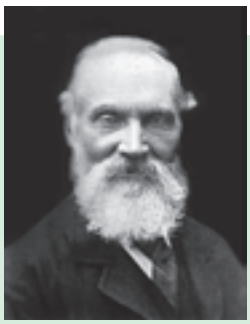
۶ گرما و قانون گازها

کویر لوت با دمای بیشینه‌ای در حدود $۷۰^{\circ}C$ در روزهای آفتابی یکی از گرم‌ترین نقاط جهان است.

چرا پارچهٔ خیسی که روی بندی پهن شده است، ساعتی بعد خشک می‌شود؟ چگونه بادهای ساحلی به‌وجود می‌آیند؟ چگونه شیشه‌های دوجداره مانع از اتلاف گرما می‌شوند؟ چگونه با اسپری کردن باغ‌های میوه می‌توان از یخ‌زدن آنها در شب‌های سرد جلوگیری کرد؟ چرا بیشتر پل‌ها به‌صورت بخش‌هایی مجزا ساخته می‌شوند که فاصلهٔ کمی بین آنها وجود دارد؟ پالتوها چگونه ما را از سرما محافظت می‌کنند؟ چگونه موهای خرس‌های قطبی می‌تواند آنها را از سرمای کشندهٔ قطب در امان نگه دارد؟ چگونه قندیل‌های یخی گسترش می‌یابند؟

پاسخ این پرسش‌ها و بسیاری از پرسش‌های مشابه را می‌توان با بررسی گرما و اثرهای آن به‌دست آورد. شما در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با مفهوم‌های فیزیکی دما و گرما آشنا شدید. در این فصل ضمن یادآوری آن مفهوم‌ها به بررسی روش گرماسنجی و اندازه‌گیری گرمای ویژه، تغییر حالت مواد و گرمای ذوب و تبخیر می‌پردازیم. علاوه بر این، اثر تغییر دما بر طول یا حجم جامدها، مایع‌ها و گازها را بررسی می‌کنیم و راه‌های انتقال گرما را مورد بحث قرار می‌دهیم و سرانجام قانون گازها را به‌طور مختصر بررسی می‌کنیم.



ویلیام تامسون کلوین[1]
ریاضیدان، فیزیکدان و مهندس بریتانیایی در ۲۸ ژوئن ۱۸۲۴م. (۱۲۰۳ هـ.ش) در شهر بلفاست ایرلند به دنیا آمد. او تحصیلات دانشگاهی خود را در دانشگاه گلاسکو به انجام رسانید و در این دوران، غیر از اختراعات مختلف، کارهای مهمی در تحلیل ریاضی‌وار الکتریسیته و نیز فرمول‌بندی قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام داد و نقشی مهم در احیای رشتهٔ فیزیک در عصر مدرن ایفا کرد. با این حال، عمدهٔ شهرت کلوین به‌خاطر تعیین دقیق صفر مطلق برابر با $-273/15^{\circ}C$ است و این در حالی است که پیش از او *سَدی کارنوی* فرانسوی در سال ۱۸۲۴، یعنی همان سالی که کلوین زاده شد، مقدار ۲۶۷- را برای دمای صفر مطلق پیشنهاد داده بود. با این وصف، یکای دما در SI به افتخار این کار کلوین، به اسم او نامگذاری شده است. او همچنین 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 ۱۷ دسامبر ۱۹۰۷ م. (۱۲۸۶ هـ.ش) در سن ۸۳ سالگی در اسکاتلند دیده از جهان فرو بست.

۶ـ۱ دما، انرژی درونی و گرما

دما از دیدگاه میکروسکوپی به انرژی جنبشی مولکول‌های ماده بستگی دارد ولی این ارتباط بسیار پیچیده است و از این‌رو شاید شروع خوبی برای تعریف دما نباشد. در این کتاب، دما را از دیدگاه ماکروسکوپی بررسی می‌کنیم. از این دیدگاه، دما کمیتی است که میزان سردی و گرمی اجسام را مشخص می‌کند. به این منظور لازم است یک مقیاس دمایی به‌وجود آوریم و برای این کار می‌توان از هر مشخصهٔ قابل اندازه‌گیری‌ای بهره بگیریم که با گرمی وسردی جسم تغییر می‌کند که به آن کمیت دماسنجی می‌گوییم.

فعالیت ۶ـ۱

در فصل ۱ گفتیم برای آنکه تعریف یک کمیت فیزیکی کامل شود، باید یکای آن و نیز روش و ابزار اندازه‌گیری آن مشخص شود. دما را به عنوان یک کمیت فیزیکی تعریف کنید، یعنی در مورد ابزار و روش اندازه‌گیری آن توضیح دهید و یکای آن‌را مشخص کنید. (برای این کار می‌توانید از کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه و یا هر کتاب فیزیک مناسب دیگری استفاده کنید.)

مقیاس‌های دما : یکای متداول دما درجهٔ سلسیوس است که با نماد $^{\circ}C$ نمایش داده می‌شود. دما بر حسب درجهٔ سلسیوس را معمولاً با θ نشان می‌دهند.

۱ـ William Thomson Baron Kelvin

در SI به جای سلسیوس، یکای دیگری به نام کلوین را به‌کار می‌برند که با نماد K نمایش داده می‌شود. دما بر حسب کلوین را معمولاً با T نشان می‌دهند. رابطهٔ میان دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلوین به‌صورت زیر است :

$$T = \theta + ۲۷۳ \qquad (۱_۶)$$

بنا به رابطهٔ ۶ــ۱، صفرِ کلوین برابر $-۲۷۳^{\circ}C$ است[۱]. یکای رایج دیگر دما، فارنهایت است که امروزه در صنعت کاربرد فراوانی دارد (شکل ۶ــ۱).

شکل ۶ــ۱ــ مقایسهٔ یکاهای سلسیوس و فارنهایت

$$\text{دما در مقیاس فارنهایت} = \frac{۹}{۵}\theta + ۳۲$$

تمرین ۶ــ۱

دمای ذوب یخ، $۰^{\circ}C$، دمای جوش آب، $۱۰۰^{\circ}C$ و دمای بدن انسان سالم، $۳۷^{\circ}C$ است. هر یک از این دماها برابر چند کلوین و چند درجهٔ فارنهایت است؟

مثال ۶ــ۱

نشان دهید که اختلاف بین دو دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلوین با هم برابر است.

پاسخ :

$$\Delta T = T_۲ - T_۱$$
$$= (\theta_۲ + ۲۷۳) - (\theta_۱ + ۲۷۳)$$
$$= \theta_۲ - \theta_۱$$

در نتیجه :

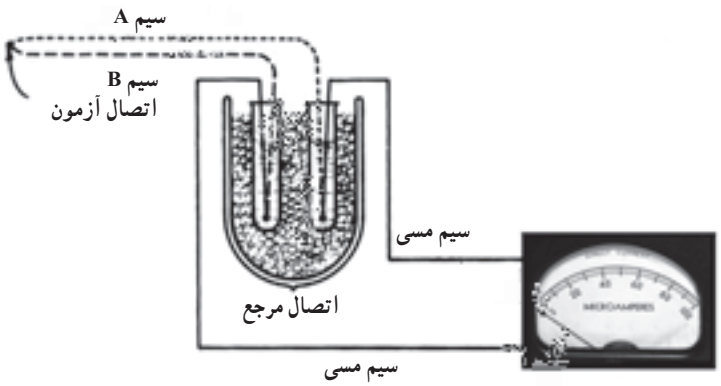
$$\Delta T = \Delta\theta$$

دماسنجی : همان‌طور که پیش‌تر گفتیم برای دماسنجی از هر خاصیت قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنیم که با گرمی و سردی جسم تغییر می‌کند. مثلاً در دماسنج‌های جیوه‌ای یا الکلی که در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت، کمیت دماسنجی ارتفاع مایع درون لولهٔ دماسنج است. دماسنج ترموکوپل (شکل ۶ــ۲) نمونهٔ دیگری از دماسنج‌هاست که کمیت دماسنجی در آن جریان الکتریکی است.

مطابق شکل ۶ــ۲ دو سیم فلزی غیرهمجنس A و B از طرفی در دمای ذوب یخ نگه داشته شده‌اند و از طرف دیگر در مکانی به هم متصل‌اند که می‌خواهیم دمای مجهول آن را به‌دست آوریم. این مجموعه شامل دو اتصال با سیم‌های مسی رابط است که به یک آمپرسنج یا گالوانومتر بسته می‌شود. با افزایش دمای مورد اندازه‌گیری، شدت جریان در مدار بیشتر می‌شود. اگر آزمایش را چندین بار و برای دماهای

۱ــ صفر کلوین به‌طور دقیق برابر $-۲۷۳/۱۵^{\circ}C$ است ولی برای محاسبه‌های این کتاب همان مقدار تقریبی $-۲۷۳^{\circ}C$ مناسب است.

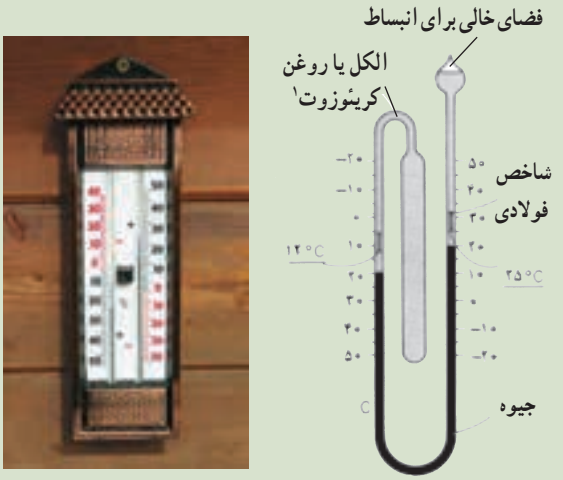
متفاوت تکرار کنیم می‌توانیم شدت جریان مربوط به هر دمایی را مشخص کنیم. گسترهٔ دماسنجی یک ترموکوپل می‌تواند از صفر تا حدود $1600^{\circ}C$ باشد. مزیت ترموکوپل در این است که به خاطر جرم کوچک، خیلی سریع با دستگاهی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود به حال تعادل گرمایی می‌رسد.



شکل ۶ــ۲ــ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل

دماسنج بیشینه ـ کمینه : این دماسنج نوع ویژه‌ای از دماسنج‌های مایعی است که بیشینه و کمینهٔ دما را در یک مدت زمان معین نشان می‌دهد. از این دماسنج معمولاً در مراکز پرورش گل وگیاه، باغداری، هواشناسی و ... استفاده می‌کنند. شکل زیر طرح‌واره‌ای از این نوع دماسنج را نشان می‌دهد.

هنگامی که دما بالا می‌رود، به سبب انبساط الکل (در لولهٔ سمت چپ شکل)، جیوه در لولهٔ سمت راست به بالا رانده می‌شود و شاخص فولادی لولهٔ سمت راست را با خود بالا می‌برد.



شکل ۶ــ۳ــ طرح‌واره‌ای از یک دماسنج بیشینه ــ کمینه و شکلی واقعی از یکی از انواع آن

اگر سطح جیوه در لولهٔ سمت راست پایین بیاید، شاخص فولادی، که به آن فنرهای ریزی متصل است، همراه با آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای بیشینه می‌ایستد.

هنگامی که الکل به علت کاهش دما منقبض می‌شود، جیوه از طرف چپ لولهٔ U‌شکل بالا می‌رود و شاخص فولادی دیگر را در این طرف لوله بالا می‌راند. اگر سطح جیوه در لوله سمت چپ پایین بیاید شاخص فولادی سمت چپ نیز که به آن فنرهای ریزی متصل است، همراه با آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای کمینه می‌ایستد.

با استفاده از آهنربا، این دو شاخص در پایان مدت زمان مورد نظر به سطح جیوه برگردانده می‌شوند.

در طراحی جدید این نوع دماسنج‌ها به علت سمی‌بودن جیوه از مایع ترکیبی جدیدی به‌عنوان جایگزین استفاده می‌شود.

مطالعهٔ آزاد

۱ــ Creosote

گرما و تعادل گرمایی : در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که گرما مقدار انرژی‌ای است که به دلیل اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می‌شود. با توجه به قانون پایستگی انرژی، انرژی‌ای که جسم با دمای بالاتر از دست می‌دهد، برابر انرژی‌ای است که جسم با دمای پایین‌تر می‌گیرد. این مبادلهٔ گرما تا زمانی ادامه می‌یابدکه دمای دو جسم یکسان شود، و از آن پس دیگر گرمایی بین دو جسم مبادله نمی‌شود. در این حالت می‌گوییم دو جسم با هم در تعادل گرمایی‌اند و دمای مشترک آنها را دمای تعادل می‌نامیم.

برای مثال اگر یک قطعه فلز داغ را در یک ظرف آب سرد بیندازیم، گرما از قطعه فلز با دمای بالاتر به آب با دمای پایین‌تر، شارش می‌کند. این شارش گرما تا زمانی ادامه می‌یابد که قطعهٔ فلز و آب هم‌دما شوند و به دمای تعادل برسند.

تغییر دما ــ گرمای ویژه : در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه مقدار گرمای لازم برای ایجاد یک تغییر دمای معین را محاسبه کردیم. دیدیم که برای ایجاد یک تغییر معین در دمای جسم‌های مختلف به مقدارهای متفاوت گرما نیاز است. گرمای ویژه هر جسم را که با نماد c نمایش داده می‌شود به صورت زیر تعریف کردیم :

گرمای ویژهٔ 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.

به این ترتیب گرمای Q برای ایجاد تغییر دمای ΔT یا $\Delta\theta$ برای m کیلوگرم از یک جسم برابر است با

$$Q = mc\Delta\theta = mc\,(\theta_2 - \theta_1) = mc(T_2 - T_1) \qquad (۶ــ۲)$$

در این رابطه‌ها Q (گرما) بر حسب ژول، m (جرم) بر حسب کیلوگرم، $\Delta\theta$ (تغییر دما) برحسب درجهٔ سلسیوس و ΔT بر حسب کلوین است. یکای c با استفاده از رابطه ۶ــ۲، $J/kg.^\circ C$ یا $J/kg.K$ است. گرمای ویژهٔ برخی از مواد در جدول ۶ــ۱ داده شده است.

جدول ۶ــ۱ــ گرمای ویژه برحسب ژول بر کیلوگرم کلوین

ماده	گرمای ویژه	ماده	گرمای ویژه
سرب	۱۳۰	بتون	۸۰۰
جیوه	۱۴۰	گرانیت	۸۰۰
نقره	۲۴۰	سنگ مرمر	۸۸۰
برنج	۳۸۰	آلومینیم	۹۰۰
مس	۳۹۰	یخ ($0^\circ C$)	۲۱۰۰
فولاد[۱]	۴۵۰	اتانول	۲۴۳۰
استیل ضد زنگ	۴۹۰	آب دریا	۳۹۰۰
شیشه	۵۰۰ــ۸۵۰	آب	۴۲۰۰

۱ــ آلیاژ آهن با ۲٪ کربن

اگر دمای جسم در اثر مبادلهٔ گرما بالا رود $\theta_2 > \theta_1$ و $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 > 0$ و رابطهٔ ۶ــ۲ مقدار مثبتی برای Q به‌دست می‌دهد ($Q > 0$) در حالی که اگر دمای جسم با مبادلهٔ گرما کاهش یابد، $\theta_2 < \theta_1$ و $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 < 0$، و مقداری که برای Q به‌دست می‌آید منفی خواهد بود ($Q < 0$).

پس می‌توان گفت که علامت Q در رابطهٔ ۶ــ۲ مشخص می‌کند که جسم گرما گرفته است ($Q > 0$) یا گرما داده است ($Q < 0$). از این پس در این کتاب همواره گرما برای جسمی که گرما را می‌گیرد مثبت و برای جسمی که گرما را از دست می‌دهد منفی در نظر گرفته می‌شود.

مثال ۶ــ۲

یک قطعهٔ ۱۰۰ گرمی از مس را که دمای آن $90^\circ C$ است در یک ظرف آب سرد می‌اندازیم، دمای تعادل به $24^\circ C$ می‌رسد. گرمای Q را برای مس حساب کنید.

پاسخ : $m = 100g = 0/1kg$ ، $\theta_1 = 90^\circ C$ ، $\theta_2 = 24^\circ C$ و گرمای ویژه مس با استفاده از جدول ۶ــ۱ برابر با $c = 390 J/kg.^\circ C$ است.

از رابطهٔ ۶ــ۲ برای مس، به‌دست می‌آوریم :

$$Q = mc\Delta\theta = 0/1 \times 390 \times (24-90)$$
$$= 39 \times (-66) = -2574J \simeq -2/6kJ$$

علامت منفی که در محاسبهٔ Q به‌دست آمده، نشان می‌دهد که مس گرما از دست داده است.

مثال ۶ــ۳

فرستنده‌ها و گیرنده‌های الکترونیکی درون ماهواره‌ها نیز مانند فرستنده‌ها و گیرنده‌های زمینی دارای یک بازده مشخص هستند و تنها بخشی از انرژی دریافتی را به انرژی مورد نظر تبدیل می‌کنند. فرض کنید انرژی‌ای که چنین دستگاهی از سلول‌های خورشیدی متصل به ماهواره در هر ثانیه دریافت می‌کند ۱۰J و انرژی‌ای که فرستندهٔ امواج به سمت زمین گسیل می‌کنند ۳J باشد. همچنین فرض کنید جنس این دستگاه از سیلیکون با گرمای ویژهٔ $700 J/kg.^\circ C$ و جرم آن ۰/۵ کیلوگرم است. در مدت ۱۰۰ ثانیه :

الف) دستگاه چقدر انرژی دریافت و چقدر انرژی گسیل کرده است؟

ب) با توجه به پایستگی انرژی، افزایش انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

پ) افزایش انرژی درونی، معادل گرمایی است که سبب افزایش دمای دستگاه می‌شود. افزایش دمای دستگاه چقدر است؟

پاسخ :

الف) اگر انرژی را با E و توان را با P نشان دهیم، $E = Pt$ است و درنتیجه،

$$E_{\text{دریافت}} = P_{\text{دریافت}}\, t = 10 \times 100 = 1000J$$
$$E_{\text{گسیل}} = P_{\text{گسیل}}\, t = 3 \times 100 = 300J$$

ب) اگر تغییر انرژی درونی دستگاه را با ΔU نمایش دهیم، با استفاده از قانون پایستگی انرژی داریم :

$$\Delta U = E_{\text{دریافت}} - E_{\text{گسیل}} = 1000 - 300 = 700J$$

پ)

$$\Delta U = Q = mc\Delta\theta$$

$$۷۰۰ = ۰/۵ \times ۷۰۰ \times \Delta\theta \Rightarrow \Delta\theta = ۲^\circ C$$

این افزایش دما دائمی نیست و پس از مدتی دمای دستگاه ثابت می‌ماند. پس از آنکه دمای دستگاه به مقدار معینی رسید، سازوکارهایی وجود دارد که مانع از افزایش بیشتر دمای دستگاه می‌شود.

دمای تعادل : اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند و پس از مدتی همدما شوند، دمای تعادل را می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند؛ برای این اجسام $Q<۰$ است. بقیهٔ اجسام گرما می‌گیرند؛ برای این اجسام $Q>۰$ است. بنا به قانون پایستگی انرژی همان‌قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند. یعنی حاصل جمع این Qها صفر است :

$$Q_۱ + Q_۲ + Q_۳ + \ldots = ۰ \qquad (۶-۳)$$

مثال ۶-۴

یک قطعهٔ ۱۴۰ گرمی آلومینیم را که دمای آن $۸۰^\circ C$ است در ظرف عایقی که حاوی ۲۵۰g آب در دمای $۲۲^\circ C$ است می‌اندازیم، دمای تعادل را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و آب چشم‌پوشی کنید.

پاسخ : در این مثال دو جسم داریم که تغییر دما داده‌اند، برای سادگی مشخصه‌های آنها را با زیرنویس‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهیم، یعنی :

$$\text{جرم آلومینیم} = m_۱ = ۱۴۰g = ۰/۱۴kg$$

$$\text{دمای اولیهٔ آلومینیم} = \theta_۱ = ۸۰^\circ C$$

و از جدول ۶-۱

$$\text{گرمای ویژهٔ آلومینیم} = c_۱ = ۹۰۰ J/kg.^\circ C$$

و همین‌طور برای آب داریم :

$$\text{جرم آب} = m_۲ = ۲۵۰g = ۰/۲۵kg$$

$$\text{دمای اولیهٔ آب} = \theta_۲ = ۲۲^\circ C$$

و از جدول ۶-۱

$$\text{گرمای ویژهٔ آب} = c_۲ = ۴۲۰۰ J/kg.^\circ C$$

دمای تعادل که دمای نهایی مشترک آب و آلومینیم است را با θ نمایش می‌دهیم. آنگاه بنا به رابطهٔ ۶-۳ داریم :

$$Q_۱ + Q_۲ = ۰$$

$$m_۱c_۱(\theta - \theta_۱) + m_۲c_۲(\theta - \theta_۲) = ۰$$

$$۰/۱۴ \times ۹۰۰ \times (\theta - ۸۰) + ۰/۲۵ \times ۴۲۰۰ \times (\theta - ۲۲) = ۰$$

درنتیجه :

$$\theta \simeq ۲۸^\circ C$$

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 ۶ــ۳ معادله‌ای به‌دست می‌آوریم که می‌توان دمای تعادل را از آن محاسبه کرد :

$$m_1c_1(\theta-\theta_1)+m_2c_2(\theta-\theta_2)+m_3c_3(\theta-\theta_3)+\ldots=0 \qquad (۴ــ۶)$$

از معادلهٔ ۶ــ۴ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژه یک جسم نیز استفاده کنیم.

مثال ۶ــ۵

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

پاسخ : با استفاده از داده‌های این مثال و جدول ۶ــ۱ داریم :

آب : $m_1=500g=0/5kg\ ,\ \theta_1=20^\circ C\ ,c_1=4200J/kg.^\circ C$

مس : $m_2=100g=0/1kg\ ,\ \theta_2=50^\circ C\ ,c_2=390J/kg.^\circ C$

فلز : $m_3=150g=0/15kg\ ,\ \theta_3=60^\circ C\ ,c_3=?$

دمای تعادل : $\theta=22^\circ C$

با استفاده از رابطهٔ ۶ــ۴ داریم :

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

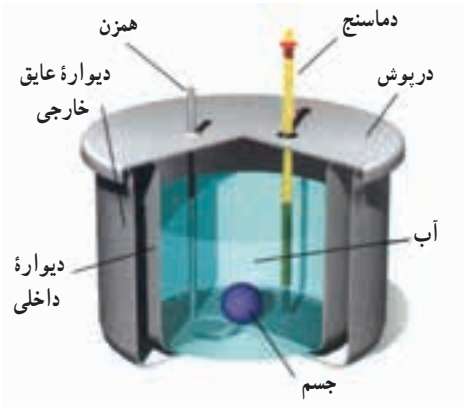
$$0/5\times4200\times(22-20)+0/1\times390(22-50)+0/15\times c_3\times(22-60)=0$$

درنتیجه

$$c_3\simeq545\ J/kg.^\circ C$$

تمرین ۶ــ۲

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



شکل ۶ــ۴ــ طرحی از نمای داخلی و اجزای یک گرماسنج

گرماسنج و گرماسنجی : گرماسنج که به آن کالری‌متر نیز می‌گویند و در شکل ۶ــ۴ نشان داده شده است، ظرفی فلزی و درپوش‌دار است که به‌خوبی عایق‌بندی گرمایی شده است. این ظرف در آزمایش‌های گرماسنجی مانند تعیین گرمای ویژهٔ اجسام به‌کار می‌رود. در گرماسنج مقداری آب با جرم معلوم می‌ریزیم و پس از همدما شدن آب و گرماسنج، دمای آب را اندازه می‌گیریم. سپس جسمی که می‌خواهیم گرمای ویژه‌اش را پیدا کنیم و جرم و دمای اولیهٔ آن را اندازه گرفته‌ایم، درون گرماسنج قرار می‌دهیم و 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 ۶ــ۳ و ۶ــ۴ و با چشم‌پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادلهٔ گرما داریم :

$$Q_{آب} + Q_{جسم} + Q_{ظرف} = ۰$$

$$m_{آب}\, c_{آب}\,(\theta - \theta_{۱(آب)}) + m_{جسم}\, c_{جسم}\,(\theta - \theta_{۱(جسم)}) + m_{ظرف}\, c_{ظرف}\,(\theta - \theta_{۱(ظرف)}) = ۰$$

به کمک این رابطه می‌توانیم گرمای ویژهٔ جسم را به‌دست آوریم. حاصل‌ضرب جرم در گرمای ویژهٔ یک جسم را ظرفیت گرمایی آن جسم می‌نامند و آن را با C نشان می‌دهند. یکای این کمیت، J/K یا $J/^{\circ}C$ است. معمولاً در مورد گرماسنج به جای آنکه جرم و گرمای ویژهٔ ظرف گرماسنج را جداگانه معلوم کنند، ظرفیت گرمایی ظرف گرماسنج را مشخص می‌کنند.

مثال ۶ــ۷

قطعه‌ای فلزی به جرم ۵۵۰g و دمای $۷۵^{\circ}C$ که گرمای ویژه‌اش نامعلوم است را درون گرماسنجی حاوی ۵۰۰g آب $۱۵/۵^{\circ}C$ می‌اندازیم. ظرف گرماسنج آلومینیومی و جرم آن ۱۰۰g است. دمای تعادل مجموعه $۱۸/۸^{\circ}C$ می‌شود.

الف) گرمای ویژهٔ قطعه فلز چقدر است؟ با مراجعه به جدول ۶ــ۱ تعیین کنید این قطعه فلز از چه جنسی می‌تواند باشد؟

ب) با چشم‌پوشی از مبادلهٔ گرما با ظرف گرماسنج، گرمای ویژهٔ قطعه فلز را دوباره بیابید.

پاسخ :

الف)

$$Q_{آب} + Q_{جسم} + Q_{ظرف} = ۰$$

$$m_{آب}\, c_{آب}\,(\theta - \theta_{۱(آب)}) + m_{جسم}\, c_{جسم}\,(\theta - \theta_{۱(جسم)}) + m_{ظرف}\, c_{ظرف}\,(\theta - \theta_{۱(ظرف)}) = ۰$$

$$۰/۵۰۰ \times ۴۲۰۰ \times (۱۸/۸ - ۱۵/۵) + ۰/۵۵۰ \times c_{جسم}\,(۱۸/۸ - ۷۵) + ۰/۱۰۰ \times ۹۰۰\,(۱۸/۸ - ۱۵/۵) = ۰$$

$$۶۹۳۰ - ۳۰/۹۱\, c_{جسم} + ۲۹۷ = ۰ \Rightarrow c_{جسم} \simeq ۲۳۴ \frac{J}{kg.^{\circ}C}$$

با مراجعه به جدول ۶ــ۱ درمی‌یابیم که این فلز می‌تواند نقره باشد.

ب) با چشم‌پوشی از مبادلهٔ گرما با ظرف گرماسنج داریم :

$$Q_{آب} + Q_{جسم} = ۰$$

$$m_{آب}\, c_{آب}\,(\theta - \theta_{۱(آب)}) + m_{جسم}\, c_{جسم}\,(\theta - \theta_{۱(جسم)}) = ۰$$

$$۰/۵۰۰ \times ۴۲۰۰\,(۱۸/۸ - ۱۵/۵) + ۰/۵۵۰ \times c_{جسم}\,(۱۸/۸ - ۷۵) = ۰$$

$$۶۹۳۰ - ۳۰/۹۱\, c_{جسم} = ۰ \Rightarrow C_{جسم} \simeq ۲۲۴ \frac{J}{kg.^{\circ}C}$$

با مقایسهٔ پاسخ‌های الف و ب معلوم می‌شود که اثر ظرف گرماسنج در مبادلهٔ گرما ناچیز است.

آزمایش ۶ـ۱

وسیله‌های آزمایش : 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 داغ‌شده را توسط انبر به‌سرعت درون گرماسنج بیندازید.

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

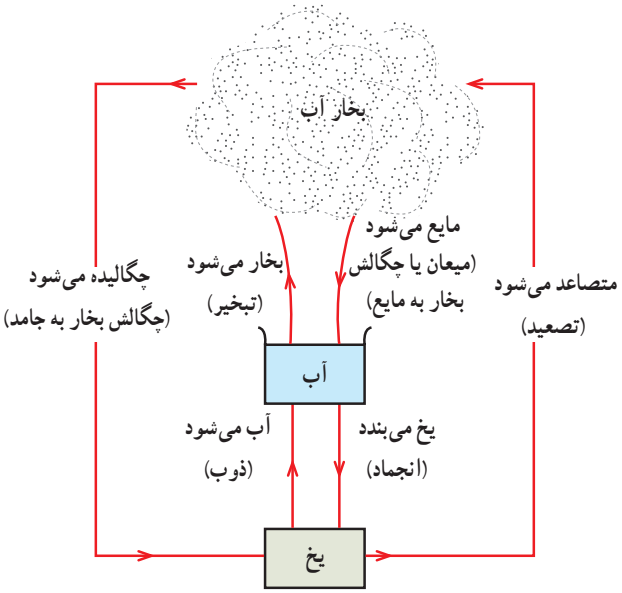
۷ــ با استفاده از معادلهٔ زیر که از رابطهٔ ۶ــ۴ به‌دست آمده است،

$$m_{آب}\, c_{آب}\,(\theta-\theta_{۱آب})+m_{جسم}\, c_{جسم}\,(\theta-\theta_{۱جسم})+C_{گرماسنج}\,(\theta-\theta_{۱گرماسنج})=۰$$

گرمای ویژهٔ جسم فلزی را به‌دست آورید.

۶ــ۲ حالت‌های ماده

همان‌طورکه در فصل ۵ دیدیم موادی که در اطراف ما وجود دارند در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز یافت می‌شوند. برای مثال $H_۲O$ هم به حالت جامد (یخ) و هم به حالت مایع (آب) و هم به حالت گاز (بخار آب) یافت می‌شود. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. برای مثال در شکل ۶ــ۵ انواع تغییر حالت‌هایی که برای آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه‌اند.



شکل ۶ــ۵ــ انواع تغییر حالت‌های آب

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 میعان یا چگالش بخار به مایع می‌نامیم.

امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم و بدون گذر از حالت مایع صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، تصعید و تغییر حالت وارون آن یعنی از بخار به جامد چگالش بخار به جامد گفته می‌شود. برای مثال نفتالین در دمای اتاق به‌طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود و 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 به مایع ومایع به بخار یا گاز را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم.

ذوب : پیش از این دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرمادادن 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 ذوب‌شدن می‌کند و به مایع تبدیل می‌شود. این دمای ثابت را که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد دمای ذوب یا نقطهٔ ذوب و به عبارتی دمای گذار جامد به مایع می‌نامند. معمولاً حجم جامدهای بلوری هنگام ذوب‌شدن افزایش می‌یابد، زیرا حجمی که بلور با آرایش منظم مولکول‌ها در حالت جامد اشغال می‌کند نسبت به این حجم در حالت مایع که آرایش مولکولی نامنظمی دارد، کمتر است.

برخلاف جامدهای خالص و بلورین، جامدهای بی‌شکل مانند شیشه و قیر نقطهٔ ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع، وقتی این مواد را گرم می‌کنیم پیش از ذوب‌شدن خمیری شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به‌تدریج ذوب می‌شوند[۱].

معمولاً افزایش فشار وارد بر جسم سبب بالارفتن نقطهٔ ذوب جسم می‌شود. در برخی اجسام مانند یخ، افزایش فشار به کاهش نقطهٔ ذوب می‌انجامد. نقطهٔ ذوب یخ در فشار یک اتمسفر برابر صفر درجهٔ سلسیوس است.

فعالیت ۷ـ۲

دربارهٔ علت دیرتر آب شدن برف روی قلهٔ کوه‌ها تحقیق کنید. نتیجهٔ تحقیق خود را به کلاس گزارش دهید.

عمل ذوب، فرایندی گرماگیر است. یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود. این گرما دمای جسم را تغییر نمی‌دهد بلکه سبب تغییر حالت آن می‌شود.

گرمای لازم برای تغییر حالت جسم از جامد به مایع، در دمای ذوب، با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم جسم را گرمای ذوب (یا گرمای نهان ذوب) می‌نامیم و آن را با L_F نشان می‌دهیم[۲] :

$$L_F = \frac{Q}{m}$$

۱ــ درست‌تر آن است که بگوییم موادی مانند شیشه یا قیر که ساختار بلورین ندارند و در فیزیک به آنها **آمورف** گفته می‌شود، هنگام ذوب یا انجماد، تغییر حالت (فاز) نمی‌دهند. قیر یا شیشه هنگام ذوب یا انجماد فقط شل یا سفت می‌شوند و ساختار مولکولی آنها (برخلاف جامدهای بلورین) تغییر نمی‌کند. به همین دلیل برخی کتاب‌ها، شیشه را مایع سِفت نیز می‌گویند.

۲ــ زیرنویس F حرف اول واژهٔ انگلیسی Fusion به معنای ذوب است.

گرمای ذوب به جنس جسم بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. بنابراین گرمای لازم برای ذوب جسم جامدی به جرم m و گرمای ذوب L_F از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[1].

$$Q = mL_F \qquad (۵ــ۶)$$

گرمای ذوب و نقطهٔ ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقدارها برای برخی از مواد در جدول ۶ــ۲ داده شده است.

جدول ۶ــ۲ــ نقطهٔ ذوب و گرمای ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطهٔ جوش (°C)	گرمای ذوب (kJ/kg)
هیدروژن	−۲۵۹	۵۸/۶
اکسیژن	−۲۱۸	۱۳/۸
ازت	−۲۱۰	۲۵/۵
جیوه	−۳۹	۱۱/۸
یخ	۰	۳۳۳/۷
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۳	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

مثال ۶ــ۷

فلز گالیم (Ga) عنصر سی‌ویکم جدول تناوبی عناصر است. دمای ذوب این فلز ۲۹/۸°C و گرمای ذوب آن ۸۰/۴kJ/kg است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود هرگاه این فلز را در دست بگیریم شروع به ذوب‌شدن می‌کند. حساب کنید که یک قطعهٔ ۱۰ گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطهٔ ذوب خود به‌طور کامل ذوب شود.

پاسخ :

$$Q = mL_F = (۱۰\times۱۰^{-۳})\,(۸۰/۴\times۱۰^{۳}) = ۸۰۴\,J$$

۱ــ پیش از این در کتاب‌های درسی گرمای لازم برای ذوب هر جسم جامد، یعنی Q، را گرمای نهان ذوب و L_F را گرمای نهان ویژهٔ ذوب می‌نامیدند که این نام‌گذاری امروزه چندان مرسوم نیست.

انجماد : وقتی از مایع خالصی گرما می‌گیریم، سرد می‌شود تا به نقطهٔ انجماد خود برسد. اگر گرماگرفتن از مایع را در این دما ادامه دهیم مایع شروع به جامدشدن می‌کند، بی‌آنکه دمای آن کاهش یابد. دمای نقطهٔ ذوب هر ماده با دمای انجماد آن در فشار یکسان برابر است. یعنی برای مثال اگر در فشار یک اتمسفر به یخ صفر درجهٔ سلسیوس گرما دهیم شروع به ذوب می‌کند و نیز اگر در همان فشار از آب صفر درجهٔ سلسیوس گرما بگیریم شروع به انجماد می‌کند.

هر جسم به هنگام انجماد همان‌قدر گرما از دست می‌دهد که به هنگام ذوب می‌گیرد. همان‌طورکه قبلاً دیدیم وقتی جسم گرما از دست می‌دهد $Q<0$ است، پس برای محاسبهٔ گرما به هنگام انجماد مایعی به جرم m داریم،

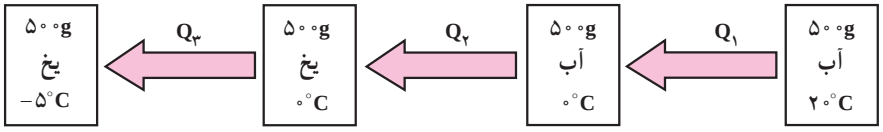
$$Q=-mL_F \qquad (۶ـ۶)$$

در اینجا نیز مانند فرایند ذوب که برای جامدهای غیربلورین نقطهٔ انجماد مشخصی وجود ندارد، وجود ناخالصی موجب می‌شود که مایع، نقطهٔ انجماد مشخصی نداشته باشد بلکه انجماد در گستره‌ای از دماها رخ دهد. مثلاً هنگام یخ‌زدن آب نمک، اولین بلورها در دمای کمتر از $0^\circ C$ تشکیل می‌شود و انجماد کامل در دماهای کمتر، تا $-18^\circ C$ روی می‌دهد.

مثال ۷ـ۸

از $500g$ آب با دمای $20^\circ C$ چند کیلوژول گرما بگیریم تا به یخ با دمای $-5^\circ C$ تبدیل شود؟

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



که در آن :

$$Q_1=mc\Delta\theta=0/5\times4200(0-20)=-42000J=-42kJ$$

$$Q_2=-mL_F=-0/5\times334000=-167000J=-167kJ$$

$$Q_3=mc\Delta\theta=0/5\times2100(-5-0)=-5250J=-5/25kJ$$

بنابراین کل گرما برابر است با

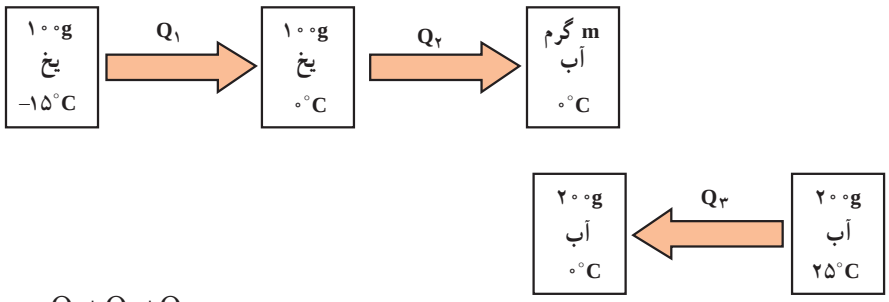
$$Q=Q_1+Q_2+Q_3=-214/25kJ$$

یعنی باید $214/25kJ$ گرما از آب بگیریم.

مثال ۶ـ۹

در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی ناچیز ۲۰۰g آب با دمای ۲۵°C وجود دارد. قطعه یخی به جرم ۱۰۰g و دمای ۱۵°C− درون آن می‌اندازیم. پس از مبادلهٔ گرما و برقراری تعادل گرمایی، مخلوطی از آب و یخ به جا می‌ماند. جرم یخ باقی‌مانده چند گرم است؟

پاسخ : می‌دانیم دمای تعادل آب خالص و یخ خالص در فشار 1atm برابر ۰°C است. مرحله‌های طرح‌وار این فرایند در شکل زیر رسم شده است.



$$Q_1+Q_2+Q_3=0$$

$$m_{\text{یخ}}c_{\text{یخ}}\Delta\theta_{\text{یخ}}+m_{\text{یخ ذوب شده}}L_f+m_{\text{آب}}c_{\text{آب}}\Delta\theta_{\text{آب}}=0$$

$$0/1\times2100\big(0-(-15)\big)+m\times334000+0/2\times4200(0-25)=0$$

$$3150+334000m-21000=0$$

$$334000m=17850 \Rightarrow m=0/053kg=53g$$ (جرم یخ ذوب‌شده)

بنابراین 47g از یخ *ذوب‌نشده* باقی می‌ماند.

تمرین ۳ـ۷

اگر در مثال ۶ــ۹ جرم قطعه یخ اولیه 50g باشد، دمای تعادل چقدر می‌شود؟

آزمایش ۲ـ۷

وسیله‌های آزمایش : بشر شیشه‌ای با حجم 400cc، چراغ‌گازی، سه‌پایه، توری نسوز، ترازو، مقداری مخلوط آب و یخ، گرماسنج با ظرفیت گرمایی معلوم و دماسنج.

شرح آزمایش :

۱ــ 200cc آب در بشر بریزید و آن را روی سه‌پایه قرار دهید. چراغ‌گاز را روشن کنید تا دمای آب دست‌کم به ۶۰°C برسد.

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

۳ــ قطعه یخی به جرم تقریبی 50g را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای 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 به‌دست‌آمده، گرمای ذوب یخ (L_F) را حساب کنید.

تبخیر و جوشیدن : وقتی لباس خیسی را روی بند رخت می‌اندازیم آب موجود در آن پس از مدتی بخار و لباس خشک می‌شود. آبی که در هوای گرم تابستان روی زمین می‌پاشیم نیز به‌سرعت بخار و زمین خشک می‌شود. در پدیده‌هایی از این دست می‌بینیم که مایع در هر دمایی تبخیر می‌شود. بعضی از مولکول‌های مایع که به سرعت‌های به اندازهٔ کافی زیاد برسند از سطح مایع فرار می‌کنند. به این فرایند تبخیر سطحی می‌گوییم. تجربه نشان می‌دهد که آهنگ تبخیر سطحی به عامل‌های مختلفی از جمله دمای مایع و مساحت سطح آن بستگی دارد.

فعالیت ۷ـ۳

الف) بررسی کنید که افزایش دما و افزایش مساحت سطح مایع هریک تبخیر سطحی مایع را تندتر یا کندتر می‌کند.

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 که چگونه عرق‌کردن به خنک‌نگه‌داشتن بدن کمک می‌کند.

با گرم‌کردن تدریجی مایع، آهنگ تبخیر سطحی آن افزایش می‌یابد. بخشی از گرمای داده‌شده به مایع موجب افزایش دما و بخش دیگر موجب تبخیر سطحی مایع می‌شود. تاکنون در حل مسئله‌های گرماسنجی، گرمایی را که هنگام افزایش دمای مایع صرف تبخیر سطحی آن می‌شود، نادیده گرفتیم. وقتی مایعی را گرم می‌کنیم دمای آن بالا می‌رود تا اینکه در دمای خاصی حباب‌های گاز درون مایع شکل می‌گیرند و به سطح مایع می‌آیند و از آن خارج می‌شوند. به این پدیده جوشیدن مایع و به این دما، دمای جوش یا نقطهٔ جوش می‌گوییم.

در نقطهٔ جوش هرچه به مایع گرما بدهیم دمای آن افزایش نمی‌یابد و همهٔ گرما صرف تبخیر مایع می‌شود. آهنگ تبخیر هر مایع در نقطهٔ جوش آن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. تجربه نشان می‌دهد که گرمای لازم برای تبخیر هر مایع با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم مایع بخارشده را گرمای تبخیر مایع (یا گرمای نهان تبخیر مایع) می‌نامیم و آن را با L_V [1] نشان می‌دهیم.

$$L_v = \frac{Q}{m}$$

گرمای تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم m که گرمای تبخیر آن L_V است از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[2] :

$$Q = mL_V \qquad (۷ـ۶)$$

۱ــ زیرنویس v حرف اول واژهٔ انگلیسی Vaporization به معنی تبخیر است.

۲ــ پیش از این در کتاب‌های درسی گرمای لازم برای تبخیر مایع (Q) را گرمای نهان تبخیر و L_V را گرمای نهان ویژهٔ تبخیر می‌نامیدند. این نام‌گذاری امروزه چندان مرسوم نیست.

جدول ۶ــ۳ برخی از مقدارهای L_V را نشان می‌دهد که به‌طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به‌دست آمده است.

جدول ۶ــ۳ــ مقادیر L_V برای آب در دماهای مختلف

دما ($^\circ C$)	$L_V(kJ/kg)$
۰	۲۴۹۰
۱۵	۲۴۵۴
۵۰	۲۳۷۴
۱۰۰	۲۲۵۶
۱۵۰	۲۱۱۵

فعالیت ۶ـ۴

تحقیق کنید چرا در جدول ۶ ــ ۳ گرمای نهان تبخیر آب با افزایش‌دمای آن کاهش می‌یابد.

مثال ۶ـ۱۰

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 $200\,g$ از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۶ــ۷ و استفاده از جدول ۶ــ۳ داریم :

$$Q = mL_V = (0/2)(2374\times10^3) \simeq 4/75\times10^5\,J$$

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای تبخیر مایع در نقطهٔ جوش آن سر و کار 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 ۶ــ۳ نقطهٔ جوش و گرمای تبخیر برخی از مواد را در فشار یک اتمسفر نشان می‌دهد.

جدول ۶ــ۴ــ نقطهٔ جوش و گرمای تبخیر برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطهٔ جوش ($^\circ C$)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیم	−۲۶۹	۲۱
هیدروژن	−۲۵۳	۴۶۰
ازت	−۱۹۶	۲۰۰
اکسیژن	−۱۸۳	۲۱۴
آمونیاک	−۳۵	۱۳۶۹
اتر	۳۵	۳۷۷
برم	۵۹	۱۹۳
کلروفرم	۶۲	۲۴۷
الکل (اتانول)	۷۹	۸۴۶
بنزن	۸۰	۳۹۰
آب	۱۰۰	۲۲۵۶
ید	۱۸۴	۱۶۴
گلیسیرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

فعالیت ۷ـ۵

علت سریع‌تر پخته‌شدن غذا در دیگ زودپز را با افراد گروه خود مورد بحث قرار دهید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

مثال ۷ـ۱۱

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

الف) از لحظهٔ آغاز 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 گرمای تولید شدهٔ کتری به آب می‌رسد.

پاسخ:

الف) با توجه به رابطهٔ ۶ــ۷ داریم:

$$Q = mL_V = (۲\times۱۰^{-۶})(۲۲۵۶) \simeq ۴/۵\times۱۰^{۶}\,J$$

ب)

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{۴/۵\times۱۰^{۶}}{۱/۵\times۱۰^{۳}} = ۳۰۰۰\,s = ۵۰\,min$$

برای اندازه‌گیری گرمای تبخیر در نقطهٔ جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش کنید ۶ــ۳ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

آزمایش ۷ـ۳

وسایل لازم : 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 معینی آب (مثلاً ۲۰۰g) در آن بریزید.

۲ــ توری را روی سه‌پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و ارلن را روی توری قراردهید.

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

۴ــ در لحظه‌ای که دمای آب به ۷۰°C می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید. $(t_1=0, \theta_1=70^\circ C)$

۵ــ صبر کنید تا آب به جوش آید. زمان (t_2) و دما (θ_2) را ثبت کنید.

۶ــ با استفاده از رابطهٔ $P(t_2-t_1)=mc(\theta_2-\theta_1)$ و جاگذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب (P) را به دست آورید.

۷ــ گرمادادن 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_3) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن‌کردن آن جرم آب بخارشده (m') را به‌دست آورید.

۹ــ گرمای تبخیر را با استفاده از رابطهٔ $P(t_3-t_2)=m'L_V$ به‌دست آورید.

تمرین ۷ـ۴

قطعه یخی به جرم ۰/۵ کیلوگرم و دمای اولیهٔ ۲۰°C− را آنقدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار ۱۰۰°C شود. کلّ گرمایی که برای این منظور صرف کرده‌ایم چند کیلوژول است؟

میعان : میعان، وارونِ فرایند تبخیر است. بخار هنگام تبدیل‌شدن به مایع گرما از دست می‌دهد. این گرما برابر گرمایی است که مایع هنگام تبخیر می‌گیرد. میعان نیز مانند تبخیر، در هر دمایی رخ می‌دهد. گرمای مربوط به میعانِ مقداری بخار به جرم m و گرمای تبخیر L_V از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$Q=-mL_V \qquad (۸ــ۶)$$

علامت منفی نشان‌دهندهٔ آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد و باعث گرم‌شدن اجسام پیرامون خود می‌شود. مثلاً اتاق حمامی را پس از دوش‌گرفتن یک شخص در نظر بگیرید.

وقتی شما وارد حمام شوید پس از چند لحظه احساس می‌کنید که گرمتان شده است. زیرا در اثر باز بودن دوش (حتی اگر آب سرد باشد) مقداری بخار آب در فضای حمام ایجاد شده است و با ورود شما به حمام، میعان این بخار روی بدنتان به شما گرما می‌دهد.

مثال ۶ـ۱۲

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی بر روی شیشهٔ پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره قطره می‌چکد. اگر دمای شیشه حدود $0^{\circ}C$ باشد برای آنکه حدود ۵۰ گرم آب روی شیشه تقطیر شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

پاسخ :

با استفاده از جدول ۶ـ۴ و رابطهٔ ۶ـ۸ داریم :

$$Q=-mL_V=-(50\times10^{-3})(2490\times10^{3})=-124500J$$

در این عمل ۱۲۴/۵ کیلوژول گرما به شیشه داده می‌شود.

فعالیت ۶ـ۶

در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

۶ـ۳ انبساط گرمایی

معمولاً برای آنکه درِ فلزی محکم یک ظرف شیشه‌ای را باز کنیم روی آن آب داغ می‌ریزیم. وقتی دو لیوان شیشه‌ای در هم گیر کرده باشند می‌توانیم با ریختن آب سرد در لیوان داخلی و گذاشتن لیوان بیرونی در آب گرم، دو لیوان را از هم جدا کنیم. وقتی دندانپزشک سوراخ دندانی را پُر می‌کند باید مادهٔ پُرکننده همان مشخصه‌های انبساط گرمایی دندان را داشته باشد، چرا که در غیر این صورت خوردن یک بستنی سرد و در پی آن نوشیدن چایی داغ بسیار دردناک خواهد بود.

فعالیت ۶ـ۷

توضیح دهید که چگونه می‌توان با استفاده از ابزارهایی که در شکل زیر نشان داده شده است پدیدهٔ انبساط در اثر افزایش دما را نمایش داد.

بیشتر اجسام با افزایش دما انبساط پیدا می کنند و یا با کاهش دما حجمشان کم می‌شود. این پدیده اساس ساخت بعضی از دماسنج‌ها و دماپا (ترموستات) است ــ بی‌توجهی به پدیدهٔ انبساط در ساختن پل‌ها، خط آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

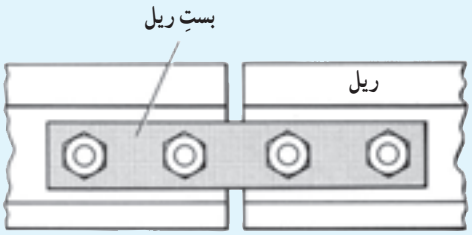
فعالیت ۶-۸

شکل الف، اتصال دو قسمت متوالی یک پل را نشان می‌دهد.

تحقیق کنید چرا برای اتصال دوبخش پل از این روش استفاده می‌شود.

شکل ب، طرحی از دو قسمت متوالی خط آهن (ریل راه‌آهن) را نشان می‌دهد. تحقیق کنید اگر فاصلهٔ خالی بین این دو قسمت به حد کافی زیاد نباشد، چه مشکلی پیش می‌آید (شکل پ).

(الف)



(ب)

(پ)

انبساط طولی : اگر میله‌ای به طول اولیهٔ L_1 را به اندازهٔ ΔT گرم کنیم به طول آن به اندازهٔ ΔL افزوده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد ΔL با L_1 نسبت مستقیم دارد. اگر ΔT خیلی زیاد نباشد ΔL با ΔT نیز نسبت مستقیم دارد. ضریب این تناسب را با α نشان می‌دهیم و داریم :

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \qquad (۹ــ۶)$$

به α ضریب انبساط طولی میله می‌گویند که به جنس میله بستگی دارد. یکای α، برکلوین $(\frac{1}{K})$ یا بر درجهٔ سلسیوس $(\frac{1}{^\circ C})$ است. ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۶ــ۵ داده شده است.

توجه کنید که مقادیر داده شده برای α در جدول بسیار کوچک هستند. همچنین خوب است بدانید که ضریب انبساط طولی α علاوه‌بر جنس ماده، به دما نیز اندکی وابسته است اما به دلیل اینکه این وابستگی ناچیز است معمولاً برای مصارف عملی آن را نادیده می‌گیریم.

جدول ۶ــ۵ــ ضریب انبساط طولی برخی اجسام

ماده	ضریب انبساط طولی $(\frac{1}{K})$
الماس	$۱/۲\times۱۰^{-۶}$
شیشه پیرکس	$۳/۲\times۱۰^{-۶}$
شیشهٔ معمولی	۹×۱۰^{-۶}
فولاد	۱۱×۱۰^{-۶}
بتون	۱۲×۱۰^{-۶}
مس	۱۷×۱۰^{-۶}
برنج	۱۹×۱۰^{-۶}
آلومینیوم	۲۳×۱۰^{-۶}
سرب	۲۹×۱۰^{-۶}
یخ (در $^\circ C$)	۵۱×۱۰^{-۶}

مثال ۷ـ۱۳

پلی بتونی را با طول ۲۰۰m در نظر بگیرید. افزایش طول این پل هنگامی که دمای آن ۵۰°C زیاد شود چند سانتی‌متر است؟

پاسخ :

از جدول ۶ـ۵ و با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۹ داریم :

$$\Delta L=\alpha L_1\Delta T=(12\times10^{-6})(200)(50)=12\times10^{-2}m$$
$$=12cm$$

اگر در ساختمان این پل فضای لازم برای انبساط طولی پیش‌بینی نشده باشد، چنین انبساطی می‌تواند باعث تخریب پل شود.

آزمایش ۷ـ۴

وسایل آزمایش : دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی با چند لولهٔ فلزی توخالی از جنس‌های مختلف ــ ارلن با درپوش سوراخ‌دار ــ لولهٔ لاستیکی ــ توری و سه‌پایه ــ چراغ گاز

شرح آزمایش :

۱ــ طول لولهٔ توخالی موردنظر را اندازه بگیرید (L_1) و 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 از یک سوراخ و لولهٔ لاستیکی را از سوراخ دیگر درپوش رد کنید.

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

۵ــ صبر کنید تا از سر آزادِ لولهٔ لاستیکی بخار آب خارج شود. سپس لوله را مطابق شکل به دستگاه وصل کنید.

۶ــ آنقدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لولهٔ توخالی کاملاً گرم شود و دمای آن به حدود دمای آب جوش درون ارلن برسد (θ_2).

۷ــ افزایش طول میلهٔ توخالی را با ریزسنج متصل به دستگاه اندازه بگیرید(ΔL).

۸ــ با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۹ ضریب انبساط طولی را به‌دست آورید.

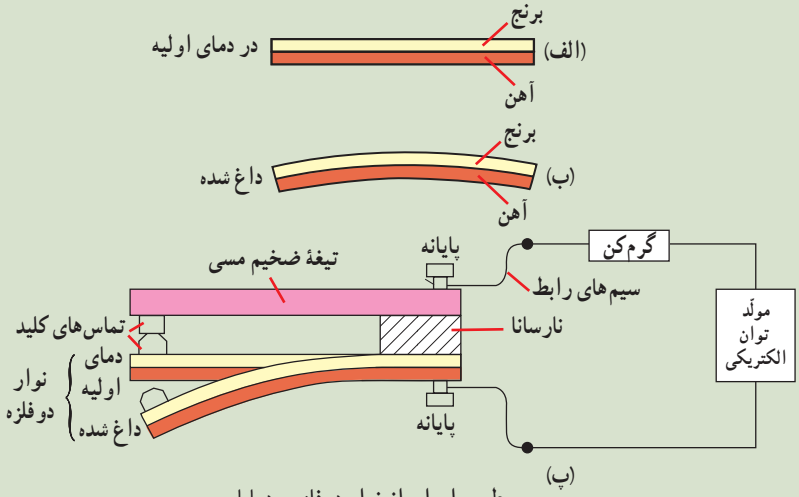
۹ــ میلهٔ توخالی دستگاه راعوض کنید و آزمایش را برای میله‌ای با جنس دیگر دوباره انجام دهید.

مطالعهٔ آزاد

نوار دوفلزه[1] و دماپا (ترموستات)

نوار دوفلزه از دو تیغهٔ فلزی متفاوت مانند برنج و آهن ساخته شده است که سرتاسر به‌هم جوش داده یا پرچ شده‌اند (شکل الف). در دمای معمولی محیط، طول دو تیغه یکسان است. با افزایش دما طول تیغه‌ها افزایش می‌یابد. تیغه‌ای که ضریب انبساط طولی بزرگ‌تری دارد، افزایش طول بیشتری نیز خواهد داشت و در نتیجه نوار طوری خم می‌شود که تیغهٔ با ضریب انبساط بیشتر کمان خارجی و تیغهٔ دیگر کمان داخلی خم را تشکیل می‌دهد (شکل ب). اگر به‌جای گرم کردن نوار، آن را سرد کنیم، نوار در خلاف جهت قبلی خم می‌شود.

دماپا کلیدی الکتریکی است که در آن قطع و وصل جریان با استفاده از حسگرهای گرمایی انجام می‌شود. اغلب از نوارهای دوفلزه به عنوان حسگرهای گرمایی در دماپا استفاده می‌شود (شکل پ). در مدار سادهٔ نشان داده شده در شکل پ، عبور جریان الکتریکی از گرم‌کن برقی باعث گرم شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازهٔ معینی برسد براثر خم شدن نوار جریان قطع و گرم‌کن برقی خاموش می‌شود. با خاموش شدن گرم‌کن، دمای تیغه کاهش می‌یابد و نوار دوباره به شکل وضعیت قبلی خود بازمی‌گردد و به این ترتیب دوباره مدار وصل و گرم کن برقی روشن می‌شود. دماپاها در بسیاری از وسایل الکتریکی مانند یخچال، آبگرمکن، سماوربرقی و ... کاربرد دارند.

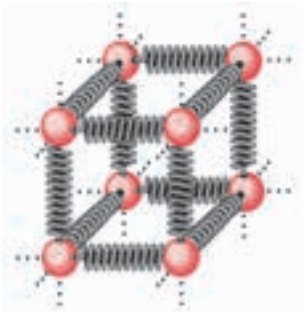


طرح‌واره‌ای از نوار دوفلزه و دماپا

فعالیت ۶ـ۷

شکل روبه‌رو دماسنجی را نشان می‌دهد که در آن از یک نوار دوفلزی حلزونی شکل استفاده شده است. اساس کار این دماسنج را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

انبساط گرمایی از دیدگاه مولکولی نیز قابل درک است. نیروهای بین اتمی در جامدها مثل فنر عمل می‌کنند (شکل ۶ـ۶). هر اتم در اطراف مکان تعادل خود نوسان می‌کند و با افزایش دما بر انرژی و دامنهٔ نوسان اتم‌ها افزوده می‌شود. در این حالت فاصلهٔ متوسط اتم‌ها از یکدیگر افزایش می‌یابد و در نتیجه جسم انبساط می یابد.


شکل ۶ـ۶ـ در جامدها، نیروهای بین اتمی مثل فنر عمل می‌کنند.

۱ـ بای متال (bi_metal)

مثال ۷ـ۱۴

الف) ورقه‌ای مستطیلی‌شکل به اضلاع a_1 و b_1 را درنظر بگیرید. بر اثر افزایش دمای ΔT، طول اضلاع مستطیل به اندازه Δa و Δb افزایش می‌یابند که هریک با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۹ به‌دست می‌آید.

الف) افزایش مساحت این ورقه براثر افزایش دما چقدر است؟

ب) افزایش مساحت ورقه‌ای مسی به مساحت $۲۵۰۰\,cm^۲$ وقتی دمایش $۵۰^\circ C$ بالا رود، چند سانتی‌متر مربع است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۶ـ ۹ می‌توان Δa و Δb را به‌دست آورد :

$$\Delta a = \alpha a_1 \Delta T \Rightarrow a_2 = a_1 + \alpha a_1 \Delta T \Rightarrow a_2 = a_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\Delta b = \alpha b_1 \Delta T \Rightarrow b_2 = b_1 + \alpha b_1 \Delta T \Rightarrow b_2 = b_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

مساحت ورقه پس از افزایش دما برابر با $a_2 b_2$ است و بنابراین داریم :

$$A_2 = a_2 b_2 = a_1(1 + \alpha \Delta T)\ b_1 (1 + \alpha \Delta T) = a_1 b_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$= a_1 b_1 (1 + 2\alpha \Delta T + (\alpha \Delta T)^2)$$

با توجه به اینکه α معمولاً از مرتبهٔ 10^{-5} بر درجهٔ سلسیوس است (جدول ۶ـ۵ را ببینید) و ΔT معمولاً بیشتر از مرتبهٔ 10^2 درجهٔ سلسیوس نیست، می‌توان نتیجه گرفت که جملهٔ $(\alpha \Delta T)^2$ در مقایسه با جملهٔ $2\alpha \Delta T$ بسیار کوچک است و می‌شود از آن چشم‌پوشی کرد. از طرفی $a_1 b_1$ همان مساحت اولیهٔ ورقه است که آن را با A_1 نشان می‌دهیم.

بنابراین می‌توان نوشت :

$$A_2 = A_1(1 + 2\alpha \Delta T) \Rightarrow A_2 - A_1 = 2\alpha A_1 \Delta T$$

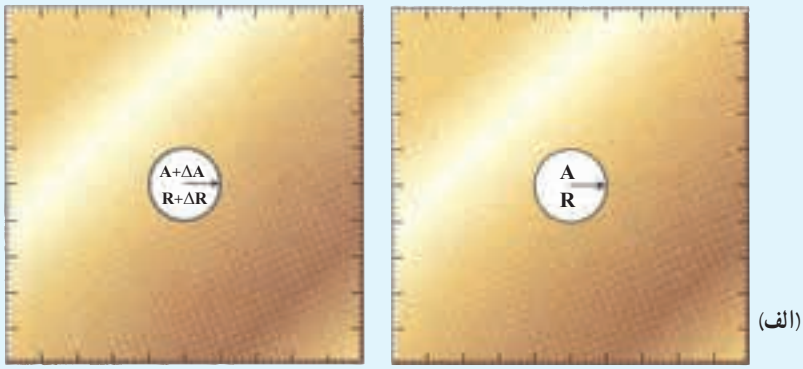
$$\Rightarrow \Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$$

ب) از رابطهٔ به‌دست آمده در قسمت الف استفاده می‌کنیم. ورقه از جنس مس است. ضریب انبساط طولی مس با استفاده از جدول ۶ـ۵ برابر $۱۷ \times 10^{-۶}/^\circ C$ است و بنابراین داریم :

$$A_2 = 2\alpha\, A_1 \Delta T = 2(۱/۷ \times ۱۰^{-۵})(۲۵۰۰)(۵۰) \simeq ۴\,cm^۲$$

فعالیت ۷ـ۱۰

شکل‌های الف و ب نشان می‌دهند که وقتی روی یک صفحهٔ فلزی حفره‌ای دایره‌ای داشته باشیم و صفحه را گرم کنیم، قطر (یا مساحت) حفره بزرگ می‌شود. نشان دهید که اگر چنین صفحه‌ای را گرم کنیم، افزایش مساحت حفره از رابطهٔ $\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$ به‌دست می‌آید.



(ب) (الف)

انبساط حجمی : 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 به‌دست می‌آید :

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T \qquad (۶ ـ ۱۰)$$

در این رابطه β ضریب انبساط حجمی جامد یا مایع و یکای آن بر کلوین $(\frac{۱}{K})$ یا بر درجهٔ سلسیوس $(\frac{۱}{^\circ C})$ است.

چون مایع‌ها شکل معینی ندارند انبساط آنها را به‌صورت حجمی بررسی می‌کنیم. انبساط حجمی مایع‌ها به سادگی قابل مشاهده است. در جدول ۶ـ۶ ضریب انبساط حجمی برخی مایع‌ها داده شده است.

جدول ۶ـ۶ـ ضریب انبساط حجمی چند مایع

ماده	ضریب انبساط $(\frac{۱}{K})$	ماده	ضریب انبساط $(\frac{۱}{K})$
جیوه	$۰/۱۸ \times ۱۰^{-۳}$	اسید استیک	$۱/۱۰ \times ۱۰^{-۳}$
گلیسیرین	$۰/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$	بنزن	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۳}$
روغن زیتون	$۰/۷۰ \times ۱۰^{-۳}$	کلروفرم	$۱/۲۷ \times ۱۰^{-۳}$
پارافین	$۰/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$	استون	$۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$
بنزین	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$	اتر معمولی	$۱/۶۰ \times ۱۰^{-۳}$
الکل اتیلیک	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۳}$	آمونیاک	$۲/۴۵ \times ۱۰^{-۳}$

برای بیشتر جامدها انبساط طولی در راستاهای مختلف با ضریب انبساط طولی یکسان صورت می‌گیرد[۱]. به همان روشی که در مثال ۶ـ۱۴ نشان دادیم، ثابت می‌شود که ضریب انبساط حجمی این جامدها ۳ برابر ضریب انبساط طولی آنها است.

$$\beta_{\text{جامد}} = ۳\alpha \qquad (۶ ـ ۱۱)$$

با مقایسهٔ ضریب انبساط حجمی جامدها با ضریب انبساط حجمی مایعات جدول ۶ـ۶ نتیجه می‌گیریم انبساط حجمی جامدها به‌مراتب کمتر از مایعات است.

۱ـ به چنین جامدهایی اصطلاحاً همسانگرد (ایزوتروپ) می‌گویند.

مثال ۶ـ۱۵

حجم یک شمش آلومینیومی در دمای $۱۰^{\circ}C$ ، برابر $۱۰۰۰cm^{۳}$ است. اگر دمای شمش را به $۱۰۰^{\circ}C$ برسانیم چقدر بر حجم آن افزوده می‌شود؟

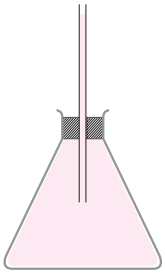
پاسخ : با استفاده از جدول ۶ـ۵ و رابطهٔ ۶ـ۱۱ داریم :

$$\beta = ۳\alpha = ۳\times ۲۳\times ۱۰^{-۶} = ۶۹\times ۱۰^{-۶}\ \frac{۱}{^{\circ}C}$$

حال با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۰ خواهیم داشت :

$$\Delta V = \beta V_{۱}\Delta\theta = (۶۹\times ۱۰^{-۶})(۱۰۰۰)(۱۰۰-۱۰) \simeq ۶cm^{۳}$$

مثال ۶ـ۱۶



ارلنی شیشه‌ای را که در دمای $۲۰^{\circ}C$ گنجایشی برابر با $۲۰۰/۰cm^{۳}$ دارد، مطابق شکل با گلیسیرین در همان دما پرکرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسیرین آن 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 : افزایش حجم گلیسیرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۰ محاسبه می‌کنیم :

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} = \beta_{\text{گلیسیرین}} V_{۱}\,\Delta T = (۴۹\times ۱۰^{-۵})(۲۰۰/۰)(۶۰-۲۰) \simeq ۳/۹cm^{۳}$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_{۱}\,\Delta T = (۳\alpha_{\text{شیشه}})V_{۱}\,\Delta T = (۲۰۰/۰)(۳\times ۹\times ۱۰^{-۶})(۶۰-۲۰) \simeq ۰/۲cm^{۳}$$

چون افزایش حجم گلیسیرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسیرین از ظرف سرریز می شود. حجم گلیسیرین سرریز شده برابر است با :

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

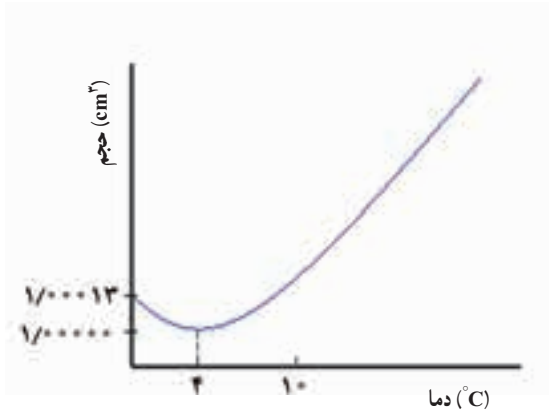
فعالیت ۶ـ۱۱

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با آن بتوانید حجم گلیسیرین سرریز شده در مثال ۶ـ۱۶ را اندازه بگیرید. سپس مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده را با هم مقایسه کنید.

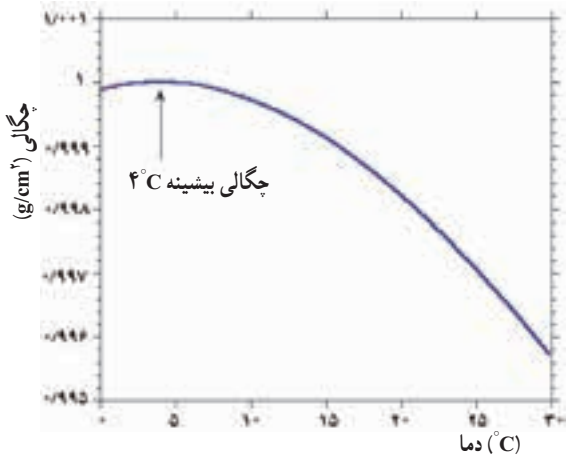
فعالیت ۶ـ۱۲

افزایش دما که به‌طور 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 $\rho_{۲} = \rho_{۱}(۱-\beta\Delta T)$ است که در آن $\rho_{۱}$ و $\rho_{۲}$ به ترتیب چگالی ماده در دماهای $T_{۱}$ و $T_{۲}$، β ضریب انبساط حجمی است. درستی این رابطه را تحقیق کنید.

انبساط غیرعادی آب : حجم بیشتر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش و در نتیجه چگالی آنها، افزایش می‌یابد. ولی رفتار آب در محدودهٔ دمایی $4^{\circ}C$ تا $0^{\circ}C$ متفاوت است. یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۶ــ ۷ــ 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.



الف) تغییرات حجم آب (شیرین) با دما



ب) تغییرات چگالی آب (شیرین) با دما

شکل ۶ــ۷

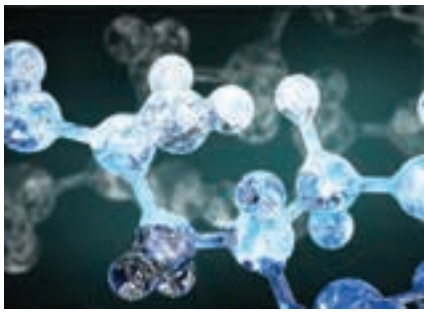
مطالعهٔ آزاد

جدول ضریب انبساط حجمی آب

جدول روبه‌رو ضریب انبساط حجمی آب را در چند دمای مختلف نشان می‌دهد که در توافق با شکل‌های ۶ــ۷ الف و ب است و از روی آن می‌توان به رفتار غیرعادی آب در دماهای $0^{\circ}C$ تا $4^{\circ}C$ و رفتار طبیعی آن در دماهای بالاتر از $4^{\circ}C$ پی برد.

دما ($^{\circ}C$)	$\beta(\frac{1}{^{\circ}C})$
۱	-۴۸×۱۰^{-۶}
۴	۰
۷	۴۵×۱۰^{-۶}
۱۰	۸۸×۱۰^{-۶}
۱۵	۱۵۱×۱۰^{-۶}
۲۰	۲۰۷×۱۰^{-۶}

همین تغییر حجم غیرعادی آب است که موجب می‌شود دریاچه‌ها به‌جای اینکه از پایین به بالا یخ بزنند از بالا یخ بزنند. وقتی دمای سطح آب مثلاً از $10^{\circ}C$ کمی 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 پایین تر از $4^{\circ}C$ حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. یعنی سردشدن بیشتر آب موجب می‌شود که چگالی آب سطح دریا نسبت به آب زیر آن کمتر شود و در نتیجه در سطح باقی بماند تا اینکه یخ بزند. بنابراین در حالی که آب زیرِ دریاچه هنوز مایع است و دمایی بیش از صفر درجه دارد، سطح آب یخ می‌زند. اگر آب دریاچه‌ها از پایین به بالا یخ می‌زد،



شکل ۶ــ ۸ــ نمایشی از آرایش مولکول‌های آب در بلور یخ

اثرات زیست‌محیطی زیانبار فراوانی درپی‌داشت و حیات گیاهی و جانوری در عمق دریاچه‌ها از بین می‌رفت. افزون بر این، وجود لایهٔ یخ در سطح دریاچه مانند یک عایق گرمایی عمل می‌کند و مانع سرد شدن آب عمق دریاچه می‌شود.

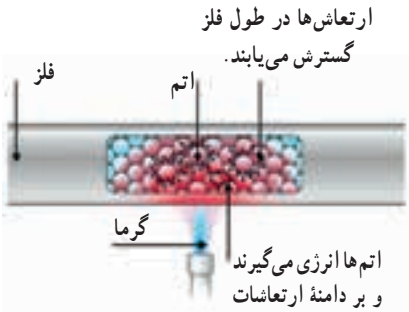
رفتار شگفت‌انگیز آب را می‌توان با ساختار غیرعادی شبکهٔ بلوری یخ توضیح داد. می‌دانیم حجم اشغال شده با آرایش منظم مولکول‌ها در مقایسه با حجم اشغال شده با آرایش نامنظم همان مولکول‌ها کمتر است. مولکول‌های آب در بلور یخ طوری آرایش یافته‌اند که در بعضی نواحی، مولکول‌ها خیلی به هم نزدیک‌اند در حالی که در نواحی دیگر بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۶ــ۸). وقتی آب از بلور یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، برخلاف سایر اجسام، آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود. یعنی فاصلهٔ بین مولکول‌هایی که خیلی به هم نزدیک بودند افزایش می‌یابد در حالی که فاصلهٔ بین مولکول‌هایی که فضای خالی میان آنها وجود داشت کم می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد. 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.

۶ــ ۴ انتقال گرما

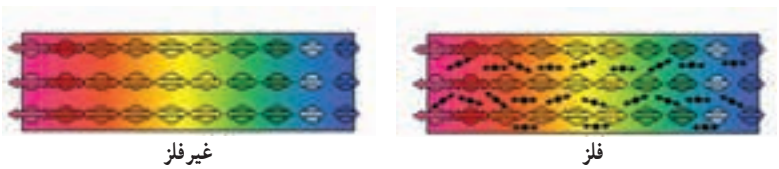
دیدیم که اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. این شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارت‌اند از رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی. در هر فرایند انتقال گرما، ممکن است هر سهٔ این سازوکارها دخالت داشته باشند (شکل ۶ــ۹). انتقال گرما از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم همدما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی سازوکار هر یک از این روش‌ها می‌پردازیم.

شکل ۶ــ ۹ــ در این شکل، هر سه روش انتقال گرما را در تصویری مشاهده می‌کنید.

رسانش : 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. در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با انتقال گرما به روش رسانش آشنا شده‌ایم. در واقع ارتعاش اتم‌ها (شکل ۶ــ۱۰) و الکترون‌های آزاد در ناحیهٔ گرم شدهٔ جسم موجب انتقال بخشی از انرژی آنها به اتم‌ها و الکترون‌های بسیار زیاد مجاورشان و در نتیجه انتقال گرما به روش رسانش می‌شود. رسانش گرما در مواد مختلف، متفاوت است. چون الکترون‌ها بسیار کوچک‌اند، به سرعت حرکت می‌کنند و با برخورد با سایر الکترون‌ها و اتم‌ها سبب رسانش گرمایی می‌شوند. بنابراین در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرمایی بیشتر از اتم‌هاست. در حالی که فلزها رساناهای خوبِ گرما هستند، موادی مانند شیشه، چوب و آجر رساناهای چندان خوبی به‌شمار نمی‌روند (شکل ۶ــ۱۱). به همین دلیل از ماده‌های عایق مخصوصی در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا از خروج جریان گرما در زمستان و ورود آن در تابستان جلوگیری کنند.



شکل ۶ــ ۱۰ــ ارتعاش اتم‌ها موجب انتقال انرژی گرمایی شده است.



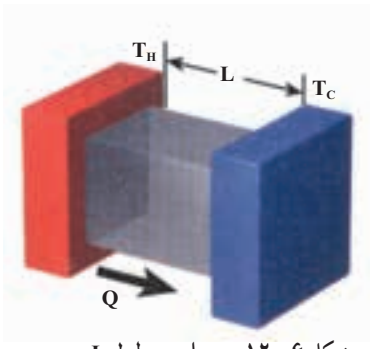
شکل ۶ــ ۱۱ــ در رساناهای فلزی، الکترون‌های آزاد نقشی اساسی در رسانش گرمایی بازی می‌کنند.

فعالیت ۶ـ۱۴

برخی آشپزها برای آنکه سیب‌زمینی زودتر آب‌پز شود ابتدا چند سیخ کوچک فلزی درون سیب‌زمینی می‌گذارند و بعد آن را در آب می‌اندازند و گرم می‌کنند. علت این کار آشپزها چیست؟

با شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال گرما به روش رسانش می‌توانیم گرمای منتقل شده از یک سربه سر دیگر میله‌ای را محاسبه کنیم.

فرض کنید طول یک میله L و مساحت مقطع آن A باشد (شکل ۶ـ۱۲). دمای انتهای سرد میله را T_C و دمای انتهای گرم میله را T_H می‌نامیم. گرمایی که در مدت زمان t از انتهای گرم میله به انتهای سرد آن شارش می‌یابد را با Q نشان می‌دهیم. نسبت $\frac{Q}{t}$، آهنگ رسانش گرمایی نامیده می‌شود و آن را با H نشان می‌دهیم. تجربه نشان می‌دهد که آهنگ رسانش گرمایی (H) با مساحت مقطع میله (A) و اختلاف دمای دو انتهای میله $(T_H - T_C)$ نسبت مستقیم و با طول میله (L) نسبت وارون دارد، یعنی :



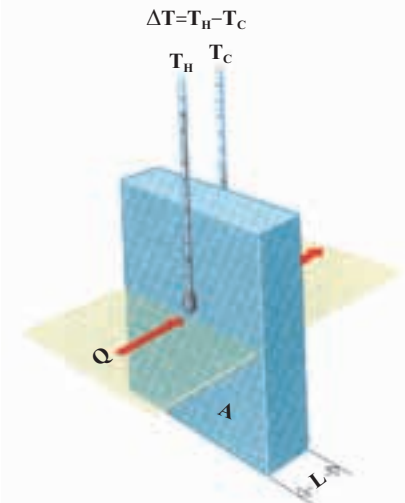
شکل ۶ـ۱۲ـ میله‌ای به طول L و مقطع A بین دومنبع با دماهای T_C و T_H قرار گرفته است.

$$H = \frac{Q}{t} = k\frac{A(T_H - T_C)}{L} \qquad (۶ - ۱۲)$$

در این رابطه، k رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. یکای رسانندگی گرمایی در SI، J/s.m.K یا وات بر متر ـ کلوین (W/m.K) است. جدول ۶ـ ۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را به‌دست می‌دهد.

جدول ۶ـ ۷ـ رسانندگی گرمایی برخی از مواد

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



شکل ۶ـ۱۳ـ تیغه‌ای به طول L و مقطع A بین دومنبع با دماهای T_C و T_H قرار گرفته است.

اگرچه رابطهٔ ۶ـ۱۲ برای میله بیان شده است، ولی برای هر تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع A و ضخامت L نیز برقرار است (شکل ۶ـ۱۳).

فعالیت ۶ـ۱۳

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

تصویری بسیار بزرگ شده‌ای از موی یک خرس قطبی

مثال ۶ـ۱۷

طول و عرض شیشهٔ پنجرهٔ اتاقی ۲/۰ m و ۱/۵ m و ضخامت آن ۵mm است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است، $-۳^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است، $+۲^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۲ داریم :

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

آنگاه با قرار دادن $k = ۱W/m.K$ ، $A = ۱/۵ \times ۲/۰ = ۳m^۲$ ، $\Delta T = ۵^{\circ}C$ و $L = ۰/۰۰۵m$ در رابطهٔ بالا خواهیم داشت :

$$H = ۱ \times \frac{(۳)(۵)}{۰/۰۰۵} = ۳۰۰۰W$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری ۳۰۰۰W می‌شود.

مثال ۶ـ۱۸

برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشهٔ پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایهٔ میانی هوا جایگزین می کنند.

طول و عرض شیشهٔ دوجدارهٔ پنجرهٔ اتاقی به ترتیب ۲m و ۱/۵m، ضخامت هریک از دو لایهٔ شیشه‌ای آن ۵mm و ضخامت لایهٔ میانی هوا ۱۰mm است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است $-۳^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است $+۲^{\circ}C$ است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت با عدد به‌دست آمده در مثال قبل مقایسه کنید. در این حالت می‌توان شیشهٔ دوجداره را مانند تیغه یا بره‌ای با همان مساحت و همان ضخامت درنظرگرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً با رسانندگی گرمایی هوا برابر است[۱].

۱ــ حل درست مسائلی از این دست با فرض یکسان بودن آهنگ رسانش گرمایی در لایه‌های مختلف انجام می‌شود و به رابطهٔ زیر می‌انجامد که تدریس آن موضوع کار این کتاب نیست،

$$H = A\left(\frac{۱}{\frac{L_۱}{k_۱} + \frac{L_۲}{k_۲} + \cdots + \frac{L_n}{k_n}}\right)(T_H - T_C)$$

در مثال ۶ــ۱۸، $n = ۳$ است.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۶ــ ۱۲ داریم :

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

آنگاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت

$$H = ۰/۰۲۴ \times \frac{۳ \times ۵}{۰/۰۲} = ۱۸W$$

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

همان‌طور که می‌بینید عدد به‌دست آمده، تفاوت زیادی (۱۶۷ بار کوچک‌تر) با عدد به‌دست آمده در مثال قبل دارد که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

همرفت : وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چطور همهٔ آب آن در مدت نه‌چندان زیادی گرم می‌شود؟ بخاری چگونه هوای داخل اتاق را گرم می‌کند؟ انتقال گرما در مایعات و گازها که معمولاً رساناهای گرمایی خوبی نیستند به روش همرفت، یعنی همراه با جابه‌جایی بخشی از خود ماده، انجام می‌گیرد. همان‌طور که خواهیم دید این پدیده براثر کاهش چگالی شاره با افزایش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما به روش همرفت را می‌توان به سادگی با انجام آزمایش زیر نمایش داد.

آزمایش ۷ـ ۵

وسیله‌های آزمایش : لولهٔ همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پرمنگنات پتاسیم یا جوهر، شعلهٔ گاز

شرح آزمایش :

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

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

۳ــ 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.

۴ــ مشاهدات خود را بنویسید و با بحث در گروه، دلیل هریک از مشاهدات را توضیح دهید.

همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، برخلاف رسانش گرمایی، انتقال گرما با انتقال تکه‌هایی از خود ماده صورت می‌گیرد و مولکول‌ها مسافت‌هایی طولانی را طی می‌کنند تا انرژی منتقل شود. وقتی شاره از زیر در تماس با منبعی گرم‌تر از خود قرار گیرد، مولکول‌های زیرین شاره حرکت می‌کنند و بیشتر از هم دور می‌شوند. چگالی این قسمت از

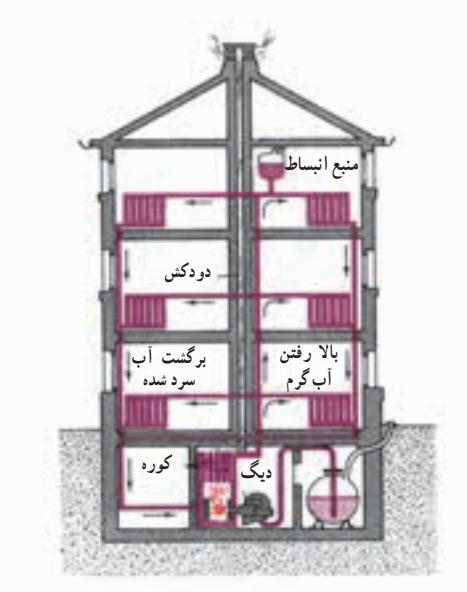
شاره کاهش می‌یابد و به بالا رانده می‌شود. شارهٔ خنک‌تر و چگال‌تر پایین می‌آید و جای شارهٔ گرم شده را می‌گیرد و به این ترتیب جریان‌های همرفتی به‌وجود می‌آیند. گرم شدن هوای داخل اتاق به‌وسیلهٔ بخاری یا شومینه (شکل ۶ــ۱۴)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۶ــ۱۵)، گرم شدن آب درون قابلمه (شکل ۶ــ۱۶)، انتقال گرما از کورهٔ هسته‌ای واقع در مرکز خورشید به سطح آن و ... همگی براثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهند. همهٔ این مثال‌ها نمونه‌هایی از همرفت طبیعی است.

نوع دیگری از همرفت، همرفت واداشته است که در آن شاره به کمک یک تلمبه (طبیعی یا مصنوعی) به چرخش واداشته می‌شود تا با این چرخش انتقال گرما صورت پذیرد. سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۶ــ۱۷)، سیستم خنک‌کنندهٔ موتور اتومبیل، دستگاه گردش خون در بدن جانوران خونگرم و ... مثال‌هایی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.

شکل ۶ــ۱۴ــ گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت

شکل ۶ــ۱۵ــ جریان‌های باد ساحلی در شب و روز، ناشی از پدیدهٔ همرفت. به جهت چرخش هوا توجه کنید.

شکل ۶ــ۱۶ــ گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت



شکل ۶ــ۱۷ــ طرحی از سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها

وارونگی هوا[۱]: وارونگی هوا که معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود پیامد توقف همرفت طبیعی در جوّ زمین است. در چنین شب‌هایی لایهٔ هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایهٔ هوای گرم بالاتر قرار می گیرد. این لایهٔ هوای گرم، پیش از این براثر پدیدهٔ همرفت در یک روز معمولی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایهٔ هوای سرد مجاور زمین آن را چگال‌تر از هوای سردی می کند که در شرایط طبیعی به پایین رانده می‌شود (شکل ۶ــ۱۸ الف) و بدین ترتیب مانع از چرخش هوا براثر پدیدهٔ همرفت می‌شود. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلایندهٔ شهری واقع در لایهٔ هوای سرد مجاور زمین در این لایه حبس می‌شوند (شکل ۶ــ۱۸ ب). به این پدیده وارونگی هوا می‌گویند. وارونگی هوا تا وقتی تداوم دارد که براثر وزیدن باد لایه‌های هوای سرد و گرم

۱ــ Air Inversion

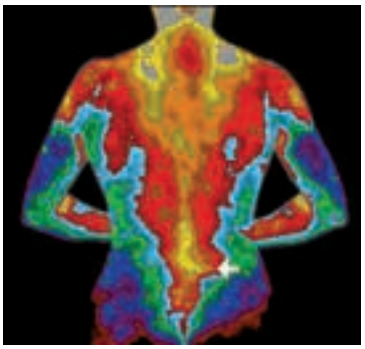
جابه‌جا شود یا با افزایش دمای قابل توجه لایهٔ سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جوّ زمین از سرگرفته شود. با توجه به اینکه در این پدیده الگوی تغییرات دما در یک روز طبیعی برهم می‌خورد به آن وارونگی دما نیز گفته شده است.

الف) بالا رفتن هوای گرم در یک روز معمولی

ب) وارونگی هوا مانع از بالا رفتن هوای گرم می‌شود.

شکل ۶ــ۱۸ــ وارونگی هوا باعث می‌شود گرد و غبار و گازهای آلاینده که عمدتاً ناشی از تردد خودروها است در هوای سرد مجاور زمین حبس شوند. همرفت طبیعی، در حالت عادی باعث پراکندگی گرد و غبار و گازهای آلاینده می‌شود.

تابش گرمایی : همهٔ ما تجربهٔ گرم شدن در نور خورشید را داریم. با نزدیک کردن دستمان به اجسام گرمی مانند کتری روی اجاق روشن یا رادیاتور گرم شوفاژ نیز تجربهٔ مشابهی خواهیم داشت. دست خود را زیر صفحهٔ اتوی روشنی نگهدارید؛ دست شما گرم می‌شود. آیا گرما با روش رسانش یا همرفت از اتو به دستتان رسیده است؟ می‌دانید که هوا رسانای خوبی نیست و چون دست شما زیر اتو قرار دارد انتقال گرما به روش همرفت نیز نمی‌تواند رخ داده باشد. خورشید، اتوی داغ، کتری، رادیاتور شوفاژ و ... از خود پرتوهایی گسیل می کنند که دست ما با جذب کردن آن گرم می‌شود. این پرتوها از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند که در درس فیزیک سال آخر دبیرستان با آنها بیشتر آشنا می‌شوید و خواهید دید که تولید امواج الکترومغناطیسی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها تابش الکترومغناطیسی جسم به دلیل دمای آن است. در واقع هر جسم می‌تواند از خود تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که شدت و بسامد این تابش به دمای جسم بستگی دارد و به همین دلیل آن را تابش گرمایی می‌نامیم. مثلاً سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای $22^{\circ}C$ تابشی گرمایی با آهنگی در حدود $100\,W$ دارد (شکل ۶ــ۱۹) در دماهای متداول، اجسام معمولاً تابش فروسرخ دارند. این نوع انتقال گرما به محیط مادی نیاز ندارد و با سرعت نور در خلأ منتشر می‌شود. تابش گرمایی از سطح هر جسم علاوه بر دما به مساحت، میزان صیقلی بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۶ــ۲۰). سطوح صاف و درخشان با رنگ‌های روشن تابش گرمایی کمتری دارند، در حالی که تابش گرمایی سطوح تیره، ناصاف و مات بیشتر است. تف‌سنج‌های تابشی یکی از وسایل اندازه‌گیری دما برای اجسام داغ هستند که اساس کار آنها بر تابش گرمایی گسیل شده از سطح اجسام بناشده است.

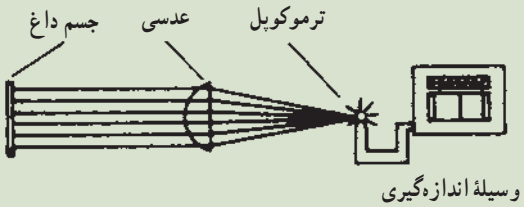


شکل ۶ــ۱۹ــ بدن یک شخص معمولی با آهنگی درحدود $100\,W$ تابش گرمایی می‌کند.

شکل ۶ــ۲۰ــ درون مکعب *لسلی* آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه جانبی مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.

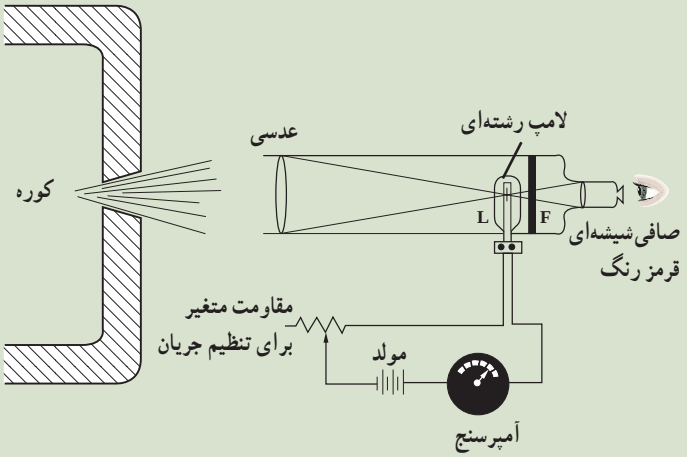
تَف‌سنج (پیرومتر) : تف‌سنج‌ها، دماسنج‌هایی هستند که براساس تابش حاصل از اجسام طراحی شده‌اند. اهمیت تف‌سنج‌ها در این است که برخلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرند. دو نوع معروف این دماسنج‌ها، عبارت‌اند از تف‌سنج تابشی و تف‌سنج نوری.

الف) تَف‌سنج تابشی : این تف‌سنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل شده از جسم روی یک ترموکوپل یا آرایه‌ای از ترموکوپل‌ها اندازه می‌گیرد. می‌توان دمای جسم را از روی جریان خروجی ترموکوپل تعیین کرد.



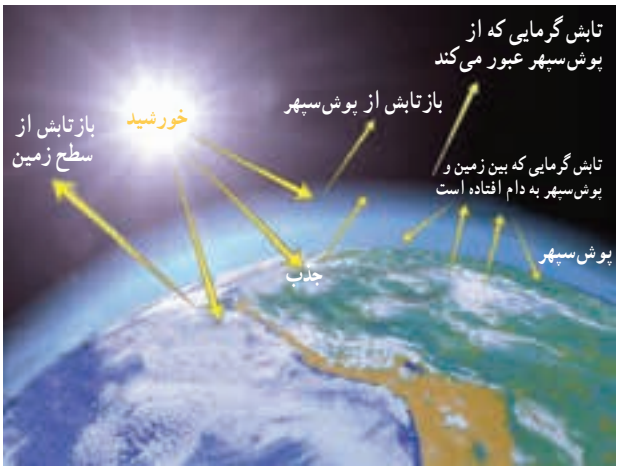
الف) تف‌سنج تابشی و طرحی از ساختار آن

ب) تَف‌سنج نوری : این تف‌سنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری دمای اجسام خیلی داغ که تابشی مرئی دارند (مانند کوره‌ها) به‌کار می‌رود. اساس کار این تف‌سنج، مقایسهٔ رنگ و شدت نور تابیده از جسم داغ، با رنگ و شدت نور یک لامپ رشته‌ای است. نور تابیده از جسم داغ، توسط یک عدسی روی رشتهٔ لامپ متمرکز می‌شود و ناظر که از طریق یک دوربین رشتهٔ ملتهب لامپ را در زمینهٔ نور حاصل از جسم داغ می‌بیند، شدت جریان لامپ را آنقدر تغییر می‌دهد تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به‌طوری که رشتهٔ لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



ب) تف‌سنج نوری و طرحی از ساختار آن

اثر گلخانه‌ای[1] : بخشی از نور خورشید با عبور از جوّ زمین به سطح آن می‌رسد. بخش عمدهٔ این نور جذب زمین می‌شود، زمین گرم می‌شود و با تابش گرمایی از خود امواج فروسرخ گسیل می‌کند. وجود گازهایی مانند CO_2، بخار آب و متان (CH_4) ــ که مولکول‌های جذب‌کنندهٔ بسیار خوبی برای امواج فروسرخ هستند ــ در لایهٔ پوش‌سپهر (استراتوسفر) جوّ زمین (لایه‌ای حدوداً در فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۸ کیلومتری سطح زمین) باعث کدر شدن این لایه برای تابش‌های فروسرخ می‌شود. این لایه بیشترِ تابش گرمایی حاصل از زمین را جذب می‌کند. خود این لایه نیز تابش گرمایی می‌کند. بخشی از تابش گرمایی لایهٔ پوش‌سپهر از جو خارج می‌شود، ولی بیشتر آن به زمین بازمی‌گردد و به این ترتیب رفت و برگشتی از تابش گرمایی بین این لایه و سطح زمین رخ می‌دهد. در تشابه با گلخانه‌ها که با ایجاد محیطی محصور مانع از جریان هوا و خروج هوای گرم از گلخانه‌ها می‌شوند، به این به دام افتادن تابش گرمایی بین لایهٔ پوش‌سپهر و سطح زمین **اثر گلخانه‌ای** و به گازهای موجود در لایهٔ پوش‌سپهر که سبب این پدیده می‌شوند **گازهای گلخانه‌ای** می‌گویند. اگر لایهٔ پوش‌سپهر وجود نداشت، دمای میانگین سطح زمین چیزی در حدود $-18^{\circ}C$ می‌شد ولی اینک این دما در حدود $+15^{\circ}C$ است؛ یعنی اثر گلخانه‌ای حدود $33^{\circ}C$ به دمای میانگین سطح زمین افزوده است (شکل ۶ــ۲۱).



شکل ۶ــ۲۱ــ جذب، بازتابش و تابش گرمایی در جو و سطح زمین و اثر گلخانه‌ای

با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای درپوش‌سپهر، اثر گلخانه‌ای تشدید می‌شود و بدین ترتیب دمای زمین افزایش می‌یابد. درچند دههٔ اخیر به دلیل فعالیت‌های مختلف صنعتی و افزایش آلاینده‌هایی مثل CO_2 در جو زمین، غلظت گازهای گلخانه‌ای در لایهٔ پوش‌سپهر زیادتر از قبل شده و دمای سطح زمین بالا رفته است.

خوب است بدانید که همواره درحالت تعادل، انرژی تابشی جذب شده توسط سطح زمین با انرژی تابشی گسیل شده از آن (بازتابش و تابش گرمایی) برابر است. همین برابری در خارجی‌ترین سطح جو زمین نیز وجود دارد. جذب و گسیل انرژی تابشی در درون خود جو نیز برابر است.

۱ــ Greenhouse effect

شکل ۶ــ۲۲ــ سرد شدنِ هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه مچاله شدن مخزن شده است.

قانون گازهای کامل (آرمانی) : به گاز درون یک ظرف دربسته، مثلاً گاز درون یک قوطی اسپری خوش‌بوکننده فکر کنید. با داغ کردن این گاز، جنبش مولکولی در آن بسیار زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های ظرف افزایش می‌یابد و این می‌تواند موجب ترکیدن ظرف شود. اگر درِ یک بطری نوشابهٔ پلاستیکی و توخالی را ببندیم و آن را درونِ جایخی یخچال بگذاریم، پس از مدتی بطری مچاله می‌شود. شکل ۶ــ۲۲ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل مچاله شده است. شکل ۶ــ۲۳ یک اسباب‌بازی را نشان می‌دهد که مخزن کوچک شیشه‌ای آن تا نیمه از یک مایع رنگی پرشده است. وقتی مخزن شیشه‌ای را در دستان خود بگیرید، فشار هوا و بخار مایع در نیمهٔ خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع را به طرف پایین می‌راند. این امر سبب می‌شود مایع در لولهٔ باریک و مارپیچ بالا رود. هرچه دستان شما گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را دربرگیرد، مایع در لولهٔ باریک بیشتر بالا می‌رود.

شکل ۶ــ۲۳ــ با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لولهٔ مارپیچ بالا می‌رود.

دانشمندانی مانند بویل، ماریوت، شارل، گیلوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطهٔ بین فشار، حجم و دمای مقدار معینی گاز درون یک محفظه را بیابند. شکل ۶ــ۲۴ استوانه (سیلندر) مدرّجی را نشان می‌دهد که مقداری گاز در آن محبوس شده است. گاز، زیر پیستونی قرار دارد که می‌تواند به‌راحتی درون استوانه بالا و پایین برود. دماسنج و فشارسنجی، دما و فشار گاز را نشان می‌دهند و حجم گاز نیز از درجه‌بندی روی بدنهٔ استوانه معلوم می‌شود. برای گرم یا سرد کردن گازِ درون استوانه می‌توانیم دستگاه را در محیطی سرد یا گرم قرار دهیم و همچنین با جابه‌جا کردن پیستون می‌توان حجم گاز را به میزان دلخواه تغییر داد.

اگر گاز درون محفظه به اندازهٔ کافی رقیق و یا چگالی آن به حدّ کافی کم باشد، یعنی مولکول‌های گاز آنقدر از هم دور باشند که با هم برهم‌کنش نداشته باشند، گاز را کامل (آرمانی) می‌نامیم. اگر تعداد مول‌های گاز کامل درون ظرفی ثابت باشد، نسبت حاصل‌ضرب فشار در حجم به دمای مطلق گاز، مقدار ثابتی است، یعنی $\frac{PV}{T}$ برای آن تغییر نمی‌کند. به عبارتی دیگر، اگر فشار، حجم و دمای گاز کامل در یک حالت به ترتیب P_1، V_1 و T_1 و در حالتی دیگر به ترتیب P_2، V_2 و T_2 باشد، داریم :

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2}=\cdots \qquad (۶ــ۱۳)$$

شکل ۶ــ۲۴ــ دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل

گرچه رابطهٔ ۶ــ۱۳ برای گازهای کامل (آرمانی) برقرار است ولی برای گازهای واقعی که چگالی آنها به حدّ کافی کم باشد نیز با دقت نسبتاً خوبی برقرار است. در این رابطه P فشار مطلق گاز (نه فشار پیمانه‌ای) و دما برحسب کلوین است.

فعالیت ۶ـ۱۵

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

مثال ۶ـ۱۹

زیرِ پیستون یک سیلندر، هوایی با حجم $۱۲۰cm^۳$ و فشار یک اتمسفر وجود دارد. با فشردن پیستون، حجم هوای محبوس را به $۲۰cm^۳$ می‌رسانیم، در حالی که دمای آن را ثابت نگه داشته‌ایم. اکنون فشار هوا چقدر است؟ (هوای محبوس درون سیلندر را گاز کامل فرض کنید.)

پاسخ : چون دما ثابت است، داریم :

$$T_۱ = T_۲$$

و در نتیجه رابطهٔ (۶ــ ۱۳) به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$P_۱V_۱ = P_۲V_۲$$

این رابطه که آن را حدود ۳۵۰ سال پیش رابرت بویل[۱] انگلیسی و امه ماریوت[۲] فرانسوی مستقل از هم به‌دست آوردند، به قانون بویل ــ ماریوت مشهور است.

در این مثال $P_۱ = ۱atm$، $V_۱ = ۱۲۰cm^۳$، $V_۲ = ۲۰cm^۳$ و $P_۲$ مجهول است. در نتیجه داریم : $(۱)(۱۲۰)=P_۲(۲۰)$

و از آنجا $P_۲ = ۶atm$ می‌شود.

فعالیت ۶ ـ ۱۶

برای بررسی درستی قانون بویل ــ ماریوت آزمایشی را طراحی کنید.

مثال ۶ـ۲۰

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

پاسخ : در این آزمایش فشار ثابت مانده است، یعنی

$$P_۱ = P_۲$$

بنابراین رابطهٔ ۶ــ۱۳ به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$\frac{V_۱}{T_۱} = \frac{V_۲}{T_۲}$$

۱ــ Robert Boyle (1627 – 1691)

۲ ــ Edme Mariotte (1620 – 1684)

این رابطه را در حدود ۲۰۰ سال پیش ژاک‌شارل[۱] و ژورف گی‌ـ لوساک[۲] به‌طور مستقل از یکدیگر به‌دست آوردند و به قانون شارل‌ـ گی‌لوساک معروف است.

با استفاده از داده‌های این مثال داریم :

$T_۱ = ۲۷ + ۲۷۳ = ۳۰۰K$ $\quad V_۱ = ۲/۰ \text{ liter}$

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

بنابراین داریم :

$$\frac{۲/۰}{۳۰۰} = \frac{V_۲}{۳۶۰}$$

و در نتیجه $V_۲ = ۲/۴\text{liter}$ می‌شود.

فعالیت ۷ ـ ۱۷

سر سُرنگی شیشه‌ای (که پیستون آن آزادانه حرکت می‌کند) را بسته و آن را درون ظرف آبی می‌گذاریم. توضیح دهید با روشن کردن چراغ زیر ظرف، هریک از کمیت‌های دما، حجم و فشار هوای درون سرنگ چگونه تغییر می‌کند؟

مثال ۷ـ۲۱

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

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

$$\begin{cases} P_۱ = P_{g_۱} + P_۰ = ۱۴ + ۱ = ۱۵ atm \\ V_۱ = ۱۲ liter \\ T_۱ = \theta_۱ + ۲۷۳ = ۷ + ۲۷۳ = ۲۸۰K \end{cases} \qquad \begin{cases} P_۲ = ? \\ V_۲ = ۲۵ liter \\ T_۲ = \theta_۲ + ۲۷۳ = ۷۷ + ۲۷۳ = ۳۵۰K \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم :

$$\frac{P_۱V_۱}{T_۱} = \frac{P_۲V_۲}{T_۲} \Rightarrow \frac{۱۵ \times ۱۲}{۲۸۰} = \frac{P_۲ \times ۲۵}{۳۵۰} \Rightarrow P_۲ = ۹ atm$$

بنابراین فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با $P_{g_۲} = P_۲ - P_۰ = ۹ - ۱ = ۸ \text{ atm}$

۱ـ Jacques A.S. Charles (1746 – 1823)

۲ـ Josef Gay – Lussac (1778 – 1850)

اسماعیل جَزَری

بدیع‌الزّمان ابوالعزّ اسماعیل‌بن رزّاز جزری مشهور به اسماعیل جزری از مهندسان به نام اسلام در سدهٔ ششم هجری قمری است. تنها اثر به‌جامانده از او کتابی به نام «الجامع بین‌العلم و العمل النافع فی صناعه الحیل» که به اختصار «الحیل» نیز نامیده شده است. این کتاب به زبان عربی است و سندی مهم در تاریخ فنّاوری محسوب می‌شود. مختصر اطلاعاتی که از زندگانی جزری در اختیار داریم مبتنی بر مطالب خود او در مقدمهٔ کتابش است. تاریخ تولد او مشخص نیست، ولی از قراین چنین برمی‌آید که او در بین جمادی‌الاخر و شعبان سال ۶۰۲ هجری قمری درگذشته است. در مورد نژاد و قومیت وی نیز در منابع چیزی نمی‌توان یافت ولی با توجه به نام عربی او و قرائن آن زمان فرض می‌شود که وی عرب بوده است، هرچند فرضیه‌هایی در مورد آشوری، ایرانی، ترک یا کُرد بودن وی نیز وجود دارد.

جزری در شهر «آمد» می‌زیست که فرمانروایان آن در دیار بکر حکومت می کردند و همان‌طور که در مقدمهٔ کتاب خود آورده است، کتاب «الحیل» را به‌دستور ناصرالدین محمود فرمانروای آن ملک، و بین سال‌های ۵۹۷ تا ۶۰۲ هجری قمری نوشته است. کتاب «الحیل» یکی از مهم‌ترین و برجسته ترین کتاب‌های مهندسی مکانیک در تاریخ تمدن اسلامی محسوب می‌شود. کتاب به شش‌بخش تقسیم می‌شود. بخش اول شامل شرح شش نوع ساعت آفتابی و چهار ساعت شمعی؛ بخش دوم شرح ده دستگاه خودکار توزیع نوشیدنی؛ بخش سوم شرح چهار آفتابه و ظرف خودکار برای ریختن آب و شستشوی دست و شش تشت اندازه‌گیری خون هنگام رگ‌زنی؛ بخش چهارم شرح شش فواره است که در فاصله‌های زمانی مشخصی به‌طور خودکار تغییر شکل می‌دهند؛ بخش پنجم شرح پنج دستگاه آب‌کشی از آبگیر و بخش ششم شامل توصیفی از دری است که از برنج ریخته‌گری شده ساخته بود و نیز شرح وسیله‌ای هندسی برای یافتن مرکز دایرهٔ گذرنده بر هر سه نقطهٔ دلخواه واقع بر یک صفحه یا سطح یک کره است.

جزری برای هر دستگاه یک تصویر اصلی رسم کرده است که نشان‌دهندهٔ شکل کلی دستگاه است. مثلاً شکل روبه‌رو تصویری از دستگاهی است که برای بالاآوردن آب آبگیر یک چاه به کمک یک چارپا در این کتاب رسم شده است.

واضح است برای طراحی این دستگاه به محاسبات دقیقی نیاز است؛ از جمله قطر چرخ‌دنده‌ها، تعداد دنده‌ها، استحکام چرخ دنده‌ها و محورها و به‌ویژه بار ناشی از وزن آب درون ملاقه‌ها که نخست به محور و از آنجا به چرخ‌دنده‌های آن و سپس به چرخ‌دنده‌های قطاعی وارد می شود. البته مهندسان آن دوره روش ترسیم سه‌بُعدی تصاویر را نمی‌دانستند و رسم فنّی به شکل امروزی وجود نداشت، ولی این نقص مانع از درک عملکرد دستگاه‌های کتاب نمی‌شود و دستگاه‌هایی که در این کتاب توضیح داده شده است همگی از نظر فنی درست و قابل ساخت‌اند و سه نمونه از آنها در جشنوارهٔ جهانی اسلام در سال ۱۹۷۶ (۱۳۵۵ هجری شمسی) به‌نمایش درآمده است. در کتاب جزری واژه‌ها و اصطلاحات فنّی بسیاری به زبان فارسی وجود دارد که نشان‌دهندهٔ تأثیر عمیق ایرانیان بر فنّاوری جهان اسلام است.

پرسش‌های فصل ششم

۱ هنگامی که با دماسنج جیوه‌ای دمای آبی را اندازه می‌گیرید، موقع خواندن دما، باید مخزن دماسنج حتماً درون آب باشد، ولی وقتی پزشک دمای بدن بیمار را اندازه می‌گیرد، دماسنج را از محل تماس با بدن بیمار دور می‌کند، بعد دما را می‌خواند. چه تفاوتی بین دماسنج پزشکی و دماسنج جیوه‌ای معمولی وجود دارد که این روش اندازه‌گیری را توجیه می‌کند؟

۲ کدام گزینه دربارهٔ فرایند ذوب درست است؟

الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر موارد، سبب پایین‌رفتن نقطهٔ ذوب می‌شود.

ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب افزایش 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.

ث) دادن گرمای نهان ذوب به جامدی که به نقطهٔ ذوب رسیده است، آن را ذوب می‌کند.

۳ 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.

۴ 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.

۵ چرا سطح بیرونی بطری نوشابهٔ سرد، در هوای گرم عرق می‌کند؟

۶ الف) آیا می‌توان یخ را بدون آنکه ذوب شود تا دمایی بالاتر از $0^{\circ}C$ گرم کرد؟

ب) آیا می‌توان آب را بدون آنکه یخ ببندد، تا دمایی پایین‌تر از $0^{\circ}C$ سرد کرد؟

۷ برای خنک کردن موتور اتومبیل لازم است مایعی نظیر مخلوط ضد یخ با آب و یا آب معمولی در اطراف سیلندر و درون حفره‌های سیلندر گردش کند. بهتر است گرمای ویژهٔ مایع کم باشد یا زیاد؟ چرا؟ چه عوامل دیگری نیز می‌تواند دارای اهمیت باشد؟

۸ چه روش‌هایی پیشنهاد می‌کنید که نتیجهٔ آزمایش اندازه‌گیری گرمای ویژه از دقت بیشتری برخوردار باشد؟ توضیح دهید.

مسائل فصل ششم

۱ دماهای زیر را بر حسب درجهٔ سلسیوس مشخص کنید :

الف) $0K$ ب) $273K$ پ) $373K$ ت) $546K$

۲ هنگامی که $1kg$ آب را با گرمکن غوطه‌ور در آب به مدت ۵ دقیقه گرم می‌کنیم، دمای آب $30^{\circ}C$ بالا می‌رود.

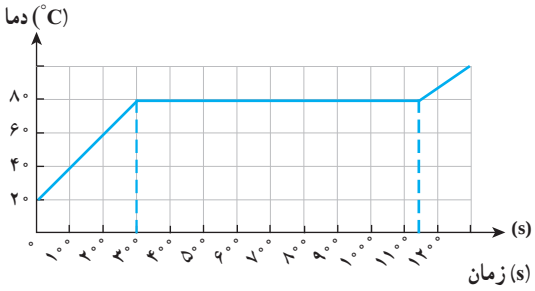
الف) توان متوسط گرمکن را حساب کنید.

ب) اگر همین گرمکن آب را به مدت ۹ دقیقه گرم کند، دمای آن‌را چقدر افزایش خواهد داد؟

۳ دمای یک قطعه فلز ۰/۶ کیلوگرمی را توسط یک گرمکن ۵۰ واتی در ۱۱۰s از $18^\circ C$ به $38^\circ C$ رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژهٔ فلز چه مقداری را ارائه می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این جواب از مقدار واقعی برای گرمای ویژه بیشتر است یا کمتر؟ توضیح دهید.

۴ 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. دمای این مجموعه $30^\circ C$ است. در این هنگام ۱۰۰ گرم آب $70^\circ C$ به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل $52^\circ C$ می‌شود. گرمای ویژهٔ مادهٔ نامعلوم را محاسبه کنید.

۵ به یک جسم جامد ۰/۵ کیلوگرمی توسط یک گرمکن ۱۰۰ واتی گرما می‌دهیم. منحنی تغییرات دمای این جسم با زمان در شکل روبه‌رو نشان داده شده است.



الف) چه زمانی طول می‌کشد تا این جامد به نقطهٔ ذوب خود برسد؟

ب) با استفاده از نمودار، گرمای ویژهٔ جامد و گرمای نهان ویژهٔ ذوب آن‌را محاسبه کنید.

۶ گرمکنی در هر ثانیه ۲۰۰ ژول انرژی فراهم می‌کند. چه مدت زمان طول می‌کشد تا این گرمکن ۰/۱ کیلوگرم آب $100^\circ C$ را به بخار آب $100^\circ C$ تبدیل کند؟ این گرمکن در همین مدت زمانی، چه مقدار یخ $0^\circ C$ را به آب $0^\circ C$ می‌تواند تبدیل کند؟

۷ یک گرمکن که با آهنگ ثابت ۵۰۰ وات انرژی تولید می‌کند، به‌طور کامل در یک قطعه یخ بزرگ با دمای $0^\circ C$ گذاشته شده است. در مدت ۱۳۲۰ ثانیه، ۲ کیلوگرم آب با دمای $0^\circ C$ تولید می‌شود. گرمای نهان ویژهٔ ذوب یخ را حساب کنید.

۸ یک گرمکن ۵۰ واتی غوطه‌ور در آب به‌طورکامل در ۱۰۰ گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می‌شود.

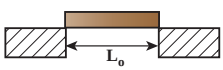
الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از $20^\circ C$ به $25^\circ C$ می‌رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.

ب) چه مدت طول می‌کشد تا دمای آب درون گرماسنج از $25^\circ C$ به نقطهٔ جوش ($100^\circ C$) برسد؟

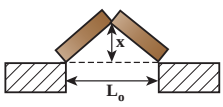
پ) چه مدت طول می‌کشد تا ۲۰ گرم آب درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۹ یک مادهٔ فولادی ابتدا تا دمای $800^\circ C$ گرم شده و سپس در روغنی به جرم 2kg و دمای $10^\circ C$ فرو برده می‌شود. درنتیجه، دمای روغن به اندازهٔ $40^\circ C$ افزایش می‌یابد. جرم مادهٔ فولادی در صورتی که دمایش در روغن به اندازهٔ $20^\circ C$ کم شده باشد، چقدر است؟ گرمای ویژه فولاد و روغن به ترتیب برابر با $c_{\text{فولاد}} = 0/63\,kJ/kgK$ و $c_{\text{روغن}} = 1/9\,kJ/kgK$ است.

۱۰ براثر افزایش دما به اندازهٔ $32^\circ C$، میله‌ای که در مرکز آن شکافی وجود دارد به بالا تاب می‌خورد.



اگر فاصلهٔ ثابت $L_0 = 3/77m$ و ضریب انبساط خطی میله $25\times10^{-6}/^\circ C$ باشد، بالارفتگی x مرکز میله چقدر است؟



۱۱ با استفاده از مقدارهای ضریب انبساط طولی درجدول ۶ــ۴، انبساط تیرآهنی با طول اولیهٔ ۲۵ متر، دراثر افزایش دمای از $-10^\circ C$ تا $30^\circ C$ را حساب کنید.

۱۲ با استفاده از جدول ۶ــ۴ حساب کنید که چه مقدار افزایش دما باعث می‌شود که طول یک خط‌کش ۰/۵ متری برنجی ۱/۱ میلی‌متر افزایش یابد.

۱۳ طول‌های یک سیم آهنی و یک سیم مسی در دمای $۲۰^{\circ}C$ با هم یکسان و برابر $۱۰۰m$ است. آیا در دمای $۶۰^{\circ}C$ اختلافی در طول سیم‌ها مشاهده می‌شود؟ اگر پاسخ مثبت است مقدار آن را به‌دست آورید.

۱۴ مقداری نفت خام در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع $h=۱۰m$ ریخته شده است. در دمای $-۱۰^{\circ}C$ فاصلهٔ بین سطح نفت تا بالای ظرف برابر $\Delta h=۵۰cm$ است. ضریب انبساط حجمی نفت $\beta=۱۰^{-۴}K^{-۱}$ است. اگر از انبساط دیوارهٔ ظرف در حین افزایش دما چشم‌پوشی شود، در چه دمایی نفت از ظرف سرریز می‌شود؟

۱۵ در روزی که دما $۰^{\circ}C$ است برای پنجره‌ای، شیشه‌ای به طول $۶m$ انداخته شد. برای پیش‌بینی انبساط شیشه، فاصلهٔ کوچکی به اندازهٔ ۱/۳۵ میلی‌متر بین شیشه و چارچوب منظور شد. روزی که دما $۲۵^{\circ}C$ است مشاهده می‌شود که این فاصله از بین رفته است. با چشم‌پوشی از انبساط چارچوب پنجره، ضریب انبساط شیشه را حساب کنید.

۱۶ شیشهٔ پنجره‌ای دارای عرض ۲ متر، ارتفاع ۱ متر و ضخامت $۴mm$ است.

الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است برابر $۲^{\circ}C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم داخل اتاق است $۷^{\circ}C$ است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه به بیرون اتاق انتقال پیدا می‌کند؟

ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می‌شود؟

پ) اگر در طول سال اختلاف دمای دو وجه شیشه به‌طور متوسط $۳^{\circ}C$ باشد، چه مقدار انرژی توسط رسانش از همین یک پنجره تلف می‌شود؟

۱۷ گازی در دمای $۲۰^{\circ}C$ دارای حجم $۱۰۰cm^{۳}$ است. این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا حجم آن در فشار ثابت $۲۰۰cm^{۳}$ شود؟ این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم $۵۰cm^{۳}$ خواهد شد؟

۱۸ هوایی با فشار یک اتمسفر درون استوانهٔ یک تلمبه دوچرخه به طول $۲۴cm$ محبوس است.

الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به $۳۰cm$ افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چه‌قدر خواهد شد؟

ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس ۳ اتمسفر شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۱۹ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا $۱۷^{\circ}C$ است فشار اندازه‌گیری شده در لاستیک ۲ اتمسفر بیش از فشار جو است. پس از یک اتومبیل‌رانی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه‌گیری می‌شود. مشاهده می‌شود که فشار ۲/۳ اتمسفر بیش از فشار جو است. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است (حجم لاستیک را ثابت بگیرید)؟

۲۰ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه‌های مهم کنترل دمای بدن است.

الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم $۵۰kg$ را، $۱^{\circ}C$ سردتر کند؟ گرمای ویژهٔ تبخیر آب در دمای بدن $(۳۷^{\circ}C)$ برابر $۲/۴۲\times۱۰^{۶}J/kg$ و گرمای ویژهٔ بدن در حدود $۳۴۸۰J/kg$ است.

ب) حجم آبی را که شخص باید برای جبران آب تبخیر شده بنوشد، حساب کنید.

۲۱ در آزمایشی جرم‌های مساوی از سرب و آلیاژ سرب ــ قلع (لحیم) سرد شده است و نمودارهای تغییر دما برحسب زمان به صورت شکل زیر است.

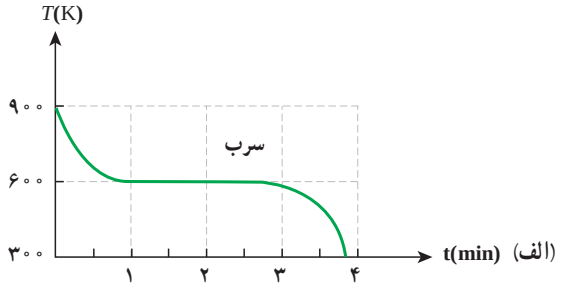
الف) حالت فیزیکی سرب را پس از ۳۰ ثانیه نام ببرید.

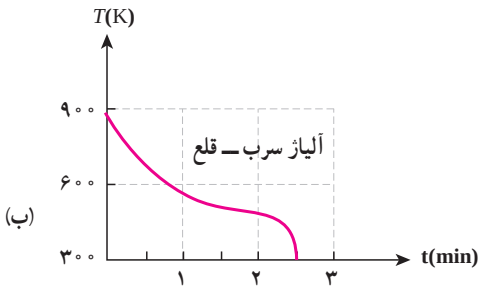
ب) چه پدیده‌ای در دمای $۶۰۰K$ برای سرب روی می‌دهد؟

پ) چرا دمای سرب بیش از ۲ دقیقه در $۶۰۰K$ ثابت می‌ماند؟

ت) با استفاده از نمودارهای داده‌شده، دو تفاوت مهم میان فلز سرب و آلیاژ سرب ــ قلع را نام ببرید.

ث) چرا استفاده از لحیم نسبت به سرب برای اتصال سیم‌ها یا تعمیر لوله‌های شکسته مناسب است؟





۲۲ در چالهٔ کوچکی ۱kg 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 است؟

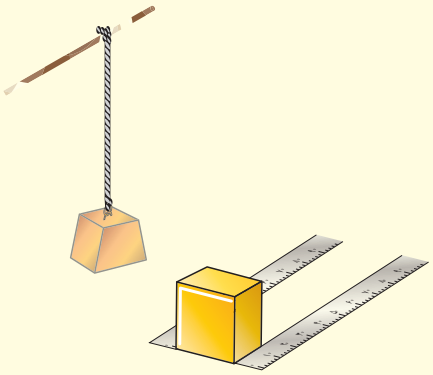
واژه‌نامه

انجماد	Freezing
اندازه‌گیری	Measurement
انرژی پتانسیل	Potential Energy
انرژی جنبشی	Kinetic Energy
انرژی درونی	Internal Energy
برایند	Resultant
بردار	Vector
بردار مکان	Position Vector
بلورین	Crystalline
پایستگی انرژی	Conservation of Energy
پخش	Diffusion
تابش	Radiation
تبخیر	Vaporization
تبخیر سطحی	Evaporation
تصعید	Sublimation
تعادل گرمایی	Thermal Equilibrium
تَف‌سنج نوری	Optical Pyrometer
توان	Power
جابه‌جایی	Displacement
جرم	Mass
چسبندگی (هم‌چسبی)	Cohesion
چسبندگی سطحی (دگرچسبی)	Adhesion
چگالش	Condensation
چگالی	Density
حالت	Phase
حرکت	Motion
حرکت شناسی	Kinematics
حرکت یکنواخت	Uniform Motion
دما	Temperature
دماپا	Thermostat
دماسنج	Thermometer
دماسنج فرینه	Maximum and Minimum Thermometer
دینامیک	Dynamics
ذوب	Fusion
ذرّات بنیادی	Elementary Particles
رسانا	Conductor
رسانش	Conduction
سرعت لحظه‌ای	Instantaneous Velocity
سرعت متوسط	Average Velocity
شتاب لحظه‌ای	Instantaneous Acceleration
شتاب متوسط	Average Acceleration
ضریب اصطکاک ایستایی	Coefficient of Static Friction
ظرفیت گرمایی	Heat Capacity
فراصوت	Ultrasound
فشار	Pressure
فشار پیمانه‌ای	Gage Pressure
فشارسنج	Barometer
فناوری	Technology
فیزیک اتمی	Atomic Physics
فیزیک هسته‌ای	Nuclear Physics
قانون‌های نیوتون	Newtons Laws
قضیه کار و انرژی	Work – Energy Theorem
کار	Work
کشش	Tension
کشش سطحی	Surface Tension
کمیّت	Quantity
گاز کامل	Ideal gas
گرانش	Gravitation
گرما	Heat
گرمای نهان	Latent Heat
گرمای ویژه	Specific Heat
مادّهٔ چگال	Condensed Matter
مقیاس دماسنجی	Temperature Scale
مویینگی	Capillarity
میعان	Liquefaction
نرده‌ای	Scalar
نمادگذاری علمی	Scientific Notation
نیرو	Force
نیروسنج	Dynamometer
نیروی رانشی	Repulsive Force
نیروی ربایشی	Attractive Force
وزن	Weight
همرَفت	Convection
یکا	Unit
یکاهای اصلی	Base Units
یکاهای فرعی	Derived Units

عنوان آزمایش : **نام آموزشگاه :** **شماره کلاس :**

تاریخ اجرای آزمایش : **نام و نام خانوادگی گزارشگر :**

تاریخ تحویل گزارش : **نام و نام خانوادگی اعضای گروه :**



وسایل لازم : وزنهٔ فلزی قلابدار ــ مکعب چوبی (هم‌جرم با وزنه) ــ نخ ــ خط‌کش ــ پایه ــ خمیر بازی ــ چسب نواری ــ ترازو

مرحله‌های اجرای آزمایش : ابتدا جرم وزنهٔ قلابدار را با استفاده از ترازوی سه‌اهرمه (تک‌کفه‌ای) اندازه‌گیری کردیم m=۵۳/۶g. برای آنکه مکعب با سطح میز اصطکاک کمتری داشته باشد زیر آن را چسب‌نواری چسباندیم. سپس جرم آن را اندازه‌گیری کردیم و آنقدر روی آن خمیربازی چسباندیم تا جرم مجموعه به ۵۳/۶ گرم رسید. چون می‌خواهیم مکعب روی مسیر مستقیم حرکت کند و در آزمایشگاه ریل پرده نداشتیم مطابق شکل روبه‌رو دو خط‌کش را در طرفین مکعب طوری روی میز چسباندیم که مکعب بتواند در نوار بین دو خط‌کش حرکت کند.

وزنه را با نخ از پایه طوری آویختیم که در حالت قائم و مماس بر مکعب ساکن باشد.

وزنه را در حالتی که نخ آن کاملاً کشیده بود به اندازهٔ 5cm از سطح میز بالا آورده و رها کردیم.

گلوله در برخورد با مکعب تقریباً ساکن شد و مکعب به حرکت درآمد و جابه‌جا شد. جابه‌جایی را اندازه‌گیری کردیم و برای کم‌کردن خطای آزمایش دو بار دیگر نیز همین کار را تکرار کردیم و میانگین جابه‌جایی مکعب را در جدول یادداشت کردیم.

آزمایش را به همین ترتیب برای ارتفاع‌های دیگر هر بار سه مرتبه انجام دادیم و همهٔ نتایج را در جدول ثبت کردیم.

جدول یا نمودار

توجه : اندازه‌گیری جابه‌جایی مکعب وقتی وزنه از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری رها می‌شد در سومین دفعه خیلی با بقیه تفاوت داشت که آن را حذف کردیم چون احتمالاً در برخورد آن با جعبه خطایی پیش‌آمده که متوجه آن نشده‌ایم.

ردیف	ارتفاع وزنه از سطح میز (cm)	جابه‌جایی مکعب پس از برخورد			
		۱	۲	۳	میانگین
۱	۵	۷/۷	۷/۳	۷/۶	۷/۵
۲	۱۰	۱۴	۱۴/۲	۱۴/۶	۱۴/۳
۳	۱۵	۲۰/۸	۲۱/۵	~~۱۸/۵~~	۲۱/۶
۴					

تحلیل جدول یا نمودار و نتیجه‌گیری : دیده می‌شود که وقتی ارتفاع را دو برابر کردیم تقریباً جابه‌جایی مکعب نیز دو برابر و به همین ترتیب وقتی ارتفاع را سه برابر کردیم جابه‌جایی مکعب هم سه برابر شده است.

پس نتیجه می‌گیریم که : الف) وزنه وقتی نسبت به میز در ارتفاع قرار می‌گیرد دارای انرژی‌ای است که در برخورد به مکعب آن را به شکل انرژی جنبشی به مکعب می‌دهد.

انرژی وزنه را انرژی پتانسیل گرانشی می‌نامیم.

ب) هرچه ارتفاع وزنه بیشتر باشد انرژی پتانسیل گرانشی آن هم بیشتر است :

$U \propto h$ انرژی پتانسیل گرانشی جسم

عوامل ایجاد خطا :

الف) اصطکاک جعبه با لبه‌های خط‌کش‌ها دردو طرف مسیر و نیز با سطح میز

ب) اندازه‌گیری ارتفاع گلوله تا سطح میز که سعی می‌کردیم از مرکز وزنه تا سطح میز را با خط‌کش اندازه‌بگیریم و همین موجب ایجاد خطا می‌شد.

پ) طرز قرارگرفتن گلوله و نخ موجب می‌شود که پس از رهاشدن برخورد در همهٔ حالت‌ها ایده‌آل نباشد بخصوص در آزمایش سوم برای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری.

پیشنهاد و ابتکار : اعضای گروه ما فکر می‌کنند که از عوامل دیگر مؤثر انرژی پتانسیل گرانشی هر جسم جرم آن است و برای تحقیق آن می‌توانیم مانند آزمایش اجرا شدهٔ بالا وزنه‌هایی با جرم‌های مختلف را از یک ارتفاع یکسان رها کنیم تا به جعبه برخورد کنند. البته حدس می‌زنیم که این دفعه گلوله‌ها در برخورد با جعبه متوقف نشوند و همین موضوع باعث خطای زیادی خواهد شد.

فهرست منابع

منابع فارسی

۱ــ مبانی فیزیک (جلد اول)، ویرایش نهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمهٔ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۹۰.

۲ــ فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویرایش دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمهٔ اعظم پورقاضی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.

۳ــ درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمهٔ روح‌الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ اول ۱۳۸۵، انتشارات مدرسه.

۴ــ حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمهٔ حسین توتونچی، حسن شریفیان عطار و محمدهادی هادی‌زاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.

۵ــ دورهٔ درسی فیزیک (جلد اول) گ.س.لندسبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.

۶ــ اصول فیزیک (جلد اول)، اوهانیان، ترجمهٔ یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اوّل، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.

۷ــ فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، هیوئیت، ترجمهٔ منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.

۸ــ فیزیک پایه، ویرایش سوم، بلت، ترجمهٔ محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۰، انتشارات فاطمی.

۹ــ دانشنامهٔ فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ترجمهٔ محمدابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامهٔ بزرگ فارسی.

۱۰ــ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویرایش دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر و رسول جعفری‌نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.

منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, MC Graw – Hill.

2. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.

3. Physics, Giambattista and Richardson, Second Edition, 2008, MC Graw– Hill.

4. University Physics, Bauer and Westfall, 2011, MC Graw – Hill.

5. Physics, Eugene Heacht, Second Edition, 1997, Brooks / Cole Publishing company.

6. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison – Wesley.

7. Fundamental of Physics, David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker, 2008, John Wiley and Sons.

8. Physics, Douglas C. Giancoli, 1991, Prentice – Hall International.

9. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.

تصویرهای شروع فصل‌های ۱، ۲ ، ۳ از کتاب مجموعه تصاویر نیکول فریدنی، چاپ ۱۳۸۱، انتخاب شده‌اند.

معلمان محترم، صاحب‌نظران، دانش‌آموزان عزیز و اولیای آنان می‌توانند نظر اصلاحی خود را در بارهٔ مطالب این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ - گروه درسی مربوط و یا پیام‌نگار (Email) talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطهٔ نظری