه دیگر چقدر است؟ ب) کار انجام شده در چرخه چقدر است؟ پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟ ت) در چه فرایندهایی گاز گرما از دست داده است؟

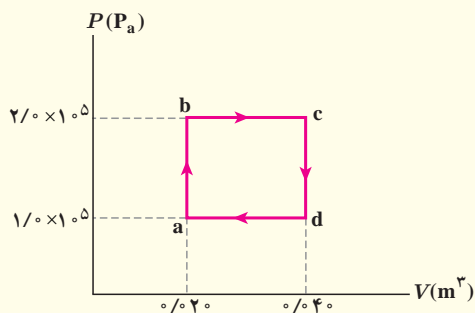


۱۳) گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای مبادله شده در این چرخه چند ژول است؟



۱۴) دستگاهی متشکل از  $0.32\text{ mol}$  گاز کامل تک‌اتمی حجمی برابر  $2/2\text{ L}$  را در فشار  $2/4\text{ atm}$  اشغال کرده است. این دستگاه چرخه‌ای مطابق شکل را می‌پیماید که در آن فرایند  $CA$  فرایندی هم‌دما است. الف) دما در نقاط  $A$ ،  $B$  و  $C$  چقدر است؟ ب)  $\Delta U$  را برای هر یک از سه فرایند چرخه به دست آورید.

### ۵-۷ 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  $J$   $100\%$  گرما از منبع دما بالا می‌گیرد و  $J$   $60\%$  گرما به منبع دما پایین می‌دهد. الف) بازده این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه  $s$   $500\%$  طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟
- ۱۷ بازده یک ماشین آرمانی  $25\%$  درصد است و در هر چرخه  $J$   $10^2 \times 8/2$  کار انجام می‌دهد. الف)  $Q_H$  و  $Q_L$  را در هر چرخه ماشین به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به  $30\%$  درصد افزایش یابد،  $Q_H$  و  $Q_L$  به ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟
- ۱۸ یک ماشین بخار در هر دقیقه  $MJ$   $10^5 \times 1/5$  گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و  $MJ$   $10^4 \times 9/0$  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  $kJ$   $8/0$  گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و  $kJ$   $2/0$  کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت  $J/g$   $10^4 \times 5/0$  است و ماشین در هر ثانیه  $40\%$  چرخه را می‌پیماید. کمیت‌های زیر را حساب کنید.
- الف) بازده ماشین، ب) با فرض آرمانی بودن ماشین، گرمای تلف شده در هر چرخه، پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه و ت) توان ماشین.

### ۸-۵ 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 بازده آن  $70\%$  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 دما بالا را افزایش دهیم یا دمای منبع دما پایین را به همان مقدار کاهش دهیم؟
- ۲۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع‌های با دمای  $K$   $300$  و  $K$   $400$  کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از:

ماشین A	$Q_H = 2000J$	$Q_L = -1750J$	$W = -40J$
ماشین B	$Q_H = 500J$	$Q_L = -200J$	$W = -400J$
ماشین C	$Q_H = 600J$	$Q_L = -200J$	$W = -400J$
ماشین D	$Q_H = 100J$	$Q_L = -90J$	$W = -10J$

با فرض آرمانی بودن این چهار ماشین:

- الف) کدام یک از ماشین‌ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می‌کنند؟  
ب) کدام یک از ماشین‌ها قابل ساخت هستند؟

- ۲۳ یک ماشین کارنو بین دماهای  $K$   $280$  و  $K$   $360$  کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه  $J$   $750$  گرما از منبع دما بالا می‌گیرد. الف) در هر چرخه  $|W|$  چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع دما پایین داده می‌شود؟

### ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

- ۲۴ قرار است نیم ساعت دیگر مهمانی برای شما برسد در حالی که هیچ یخی را برای نوشابه خود آماده نکرده‌اید. به سرعت  $L$   $1/0$  آب  $C$   $10$  را در قالب‌های یخ می‌ریزید و در فریزر قرار می‌دهید. آیا در زمانی که مهمان می‌رسد، یخ خواهید داشت؟ ضریب عملکرد یخچال  $4/0$  و توان آن  $W$   $110$  است. (فرض کنید همه توان الکتریکی یخچال صرف سرد کردن و یخ زدن آب می‌شود.)
- ۲۵ یک کولر گازی در هر دقیقه  $J$   $10^4 \times 9/0$  گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت  $J$   $10^5 \times 1/3$  گرما به فضای بیرون می‌دهد. با فرض آرمانی بودن کولر،  
الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟ ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟
- ۲۶ فرض کنید  $g$   $250$  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  $C$   $22$  است. دمای داخل یخچال در  $C$   $5$  ثابت نگه داشته شده است. کمترین مقدار انرژی الکتریکی که باید به یخچال داده شود تا یخ صفر درجه سلسیوس تشکیل شود، چقدر است؟

## محاسبه‌های جبری با رقم‌های بامعنا

هنگامی که عددها در هم ضرب یا بر هم تقسیم می‌شوند تعداد رقم‌های بامعنا در نتیجه محاسبه نمی‌تواند بیشتر از تعداد رقم‌های بامعناى عددی باشد که کمترین رقم بامعنا را دارد. مثلاً حاصل عبارت  $۳/۱۴۱۵ \times ۲/۹۲۳ \times ۷/۱۲$  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  $۲۴۵/۴۱ + ۴/۸$  باید به صورت  $۲۵۰/۲$  بیان شود. اگر نتیجه به صورت  $۲۵۰/۲۱$  بیان شود نادرست است. همچنین حاصل عبارت  $۲۱/۴۳۵۶ - ۴۱/۳۴۲ + ۱۲/۰$  باید به صورت  $۳۱/۹$  بیان شود.

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

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

صفرهایی که در طرف راست اعداد قرار دارند می‌توانند بامعنا باشند یا نباشند. برای مثال، اگر طول میله‌ای  $۲۳۰\text{mm}$  گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا ممکن است دو یا سه رقم باشد. اگر نتیجه اندازه‌گیری با نمادگذاری علمی، به صورت  $۲۳۰\text{mm} = ۲/۳ \times ۱۰^۲\text{mm}$  نوشته شود، دارای دو رقم بامعنا و اگر به صورت  $۲۳۰\text{mm} = ۲/۳۰ \times ۱۰^۲\text{mm}$  نوشته شود دارای سه رقم بامعنا است. در برخی از کتاب‌های درسی، برای سادگی، تمام صفرهای سمت راست اعداد را بامعنا فرض می‌کنند. در کتاب فیزیک (۱) نیز ما از این فرض استفاده کرده‌ایم. بنابراین وقتی طول میله‌ای  $۲۳۰\text{mm}$  گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا در این گزارش را سه رقم می‌گیریم.

## واژه نامه فارسی - انگلیسی

Crystalline Solid	جامدهای بلورین	Rate	آهنگ
Amorphous Solid	جامدهای بی شکل	Flow Rate	آهنگ جریان
Mass	جرم	Greenhouse Effect	اثر گلخانه‌ای
Turbulent Flow	شارش تلاطمی	Significant Figures	ارقام با معنا
Laminar Flow	جریان لایه‌ای	Cylinder	استوانه (سیلندر)
Floating Object	جسم شناور	Static Friction	اصطکاک ایستایی
Submerged Object	جسم غوطه‌ور	Principle	اصل
Earth Atmosphere	جو زمین	Archimedes' Principle	اصل ارشمیدس
Barometer	جو سنج	Bernoulli Principles	اصل برنولی
Boiling	جوشیدن	Expansion	انبساط
Cycle	چرخه	Volume Expansion	انبساط حجمی
Otto Cycle	چرخه اُتو	Linear Expansion	انبساط طولی
Viscosity	گران‌روی	Thermal Expansion	انبساط گرمایی
Source	چشمه	Freezing	انجماد
Condensation	چگالش	Measurement	اندازه‌گیری
Condenser	چگالنده	Potential Energy	انرژی پتانسیل
Density	چگالی	Gravitational Potential Energy	انرژی پتانسیل گرانشی
Phase	حالت (فاز)	Elastic Potential Energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Motion	حرکت	Kinetic Energy	انرژی جنبشی
Brownian Motion	حرکت براونی	Internal Energy	انرژی درونی
Error	خطا	Contraction	انقباض
Fundamental Knowledge	دانش بنیادی	Time Interval	بازه زمانی
Accuracy	درستی (صحت)	Efficiency	بازده
Valve	دریچه (سوآپ)	Resultant	برایند
International System Units	دستگاه بین‌المللی یکاها	Vector	بردار
Thermodynamics System	دستگاه ترمودینامیکی	Expansion Joint	بست انبساطی
Metric System	دستگاه متریک	Crystalline	بلورین
Precision	دقت	Conservation of Energy	پایستگی انرژی
Adhesion	دگرچسبی	Diffusion	پخش
Temperature	دما	Physical Phenomena	پدیده‌های فیزیکی
Thermostat	دماپا	Plasma	پلازما
Thermometer	دماسنج	Piston	پیستون
Thermometer Clinical	دماسنج طبی	Unit Prefixes	پیشوندهای یکا
Maximum - Minimum Thermometer	دماسنج کمینه- بیشینه	Thermal Radiation	تابش گرمایی
Standard Thermometer	دماسنج معیار	Vaporization	تبخیر
Thermograph	دمانگار	Evaporation	تبخیر سطحی
Dynamics	دینامیک (پویاشناسی)	Experimental	تجربی
Boiler	دیگ بخار	Estimate	تخمین (برآورد)
Elementary Particles	ذرات بنیادی	Compressibility	تراکم پذیری
Melting	ذوب	Wetting	ترشوندگی
Fusion	گداخت (همجوشی)	Sublimation	تصعید
Thermal Conduction	رسانش گرمایی	Thermal Equilibrium	تعادل گرمایی
Humidity	رطوبت	Pyrometer	تف سنسج
Micrometer	ریزسنسج	Optical Pyrometer	تف سنسج نوری
Light Year	سال نوری	Turbulent	متلاطم
Global Positioning System(GPS)	سامانه مکان‌یابی جهانی	Speed	تندی
Velocity	سرعت	Takeoff Speed	تندی برخاستن
The Fire Syringe	سرنگ آتش‌زنه	Average Speed	تندی متوسط
Valve	دریچه، سوآپ	Power	توان
Fluid	شاره	Gas Universal Constant	ثابت جهانی گازها
Dew	شبنم	Displacement	جابه‌جایی
Acceleration	شتاب	Solid	جامد

Steam engine	ماشین بخار	Spark Plug	شمع
Gasoline Engine	ماشین بنزینی	Exhaust Stroke	ضربه تخلیه
Diesel Engine	ماشین دیزل	Compression Stroke	ضربه تراکم
Carnot Engine	ماشین کارنو	Power Stroke	ضربه قدرت
Heat Engine	ماشین گرمایی	Intake Stroke	ضربه مکش
External Combustion Engine	ماشین گرمایی برون سوز	Conversion Factor	ضریب (عامل) تبدیل
Internal Combustion	ماشین گرمایی درون سوز	Coefficient of Performance	ضریب عملکرد
Environment	محیط	Heat Capacity	ظرفیت گرمایی
Model	مدل	Insulator	عایق
Modeling	مدل سازی	Uncertainty	عدم قطعیت
Order-of Magnitude	مرتبه بزرگی	Nanoscience	علوم نانو
Explosion Step	مرحله آتش گرفتن	Quasi-Static Process	فرایند ایستاوار
Exhaust Step	مرحله تخلیه	Adiabatic Process	فرایند بی دررو
Equation of Continuity	معادله پیوستگی	Thermodynamics Process	فرایند ترمودینامیکی
Equation of State	معادله حالت	Throttling Process	فرایند خفقا نشی (فشار شکن)
Approximate Value	مقدار تقریبی	Isochoric process	فرایند هم حجم
Temperature Scale	مقیاس دماسنجی	Isothermal process	فرایند هم دما
Nano-Scale	مقیاس نانو	Isobaric process	فرایند هم فشار
High-temperature Reservoir	منبع دما بالا	Pressure	فشار
Low-temperature Reservoir	منبع دما پایین	Gauge Pressure	فشار پیمانه ای (سنجهای)
Heat Reservoir	منبع گرما	Standard Atmospheric Pressure	فشار متعارف جو
Capillarity	مویبگی	Manometer	فشارسنج
Liquefaction	میعان	Technology	فناوری
Crank	میل لنگ	Spring	فنر
Nanoparticle	نانو ذره	Rule of Dulong-Petit	قاعده دولن - پتی
Nanolayer	نانو لایه	First Law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک
Nanotechnology	نانوفناوری	Second Law of Thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک
Scalar	نرده ای	Newtons Laws	قانون های نیوتون
Compression Ratio	نسبت تراکم	Work - kinetic Energy Theorem	قضیه کار - انرژی جنبشی
Physical Theory	نظریه فیزیکی	Carnot Theorem	قضیه کارنو
Freezing Point	نقطه انجماد	Carat	قیراط
Boiling Point	نقطه جوش	Work	کار
Melting Point	نقطه ذوب	Surface Tension	کشش سطحی
Triple Point	نقطه سه گانه	Physical Quantity	کمیت های فیزیکی
Scientific Notation	نماد گذاری علمی	Gravitational Work	کار گرانشی
Bi-Metal Strip	نوار دوفلزه	Temperature Quantity	کمیت دماسنجی
Force	نیرو	Macroscopic Quantity	کمیت ماکروسکوپی
Spring Balance	نیروسنج فنری	Vector Quantities	کمیت های برداری
Repulsive Force	نیروی رانشی	Scalar Quantities	کمیت های نرده ای
Attractive Force	نیروی ربایشی	Caliper	کولیس
Dissipative Forces	نیروهای اتلافی	Galaxy	کهکشان
Buoyant Force	نیروی شناوری	Ideal Gas	گاز آرمانی (کامل)
Air (Temperature) Inversion	وارونگی هوا (دما)	Gravitation	گرانش
Weight	وزن	Heat	گرما
Cohesion	هم چسبی	Calorimeter	گرماسنج
Convection	همرفت	Bomb Calorimeter	گرماسنج بمبی
Forced Convection	همرفت واداشته	Latent Heat	گرمای نهان
Unit	یکا	Specific Heat	گرمای ویژه
Base Units	یکاهای اصلی	Molar Specific Heat	گرمای ویژه مولی
Derived Units	یکاهای فرعی	Knot	گره (دریایی - هوایی)
Refrigerator	یخچال	Capillary Tube	لوله موین
Astronomical Unit	یکای نجومی	Venturi Tube	لوله ونتوری

## فهرست منابع

### منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, Mc Graw – Hill.
2. Applied Physics, 10<sup>th</sup> Edition, Dale Ewen, 2012, Prentice Hall.
3. Physics, 4<sup>th</sup> Edition, James S. Walker, Pearson, 2010.
4. IGCSE Physics, 3<sup>th</sup> Edition, Tom Duncan, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, First edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7<sup>th</sup> 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, 3<sup>th</sup> Edition, 2013, Pearson.
10. Physics, Mike Crundell, Cambridge International AS and A Level, 2<sup>th</sup> Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2<sup>th</sup> 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<sup>th</sup> edition 2012, Addison–Wesely.
15. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9<sup>th</sup> 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, 13<sup>th</sup> 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, 5<sup>th</sup> Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.

### منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاسمی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
  - ۲- مبانی فیزیک (جلد اول) مکانیک، گرما و شماره ها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و برل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
  - ۳- مبانی فیزیک (جلد اول و دوم) ریموند سروی و کریس ووئیل، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات فاطمی.
  - ۴- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۱-۱۳۸۷، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
  - ۵- دوره درسی فیزیک گ.س. لند سیرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
  - ۶- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، برل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
  - ۷- فیزیک تجربی (از مجموعه ۵ جلدی المپیاد فیزیک)، کمیته المپیاد فیزیک زاین، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات مدرسه.
  - ۸- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس اوهانیان، ترجمه یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
  - ۹- فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
  - ۱۰- فیزیک پایه، ویراست سوم، فرانک بلت، ترجمه محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
  - ۱۱- به علوم نانو خوش آمدید (به همراه DVD)، ویژه دوره آموزش متوسطه، اندرو اس مدن و دیگران، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و معصومه قاسمی، چاپ سوم ۱۳۹۵، انتشارات مدرسه.
- عکاس شروع فصل اول: آقای محمد یزدی راد

