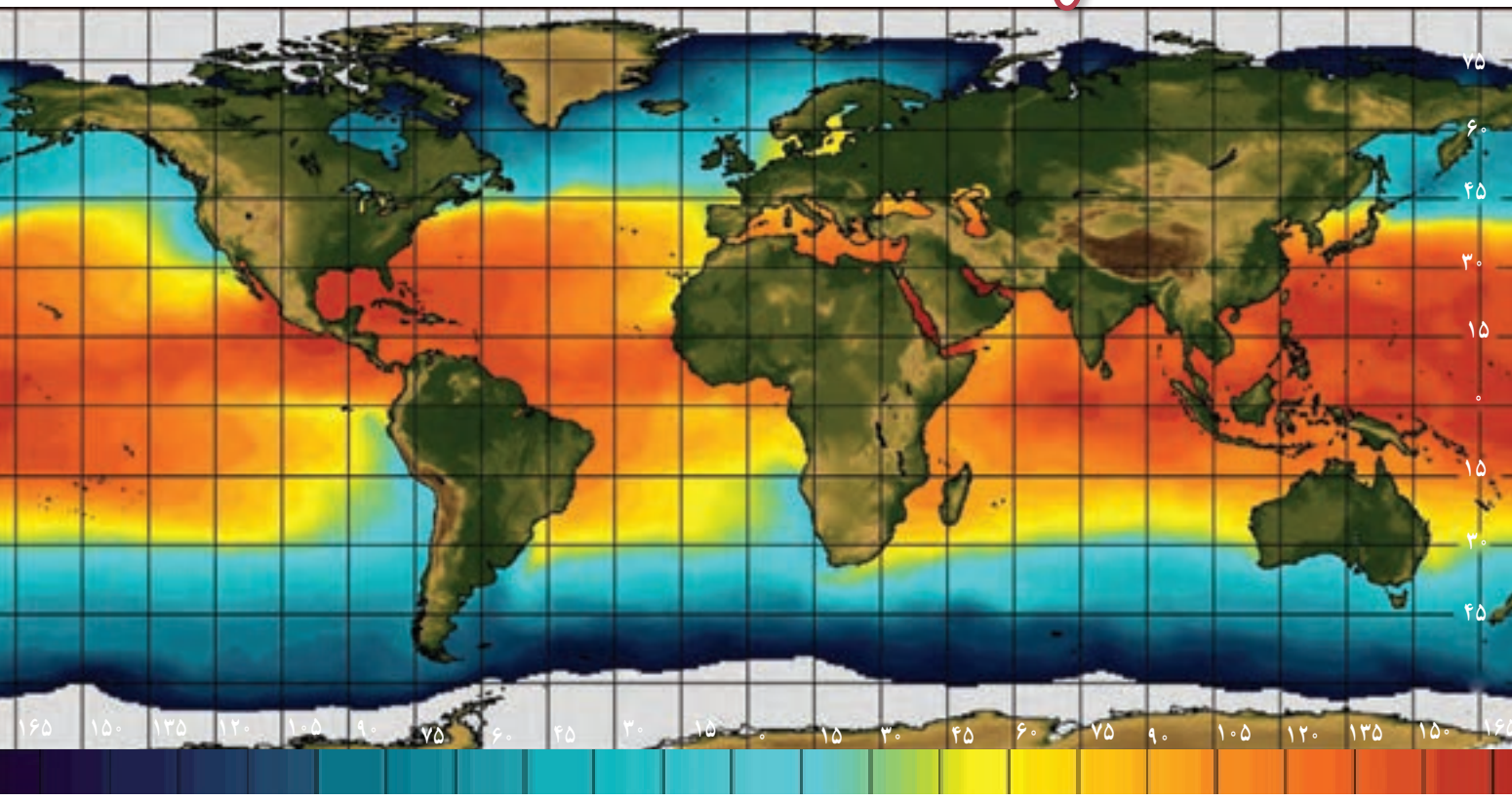
فصل ۴

دما و گرما



هواشناسان براساس تصویرهای ماهواره‌ای وضعیت هوا را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از بخش‌های عمدهٔ گزارش آنها، اعلام دمای مناطق مختلف زمین است. این تصویر ماهواره‌ای، دمای آب روی سطح کرهٔ زمین را در یک روز خاص نمایش می‌دهد. رنگ‌ها نشان‌دهندهٔ گسترهٔ دمایی از کمترین (بنفش) تا بیشترین (قرمز) است.

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

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

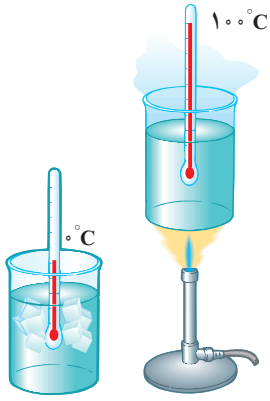
۴ـ۱ دما و دماسنجی

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

شکل ۴ـ۱ یک نمونه دماسنج الکلی

در کتاب‌های علوم خود دیدید دما کمّیتی است که میزان سردی و گرمی اجسام را مشخص می‌کند. برای اندازه‌گیری دما لازم است مقیاس دمایی داشته باشیم و برای این کار می‌توانیم از هر مشخصهٔ قابل اندازه‌گیری بهره بگیریم که با گرمی و سردی جسم تغییر می‌کند. به این ویژگی، اصطلاحاً **کمّیت دماسنجی** می‌گویند. تغییر کمّیت دماسنجی، اساس کار دماسنج‌هاست. ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع دماسنج، دماسنج‌های جیوه‌ای[۱] و الکلی است که در کتاب‌های علوم با آنها آشنا شده‌اید. در این دماسنج‌ها، کمّیت دماسنجی، ارتفاع مایع درون لولهٔ دماسنج است؛ زیرا به جز چند مورد استثنا تمام مواد با افزایش دما، منبسط و با کاهش آن منقبض می‌شوند. شکل ۴ـ۱ نمونه‌ای از یک دماسنج الکلی را نشان می‌دهد.

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



شکل ۴ـ۲ شکلی طرح‌وار از مقیاس‌بندی دما

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

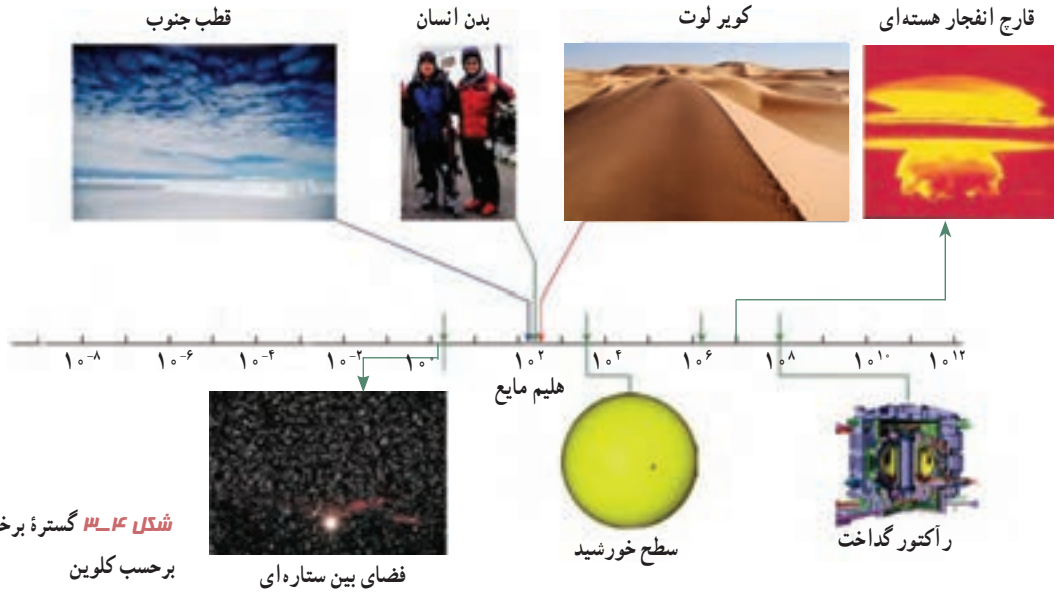
$$T = \theta + ۲۷۳/۱۵ \qquad (۱ـ۴)$$

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

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

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

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



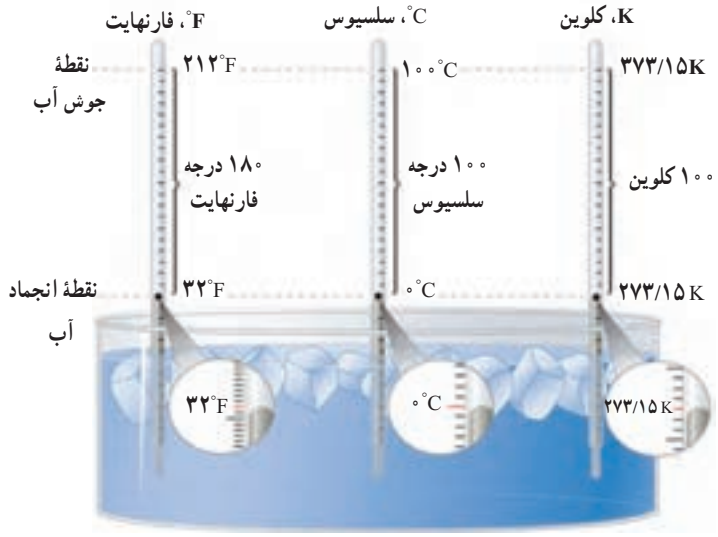
شکل ۴ـ۳ گسترهٔ برخی از دماها برحسب کلوین

تمرین ۴ـ۱

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

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

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



شکل ۴ـ۴ مقایسهٔ یکاهای فارنهایت، سلسیوس و کلوین

تمرین ۴ـ۲

الف) دمای بدن یک انسان سالم تقریباً ۳۷°C است. این دما را برحسب کلوین و فارنهایت بنویسید.

ب) گرم‌ترین نقطهٔ روی زمین، ناحیه‌ای در کویر لوت است که دمای آن تا حدود ۷۰°C و سردترین نقطه در قطب جنوب است که دمای آن تا ۸۹°C− گزارش شده است. این دماها را برحسب کلوین و فارنهایت به‌دست آورید.

فعالیت ۴ـ۱

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

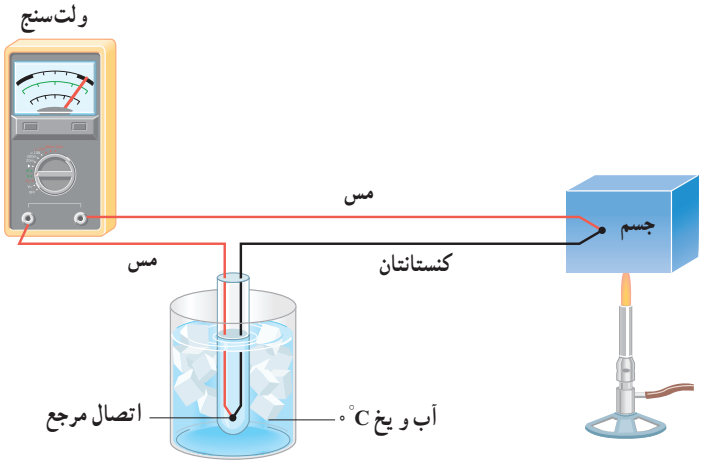
دماسنج‌های معیار[۱] : امروزه از انواع دماسنج‌ها در زندگی روزمره استفاده می‌شود. برخی از آنها در شکل‌های ۴ــ۵ نشان داده شده است.

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

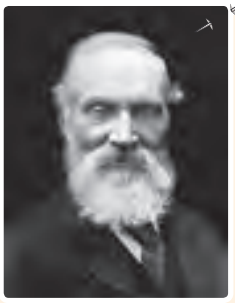
(ب) دماسنج تابشی که بر اساس آشکارسازی شدت تابش گرمایی کار می‌کند.

شکل ۴ــ۵

دانشمندان برای کارهای علمی، سه دماسنج را به‌عنوان دماسنج‌های معیار برای اندازه‌گیری گسترهٔ دماهای مختلف پذیرفته‌اند : دماسنج گازی، دماسنج مقاومت پلاتینی و تف‌سنج (پیرومتر). اساس کار دماسنج گازی مبتنی بر قانون گازهای کامل است و همچنین اساس کار تف‌سنج، بر تابش گرمایی مبتنی است که هر دو در بخش‌های آینده بررسی می‌شود. با اصول کار دماسنج‌های مقاومت پلاتینی نیز در سال آینده آشنا خواهید شد. یکی از دماسنج‌های مهم دیگر که تا پیش از سال ۱۹۹۰ میلادی جزو دماسنج‌های معیار شمرده می‌شد، دماسنج ترموکوپل است که به دلیل دقت کمتر آن نسبت به دماسنج‌های بیان شده، از مجموعه دماسنج‌های معیار کنار گذاشته شد؛ ولی این دماسنج همچنان کاربرد فراوانی در صنعت و آزمایشگاه‌ها دارد. از این‌رو، در ادامه به معرفی این دماسنج می‌پردازیم. کمیت دماسنجی این دماسنج، ولتاژ است. نمونه‌ای طرح‌وار از این دماسنج در شکل ۴ــ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۶ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل



ویلیام تامسون کلوین[۲]

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

۱ــ Standard Thermometer

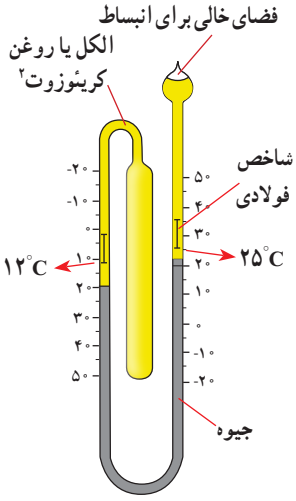
۲ــ William Thomson Baron Kelvin

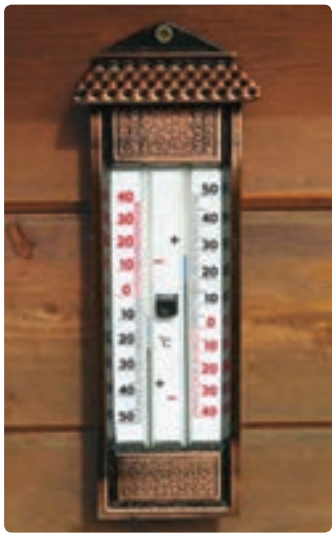
شکل ۴ــ۷ در این تصویر دمای یک گرماسنج به روش الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود.

مطابق این شکل، دو سیم 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. گسترهٔ دماسنجی یک ترموکوپل به جنس سیم‌های آن بستگی دارد؛ مثلاً در یکی از انواع ترموکوپل‌ها که جنس سیم‌ها از آلیاژهای خاصی[1] است، گسترهٔ دماسنجی از $-۲۷۰\,^{\circ}C$ تا $۱۳۷۲\,^{\circ}C$ 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 به‌کار رود که در بسیاری از وسایل صنعتی، گرمایشی و سرمایشی یافت می‌شود. شکل ۴ــ۷ روشی از اندازه‌گیری دما با دماسنج‌هایی از این دست را نشان می‌دهد.

فعالیت ۴ــ۲

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





۴ــ۲ انبساط گرمایی

اگر درِ یک ظرف شیشه‌ای محکم باشد، معمولاً برای باز کردن درِ ظرف روی آن آب داغ می‌ریزیم. وقتی دو لیوان شیشه‌ای درهم، گیر کرده باشند، با ریختن آب سرد در لیوان داخلی و گذاشتن لیوان بیرونی در آب گرم، می‌توانیم دو لیوان را از هم جدا کنیم. وقتی دندانپزشک سوراخ دندانی را پر می‌کند، باید مادهٔ پرکنندهٔ دندان همان مشخصه‌های انبساط گرمایی دندان را داشته باشد (شکل ۴ــ۸)، زیرا در غیر این صورت، خوردن یک بستنی سرد و در پی آن نوشیدن چای داغ، بسیار دردناک خواهد بود و ممکن است سبب شکستن دندان نیز بشود.

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

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

۲ــ creosote

پرسش ۴ــ۱

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

ب) چرا در برخی از فصل‌های سال، بعضی از 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 پدیدهٔ انبساط در ساختن پل‌ها، ساختمان‌ها، خط‌آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

فعالیت ۴ــ۳

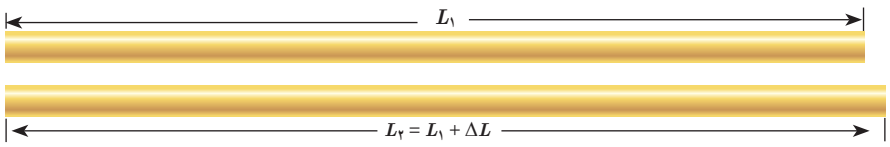
۱) شکل (الف) تصویری واقعی از دو قسمت متوالی خط‌آهن (ریل راه‌آهن)های قدیمی را در گذشته نشان می‌دهد. اگر فاصلهٔ خالی بین این دو قسمت به حدّ کافی زیاد نمی‌بود، چه مشکلی پیش می‌آمد؟

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

(الف)

(ب)

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



شکل ۴ــ۹ انبساط گرمایی میله‌ای به طول اولیهٔ L_1

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

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

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

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

ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۴ــ۱ داده شده است. توجه کنید که مقادیر داده شده برای α در جدول بسیار کوچک است. همچنین ضریب انبساط طولی α علاوه بر جنس ماده، به دما نیز اندکی وابسته است، اما به دلیل اینکه این وابستگی ناچیز است، معمولاً آن را در محاسبات معمولی نادیده می‌گیریم.

جدول ۴ــ۱ ضریب انبساط طولی برخی اجسام

ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$	ماده	ضریب انبساط طولی $\frac{1}{K}$
الماس	$1/2 \times 10^{-6}$	مس	17×10^{-6}
شیشهٔ پیرکس	$3/2 \times 10^{-6}$	برنج	19×10^{-6}
شیشهٔ معمولی	$9\text{ــ}12 \times 10^{-6}$	آلومینیم	23×10^{-6}
فولاد	$11\text{ــ}13 \times 10^{-6}$	سرب	29×10^{-6}
بتون	$10\text{ــ}14 \times 10^{-6}$	یخ (در $0^\circ C$)	51×10^{-6}

مثال ۴ــ۱

طول یک پل معلق[1] (شکل الف)، $1158\ m$ است. این پل از نوعی فولاد با $\alpha = 13 \times 10^{-6}\ 1/^\circ C$ ساخته شده است. فرض کنید کمترین دمای ممکن $-50^\circ C$ و بیشترین دمای ممکن $+50^\circ C$ باشد. بیشترین تغییر طول ممکن پل چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۲ داریم :

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T = (13 \times 10^{-6}\ 1/^\circ C)(1158 m)(100^\circ C) = 1/5 m$$

تغییر طول $1/5\ m$ مقدار نسبتاً زیادی است. بدیهی است که در عمل نمی‌توان فضایی خالی به طول $1/5\ m$ را برای این تغییر طول روی پل در نظر گرفت. برای رفع این مشکل از تعدادی *بست انبساطی/انگشتی*[2] که از جنس فلز هستند استفاده می‌کنند. شکل (ب)، نوعی از این بست‌ها و شکل (پ)، نمونه‌ای دیگر از این بست‌ها را نشان می‌دهد.

(الف) تصویری از یک پل معلق

(ب) نمونه‌ای از بست‌های انبساطی

(پ) نمونه‌ای دیگر از بست‌های انبساطی

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

۲ــ Finger Expansion Joint

آزمایش ۴ــ۱

هدف : اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی

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

شرح آزمایش :

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

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

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

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

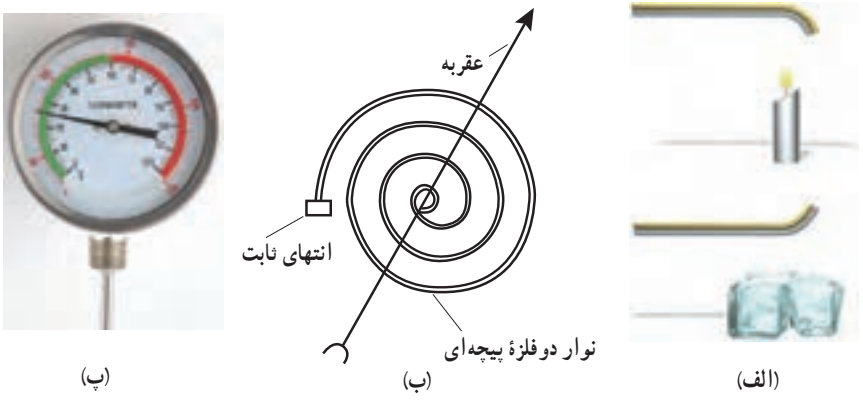
۵ــ آن‌قدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لولهٔ توخالی کاملاً گرم شود و سپس دمای دماسنج را بخوانید (θ_2).

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

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

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

دماسنج نواری دوفلزه : نوار دوفلزه (بی‌متال[1]) از دو تیغهٔ فلزی متفاوت، مانند برنج و آهن ساخته شده است که سرتاسر به هم جوش داده شده یا پرچ شده‌اند. هرگاه این نوار، گرم یا سرد شود، نوار مانند شکل ۴ــ۱۰ (الف) خم می‌شود (شکل با اندکی اغراق رسم شده است). از این ویژگی می‌توان برای دماسنجی و ساختن دماسنج استفاده کرد. به این نوع دماسنج‌ها، دماسنج نواری دوفلزه گفته می‌شود. شکل ۴ــ۱۰ (ب)، طرحی از این دماسنج را که در آن از یک نوار دوفلزهٔ پیچه‌ای استفاده شده است، نشان می‌دهد و شکل ۴ــ۱۰ (پ)، تصویری واقعی از این نوع دماسنج است.

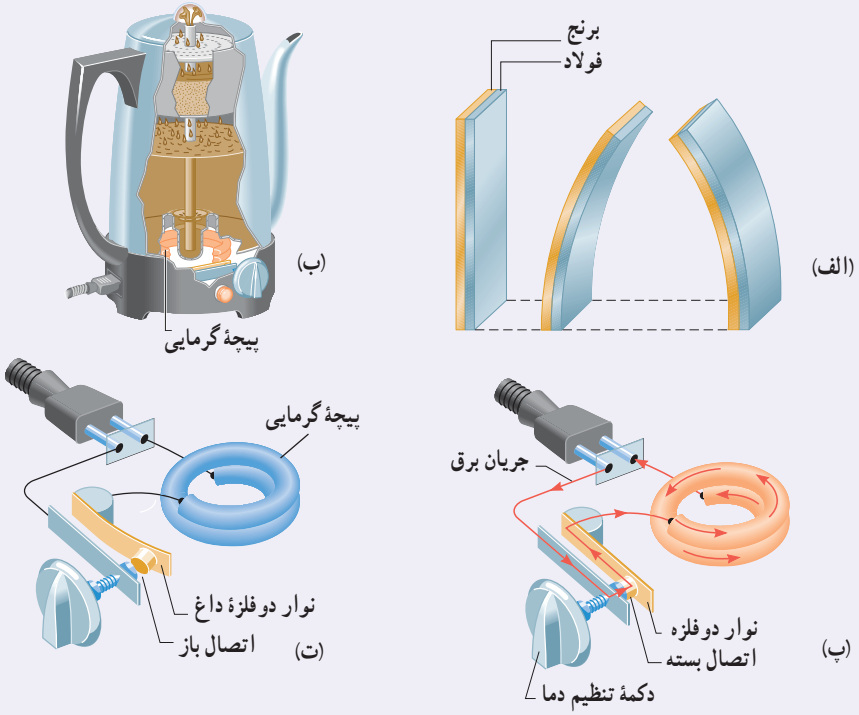


شکل ۴ــ۱۰ (الف) با گرم و سرد شدن، نوار دوفلزه در جهت‌های مخالفی خم می‌شود.
(ب) یک نوار دوفلزهٔ پیچه‌ای (پ) یک دماسنج نواری واقعی

۱ــ bi_metal

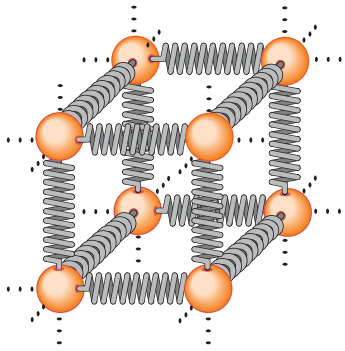
فناوری و کاربرد

دماپا (ترموستات) : در دماسنج نواری دوفلزه دیدیم که یک نوار دوفلزه با افزایش یا کاهش دما خم می‌شود. این خم‌شدگی طوری است که در هنگام گرم‌شدن، تیغهٔ با ضریب انبساط بیشتر، کمان خارجی و تیغهٔ دیگر کمان داخلی را تشکیل می‌دهد (شکل ۴ــ۱۱ الف). از این ویژگی برای ساخت نوعی دماپا (ترموستات) استفاده می‌شود. دماپاها در بسیاری از وسایل الکتریکی مانند یخچال، آبگرم‌کن، کتری برقی و ... کاربرد دارند (شکل ۴ ــ ۱۱ ب). در واقع دماپا کلیدی الکتریکی است که در آن، قطع و وصل جریان با استفاده از حسگرهای گرمایی انجام می‌شود. اغلب از نوارهای دوفلزه به عنوان حسگرهای گرمایی در دماپا استفاده می‌شود. در مدار سادهٔ نشان‌داده شده در شکل ۴ــ۱۱پ، عبور جریان الکتریکی از کتری برقی باعث گرم‌شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازهٔ معینی برسد، بر اثر خم‌شدن نوار، جریان قطع شده و کتری برقی خاموش می‌شود (شکل ۴ ــ ۱۱ ت). با خاموش‌شدن کتری، دمای تیغه کاهش می‌یابد و نوار دوباره به شکل وضعیت قبلی خود بازمی‌گردد و به این ترتیب، دوباره مدار وصل شده و کتری برقی روشن می‌شود.



شکل ۴ــ۱۱ الف) تیغهٔ دوفلزه با تغییر دما در جهت‌های مختلفی خم می‌شود، ب) دماپا در یک کتری برقی، پ) با برقرار شدن جریان الکتریکی، نوار دوفلزه گرم می‌شود. ت) سپس نوار خم شده و اتصال را قطع می‌کند.

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



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

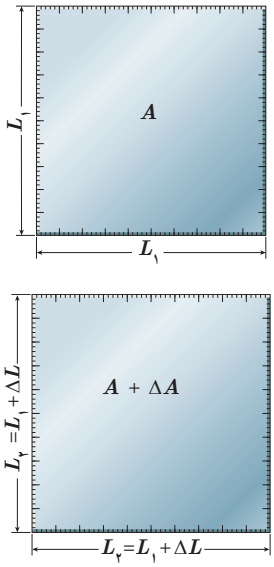
در مایع با افزایش دما حرکت کاتوره‌ای اتم‌ها و مولکول‌ها بیشتر می‌شود. این افزایش حرکت‌ها باعث دورشدن اتم‌ها و مولکول‌ها از هم می‌شود و حجم مایع افزایش می‌یابد.

انبساط سطحی و حجمی : سطح و حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. تجربه نشان می‌دهد با انبساط جسم جامد، شکل آن عوض نمی‌شود و همهٔ ابعاد آن به تناسب افزایش می‌یابد.

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

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

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



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

فعالیت ۴ــ۴

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

مثال ۴ــ۲

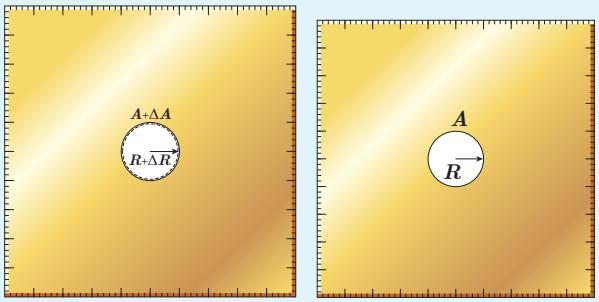
مساحت یک ورقهٔ مسی $2500\ cm^2$ است. اگر دمای این ورقه را $50^\circ C$ افزایش دهیم، مساحت آن چقدر افزایش خواهد یافت؟

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

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

تمرین ۴ــ۳

شکل‌های (الف) و (ب) نشان می‌دهند که وقتی روی یک ورقهٔ فلزی حفره‌ای دایره‌ای داشته باشیم و ورقه را گرم کنیم، قطر (یا مساحت) حفره بزرگ می‌شود. فرض کنید جنس ورقه، برنجی است و حفره‌ای به قطر یک اینچ (2/54 cm) درون آن ایجاد شده است. وقتی دمای ورقه، $200^\circ C$ افزایش یابد، افزایش مساحت حفره چقدرخواهد شد؟



(الف) (ب)

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

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

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

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

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

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

جدول ۴ــ۲ ضریب انبساط حجمی چند مایع در دمای حدود $20^\circ C$

ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
جیوه	$۰/۱۸ \times ۱۰^{-۳}$
آب	$۰/۲۷ \times ۱۰^{-۳}$
گلیسیرین	$۰/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$
روغن زیتون	$۰/۷۰ \times ۱۰^{-۳}$
پارافین	$۰/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$
بنزین	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$
اتانول	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۳}$
استیک اسید	$۱۱/۰ \times ۱۰^{-۳}$
بنزن	$۱۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$
کلروفرم	$۱۲/۷ \times ۱۰^{-۳}$
استون	$۱۴/۳ \times ۱۰^{-۳}$
اتر	$۱۶/۰ \times ۱۰^{-۳}$
آمونیاک	$۲۴/۵ \times ۱۰^{-۳}$

مثال ۴ــ۳

در یک روز داغ تابستان که دمای هوا $40^\circ C$ است، شخصی باکِ (مخزن) ۵۵ لیتری اتومبیل خود را از بنزین کاملاً پر می‌کند. فرض کنید بنزین از منبعی در زیرزمین با دمای $12^\circ C$ بالا آمده باشد. شخص اتومبیل را پارک می‌کند و ساعتی بعد بازمی‌گردد. مشاهده می‌کند بنزین قابل توجهی از باک سرریز شده است. چقدر بنزین از باک بیرون ریخته است؟ (از افزایش حجم باک که بسیار ناچیز است صرف‌نظر می‌شود.)

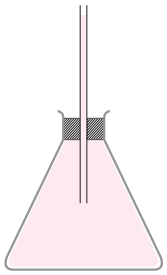
پاسخ : با توجه به اینکه بنزین، زمان کافی برای هم‌دما شدن با محیط داشته است، دمای نهایی آن را $40^\circ C$ در نظر می‌گیریم. اکنون با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۴ و جدول ۴ــ۲ برای ضریب انبساط حجمی بنزین خواهیم داشت :

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

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

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

مثال ۴ــ۴



ارلنی شیشه‌ای با ضریب انبساط طولی $۹/۰ \times ۱۰^{-۶}/^{\circ}C$ را که در دمای $۲۰/۰^{\circ}C$ گنجایشی برابر با $۲۰۰cm^{۳}$ دارد، مطابق شکل با گلیسیرین در همان دما پر کرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسیرین را به $۶۰^{\circ}C$ برسانیم

الف) آیا گلیسیرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

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

پاسخ :

الف) افزایش حجم گلیسیرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطه‌های ۴ــ۴ و ۴ــ۵ محاسبه می‌کنیم.

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} = \beta_{\text{گلیسیرین}} V_{۱} \Delta T = (۴۹ \times ۱۰^{-۵}/^{\circ}C)(۲۰۰cm^{۳})(۶۰^{\circ}C - ۲۰^{\circ}C) = ۳/۹cm^{۳}$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_{۱} \Delta T = (۳\alpha_{\text{شیشه}}) V_{۱} \Delta T = (۳ \times ۹/۰ \times ۱۰^{-۶}/^{\circ}C)(۲۰۰cm^{۳})(۶۰^{\circ}C - ۲۰^{\circ}C) = ۰/۲۰cm^{۳}$$

در این محاسبه از جدول ۴ــ۲ برای ضریب انبساط حجمی گلیسیرین استفاده کرده‌ایم؛ چون افزایش حجم گلیسیرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسیرین از ظرف سرریز می‌شود.

ب) حجم گلیسیرین سرریز شده برابر است با

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (۳/۹cm^{۳} - ۰/۲۰cm^{۳}) = ۳/۷cm^{۳}$$

فعالیت ۴ــ۵

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با آن بتوانید حجم گلیسیرین سرریز شده در مثال ۴ــ۴ را اندازه بگیرید. سپس از روی آن، ضریب انبساط حجمی گلیسیرین را تعیین کنید.

تمرین ۴ــ۴

افزایش دما که به طور معمول موجب افزایش حجم اجسام می‌شود، بر جرم آنها تأثیری ندارد. به همین دلیل انتظار داریم که چگالی اجسام با افزایش دما کاهش یابد. رابطهٔ چگالی با تغییر دما به صورت $\rho_{۲} = \rho_{۱}/(۱+\beta\Delta T)$ است که در آن $\rho_{۱}$ و $\rho_{۲}$ به ترتیب چگالی ماده در دماهای $T_{۱}$ و $T_{۲}$، β ضریب انبساط حجمی و $\Delta T = T_{۲} - T_{۱}$ است.

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

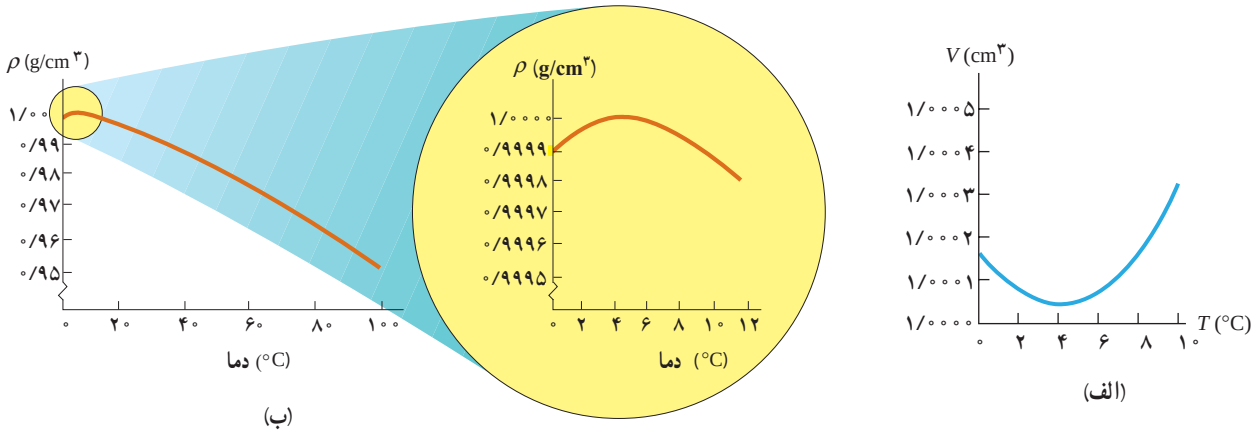
ب) نشان دهید با تقریب مناسبی می‌توان چگالی جسم را از رابطهٔ $\rho_{۲} = \rho_{۱}(۱-\beta\Delta T)$ نیز به دست آورد.

مثال ۴ــ۵

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

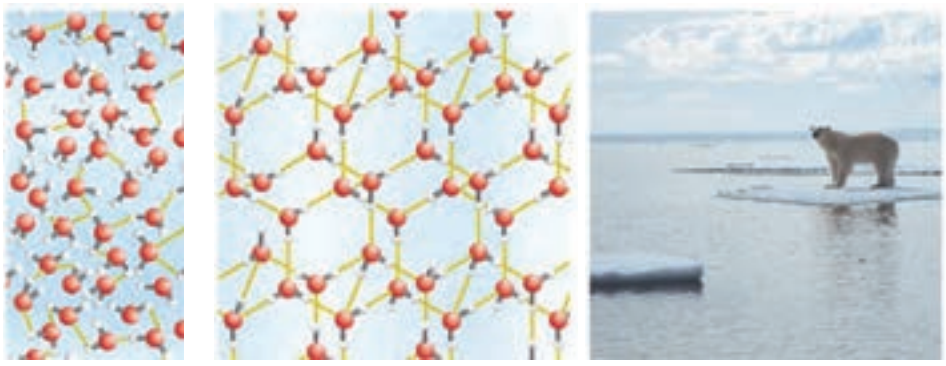
$$\rho_{۲} = \rho_{۱}(۱-\beta\Delta T) \Rightarrow \frac{\rho_{۲}}{\rho_{۱}} = (۱-۳\alpha\Delta T) = ۱ - (۳ \times ۲۹ \times ۱۰^{-۶}/^{\circ}C)(۲۰۰^{\circ}C) = ۰/۹۸$$

انبساط غیرعادی آب : در زمستان‌های سرد، سطح آب آبگیرها و دریاچه‌های کوچک یخ می‌زند و به تدریج یخ ضخیم‌تر می‌شود؛ اما در ته آبگیرها، دمای آب بالاتر از $0^\circ C$ بوده و برای موجودات زنده‌ای که آنجا زندگی می‌کنند، نسبتاً گرم و مناسب است. در واقع حجم بیشتر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش و در نتیجه چگالی آنها افزایش می یابد، ولی رفتار آب در محدودهٔ دمایی $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ متفاوت است؛ یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴ــ۱۴ (الف) و (ب)، به ترتیب نمودار حجم برحسب دما و نمودار چگالی برحسب دما را برای آب شیرین نشان می‌دهد که در آنها رفتار غیرعادی آب در محدودهٔ $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ دیده می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، دربازهٔ دمایی $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ با افزایش دما، حجم آب کاهش و چگالی آن افزایش می‌یابد. پس از دمای $4^\circ C$ مانند دیگر اجسام، با افزایش دما، حجم افزایش و چگالی کاهش می‌یابد. همین تغییر حجم غیرعادی آب است که موجب می‌شود دریاچه‌ها به جای اینکه از پایین به بالا یخ بزنند، از بالا یخ بزنند. وقتی دمای سطح آب مثلاً از $10^\circ C$ اندکی کمتر شود، چگالی آب نسبت به آب زیر خود افزایش می‌یابد و این آب، پایین می‌رود. این رفتار تا رسیدن به دمای $4^\circ C$ ادامه می‌یابد؛ ولی همان‌طور که دیدیم در دمای پایین‌تر از $4^\circ C$، حجم آب افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد؛ یعنی سرد شدن بیشتر آب موجب می‌شود که چگالی آب سطح دریاچه نسبت به آب زیر آن کمتر شود و در نتیجه در سطح باقی بماند تا اینکه یخ بزند (شکل ۴ــ۱۵ــ الف). بنابراین، در حالی که آب زیر دریاچه هنوز مایع است و دمایی بیش از صفر درجه دارد، سطح آب یخ می‌زند. اگر آب دریاچه‌ها از پایین به بالا یخ می‌زد، اثرات زیست‌محیطی زیانباری در پی داشت و حیات گیاهی و جانوری در عمق دریاچه‌ها از بین می‌رفت.



شکل ۴ــ۱۴ (الف) تغییرات حجم یک گرم آب (شیرین) با دما، (ب) تغییرات چگالی آب (شیرین) با دما

رفتار شگفت‌انگیز آب را می‌توان با ساختار مولکول‌های آن در یخ توضیح داد. مولکول‌های آب در یخ شبکه‌ای بلوری تشکیل می‌دهند، به‌طوری که مولکول‌ها در بعضی نواحی خیلی به هم نزدیک‌اند و در نواحی دیگر، بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۴ــ۱۵ــ ب). وقتی آب از یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، ساختار شبکهٔ بلوری درهم می‌شکند و آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد (شکل ۴ــ۱۵ــ پ). در محدودهٔ دماهای $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ بقایای ساختار مولکولی یخ هنوز در آب وجود دارد و موجب رفتار غیرعادی آب می‌شود.



(پ) (ب) (الف)

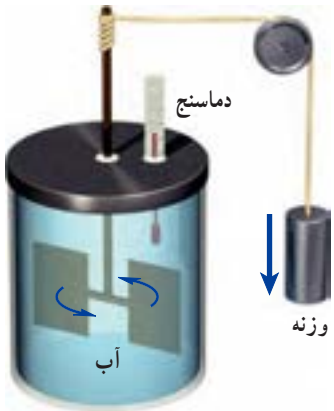
شکل ۴ــ۱۵ (الف) آب در حالت مایع چگال‌تر از یخ است و در نتیجه یخ بر روی آب شناور می‌ماند. (ب) مولکول‌های آب در یخ تشکیل یک شبکهٔ بلوری می‌دهند. (پ) آب در حالت مایع تشکیل شبکهٔ بلوری نمی‌دهد.

فعالیت ۴ــ۶

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

۴ــ۳ گرما

همان طور که در درس علوم دورهٔ اوّل متوسطه دیدید، اگر آب خیلی سرد را در لیوان بریزیم و سپس این لیوان را روی میز اتاق بگذاریم، آب گرم می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. به همین ترتیب، اگر آب داغ را در لیوان بریزیم و لیوان را روی میز بگذاریم، آب خنک می‌شود تا اینکه به دمای هوای اتاق برسد. این گرم‌تر یا سردتر شدن در ابتدا به‌سرعت رخ می‌دهد و سپس با آهنگ کندتری ادامه می‌یابد تا اینکه دمای آب با دمای اتاق یکسان گردد. در این حالت که آب، لیوان و هوای اتاق در دمای یکسانی هستند، اصطلاحاً می‌گوییم تعادل گرمایی حاصل شده است. تا پیش از قرن نوزدهم، چنین مشاهداتی را با پذیرفتن موجودی به نام کالریک توجیه می‌کردند. به عبارتی فرض می‌کردند که چیزی به نام کالریک از جسم گرم به جسم سرد جریان می‌یابد. اما کنت رامفورد[۱] (۱۷۵۳ تا ۱۸۱۴م) و جیمز پرسکات ژول[۲] (۱۸۱۸ تا ۱۸۸۹م) در پی آزمایش‌های هوشمندانه‌ای که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ــ۱۶ نشان داده شده است، دریافتند آنچه که در چنین فرایندهایی رُخ می‌دهد، چیزی جز انتقال انرژی نیست. مثلاً در مثال آب داغ، انتقال انرژی از آب به محیط پیرامون، سبب کاهش دمای آب می‌شود. در حالت کلی هرگاه جسمی با دمای بیشتر در تماس گرمایی با جسمی با دمای کمتر قرار گیرد، بر اثر اختلاف دمای دو جسم، انرژی از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می شود. به این انرژی انتقال یافته بر اثر اختلاف دمای دو جسم، گرما گفته می‌شود.



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

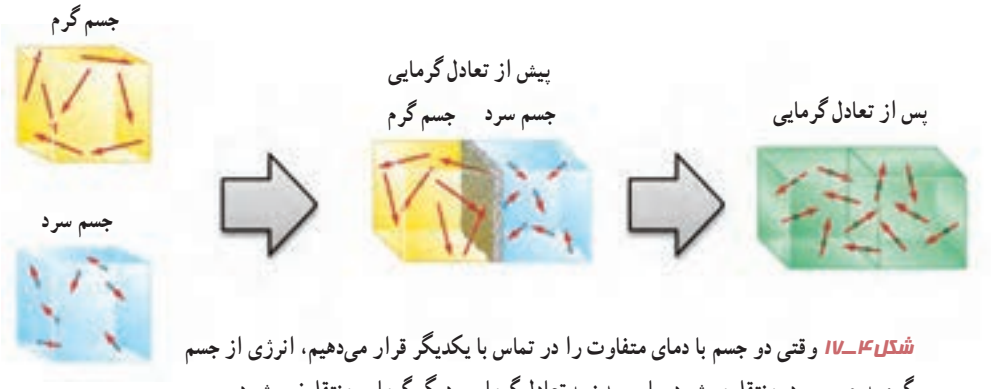
توجه کنید اشاره کردن به گرمای موجود در یک جسم اشتباه است. گرما مربوط به انرژی درحال گذار است؛ بنابراین، عبارت‌هایی مانند گرمای یک جسم، نادرست است. گرما را با نماد Q نشان می‌دهند. چون گرما، انرژی انتقال یافته است، پس باید همان یکای انرژی (ژول) را داشته باشد. یکای دیگر گرما،

۱ــ Sir Benjamin Thomson, Count Rumford

۲ــ James Prescott Joule

کالری[1] است که در موارد خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

وقتی دو جسم سرد و گرم در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، از دیدگاه میکروسکوپی، آنچه که اتفاق می‌افتد کاهش انرژی‌های 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 ۴ــ۱۷).



شکل ۴ــ۱۷ وقتی دو جسم با دمای متفاوت را در تماس با یکدیگر قرار می‌دهیم، انرژی از جسم گرم به جسم سرد، منتقل می‌شود. با رسیدن به تعادل گرمایی، دیگر گرمایی منتقل نمی شود.

پرسش ۴ــ۲

الف) منظور از این جمله که «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 کدام‌یک از آنها بیشتر از دمای هوای اتاق است؟ دمای کدام‌یک کمتر از دمای هوای اتاق است؟

پ) در شکل ۴ــ۱۷ میانگین انرژی جنبشی ذرات دو جسم چگونه تغییر کرده است؟

ظرفیت گرمایی : اگر یک پارچ آب سرد را از داخل یخچال بیرون آوریم و در اتاق قرار دهیم، آب از محیط خود، گرما می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود. آزمایش نشان می‌دهد که گرمای گرفته‌شده توسط آب با تغییر دمای آب، متناسب است؛ یعنی هرچه آب سردتر باشد، مقدار گرمایی که می‌گیرد تا دمایش با دمای اتاق یکی شود، بیشتر است. بنابراین، اگر جسمی با محیط اطراف خود گرمای Q را مبادله کند و در اثر این مبادلهٔ گرما، دمایش به اندازهٔ ΔT تغییر کند، Q متناسب با ΔT است که ضریب این تناسب را با C نشان می‌دهند، به‌طوری‌که :

$$Q = C\,\Delta T \qquad (۴ــ۶)$$

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

۱ــ ۱ cal=۴/۱۸۶۰ J

وقتی می‌گوییم ظرفیت گرمایی یک جسم J/K ۲۰۰۰ است، یعنی اگر به آن جسم J ۲۰۰۰ گرما بدهیم، دمای آن ۱K افزایش پیدا می‌کند. توجه کنید که منظور از ظرفیت، این نیست که جسم، توانایی محدودی در مبادلهٔ گرما دارد؛ بلکه تا وقتی که اختلاف دما باشد، مبادلهٔ گرما ادامه می‌یابد. مقادیر زیاد آب، مانند آب دریاچه‌ها و دریاها، نوسان‌های دمای هوای اطراف خود را متعادل می‌کند؛ زیرا اگر مقدار آب زیاد باشد، می‌تواند گرمای زیادی از محیط بگیرد یا اینکه به محیط بدهد، بی‌آنکه دمای خودش تغییر محسوسی بکند (شکل ۴ــ۱۸).

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

گرمای ویژه : تجربه نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی اجسامی که از یک نوع مادّه ساخته شده‌اند متناسب با جرم آنهاست. بنابراین، مناسب‌تر آن است که ظرفیت گرمایی واحد جرم اجسام را تعریف کنیم که به آن ظرفیت گرمایی ویژه یا به سادگی **گرمای ویژه** می‌گویند. گرمای ویژه هر جسم، مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از آن جسم داده شود تا دمای آن یک درجهٔ سلسیوس (یا یک کلوین) افزایش یابد. گرمای ویژه را با c نشان می‌دهند و طبق تعریف، رابطه‌اش با ظرفیت گرمایی به صورت $c = C/m$ است. در نتیجه رابطهٔ ۴ــ۶ چنین می‌شود :

$$Q = mc\Delta T \qquad (۴ــ۷)$$

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

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

جدول ۴ــ۳ ــ گرماهای ویژهٔ برخی از مواد *

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

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

مثال ۴ــ۶

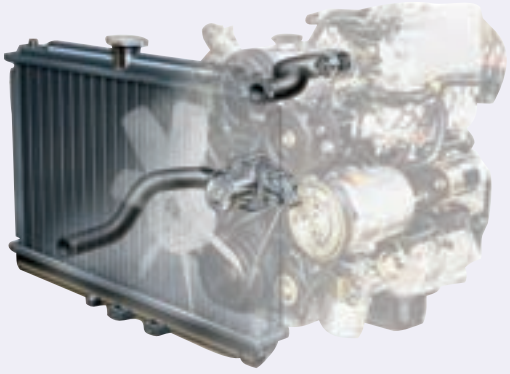
مقدار ۲/۰ L آب با دمای ۲۰ °C در اختیار داریم. چقدر گرما لازم است تا دمای این آب را به نقطهٔ جوش آن (در دمای ۱۰۰ °C) برسانیم؟

پاسخ : براساس چگالی آب، جرم ۱/۰ L آب برابر ۱/۰ kg است و از جدول ۴ــ۳ گرمای ویژهٔ آب ۴۱۸۷ J/kg.°C است. بنابراین، گرمای لازم برای گرم کردن ۲/۰ kg آب، از ۲۰ °C تا نقطهٔ جوش آب، برابر است با

$$Q = m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}}\, \Delta T = (۲/۰\,\text{kg})(۴۱۸۷\,\text{J/kg.}^{\circ}\text{C})(۱۰۰\,^{\circ}\text{C} - ۲۰\,^{\circ}\text{C}) = ۶/۷ \times ۱۰^{۵}\,\text{J}$$

فناوری و کاربرد

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



شکل ۴ــ۱۹ تصویری از سیستم خنک‌کنندهٔ خودرو

پرسش ۴ــ۳

چند گوی فلزی از جنس‌های مختلف، مثلاً از آلومینیم، فولاد، برنج، مس، سرب و ...، را اختیار می‌کنیم که همگی جرم یکسانی داشته باشند. گوی‌ها را توسط ریسمان‌هایی داخل ظرف آبی قرار می‌دهیم که آب آن درحال جوشیدن است و پس از مدتی گوی‌ها را بیرون آورده و آنها را روی یک ورقهٔ پارافین قرار می‌دهیم. به‌نظر شما کدام گوی، پارافین بیشتری را ذوب می‌کند و علت آن چیست؟ این آزمایش را نخستین بار فیزیک‌دان ایرلندی، جان تیندال[۱] (۱۸۹۳ــ۱۸۲۰م.) طراحی و اجرا کرد.

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

۱ــ John Tyndall

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

مول و عدد آووگادرو : همان‌طور که در فصل ۱ 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 $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ از واحد سازندهٔ آن ماده است که به آن عدد آووگادرو گفته می‌شود؛ مثلاً یک مول آلومینیم به معنای $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ اتم آلومینیم است و یک مول آب به معنای $۶/۰۲ \times ۱۰^{۲۳}$ 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 :

$$n = \frac{m}{M} \qquad (۸ــ۴)$$

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

مثال ۴ــ۷

شکل روبه‌رو، قطعه‌ای از الماس را نشان می‌دهد که از اتم‌های کربن درست شده است. جرم این الماس ۴۴/۵ قیراط است. یک قیراط معادل با ۰/۲۰۰ g است. چه تعداد اتم کربن در این الماس وجود دارد؟ جرم مولی کربن ۱۲/۰۱۱ g/mol است.

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

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

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

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

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

گرمای ویژهٔ مولی : وقتی مقدار ماده به جای جرم برحسب مول بیان شود باید به‌جای ظرفیت گرمایی واحد جرم از ظرفیت گرمایی واحد مول (C/n) استفاده کنیم که به آن ظرفیت گرمایی مولی یا **گرمای ویژهٔ مولی** گفته می‌شود. در واقع گرمای ویژه مولی یک ماده، مقدار گرمایی است که باید به یک مول از آن ماده بدهیم تا در شرایط فیزیکی تعیین شده، دمای آن ۱K افزایش یابد (با این کمیت در فصل ۵ بیشتر آشنا خواهیم شد).

اگر گرمای ویژهٔ مولی مواد بلورین مختلف را با هم مقایسه کنیم (در حجم ثابت)، به نظم شگفت‌انگیزی پی‌می‌بریم و درمی‌یابیم برای بیشتر فلزها، مقدار آن تقریباً مساوی با $۲۵\ \text{J/mol.K}$ است[۱]. این نظم با آنکه تقریبی است به نام قاعدهٔ «دولن و پتی[۲]» مشهور است که بیان می‌دارد گرمای لازم برای بالا بردن دمای یک مول از هر کدام از این فلزها، مقدار یکسانی است و به جنس آنها بستگی ندارد.

۱ــ محدودهٔ دمایی برای فلزات مختلف، متفاوت است. مثلاً برای مس از ۵۰۰ تا ۷۰۰ کلوین است.

۲ــ Rule of Dulong–Petit

دمای تعادل : اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرارگیرند ، پس از مدتی هم‌دما می‌شوند، یعنی دمای آنها به مقدار یکسانی می‌رسد. به این دما، **دمای تعادل** می‌گویندکه می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی، آن را محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند و بقیهٔ اجسام گرما می‌گیرند. بنا به قرارداد علامت Q برای اجسامی که گرما می‌گیرند مثبت ($Q > 0$) و برای اجسامی که گرما می‌دهند منفی ($Q < 0$) اختیار می‌شود؛ مثلاً از رابطهٔ (۴ ــ۷) نیز درمی‌یابیم که با افزایش دما، مقدار مثبتی برای Q به‌دست می‌آید و با کاهش دما، مقداری منفی برای Q به‌دست می‌آید. بنا به قانون پایستگی انرژی، همان‌قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند، پس جمع جبری این Qها صفر می‌شود :

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

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

$$m_1 c_1(\theta - \theta_1) + m_2 c_2(\theta - \theta_2) + m_3 c_3(\theta - \theta_3) + \ldots = 0 \qquad (۴ــ ۱۰)$$

مثال ۴ــ ۸

شخصی $0/30\,kg$ آب $70^\circ C$ را در یک لیوان آلومینیمی ۰/۱۲ کیلوگرمی که دمای آن $20^\circ C$ است می‌ریزد. دمای نهایی پس از آنکه آب و لیوان به تعادل گرمایی برسند چقدر است؟ فرض کنید هیچ گرمایی با محیط مبادله نمی‌شود.

پاسخ : با توجه به اینکه هیچ مبادلهٔ گرمایی با محیط نداریم، با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۹ داریم :

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

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

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

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

$$(0/300\,kg)(4187\,J/kg.^\circ C)(\theta - 70^\circ C) + (0/12\,kg)(9/0\times 10^2\,J/kg.^\circ C)(\theta - 20^\circ C) = 0$$

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

از معادلهٔ ۴ــ ۱۰ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژهٔ یک جسم نیز استفاده کنیم.

مثال ۴ــ۹

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

پاسخ : دمای تعادل ۲۲/۰°C است و نیز با استفاده از سایرداده‌های این مثال و جدول ۴ــ۳ داریم :

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

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

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

اکنون با استفاده از رابطهٔ ۴ــ ۱۰ خواهیم داشت :

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

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

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

تمرین ۴ــ۵

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

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

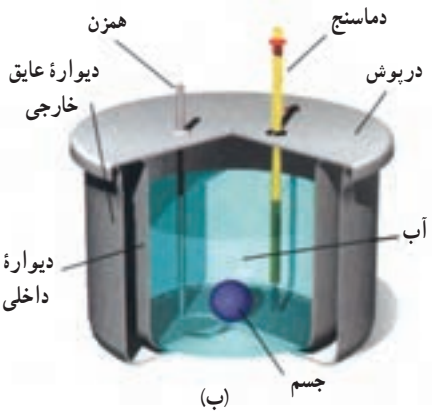
با استفاده از رابطه‌های (۴ــ ۹) و (۴ــ ۱۰) و با چشم‌پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادلهٔ گرما داریم :

$$Q_{آب}+Q_{جسم}+Q_{ظرف}=0$$

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

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

(الف)



(ب)

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

مثال ۴ــ ۱۰

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

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

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

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

اکنون با جای گذاری مقادیر خواهیم داشت :

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

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

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

آزمایش ۴ــ ۲

هدف : تعیین گرمای ویژهٔ فلزی با جنس نامعین

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

شرح آزمایش :

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

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

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

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

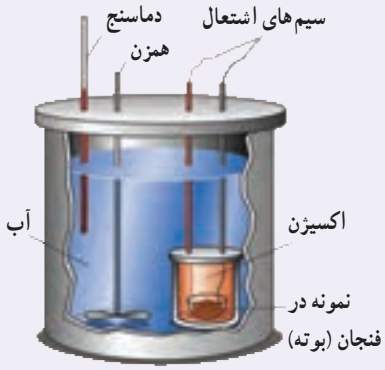
۵ــ جسم داغ شده را توسط انبر به سرعت درون گرماسنج بیندازید.

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

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

فناوری و کاربرد

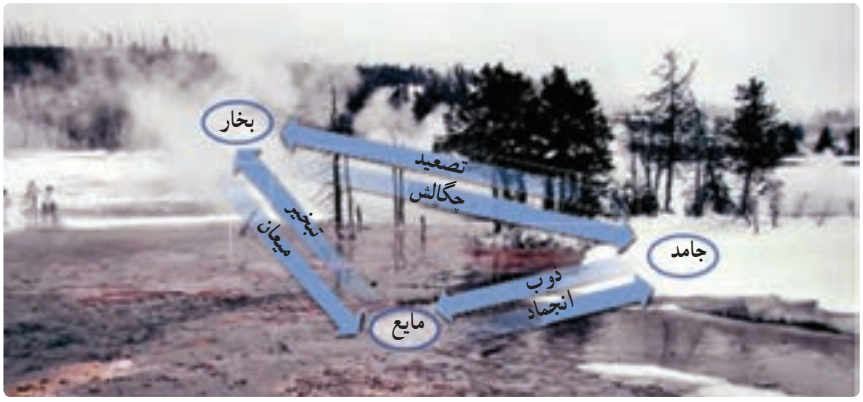
گرماسنج بمبی[1] : گرماسنج بمبی نوعی گرماسنج است که از آن برای تعیین ارزش غذایی مواد با اندازه‌گیری انرژی آزاد شدهٔ آنها در حین سوختن استفاده می‌شود. نمونه‌ای که جرم آن به دقت اندازه‌گیری شده است در ظرف سربسته‌ای که محتوی اکسیژن است (که اصطلاحاً به آن بمب گفته می‌شود) قرار داده می‌شود (شکل ۴ــ۲۲). سپس این محفظه در آب یک گرماسنج قرار داده می‌شود و توسط جریان الکتریکی عبوری از یک سیم نازک، نمونهٔ داخل آن سوزانده می‌شود. با اندازه‌گیری تغییر دمای آب، انرژی حاصل از احتراق مادهٔ موردنظر را به دست می‌آورند که تقریباً معادل انرژی آزادشده از آن ماده است.



شکل ۴ــ۲۲ اجزای یک گرماسنج بمبی

۴ــ۴ تغییر حالت‌های ماده

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، موادی که در اطراف ما وجود دارند معمولاً در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز (بخار[2]) یافت می‌شوند. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. برای مثال در شکل ۴ــ۲۳ انواع تغییر حالت‌هایی که برای سه حالت آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه‌اند.



شکل ۴ــ۲۳ تغییر حالت‌های مختلف آب که به‌طور هم‌زمان در این تصویر واقعی مشاهده می‌شود.

تبدیل جامد به مایع را ذوب، تبدیل مایع به بخار را تبخیر و تبدیل مایع به جامد را انجماد و تبدیل بخار به مایع را چگالش بخار به مایع یا میعان می‌نامیم. امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم و بدون گذر از حالت مایع صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، تصعید و تغییر حالت وارون آن، یعنی از بخار به جامد چگالش بخار به جامد گفته می‌شود. برای مثال، نفتالین در دمای اتاق به طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود، یا در صبح‌های بسیار سرد زمستان، برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشهٔ پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است.

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

۱ــ Bomb Calorimeter

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

تغییر حالت جامد ــ مایع : دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرما دادن را برای جامدهای خالص و بلورین ادامه دهیم، وقتی دمای جسم به مقدار مشخصی برسد، افزایش دما متوقف می‌شود و دما ثابت باقی می‌ماند. در این حالت، جسم شروع به ذوب شدن می‌کند و به مایع تبدیل می‌شود. این دمای ثابت را **نقطهٔ ذوب** یا دمای گذار جامد به مایع می‌نامند، که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد. به استثنای چند مورد خاص، حجم جامدهای بلوری هنگام ذوب شدن افزایش می‌یابد؛ زیرا حجمی که بلور با آرایش منظم مولکول‌ها در حالت جامد اشغال می‌کند، نسبت به این حجم در حالت مایع که آرایش مولکولی نامنظمی دارد، کمتر است.

برخلاف جامدهای خالص و بلورین، جامدهای بی‌شکل مانند شیشه و جامدهای ناخالصی مانند قیر نقطهٔ ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع وقتی این مواد را گرم می‌کنیم، پیش از ذوب شدن خمیری‌شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به‌تدریج ذوب می‌شوند.

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

فعالیت ۴ــ۷

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

در نقطهٔ سه‌گانهٔ آب، سه فاز آب در تعادل‌اند.

عمل ذوب، فرایندی گرماگیر است؛ یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود، زیرا مولکول‌های جامد باید از ساختار صلب قبلی خود رها شوند. این گرما، دمای جسم را تغییر نمی‌دهد؛ بلکه سبب تغییر حالت آن می‌شود. ذوب شدن یک قالب یخ و تبدیل آن به آب (شکل ۴ــ۲۴) مثالی مشهور از این دست است.

شکل ۴ــ۲۴ تصویری از یخ در حال ذوب

فعالیت ۴ــ۸

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

خوب است بدانید

اسپری کردن باغ های میوه : گاهی اوقات گیاهان را با آب اسپری می‌کنند تا آنها را از یخ زدن در سرمایی سخت محافظت کنند. این محافظت ناشی از لایهٔ یخی نیست که روی گیاه تشکیل می‌شود. این محافظت ناشی از فرایندهایی است که پس از نشستن آب روی گیاه رخ می‌دهند؛ یعنی فرایندهایی که در آنها آب تا نقطهٔ انجماد سرد می‌شود و سپس یخ می‌بندد. لازمهٔ هر دو فرایند این است که آب به گیاه گرما بدهد. انرژی که به گیاه و سپس به هوا منتقل می‌شود می‌تواند دمای باغ را بین $-۲^{\circ}C$ تا $۰^{\circ}C$ حفظ کند که این موجب بقای گیاهان می‌شود. باغبان از روی یخ تشکیل شده روی گیاهان می‌تواند بگوید که آیا اسپری کردن به گیاهان کمک کرده یا مضر بوده است. اگر اسپری کردن به‌درستی انجام شده باشد، قطرات پیش از یخ زدن روی گیاهان پخش می‌شوند و لایه‌ای شفاف درست می‌کنند. در غیر این صورت، تک تک قطراتی که به‌طور جزئی یخ زده‌اند، لایهٔ یخی غیر شفاف درست می‌کنند. به همین دلیل باغبان‌ها در طول شب، مدام شفافیت یخ روی گیاهان را بررسی می‌کنند.

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

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

انجماد یک مایع و تبدیل آن به یک جامد، عکس فرایند ذوب شدن است و لازمهٔ این فرایند گرفتن گرما از مایع است تا مولکول‌ها بتوانند در یک ساختار جدید قرار گیرند. در اینجا نیز تغییر حالت بدون تغییر دما رخ می‌دهد. گرمای منتقل‌شده برای تغییر حالت جسم از جامد به مایع یا از مایع به جامد، با جرم جسم نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم جسم را گرمای نهان ویژهٔ ذوب می‌گویند که به‌اختصار آن را گرمای نهان ذوب می‌نامیم و آن را با L_F نشان می‌دهیم[۱] .

$$L_F = \frac{Q}{m} \qquad (۴ــ۱۱)$$

گرمای نهان ذوب بستگی به جنس جسم دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. بنابراین، وقتی نمونه‌ای به جرم m کاملاً تغییر فاز دهد گرمای منتقل شده برابر با $Q = mL_F$ است.

وقتی تغییر فاز از جامد به مایع انجام می‌شود، جسم گرما می‌گیرد ($Q>۰$) :

$$Q = +mL_F$$

و اگر تغییر فاز از مایع به جامدانجام شود، جسم گرما از دست می‌دهد ($Q<۰$) :

$$Q = -mL_F$$

گرمای نهان ذوب و نقطهٔ ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقدارها برای برخی از مواد در جدول ۴ــ۴ داده شده است.

۱ــ اندیس F حرف اول واژهٔ انگلیسی «Fusion» است که پیشتر به معنای ذوب به کار می‌رفت. با اینکه هم‌اکنون از واژه «melting» برای ذوب استفاده می‌شود، همچنان از F برای نشان دادن ذوب استفاده می‌گردد.

فعالیت ۴ـ۹

تحقیق کنید وجود ناخالصی در مایع چه تأثیری بر نقطهٔ انجماد آن دارد.

مثال ۴ـ۱۱

فلز گالیم (Ga) یکی از چند عنصری است که در دماهای پایین ذوب می‌شود. دمای ذوب این فلز $29/8^{\circ}C$ و گرمای نهان ذوب آن $80/4\ kJ/kg$ است. یک قطعهٔ ۱۰/۰ گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطهٔ ذوب خود به طور کامل ذوب شود؟ (از تبادل گرما بین فلز و هوای محیط چشم‌پوشی می‌شود.)

پاسخ : با استفاده از رابطه ۴ـ۱۱ داریم :

$$Q = mL_F = (10/0\times10^{-3}kg)(80/4\times10^{3}J/kg) = 804J$$

مثال ۴ـ۱۲

یک جواهرساز برای ساختن جواهری می‌خواهد از $0/500\ kg$ نقره برای ریختن در قالب‌های جواهر استفاده کند. به این منظور او باید نقره را ذوب کند. اگر دمای اولیهٔ نقره همان دمای اتاق و برابر $20^{\circ}C$ باشد، چقدر گرما باید به این مقدار نقره داده شود؟

پاسخ : مرحله‌های این فرایند به‌طور طرح‌وار در شکل زیر رسم شده است.

$0/500\ kg$ نقره $20^{\circ}C$	Q_1	$0/500\ kg$ نقره در نقطهٔ ذوب $960^{\circ}C$	Q_2	$0/500\ kg$ نقرهٔ مذاب $960^{\circ}C$

که در آن

$$Q_1 = m_{\text{نقره}}\, c_{\text{نقره}}\, \Delta\theta = (0/500\,kg)(236J/kg.^{\circ}C)(960^{\circ}C-20^{\circ}C) = 1/11\times10^{5}J$$

$$Q_2 = m_{\text{نقره}}\, L_F = (0/500\,kg)(88/3kJ/kg) = 0/442\times10^{5}J$$

که در آن از گرمای ویژه و گرمای نهان ذوب نقره مندرج در جدول‌های ۴ـ۳ و ۴ـ۴ استفاده کردیم. اکنون گرمای کل با جمع کردن Q_1 و Q_2 به‌دست می‌آید :

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1/11\times10^{5}J + 0/442\times10^{5}J = 1/55\times10^{5}J = 155kJ$$

آزمایش ۴ـ۳

هدف : تعیین گرمای نهان ذوب یخ

وسیله‌های موردنیاز : بشر شیشه‌ای با حجم $400\ cm^3$، چراغ گازی، سه پایه، توری نسوز، ترازو، مقداری مخلوط آب و یخ، گرماسنج با ظرفیت گرمایی معلوم و دماسنج.

شرح آزمایش :

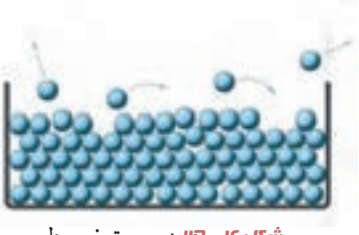
۱ــ ۲۰۰ cc آب در بشر بریزید و آن را روی سه‌پایه قرار دهید. چراغ گاز را روشن کنید تا دمای آب دست‌کم به ۶۰ °C برسد.

۲ــ آب گرم را درون گرماسنج بریزید و پس از مدتی دمای تعادل آب و گرماسنج را با دماسنج اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۳ــ قطعه یخی به جرم تقریبی ۰/۰۵۰ kg را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای ۰/۰ °C) بیرون آورده و جرم آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید.

۴ــ یخ را درون گرماسنج بیندازید و صبر کنید تا کاملاً ذوب شود. اینک دمای تعادل را اندازه بگیرید.

۵ــ با استفاده از اعداد به‌دست آمده، گرمای ذوب یخ (L_F) را حساب کنید.



شکل ۴ــ۲۵ در حین تبخیر سطحی، مولکول‌های پرانرژی‌تر از سطح مایع می‌گریزند.

تغییر حالت مایع ــ بخار : دیدیم که به تبدیل مایع به بخار تبخیر[1] می‌گویند. خشک شدن لباس خیسی که روی بند رخت آویخته شده است، یا خشک شدن سریع یک زمین خیس در هوای گرم تابستان مثال‌هایی از نوعی تبخیر هستند که به آن **تبخیر سطحی**[2] گفته می‌شود. تا پیش از رسیدن به نقطهٔ جوش مایع، تبخیر به‌طور پیوسته‌ای از سطح مایع رخ می‌دهد. در پدیدهٔ تبخیر سطحی، تندی برخی از مولکول‌های مایع به حدّی می‌رسد که می‌توانند از سطح مایع فرار کنند (شکل ۴ــ ۲۵). تجربه نشان می‌دهد آهنگ رخ دادن این فرایند به عواملی از جمله دما و مساحت سطح مایع بستگی دارد.

فعالیت ۴ــ ۱۰

الف) بررسی کنید از دیدگاه مولکولی، افزایش دما و افزایش مساحت سطح مایع چگونه بر آهنگ تبخیر سطحی مایع اثر می‌گذارد؟

ب) با بررسی تبخیر سطحی در شرایط مختلف سعی کنید از راه تجربه، عامل یا عامل‌های دیگری را پیدا کنید که بر آهنگ تبخیر سطحی مؤثر باشند.

پ) تحقیق کنید کوزه‌های سفالی چگونه می‌توانند آب داخل خود را خنک کنند.

خوب است بدانید

تعریق و تنظیم دمای بدن : برای جانوران بزرگ جثه، نسبت مساحت سطح بدن ــ که از آن گرما تلف می‌شود ــ به حجم داخلی بدن ــ که در آن گرما تولید می‌شود ــ نسبتاً کم است. بنابراین، آنها غالباً دستگاه‌های ویژه‌ای برای خلاص شدن از این گرمای ناخواسته دارند؛ مثلاً سگ‌ها با نفس‌نفس زدن و خرگوش کوهی که در تصویر نشان داده شده است، با فرستادن خون به گوش‌های نازک، بزرگ و پر از مویرگ خود این گرمای ناخواسته را از دست می‌دهند. بدن انسان‌ها به‌گونه‌ای دیگر عمل می‌کند و با عرق کردن گرما از دست می‌دهد. در واقع عرق کردن سبب می‌شود که لایهٔ آبی روی پوست بدن تشکیل شود. این لایهٔ آب با جذب گرمای مورد نیاز برای تبخیر سطحی از بدن، بدن را خنک می‌کند.

۱ــ Vaporization ۲ــ Evaporation

شکل ۴ــ۲۶ در هنگام جوشیدن، حباب‌ها از محل تشکیل خود به سمت سطح آزاد مایع بالا می‌روند.

وقتی مایعی را روی اجاقی قرار می‌دهیم، با گرم کردن مایع به دمای مشخصی می‌رسیم که در آن حباب‌های گاز از درون مایع بالا می‌آیند، که نشانه‌ای از آغاز فرایندی موسوم به جوشیدن[1] است. به این دمای مشخص، نقطهٔ جوش می‌گویند. در مورد آب، به محض اینکه حباب‌ها بالا می‌آیند به آب کمی سردتر می‌رسند و پیش از رسیدن به سطح آزاد آب با صدای تیزی فرومی‌پاشند و در آنجا دوباره به مایع تبدیل می‌شوند. ولی وقتی دمای آب همچنان بالا برود، حباب‌ها می‌توانند بیشتر بالا بروند تا اینکه سرانجام به سطح آزاد آب می‌رسند و در آنجا با صدای دیگری که به آن «غلغل کردن» می‌گویند فرو می‌پاشند (شکل ۴ــ۲۶). در این حالت است که می‌گوییم آب به «جوش کامل» رسیده است و آهنگ تبخیر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دماسنجی که مخزن آن درون آب قرار دارد دمای ثابتی را نشان می‌دهد که برای آب خالص در فشارجوّ متعارف (۱atm)، ۱۰۰°C است. در جوشیدن، کلّ مایع در فرایند تبخیر شرکت می‌کند. به فرایند تبخیر تا پیش از رسیدن به نقطهٔ جوش، تبخیر سطحی و به فرایند تبخیر در نقطهٔ جوش، اصطلاحاً جوشیدن می‌گویند، در حالی‌که هر دو فرایند، تبخیرند.

فعالیت ۴ــ۱۱

از تفاوت نقطهٔ جوش اجسام مختلف در صنعت، استفادهٔ زیادی می‌شود. تحقیق کنید چگونه از این ویژگی برای جدا کردن محصولات نفتی استفاده می‌شود؟

تجربه نشان می‌دهد که گرمای منتقل شده برای تبخیر هر مایع با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم مایع بخار شده را گرمای نهان ویژه تبخیر می‌نامیم که برای سادگی گرمای نهان تبخیر نامیده می‌شود و آن را با L_V[2] نشان می‌دهیم.

$$L_V = \frac{Q}{m} \qquad (۴ــ۱۲)$$

گرمای نهان تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. جدول ۴ــ۵ برخی از مقدارهای L_V را نشان می‌دهد که به طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به دست آمده است.

جدول ۴ــ۵ مقادیر L_V برای آب در دماهای مختلف*

دما (°C)	L_V (kJ/kg)
۰	۲۴۹۰
۱۵	۲۴۵۴
۵۰	۲۳۷۴
۱۰۰	۲۲۵۶
۱۵۰	۲۱۱۵
۲۰۰	۱۹۴۰

* مقادیر تا ۱۰۰°C در فشار ۱atm است.

پرسش ۴ــ۴

چرا در جدول ۴ــ۵ گرمای نهان تبخیر آب با افزایش دمای آن کاهش می‌یابد؟

۱ــ Boiling

۲ــ زیرنویس V حرف اول واژهٔ انگلیسی Vaporization به معنای تبخیر است.

گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم m که گرمای تبخیر آن L_V است از رابطهٔ $Q = +mL_V$ به دست می‌آید. علامت مثبت نشان دهندهٔ آن است که مایع هنگام تبخیر گرما می‌گیرد.

جدول ۴ــ۶ نقطهٔ جوش و گرمای نهان تبخیر برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر

مادّه	نقطهٔ جوش ($^\circ C$)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیم	−۲۶۹	۲۱
هیدروژن	−۲۵۳	۴۶۰
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
گلیسیرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

مثال ۴ــ ۱۳

معمولاً وقتی هوا را با بخاری‌های شعله‌ای گرم می‌کنند، برای حفظ رطوبت محیط، ظرف آبی را روی بخاری می‌گذارند. اگر دمای آب در یکی از این ظرف‌ها روی $50^\circ C$ ثابت مانده باشد، تعیین کنید برای تبخیر $0/200\,kg$ از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۴ــ ۱۲ و استفاده از جدول ۴ــ ۵ داریم :

$$Q = +mL_V = +(0/200\,kg)(2374\times10^3\,J/kg) = 4/75\times10^5\,J$$

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای نهان تبخیر مایع در نقطهٔ جوش آن سروکار داریم و البته نقطهٔ جوش هر مایع به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطهٔ جوش آن می‌شود. جدول ۴ــ۶ نقطهٔ جوش و گرمای نهان تبخیر مربوط به این نقطه را برای برخی از مواد در فشار ۱ اتمسفر نشان می‌دهد.

خوب است بدانید

بادگیرها : 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 به‌داخل ساختمان می‌رود، در حالی که بقیهٔ 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 خنک‌شده از طریق کانال‌های دیگری از دهانه‌های پشت به بادِ بادگیر، بر اثر کاهش فشار در اطراف این دهانه‌ها، خارج می‌شود.

پرسش ۴ــ۵

الف) چرا غذا در دیگ زودپز، زودتر پخته می‌شود؟

ب) دلیل دیرتر پخته شدن تخم‌مرغ در ارتفاعات چیست؟ کوهنوردان برای رفع این مشکل چه کاری انجام می‌دهند؟

مثال ۴ــ۱۴

۲/۰ لیتر آب را درون یک کتری برقی با توان الکتریکی ۱/۵kW می‌ریزیم و آن را روشن می‌کنیم.

الف) از شروع جوشیدن تا تبخیر همهٔ آب درون کتری چقدر گرما به آب داده می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا این فرایند انجام شود؟ فرض کنید تمام انرژی الکتریکی تبدیل شده به انرژی گرمایی، به آب می‌رسد.

پاسخ :

الف) با توجه به رابطه ۴ــ ۱۲ و جدول ۴ــ ۶ داریم :

$$Q = mL_V = (۲/۰\,\text{kg})(۲۲۵۶\times۱۰^{۳}\,\text{J/kg}) = ۴/۵\times۱۰^{۶}\,\text{J}$$

ب) آن‌گاه با استفاده از رابطهٔ توان خواهیم داشت :

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{۴/۵\times۱۰^{۶}\,\text{J}}{۱/۵\times۱۰^{۳}\,\text{J/s}} = ۳/۰\times۱۰^{۳}\,\text{s} = ۵۰\,\text{min}$$

برای اندازه‌گیری گرمای نهان تبخیر در نقطهٔ جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش ۴ــ ۴ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

آزمایش ۴ــ۴

هدف : تعیین گرمای نهان تبخیر آب

وسیله‌های مورد نیاز : بشر ۲۰۰cc، دماسنج، سه‌پایه، توری، پایه و گیره، چراغ گاز، زمان‌سنج، آب و ترازو

شرح آزمایش :

۱ــ جرم بشر خالی را اندازه‌گیری کنید و مقدار معیّنی آب (مثلاً ۰/۲۰۰kg) در آن بریزید.

۲ــ توری را روی سه‌پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و بشر را روی توری قرار دهید.

۳ــ دماسنج را به کمک پایه و گیره طوری درون بشر قرار دهید تا مخزن آن کمی پایین‌تر از سطح آب باشد.

۴ــ در لحظه‌ای که دمای آب به $\theta_۱ = ۷۰^{\circ}\text{C}$ می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید ($t_۱ = ۰\,\text{s}$).

۵ــ صبر کنید تا آب به‌جوش آید. زمان ($t_۲$) و دما ($\theta_۲$) را ثبت کنید.

۶ــ با استفاده از رابطهٔ $P(t_۲-t_۱) = mc(\theta_۲-\theta_۱)$ و جای‌گذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب (P) را به‌دست آورید.

۷ــ گرما دادن را آن‌قدر ادامه دهید تا مقدار قابل ملاحظه‌ای از آب بخار شود (تذکر : در طول گرمادادن باید شرایط چراغ و بشر ثابت بماند تا توان گرمادهی چراغ به آب تغییر نکند).

۸ــ زمان ($t_۳$) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن کردن آن جرم آب بخار شده (m') را به‌دست آورید.

۹ــ گرمای تبخیر را با استفاده از رابطهٔ $P(t_۳-t_۲) = m'\,L_V$ به‌دست آورید.

تمرین ۴ــ۶

قطعه یخی به جرم ۱/۰kg و دمای اولیهٔ ۲۰°C− را آن قدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار ۱۰۰°C شود. کل گرمای مورد نیاز برای این تبدیل چند کیلو ژول است؟

تبدیل بخار به مایع نیز در طبیعت رخ می‌دهد و گاهی قطره‌های مایعی از بخار روی سطوح جامد تشکیل می‌شود. به این پدیده، **میعان** گفته می‌شود. در واقع میعان، وارون فرایند تبخیر است. بنابراین، بخار گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. گرمای مربوط به میعان مقداری بخار به جرم m و گرمای نهان تبخیر L_V از رابطهٔ $Q=-mL_V$ محاسبه می‌شود. علامت منفی نشان‌دهندهٔ آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد و باعث گرم شدن اجسام پیرامون خود می‌شود؛ مثلاً یکی از عواملی که موجب می‌شود در هوایی که رطوبت آن زیاد است، احساس گرمای بیشتری بکنیم، همین میعان بخار آب روی بدنمان است.

فعالیت ۴ــ۱۲

در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق کنید.

مثال ۴ــ۱۵

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی روی شیشهٔ پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره‌قطره می‌شود. اگر دمای شیشه حدود ۰°C باشد برای آنکه ۵۰g آب روی شیشه تشکیل شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

پاسخ : با استفاده از جدول ۴ــ۶ و رابطهٔ ۴ــ۱۲ داریم :

$$Q=-mL_V=-(۵۰\times۱۰^{-۳}\,\text{kg})(۲۴۹۰\times\frac{۱۰^{۳}\,\text{J}}{\text{kg}})=-۱/۲\times۱۰^{۵}\,\text{J}$$

در این عمل، $۱/۲\times۱۰^{۲}\,\text{kJ}$ گرما به شیشه داده می‌شود.

فعالیت ۴ــ۱۳

در فرایندهای تغییر حالت (تغییر فاز) دما تغییر نمی‌کند، اما انرژی درونی ماده تغییر می‌کند. در این‌باره تحقیق کنید.

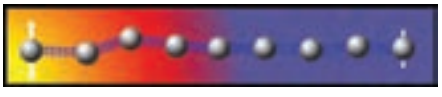
۴ــ۵ روش‌های انتقال گرما

همان‌طور که در کتاب علوم هفتم دیدیم، شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارت‌اند از : رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی. در هر فرایند انتقال گرما، ممکن است هر سهٔ این ساز و کارها دخالت داشته باشند (شکل ۴ــ۲۷).

اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. انتقال گرما، از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم هم‌دما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر ساز وکار هریک از این روش‌ها می‌پردازیم.

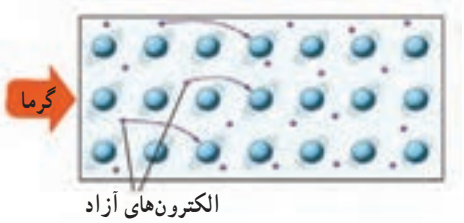
شکل ۴ــ۲۷ هر سه روش انتقال گرما را در این تصویر مشاهده می‌کنید.

رسانش گرمایی : بسیاری از ما این تجربه را داریم که انتهای قاشق فلزی درون ظرف غذای روی اجاق روشن را با دست گرفته و داغی آن را احساس کرده‌ایم. اما همچنین دیده‌ایم اجسامی دیگر مانند شیشه، چوب و... نیز می‌توانند گرما را تا حدودی انتقال دهند. رسانش گرمایی در این اجسام، به دلیل ارتعاش اتم‌ها و گسترش این ارتعاش‌ها در طول آنهاست (شکل ۴ــ۲۸). به جهت نبودِ الکترون‌های آزاد، این اجسام ،رساناهای گرمایی خوبی نیستند. به همین دلیل از برخی از این مواد در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا حتی‌الامکان از خروج گرما در زمستان و ورود آن در تابستان جلوگیری کنند.



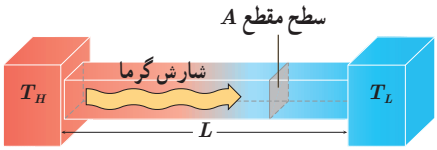
شکل ۴ــ۲۸ در نافلزات گرما صرفاً از طریق ارتعاش اتم‌ها انتقال می‌یابد. در شکل، این انتقال ارتعاشات توسط فنرها شبیه‌سازی شده است.

اما در فلزات افزون بر ارتعاش‌های اتمی، الکترون‌های آزاد نیز در انتقال گرما نقش دارند. بنابراین، نسبت به سایر اجسام، رساناهای گرمایی بسیار بهتری هستند. در واقع چون الکترون‌ها بسیار کوچک‌اند و به سرعت حرکت می‌کنند با برخورد با سایر الکترون‌ها و اتم‌ها سبب رسانش گرما می‌شوند (شکل ۴ــ ۲۹). بنابراین، در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرما بیشتر از اتم‌هاست.



شکل ۴ــ۲۹ الکترون‌های آزاد با برخورد به یکدیگر و اتم‌ها موجب رسانش بهتری برای گرما می‌شوند.

با شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال گرما به روش رسانش می‌توانیم گرمای منتقل شده از یک سر میله به سر دیگر آن را محاسبه کنیم. فرض کنید طول یک میله L و مساحت مقطع آن A باشد (شکل ۴ــ ۳۰) و یک سر میله در دمای بالاتر T_H و سر دیگر آن در دمای پایین‌تر T_L قرار گرفته باشد. گرمایی که در مدت زمان t از انتهای با دمای بالاتر میله به انتهای با دمای پایین‌تر آن شارش می‌یابد، را با Q نشان می‌دهیم. نسبت $\frac{Q}{t}$، آهنگ رسانش گرمایی نامیده می‌شود و آن را با H نشان می‌دهیم.

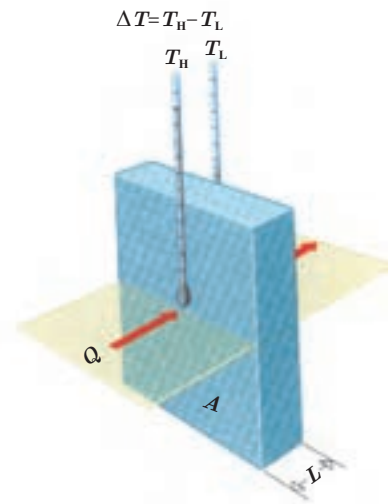


شکل ۴ــ۳۰ میله‌ای به طول L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_L و T_H قرار گرفته است.

تجربه نشان می‌دهد که آهنگ رسانش گرمایی (H) با مساحت سطح مقطع میله (A) و اختلاف دمای دو انتهای میله ($T_H - T_L$) نسبت مستقیم و با طول میله (L) نسبت وارون دارد؛ یعنی :

$$H = \frac{Q}{t} = k\frac{A(T_H - T_L)}{L} \qquad (۴ــ۱۳)$$

در این رابطه، k رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. در SI، یکای رسانندگی گرمایی J/s.m.K یا وات بر متر ــ کلوین (W/m.K) است. جدول ۴ــ ۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ ۳۱ تیغه‌ای به ضخامت L و مقطع A بین دو منبع با دماهای T_L و T_H قرار گرفته است.

جدول ۴ــ ۷ رسانندگی گرمایی برخی از مواد در دمای ۲۰ °C

ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)
پشم شیشه	۰/۰۵	یخ	۲
چوب پنبه	۰/۰۴	سرب	۳۵
هوای خشک	۰/۰۲۴	آهن	۸۰
انواع چوب	۰/۱ تا ۰/۲	آلومینیم	۲۳۵
آب	۰/۶	طلا	۲۹۰
آجر	۰/۶ تا ۰/۸	مس	۴۰۰
انواع شیشه	۰/۶ تا ۱	نقره	۴۲۰

اگرچه رابطهٔ ۴ــ ۱۳ برای میله بیان شده است، ولی برای تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع A و ضخامت L نیز برقرار است (شکل ۴ــ ۳۱). از لحاظ تجربی برای اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی مواد برای اجسام فلزی از میله و برای اجسام نافلزی از تیغه، یا بره استفاده می‌کنند.

پرسش ۴ــ۶

برخی آشپزها برای آنکه سیب‌زمینی زودتر آب‌پز شود، ابتدا چند سیخ کوچک فلزی درون سیب‌زمینی فرو می‌کنند و بعد آن را در آب انداخته و روی اجاق قرار می‌دهند. علت این کار آشپزها چیست؟

مثال ۴ــ۱۶

طول و عرض شیشهٔ پنجرهٔ اتاقی ۲/۰ m و ۱/۵m و ضخامت آن ۵/۰ mm است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است. ۳/۰ °C− و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است، ۲/۰ °C+ است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟ (k =۱ W/m.K)

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۱۳ داریم :

$$H = k\frac{A(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن k =۱W/m.K، A= (۱/۵m)(۲/۰m)=۳/۰m^2، ΔT= ۵/۰°C =۵/۰K و L=۰/۰۰۵۰m در رابطهٔ بالا خواهیم داشت :

$$H = (1\,W/m.K)\frac{(3/0\,m^2)(5/0\,^\circ C)}{0/0050\,m} = 3\times10^3\,W$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری ۳kW می‌شود.

مثال ۴ـ ۱۷

برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشهٔ پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایهٔ میانی هوا جایگزین می‌کنند. طول و عرض شیشهٔ دوجدارهٔ پنجرهٔ اتاقی به ترتیب ۲/۰ m و ۱/۵m، ضخامت هر یک از دو لایهٔ شیشه‌ای آن ۵mm و ضخامت لایهٔ میانی هوا ۱۲mm است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است $-۳/۰^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است $+۲/۰^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت، با عدد به دست‌آمده در مثال قبل مقایسه کنید. فرض کنید می‌توان مجموعه شیشهٔ دوجداره و هوای بین آن را مانند تیغه یا پره‌ای با همان مساحت و ضخامت لایهٔ هوا در نظر گرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً برابر با رسانندگی گرمایی هواست.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۱۳ داریم :

$$H = kA\frac{(T_H - T_L)}{L}$$

آن‌گاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت :

$$H = (۰/۰۲۴W/m.K)\frac{(۳/۰m^{۲})(۵/۰^{\circ}C)}{۰/۰۱۲m} = ۳۰W$$

توجه کنید که در این محاسبه از رسانندگی گرمایی هوا، $k = ۰/۰۲۴W/m.K$ استفاده شد.

همان‌طور که می‌بینید عدد به دست آمده، تفاوت زیادی با عدد به‌دست آمده در مثال قبل دارد (۱۰۰ بار کوچک‌تر است) که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

تمرین ۴ـ ۷

مساحت استخری با کف تخت، ۸۲۰ مترمربع و عمق آن ۲/۰ متر است. در یک روز گرم دمای سطح آب $۲۵^{\circ}C$ و دمای کف آب $۱۲^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی از سطح استخر به کف آن چقدر است؟

فعالیت ۴ـ ۱۴

موهای خرس قطبی توخالی هستند. تحقیق کنید این موضوع چه نقشی در گرم نگه‌داشتن بدن خرس در سرمای قطب دارد؟

تصویری بسیار بزرگ شده از موی یک خرس قطبی

همرفت : وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چگونه همهٔ آب آن در مدت نه چندان زیادی گرم می‌شود؟ بخاری چگونه هوای داخل اتاق را گرم می‌کند؟

انتقال گرما در مایعات و گازها که معمولاً رساناهای گرمایی خوبی نیستند عمدتاً به روش همرفت، یعنی همراه با جابه‌جایی بخشی از خود ماده، انجام می‌گیرد. همان‌طور که در کتاب علوم هشتم دیدید این پدیده بر اثر کاهش چگالی شاره با افزایش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما به روش همرفت را می‌توان به سادگی با انجام آزمایش نمایش داد.

آزمایش ۴ـ۵

هدف : مشاهده پدیده همرفت

وسیله‌های موردنیاز : لولهٔ همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پتاسیم‌پرمنگنات یا جوهر، چراغ الکلی یا گازی

شرح آزمایش :

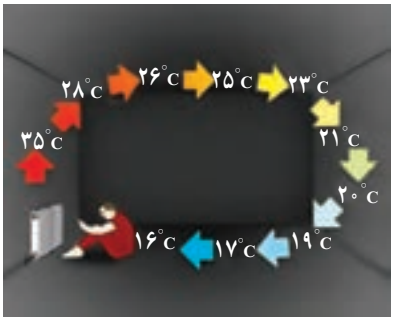
۱ـ لوله را از آب سرد پرکنید و به آرامی چند دانهٔ پتاسیم پرمنگنات (یا چند قطره جوهر) را از دهانهٔ لوله به‌داخل آن بریزید.

۲ـ یکی از شاخه‌های قائم لوله را مطابق شکل روی شعله بگیرید و در همان لحظه شاخهٔ قائم دیگر لوله را با دست لمس کنید.

۳ـ دستتان را از شاخهٔ قائم بردارید و در حالی که گرما دادن را ادامه می‌دهید به مایع درون لوله با دقت نگاه کنید. پس از چند دقیقه دوباره همان شاخهٔ قائم لوله را لمس کنید.

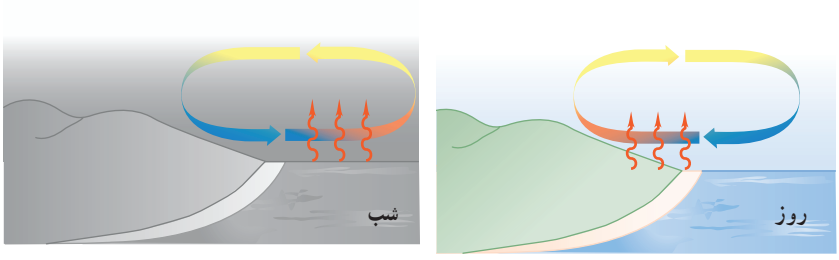
۴ـ مشاهدات خود را بنویسید و با بحث درگروه، دلیل هر یک از مشاهدات را توضیح دهید.

همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، بر خلاف رسانش گرمایی، انتقال گرما با انتقال بخش‌هایی از خود ماده صورت می‌گیرد و وقتی شاره در تماس با جسمی گرم‌تر از خود قرار گیرد، فاصلهٔ متوسط مولکول‌ها در بخشی از شاره که در تماس با جسم گرم است، افزایش می‌یابد؛ بدین‌ترتیب حجم آن زیاد می‌شود، در نتیجه چگالی این قسمت از شاره کاهش می‌یابد؛ چون اکنون چگالی این شارهٔ انبساط‌یافته کمتر از شارهٔ سردتر اطراف خود است. نیروی شناوری (بنا به اصل ارشمیدس) موجب بالا رفتن آن می‌شود. آن‌گاه مقداری از شارهٔ سردتر اطراف آن، جایگزین شارهٔ گرم‌تر می‌شود که بالا رفته است و این فرایند به همین ترتیب ادامه می‌یابد. گرم‌شدن هوای داخل اتاق به وسیلهٔ بخاری و رادیاتور شوفاژ (شکل ۴ـ۳۲)، گرم‌شدن آب درون قابلمه (شکل ۴ـ۳۳)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۴ـ۳۴)، انتقال گرما از مرکز خورشید به سطح آن و ... همگی بر اثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهند. همهٔ این مثال‌ها نمونه‌هایی از **همرفت طبیعی** است.



شکل ۴ـ۳۲ گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت

شکل ۴ـ۳۳ گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت

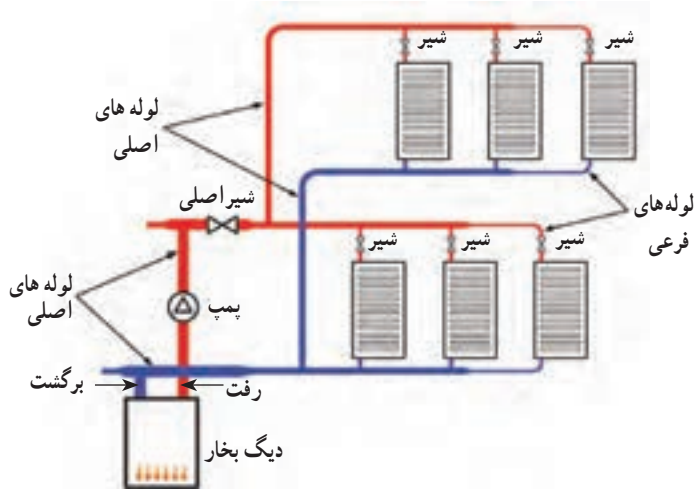


شکل ۴ـ۳۴ روز : زمین ساحل گرم‌تر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی دریا به سمت ساحل می‌شود. شب : زمین ساحل سردتر از آب دریاست. پدیدهٔ همرفت موجب نسیمی از سوی ساحل به سمت دریا می‌شود.

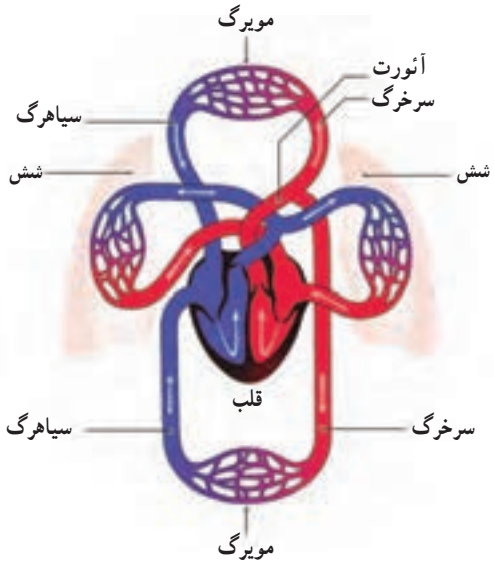
پرسش ۴ـ۷

به نظر شما چه ارتباطی بین انتقال گرما به روش همرفت و ضریب انبساط حجمی، برای یک مایع وجود دارد؟

نوع دیگری از همرفت، **همرفت واداشته** است که در آن شاره به کمک یک تلمبه (طبیعی یا مصنوعی) به حرکت واداشته می‌شود تا با این حرکت، انتقال گرما صورت پذیرد. سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۴ـ۳۵)، سیستم خنک‌کنندهٔ موتور اتومبیل و نیز گرم و سرد شدن بخش‌های مختلف بدن بر اثر گردش جریان خون (شکل ۴ـ۳۶) در بدن جانوران خونگرم مثال‌هایی عینی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.



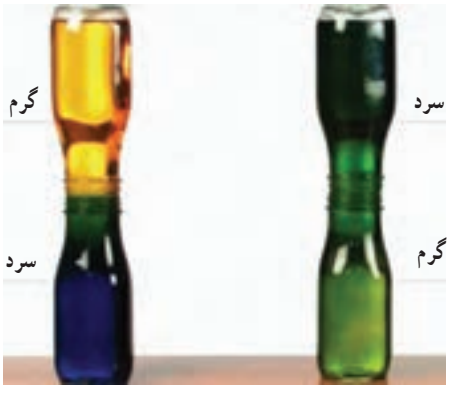
شکل ۴ـ۳۵ طرحی از سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها



شکل ۴ـ۳۶ طرحی از دستگاه گردش خون که در آن قلب همچون تلمبه‌ای باعث همرفت واداشتهٔ خون می‌شود.

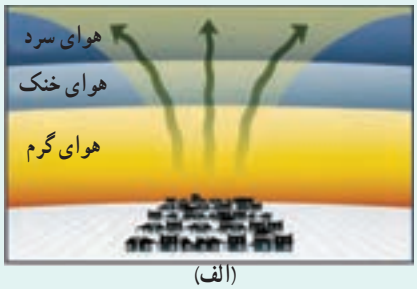
فعالیت ۴ـ۱۵

چهار بطری شیشه‌ای یکسان، دو رنگ جوهر قرمز و آبی، دو کارت ویزیت مقوایی و آب بسیار سرد و بسیار گرم تهیه کنید. در دو تا از بطری‌ها جوهر آبی و در دو بطری دیگر جوهر قرمز بریزید. سپس بطری‌های آبی را با آب خیلی سرد و بطری‌های قرمز را با آب خیلی گرم پر کنید. اکنون در حالی که دهانهٔ یک بطری قرمز را با کارت ویزیت گرفته‌اید، دهانهٔ آن را دقیقاً روی دهانهٔ یک بطری آبی قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. همین آزمایش را به طور معکوس نیز انجام دهید؛ یعنی این‌بار، یک بطری آبی رنگ که دهانهٔ آن با کارت پوشیده شده است را روی دهانهٔ بطری قرمز رنگ قرار دهید و سپس کارت را بیرون بکشید. مشاهدات خود را توضیح دهید. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

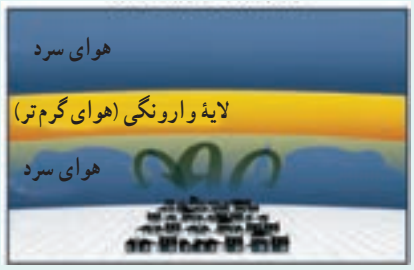


خوب است بدانید

وارونگی هوا[۱] : در شرایط عادی، توزیع لایه‌های هوای اطراف زمین به این ترتیب است که هوای گرم در اطراف سطح زمین قرار دارد و هوای لایه‌های بالاتر از آن به‌تدریج سرد و سردتر است. بدیهی است که در این حالت شرایطی مثل همرفت طبیعی حاکم است؛ یعنی هوای گرم‌تر به بالا می‌رود و هوای سردتر و چگال‌تر پایین می‌آید و بدین‌ترتیب چرخش هوایی بر اثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهد (شکل الف).



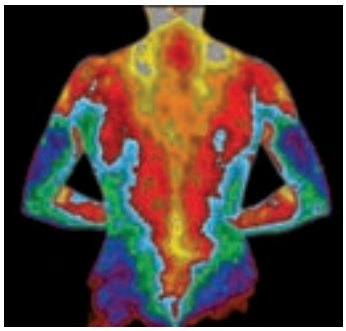
(الف)



(ب)

الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در : الف) شرایط عادی و ب) شرایطی که وارونگی هوا رخ می‌دهد.

واروگی هوا معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود و در آن همرفت طبیعی در جوّ زمین متوقف می‌گردد. در چنین شب‌هایی، لایهٔ هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایهٔ هوای گرم بالاتر قرار می‌گیرد. این لایهٔ هوای گرم، پیش از این، بر اثر پدیدهٔ همرفت در یک روز عادی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایهٔ هوای سرد مجاور زمین، باعث می‌شود پدیدهٔ همرفتی بین این لایهٔ بسیار سرد و لایهٔ هوای گرم بالای آن رخ ندهد. بدین‌ترتیب، مانع از چرخش هوا بر اثر پدیدهٔ همرفت در سطح زمین می‌گردد. به این پدیده، وارونگی هوا می‌گویند. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلایندهٔ شهری واقع در لایهٔ هوای سرد مجاور زمین، که عمدتاً ناشی از تردد خودروها و کارخانجات دودزاست، در این لایه حبس می‌شوند (شکل ب). وارونگی هوا تا وقتی تداوم دارد که بر اثر وزیدن باد لایه‌های هوای سرد و گرم جابه‌جا شود، یا با افزایش دمای قابل توجه لایهٔ سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جوّ زمین از سر گرفته شود. با توجه به اینکه در این پدیده، الگوی تغییرات دما در لایه‌های هوای اطراف زمین در یک روز طبیعی بر هم می‌خورد، به این پدیده وارونگی دما[۲] نیز گفته می‌شود.



شکل ۴ــ۳۷ تصویری دمانگاشت از بدن یک فرد. سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای $22^{\circ}C$ به دلیل تابش گرمایی با آهنگی در حدود ۱۰۰ 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 ۱۰۰ W گرما از دست می‌دهد.

تابش گرمایی : همهٔ ما تجربهٔ گرم‌شدن در آفتاب را داریم. با نزدیک‌کردن دستمان به اجسام گرمی مانند رادیاتور گرم شوفاژ، یا زیرِ لامپ رشته‌ای روشن نیز تجربهٔ مشابهی خواهیم داشت. آیا با نزدیک‌کردن دستتان به زیرِ لامپ رشته‌ای، گرما با روش رسانش، یا همرفت به دستتان می‌رسد؟

می‌دانید که هوا رسانای خوبی نیست و چون دست شما زیر لامپ قرار دارد، انتقال گرما به روش همرفت نیز نمی‌تواند رخ داده باشد. خورشید، لامپ داغ، کتری، رادیاتور شوفاژ و ... از خود پرتوهایی گسیل می‌کنند که دست ما با جذب کردن آنها گرم می‌شود. این پرتوها از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند که در سال‌های بعد خواهید دید شامل امواج رادیویی، تابش فروسرخ، نور مرئی، تابش فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای γ است. هر کدام از این امواج چشمه‌های تولیدکنندهٔ مربوط به خود را دارد. ما در این بخش، به تابش الکترومغناطیسی گسیل‌شده از مواد

۱ــ Air Inversion

۲ــ Temperature Inversion

بر اثر دمای آنها سروکار داریم. در واقع هر جسم در هر دمایی تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. به این نوع تابش، تابش گرمایی می‌گویند. نشان داده می‌شود که تابش گرمایی در دماهای زیر حدود $500\,^{\circ}C$ عمدتاً به‌صورت تابش فروسرخ است که نامرئی است. برای آشکارسازی تابش‌های فروسرخ از ابزاری موسوم به دمانگار[1] استفاده می‌کنیم و به تصویر به‌دست آمده از آن دمانگاشت[2] می‌گوییم. شکل ۴ــ۳۷ 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 صیقلی‌بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۴ــ۳۸). سطوح صاف و درخشان با رنگ‌های روشن تابش گرمایی کمتری دارند، در حالی که تابش گرمایی سطوح تیره، ناصاف و مات بیشتر است.

تابش گرمایی در پدیده‌های زیستی نیز کاربردهای فراوانی دارد که در اینجا به دو نمونه از آنها اشاره می‌شود.

الف) شکارِ تابش فروسرخ : نوعی از مارهای زنگی اندام‌هایی حفره‌ای بر روی پوزهٔ خود دارند که نسبت به تابش فروسرخ حساس‌اند (شکل ۴ــ۳۹). این مارها اغلب در سیاهی شب شکار می‌کنند. در واقع اندام‌های حفره‌ای به آنها کمک می‌کند که طعمه‌های خونگرم خود را به واسطهٔ تابش فروسرخ‌شان در تاریکی و سرمای شب مشاهده کنند.

ب) کلم اسکانک[3] : کلم اسکانک (شکل ۴ــ۴۰) یکی از چندین گیاهی است که می‌تواند دمایش را تا بیشتر از دمای محیط بالا ببرد. این نوع کلم به خاطر بالا رفتن دمایش، انرژی خود را از طریق تابش فروسرخ از دست می‌دهد و می‌تواند برف اطرافش را در زمستان آب کند.

شکل ۴ــ۳۸ درون مکعب لسلی، آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.

شکل ۴ــ۳۹ اینها اندام‌های حفره‌ای هستند که گرما را آشکار می‌کنند.

شکل ۴ــ۴۰ کلم اسکانک برف اطراف خود را آب کرده است.

فعالیت ۴ــ۱۶

پرتوسنج (رادیومتر) وسیله‌ای است که از یک حباب شیشه‌ای تشکیل شده است که درون آن چهار پرهٔ فلزی قائم قرار دارد که می‌توانند حول یک محور (سوزن عمودی) بچرخند. دو وجهِ هر چهار پره، یک در میان سفید و سیاه است. وقتی این وسیله کنار یک چشمهٔ نور قرار گیرد، پره‌ها حول سوزن عمودی می‌چرخند و هر چه شدت نور بیشتر باشد، این چرخش سریع‌تر است. در مورد دلیل چرخش پره‌ها تحقیق کنید.

۱ــ Thermograph

۲ــ Thermogram

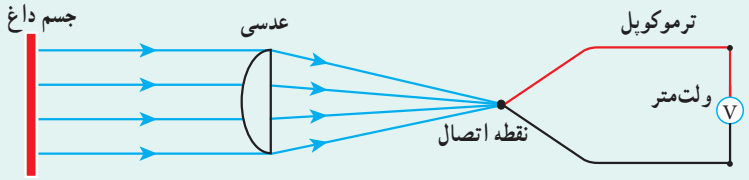
۳ــ Skunk Cabage

از تابش گرمایی می‌توان به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری دمای اجسام استفاده کرد. به روش‌های اندازه‌گیری دما مبتنی بر تابش گرمایی، تفسنجی[1] و به ابزارهای اندازه‌گیری دما به این روش، تفسنج[2] می‌گویند. تفسنج بر خلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرد. تفسنجی، به‌خصوص در اندازه‌گیری دماهای بالای $1100^{\circ}C$ اهمیت ویژه‌ای دارد. تفسنجِ تابشی و تفسنجِ نوری، تفسنج‌هایی برای اندازه‌گیری این دماها هستند و تفسنجِ نوری به عنوان دماسنج معیار برای اندازه‌گیری این دماها انتخاب شده است.

خوب است بدانید

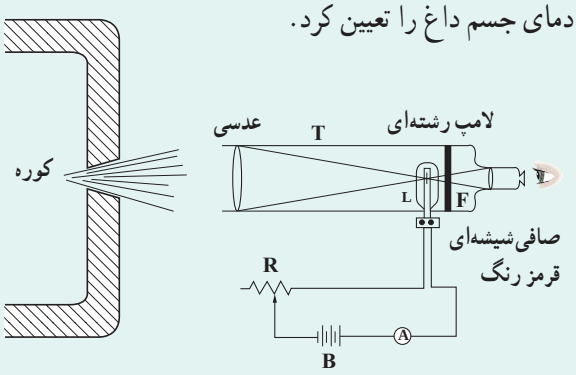
تفسنج‌های اندازه‌گیری دماهای بالا

الف) تفسنج تابشی : این تفسنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل‌شده از جسم روی یک ترموکوپل اندازه می‌گیرد. می‌توان دمای جسم را از روی ولتاژ خروجی ترموکوپل تعیین کرد.



(الف) تفسنج تابشی و طرحی از ساختار آن

ب) تفسنج نوری : این تفسنج وسیله‌ای است که برای اندازه گیری دمای اجسام خیلی داغ با دمای بیش از $1200\,K$ (مانند کوره‌ها) به کار می‌رود. اساس کار این تفسنج، مقایسهٔ رنگ و شدت نور تابیده از کوره، با رنگ و شدت نور یک لامپ رشته‌ای است. این تفسنج از یک دوربین T تشکیل شده است که در لولهٔ آن یک صافی شیشه‌ای قرمزرنگ F و یک لامپ الکتریکی کوچک L قرار دارد. نور تابیده شده از کوره، توسط عدسی دوربین روی رشتهٔ لامپ متمرکز می‌شود و ناظری که به درون دوربین نگاه می‌کند، رشتهٔ تیرهٔ لامپ را بر زمینهٔ نور کوره می‌بیند. رشتهٔ لامپ به باتری B و مقاومت متغیر R متصل شده است. با تغییر دادن مقاومت متغیر R ، جریان رشتهٔ لامپ را به‌تدریج افزایش می‌دهیم تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به طوری که رشتهٔ لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



(ب) تفسنج نوری و طرحی از ساختار آن

۱ ــ Pyrometry ۲ ــ Pyrometer

خوب است بدانید

یخ بستن بر اثر تابش : در بعضی نواحی که یخچال رایج نیست، برای ساختن یخ، آب را در کاسه‌ای کم‌عمق می‌ریزند و در طول شب بیرون می‌گذارند. کف و اطراف کاسه، عایق‌بندی شده و روی آن باز است. بدیهی است که اگر دمای هوا به زیر نقطهٔ انجماد آب برسد، آب یخ خواهد زد. اما گاهی در شب‌هایی که هوا صاف است ممکن است آب در هوایی که دمای آن قدری بالاتر از نقطهٔ انجماد آب است نیز یخ ببندد. دلیل این پدیده آن است که در یک شب صاف، آسمان را می‌توان مثل یک سطح واحد در نظر گرفت که دمایش زیر نقطهٔ انجماد آب است. در طول شب، تبادلی از تابش فروسرخ بین سطح آسمان و آب صورت می‌گیرد. گسیل تابشی آب که ابتدا دمایش بالاتر از نقطه انجماد است بیشتر از تابشی است که از آسمان جذب می‌کند و بنابراین آب سرد می‌شود. اگر دمای هوای اطراف آب خیلی بیشتر از نقطهٔ انجماد آب نباشد، آب ممکن است بر اثر این فرایند تابشی آنقدر گرما از دست بدهد تا یخ بزند.

۴ــ۶ قوانین گازها

روی برخی از افشانه‌ها (اسپری‌ها) نوشته شده است "از قرار دادن افشانه در آتش خودداری شود". با داغ‌کردن 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 نوشابهٔ پلاستیکی و توخالی، اندکی آب داغ بریزیم و سپس آب را در بطری چرخانده و دور بریزیم و آن‌گاه در بطری را محکم ببندیم، بطری پس از مدتی مچاله می‌شود. شکل ۴ــ۴۱ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل مچاله شده است. همچنین شکل ۴ــ۴۲ یک اسباب‌بازی ساده را نشان می‌دهد که مخزن پایینی آن تا نیمه از یک مایع رنگی پر شده است. وقتی این مخزن را در دستتان می‌گیرید، فشار هوا و بخار مایع در نیمهٔ خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع این مخزن را به طرف پایین می‌راند. این کار سبب می‌شود مایع رنگی مخزن پایینی از لولهٔ باریکِ مارپیچ که انتهای پایینی آن درون این مخزن قرار دارد بالا رود. هر چه دستتان گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را در برگیرد، مایع در لوله بیشتر بالا می‌رود.

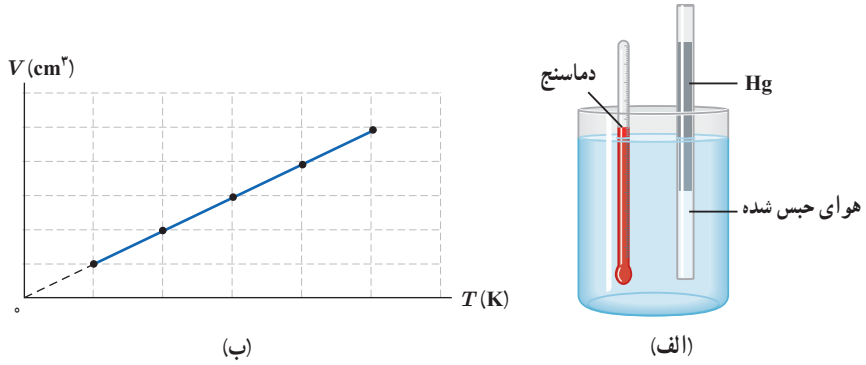
شکل ۴ــ۴۱ سرد شدن هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه مچاله شدن مخزن شده است.

شکل ۴ــ۴۲ با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لولهٔ مارپیچ بالا می‌رود.

برای بررسی رفتار گاز می‌توان مقداری گاز را درون یک استوانه قرار داد و در هر لحظه دما، فشار و حجم آن را اندازه‌گیری کرد. دانشمندانی مانند بویل، ماریوت، شارل، گی لوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطهٔ بین فشار، حجم، دما و مقدار گاز درون یک محفظه را بیابند.

بررسی گاز در فشار ثابت : تاکنون در مورد انبساط گرمایی جامدها و مایع‌ها مطالبی را فراگرفته‌ایم. اما در مورد گازها چطور؟ آیا حجم گازها نیز متناسب با دما تغییر می‌کند؟ چون گازها به سادگی متراکم می‌شوند باید به فشار گاز نیز فکر کنیم. ژاک شارل[۱] دانشمند فرانسوی (۱۸۲۳ــ۱۷۴۶ م.) به‌طور تجربی دریافت که اگر فشارِ مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود حجم آن مستقیماً با افزایش دما (بر حسب کلوین) افزایش و با کاهش دما، کاهش می‌یابد. شکل ۴ــ۴۳ الف، نوعی از آزمایش او و شکل ۴ــ۴۳ ب، نتیجه‌ای از آن آزمایش را نشان می‌دهد.

۱ــ Jacques Charles



شکل ۴ـ۳ الف) اسبابی برای تحقیق اثر دما برحجم مقدار ثابتی از گاز که در فشار ثابت نگه‌داشته شده است. ب) نمودار V برحسب T برای یک گاز، وقتی فشار و مقدار گاز ثابت باشد.

نتیجهٔ این آزمایش را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{V}{T} = \text{ثابت} \qquad (۴ـ۱۴) \quad \text{(فشار و جرم ثابت)}$$

در این رابطه V حجم گاز و T دمای گاز برحسب کلوین است.

فعالیت ۴ـ۱۷

سرِ سرنگی را که پیستون آن آزادانه حرکت می‌کند به فشارسنجی می‌بندیم و آن را به طور افقی درون ظرف آبی می‌گذاریم و ظرف را به‌آرامی گرم می‌کنیم. توضیح دهید کدام‌یک از کمیت‌های دما، حجم، فشار و مقدار هوای درون سرنگ تغییر می‌کند و تغییر آنها چگونه است؟

مثال ۴ـ۱۸

در آزمایشی، دمای مقدار معینی گاز اکسیژن را در فشار ثابت از $۲۷^{\circ}C$ به $۸۷^{\circ}C$ می‌رسانیم. اگر حجم گاز ابتدا $۲/۰L$ باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

پاسخ : در این آزمایش، جرم و فشار گاز ثابت مانده است. پس بنا به رابطهٔ ۴ـ ۱۴ داریم :

$$\frac{V_۱}{T_۱} = \frac{V_۲}{T_۲}$$

با استفاده از داده‌های مثال، می‌دانیم :

$$T_۱ = (۲۷+ ۲۷۳)K = ۳۰۰K \quad ، \quad V_۱ = ۲/۰L$$

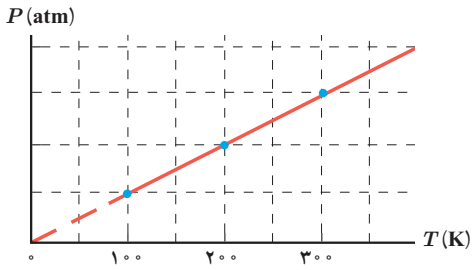
$$T_۲=(۸۷ + ۲۷۳)K = ۳۶۰K \quad ، \quad V_۲ = ?$$

بنابراین

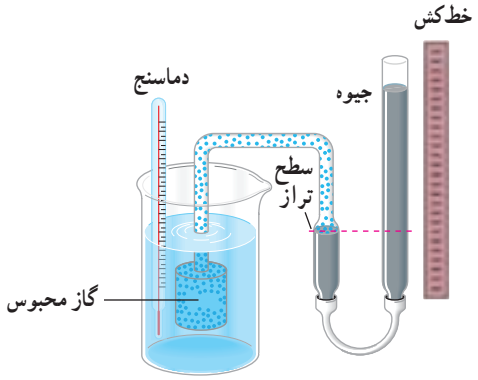
$$\frac{۲/۰}{۳۰۰} = \frac{V_۲}{۳۶۰} \Rightarrow V_۲ = ۲/۴L$$

بررسی گاز در حجم ثابت : شیمی‌دان فرانسوی ژوزف لوئیس‌گی لوساک[1] (۱۸۵۰ــ۱۷۷۸ م.) در سال ۱۸۰۲ میلادی به طور تجربی دریافت که اگر حجم مقدار معینی از یک گاز ثابت نگه داشته شود، فشار آن مستقیماً با دما (بر حسب کلوین) متناسب است (شکل ۴ــ۴۴). شکل ۴ــ۴۵ نوعی از آزمایش او را برای بررسی تغییر فشار و دمای گاز، در حجم ثابت نشان می‌دهد.

$$\frac{P}{T} = \text{ثابت} \qquad \text{(حجم و جرم ثابت)} \qquad (۴ــ۱۵)$$



شکل ۴ــ۴۴ رابطهٔ بین فشار و دمای یک گاز، در حجم ثابت



شکل ۴ــ۴۵ آزمایشی‌ساده برای اندازه‌گیری فشار گاز در دماهای مختلف (در حجم ثابت)

مثال ۴ــ۱۹

راننده‌ای پیش از حرکت، فشار لاستیک اتومبیل خود را با یک فشارسنج اندازه می‌گیرد و برای آن مقدار ۲۱۴ kPa را به دست می‌آورد. در این زمان، دما برابر با ۱۵°C است. پس از چند ساعت رانندگی، توقف می‌کند و فشار لاستیک را دوباره اندازه می‌گیرد. اینک فشار ۲۴۱kPa شده است. اکنون دمای هوای داخل لاستیک چقدر است؟ از تغییر حجم کم هوای درون لاستیک چشم‌پوشی کنید و فرض کنید فشار هوای محیط برابر با ۱atm =۱۰۱ kPa باشد.

پاسخ : می‌دانیم که فشارسنج‌ها، فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای) را اندازه می‌گیرند که برابر با اختلاف فشار مطلق با فشار هوای محیط است. بنابراین، برای استفاده از رابطه ۴ــ۱۵ باید فشار هوای محیط را به فشارهای پیمانه‌ای اضافه کنیم. پس داریم :

$$P_۱ = ۲۱۴\ \text{kPa} + ۱۰۱\ \text{kPa} = ۳۱۵\ \text{kPa}$$

$$P_۲ = ۲۴۱\ \text{kPa} + ۱۰۱\ \text{kPa} = ۳۴۲\ \text{kPa}$$

همچنین توجه کنید که دماها باید برحسب کلوین باشد. بنابراین، برای دمای اولیه داریم :

$$T_۱ = (۱۵ + ۲۷۳)\text{K} = ۲۸۸\ \text{K}$$

اکنون با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۴ــ۱۵ خواهیم داشت :

$$\frac{P_۲}{T_۲} = \frac{P_۱}{T_۱} \quad , \quad T_۲ = \left(\frac{۳۴۲\ \text{kPa}}{۳۱۵\ \text{kPa}}\right)(۲۸۸\text{K}) = ۳۱۳\text{K} = (۳۱۳ - ۲۷۳)^\circ\text{C} = ۴۰^\circ\text{C}$$

این پاسخی معقول است؛ زیرا پس از یک رانندگی طولانی، لاستیک‌ها به میزان قابل توجهی گرم می‌شوند.

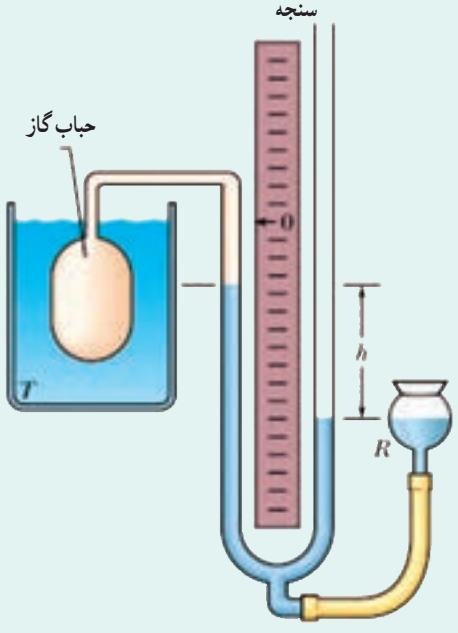
۱ــ Joseph Louis Gay–Lussac

خوب است بدانید

دماسنج گازی حجم ثابت : مطابق شکل، این دماسنج شامل یک حباب پرشده از گاز است که توسط لوله‌ای به یک فشارسنج جیوه‌ای متصل شده است. با بالا و پایین بردن مخزن R، همواره می‌توان سطح جیوه را در شاخهٔ سمت چپ لولهٔ Uشکل، در مقابل صفرِ خط‌کش نگه داشت تا حجم گاز ثابت باقی بماند. با تغییر دما، فشار گاز تغییر می‌کند. دما با فشار نسبت مستقیم دارد و نمودار دما برحسب فشار خطی است. برای استاندارد کردن درجه‌بندی دماسنج، در یک توافق بین‌المللی، نقطه‌ای موسوم به نقطهٔ سه‌گانهٔ آب[1] را به عنوان مرجع اندازه‌گیری دما انتخاب کرده‌اند. نقطهٔ سه‌گانهٔ آب، نقطه‌ای است که در آن سه فاز آب (آب مایع، یخ و بخار آب) در تعادل‌اند. به این نقطه دمای ۲۷۳/۱۶ K را اختصاص داده‌اند.[2] برای اندازه‌گیری دمای محیط، فشار گاز درون حباب را در این دما اندازه می‌گیرند و به آن دما و فشار به ترتیب، مقادیر T و P را اختصاص می‌دهند. به همین ترتیب، به دما و فشار گاز درون حباب در نقطهٔ سه‌گانهٔ آب به ترتیب، مقادیر T_{tr} و P_{tr} را اختصاص می‌دهند (توجه کنید P_{tr} آن فشاری نیست که برای رسیدن به نقطهٔ سه‌گانه لازم است، بلکه فشار گاز موردنظر در نقطهٔ سه‌گانه است). با توجه به خطی بودن رابطهٔ فشار و دما داریم :

$$T = T_{tr}\left(\frac{P}{P_{tr}}\right) = (۲۷۳/۱۶\text{K})\left(\frac{P}{P_{tr}}\right)$$

یعنی با دانستن فشار گاز در دمای مورد نظر و در نقطهٔ سه گانهٔ آب، به‌راحتی می‌توان دمای مورد نظر را محاسبه کرد. اگر از 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.



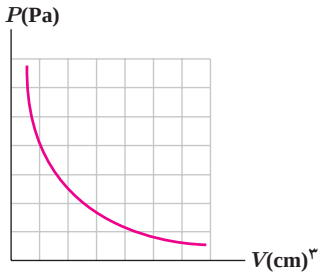
۱ ــ Triple Point of Water

۲ ــ دقت کنید که این دما همان دمای صفر درجهٔ سلسیوس نیست و اندکی با آن متفاوت است.

بررسی گاز در دمای ثابت : سومین قانون تجربی گازها، توسط دانشمند انگلیسی رابرت بویل[1] در سال ۱۶۶۲ میلادی ارائه شد و دانشمند فرانسوی امه ماریوت[2] در سال ۱۶۷۶ میلادی به نتیجهٔ مشابهی رسید.

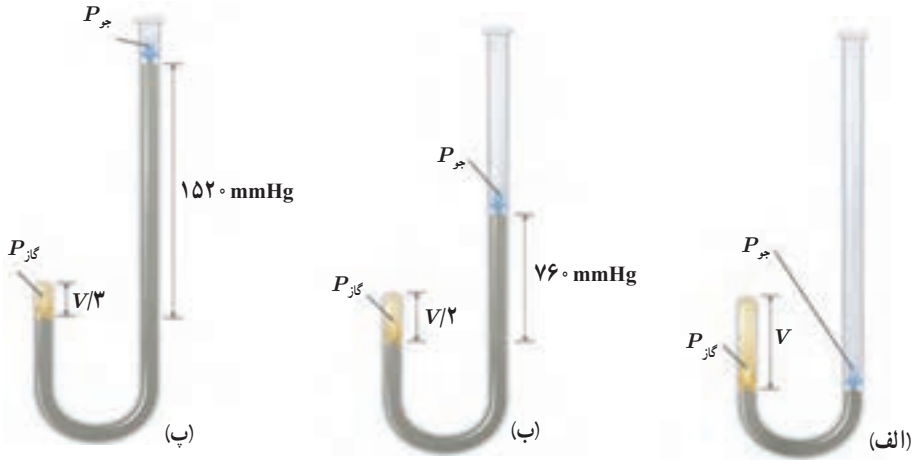
در واقع آنها دریافتند که اگر دمای مقدار معینی از یک گاز، ثابت نگه داشته شود، فشار آن با حجمش رابطهٔ وارون دارد (شکل۴ــ ۴۶). به عبارتی، حاصل‌ضرب فشار و حجم گاز مقداری ثابت است.

$$PV = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و جرم ثابت)} \qquad (۴ــ ۱۶)$$



شکل ۴ــ ۴۶ نمودار فشار برحسب حجم گاز در دمای ثابت

شکل ۴ــ ۴۷ نوعی از آزمایش بویل را نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ ۴۷ الف) در ابتدا گاز در فشار ۱ atm =۷۶۰ mmHg است توجه کنید که ارتفاع جیوه در هر دو شاخه یکسان است و دهانهٔ شاخهٔ سمت راست باز است. حجم گاز محبوس V است. ب) اگر جیوه به شاخهٔ سمت راست افزوده شود به طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه ۷۶۰ mm گردد، فشار گاز برابر فشار جو (۷۶۰ mmHg) به علاوهٔ ۷۶۰ mmHg، یعنی برابر ۱۵۲۰ mmHg و حجم گاز محبوس $\frac{V}{۲}$ می‌شود. پ) اگر باز هم به شاخهٔ سمت راست جیوه افزوده شود به‌طوری که اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه ۱۵۲۰ mm گردد فشار کل وارد به گاز به ۲۲۸۰ mmHg می‌رسد و حجم گاز محبوس به $\frac{V}{۳}$ کاهش می‌یابد.

رابرت بویل

رابرت بویل در سال ۱۶۲۷ در شهر مونستر ایرلند به دنیا آمد. بویل در ۱۴سالگی به ایتالیا سفر کرد و در آنجا تحت تأثیر اندیشه‌های گالیله قرار گرفت و در مراجعت به انگلستان وارد دانشگاه آکسفورد شد. او در آکسفورد عضو انجمن دانشجویی به‌نام «کالج نامرئی» شد که وظیفهٔ اصلی آن کشف حقایق علمی از راه و روش آزمایش بود. بویل تجربه‌گری ماهر بود و در نتیجهٔ تجربه‌ها و آزمایش‌های زیاد خود به کشف قانون بویل نایل آمد. او همچنین در مورد پدیدهٔ صوت، رنگ‌ها، بلورها و الکتریسیتهٔ ساکن نظریه‌های جالبی ارائه داد و حتی چیزی نمانده بود که به کشف عنصر اکسیژن نایل شود. او ضمن کارهای آزمایشگاهی خود پی‌برد که از ترکیب عناصر می‌توان مواد جدیدی ساخت. رابرت بویل علاوه بر کارهای علمی به امور اجتماعی و انسان‌دوستانه نیز پایبند بود و از جمله هزینهٔ انتشار کتاب مشهور نیوتون (اصول) را برعهده گرفت. بویل در سال ۱۶۹۱ در لندن درگذشت.

۱ــ Robert Boyle ۲ــ Edme Mariotte

مثال ۴ــ ۲۰

دلفینی حباب هوایی را در زیر دریاچه‌ای تفریحی ایجاد می‌کند. فرض کنید این حباب به سطح دریاچه می‌رسد و با رسیدن به سطح آب، حجم آن دو برابر می‌شود. عمقی که در آن حباب تشکیل شده است، چقدر بوده است؟ فرض کنید فشار هوا در سطح آب ۱۰۱ kPa، دمای آب دریاچه در همه‌جا یکسان است و فشار هوای داخل حباب همان فشار آب پیرامون آن است.

پاسخ : با توجه به اینکه بالا آمدن حباب در دمای یکسان آب دریاچه، رخ می‌دهد از رابطهٔ ۴ــ ۱۸ برای هوای درون حباب استفاده می‌کنیم :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

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 :

$$P_1 = P_0 + \rho g h \quad , \quad P_2 = P_0 \quad , \quad V_2 = 2 V_1$$

با قرار دادن این روابط در رابطهٔ ۴ــ ۱۶ خواهیم داشت :

$$(P_0 + \rho g h) V_1 = P_0 (2 V_1)$$

و از آنجا

$$h = \frac{P_0}{\rho g} = \frac{101 \times 10^3 \, \text{Pa}}{(1/00 \times 10^3 \, \text{kg/m}^3)(9/81 \, \text{N/kg})} = 10/3 \, \text{m}$$

بنابراین، دلفین در عمق ۱۰/۳ m از سطح دریاچه، حباب را ایجاد کرده است.

فعالیت ۴ــ ۱۸

با وجود تلاش در جهت ثابت نگه داشتن فشار هوای درون هواپیما، همواره مقدار آن کمتر از فشار هوای روی زمین است. وقتی هواپیما بالا می‌رود و فشار هوا کم می‌شود، بسته‌های نوشیدنی یا دِسر باد می‌کنند و حتی گاهی درشان باز می‌شود. با فرض ثابت بودن دما، این پدیده را توضیح دهید.

قانون آووگادرو : کمیت دیگری که در بررسی قوانین گازها باقی مانده است، جرم گاز و یا به طور معادل تعداد مول گاز است. آمدئو آووگادرو[1] (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶ م.) دانشمند ایتالیایی در سال ۱۸۱۱ میلادی بیان کرد که در دما و فشار یکسان، نسبت حجم گاز V به تعداد مولکول های آن N ثابت است :

$$\frac{V}{N} = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و فشار یکسان)}$$

همان‌طور که در بخش ۴ــ۳ دیدیم در یک مول از گاز به تعداد $6/02 \times 10^{23}$ (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 رابطهٔ بالا را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$\frac{V}{n} = \text{ثابت} \qquad \text{(دما و فشار یکسان)} \quad (۴ــ ۱۷)$$

۱ــ Amedeo Avogadro

قانون گازهای آرمانی (کامل) : همهٔ روابطی که برای گازها بیان کردیم در مورد گازهایی که به اندازهٔ کافی رقیق باشند، یا چگالی آنها به حدّ کافی کم باشد، با دقت خوبی برقرار است. به این گازها که مولکول‌های آنها به حدی از هم دورند که بر هم تأثیر چندانی نمی‌گذارند، گاز آرمانی (کامل) می‌گویند. در واقع این روابط برای گازهای واقعی که چگالی بالایی دارند نتایجی تقریبی دارد. این روابط را می‌توانیم در شکلی کلی موسوم به قانون گازهای آرمانی به صورت زیر ترکیب کنیم :

$$\frac{PV}{nT} = \text{ثابت}$$

این مقدار ثابت را با R نشان می‌دهند و به آن ثابت جهانی گازها می‌گویند. آزمایش نشان می‌دهد که مقدار R برابراست با

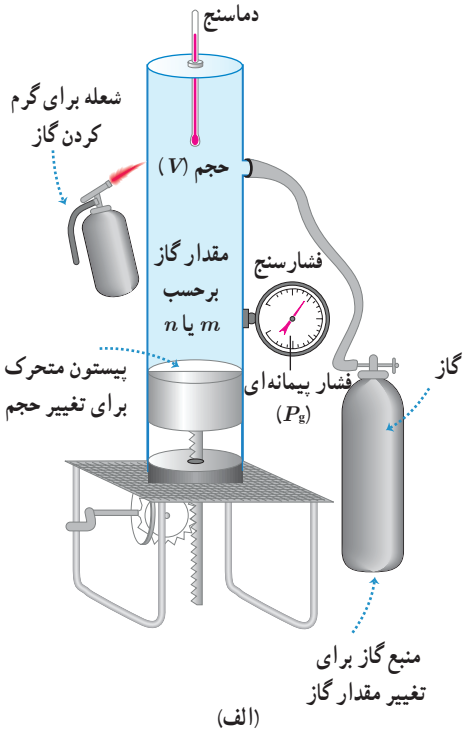
$$R = ۸/۳۱۴ \ \text{J/mol.K}$$

بنابراین، قانون گازهای کامل را می‌توان چنین نوشت :

$$PV = nRT \qquad (۱۸ــ۴)$$

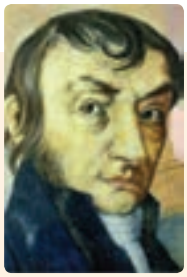
که در آن P برحسب پاسکال (Pa)، V برحسب مترمکعب (m^3)، n برحسب مول (mol) و T برحسب کلوین (K) است. شکل ۴ــ۴۸ الف طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و شکل ۴ــ۴۸ ب تصویری واقعی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

(ب)



(الف)

شکل ۴ــ۴۸ الف) طرحی از یک دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل و ب) تصویری واقعی از آن



آمدئو آووگادرو : *آمدئو آووگادرو* در سال ۱۷۷۶ در شهر تورین ایتالیا به دنیا آمد. پدرش قاضی مشهوری بود و علاقه داشت پسرش حرفهٔ او را پیشه کند. آمدئو فرد نابغه‌ای بود و در ۲۰ سالگی به دریافت دکترای حقوق نایل آمد. اما پس از سه سال کار و تجربه، دریافت که این حرفه خواسته‌هایش را برآورده نمی‌کند و از این‌رو به ریاضیات و فیزیک و شیمی روی آورد. در ۳۳ سالگی به مقام استادی فیزیک رسید. دو سال بعد، در سال ۱۸۱۱ نظریهٔ معروف مولکولی خود را در یک مجلهٔ فرانسوی به چاپ رساند. اما این نظریه در زمان خود مورد توجه قرار نگرفت و به فراموشی سپرده شد. آووگادرو با کوشش فراوان توانست فرق بین اتم و مولکول را کشف کند. او همچنین بیان کرد که حجم مساوی از هر گاز دارای تعداد مولکول یکسانی است، به‌شرط آنکه اندازه‌گیری در شرایط یکسانی از دما و فشار صورت گیرد. امروزه نظریهٔ آووگادرو به قانون آووگادرو معروف است و شهرتی عالم‌گیر دارد. آووگادرو بقیه عمرش را نیز صرف پژوهش و تدریس موضوع‌های علمی کرد و سرانجام در سال ۱۸۵۶ درگذشت، درحالی‌که دنیای علم آن روز به نبوغش پی نبرده بود.

مثال ۴ــ ۲۱

الف) تعداد مولکول‌های هوایی که در اتاقی به ابعاد ۴/۰۰ m ، ۶/۰۰ m ، ۳/۰۰ m در فشار ۱/۰۰ atm و دمای ۲۰°C وجود دارد چقدر است؟ ($R = ۸/۳۱ \text{J/mol.K}$)

ب) جرم هوای درون اتاق چقدر است؟ جرم مولی متوسط گازهای موجود در هوا، ۰/۰۲۹ kg/mol است.

پاسخ : توجه کنید که هوا به‌صورت تقریبی گاز آرمانی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین از قانون گازهای آرمانی (رابطهٔ ۴ــ ۲۰) استفاده می‌کنیم.

الف) در استفاده از قانون گازهای آرمانی باید مقادیر فشار مطلق هوا برحسب پاسکال، دما برحسب کلوین و حجم برحسب مترمکعب جای‌گذاری شود.

$$P = ۱/۰۰ \text{ atm} = (۱/۰۰ \times ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}) \text{Pa} = ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵} \text{ Pa}$$

$$V = (۴/۰۰ \text{m})(۶/۰۰ \text{m})(۳/۰۰ \text{m}) = ۷۲/۰ \text{m}^{۳}$$

$$T = (۲۷۳ + ۲۰) \text{K} = ۲۹۳ \text{K}$$

در نتیجه برای n داریم :

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(۱/۰۱ \times ۱۰^{۵} \text{Pa})(۷۲/۰ \text{m}^{۳})}{(۸/۳۱ \text{J/mol.K})(۲۹۳ \text{K})} = ۲/۹۹ \times ۱۰^{۳} \text{ mol}$$

با توجه به اینکه در هر مول از هوای درون اتاق به تعداد عدد آووگادرو، مولکول گاز وجود دارد، نتیجه می‌گیریم :

تعداد مولکول هوا = (تعداد مول)(عدد آووگادرو) = (۲/۹۹×۱۰^{۳}mol)(۶/۰۲ × ۱۰^{۲۳} مولکول/mol)=۱/۸۰×۱۰^{۲۷}

ب) با استفاده از رابطهٔ ۴ــ ۸ ($n = m/M$) جرم هوای درون اتاق را محاسبه می‌کنیم :

$$m = nM = (۲/۹۹ \times ۱۰^{۳} \text{ mol})(۰/۰۲۹ \text{ kg/mol}) = ۸۶/۷ \text{ kg}$$

مثال ۴ــ ۲۲

درون استوانه‌ای ۱۲L گاز اکسیژن با دمای ۷°C وجود دارد. فشار گاز درون استوانه را با فشارسنجی اندازه می‌گیریم. فشارسنج ۱۴atm را نشان می‌دهد. دمای گاز را به ۷۷°C و حجم آن را به ۲۵L می‌رسانیم. فشاری که فشارسنج در پایان نشان می‌دهد، چند اتمسفر است؟ فشار هوای بیرون استوانه ۱atm است. فرض کنید گاز درون استوانه، گاز آرمانی است.

پاسخ : می‌دانیم فشارسنج، فشار پیمانه‌ای را نشان می‌دهد و در قانون گازهای کامل باید از فشار مطلق استفاده کنیم. بنابراین :

$$\begin{cases} P_{۱} = P_{g۱} + P_{۰} = ۱۴ + ۱ = ۱۵ \text{atm} \\ V_{۱} = ۱۲ \text{ L} \\ T_{۱} = \theta_{۱} + ۲۷۳ = ۷ + ۲۷۳ = ۲۸۰ \text{K} \end{cases} \qquad \begin{cases} P_{۲} = ? \\ V_{۲} = ۲۵ \text{ L} \\ T_{۲} = \theta_{۲} + ۲۷۳ = ۷۷ + ۲۷۳ = ۳۵۰ \text{K} \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم :

$$\frac{P_{۱}V_{۱}}{T_{۱}} = \frac{P_{۲}V_{۲}}{T_{۲}} \Rightarrow \frac{۱۵ \times ۱۲}{۲۸۰} = \frac{P_{۲} \times ۲۵}{۳۵۰} \Rightarrow P_{۲} = ۹/۰ \text{atm}$$

بنابراین، فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با

$$P_{g۲} = P_{۲} - P_{۰} = ۹/۰ - ۱/۰ = ۸/۰ \text{atm}$$

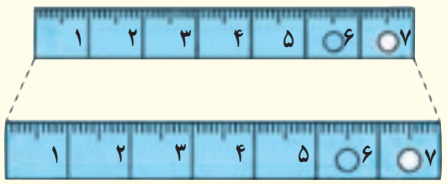
۴ـ۱ دماسنجی

۱ دماهای زیر را بر حسب درجهٔ سلسیوس و فارنهایت مشخص کنید :

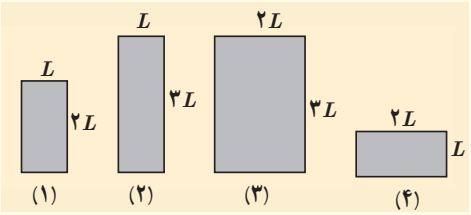
الف) ۰K ب) ۲۷۳K پ) ۳۷۳ K ت) ۵۴۶K

۲ برای اندازه‌گیری دمای یک جسم توسط دماسنج به چه نکاتی باید توجه کنیم؟ (راهنمایی : به نکاتی که در فصل ۱ خواندید نیز توجه کنید)

۴ـ۲ انبساط گرمایی



۳ شکل روبه‌رو، یک خط‌کش فلزی را که در آن سوراخی ایجاد شده است در دو دمای متفاوت نشان می‌دهد (برای روشن بودن مطلب، انبساط به‌صورت اغراق آمیزی رسم شده است.) از این شکل چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



۴ شکل روبه‌رو چهار صفحهٔ فلزی هم‌جنس به اضلاع متفاوت را در یک دما نشان می‌دهد. اگر دمای همهٔ آنها را به اندازهٔ یکسان زیاد کنیم،

الف) ارتفاع کدام صفحه یا صفحه‌ها بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

ب) مساحت کدام یک بیشتر افزایش پیدا می‌کند؟

پ) اگر در هر چهارتای آنها روزنهٔ کوچک هم‌اندازه‌ای وجود داشته باشد، افزایش قطر چهار روزنه در اثر افزایش دمای یکسان را با هم مقایسه کنید.

۵ یک بزرگراه از بخش‌های بتونی به طول ۲۵/۰ m ساخته شده است. این بخش‌ها در دمای ۱۰/۰°C، بتون‌ریزی و عمل آورده شده‌اند. برای جلوگیری از تاب برداشتن بتون در دمای ۵۰/۰°C، مهندسان باید چه فاصله‌ای را بین این قطعه‌ها در نظر بگیرند؟

$\alpha_{\text{بتون}} \approx ۱۴ \times ۱۰^{-۶} K^{-۱}$

۶ یک ظرف آلومینیمی با حجم ۴۰۰ cm^3 در دمای ۲۰/۰°C به‌طور کامل از گلیسیرین پر شده است. اگر دمای ظرف و گلیسیرین به ۳۰/۰°C برسد، چقدر گلیسیرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

۷ مقداری بنزین در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع $h=۱۰ m$ ریخته شده است. در دمای ۱۰°C− فاصلهٔ بین سطح بنزین تا بالای ظرف برابر $\Delta h=۵۰ cm$ است. اگر از انبساط ظرف در نتیجهٔ افزایش دما چشم‌پوشی شود، در چه دمایی بنزین از ظرف سرریز می‌شود؟

۸ در شکل روبه‌رو با کاهش دما، نوار دوفلزه به طرف پایین خم می‌شود. اگر یکی از نوارها، برنجی و نوار دیگر فولادی باشد؛

الف) نوار بالایی از چه جنسی است؟

ب) اگر نوارها را گرم کنیم به کدام سمت خم می‌شوند.

۹ طول خط‌های لوله گاز، 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 ۱۰°C− و در تابستان تا ۵۰°C+ برسد. جنس این لوله‌ها عموماً از فولاد با $\alpha \approx ۱۰ \times ۱۰^{-۶} K^{-۱}$

است. طول خط لوله، بین دو ایستگاه تهران ــ اصفهان تقریباً ۲۳۰km است.
الف) در اثر این اختلاف دما، این خط چقدر منبسط می‌شود؟
ب) چگونه می‌توان تأثیر این انبساط را برطرف کرد؟

۱۰ در یک روز گرم یک باری مخزنی حامل سوخت با ۳۰,۰۰۰L بنزین بارگیری شده است. دمای هوا در محل تحویل سوخت ۲۰/۰°C کمتر از محلی، است که در آنجا سوخت بار زده شده است. راننده چند لیتر سوخت را در این محل تحویل می‌دهد؟

۴ــ۳ گرما

۱۱ برای گرم کردن ۲۰۰g آب جهت تهیهٔ چای، از یک گرمکن الکتریکی غوطه‌ور در آب استفاده می‌کنیم. روی برچسب گرمکن ۲۰۰W نوشته شده است. با نادیده گرفتن اتلاف گرما، زمان لازم برای رساندن دمای آب از ۳۰/۰°C به ۱۰۰°C را محاسبه کنید.

۱۲ دمای یک قطعه فلز ۰/۶۰ کیلوگرمی را توسط یک گرمکن ۵۰ واتی در مدت ۱۱۰s از ۱۸°C به ۳۸°C رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژهٔ فلز چه مقداری را به‌دست می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این پاسخ از مقدار واقعی گرمای ویژه فلز بیشتر باشد یا کمتر؟ توضیح دهید.

۱۳ گرماسنجی به جرم ۲۰۰ گرم از مس ساخته شده است. یک قطعهٔ ۸۰ گرمی از یک مادهٔ نامعلوم همراه با ۵۰ گرم آب به درون گرماسنج ریخته می‌شود. اکنون دمای این مجموعه ۳۰°C شده است. در این هنگام ۱۰۰ گرم آب ۷۰°C به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل ۵۲°C می‌شود. گرمای ویژهٔ قطعه را محاسبه کنید.

۴ ــ ۴ تغییر حالت‌های ماده

۱۴ یکی از روش‌های بالابردن دمای یک جسم، دادن گرما به آن است. اگر به جسمی گرما دهیم، آیا دمای آن حتماً بالا می‌رود؟ توضیح دهید.

۱۵ قبل از تزریق دارو یا سرُم به یک بیمار، محل تزریق را با الکل تمیز می‌کنند. این کار سبب احساس خنکی در محل تزریق می‌شود. علت را توضیح دهید.

۱۶ کدام گزینه دربارهٔ فرایند ذوب نادرست است؟
الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر مواد، سبب پایین‌رفتن نقطهٔ ذوب می‌شود.
ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب کاهش اندک نقطهٔ ذوب آن می‌شود.
پ) فرایند ذوب، عملی گرماگیر است.
ت) گرمایی که جسم جامد در نقطهٔ ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی‌شود.

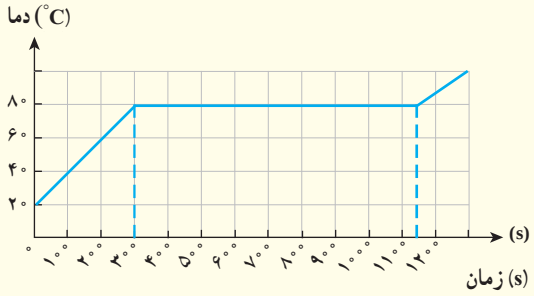
۱۷ کمترین گرمای لازم برای ذوب کامل ۲۰۰g نقره که در آغاز در دمای ۲۰/۰°C قرار دارد چقدر است؟ (فشار هوا را یک اتمسفر فرض کنید)

۱۸ یک راه برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد یک سالن سربسته در شب‌هنگام، وقتی که دمای زیر صفر پیش‌بینی شده است، قرار دادن تشت بزرگ پر از آب در سالن است. اگر جرم آب درون تشت ۱۵۰kg و دمای اولیهٔ آن ۲۰/۰°C باشد و همهٔ آن به یخ ۰/۰°C تبدیل شود، آب چقدر گرما به محیط پیرامونش می‌دهد؟

۱۹ یک گرمکن ۵۰ واتی به‌طورکامل در ۱۰۰ گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می‌شود.
الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از $20^{\circ}C$ به $25^{\circ}C$ می‌رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.
ب) چه مدت طول می‌کشد تا دمای آب درون گرماسنج از $25^{\circ}C$ به نقطهٔ جوش ($100^{\circ}C$) برسد؟
پ) چه مدت طول می‌کشد تا ۲۰ گرم آب در حال جوش درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۲۰ گرمکنی در هر ثانیه ۲۰۰/۰ ژول گرما می‌دهد. الف) چقدر طول می‌کشد تا این گرمکن ۰/۱۰۰ کیلوگرم آب $100^{\circ}C$ را به بخار آب $100^{\circ}C$ تبدیل کند؟ ب) این گرمکن در همین مدت، چه مقدار یخ $0^{\circ}C$ را می‌تواند به آب $0^{\circ}C$ تبدیل کند؟

۲۱ اگر به جسم جامدی که ابعاد آن به اندازهٔ کافی کوچک است با توان ثابتی گرما بدهیم نمودار دما ــ زمان آن به‌صورت کیفی مانند شکل روبه‌رو می‌شود. این نمودار در اینجا برای جسم جامدی به جرم ۵۰/۰ g رسم شده که توسط یک گرمکنِ ۱۰/۰ W گرم شده است.
الف) چقدر طول می‌کشد تا این جامد به نقطهٔ ذوب خود برسد؟
ب) گرمای ویژهٔ جامد و پ) گرمای نهان ذوب آن‌را محاسبه کنید.



۲۲ در چالهٔ کوچکی ۱/۰۰ kg آب $0^{\circ}C$ قرار دارد. اگر بر اثر تبخیر سطحی قسمتی از آب تبخیر شود و بقیهٔ آن یخ ببندد، جرم آب یخ‌زده چقدر می‌شود؟

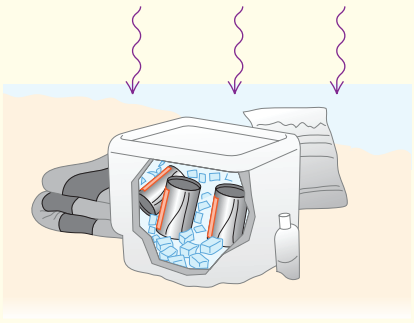
۲۳ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه‌های مهم تنظیم دمای بدن است.
الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم ۵۰/۰ kg به اندازهٔ $1/00^{\circ}C$ کاهش یابد؟ گرمای نهان تبخیر آب در دمای بدن ($37^{\circ}C$) برابر $2/42\times10^{6}J/kg$ و گرمای ویژهٔ بدن در حدود $3480J/kg.K$ است. ب) حجم آبی که شخص باید برای جبران آب تبخیر شده بنوشد، چقدر است؟

۴ــ۵ روش‌های انتقال گرما

۲۴ اگر شما یک تیر چوبی و یک لولهٔ فلزی سرد را که هم‌دما هستند لمس کنید، چرا حس می‌کنید که لوله سردتر است؟ چرا ممکن است دست شما به لوله بچسبد؟

۲۵ یک پالتو چگونه شما را گرم نگه می‌دارد؟ چرا استفاده از چند لباس زیر پالتو این عمل را تشدید می‌کند؟

۲۶ شیشهٔ پنجره‌ای دارای عرض ۲/۰ متر، ارتفاع ۱/۰ متر و ضخامت ۴/۰ mm است.
الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است $2/0^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم داخل اتاق است $7/0^{\circ}C$ است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه (با $k \simeq 1/0 W/m.K$) به بیرون اتاق انتقال پیدا می‌کند؟
ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می‌شود؟



۲۷ جعبهٔ یخدانی از جنس پلی‌استیرن با مساحت کل دیواره‌های $0/80 m^2$ و ضخامت دیواره‌های ۲/۰ cm در اختیار دارید. اختلاف دمای سطح داخلی و خارجی یخدان $20/0^{\circ}C$ است. در یک روز (۲۴h) چقدر یخ آب می‌شود؟ رسانندگی گرمایی پلی‌استیرن برابر است با $k = 0/010 W/m.K$.

۲۸ دوقوری همجنس و هم‌اندازه را درنظر بگیرید که سطح بیرونی یکی سیاه‌رنگ و دیگری سفیدرنگ است. هر دو را با آب داغ با دمای یکسان پر می‌کنیم. آب کدام قوری زودتر خنک می‌شود؟

۴ـ۶ قوانین گازها

۲۹ گازی در دمای $20^{\circ}C$ دارای حجم $100/0 cm^3$ است.الف) این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا در فشار ثابت، حجم آن $200/0 cm^3$ شود؟ ب) این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم $50/0 cm^3$ خواهد شد؟

۳۰ هوایی با فشار $1/0 atm$ درون استوانهٔ یک تلمبه دوچرخه به طول $24 cm$ محبوس است. راه‌های ورودی و خروجی هوای استوانه تلمبه را می‌بندیم. اکنون :

الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به $30/0 cm$ افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چقدر خواهد شد؟

ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس $3/0 atm$ شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۳۱ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا $17^{\circ}C$ است، فشارسنج، فشار درون لاستیک را $2/00$ اتمسفر نشان می‌دهد. پس از یک رانندگی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه‌گیری می‌شود. اکنون فشارسنج، $2/30$اتمسفر را نشان می‌دهد. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است؟ حجم لاستیک را ثابت و فشار جو را $1/00$ اتمسفر در نظر بگیرید.

۳۲ دما و فشار متعارف (STP)[۱] برای گاز، دمای $0^{\circ}C = 273K$ و فشار $1atm = 1/013 \times 10^5 Pa$ معرفی می‌شود. حجم یک مول گاز کامل در دما و فشار متعارف چقدر است؟

۳۳ یک حباب هوا به حجم $0/20 cm^3$ در ته یک دریاچه به عمق $40/0 m$ قرار دارد که دما در آنجا $4/0^{\circ}C$ است. حباب تا سطح آب بالا می‌آید که در آنجا دما $20^{\circ}C$ است (دمای هوای حباب با دمای آب اطراف آن یکسان است). در لحظه‌ای که حباب به سطح آب می‌رسد حجم آن چقدر است؟ فشار هوا در سطح دریاچه را $1/01 \times 10^5 Pa$ درنظر بگیرید.

۱ـ Standard Temperature and Pressure