فصل ۴

دما و گرما

دما و دماسنجی ۴ـ۱
انبساط گرمایی ۴ـ۲
گرما ۴ـ۳
تغییر حالت‌های ماده ۴ـ۴
روش‌های انتقال گرما ۴ـ۵
قوانین گازها ۴ـ۶
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- تفاوت دما و گرما را تبیین می‌کنند و آنها را از هم تمیز می‌دهند.
- با استفاده از پایستگی انرژی به درکی از دمای تعادل و مبادلهٔ انرژی به‌صورت گرما می‌رسند.
- با روش‌های انتقال گرما در محیط پیرامون خود آشنا می‌شوند.
- اثر تغییردما بر ویژگی‌های فیزیکی مختلف مواد را تبیین می‌کنند.
- رفتار گازهای آرمانی (کامل) را می‌شناسند و آنها را از گازهای واقعی تمیز می‌دهند.

چه شناختی مطلوب است؟

- تغییر کمیت دماسنجی، اساس کار دماسنج‌ها است.
- بیشتر اجسام باافزایش دما، حجم‌شان زیاد و باکاهش دما حجم‌شان کم می‌شود.
- بر اثر اختلاف دما بین دو جسم که در تماس فیزیکی با یکدیگر قرار دارند، انرژی به صورت گرما از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود.
- دو یا چند جسم با دماهای متفاوت که در تماس با یکدیگرند پس از مدتی به دمای تعادل می‌رسند.
- تغییر حالت (فاز) معمولاً همراه با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه است بی‌آنکه تغییر دمایی رخ دهد.
- انتقال گرما به سه روش رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی صورت می‌گیرد.
- با کنترل متغیرهای فشار، حجم، دما و مقدار گاز، به قانونمندی در رفتار گازها پی‌می‌برد.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شوند؟

- کمیت دماسنجی چیست و چگونه از آن در مقیاس‌بندی دماسنج‌ها استفاده می‌شود؟
- بین تغییر حجم و تغییردما (در حالت کلی) چه رابطه‌ای وجود دارد؟
- مقدار گرمای لازم برای افزایش جرم مشخصی از یک جسم به اندازهٔ دمایی معین به چه عواملی بستگی دارد؟
- دمای تعادل براساس چه قانون فیزیکی تعیین می‌شود؟
- گرمای منتقل‌شده برای تغییر حالت (فاز) یک جسم به چه عاملی بستگی دارد؟
- آهنگ رسانش گرمایی در یک جسم به چه عواملی بستگی دارد؟
- گرما به چه روش‌هایی می‌تواند از جسمی با دمای بالاتر به جسمی با دمای پایین‌تر منتقل شود؟
- رفتار گازها را با چه کمیت‌هایی می‌توان توصیف کرد؟

در پایان این واحد یادگیری دانش‌آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

الف) دانشی

با مفاهیم دما، دماسنجی، کمیت دماسنجی، انبساط گرمایی، انبساط غیرعادی آب، گرما، ظرفیت گرمایی، گرمای ویژه، گرماسنج و گرماسنجی، قوانین گازها و گازهای آرمانی آشنا می‌شوند.

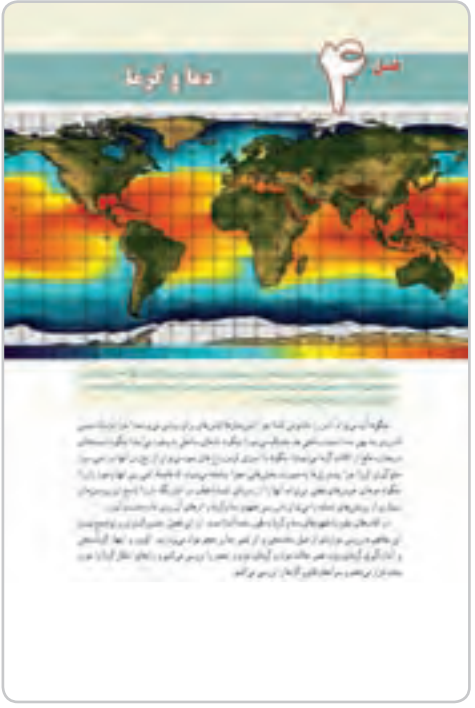
ب) مهارتی

به مهارت‌های چگونگی مدرّج کردن دماسنج‌ها، اندازه‌گیری دما با دماسنج‌ها، تبدیل مقیاس‌های دما به یکدیگر، تعیین عوامل مؤثر برانبساط، محاسبهٔ انبساط گرمایی اجسام، به‌دست آوردن ضریب انبساط حجمی مایعات، محاسبهٔ گرمای منتقل شده به یک جسم در یک تغییر دمای معین، تعیین دمای تعادل، گرماسنجی و به دست‌آوردن گرمای ویژهٔ یک جسم نامشخص، تعیین گرمای نهان، محاسبهٔ گرمای لازم برای تغییر حالت‌ها، تعیین عوامل مؤثر بر رسانندگی گرمایی، محاسبهٔ گرمای منتقل شده در رسانش گرمایی، نشان دادن پدیدهٔ همرفت، کنترل متغیرها و پیدا کردن عوامل مؤثر بر رفتار گازها و تعیین کمیت مجهول در رفتار گازها دست می‌یابند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

- **جلسهٔ اوّل و دوم** : تصویر شروع فصل، بخش ۴ــ۱ دما و دماسنجی
- **جلسهٔ سوم و چهارم** : بخش ۴ــ۲، انبساط گرمایی
- **جلسهٔ پنجم و ششم** : بخش ۴ــ۳ گرما تا سر دمای تعادل
- **جلسهٔ هفتم** : از دمای تعادل تا ابتدای بخش ۴ــ۴
- **جلسهٔ هشتم و نهم** : بخش ۴ــ۴ تا تغییر حالت‌های ماده
- **جلسهٔ دهم و یازدهم** : روش‌های انتقال گرما
- **جلسهٔ دوازدهم و سیزدهم** : قوانین گازها
- **جلسهٔ چهاردهم** : جمع‌بندی، رفع اشکال و حل پرسش‌ها و تمرین‌های باقیمانده
- **جلسهٔ پانزدهم** : آزمون تشریحی فصل سوم

راهنمای تدریس

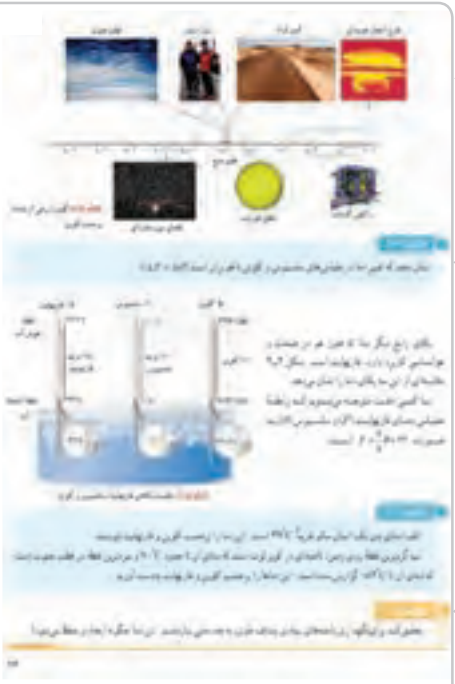


هدف این پرسش‌های ابتدای فصل، آن است که دانش‌آموز با نتایج واقعی مفاهیم و نظریه‌هایی که در این فصل می‌آموزد آشنا شود و اهمیت این دانش را در گوشه و کنار زندگی پیرامونش درک کند.

۴ــ۱ــ دما و دماسنجی

راهنمای تدریس: هدف این بخش، آن است که درک تجربی و عُرفی دانش‌آموز از گرمی و سردی مبنا قرار گیرد و توسعه داده شود تا فهم او به کمیت فیزیکی دما نزدیک گردد. این رویکرد، قطعاً متفاوت از رویکرد دقیق نظری برای تعریف دما در فیزیک است. در رویکرد نظری دقیق باید با قانون صفرم ترمودینامیک درگیر شویم که در توان یادگیری دانش‌آموز در این ردهٔ تحصیلی نیست و پیمودن این مسیر با اهداف آموزش علم در این مرحله فاصله دارد.

حفظ کردن مرتبهٔ بزرگی این دماها موردنظر نیست، ولی لازم است در طرح درس دبیران محترم، این مقادیر مورد گفت‌وگو قرار گیرد تا دانش‌آموزان دست‌کم به‌طور اجمالی با حدود این دماها آشنا شوند و دانش‌آموز دمای $10^{6}\,K$ یا $10^{8}\,K$ را عجیب و غیر ممکن نداند.



تمرین ۴ــ۱

این تمرین با توجه به نقش مهمی که در ادامهٔ درس این فصل دارد باید مورد تأکید ویژه قرار گیرد. در ادامهٔ فصل در همهٔ روابطی که با تغییر دما سروکار داریم، ΔT و $\Delta\theta$ قابل جایگزینی با هم هستند.

پاسخ تمرین ۴ــ۱

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (\theta_2 + 273/15) - (\theta_1 + 237/15)$$
$$= \theta_2 - \theta_1 = \Delta\theta$$

پاسخ فعالیت ۴ــ۱

این دما حدود $-196^{\circ}C$ است و نمونه در ظرف‌های مخصوص و نیز برای مدت طولانی جهت پیوند نگهداری می‌شود. این دما توسط نیتروژن (یا هیدروژن) مایع حاصل می‌شود و نمونه‌ها در ظرف‌های نیتروژن مایع نگهداری می‌شود و تا مدت ۱۵ سال می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

خوب است همکاران محترم، فرصت مغتنم یادگیری دانش‌آموز را صرف بررسی دماسنج‌های تخیلی و غیرواقعی و رابطهٔ بین دما در این مقیاس‌ها نکنند، به‌خصوص که برخی از این گونه سؤالات و مسئله‌ها، بی‌توجه به رابطهٔ غیرخطی بین دما و برخی کمیت‌های دماسنجی طرح می‌شوند.

پاسخ تمرین ۴ــ۲

همان‌طور که در پانوشت کتاب درسی آمده است، در حل مسئله‌ها از رابطهٔ تقریبی $\theta = T + 273$ استفاده می‌کنیم.

الف) $T = 37 + 273 = 310\,K$

همچنین برای تبدیل به فارنهایت داریم $F = \frac{9}{5}\theta + 32 = \frac{9}{5}(37) + 32 = 98/6^{\circ}F \approx 99^{\circ}F$

ب) برحسب کلوین داریم $T_1 = 70 + 273 = 343K$

$T_2 = -89 + 273 = 184K$

و برحسب فارنهایت داریم

$$F_1 = \frac{9}{5}\theta_1 + 32 = \frac{9}{5}(70) + 273 = 399^{\circ}F$$

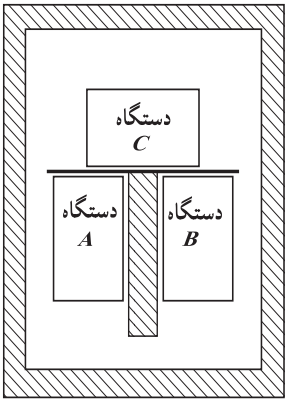
$$F_2 = \frac{9}{5}\theta_2 + 32 = \frac{9}{5}(-89) + 273 = 112/8^{\circ}F \approx 113^{\circ}F$$

دما و قانون صفرم ترمودینامیک

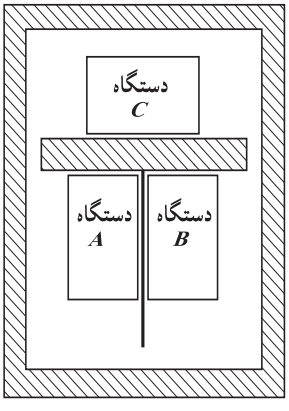
احساس عادی ما از دما به‌صورت صفاتی نظیر سرد، گرم، داغ، خنک، ولرم و غیره که در توصیف اجسام به کار می‌روند بیان می‌شود. با لمس کردن یک جسم، سردی یا گرمی آن را تشخیص می‌دهیم، اما برای ارائهٔ تعریف کمّی دما باید به اثراتی از جسم توجه کرد که ناشی از احساس ما از سردی یا گرمی آنها نباشد و شامل کمیت‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری باشد. دستگاه‌های متعددی را می‌توان یافت که برخی از ویژگی‌های آنها با گرمی و سردی دستگاه تغییر می‌کند. مثلاً جیوه یا الکل موجود در مخزنی که به لولهٔ باریکی ضمیمه شده است، نمونه‌ای از این دستگاه‌ها است. هرچه مایع موجود در مخزن گرم‌تر شود، طول L ستون مایع زیادتر می‌گردد. یا گازی با حجم ثابت که درون حبابی قرار دارد نمونهٔ دیگری است که با گرم یا سرد شدن گاز محبوس در آن، فشار Pی گاز که با یک فشارسنج اندازه‌گیری می‌شود، تغییر می‌کند. چنین دستگاه‌هایی می‌تواند مبنایی برای اندازه‌گیری دما باشد ولی هیچ یک از این دستگاه‌ها، پیش از تعریف دقیق دما، هنوز یک دماسنج نیستند، بلکه دمانما هستند.

لوله و مایع در مثال نخست را دستگاه A و گاز و ظرف آن در مثال دوم را دستگاه B فرض کنید. آنگاه مشخصهٔ دستگاه A عبارت است از طول L ستون مایع و مشخصهٔ دستگاه B فشار Pی گاز است. هرگاه A و B در تماس با هم قرار گیرند، معمولاً ابتدا مشخصه دمای هر دو تغییر می‌کند، و لی سرانجام حالتی پیش خواهد آمد که پس از آن مشخصات دو دستگاه تغییر نمی‌کند. به‌حالتی که مشخصات دو دستگاه پس از رسیدن به آن حالت تغییر نمی‌کند، تعادل گرمایی می‌گویند. حال اگر A و B با دیواره‌ای عایق در تماس با یکدیگر باشند و خودشان هر یک با دیواره‌ای گرمابَر با دستگاه سومی مانند C در ارتباط قرار گیرند، هر یک از دو دستگاه A و B پس از مدتی با دستگاه C به تعادل گرمایی درمی‌آیند. تجربه نشان می‌دهد اگر پس از آن دیوارهٔ عایق بین A و B را برداریم، مشخصه‌های دو دستگاه A و B تغییر بیشتری نخواهد کرد. به‌عبارتی، دو دستگاه A و B نیز با یکدیگر در تعادل گرمایی خواهند بود. این تجربه به‌صورت زیر بیان می‌شود: «دو دستگاه که هر یک به‌طور جداگانه با دستگاه سوم به حال تعادل گرمایی درآمده‌اند با یکدیگر نیز در تعادل گرمایی هستند.» این را اصطلاحاً **قانون صفرم ترمودینامیک** می‌نامند. علت این نامگذاری این است که قوانین اول و دوم که از مهم‌ترین اصول علم ترمودینامیک هستند مبتنی بر قانون صفرم‌اند، در حالی‌که قانون صفرم در دههٔ ۱۹۳۰ میلادی، سال‌ها پیش از کشف قانون‌های اول و دوم، کشف شد. فیزیک‌دانان برای اینکه تقدم قانون صفرم به قوانین اول و دوم را نشان دهند آن را به این نام، نامیدند.

اکنون پرسش این است که این چه چیزی است که در دو دستگاه A و B به تعادل در می‌آید؟ در پاسخ می‌گوییم کمیتی است به نام دما. دما ویژگی‌ای از جسم است که به کمک آن تعادل یا عدم تعادل گرمایی یک دستگاه را با دستگاه‌های دیگر مشخص می‌کنند. هرگاه دو یا چند دستگاه به حال تعادل گرمایی باشند گویند دمای آنها برابر است. دمای یک دستگاه را می‌توان با یک عدد نشان داد. درجه‌بندی و تشکیل مقیاس دمایی، تبیین مجموعه قواعدی است که براساس آنها به هر دستگاه عددی را به دماها نسبت می‌دهد. پس از آنکه این کار انجام شد، در حالت تعادل گرمایی به سادگی می‌توان گفت که دمای دستگاه‌ها با هم مساوی است. اگر دمای دو دستگاه متفاوت باشد، باید مطمئن بود که آن دو دستگاه در حال تعادل گرمایی نیستند.



الف) اگر A و B در تعادل گرمایی با C باشند، آنگاه



ب) A و B نیز در تعادل گرمایی با یکدیگرند.

خوب است دبیران محترم در فرصت‌های مناسب گریزی به زندگی علمی دانشمندان بزنند و نکات برجستهٔ این نوع از زندگی را در نگاه دانش‌آموزان بنشانند. قطعاً آشنایی با زیبایی‌ها، جاذبه‌ها و منش علمی این بزرگان، در جهت ذهنی استعدادهای نوجوانان به این سمت و سو مؤثر است.

معمولاً در توضیح کلی و غیردقیق دماسنج ترموکوپل، وسواس و حساسیتی روی اینکه در این دماسنج، جریان الکتریکی کمیت دماسنجی است یا ولتاژ، وجود ندارد. در آزمایش کیفی و غیردقیق این دماسنج در آزمایشگاه فیزیک نیز، ممکن است از ولت‌سنج یا آمپرسنج استفاده شود. اما در بحث دقیق مربوط به این دماسنج، معلوم می‌شود که کمیت دماسنجی ولتاژ است نه جریان.

همین‌طور، در یک آزمایش غیردقیق، از ساختن اتصال مرجع طفره می‌رویم، ولی در یک ترموکوپل دقیق، حتماً به‌وجود اتصال مرجع نیاز داریم.

دماسنج‌های مختلف که از کمیت‌های دماسنجی متفاوت بهره می‌گیرند، دقت (precision) و صحت (accuracy) یکسان ندارند. در اندازه‌گیری‌هایی که لازم است دما با دقت و صحت زیاد اندازه‌گیری شود باید سراغ دماسنج‌های معیار برویم. این دماسنج‌ها پیشنهاد فیزیک‌دانان تجربی‌کار برجسته در کنفرانس‌های بین‌المللی SI هستند.

۴ــ۲ــ انبساط گرمایی

در آموزش علم برای این ردهٔ سنی از دانش‌آموزان، درست آن است که در هر موضوعی از تجربه‌های نزدیک و در دسترس دانش‌آموز شروع کنیم. این رویکرد، ذهن یادگیرنده را در ردگیری و دنبال کردن بحث، آرام و با نشاط می‌کند و فهم پدیدهٔ مورد مطالعه را برای وی عمیق‌تر می‌نماید. در اینجا فهم عمیق پدیده به معنی تثبیت و ماندگاری این فهم در لایه‌های عمیق ذهن یادگیرنده است و نه به معنی فهم با ساختار نظری کامل و دقیق. فهم عمیق به این معنی دوم، از اهداف آموزش در سطوح علمی بالاتر است.

به‌خاطر سپردن گسترهٔ دقیق دماسنجی ترموکوپل و جنس سیم‌ها و آلیاژها، برای دانش‌آموزان، ضرورت چندانی ندارد.

توجه کنید که دماسنج «کمینه ــ بیشینه» به‌عنوان یک ابزار ساده، تنها می‌تواند کمینه و بیشینهٔ دما را در یک بازهٔ زمانی نشان دهد. اگر بخواهیم بدانیم در چه مدتی از این بازهٔ زمانی دما در نزدیکی دمای کمینه و در چه مدتی، دما در نزدیکی دمای بیشینه بوده است باید از اندازه‌گیری و ثبت کردن دما در فاصله‌های زمانی پیاپی و معین در این بازهٔ زمانی کمک بگیریم که البته با ابزارهای پیشرفته‌تر و کامل‌تر، شدنی است.

پاسخ فعالیت ۴ــ۲

هنگامی که دما بالا رود، به‌دلیل انبساط الکل یا روغن موجود در مخزن وسطی و لولهٔ سمت چپ دماسنج، جیوه در لولهٔ سمت راست به بالا رانده می‌شود و شاخص فولادی لولهٔ سمت راست را با خود بالا می‌برد. اگر سطح جیوه در لولهٔ سمت راست پایین بیاید، شاخص فولادی که به آن فنرهای ریزی متصل است، همراه آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای بیشینه می‌ایستد.

وقتی 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 لولهٔ سمت چپ پایین بیاید شاخص فولادی سمت چپ که به آن نیز 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 موردنظر به سطح جیوه برگردانده می‌شود. در طراحی جدید این نوع دماسنج‌ها، به‌علت سمی بودن جیوه از مایع ترکیبی جدیدی به‌عنوان جایگزین استفاده می‌شود. این دماسنج به دماسنج Six نیز مشهور است و فیلم‌های زیادی از آن در اینترنت پیدا می‌شود.

دانستنی برای معلم

دماسنج‌های معیار

دانشمندان در پی یک مقیاس عملی و وسیله‌ای آسان و سریع برای اندازه‌گیری دما و مدرّج کردن دماسنج‌های علمی و صنعتی هستند. در نشست بین‌المللی اوزان و مقادیر سال ۱۹۹۰، مقیاس بین‌المللی دمای ITS۹۰[۱] معرفی شد. در ITS۹۰ دماسنج معیار اصلی، دماسنج گازی است، اما با توجه به اینکه استفاده از این دماسنج بسیار دشوار است، با استفاده از این دماسنج برخی نقاط ثابت دمایی مانند دمای نقطهٔ سه‌گانهٔ مواد مختلف را به‌طور دقیق اندازه گرفته‌اند و سپس برای اندازه‌گیری دما، بین این نقاط ثابت، دماسنج‌های معیار ثانویه معرفی کرده‌اند. این دماسنج‌های ثانویه در نقاط ثابت دمایی که با دماسنج معیار گازی اندازه‌گیری شده است، با این دماسنج همخوان هستند و در بین این نقاط، دما را با روش‌های بیان شده در ITS۹۰ درون‌یابی می‌کنند. کمترین دمای اندازه‌گیری شده با دماسنج گازی ۰/۶۵K است و تا به حال برای دماهای کمتر از این، مقیاسی تعریف نشده است، گرچه پژوهش‌ها در این زمینه ادامه دارد.

اندازه‌گیری دما بنا به ITS۹۰، در دماهای کمتر از ۱۳/۸۰۳۳K[۲] با دماسنج معیار گازی ^{3}He و ^{4}He انجام می‌گیرد، در دماهای ۱۳/۸۰۳۳K تا ۱۲۳۴/۹۳K[۳] با دماسنج معیار ثانویهٔ مقاومت پلاتینی و روش‌های مربوط به این دماسنج (که ITS۹۰ توضیح می‌دهد) انجام می‌شود، و در دماهای بیشتر از ۱۲۳۴/۹۳K، از دماسنج معیار ثانویهٔ تف‌سنج نوری و روش‌های مربوط به آن (که ITS۹۰ توضیح می‌دهد) استفاده می‌شود. پیش از ITS۹۰، ترموکوپل به عنوان دماسنج معیار ثانویه برای اندازه‌گیری دماهای بالا استفاده می‌شد، ولی دماسنج‌های مقاومت پلاتینی و تف‌سنج نوری به دلیل داشتن دقت بیشتر جایگزین آن شوند.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۱

۱ چه دمایی در مقیاس فارنهایت برابر (الف) دو برابر دمایی در مقیاس سلسیوس و (ب) نصف دمایی در مقیاس سلسیوس است؟

پاسخ : الف) $۳۲۰^{\circ}F$

ب) $-۱۲/۳^{\circ}F$

۲ یک آلیاژ خاص وقتی دمای آن به ۹۲/۰K می‌رسد خاصیتی موسوم به اَبَررسانایی پیدا می‌کند. این دمای حدّی برحسب سلسیوس و فارنهایت چقدر است؟

پاسخ : الف) $-۱۸۱^{\circ}C$

ب) $-۲۹۴^{\circ}C$

۱ـ International Temperature Scale ۱۹۹۰

۲ـ دمای نقطهٔ سه گانهٔ H_2 است که به وسیلهٔ دماسنج معیار گازی اندازه‌گیری شده است.

۳ـ دمای ذوب طبیعی طلا است که به وسیلهٔ دماسنج معیار گازی اندازه‌گیری شده است.

پاسخ پرسش ۴ــ۱

الف) در این صورت انبساط و انقباض گرمایی هر دو به یک گونه خواهد بود و بنابراین تغییرات دمایی تأثیری برجا گرفتن درست کلید در قفل نخواهد گذاشت.

ب) به‌دلیل انبساط‌های گرمایی متفاوت در و چارچوب، تغییرات ابعاد آنها یکسان نخواهد بود. البته اگر در و چارچوب هم‌جنس باشند نیز به دلیل اینکه چارچوب در میان مصالحی نصب شده است که جهت افزایش طول آنها برخلاف جهت افزایش طول چارچوب است، این اتفاق می‌تواند رخ دهد.

یادگیری موارد استثنا، برای دانش‌آموزان، ضرورت چندانی ندارد.

می‌توان با طرح درس‌ها و رویکردهای متفاوتی به رابطهٔ ۴ــ۲ یا رابطه‌هایی قدری متفاوت ولی معادل با این رابطه رسید. همهٔ این روش‌ها، تقریبی و غیردقیق بودن این رابطه را به شکل‌های مختلف، در درون خود دارند. برای کاربردهای دقیق‌تر باید سراغ تعریف دیفرانسیلی و دقیق α برویم که در این حد از آموزش مناسب نیست.

پاسخ فعالیت ۴ــ۳

۱ــ در هر دو شکل، فاصله یا «شکاف‌هایی انبساطی» برای انبساط تعبیه شده است تا دو بخش خط آهن در روزهای گرم فضایی برای انبساط داشته باشند. عکس جالبی در اینترنت از خطوط ریل قدیمی وجود دارد که به‌دلیل عدم تعبیه چنین فاصله‌هایی خطوط کج و معوج شده‌اند.

۲ــ خطوط ریل جدید دارای چنین فضاهایی برای انبساط نیستند. آنها به‌طور پیوسته به هم جوش خورده‌اند. این ریل‌ها زمانی درست می‌شوند که دما حدوداً برابر با میانگین کمینه و بیشینهٔ دمای سالیانه در منطقهٔ موردنظر باشد. با این تدبیر دامنهٔ تغییرات دما که موجب تغییر طول ریل می‌شود کاهش می‌یابد و بنابراین حتی در صورتی‌که ریل دارای شکاف‌های انبساطی باشد نیز انبساط آن تا نصف کاهش می‌یابد. (توجه کنید که اگر دو انتهای میله‌ای را محکم ببندیم و مانع انبساط و انقباض آن شویم و سپس دما را تغییر دهیم، گیره‌های دو انتهای میله مانع انبساط و تراکم میله می‌شود و اگر تغییر دما بسیار زیاد باشد، همان‌طور که در پاسخ قسمت ۱ گفتیم ممکن است میله تغییر شکل دهد تا اینکه حتی ممکن است بشکند. محاسبات مربوط به این پدیده را می‌توان در مبحث تنش گرمایی در کتاب‌های پیشرفته جستجو کرد.)

خوب است دانش‌آموزان مرتبهٔ بزرگی ضریب انبساط‌های جامدات ($۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۵}$ با یکای $\frac{۱}{K}$) در این جدول را به‌خاطر بسپارند تا تصور نادرست و غیرواقعی از این کمیت نداشته باشند. همین‌طور خوب است دقت کنند که کمترین انبساط‌های گرمایی در این جدول مربوط به الماس و شیشهٔ پیرکس است. از این شیشه در ساخت شیشه‌آلات آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

دامنهٔ تغییر دما در منطقهٔ مربوط به مثال ۴ــ۱ و اکثر مناطق زندگی در جهان خیلی کمتر از مقادیر داده شده در این مثال است. ولی در بسیاری از محاسبات از این نوع، در دنیای علوم مهندسی، اولاً به بدترین شرایط فکر می‌کنند تا در یک طرح مهندسی برای مقابله با چنین شرایطی نیز آماده باشند، ثانیاً در بسیاری موارد، به محاسبهٔ دقیق نیازی ندارند و تنها داشتن مقدار حدودی یک کمیت کافی است.

در صورتی که چینش (setup) دستگاه موجود در آزمایشگاه مدرسهٔ شما، قدری متفاوت با این دستگاه باشد، لازم است جزئیات آزمایش را براساس دستگاه خودتان متناسب‌سازی کنید.

ممکن است دما در ابتدا و انتهای لولهٔ فلزی، و درون لولهٔ توخالی، قدری متفاوت باشد. در یک اندازه‌گیری دقیق‌ترِ ضریب انبساط طولی، باید به تصحیح خطای ناشی از این اختلاف دما بیندیشیم.

توجه دانش‌آموزان را به مبحث دماپا که در «فناوری کاربرد» مطرح شده است جلب کنید. چون در این دماسنج از نوار دوفلزه استفاده شده است و ضریب انبساط خطی دو فلز متفاوت است، واکنش نوار پیچه‌ای به تغییر دما به‌صورت جمع‌شدن یا بازشدن خواهد بود.

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی خم‌شدن یک نوار دوفلزه (بی‌متال) را مشاهده می‌کنید.

خیلی وقت‌ها ترموستات با تیغهٔ دوفلزه (بی‌متال) معادل گرفته می‌شود؛ این خطاست. ترموستات یک کلید حساس به دما است که با کم یا زیاد شدن دما، قطع یا وصل می‌شود و ممکن است برای ساخت این کلید از پدیده‌های فیزیکی مختلفی که به دما ارتباط پیدا می‌کند، استفاده شود. خم شدن تیغهٔ دو فلزه با تغییر دما، فقط یکی از این پدیده‌هاست.

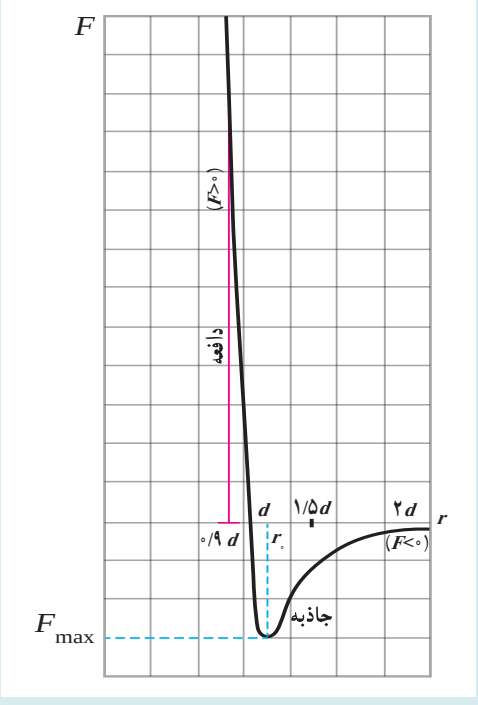
معمولاً این‌طور تصور می‌شود که انبساط گرمایی جسم جامد، پیامد مستقیم افزایش نوسانات اتم‌ها یا مولکول‌ها با افزایش دمای جسم است. واقعیت این است که اگر نیروهای بین مولکولی کاملاً شبیه نیروهای فنرها در مدل گلوله و فنر بود، هرگز با افزایش ارتعاشات گلوله‌ها، شبکه منبسط نمی‌شد. می‌توانید برای فهم درست پدیدهٔ انبساط گرمایی به دانستنی‌ای که در این مورد خواهد آمد مراجعه کنید.

دانستنی برای معلم

منحنی‌های انرژی پتانسیل مولکولی

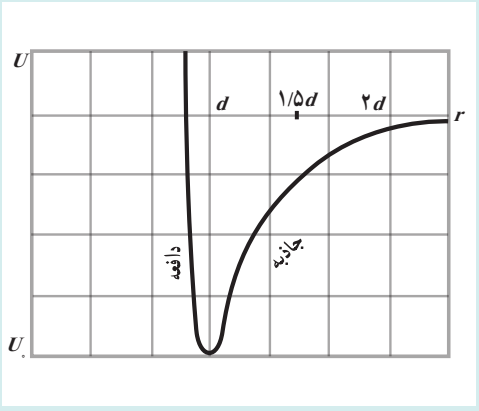
با دانستن شکل نیروهای بین مولکولی برای جامدات و مایعات می‌توانیم نمودار انرژی پتانسیل مولکولی (U) را بر حسب فاصلهٔ بین مولکولی (r) رسم کنیم. اگر d فاصلهٔ تعادل بین مولکولی باشد، می‌دانیم وقتی $r < d$ است، نیروی بین مولکولی دافعه و وقتی $r > d$ است، این نیرو جاذبه می‌شود (شکل الف).

طبق رابطهٔ $F\Delta r = -\Delta U$ درمی‌یابیم منحنی انرژی پتانسیل به ازای $r < d$ و نیروی (مثبت) دافعهٔ بین مولکولی باید نزولی یا دارای شیب منفی باشد (یعنی با محور طول‌ها زاویهٔ منفرجه بسازد) و به ازای $r > d$ و نیروی (منفی) جاذبهٔ بین مولکولی باید صعودی یا دارای شیب مثبت باشد (یعنی با محور طول‌ها زاویهٔ حاده بسازد). چون نیروی دافعه نسبت به نیروی جاذبه به‌طور شدیدتری با فاصله تغییر می‌کند، منحنی انرژی پتانسیل نامتقارن است. در طرف چپ کمینه ($r < d$) شیب خیلی تند است، در حالی‌که در طرف راست کمینه ($r > d$)، منحنی ابتدا صعود می‌کند، اما با شیب کمتر و سرانجام تخت می‌شود، زیرا نیروی برهم‌کنش



(الف)

برای $r > d$ عملاً صفر است. همان‌طورکه می‌دانیم تراز صفر انرژی پتانسیل را می‌توان به دلخواه اختیار کرد. در اینجا مناسب‌تر آن است انرژی پتانسیل را برای وقتی که مولکول‌ها از یکدیگر بسیاردورند، صفر درنظر گرفت. منحنی انرژی پتانسیل برهم‌کنش بین مولکولی در شکل ب نشان داده شده است. در این شکل، U_0 کمینهٔ انرژی پتانسیل مربوط به برهم‌کنش بین مولکول‌ها و مربوط به حالت تعادل آنها است. به‌عبارتی، هرگاه مولکول‌ها به فاصلهٔ d از یکدیگر قرار گیرند، دارای این مقدار انرژی خواهند بود. همان‌طور که خواهیم دید این شکلِ منحنی‌های انرژی پتانسیل است که باعث انبساط گرمایی می‌شود.



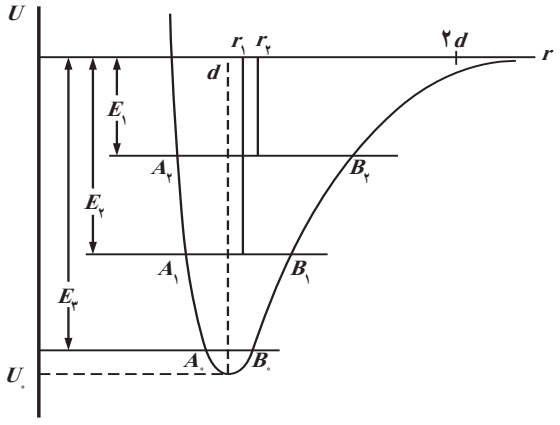
(ب)

دانستنی برای معلم

توجیه انبساط گرمایی از دیدگاه میکروسکوپی

در هر دمای معین، مولکول‌های جسم جامد یا مایع در فاصله‌های معینی از یکدیگر قرار دارند و حول مکان‌های تعادل خود ارتعاش می‌کنند. اگر منحنی انرژی پتانسیل را برحسب فاصلهٔ بین مولکولی رسم کنیم و انرژی کلّ یک مولکول را برای چند دما روی آن مشخص کنیم، می‌توانیم به توجیه انبساط گرمایی جامدات و مایعات بپردازیم.

در این شکل E_0 انرژی نقطهٔ صفر، یعنی کمینهٔ انرژی ارتعاشی مولکول (یعنی انرژی کلّ مربوط به ارتعاش) در دمای صفر مطلق است. E_1 و E_2 انرژی‌های ارتعاشی مولکول در دماهای بالاتر T_1 و T_2 هستند. در صفر مطلق، مولکول‌ها حول مکان تعادل خود که مثلاً در شکل d است ارتعاش می‌کنند. با افزایش دما و در نتیجه افزایش انرژی ارتعاشی، مولکول‌ها در دمای T_1 بین نقاط A_1 و B_1 و در دمای T_2 بین نقاط A_2 و B_2 ارتعاش می‌کند. اما نکتهٔ مهم این است که چون منحنی انرژی پتانسیل نامتقارن است، نقطه‌های B به‌طرف راست بیشتر از نقطه‌های A به‌طرف چپ تغییر مکان پیدا می‌کنند. بنابراین با افزایش دما، مکان تعادل نیز به‌سمت راست انتقال می‌یابد. به‌عبارت دیگر، این نامتقارن بودن منحنی انرژی پتانسیل است که باعث انبساط گرمایی می‌گردد. به‌دلیل نامتقارن بودن منحنی انرژی پتانسیل، فاصلهٔ بین مولکول‌ها افزایش می‌یابد.



رفتار مولکول‌های یک مایع، نه بی‌نظمی و کاتورگی رفتار مولکول‌های گاز را دارد، نه نظم شدید رفتار مولکول‌های یک جامد بلوری را. در مایعات، نوعی نظم میان‌بُرد، بین مولکول‌ها وجود دارد. مولکول‌ها می‌توانند در گروه‌های کوچکی منظم شوند و این گروه‌ها در کنار یکدیگر یا روی هم بلغزند و جابه‌جا شوند. این رفتار مولکول‌ها در مایعات، مبنای فهم برخی ویژگی‌های مایعات است.

توجه دهید که در رابطهٔ ۴ــ۳ یکاهای ΔA و A یکسان، و یکاهای α و ΔT وارون هم است.

همچنین انبساط سطحی را به‌عنوان تعمیمی از انبساط خطی مطرح کنید و از دانش‌آموزان بخواهید رابطهٔ انبساط سطحی را براساس منطق تعمیم حدس بزنند. (البته با چنین رویکردی نمی‌توان به این نتیجه رسید که ضریب انبساط سطحی دو برابر ضریب انبساط طولی است.)

پاسخ فعالیت ۴ــ۴

با استفاده از معادلهٔ ۴ــ۲ 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 $a_2 b_2$ است و بنابراین داریم

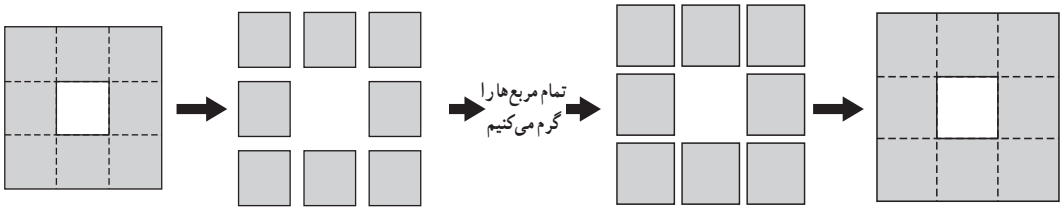
$$A_2 = a_2 b_2 = a_1 b_1$$
$$= a_1(1+\alpha\Delta T)\, b_1(1+\alpha\Delta T) = a_1 b_1 (1+\alpha\Delta T)$$
$$= a_1 b_1 (1 + 2\alpha\Delta T + (\alpha\Delta T)^2)$$

با توجه به اینکه α معمولاً از مرتبهٔ 10^{-5} بر درجهٔ سلسیوس است (جدول ۴ــ۱ 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 :

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

چالش‌ها و چاره‌اندیشی‌های معروفی در این پدیده وجود دارد. آیا با گرم کردن جسم جامدی که حفره‌ای درون آن وجود دارد، انبساط جسم طوری رخ می‌دهد که حفره کوچک شود یا طوری رخ می‌دهد که حفره بزرگ شود؟ شاید سر راست‌ترین پاسخ به این سؤال که ذهن دانش‌آموز را به نرمی و راحتی به اطمینان برساند، منطق تجربه و آزمایش باشد. ***آزمایش معروف گلوله و حلقه*** پاسخ تجربی قاطعی برای این ابهام و سردرگمی دانش‌آموز است. همچنین می توان آزمایشی ذهنی با صفحه‌ای مربعی از جنس فلز را تصور کرد که در وسط آن حفره‌ای مربعی ایجاد شده است. فرض کنید این صفحه را به قطعاتی مربعی می‌شکنیم و قطعه‌ها را پس از گرم کردن، دوباره کنار هم می‌چینیم. درخواهیم یافت، اکنون حفرهٔ مربعی بین صفحات هم باید بزرگ‌تر شده باشد.

این‌گونه پاسخ‌ها علاوه بر اینکه به‌راحتی با ساختار یادگیری ذهن دانش‌آموز ارتباط می‌گیرد، قدرت منطق تجربی و اهمیت آن را در علوم تجربی به دانش‌آموز می‌فهماند.



در این فیلم آزمایش مشهور انبساط گرمایی را که مانع عبور گلوله از حلقه می‌شود را مشاهده می‌کنید.

فیلم

پاسخ تمرین ۴ــ۳

باید از رابطهٔ $\Delta A = ۲\alpha A \Delta T$ استفاده کنیم. این را می‌توان به‌طور شهودی دریافت. رابطهٔ ΔA را برای سطح دایره‌ای می‌توان به‌طور مستقیم نیز اثبات کرد :

$$\Delta A = \Delta(\pi R^۲) = ۲\pi R \Delta R = ۲\pi R(\alpha R \Delta T) = ۲\alpha(\pi R^۲)\Delta T = ۲\alpha A \Delta T$$

در هر حال با جای‌گذاری خواهیم داشت :

$$\Delta A = ۲(۱۹ \times ۱۰^{-۶}/^{\circ}C)(\pi)((۲/۵۴ \times ۱۰^{-۲}m)^۲/۴)(۲۰۰^{\circ}C) = ۳/۸ \times ۱۰^{-۶}\,m^۲$$

رابطهٔ انبساط حجمی را نیز می‌توان با همان منطقی که برای رابطهٔ انبساط خطی ارائه شد (تلفیقی از تجربه و تعمیم) مطرح کرد.

در بسیاری از بلورها ضریب انبساط طولی در راستاهای مختلف درون بلور یکسان نیست. کوارتز (SiO_2) نمونهٔ معروفی از این بلورها است. ژیپس (گچ آب‌دار) نمونهٔ دیگری از این بلورهاست. به این بلورها *ناهمسانگرد* می‌گویند.

به دانش‌آموزان توجه دهید که برای مایع‌ها، انبساط حجمی تنها پارامتر انبساط معنی‌دار است. به‌عبارت دیگر، توجه دانش‌آموزان به این نکته جلب شود که سخن گفتن از انبساط خطی یا سطحی برای مایعات بی‌معناست.

در یک محاسبهٔ سخت‌گیرانه در مثال‌هایی از نوع مثال ۴ــ۴، باید به این نکته توجه کرد که مایع سرریز شده، در دماهای متفاوتی از ظرف بیرون می‌ریزد. چنین نیست که همهٔ مایع سرریز شده به دمای نهایی $60\,^{\circ}C$ رسیده باشد. بنابراین در مدلِ ریاضیِ ساخته شده در حل این مسئله، نوعی خطای ذاتی وجود دارد که البته متفاوت از خطای مربوط به رابطهٔ $\Delta V = \beta V_1 \Delta T$ است.

توصیه می‌شود پیش از آزمایش فعالیت ۴ــ۵، توجه دانش‌آموزان را به تفاوت ضریب انبساط حجمی مایع‌ها و جامدات جلب کنید و اینکه این ضریب برای مایعات به مراتب بزرگ‌تر است و به این ترتیب با افزایش دما، مایع سرریز می‌شود.

پاسخ فعالیت ۴ــ۵

این فعالیت در واقع در همان امتداد مثال ۴ــ۴ است. یک ارلن شیشه‌ای را (همراه با یک لولهٔ شیشه‌ای بلند) پر از گلیسیرین می‌کنیم، به‌طوری که هیچ هوایی در ارلن نباشد و گلیسیرین تا لبهٔ لوله بالا آمده باشد. سپس ظرف شیشه‌ای بزرگی را پر از آب کرده و آن را داغ می‌کنیم. بعد ارلن را وارد ظرف داغ می‌کنیم. گلیسیرین از لوله جاری می‌شود. حجم گلیسیرین جاری شده را با پیمانه‌ای مدرّج اندازه می‌گیریم. باید حجم اولیهٔ گلیسیرین را نیز با روش مناسبی اندازه‌گیری کرده باشیم (دقت کنید که این حجم متفاوت از حجم نوشته شده روی ارلن است) همچنین لازم است دمای اولیه و نهایی گلیسیرین را نیز داشته باشیم. آنگاه همان‌طور که در مثال ۴ــ۴ دیدیم حجم سرریز شده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (\beta_{\text{گلیسیرین}} - \beta_{\text{ظرف}})\ V_1 \Delta T$$

با معلوم بودن ضریب انبساط حجمی ظرف، ضریب انبساط حجمی گلیسیرین پیدا می‌شود.

دانش‌آموزان می‌دانند جرم جسم با دما تغییر نمی‌کند. با توجه به اینکه آنها با رابطهٔ چگالی آشنا هستند، از آنها بخواهید پیش از به‌دست آوردن رابطهٔ چگالی با تغییر دما، حدس خود را بیان کنند.

پاسخ تمرین ۴ــ۴

الف) با استفاده از رابطهٔ (۴ـ۴) داریم $\Delta V = \beta V_1 \Delta T$

که آن را می‌توان به‌صورت $V_2 = V_1(1 + \beta \Delta T)$ نوشت. بدیهی است با توجه به اینکه جرم تغییر نمی‌کند با افزایش دما، چگالی جسم باید کاهش یابد. ولی شکل آن چگونه است؟ از رابطهٔ $\beta = m/V$ (تعریف چگالی) داریم :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{1+\beta \Delta T} \Rightarrow \rho_2 = \frac{\rho_1}{1+\beta \Delta T}$$

ب) صورت و مخرج رابطهٔ بالا را در $(\beta \Delta T - 1)$ ضرب می‌کنیم :

$$\rho_2 = \frac{\rho_1(1-\beta \Delta T)}{(1+\beta \Delta T)(1-\beta \Delta T)} = \frac{\rho_1(1-\beta \Delta T)}{1-\beta^2(\Delta T)^2}$$

با توجه به اینکه β مقداری کوچک از مرتبه 10^{-3} است (جدول ۴ــ۲ را ببینید) از جملهٔ $\beta^2(\Delta T)^2$ چشم‌پوشی می‌کنیم و بنابراین داریم :

$$\rho_2 = \rho_1 (1 - \beta \Delta T)$$

تغییر حجم آب در محدودهٔ دمایی صفر تا ۴ درجهٔ سلسیوس در حدود یک صدم درصد است ولی تغییر حجم آب در تغییر فاز آب به یخ در حدود ۱۰ درصد است. تغییر حجم آب در تغییر فاز جامد به مایع (یا برعکس) به‌خوبی محسوس و قابل مشاهده است. پیشنهاد می‌شود دانش‌آموزان ظرفی را که لبالب از یخ پرشده است، در معرض گرمای ملایمی قرار دهند تا به آرامی آب شود و پس از آنکه همهٔ یخ آب شد، این کاهش حجم چشمگیر را ببینند.

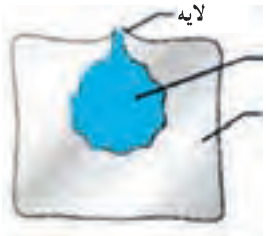
معمولاً بحث رفتار غیرعادی آب، در درس شیمی نیز مطرح می‌شود. خوب است دبیران محترم دو درس، در این مورد با هم همفکری و گفتگو کنند و با دیدگاه‌های یکدیگر آشنا شوند.

در این فیلم، گرمای آزاد شده در یک تغییر فاز از مایع به جامد را مشاهده می‌کنید.

فیلم

پاسخ فعالیت ۴ــ۶

وقتی آب یخ می‌بندد، آب منبسط می‌گردد. اگر یخ در ظرفی روباز تشکیل شود، چون از اطراف نمی‌تواند انبساط یابد، انبساط آن رو به بالا رخ می‌دهد. ابتدا بخش‌هایی از آب که کنار دیوارهٔ ظرف هستند یخ می‌زند و به این ترتیب لایهٔ یخ نازکی روی سطح آب تشکیل می‌شود. با ادامهٔ فرایند یخ زدن، آبی که در میانهٔ ظرف باقی مانده یخ می‌زند و منبسط می‌گردد. در این انبساط، آب میانهٔ ظرف، لایهٔ یخ بالای سرش را به‌طرف بالا می‌راند و این فرایند تا پایان یخ زدن کل آب ادامه می‌یابد و سرانجام سطح بالایی یخ، چیزی شبیه به یک مخروط کوتاه می‌شود. این فرایند گاهی می‌تواند یک تیزی تشکیل دهد. در این مواقع آب در حال انبساط زیرین، لایهٔ یخ را می‌شکند و بقیهٔ آب از محلّ شکستگی به بالا هدایت می‌شود. هرچه سرعت یخ بستن به حدّ کافی کم باشد، آب بیشتری می‌تواند از طریق این پوسته به بالا فشرده و منجمد شود. وقتی همهٔ آب یخ زد، این پوسته تشکیل تیزی رو به بالای صلبی را می‌دهد. به این تیزی رو به بالا «یخ میخی»[۱] می‌گویند. درست کردن یخ میخی، موضوع پرجاذبه‌ای است که می‌تواند دانش‌آموزان را به شوق بیاورد. به فیلم مربوطه در سایت گروه مراجعه شود.



در این فیلم چگونگی درست کردن یخ میخی را می‌بینید.

فیلم

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ــ۲

۱ قطر یک روزنهٔ دایره‌ای در صفحه‌ای آلومینیومی در دمای $0/000\,^{\circ}C$ برابر $2/725\ cm$ است. وقتی دمای صفحه تا $100/0\,^{\circ}C$ افزایش یابد، قطر روزنه چقدر می‌شود؟

پاسخ : $2/731\ cm$

۲ چگالی آب در دمایی خاص $\rho=0/999\times10^{3}\ kg/m^{3}$ است. اگر ضریب انبساط حجمی آب برابر $\beta=1/8\times10^{-4}\ K^{-1}$ باشد، دمای آب چقدر است؟ (**راهنمایی :** چگالی آب در دمای $4\,^{\circ}C$ برابر با $1/03\times10^{3}\ kg/m^{3}$ است.)

پاسخ : $54\,^{\circ}C$

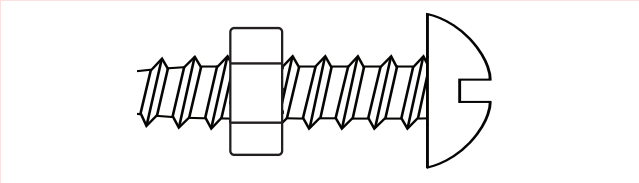
۳ دو ظرف که حاوی نفت سفید در دماهای $\theta_1=10/0\,^{\circ}C$ و $\theta_2=80/0\,^{\circ}C$ هستند، توسط لولهٔ باریکی که در آن توپیِ لغزنده‌ای است، به هم وصل شده‌اند. اگر ضریب انبساط حجمی نفت سفید برابر $\beta=1/00\times10^{-3}\ K^{-1}$ باشد، نسبت ارتفاع‌های ستون‌های نفت در دو ظرف را به دست آورید. (**راهنمایی :** ارتفاع ستون‌های مایع، به‌طور معکوس متناسب با چگالی مایع داخل ظرف‌ها است.)

پاسخ : $h_2/h_1=1/06$

۱ــ Ice – spike

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ــ۲

۱ مهره‌ای به دور یک پیچ، بسیار محکم شده است. برای راحت‌تر باز کردن مهره، آیا باید این مجموعه را گرم کنیم یا سرد؟
پاسخ : باید گرم کنیم. به آزمایش حفره و گلوله بیندیشید.



۲ چرا در خانه‌هایی که لوله‌های آب در معرض هوای سرد زمستان هستند، ممکن است لوله‌ها بترکند؟
(**راهنمایی :** یخ حاصل از انجماد آب ممکن است بستی را ایجاد کند و آب را محبوس نماید.)

۴ــ۳ــ گرما

گونه‌ای از فهم عرفی و غیر فیزیکی در میان مردم و دانش‌آموزان رایج است که وقتی دو جسم گرم و سرد کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، جسم سرد به جسم گرم، سرما می‌دهد. خوب است دبیران محترم، در صورت لزوم روی تصحیح این فهم نادرست فیزیکی پافشاری کنند.

البته در برخی موارد، بیانی وجود دارد که کمی شبیه به این خطای رایج است، ولی نادرست نیست. مثلاً وقتی در هوای سرد زمستانی، دَرِ یک اتاق گرم را باز می‌کنیم، ممکن است هوای گرم از اتاق بیرون برود و هوای سرد وارد اتاق شود. قطعاً با چنین فهمی نمی‌توان و نباید مخالفت کرد.

خوب است به تاریخچهٔ کالریک اشاره شود؛ در راستای آنچه دانش‌آموزان در فصل اول آموخته‌اند، در اینجا نیز تأکید شود که مدل‌های علمی و قدیمی (در اینجا کالریک)، در محدودهٔ خود به‌خوبی عمل می‌کرده‌اند. اتفاقی که در پیشرفت و توسعه علم رخ می‌دهد، ارائهٔ مدل‌های جدیدی است که هم در محدودهٔ مدل‌های قبلی و قدیمی پاسخگو هستند، و هم پدیده‌های جدید را توجیه می‌کنند.

خوب است، ذهن دانش‌آموزان را متوجه این مطلب بکنیم که در تشبیه‌هایی مانند مدل گلوله و فنر در بحث انبساط گرمایی یا مدل جنبشی مولکولی که در اینجا می‌بینید، همهٔ آنچه در این مدل‌ها یا تشبیه‌ها وجود دارد، قابل تعمیم یافتن به اصل پدیده نیست. مثلاً در اینجا فقط می‌فهمیم جنبش مولکولی جسم داغ، کم و جنبش مولکولی جسم سرد زیاد می‌شود و نباید نتیجه بگیریم نهایتاً سرعت‌های همهٔ ذرات در دو جسم مساوی می‌گردد.

هدف از پرسش **۴ــ۲** آن است که دانش‌آموزان دریابند دماسنج، دمای تعادل را نشان می‌دهد.

پاسخ پرسش ۴ــ۲

الف) در واقع دماسنج‌ها، دمای تعادل خود با محیط را اندازه می‌گیرند. پس، دماسنج دمای خود را که در تعادل با محیط است اندازه می‌گیرد.

ب) دمای بدن دانش‌آموز بیشتر از دمای بقیهٔ اجسام است. دمای شیشهٔ پنجره که در تماس با هوای سرد بیرون است از دمای بقیه اجسام کمتر است. دمای اجسامی مثل میز، صندلی و تخته، با دمای هوای اتاق تقریباً یکسان است، گرچه ممکن است در تماس دست خود با آنها، دماهای متفاوتی را احساس کنیم که این به خوب یا بد بودن رسانش گرمایی آن اجسام مربوط می‌شود.

پ) با کاهش دمای جسم گرم، میانگین انرژی جنبشی ذرات آن کاهش می‌یابد و با افزایش دمای جسم سرد، میانگین انرژی جنبشی ذرات آن افزایش می‌یابد. درصورتی که دو جسم از یک جنس باشند، هنگام برقراری تعادل گرمایی و هم‌دما شدن دو جسم، میانگین انرژی جنبشی ذرات آنها با هم مساوی است.

در مبحث ظرفیت گرمایی باید به این نکته اشاره شود که منظور از ظرفیت گرمایی این نیست که ماده می‌تواند گرما را حفظ کند. گرما برخلاف انرژی درونی، یک تابع حالت ترمودینامیکی نیست.

توجه کنید که پیش از بیان رابطهٔ **۴ــ۷** امکان اندازه‌گیری مستقیم گرما وجود ندارد. در واقع پیش از رابطهٔ **۴ــ۷** گرما را براساس فهمی که از هم ارزی کار و گرما داریم به روش‌هایی غیر از روش‌های گرماسنجی یا کالری‌متری اندازه می‌گیریم (مثلاً به روش الکتریکی و با استفاده از رابطهٔ $W = RI^{2}t$).

خوب است اشاره شود منظور از پسوند ویژه، «بر واحد جرم» است. همچنین آزمایش‌های اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی، اغلب در فشار ثابت انجام می‌شود؛ چرا که انجام این آزمایش‌ها در حجم ثابت، به‌دلیل تغییر حجم با دما، بسیار دشوار است. برای همین ظرفیت گرمایی در حجم ثابت معمولاً اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه از روی داده‌های دیگر محاسبه می‌گردد.

دبیران محترم، مراقبت کنند که این تعریف گرمای ویژه، سبب کج‌فهمی دانش‌آموزان نشود، به‌طوری که گمان کنند گرمای ویژه، از جنس گرما است.

فعالیت پیشنهادی

درون بادکنکی مقداری آب بریزید و سپس آن را باد کنید. بادکنک باد شده را روی شمع روشنی قرار دهید. خواهید دید بادکنک نمی‌ترکد و دوده‌ای بر محل تماس بادکنک با شعلهٔ شمع تشکیل می‌شود. دلیل را توضیح دهید.

پاسخ : این به ظرفیت گرمایی بالای آب مربوط می‌شود. آب به دلیل ظرفیت گرمایی بالای خود، گرمای اضافی بادکنک را جذب می‌کند و نمی‌گذارد درجه حرارت بادکنک به دمایی برسد که آن را بسوزاند. مورد مشابهی در قابلمهٔ کاغذی رخ می‌دهد که در آب ریخته باشید. در این آزمایش نیز کاغذ در تماس با شعله، نمی‌سوزد.

این فیلم، نمایشی از این فعالیت را نشان می‌دهد.

فیلم

در این فیلم، آزمایش مشابهی در مورد نسوختن یک قابلمهٔ کاغذی حاوی آب را می‌بینید.

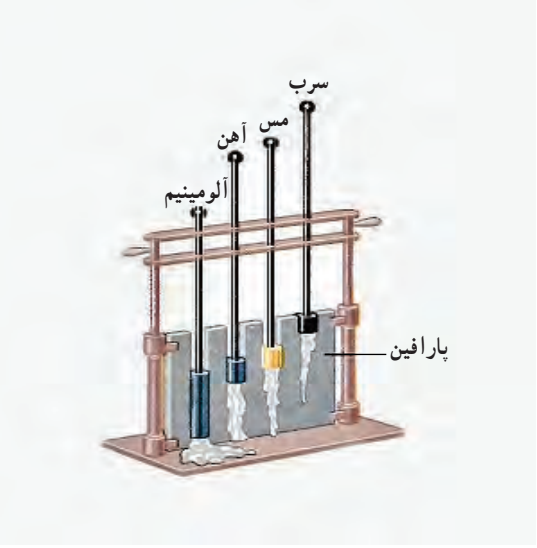
فیلم

در این فیلم، آزمایش مشابهی را می‌بینید که در آن یک اسکناس در مخلوطی از آب و الکل خیسانده می‌شود، ولی زیر شعله، آتش نمی‌گیرد.

فیلم

پاسخ پرسش ۴ــ۳

این به گرماهای ویژهٔ گوی‌ها بستگی دارد. اگر به جدول ۴ـ۳ رجوع کنید برحسب J/kg.K گرماهای ویژهٔ سرب، برنج، مس، فولاد و آلومینیم به ترتیب ۱۲۸، ۳۸۰، ۳۸۶، ۴۵۰ و ۹۰۰ است. بنابراین میزان ذوب شدن پارافین از کمترین تا بیشترین به همان ترتیب است. آزمایش اصلی که توسط *جان تیندال* انجام شد به وسیلهٔ وزنه‌های استوانه‌ای انجام شده که شکل آن به‌صورت زیر است.



در این فیلم، نمایشی از آزمایش تیندال را مشاهده می‌کنید.

فیلم

معمولاً دانش‌آموزان می‌پندارند مول فقط مربوط به مولکول‌ها است. خوب است اشاره شود که مول تنها مربوط به مولکول‌ها نیست، بلکه به اجزای سازندهٔ هر شکل از ماده مربوط است.

توجه شود در جامدهای بلوری غیرفلزی رفتار C_P و C_V متفاوت است و با افزایش دما C_P به‌طور خطی افزایش می‌یابد در حالی که در C_V به مقداری مجانبی میل می‌کند، اما در مورد فلزها این دو، رفتار تقریباً یکسانی دارند و هر دو با افزایش دما به یک مقدار مجانبی میل می‌کنند.

در یک رویکرد نظری و سخت‌گیرانه، در بحث قانون صفرم ترمودینامیک گفته می‌شود آنچه برای دو جسم در تماس با یکدیگر که به تعادل رسیده‌اند، یکسان است، دما نامیده می‌شود. یعنی مفهوم تعادل، مقدم بر تعریف کمیت فیزیکی دما است. این رویکرد گرچه از لحاظ علمی درست‌تر است، ولی مناسبِ فضای فهم علمی دانش‌آموزان در این ردهٔ تحصیلی نیست.

برای جا انداختن معادلهٔ **۴ــ۹** که براساس قانون پایستگی انرژی نوشته شده است مثال‌های زیادی باید مطرح شود تا دانش‌آموزان به درک درستی از آن نایل آیند.

بعضی وقت‌ها گفته می‌شود رابطهٔ **۴ــ۹** به شرطی درست است که گرمای تلف شده نداشته باشیم. این شرط، لازم نیست. آنچه به آن گرمای تلف شده گفته می‌شود، مثلاً گرمایی است که با هوای اطراف اجسام اصلی مورد بحث، داد و ستد شده است. در چنین مواردی باید Qی این هوا را نیز در مجموع گرماهای رابطهٔ **۴ــ۹** قرار دهیم.

واضح است که رابطهٔ **۴ــ۱۰** در شرایطی که برخی از اجسام، در نتیجهٔ داد و ستد گرما تغییر فاز دهند، درست نیست.

در مثال ۴ــ۹ و تمرین ۴ــ۵، چشم‌پوشی از ظرفیت گرمایی ظرف حاوی آب در مقایسه با ظرفیت گرمایی آب درون ظرف، نابه‌جا نیست. ظرفیت گرمایی ظرف گرماسنج‌های معمولی آزمایشگاهی چیزی در حدود $۱۰۰\,J/^{\circ}C$ است که در مقایسه با ظرفیت گرمایی $۰/۵۰۰\,kg$ آب ($۲۱۰۰\,J/^{\circ}C \simeq$) ناچیز (در حدود ۵ درصد) است. از این منظر نیز، این مثال و تمرین، مقدمهٔ خوبی برای ورود به بحث گرماسنج (کالری متر) هستند. البته، گرماسنج علاوه بر اینکه باید ظرفیت گرمایی ناچیزی داشته باشد، باید به‌خوبی نیز عایق‌پوش گرمایی شده باشد، و بلکه این ویژگی دوم مهم‌تر نیز هست.

دانش‌آموزان، معمولاً نمی‌توانند به‌سادگی میان عایق بودن ظرف و رخ ندادن مبادلهٔ گرما بین ظرف و مواد درون ظرف، تمایز قائل شوند. لازم است دبیران محترم، در تمرین ۴ــ۵، که مقدمهٔ خوبی برای ورود به بحث گرماسنجی است، تفاوت و تمایز این دو مفهوم را برای دانش‌آموزان روشن کنند.

پاسخ تمرین ۴ــ۵

در این فرایند، آب گرما از دست می‌دهد و جسم گرما می‌گیرد و به دمای تعادل ($\theta = ۲۱/۰^{\circ}C$) می‌رسد. به ازای

آب : $m_۱ = ۰/۵۰۰\,kg\ ,\ \theta_۱ = ۲۵/۰^{\circ}C\ ,\ c_۱ = ۴۱۸۷\ J/kg.^{\circ}C$

جسم : $m_۲ = ۰/۲۵۰\,kg\ ,\ \theta_۲ = ۳/۰^{\circ}C$

از رابطهٔ ۴ـ۱۰ خواهیم داشت :

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

$$\Rightarrow c_۲ = \frac{m_۱c_۱(\theta - \theta_۱)}{m_۲c_۲(\theta - \theta_۲)} = \frac{(۰/۵۰۰\,kg)(۴۱۸۷\,J/kg.^{\circ}C)(۲۵/۰^{\circ}C - ۲۱/۰^{\circ}C)}{(۰/۲۵۰\,kg)(۲۱/۰^{\circ}C - ۳/۰^{\circ}C)}$$

$$= ۱۸۶۱\ J/kg.^{\circ}C \simeq ۱/۹ \times ۱۰^{۳}\ J/kg.^{\circ}C$$

برای آنکه از درستی انجام آزمایش ۴ــ۲ مطمئن شوید پیشنهاد می‌شود نخست با استفاده از این روش آزمایش، گرمای ویژهٔ یک فلز معلوم را محاسبه و آن را با مقادیر جدول ۴ــ۳ مقایسه کنید. اگر عدد به‌دست آمده با تقریب خوبی درست بود، بعد گرمای ویژه نامعلوم را تعیین کنید، وگرنه در پی رفع مشکل آزمایش بگردید.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ــ۳

۱ مهندسی می‌خواهد گرمای ویژهٔ یک آلیاژ فلزی نامعلوم را تعیین کند. ۰/۱۵۰kg از نمونه‌ای از این آلیاژ را تا $54^{\circ}C$ گرم می‌کند و بلافاصله آن را در ۰/۴۰۰kg آب $10/0^{\circ}C$ می‌اندازد که در ظرف گرماسنجی از جنس آلومینیوم به جرم ۰/۲۰۰kg قرار دارد. دمای نهایی مجموعه $30/5^{\circ}C$ است. گرمای ویژهٔ آلیاژ را تعیین کنید.

پاسخ : $497 J/kg.^{\circ}C$

۲ برای اندازه‌گیری گرمای ویژهٔ سرب به این ترتیب عمل کنید. نخست یک گلولهٔ سربی به جرم ۶۰۰g را تا دمای $100^{\circ}C$ گرم کنید و سپس آن را در یک گرماسنج آلومینیومی به جرم ۲۰۰g قرار دهید که حاوی ۵۰۰g آب در دمای اولیهٔ $17/3^{\circ}C$ است. اگر دمای نهایی مخلوط به $20/0^{\circ}C$ برسد، گرمای ویژهٔ سرب چقدر است؟

پاسخ : $0/128 kJ/kg.K$

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ــ۳

۱ گرمای ویژهٔ آب ۱۰ برابر گرمای ویژهٔ آهن است. اگر جرم برابری از آب و آهن در ابتدا در تعادل گرمایی باشند، پس از افزودن ۵۰J گرما به هرکدام، کدام یک از موارد زیر تحقق می‌یابد؟

الف) آنها در تعادل گرمایی باقی می‌مانند.

ب) آنها دیگر در تعادل گرمایی نیستند. آهن گرم‌تر است.

پ) آنها در تعادل گرمایی نیستند. آب گرم‌تر است.

پاسخ : ب)

۲ در قدیم مرسوم بود سبزیجات و شیشه‌های ترشیجات را برای در امان ماندن از سرما در زیرزمین قرار می‌دادند که در آن تشتی بزرگ از آب در کنار آنها گذاشته می‌شد. چگونه چنین کاری می‌توانست مانع از یخ زدن آنها شود؟

(**راهنمایی :** وقتی آب شروع به یخ‌زدن می‌کند، مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود که دمای زیرزمین را حدود $0^{\circ}C$ نگه می‌دارد. همچنین محلول‌های آبی شیشه‌های ترشیجات، نقطهٔ انجماد پایین‌تری دارند.)

۴ــ۴ــ تغییر حالت‌های ماده

مبحث تغییر حالت‌های ماده، همان‌طور که در ادامه می‌آید، می‌تواند بحثی راه‌گشا در مورد انرژی درونی ارائه کند. بنابراین خوب است به ارتباط این مبحث با انرژی درونی توجه داده شود.

خوب است پیش از ورود به بحث تغییر فاز جامد ــ مایع، از دانش‌آموزان بخواهیم براساس دانسته‌های قبلی، اطلاعات عمومی، تجربه، یا حدس‌های هوشمندانه و علمی خود، در این مورد گفتگو کنند، و با هدایت و راهنمایی معلم، به مطلب موردنظر درسی، نزدیک شوند.

توجه کنید که در فعالیت ۴ــ۷، نقطهٔ سه‌گانه اهمیت ندارد. هدف از این فعالیت آن است که نشان دهد برای افزایش جزئی نقطهٔ ذوب یخ به چه کاهش فشار زیادی نیاز است.

پاسخ فعالیت ۴ــ۷

اگر به ویراست هفتم کتاب حرارت و ترمودینامیک زیمانسکی ــ دیتمن (صفحهٔ ۲۵۲ ترجمهٔ فارسی) رجوع کنید، درمی‌یابید که فشار برای دمای نقطهٔ سه‌گانه آب طبیعی ۶۱۱/۷۳Pa است که می‌بینید چه تفاوت فاحشی با فشار مربوط به دمای $0\,^{\circ}C$ دارد. (توجه کنید این فشار نقطهٔ سه‌گانه را با فشار P_{tr} در «خوب است بدانید دماسنج گازی حجم ثابت» اشتباه نگیرید. P_{tr} فشار گاز دماسنج گازی در نقطهٔ سه‌گانه است.)

پاسخ فعالیت ۴ــ۸

هوا شامل بخار آب است. وقتی دمای هوا در ابتدا بالای نقطهٔ انجماد آب باشد و هوا خنک شود همان پدیدهٔ میعان رخ می‌دهد و بخار به شکل باران، مه و شبنم تبدیل می‌شود. با سردتر شدن هوا، این آب به شکل تگرگ یخ می‌زند. اما اگر در ابتدا دما زیر نقطهٔ انجماد آب باشد، بخار آب مستقیماً از حالت گازی به حالت جامد می‌رود (عکس پدیدهٔ تصعید). در این صورت بلورهای یخ معلق در هوا ضمن حفظ تقارن شش وجهی خود، به‌آرامی رشد می‌کند و تشکیل دانه‌های برف را می‌دهند. (فرایند مشابهی موجب تشکیل برفک در یخچال می‌شود.)

دانستنی برای معلم

پَس‌دَمِه[۱]

وقتی هواپیما در ارتفاع زیاد در حرکت است، گردبادهایی توسط نوک بال‌ها (و سایر قسمت‌های نوک‌تیز بدنهٔ هواپیما) در هوا ایجاد می‌شود. بخار آب موجود در دود خارج‌شده از موتور هواپیما، درون این گردبادها و در هوای بسیار سردِ ارتفاع زیاد، تبدیل به قطره‌های کوچک آب، یا بلورهای ریز و درشت یخ می‌شود. قطره‌های آب یا بلورهای یخ که درون این گردبادها ایجاد شده‌اند، نور خورشید را شدیداً پراکنده می‌کنند و دنباله‌های گردبادی ایجادشده در پشت هواپیما را قابل مشاهده می‌سازند. چون پراکندگی نور سفید خورشید به‌وسیلهٔ این قطره‌های آب و بلورهای یخ، معمولاً به طول موج نور بستگی ندارد، این پَس‌دَمه‌ها معمولاً سفیدرنگ هستند.

معمولاً پس‌دمه‌هایی که از قطرات آب تشکیل شده‌اند کوتاه‌اند، زیرا این قطره‌ها به‌سرعت تبخیر می‌شوند. ولی پس‌دمه‌هایی که از بلورهای ریز یخ تشکیل می‌شوند (برخلاف بلورهای یخ بزرگ که فرومی‌افتند)، مدت بیشتری باقی می‌مانند و بنابراین پس‌دمه‌های بلند و بادوامی هستند.

گاه این پس‌دمه‌ها روی دود، مه، یا بخاری که در ارتفاعات پایین‌تر قرار دارد، سایه می‌اندازند و مانع رسیدنِ نور خورشید به آنها می‌شوند. در چنین مواقعی، این سایه به شکل خطی تیره در آسمان ظاهر می‌شود. جالب آن است که در چنین وضعیتی، اگر خورشید در پشت هواپیما باشد، خط تیرهٔ سایه در جلوی هواپیما دیده می‌شود.

پدیدهٔ مشابه دیگری هنگام عبور هواپیما از میان ابری که حاوی قطرات آب و بلورهای ریز یخ است رخ می‌دهد. گرمای ایجادشده به‌وسیلهٔ موتور هواپیما باعث تبخیر قطره‌های آب و بلورهای یخ درون ابر می‌شود و خط تاریکی به نام *دنبالهٔ اتلافی*[۲] در آسمان ظاهر می‌گردد.

گاه بخار آب موجود در دود خارج‌شده از موتور هواپیما، ابر را آن‌چنان انباشته از بخار می‌کند که بلورهای یخی بسیار بزرگ در ابر ایجاد شده و فرومی‌افتند و در این وضعیت نیز ممکن است یک دنبالهٔ اتلافی در آسمان ظاهر شود.

۱ــ Contril مخفف Condensation trail

۲ــ Distrail

پاسخ فعالیت ۴ــ۹

وجود ناخالصی موجب فروافتادن نقطهٔ انجماد می‌شود. برای توضیح این پدیده به قطعه یخی فکر کنید که روی آن لایهٔ نازکی از آب وجود دارد. در سطح جدایی لایهٔ آب و یخ، دائماً تعدادی مولکول از آب به یخ می‌پیوندند و تعدادی مولکول نیز از یخ به آب می‌پیوندد. وجود تعادل در این دو فرایند سبب می‌شود مقدار آب و مقدار یخ ثابت بماند. حال اگر مقداری نمک طعام روی این قطعه یخ بپاشیم. مولکول‌های نمک در لایهٔ آب به یون‌های مثبت و منفی تجزیه می‌شوند. مولکول‌های آب دور هر دو یون جمع می‌شوند و اصطلاحاً یون‌ها را *هیدراته* می‌کنند. در نتیجهٔ هیدراته شدن یون‌ها، تعداد مولکول‌هایی که از آب به یخ می‌پیوندند کاهش می‌یابد، در حالی‌که تعداد مولکول‌هایی که از یخ به آب می‌پیوندند تغییری نکرده است. به عبارتی، تعادل قبلی برهم می‌خورد و از یخ کاسته و بر لایهٔ آب افزوده می‌شود و آن‌قدر آب موجود در لایهٔ آب زیاد می‌شود تا دوباره تعادل برقرار گردد. در پیوستن مولکول‌های آب از یخ به آب، انرژی مولکول‌ها افزایش می‌یابد، زیرا مولکول‌های آب در حالت مایع نسبت به حالتی که در ساختار بلورین و صلب یخ قرار دارند، دارای انرژی بیشتری هستند. این افزایش انرژی مولکول‌ها، با گرفتن گرما از لایهٔ آب تأمین می‌شود و در نتیجه دمای لایهٔ آب پایین می‌آید و به دنبال آن دمای یخ که در تماس با این لایهٔ آب است نیز کاهش می‌یابد. اصطلاحاً گفته می‌شود نقطهٔ انجماد آب به‌دلیل وجود نمک "فرو می‌افتد."

با پاشیدن نمک بیشتر روی یخ، مقدار بیشتری از یخ ذوب می‌شود و دمای آب و یخ بیشتر کاهش می‌یابد. البته برای این کاهش، حدّی وجود دارد؛ مثلاً برای نمک طعام ($NaCl$) این دمای حدّی، $-21^{\circ}C$ و برای کلسیم کلراید ($CaCl_2$) این دمای حدّی، $-55^{\circ}C$ است. به همین دلیل برای جاده‌های یخ بسته از کلسیم کلراید استفاده می‌کنند.

در اینجا نیز، همچون بحثِ تغییر فاز جامد ــ مایع، خوب است، گفت‌وگویی مقدماتی، با همان الگو و اهداف، میان دانش‌آموزان طراحی کنیم. به علاوه خوب است با پرسش‌های برانگیزندهٔ بیشتری مبحث را شروع کرد، به‌خصوص که دانش‌آموزان با این موارد آشنا‌ترند.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۰

الف) تبخیر سطحی با افزایش دما زیاد می‌شود. در واقع مولکول‌ها برای آنکه بتوانند از سطح آزاد مایع فرار کنند باید انرژی جنبشی لازم برای فرار از چنگ کشش سطحی را داشته باشند و بدیهی است که این با افزایش دما بیشتر می‌شود. وانگهی کشش سطحی آب نیز با افزایش دما کم می‌شود که این هم به تبخیر ساده‌تر آب می‌انجامد. در جدول ۴ــ۵ نیز این بستگی به دما به‌وضوح نمایان است.

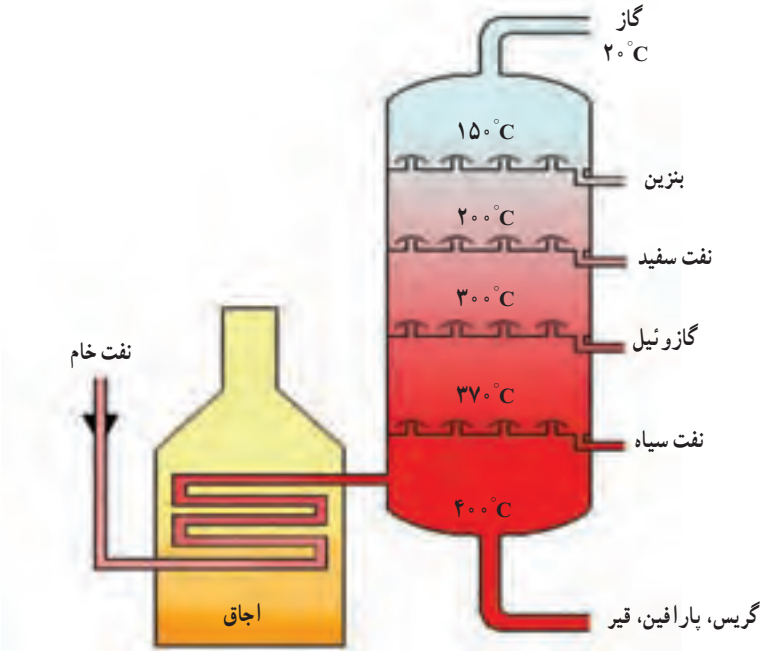
افزایش مساحت نیز موجب افزایش تبخیر سطحی می‌شود. چرا که هر چه مساحت سطح آزاد بیشتر شود بدیهی است که مولکول‌های بیشتری برای فرار از سطح آزاد مایع وجود خواهد داشت.

ب) دانش‌آموزان مثلاً می‌توانند سطح آزاد مایع را در معرض نسیم یا باد طبیعی و یا مصنوعی (مثلاً باد پنکه) قرار دهند و بدین ترتیب دریابند که آهنگ تبخیر سطحی افزایش می‌یابد. همچنین اگر بتوان شرایطی را فراهم کرد که فشار هوا بر سطح آزاد مایع کاهش یابد و ظرف در محیطی با خلأ نسبی قرار گیرد، آهنگ تبخیر سطحی افزایش می‌یابد.

پ) آبی که از دیواره‌های متخلخل کوزه به بیرون تراوش کرده بخار می‌شود و ضمن تبخیر از کوزه و آب داخل آن، گرمای لازم (گرمای نهان تبخیر) گرفته می‌شود. حال اگر نسیمی بوزد این عمل تشدید می‌شود. زیرا همان‌طور که گفتیم در حین تبخیر، مولکول‌های آب از آن جدا می‌شوند تا به هوای مجاور خود بروند. مقداری انرژی صرف می‌شود تا این مولکول‌ها از جاذبهٔ مولکول‌های سطح آب رها شوند. بسیاری از این مولکول‌ها، مثلاً با برخورد با مولکول‌های هوا، به سطح آب باز می‌گردند. اما اگر هوا با یک نسیم حرکت کند این مولکول‌های آزادشده از محل دور می‌شوند و نمی‌توانند انرژی را برگردانند که به این در قسمت (ب) نیز پرداختیم. اگر این از دست‌دادن انرژی سریع باشد، دمای آب پیش از آنکه انرژی قابل توجهی از محیط به آب انتقال یابد، فرو می‌افتد. بنابراین اگر یک کوزهٔ متخلخل در سایه قرار داده شود، وزش یک نسیم می‌تواند آب داخل کوزه را با جدا کردن مولکول‌های بخار شده از آبی که از دیواره کوزه به بیرون تراویده است خنک کند. عرق‌کردن بدن و یا خیساندن لباس و پوشیدن آن و سپس قرارگرفتن در زیر سایه و محلی بادگیر نیز به‌طور مشابه می‌تواند باعث خنک‌شدن شخص شود.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۱

اجزای تشکیل‌دهندهٔ یک محلول چند جزئی مانند نفت خام نقطه‌های جوش متفاوتی دارند، به‌طوری که سنگین‌ترین آنها بالاترین نقطهٔ جوش و سبک‌ترین آنها کمترین نقطهٔ جوش را دارند. وقتی نفت خام را چنان حرارت دهیم که ناگهان همهٔ اجزای آن تبدیل به بخار گردد و سپس آنها را سرد کنیم تا به مایع تبدیل شوند، اجزای مختلف نفت خام با نقاط جوش مختلف را می‌توان در یک ستون تقطیر از هم جدا کرد. سبک‌ترین محصولات با پایین‌ترین نقطهٔ جوش از بالای ستون و سنگین‌ترین محصولات با بالاترین نقطهٔ جوش از پایین ستون خارج می‌شود.



پاسخ پرسش ۴ــ۴

این مورد را می‌توان با نیروهای بین مولکولی که در فصل ۳ معرفی شدند توضیح داد (در مورد این نیروها و نقش آنها در حالت‌های ماده مقالهٔ بسیار آموزنده‌ای تحت عنوان «مولکول‌ها، اتم‌ها و ساختار داخلی اتم‌ها» در صفحهٔ ۹ شمارهٔ ۷۲ مجلهٔ رشد آموزش فیزیک به چاپ رسیده است که توصیه می‌شود حتماً به آن رجوع شود). همان‌طور که دیدیم نیروهای چسبندگی مولکولی به فاصلهٔ بین مولکول‌ها بستگی دارند. با افزایش دما و کاهش چگالی، فاصلهٔ بین مولکولی در حالت مایع افزایش و نیروی چسبندگی بین مولکول‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه تفاوت بین انرژی‌های درونی جسم در حالت‌های مایع و بخار کاهش می‌یابد. به بیانی بسیار ساده شده، با افزایش دما، مولکول‌ها ساده‌تر می‌توانند از سطح آزاد مایع بگریزند و به گرمای کمتری برای این امر نیاز است و بالعکس (همچنین نگاه کنید به پاسخ فعالیت ۴ــ۱۰ الف).

توجه کنید که بادگیرها اقسام متفاوتی دارند و در اینجا به یکی از انواع آن پرداخته شده است.

فیلم

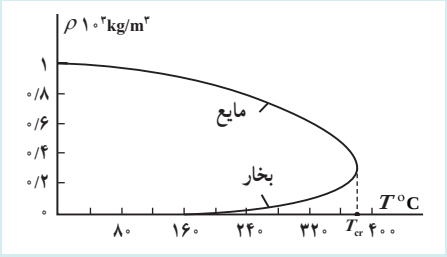
در این فیلم چگونگی ورود و خروج جریان‌های هوا را در نوعی از بادگیرها مشاهده می‌کنید.

دانستنی برای معلم

بخار اشباع شده

اگر مقداری کافی از مایعی را در ظرف دربسته‌ای بریزیم، قسمتی از مایع بخار می‌شود و بقیهٔ آن به شکل مایع باقی می‌ماند. اما فرایند بخار شدن متوقف نمی‌شود. همراه فرایند بخارشدن، فرایند جبران‌کنندهٔ چگالش بخار به آب نیز صورت می‌گیرد. پس از مدتی، بین فرایند بخارشدن و فرایند چگالش، تعادل برقرار می‌شود. به بخاری که با مایع خود در حالت تعادل است، *بخار اشباع شده* گفته می‌شود. هرچه دمای ظرف کمتر باشد، بخار کمتری را می‌تواند در حالت اشباع خود بگنجاند.

برای اندازه‌گیری و گزارش میزان بخار آب موجود در هوا، معمولاً از کمیت‌های *رطوبت مطلق هوا* و *رطوبت نسبی* آن استفاده می‌شود. رطوبت مطلق هوا، جرم بخار آب موجود در $1\,m^3$ هوا، یعنی چگالی بخار آب در هوای آن محیط است که معمولاً برحسب g/m^3 بیان می‌شود. رطوبت نسبی، نسبت رطوبت مطلق به چگالی بخار اشباع شده در هوا، در آن دما است.



چگالی آب و بخار اشباع آن بر حسب دما

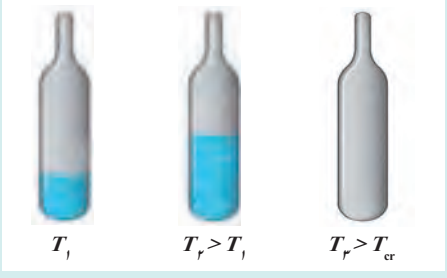
دانستنی برای معلم

نقطهٔ بحرانی و حالت گازی

برای هر ماده‌ای دمایی موسوم به ***دمای بحرانی*** وجود دارد که در دمای بالاتر از آن دما، هر چقدر هم فشار زیاد و ماده متراکم گردد، ماده به مایع تبدیل نمی‌شود. اگر منحنی‌های بستگی چگالی بخار اشباع مایع و خودِ آن مایع با دما رسم شود، خواهیم دید در نقطهٔ مشخصی به هم می‌رسند. بنابراین دمای بحرانی، دمایی است که در آن چگالی بخار اشباع شده با چگالی مایع برابر است و مرز بین مایع و بخار ناپدید می‌شود.

مثلاً این دما برای آب $T_{cr} = ۳۷۴\,^\circ C$ است. فشار و چگالی متناظر با این دما را فشار و چگالی بحرانی می‌گویند که برای آب $P_{cr} =$ ۲۱۸ atm و $\rho_{cr} = ۳۲۹\,kg/m^3$ است. آزمایش نشان می‌دهد که در دمای بالاتر از دمای بحرانی، هرچه فشار بالاتر هم برود، دو حالت مجزای مایع ـ بخار که با فصل مشترک مشخصی از هم جدا شده باشند (آن‌طور که به‌خاطر میعان بخار در دماهای پایین دمای بحرانی مشاهده می‌شود) وجود ندارد و بنابراین در دمای بالاتر از دمای بحرانی، تعادل مایع ـ بخار امکان‌پذیر نیست.

حالت بحرانی ماده را می‌توان به‌وسیلهٔ آزمایش نمایش داد. در یک فلاسک شیشه‌ای کوچک سربسته که دارای مقداری اتر است در دمای پایین، مرز کاملاً مشخصی بین مایع و بخار اشباع‌شده دیده می‌شود. اگر فلاسک گرم شود، با وجود اینکه بخشی از مایع هنگام گرم شدن بخار می‌شود، سطح مایع بالا می‌آید. این امر نشان می‌دهد چگالی مایع کاهش و چگالی بخار افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. در دمای بحرانی مرز بین مایع و بخار ناپدید می‌شود و تمام حجم مادهٔ موجود در فلاسک ابری می‌شود.



به وضعیت بالای نقطهٔ بحرانی که در آن فشار و دما افزایش یابد، حالت ***شارهٔ اَبَر بحرانی***[1] گفته می‌شود.

۱. برای اتان[2] در زیر نقطهٔ بحرانی، فازهای گاز و مایع به طور همزیست وجود دارد.

۲. در نقطهٔ بحرانی (۳۲/۱۷°C و ۴۸/۷۲ bar)، فازهای مجزای بخار و مایع وجود ندارد و شیری رنگ است.

۳. بالای نقطهٔ بحرانی، شارهٔ اَبَر بحرانی داریم.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۴

۱ در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی ناچیز، ۲۰۰g آب با دمای ۲۵/۰°C وجود دارد. قطعه یخی به جرم ۱۰۰g و دمای ۱۵/۰°C− را درون آن می‌اندازیم. پس از مبادلهٔ گرما و برقراری تعادل گرمایی، مخلوطی از آب و یخ بر جای می‌ماند. جرم یخ باقی‌مانده چند گرم است؟

پاسخ : ۴۶/۷g

۲ مقداری آب با حجم $V=0/80\,L$ و دمای $\theta=15^{\circ}C$ روی یک گرمکن برقی با توان مفید ۲۰۰W قرار دارد. آب تا نقطهٔ جوش آن گرم می‌شود. اگر ۱۰٪ از آب به بخار تبدیل شود، زمان لازم برای این فرایند چقدر است؟

پاسخ : ۳۹ min

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۴

۱ چرا وقتی باد می‌وزد احساس خنکی می‌کنیم؟

۲ اگر قطعه یخی با دمای ۰°C را در ظرف آبی با دمای ۰°C در اتاقی با دمای ۰°C قرار دهیم چه رخ می‌دهد؟

الف) هیچ،

ب) تمام یخ آب می‌شود.

پ) فقط بخشی از یخ آب می‌شود.

ت) فقط بخشی از آب یخ می‌زند.

پاسخ : الف)

۱ـ Supercritical

۲ـ ethane

پاسخ پرسش ۴ــ۵

الف) این مثالی از افزایش نقطهٔ جوش آب با افزایش فشار وارد بر سطح آزد مایع است. در درون دیگ زودپز، با افزایش بخار آب، فشار وارد بر روی سطح مایع درون دیگ و در نتیجه نقطهٔ جوش افزایش می‌یابد و بنابراین مواد درون زودپز در دمای بالاتر و سریع‌تر پخته می‌شود.

ب) در ارتفاعات، فشار هوا پایین‌تر است و بنابراین نقطهٔ جوش پایین می‌آید. مثلاً در قلهٔ دماوند نقطهٔ جوش آب حدود $۸۰^{\circ}C$ و در قلهٔ اورست نقطهٔ جوش آب در حدود $۷۲^{\circ}C$ است. البته این دما برای پختن تخم‌مرغ که به دمای $۷۰^{\circ}C$ نیاز دارد کافی است ولی زمان پختن را طولانی می‌کند. معمولاً گفته می‌شود کوه‌نوردان از نمک استفاده می‌کنند، ولی خوب است بدانید که افزودن $۲۰۰g$ نمک (حدود یک لیوان) در ۱ لیتر آب حداکثر $۲^{\circ}C$ بر نقطهٔ جوش آب می‌افزاید.

پاسخ تمرین ۴ــ۶

گرمای لازم برای تبدیل یخ $-۲۰^{\circ}C$ به بخار $۱۰۰^{\circ}C$ از مجموع گرما در چهار فرایند حاصل می‌شود.

۱) تبدیل یخ $-۲۰^{\circ}C$ به یخ $۰^{\circ}C$

۲) تبدیل یخ $۰^{\circ}C$ به آب $۰^{\circ}C$

۳) تبدیل آب $۰^{\circ}C$ به آب $۱۰۰^{\circ}C$

۴) تبدیل آب $۱۰۰^{\circ}C$ به بخار $۱۰۰^{\circ}C$.

یعنی

$$Q = mc_{\text{یخ}}\Delta\theta_1 + mL_F + mc_{\text{آب}}\Delta\theta_2 + mL_V$$

$$= (۰/۱\,kg)(۲۱۰۰\,J/kg.^{\circ}C)(۲۰^{\circ}C)$$

$$+(۰/۱\,kg)(۳۳۳/۷\times۱۰^{۳}\,J/kg)$$

$$+(۰/۱\,kg)(۴۱۸۷\,J/kg.^{\circ}C)(۱۰۰^{\circ}C)$$

$$+(۰/۱\,kg)(۲۲۵۶\times۱۰^{۳}\,J/kg)$$

$$= ۳۰۵۲۸۰۰\,J \approx ۳/۱\times۱۰^{۶}\,J$$

(توجه کنید گرچه جدول ۴ـ۳ گرمای ویژهٔ یخ را برای $-۱۰^{\circ}C$ داده است، ولی در این مسئله از همان داده استفاده کردیم.)

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۲

به بیان ساده شده‌ای می‌توان گفت که با برخورد مولکول‌های بخار آب با سطح برگ که در صبحگاهان دمای پایین‌تری از دمای بخار آب دارند، بخار آب مایع می‌شود.

اما پاسخ تفصیلی آن نیاز به معرفی برخی مفاهیم دارد. مقدار بخار آب موجود در هوا اغلب به‌صورت رطوبت نسبی در مقایسه با حدّ اشباع داده می‌شود. برای مثال، رطوبت نسبی ۵۰٪ به معنی آن است که مقدار بخار، نصف حدّ اشباع است. مثلاً در یک دوش آب گرم در محیطی بسته، رطوبت نسبی ممکن است به ۱۰۰٪ برسد و پس از آن وقتی بخار آب اضافی به هوا داده شود، مقداری از این بخار به قطرات آب تبدیل می‌شود. باید توجه کرد که حدّ اشباع برای هوای سردتر، پایین‌تر است (یعنی هرچه دما کمتر باشد، هوا بخار کمتری را می‌تواند در حالت اشباع خود جای دهد) و بنابراین میعان بخار آب بیشتر رخ می‌دهد. به همین دلیل است که آینهٔ سرد حمام باعث چگالش بخار آب به‌صورت مایع بر روی آن می‌شود. در پدیدهٔ شبنم صبحگاهی هم پدیدهٔ مشابهی رخ می‌دهد.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۳

معمولاً این از آن پرسش‌هایی است که ذهن دانش‌آموزان را به شدت درگیر می‌کنند. چرا که در جایی عنوان می‌شود وقتی به مخلوط آب و یخ گرما می‌دهیم دماسنج درون ظرف آب و یخ تغییر دمایی نشان نمی‌دهد و از طرفی گفته می‌شود که با گرم شدن، انرژی درونی ماده افزایش می‌یابد. ولی باید توجه کرد اینها دو امکان متفاوت برای افزایش انرژی درونی ماده هستند و با هم تناقضی ندارند و افزایش درونی حتماً با افزایش دما همراه نیست. البته در اینجا بحث‌هایی وجود دارد که به‌راستی انرژی درونی چیست. بسیاری از کتاب‌ها در کنار انرژی درونی به انرژی گرمایی می‌پردازند و بیان می‌دارند انرژی درونی مجموع انرژی پتانسیل و انرژی گرمایی است. ولی در هر حال باید توجه داشت که بررسی این موضوع بدون توجه به منحنی‌های انرژی پتانسیل ممکن نیست، که البته پیشتر به معرفی آنها در این کتاب راهنمای معلم پرداختیم.

تشریح کامل‌تر این منحنی‌ها را می‌توانید در مقالهٔ زیر بیابید : «مولکول‌ها، اتم‌ها و ساختار داخلی اتم‌ها، مجلهٔ رشد آموزش فیزیک، شمارهٔ ۷۲ صفحهٔ ۹». در اینجا یادآوری می‌کنیم که این منحنی‌ها می‌توانند نیروهای بین اتمی و بین مولکولی را توضیح دهند که با نیروهای بین مولکولی در فصل ۳ آشنا شدیم. در نتیجهٔ افزایش دما، نقطهٔ تعادل در این منحنی‌ها به سمت راست انتقال می‌یابد و به‌دلیل نامتقارن بودن شکل منحنی انرژی پتانسیل، فاصلهٔ بین مولکول‌ها افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت با افزایش دما از عمق چاه پتانسیل که نمود قدرت پیوند مولکولی است کاسته می‌شود.

با افزایش دما سرانجام به وضعیتی می‌رسیم که جدا شدن یک مولکول H_2O از سطح یخ ساده می‌شود. پس گرما، نه صرف افزایش دمای یخ، بلکه صرف کم شدن قدرت پیوند بین مولکول می‌شود. برای دانش‌آموزان می‌توان به همین توضیح ساده اکتفا کرد که پیش از آنکه گرما صرف جنبش مولکول‌ها شود باید بتوانند یک مولکول را بکند. (بنابراین اینکه گرما را لزوماً معادل انرژی درونی بگیریم نادرست است.) پس از این وضعیت است که گرما به جنبش مولکول‌ها می‌انجامد. در مورد این مباحث به مقاله‌های زیر نیز رجوع کنید : «دو خطای رایج در آموزش فیزیک، رشد و آموزش فیزیک، شمارهٔ ۱۰۹ صفحهٔ ۱۵» و «گرمای نهان ذوب و گرمای ویژهٔ آب، رشد آموزش فیزیک شمارهٔ ۱۰۲، صفحهٔ ۲۶».

۴ــ۵ــ روش‌های انتقال گرما

دانش‌آموزان با روش‌های انتقال گرما در دورهٔ اول متوسطه آشنا شده‌اند و می‌توان تدریس این بخش را با یادآوری دانسته‌های قبلی دانش‌آموزان آغاز کرد.

هدف از پرسش ۴ــ۶ بررسی ویژگی‌های دخیل در رسانش گرمایی است.

پاسخ پرسش ۴ــ۶

یک سیخ کوچک فلزی، انرژی گرمایی را از طریق رسانش به درون سیب زمینی انتقال می‌دهد. چون فلز انرژی گرمایی را بهتر به درون سیب‌زمینی انتقال می‌دهد، بنابراین زمان لازم برای پخت سیب‌زمینی کاهش می‌یابد. البته نشان داده شده است که سیخ‌های کوچک بیش از ۱ تا ۲ دقیقه زمان متعارف برای پختن سیب‌زمینی را کاهش نمی‌دهند، ولی اگر سر آزاد سیخ سنگین و یا پهن باشد، این عمل به‌مراتب تأثیرگذارتر است.

پاسخ تمرین ۴ــ۷

از رابطهٔ ۴ــ۱۵ استفاده می‌کنیم.

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

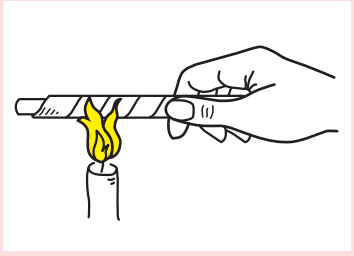
$$= (۰/۶\,\mathrm{W/m.^{\circ}C})(۸۲۰\,\mathrm{m^2})\,\frac{(۲۵^{\circ}\mathrm{C} - ۱۲^{\circ}\mathrm{C})}{۲/۰\,\mathrm{m}}$$

$$= ۳۱۹۸\,\mathrm{W} \approx ۳ \times ۱۰^{۳}\,\mathrm{W} = ۳\,\mathrm{kW}$$

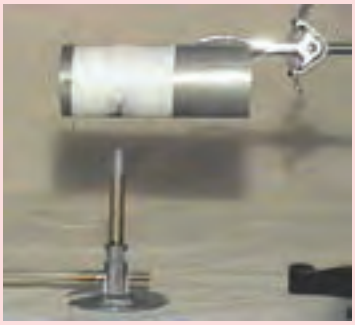
پاسخ فعالیت ۴ــ۱۴

موهای سفید خرس قطبی، فقط قسمت‌های مرئی و فروسرخ نور خورشید را مانند یک فیبر نوری، پس از بازتاب‌های مکرر درون مو به پوست منتقل می‌کند. در آنجا نور جذب پوست می‌شود و بدین ترتیب دمای بدن خرس افزایش می‌یابد. اما گرمای حاصل در پوست نسبتاً حفظ می‌شود، زیرا موها توخالی هستند و مانند لوله‌های توخالی رسانندهٔ ضعیف گرما هستند.

فعالیت پیشنهادی

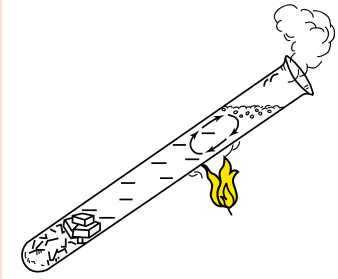


یک نوار باریک کاغذی را دور یک میخ، یا یک میله، یا لوله‌ای فلزی طوری بپیچید که حلقه‌های نوار کاغذی پیچیده شده دور فلز، روی هم افتادگی نداشته باشند و خیلی محکم روی فلز پیچیده شده باشند. اکنون فلز را طوری روی شعله شمع بگیرید که شعله به نوار کاغذی بخورد. کاغذ از دود شعله سیاه می‌شود، ولی تا وقتی که میخ یا میله کاملاً داغ نشود، نمی‌سوزد. ولی اگر در این تجربه به‌جای فلز از میلهٔ شیشه‌ای استفاده کنید، نتیجهٔ آزمایش متفاوت خواهد بود. در مورد هر دو تجربه بحث کنید.



پاسخ : میخ یا میلهٔ آهنی رسانندگی گرمایی بالایی دارد. گرما از نوار کاغذی به میخ یا میلهٔ آهنی انتقال می‌یابد و به سرعت به کل میخ یا میله می‌رسد و در نتیجه از رسیدن کاغذ به دمای اشتعال جلوگیری می‌کند. استفاده از مس نتیجهٔ بهتری به‌دست می‌دهد، زیرا رسانندگی گرمایی مس بیشتر از رسانندگی گرمایی آهن است و با سرعت بیشتری گرما را از کاغذ به میخ یا میله انتقال می‌دهد. رسانندگی گرمایی شیشه بسیار کم است و نمی‌تواند گرما را به سرعت زیاد از کاغذ به میلهٔ شیشه‌ای برساند و بنابراین کاغذ به‌سرعت به دمای اشتعال می‌رسد و آتش می‌گیرد.

فعالیت پیشنهادی



در یک لولهٔ آزمایش مقداری آب بریزید. قطعه یخ کوچکی را درون لوله بیاندازید و برای آنکه یخ ته لوله بماند وزنهٔ فلزی کوچکی روی یخ بگذارید (یا توری فلزی کوچکی را مچاله کرده و روی یخ قرار دهید). اینک لوله را طوری روی شعله بگیرید که شعله با قسمت بالایی لوله برخورد کند. آب بالای لوله به جوش می‌آید اما یخ، ته لوله باقی می‌ماند و آب نمی‌شود. چرا؟ توضیح دهید.

پاسخ : دلیل این امر آن است که فقط آب بالای لوله می‌جوشد. این آب گرم می‌شود و انبساط می‌یابد و چگالی آن کاهش می‌یابد. آبِ انبساط یافته به ته لوله نمی‌رود و جریان همرفتی فقط در آب بالای لوله رخ می‌دهد. جریان آب گرم به آب ته لوله که چگال‌تر است سرایت نمی‌کند. آب پایین لوله از طریق رسانش گرمایی خود آب گرم می‌شود. رسانندگی گرمایی آب بسیار کم است و بنابراین مدت بسیار زیادی طول می‌کشد تا آب ته لوله گرم شود و یخ را آب کند.

فیلم

این فیلم، نمایشی از این فعالیت پیشنهادی را نشان می‌دهد.

هدف از آزمایش ۴ـ۵ آن است که دانش‌آموزان جریان همرفتی را به کمک تغییر چگالی توضیح دهند.

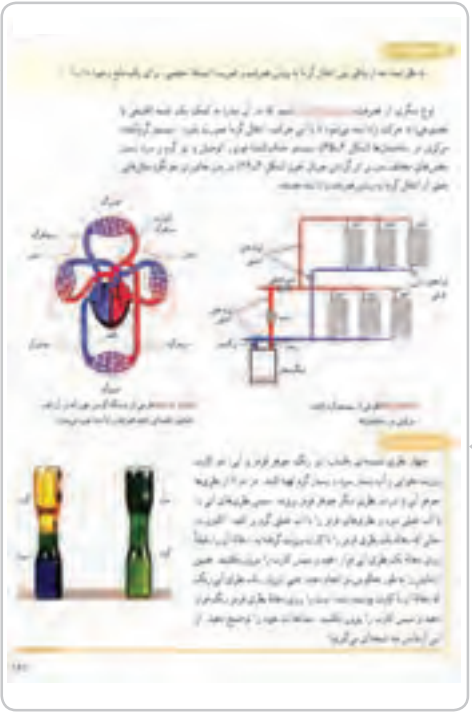
تأکید شود که در پدیدهٔ همرفت، انتقال انرژی گرمایی (بخشی از انرژی درونی که به جنبش مولکول‌های شاره مربوط است)، همراه با انتقال خود شاره صورت می‌پذیرد. در واقع شارهٔ سرد، از منبع گرما، گرما می‌گیرد و سپس شاره که انرژی گرمایی آن افزایش یافته است، جابه‌جا می‌شود.

فیلم

این فیلم، چگونگی نوعی از آزمایش ۴ـ۵ را نشان می‌دهد.

فعالیت پیشنهادی

در یک ظرف شیشه‌ای کوچک مقداری آب بریزید و آن را طوری در قابلمهٔ پر از آبی قرار دهید که ته ظرف شیشه‌ای با ته قابلمه تماس پیدا نکند و آب قابلمه درون ظرف شیشه‌ای نریزد. مثلاً می‌توانید ظرف شیشه‌ای را درون قابلمه آویزان کنید. قابلمه را روی شعله بگذارید تا آب قابلمه به جوش بیاید. از این به بعد هرچه منتظر بمانید آب ظرف شیشه‌ای به جوش نخواهد آمد. چرا؟ توضیح دهید.
(**راهنمایی** : برای آنکه آب به جوش آید کافی نیست تا $100^{\circ}C$ گرم شود. در حالی که هر ذرهٔ آب قابلمه با ته بسیار داغ قابلمه در تماس است، اما آب ظرف شیشه‌ای فقط با آب جوش تماس دارد.)



پاسخ پرسش ۴ــ۷

یادآوری می‌کنیم در پدیدهٔ همرفت قسمت‌های گرم شاره رو به بالا و قسمت‌های سرد شاره رو به پایین حرکت می‌کنند و این فرایند ناشی از کاهش چگالی شاره بر اثر افزایش دما است. بنابراین به‌راحتی می‌توان دریافت که هرچه ضریب انبساط حجمی شاره‌ها بزرگ‌تر باشد، افزایش حجم بر اثر افزایش دمای یکسان، بیشتر و چگالی، کمتر می‌شود و بنابراین جریان‌های همرفتی به‌سهولت بیشتری ظاهر می‌شوند. خوب است بدانید چسبناکی (ویسکوزیته) شاره نیز نقش مهمی در پدیدهٔ همرفت بازی می‌کند و هرچه چسبندگی بیشتر باشد، از بروز جریان‌های همرفتی بیشتر جلوگیری می‌کند.

توجه شود که از فعالیت ۴ــ۱۵ باید به‌عنوان راه‌کاری برای درک پدیدهٔ وارونگی هوا استفاده شود و پس از آن به این پدیده پرداخت.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۵

اگر مشاهده کنید درمی‌یابید که وقتی بطری گرم را روی بطری سرد قرار می‌دهید تقریباً تغییر محسوسی در رنگ‌ها مشاهده نخواهیم کرد و تنها در ناحیهٔ تماس دو بطری به‌دلیل تماس آب‌ها با یکدیگر تغییر رنگ ناچیزی مشاهده خواهیم کرد. ولی در موردی که بطری سرد را روی بطری گرم قرار می‌دهیم، به‌دلیل رخ دادن پدیدهٔ همرفت، آب گرم رو به بالا و آب سرد رو به پایین حرکت می‌کند و بدین ترتیب آب‌های دو بطری در هم می‌آمیزد و پس از مدتی شاهد تغییر رنگ هر دو به رنگ سبز خواهیم بود. وضعیت اول را می‌توان مشابه حالت وارونگی هوا درنظرگرفت، در حالی که وضعیت دوم مثل وضعیت طبیعی هواست که در روزهای معمولی رخ می‌دهد و از این جهت این فعالیت برای درک پدیدهٔ وارونگی هوا که در «خوب است بدانید» کتاب مطرح‌شده آموزنده است.

فیلم

این فیلم، چگونگی فعالیت ۴ــ۱۵ را نشان می‌دهد.

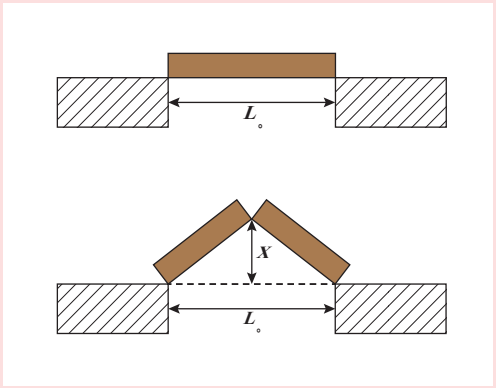
دانستنی برای معلم

توضیح در مورد اینکه چگونه دستگاه گردش خون مانند جریان همرفت عمل می‌کند.

فرض کنید شخصی تب داشته باشد یا فعالیت زیادی کرده باشد و یا به هر دلیل دیگری دمای بدنش افزایش یافته باشد. در این وضعیت، رگ‌های خونی نزدیک پوست شخص انبساط می‌یابد تا خون بیشتری توسط قلب به سطح پوست انتقال یابد. خون، گرما را از درون بدن به پوست می‌رساند و گرما از پوست به محیط سردتر اطراف جریان می‌یابد. در واقع همرفت واداشتهٔ خون مهمترین ساز و کار انتقال گرما در بدن است که برای حفظ دمای بدن در محیط‌های مختلف لازم است.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۵

۱ بر اثر افزایش دما به اندازهٔ $۳۲^{\circ}C$، میله‌ای که در مرکز آن شکافی وجود دارد، رو به بالا تاب می‌خورد. اگر فاصلهٔ ثابت $L_{\circ}$ برابر $۳/۷۷m$ و ضریب انبساط خطی میله $۲۵\times۱۰^{-۶}/^{\circ}C$ باشد، بالارفتگی x میله چقدر است؟



پاسخ : $۷/۵\ cm$

۲ یک میلهٔ استوانه‌ای مسی به طول $۱/۲m$ و مساحت مقطع $۴/۸cm^{۲}$ برای جلوگیری از اتلاف گرمایی عایق‌بندی شده است. دو انتهای میله، با قرار دادن یک سر آن در مخلوط آب‌ـیخ و سر دیگر آن در مخلوط آب جوش و بخار، در اختلاف دمای $۱۰۰^{\circ}C$ نگه داشته شده‌اند. یخ با چه آهنگی در انتهای سرد میله، ذوب می‌شود؟

(راهنمایی : $\frac{d\theta}{dt}=\frac{d}{dt}(mL_F)=L_F\frac{dm}{dt}$ و از اینجا dm/dt را محاسبه کنید.)

پاسخ : $۴/۸\times۱۰^{-۲}g/s$

۳ **اثر لیدن فراست :** یک قطرهٔ آب روی ماهی‌تابه‌ای با دمای بین $۱۰۰^{\circ}C$ تا حدود $۲۰۰^{\circ}C$، تقریباً $۱s$ دوام می‌آورد. ولی اگر ماهی‌تابه بسیار داغ‌تر باشد، قطره می‌تواند چند دقیقه دوام آورد. به این اثر، *اثر لیدن فراست* گفته می‌شود که نخستین کاوشگر آن بوده است. عمر طولانی‌تر قطره ناشی از تکیه آن بر لایه نازکی از هوا به طول L است که قطره را از فلز جدا می‌کند. اگر جرم قطرهٔ آب $m=۶/۰۰\times۱۰^{-۶}kg$ و $L=۰/۱۰۰mm$ باشد، با فرض آنکه دمای ثابت ماهی‌تابه $T=۳۰۰^{\circ}C$ و دمای قطره $۱۰۰^{\circ}C$ باشد، زمان دوام قطره را به‌دست آورید (راهنمایی : $Ht=mL_V$، که در آن H آهنگ رسانش گرمایی است.)

پاسخ : $۶۵/۰\ s$

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۵

۱ دو خانه از جنس یکسانی ساخته شده‌اند، ولی طول، عرض و ارتفاع و ضخامت دیواره‌های یکی، دو برابر خانهٔ دیگر است. برای اینکه این دو خانه در یک روز سرد گرم نگه داشته شود، خانهٔ بزرگ‌تر در مقایسه با خانهٔ کوچک‌تر با چه آهنگی باید گرم شود؟
الف) با دو برابر آن ب) با چهار برابر آن پ) با ۱۶ برابر آن
پاسخ : الف

۲ الف) چرا شعلهٔ آتش خودبه‌خود خاموش نمی‌شود؟ ب) به گمان شما در شرایط بی‌وزنی شکل شعلهٔ آتش چگونه می‌شود و پ) آیا در نبود جریان هوا امکان سوختن ممکن خواهد بود؟ (**راهنمایی :** به پدیدهٔ همرفت توجه کنید.)
پاسخ : الف) به دلیل پدیدهٔ همرفت ب) شکل کره‌ای پ) خیر

۳ به گمان شما اگر در اعماق فضا بدون لباس فضانوردی حرکت کنید، سوای کمبود اکسیژن چه خطری فضانوردان را تهدید می‌کند؟
پاسخ : یک دلیل اینکه در دمای اتاق احساس راحتی می‌کنید این است که تابش فروسرخی که از دیوارها به شما گسیل می‌شود و تابش فروسرخی که از شما به دیوارها گسیل می‌شود تقریباً برابر است. در نتیجه، شما تقریباً با همان آهنگی که انرژی از دست می‌دهید، انرژی به دست می‌آورید. اگر تابشی که به شما می‌رسد به میزان چشمگیری کاهش یابد احساس سرما می‌کنید. اگر در عمق فضا، دور از سفینه، راه بروید دیگر دیواری وجود نخواهد داشت و سریعاً احساس سرما خواهید کرد. آهنگی که با آن انرژی گرمایی را از دست می‌دهید حدود ۸۰۰ وات است. البته این مورد سوای خطرات دیگری است. مثلاً وقتی آب در خلأ قرار می‌گیرد نخست می‌جوشد (بخشی از آن بخار می‌شود) و سپس یخ می‌بندد و چون در بدن مقدار زیادی آب وجود دارد می‌توان حدس زد چه بلایی بر سر بدن خواهد آمد.

۴ چرا یخچال‌های سوپرمارکت‌ها بهتر است دردار و افقی باشند؟
(**راهنمایی :** به جریان همرفت و اینکه هوای سرد، چگال‌تر است بیندیشید.)

۵ چرا برخی اوقات در حوالی عصر یک روز تابستانی، حشرات در بالای درخت ستونی را تشکیل می‌دهند، طوری که گویی دودی در بالای درخت تشکیل شده است؟
پاسخ : معمولاً در این هوا، درختان به‌سرعت زمین اطراف خود خنک نمی‌شوند و بنابراین هوای گرم از آن بالا می‌رود و ظاهراً حشرات جذب این هوای گرم شده و ستونی همرفتی را تشکیل می‌دهند.

۶ چرا اگر با زبان خود لولهٔ فلزی سردی را لیس بزنید، ممکن است زبانتان به لوله بچسبد؟

توجه کنید که رسانش و در پی آن همرفت، بر اثر گرم شدن لایهٔ هوای در تماس با بدن صورت می‌گیرد.

به این گیاهان اصطلاحاً *ترموجنیک* (Thermogenic) می‌گویند. خوب است دانش‌آموزان را ترغیب کنید موارد دیگری از این گیاهان را نیز بیابند.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۶

حرکت پره‌ها در رادیومتر *کروکس* را اغلب به اشتباه به فشار نور مربوط می‌کنند. اما تأثیر فشار نور بسیار ناچیزتر از آن است که بتواند باعث چرخش پره‌ها شود. وانگهی اگر چنین چرخشی ناشی از فشار نور وجود می‌داشت باید در خلاف جهت چرخش مشاهده شده رخ می‌داد. ماجرای اصلی این است که نور (تابش فروسرخ و نورمرئی) در طرف سیاه پره بیشتر از طرف سفید آن جذب می‌شود و بدین ترتیب طرف سیاه قدری گرم‌تر از طرف سفید می‌گردد و مولکول‌های هوای اطراف خود را نیز بیشتر گرم می‌کند. به‌علت اختلاف دما، مولکول‌های هوا در طرف سیاه پره‌ها سریع‌تر از مولکول‌های هوا در طرف سفید آن حرکت می‌کنند و بنابراین نیروی وارد بر طرف سیاه بزرگ‌تر از نیروی وارد برطرف سفید است و بنابراین پره‌ها در جهتی می‌چرخند که نیروی وارد از مولکول‌های هوا به طرف سیاه پره‌ها، تعیین می‌کنند.

ولی اگر داخل حباب شیشه‌ای کاملاً تخلیه شده باشد، ممکن است در شرایط ایده‌آل پره‌ها در خلاف این جهت بچرخند، چرا که در آن صورت همان‌طور که بالا گفتیم نوری که به پره‌ها می‌تابد طرف سفید را بیشتر هل می‌دهد. به فیلم مربوطه در سایت گروه مراجعه شود.

تبصره : در مورد حرکت پره‌ها در رادیومتر کروکس برخی استدلال می‌کنند گرچه طرف سیاه دمای بالاتری دارد، اما در عوض در نزدیکی آن چگالی مولکول‌ها پایین‌تر است. با این حال اینشتین ثابت کرد که اختلاف دما عامل مؤثرتری است، اما چگالی پایین مولکول‌ها در حذف سیاه موجب می‌شود پره‌ها با سرعت پایین‌تری از آنچه مورد انتظار است، بچرخند.

فیلم

در این فیلم‌ها وابستگی تابش گرمایی سطوح را به رنگ آنها مشاهده می‌کنید.

فیلم

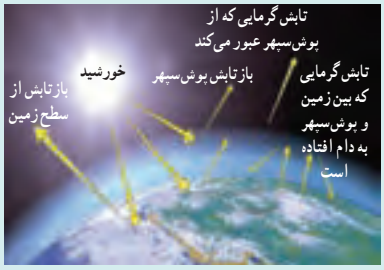
این فیلم چگونگی کار یک رادیومتر کروکس را نشان می‌دهد.

دانستنی برای معلم

اثر گلخانه‌ای[۱] : بخشی از نور خورشید با عبور از جوّ زمین به سطح آن می‌رسد و بخش عمدهٔ این نور جذب زمین می‌شود. زمین گرم می‌شود و با تابش گرمایی، از خود امواج فروسرخ گسیل می‌کند. وجود گازهایی مانند کربن‌دی‌اکسید (CO_2) که مولکول‌های جذب‌کنندهٔ بسیار خوبی برای امواج فروسرخ هستند، در لایهٔ پوش‌سپهر[۲] جوّ زمین، باعث کدر شدن این لایه برای تابش‌های فروسرخ می‌شود. این لایه بخش عمدهٔ تابش گرمایی حاصل از زمین را جذب می‌کند. خودِ این لایه نیز تابش گرمایی می‌کند. بخشی از تابش گرمایی لایهٔ پوش‌سپهر از جو خارج می‌شود، ولی بیشتر آن به زمین بازمی‌گردد و به این ترتیب، رفت و برگشتی از تابش گرمایی بین این لایه و سطح زمین رخ می‌دهد. در تشابه با گلخانه‌ها که با ایجاد محیطی محصور، مانع از جریان هوا و خروج هوای گرم از گلخانه‌ها می‌شوند، به این به‌دام‌افتادن تابش گرمایی بین لایهٔ پوش‌سپهر و سطح زمین اثر گلخانه‌ای می‌گویند و به گازهای موجود در لایهٔ پوش‌سپهر که سبب این پدیده می‌شوند گازهای گلخانه‌ای می‌گویند[۳]. اگر لایهٔ پوش‌سپهر وجود نداشت، دمای میانگین سطح زمین چیزی در حدود $-18^{\circ}C$ می‌شد، ولی اینک این دما چیزی در حدود $+15^{\circ}C$ است؛ یعنی اثر گلخانه‌ای حدود $33^{\circ}C$ به دمای میانگین سطح زمین افزوده است.

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

گفتنی است که همواره در حالت تعادل، انرژی تابشی به سطح زمین با مجموع انرژی‌های بازتابیده از سطح زمین و تابش گرمایی زمین برابر است. همین برابری در خارجی‌ترین سطح جوِّ زمین نیز وجود دارد.



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

۴ــ۶ــ قوانین گازها

در این فصل به یادسپاری نام‌هایی چون قانون بریل، قانون شارل و... هدف نیست و تنها باید به رفتار گازها اشاره شود و به‌خصوص دانش‌آموزان رشته ریاضی‌فیزیک را برای فصل۵ آماده سازد.

فیلم

در این فیلم، مچاله‌شدن قوطی داغ در آب را مشاهده می‌کنید.

فیلم

در این فیلم، بالا رفتن مایع رنگی در اسباب آزمایش شکل ۴ــ۴۲ را مشاهده می‌کنید.

---

۱. Greenhouse Effect

۲. پوش‌سپهر یا استراتوسفر، لایه‌ای حدوداً در فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۸ کیلومتری سطح زمین است.

۳. چون اصطلاح اثر گلخانه‌ای اغلب برای به دام افتادن تابش گرمایی توسط جوّ زمین به‌کار می‌رود، به غلط پنداشته می‌شود که گرم بودن گلخانه نیز ناشی از به دام افتادن تابش‌های گرمایی است؛ درحالی‌که دلیل گرم بودن گلخانه‌ها، عدم جریان هوا در آنها است.

توجه کنید که هدف از فعالیت ۴ــ۱۷، آزمودن رابطهٔ ۴ــ۱۴ است.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۷

اگر اصطکاک پیستونِ سرنگ با سیلندر آن کم باشد، پیستون هیچ اختلاف فشاری را برای هوای درون سرنگ با آب بیرون سرنگ تحمل نمی‌کند و همواره طوری جابه‌جا می‌شود و در وضعیتی قرار می‌گیرد که فشار هوای درون سرنگ با فشار آب بیرون آن برابر باشد. چون در این آزمایش فشار آب بیرون سرنگ تغییری نمی‌کند، برای یک پیستون کم‌اصطکاک، فشار هوای درون سرنگ نیز ثابت می‌ماند. بنابراین در اینجا انبساط هوای درون سرنگ در فشار ثابت است و در فشار ثابت با افزایش دما حجم زیاد می‌شود تا V/T ثابت بماند. بنابراین دما و حجم افزایش می‌یابد و فشار و مقدار هوا ثابت می‌ماند. در عمل، اگر از سرنگی با پیستون کم‌اصطکاک استفاده کنید و این آزمایش را انجام دهید، ثابت ماندن فشار، افزایش همزمان حجم و دما، و ثابت ماندن نسبت V/T در مدت انجام آزمایش را مشاهده می‌کنید.

در این فیلم چگونگی مدرّج کردن یک دماسنج گازی حجم ثابت را مشاهده می‌کنید.

فیلم

توجه کنید هدف از فعالیت ۴ــ۱۸، آزمودن قوانین گازها و کاربرد آنها است.

پاسخ فعالیت ۴ــ۱۸

وقتی هواپیما بالا می‌رود و فشار هوا کم می‌شود، گاز یا هوای درون نوشیدنی که فشار بیشتری از هوای بیرون ظرف دارد، به درِ منعطف ظرف فشار وارد می‌آورد. توجه کنید که با فرض هم‌دما بودن این فرایند، الگوی تغییر فشار ـ حجم از رابطهٔ « ثابت $=PV$» پیروی می‌کند و با افزایش حجم ظرف نوشیدنی، از فشار داخل آن کاسته می‌شود. اگر درِ این ظرف بر اثر انبساط هوای محبوس باز نشود و شما پیش از نوشیدن، ظرف نوشیدنی را تکان دهید، با باز کردن ناگهانی درِ ظرف، محتویات آن به سمت بیرون پرت خواهد شد.

فیلم

این فیلم تقریباً شبیه‌سازی آزمایشگاهیِ اتفاقی است که انتظار داریم در فعالیت ۴ــ۱۸ رخ دهد.

لازم است، تفاوت گاز کامل و گاز واقعی برای دانش‌آموزان تبیین شود. رابطهٔ $nRT=PV$ که برای گازهای کامل برقرار است، در گازهای واقعی فقط به نتایج تقریبی می‌انجامد. درواقع، رابطهٔ T ،V ،P و n در گازهای واقعی، مفصل‌تر و پیچیده‌تر از این رابطه برای گازهای کامل است.

لازم است تأکید شود که در رابطهٔ قانون گازهای کامل، باید دما حتماً برحسب کلوین باشد، و همچنین، فشار، فشار مطلق گاز باشد و نه فشار سنجه‌ای آن.

فعالیت پیشنهادی

مقداری آب را در یک بشقاب بریزید. بعد شمع روشنی را در وسط بشقاب قرار دهید و آنگاه یک ظرف استوانه‌ای (یا لیوان بلند) را روی شمع داخل بشقاب قرار دهید. مشاهده می‌کنید آب داخل بشقاب به درون ظرف شیشه‌ای کشیده می‌شود و بالا می‌رود. دلیل آن را توضیح دهید.

پاسخ : اغلب به غلط توضیح می‌دهند که چون ضمن سوختن شمع، اکسیژن می‌سوزد، مقدار گاز درون استوانهٔ شیشه‌ای کم می‌شود. فشار گاز درون استوانه کاهش می‌یابد و در نتیجه این اتفاق می‌افتد. این توضیح نادرست است. علت اصلی، گرم شدن هوای درون استوانه و سپس سرد شدن دوبارهٔ آن است. زیرا اولاً می‌توان بدون شمع شعله‌ور نیز این آزمایش را انجام داد. یعنی ظرف شیشه‌ای را با آب جوش آب کشید و گرم کرد و سپس همین آزمایش را انجام داد.

ثانیاً اگر به جای شمع یک تکه پنبهٔ آغشته به الکل را که مدت زیادتری می‌سوزد و هوای درون استوانه را بیشتر گرم می‌کند استفاده کنیم، آن‌وقت آب تقریباً تا وسط ظرف شیشه‌ای بالا می‌رود، در صورتی که می‌دانیم اکسیژن فقط در حدود $\frac{۱}{۵}$ حجم هوا را تشکیل می‌دهد. توضیح درست این است که شمع شعله‌ور، هوای داخل استوانهٔ شیشه‌ای را گرم می‌کند، فشار این هوا افزایش می‌یابد و در نتیجه مقداری از هوای داخل استوانهٔ شیشه‌ای از زیر آن خارج می‌شود. وقتی شمع خاموش می‌شود، هوای داخل استوانه از نو سرد و ضمن سردشدن فشارش کم می‌شود و بر اثر فشار هوای بیرون استوانهٔ شیشه‌ای، آب از بشقاب به زیر استوانه‌ای و سپس به داخل آن می‌رود.

این فیلم، نمایشی از این فعالیت پیشنهادی را نشان می‌دهد.

فیلم

فعالیت پیشنهادی

بادکنکی را باد کنید و درون فریزر قرار دهید. پس از آنکه بادکنک به‌خوبی سرد شد آن را از فریزر بیرون آورید و در هوای ترجیحاً گرم اتاق بگذارید. صبر کنید تا بادکنک به دمای اتاق برسد. الف) در مورد تغییر دما، حجم، و فشار هوای درون بادکنک، در مدتِ زمانِ پس از بیرون آمدن از فریزر بحث کنید. ب) در فیلم، تجربه‌ای را می‌بینید که بخشی از آن، تجربه‌ای است که به شما پیشنهاد کردیم. در مورد شباهت و تفاوت این دو تجربه نظر دهید.

پاسخ : الف) با بیرون آوردن بادکنک از فریزر، دمای هوای داخل بادکنک زیاد می‌شود. با افزایش دما، اگر حجم بادکنک ثابت می‌ماند، طبق قانون گازهای کامل، فشار هوای درون بادکنک زیاد می‌شد. ولی به‌دلیل کشسان بودن پوستهٔ بادکنک، آنچه در اینجا رخ می‌دهد، افزایش همزمان فشار و حجم بادکنک است. افزایش فشار هوای درون بادکنک، باعث می‌شود پوستهٔ کشسان بادکنک بزرگ‌تر شده و حجم هوای داخل آن نیز افزایش یابد. اگر فشار، حجم، و دمای اولیهٔ هوای درون بادکنک را با $P_۱$، $V_۱$ ،

T_1 و مقادیر نهایی این سه کمیت را با P_2، V_2، T_2 نشان دهیم بنا به قانون گازهای کامل داریم $\frac{P_2V_2}{T_2}=\frac{P_1V_1}{T_1}$. چون مقادیر نهایی هر سه کمیت P، V و T از مقادیر اولیهٔ آنها بیشتر است، تساوی $\frac{P_2V_2}{T_2}=\frac{P_1V_1}{T_1}$ نتیجه می‌دهد که درصد افزایش دما از درصد افزایش هر یک از دو کمیت P و V بیشتر است.

ب) فیلم، بادکنک مچاله شده‌ای را نشان می‌دهد که از ظرف نیتروژن مایع بیرون آورده می‌شود و در هوای اتاق باد می‌شود. در لحظات اولیهٔ این رخداد، آنچه درون بادکنک مچاله شده قرار دارد، هوای مایع است. مدتی طول می‌کشد تا این هوای مایع، به گاز تبدیل شود و به اندازهٔ کافی رقیق شود تا بتوان قانون گازهای کامل را برای آن به‌کار برد. در این مدت، معادلهٔ $\frac{P_2V_2}{T_2}=\frac{P_1V_1}{T_1}$ برای هوای درون بادکنک برقرار نیست. پس از آنکه هوای درون بادکنک به اندازهٔ کافی رقیق شد، همان توضیحات قسمت الف درست است.

فیلم

این فیلم، باد شدن بادکنک مچاله‌شده را پس از بیرون آوردن از ظرف نیتروژن مایع نشان می‌دهد.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۶

۱ ظرفی با تیغه‌هایی به سه بخش با حجم‌های V_1، V_2 و V_3 تقسیم شده است. این بخش‌ها شامل گازهایی در فشارهای P_1، P_2 و P_3 هستند. اگر دما تغییر نکند، پس از برداشتن تیغه‌ها، فشار داخل ظرف چقدر می‌شود؟

پاسخ : $(P_1V_1+P_2V_2+P_3V_3)\,/\,(V_1+V_2+V_3)$

۲ گاز اکسیژن به حجم $1000\,cm^3$، در دمای $20/0\,^\circ C$ و فشار $1/01\times10^5\,Pa$ آن‌قدر انبساط می‌یابد تا حجم آن به $1500\,cm^3$ و فشار آن به $1/06\times10^5\,Pa$ برسد. الف) تعداد مول‌های موجود در نمونه و ب) دمای نهایی آن چقدر است؟

پاسخ : الف) $3/88\times10^{-2}\,mol$

ب) $493\,K$

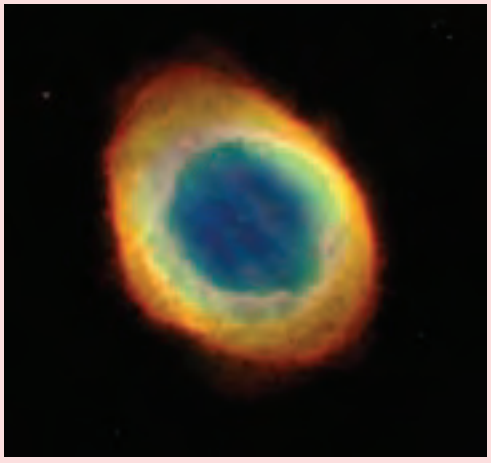
۳ بهترین خلأ آزمایشگاهی، فشاری در حدود $1/01\times10^{-13}\,Pa$ دارد. در دمای $293\,K$، چند مولکول گاز در هر سانتی‌متر مکعب از چنین خلئی وجود دارد؟

پاسخ : ۲۵ مولکول

۴ لاستیک اتومبیل به حجم $۱/۶۴\times۱۰^{-۲}m^۳$ در دمای $۰/۰۰^\circ C$ از هوایی پر شده است که فشار آن ۲۶۶kPa است. وقتی هوای داخل لاستیک به دمای $۲۷/۰^\circ C$ و حجم لاستیک به $۱/۶۷\times۱۰^{-۲}m^۳$ برسد، الف) فشار داخل لاستیک چقدر می‌شود؟ ب) فشارسنج چه فشاری را نشان می‌دهد؟

پاسخ : الف) ۲۸۷kPa

ب) ۱۸۶kPa



۵ سحابی سیاره‌ای، ابری است حلقوی که عمدتاً از گاز هیدروژن با غلظت ۱۰۰۰ مولکول بر سانتی‌متر مکعب و دمای ۱۰۰۰۰K تشکیل شده است. فشار گاز این سحابی چقدر است؟

(راهنمایی : از رابطهٔ $P=nRT/V$ استفاده کنید و در آن به جای n از N/N_A جای‌گذاری کنید.)

پاسخ : $۱/۳۸\times۱۰^{-۱۰}Pa$

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ـ۶

۱ اگر ۱/۰L گاز محبوس در ظرفی، در دمای ۸۰۰K به حجم ۰/۵۰L فشرده شود، درحالی‌که فشار آن از ۱/۰atm به ۰/۵atm تغییر کند، دمای حاصل برحسب کلوین چقدر خواهد شد؟

الف) ۸۰۰K

ب) ۶۰۰K

پ) ۴۰۰K

ت) ۲۰۰K

پاسخ : (ت)

۲ آیا امکان دارد رفتار گازی از رابطهٔ «ثابت $= PV^۲$» پیروی کند؟

پاسخ : خیر. زیرا در آن صورت درخواهید یافت که با افزایش حجم گاز، دما کاسته می‌شود.

راهنمای پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

در فصل اول آموختیم که در مورد عددهایی مانند ۶۰۰ یا ۶۰۰۰ و از این قبیل که به صفر ختم می‌شوند تعداد رقم‌های بامعنا مشخص نیست. ما در پاسخ به پرسش‌ها و مسئله‌هایی با معنا از این دست در فصل‌های ۴ و ۵، حداکثر تعداد رقم‌های با معنای ممکن را فرض کرده‌ایم. مثلاً در $\theta = 800\,K$ سه رقم بامعنا و در $V = 20\,L$ دو رقم فرض کرده‌ایم.

۱

الف)

$$0\,K = -273/15\,^{\circ}C \simeq -273\,^{\circ}C$$
$$F = [(-273/15)(\frac{9}{5}) + 32/00]\,^{\circ}F = -459/67\,^{\circ}F \simeq -460\,^{\circ}F$$

ب)

$$273\,K = -0/15\,^{\circ}C \simeq 0\,^{\circ}C$$
$$F = [(0/15)(\frac{9}{5}) + 32/00]\,^{\circ}F = +31/73\,^{\circ}F = 32\,^{\circ}F$$

پ)

$$373\,K = 99/85\,^{\circ}C \simeq 100\,^{\circ}C$$
$$F = [(99/85)(\frac{9}{5}) + 32/00]\,^{\circ}F = 211/73\,^{\circ}F = +212\,^{\circ}F$$

ت)

$$546\,K = 272/85\,^{\circ}C \simeq 273\,^{\circ}C$$
$$F = [(272/85)(\frac{9}{5}) + 32/00]\,^{\circ}F = 523/73\,^{\circ}F = 523\,^{\circ}F$$

۲ اگر دماسنج، جیوه‌ای یا الکلی باشد باید دما را از روبه‌رو بخوانیم تا اختلاف منظر (خطای مشاهده‌ای) نداشته باشیم. اندازه‌گیری را چند بار تکرار می‌کنیم. باید از دماسنج مناسبی برای گسترهٔ موردنظر استفاده کنیم.

۳ مقیاس (فاصلهٔ میان خط‌های نشانه)، ضخامت و قطر دایره، هر سه با یک عامل بزرگ می‌شوند.

۴ الف) ۲ و ۳ یکسان، سپس ۱، سپس ۴
ب) ۳، ۲، سپس ۱ و ۴ یکسان
پ) همه یکسان.

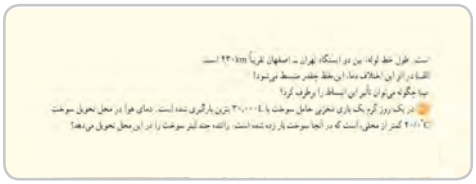
۵

$$\Delta L = L_{\circ}\,\alpha\Delta T = (25/0\,m)(14 \times 10^{-6}\,K^{-1})(40/0\,K) = 1/4 \times 10^{-2}\,m = 1/4\,cm$$

۶

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} = \beta_{\text{گلیسیرین}} V_1 \Delta\theta$$
$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{آلومینیم}} V_1 \Delta\theta$$
$$V = \Delta V_{\text{گلیسیرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = (\beta_{\text{گلیسیرین}} - \beta_{\text{آلومینیم}}) V_1 \Delta\theta$$
$$= (۴۹\times۱۰^{-۵}\,K^{-۱} - ۳(۲۳\times۱۰^{-۶}\,K^{-۱}))(۴۰۰\,cm^۳)(۳۰/۰^\circ C - ۲۰/۰^\circ C)$$
$$= ۱/۶۸۴\,cm^۳ \simeq ۱/۷\,cm^۳$$

۷ چون سطح مقطع ظرف ثابت است، حجم بنزین داخل مخزن متناسب با ارتفاع بنزین داخل آن است. بنابراین در فرمول انبساط حجمی به جای ΔV و V_1 به ترتیب $h\Delta A$ و Ah_1 قرار می‌دهیم و چنین به‌دست می‌آوریم :



$$\Delta h = \beta h_1 \Delta\theta \Rightarrow h_۲ = h_1(۱ + \beta\Delta\theta)$$

با توجه به $h_۲ = h_1 + \Delta h$ داریم :

$$\theta_۲ = \frac{\Delta h}{\beta(h - \Delta h)} + \theta_1$$
$$= \frac{۵۰\,cm}{(۱/۰۰\times۱۰^{-۳}\,^\circ C)(۱۰۰۰\,cm - ۵۰\,cm)} - ۱۰^\circ C$$
$$= ۴۲/۶۳^\circ C \approx ۴۳^\circ C$$

۸ الف) چون با کاهش دما، نوار به سمت پایین خم شده است ضریب انبساط طولی نوار پایین باید بیشتر از نوار بالایی بوده باشد. اگر به جدول ۴ــ۱ مراجعه کنید درمی‌یابید که ضریب انبساط طولی برنج بیشتر از فولاد است و بنابراین، نوار بالایی از جنس فولاد است.
ب) در این صورت نوار در جهت مخالف خم می‌شود به‌طوری که برنج کمان بیرونی شود.

۹ الف)

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T = (۱۰\times۱۰^{-۶}\,K^{-۱})(۲/۳۰\times۱۰^۵\,m)(۶۰\,K)$$
$$= ۱/۳۸\times۱۰^۲\,m \approx ۱/۴\times۱۰^۲\,m$$

ب) معمولاً در بخش‌هایی از این خط لوله، مانند شکل، لوله‌ها را به‌صورت Uشکل در می‌آوردند. همچنین (به‌خصوص در مورد ریل‌های راه‌آهن) این لوله‌ها (ریل‌ها) را زمانی می‌سازند که دما حدوداً برابر با نصف میانگین مقدارهای بیشینه و کمینهٔ سالیانه‌اش است.

۱۰

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta\theta$$
$$\Rightarrow V_۲ = V_1(۱ + \beta\Delta\theta)$$
$$= (۳۰۰۰۰\,L)(۱ + (۱/۰۰\times۱۰^{-۳}\,K^{-۱})(-۲۰/۰\,K))$$
$$= ۲۹۴۰۰\,L \simeq ۲/۹۴\times۱۰^۴\,L$$

۱۱ با توجه به اینکه $Q = Pt$ است داریم :

$$Pt = mc\Delta\theta$$

$$(۲۰۰\,J/s)(t) = (۰/۲۰۰\,kg)(۴۱۸۷\,J/kg.^\circ C)(۷۰^\circ C)$$

$$\Rightarrow t = ۲۹۳/۰۹\,s \simeq ۲/۹۴ \times ۱۰^۲\,s$$

۱۲ رابطه‌های $Q = Pt$ و $Q = mc\Delta\theta$ را برابر هم قرار می‌دهیم :

$$Pt = mc\Delta\theta$$

$$\Rightarrow c = \frac{Pt}{m\Delta\theta} = \frac{(۵۰\,J/s)(۱۱۰\,s)}{(۰/۶۰\,kg)(۳۸-۱۸)^\circ C}$$

$$= ۴۵۸\,J/kg.^\circ C \simeq ۴/۶ \times ۱۰^۲\,J/kg.^\circ C$$

احتمالاً بخشی از گرمای داده شده توسط گرمکن به هوا و مواد پیرامون فلز داده شده است. بنابراین در رابطهٔ $Q = mc\Delta\theta$ که برای قطعه فلز به کار می‌بریم Q کمتر از Pt است و در نتیجه مقدار واقعی گرمای ویژه فلز، کمتر از پاسخ به‌دست آمده در حل است.

۱۳ از شرط تعادل گرمایی در حالت کلی داریم :

$$m_{ظرف}c_{ظرف}(\theta - \theta_{۱\,ظرف}) + m_{قطعه}c_{قطعه}(\theta - \theta_{۱\,قطعه}) + m_{آب}c_{آب}(\theta - \theta_{۱\,آب}) + m'_{آب}c_{آب}(\theta - \theta'_{۱\,آب}) = ۰$$

توجه کنید که در این رابطه با توجه به اینکه دمای اولیهٔ ظرف، قطعه و ۵۰g آب اولیه یکسان و برابر $۳۰^\circ C$ است، داریم :

$$\theta_{۱\,ظرف} = \theta_{۱\,قطعه} = \theta_{۱\,آب} = ۳۰^\circ C$$

و در این رابطه $m'_{آب}$ در واقع جرم آبی است که بعداً افزوده می‌شود ($m'_{آب} = ۱۰۰\,g$) و $\theta'_{۱\,آب}$ دمای اولیهٔ آب افزوده شده ($\theta'_{۱\,آب} = ۷۰^\circ C$) است. هدف، محاسبهٔ گرمای ویژهٔ قطعه است. با توجه به اینکه دمای تعادل $\theta = ۵۲^\circ C$ است، خواهیم داشت.

$$(۰/۲۰۰\,kg)(۳۸۶\,J/kg.^\circ C)(۵۲-۳۰)^\circ C + (۸۰ \times ۱۰^{-۳}\,kg) \times c_{قطعه}\,(۵۲-۳۰)^\circ C + (۵۰ \times ۱۰^{-۳}\,kg)\,(۴۱۸۷\,J/kg.^\circ C)(۵۲-۳۰)^\circ C$$
$$+ (۰/۱۰۰\,kg)\,(۴۱۸۷\,J/kg.^\circ C)(۵۲-۷۰)^\circ C = ۰$$

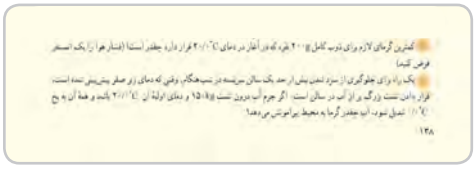
از اینجا خواهیم داشت

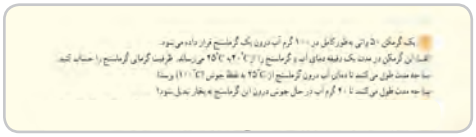
$$c_{قطعه} = ۷۰۰/۳\,J/kg.^\circ C \approx ۷/۰ \times ۱۰^۲\,J/kg.^\circ C$$

۱۴ همان‌طور که در متن کتاب اشاره شده است در پدیده‌های تغییر فاز جامد به مایع و مایع به بخار، با آنکه ماده‌ای که تغییر فاز می‌دهد گرما می‌گیرد ولی تغییر دما نمی‌دهد.

۱۵ این پدیده به تبخیر سطحی مربوط است. یعنی با فرار مولکول‌های فرّار الکل و رخ دادن پدیدهٔ تبخیر سطحی، الکل مایع از پوست بدن گرما می‌گیرد و بخار می‌شود و در نتیجه احساس خنکی در آن محل می‌کنیم.

۱۶ با توجه به آموخته‌هایمان از این فصل درمی‌یابیم که گزینهٔ الف نادرست است.





۱۷ با دادن گرما به نقره، ابتدا دمای آن از $۲۰/۰^{\circ}C$ به نقطهٔ ذوب $(۹۶۰^{\circ}C)$ می‌رسد و سپس نقره ذوب می‌شود :

$$Q = {}_{۱}Q + Q_{۲} = m_{\text{نقره}}\, c_{\text{نقره}}\, \Delta\theta + mL_F$$
$$= (۰/۲۰۰\,kg)(۲۳۶ J/kg.^{\circ}C)(۹۶۰ - ۲۰/۰^{\circ}C) +$$
$$(۰/۲۰۰\,kg)(۸۸/۳ \times ۱۰^{۳} J/kg) = ۶۲۰۲۸J \approx ۶/۲۰ \times ۱۰^{۴} J$$

۱۸ برای یخ زدن کامل، مجموعاً دو فرایند صورت می‌گیرد. نخست آب $۲۰/۰^{\circ}C$ به آب $۰^{\circ}C$ تبدیل می‌شود و سپس در دمای صفر درجه یخ می‌زند. پس گرمای کلّ منتقل شده برابر است با

$$Q = mc_{\text{آب}}\Delta\theta + mL_F$$
$$= (۱۵۰\,kg)(۴۱۸۷\ J/kg.K)(۲۰/۰^{\circ}C) + (۱۵۰\ kg)(۳۳۳/۷ \times ۱۰^{۳} J/kg)$$
$$= ۶/۲۶ \times ۱۰^{۷} J$$

۱۹ گرمایی که گرمکن می‌دهد صرف گرم کردن آب و ظرف گرماسنج می‌شود و بنابراین داریم :

$$Pt = Q = Q_{\text{آب}} + Q_{\text{ظرف}}$$
$$= m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}}\, \Delta\theta + C_{\text{ظرف}}(\Delta\theta)$$
$$= (m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}} + C_{\text{ظرف}})\Delta\theta$$

الف) با استفاده از این رابطه داریم :

$$(۵۰\ J/s)(۶۰s) = [(۰/۱۰۰\,kg)(۴۱۸۷\ J/kg.^{\circ}C) + C_{\text{ظرف}}]\ (۲۵ - ۲۰)^{\circ}C$$
$$\Rightarrow C_{\text{ظرف}} = ۱۸۱/۳\ J/^{\circ}C \approx ۱/۸ \times ۱۰^{۲} J/^{\circ}C$$

ب) دوباره از رابطهٔ بالا استفاده می‌کنیم. ولی اکنون گرمای ویژهٔ ظرف مشخص و زمان نامشخص است.

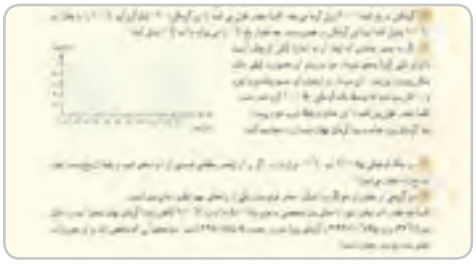
$$t = \frac{(m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}} + C_{\text{ظرف}})\Delta\theta}{P}$$
$$= \frac{[(۰/۱۰۰\,kg)(۴۱۸۷\,J/kg.^{\circ}C) + ۱۸۰\,J/^{\circ}C](۷۵^{\circ}C)}{۵۰\,J/s}$$
$$= ۸۹۸/۰۵s \approx ۹/۰ \times ۱۰^{۲} s$$

پ) برای اینکه آب $۱۰۰^{\circ}C$ به بخار $۱۰۰^{\circ}C$ تبدیل شود، آب به اندازهٔ $Q = mL_V$ گرما می‌گیرد و چون در این رخداد دما تغییر نمی‌کند، گرماسنج گرما نمی‌گیرد. پس داریم :

$$Pt = mL_V$$

و از آنجا

$$t = \frac{mL_V}{P} = \frac{(۰/۲۰\,kg)(۲/۲۵۶ \times ۱۰^{۶} J/kg)}{۵۰\,J/s} = ۹۰۲/۴s \simeq ۹/۰ \times ۱۰^{۲} s$$



۲۰ الف) گرمای لازم برای تبدیل آب $100^\circ C$ به بخار آب $100^\circ C$ از رابطهٔ $Q=Pt$ به‌دست می‌آید و از طرفی $Q=mL_V$ است. در نتیجه داریم :

$$t=\frac{mL_V}{P}=\frac{(0/100\,kg)(2256\times10^3\,J/kg)}{200/0\,J/s}$$
$$=1128\,s\simeq 1/13\times10^3\,s$$

ب) گرمکن در این مدت گرمایی معادل mL_V را تأمین کرده است. بنابراین اگر چنین گرمایی صرف گرم کردن یخ شده باشد، داریم :

$$(0/100\,kg)(2256\times10^3 m)=(m_{یخ})(333/7\times10^3 J/kg)\Rightarrow m_{یخ}=0/676\,kg$$

۲۱ الف) همان‌طور که شکل نشان می‌دهد تغییر فاز از جامد به مایع در زمان $300\,s$ شروع می‌شود و بنابراین $300\,s$ طول می‌کشد تا جامد به نقطهٔ ذوب خود برسد.

ب) از نمودار درمی‌یابیم دمای جسم پیش از تغییر فاز از دمای $20^\circ C$ به دمای $80^\circ C$ می‌رسد. بنابراین از تلفیق رابطه‌های $Q=mc\Delta\theta$ و $Q=Pt$ که در آنها P توان گرمکن، t زمان رسیدن به نقطهٔ ذوب، و m و c به ترتیب جرم و گرمای ویژهٔ جسم جامد است، خواهیم داشت

$$Pt=mc\Delta\theta$$

و در نتیجه

$$c=\frac{Pt}{m\Delta\theta}=\frac{(10/0\,J/s)(300\,s)}{(0/0500\,kg)(80-20)^\circ C}=1/0\times10^3\,J/kg.^\circ C$$

پ) گرمای نهان ذوب را با استفاده از رابطهٔ $L_F=Q/m$ به‌دست می‌آوریم. دوباره به جای Q از رابطهٔ $Q=Pt$ قرار می‌دهیم. ولی توجه کنید که در اینجا t زمان تغییر فاز جامد است که از روی منحنی حدس می‌زنیم $1150-300=850\,s$ می‌شود که البته با توجه به مبحث ارقام معنی‌دار باید آن را به‌صورت $8/5\times10^2\,s$ بیان کنیم. یعنی با دو رقم معنی‌دار و یک رقم حدسی. بنابراین برای L_F داریم :

$$L_F=\frac{(10/0\,J/s)(8/5\times10^2\,s)}{0/0500\,kg}=1/7\times10^5\,J/kg$$

۲۲ عمل تبخیر، عملی گرماگیر است. وقتی بخشی از آب درون چاله بر اثر تبخیر سطحی تبخیر می‌شود، گرمای لازم را از آب باقی‌مانده تأمین می‌کند. بنابراین آب باقیمانده که دمایش صفر درجه است، با از دست دان انرژی گرمایی یخ می‌زند. در حین یخ زدن جرم m_1 آب، مقداری انرژی گرمایی برابر با $Q_1=m_1L_F$ آزاد می‌شود. در حین تبخیر، جرم باقی‌ماندهٔ $m_2=(m-m_1)$، مقدار گرمای جذب‌شده برابر $Q_2=m_2L_V$ است. چون $Q_2=Q_1$ است، داریم :

$$m_1L_F=(m-m_1)L_V$$

که در آن L_V گرمای نهان تبخیر آب در دمای $0^\circ C$ است که آن را از جدول ۴ــ۵ قرار می‌دهیم. در نتیجه برای m_1 داریم

$$m_1=\frac{mL_V}{L_F+L_V}=\frac{(1/00\,kg)(2490\,kJ/kg)}{(2490\,kJ/kg)+(334\,J/kg)}$$
$$=0/880\,kg=880\,g$$

(توجه کنید که در این مسئله چون فرایندها بدون تغییر دما صورت گرفته‌اند، لذا دلیل مبادلهٔ انرژی اختلاف دما نبوده است و بنابراین انرژی مبادله شده را *انرژی گرمایی* و نه گرما نامیدیم.)

۲۳ الف) با فرض آنکه تمام انرژی لازم برای تبخیر آب، از بدن شخص گرفته شده، داریم :

$$Q_{\text{آب}} = Q_{\text{شخص}}$$

$$m_{\text{آب}} L_V = m_{\text{شخص}}\, c_{\text{شخص}} |\Delta\theta|$$

از اینجا جرم آب را به‌دست می‌آوریم

$$m_{\text{آب}} = \frac{m_{\text{شخص}}\, c_{\text{شخص}} |\quad|}{} = \frac{(۵۰/۰\text{g})(۳۴۸۰\,\text{J/kg.K})(۱/۰۰\text{K})}{۲/۴۲\times۱۰^{۶}\,\text{J/kg}}$$

$$= ۰/۰۷۱۹\text{kg} = ۷۱/۹\text{g}$$

ب) حجم آب را با استفاده از تعریف چگالی $\rho = m/V$ به‌دست می‌آوریم. با توجه به اینکه چگالی آب از جدول ۸ــ۱ برابر $۱/۰۰\times۱۰^{۳}\text{kg/m}^{۳}$ است، حجم این جرم از آب چنین می‌شود :

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{۰/۰۷۲\,\text{kg}}{۱/۰۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg/m}^{۳}} = ۷/۱۹\times۱۰^{-۵}\,\text{m}^{۳} = ۷۱/۹\,\text{cc}$$

۲۴ احساس اینکه یک جسم چقدر سرد است به آهنگ رسانش گرما از دستان شما به جسم بستگی دارد. فلز رسانندهٔ گرمای بهتری از چوب است و در نتیجه گرما از دست شما با آهنگ بیشتری به لولهٔ فلزی شارش می‌کند و لوله سردتر به نظر می‌رسد. انگشتان به این دلیل می‌توانند به یک سطح فلزی سرد بچسبند که رطوبت روی پوست می‌تواند به‌صورت دندانه‌های ریزی روی سطح فلز یخ بزند.

۲۵ کلاً روش‌های اتلاف انرژی همان روش‌های انتقال انرژی، یعنی رسانش، تابش و همرفت است و نیز ممکن است انرژی را از طریق تبخیر عرق از پوست خود، از دست بدهید. هدف از پوشیدن پالتو کاهش اتلاف انرژی از راه‌های بالاست. مثلاً پوشش‌هایی از جنس چرم می‌تواند اتلاف‌های ناشی از همرفت و تبخیر ناشی از وزیدن باد را کاهش دهد. در مورد رسانش گرمایی، پالتو می‌تواند یک لایهٔ هوا در اطراف بخشی از بدن شما ایجاد کند که چون انتقال گرما از طریق هوا نسبتاً کم است، این لایه به عایق‌بندی شما کمک می‌کند. پوشیدن چند لباس در زیر پالتو این عمل را تشدید می‌کند، زیرا در این صورت چند لایهٔ هوا شما را عایق‌بندی می‌کند.

۲۶ باید از رابطهٔ $Q = k\dfrac{A(T_H - T_L)}{L}$ استفاده کنیم. توجه کنید رسانندگی گرمایی شیشه بین ۰/۶ تا ۱ برحسب W/m.K است که ما در این مسئله آن را برابر ۱ اختیار کرده‌ایم.

الف) داده‌های مسئله عبارت‌اند از

$$t = ۱/۰\,\text{s}$$

$$A = (۲/۰\,\text{m})(۱/۰\,\text{m}) = ۲/۰\,\text{m}^{۲}$$

$$\Delta T = ۷/۰\,\text{K} - ۲/۰\,\text{K} = ۵/۰\,\text{K}$$

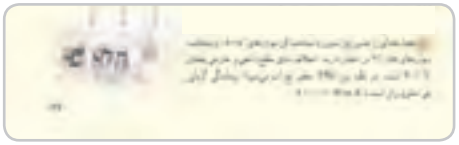
$$L = ۴/۰\times۱۰^{-۳}\,\text{m}$$

بنابراین

$$Q = (۱/۰\,\text{J/s.mK})\,\frac{(۲/۰\,\text{m}^{۲})(۵/۰\,\text{K})}{۴/۰\times۱۰^{-۳}\,\text{m}}\,(۱/۰\,\text{s}) = ۲/۵\times۱۰^{۳}\,\text{J}$$

ب) حالا $t = (۲۴\text{h})(\frac{۶۰\,\text{min}}{۱\text{h}})(\frac{۶۰\,\text{s}}{۱\,\text{min}}) = ۸۶۴۰۰\,\text{s}$ است. بنابراین

$$Q = (۱/۰\,\text{J/s.mK})\,\frac{(۲/۰\,\text{m}^{۲})(۵/۰\,\text{K})}{۴/۰\times۱۰^{-۳}\,\text{m}}\,(۸۶۴۰۰\,\text{s}) = ۲/۱۶\times۱۰^{۸}\,\text{J} \approx ۲/۲\times۱۰^{۸}\,\text{J}$$



۲۷ با استفاده از رابطهٔ $Q = kA\frac{(T_H - T_L)}{L}$ خواهیم داشت :

$$Q=(۰/۰۱۰\,\mathrm{W/m.K})(۰/۸۰\,\mathrm{m^۲})\frac{۲۰/۰^\circ\mathrm{C}}{۰/۰۲۰\,\mathrm{m}}\times ۸۶۴۰۰\,\mathrm{s}=۶۹۱۲۰۰\,\mathrm{J}\simeq ۶/۹\times ۱۰^۵\,\mathrm{J}$$

بنابراین جرم یخ ذوب شده چنین می‌شود

$$m=\frac{Q}{L_F}=\frac{۶۹۱۲۰۰\,\mathrm{J}}{۳۳۳۷۰۰\,\mathrm{J/kg}}=۲/۰۷\,\mathrm{kg}\simeq ۲/۱\,\mathrm{kg}$$

۲۸ قوری سیاه تابش گرمایی بیشتری می‌کند و بنابراین زودتر سرد می‌شود.

۲۹ الف) چون فشار ثابت است از قانون گازها داریم

$$\frac{V_۱}{T_۱}=\frac{V_۲}{T_۲}\Rightarrow$$

$$T_۲=(\frac{T_۱V_۲}{V_۱})=\frac{(۲۰+۲۷۳)(۲۰۰/۰\,\mathrm{cm^۳})}{۱۰۰/۰\,\mathrm{cm^۳}}=۵۸۶\,\mathrm{K}=۳۱۳^\circ\mathrm{C}$$

ب)

$$T_۲=\frac{(۲۰+۲۷۳)(۵۰/۰\,\mathrm{cm^۲})}{۱۰۰/۰\,\mathrm{cm^۳}}=۱۴۶/۵\,\mathrm{K}=-۱۲۶/۵^\circ\mathrm{C}\simeq -۱۲۷^\circ\mathrm{C}$$

۳۰ الف) چون دما ثابت است از قانون گازها به‌صورت زیر استفاده می‌کنیم :

$$P_۱V_۱=P_۲V_۲$$

اگر مساحت قاعدهٔ استوانهٔ تلمبه را A بگیریم خواهیم داشت

$$(۱/۰\,\mathrm{atm})(۲۴\,\mathrm{cm}\times A)=P_۲(۳۰/۰\,\mathrm{cm}\times A)$$

و در نتیجه $P_۲=۰/۸۰\,\mathrm{atm}$ می‌شود.

ب) اکنون داریم

$$(۱/۰\,\mathrm{atm})(۲۴A\times \mathrm{cm})=(۳/۰AL)(\mathrm{atm})$$

و از اینجا $L=۸/۰\,\mathrm{cm}$ می‌شود و بنابراین باید طول استوانه را به اندازهٔ $۲۴\,\mathrm{cm}-۸/۰\,\mathrm{cm}=۱۶\,\mathrm{cm}$ کاهش دهیم.

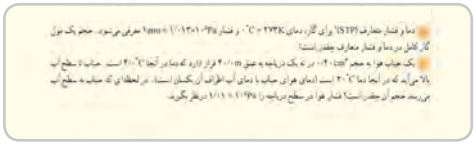
۳۱ در این مسئله حجم ثابت است و بنابراین از قانون گازها داریم :

$$\frac{P_۱}{T_۱}=\frac{P_۲}{T_۲}$$

توجه کنید فشاری که فشارسنج اندازه می‌گیرد فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای) است، ولی در این رابطه باید فشارهای مطلق را قرار دهیم و نه فشار پیمانه‌ای را. بنابراین :

$$\frac{(۲/۰۰+۱/۰۰)\,\mathrm{atm}}{(۱۷+۲۷۳)\,\mathrm{K}}=\frac{(۲/۳۰+۱/۰۰)\,\mathrm{atm}}{T_۲}$$

و از اینجا $T_۲=۳۱۹\,\mathrm{K}=۴۶^\circ\mathrm{C}$ می‌شود.



۳۲ از رابطهٔ $PV = nRT$ استفاده می‌کنیم :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(۱/۰۰\,\text{mol})[۸/۳۱۴\,\text{J/mol.K}](۲۷۳\,\text{K})}{۱/۰۱۳\times۱۰^{۵}\,\text{Pa}}$$

$$= ۰/۰۲۲۴\,\text{m}^{۳} = ۲۲/۴\,\text{L}$$

توجه کنید که در این مسئله، منظور از یک مول گاز، دقیقاً یک مول است و نه ۱mol یا ۱/۰ mol و . . . ، به همین دلیل مقدار رقم‌های با معنی در یک مول، محدودکنندهٔ تعداد ارقام بامعنی پاسخ نهایی نیست.

۳۳ از قانون گازهای کامل داریم

$$\frac{P_{۲}V_{۲}}{T_{۲}} = \frac{P_{۱}V_{۱}}{T_{۱}}$$

که در اینجا شاخص ۱ مربوط به ته دریاچه و شاخص ۲ مربوط به سطح آب دریاچه است. با فرض اینکه فشار هوا در حباب، همان فشار آب اطراف آن باشد، داریم

$$P_{۱} = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

که در آن ρ چگالی آب و h عمق دریاچه است، بدیهی است که $P_{۲} = P_{\text{atm}}$. از اینجا داریم

$$V_{۲} = \frac{T_{۲}}{T_{۱}} \times \frac{P_{\text{atm}} + \rho gh}{P_{\text{atm}}} \times V_{۱} = \left(\frac{۲۹۳\,\text{K}}{۲۷۷\,\text{K}}\right)\frac{۱/۰۱\times۱۰^{۵}\,\text{Pa} + (۱/۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg/m}^{۳})(۹/۸۰\,\text{m/s}^{۲})(۴۰/۰\,\text{m})}{۱/۰\times۱۰^{۵}\,\text{Pa}} \times (۰/۲۰\,\text{cm}^{۳})$$

$$= ۱/۰۳\,\text{cm}^{۳} \approx ۱/۰\,\text{cm}^{۳}$$