



کوير لوت

کوير هم بسيار زيباست هر چند در آن باران به ندرت مي بارد! پس از بارش باران و تابش دوباره خورشيد بر بهنه کوير، جلوه هاي زيبايي در آن پديد مي آيد. تبخير آب موجود در لايه سطحی خاک کوير، موجب کاهش حجم و ايجاد ترک هاي بي شکل و بديعي در آن مي شود.

گرمای و قانون گازها

چرا وقتی قطعه یخی را درون یک لیوان آب می‌اندازیم، آب سرد می‌شود؟ چه چیز باعث خشک شدن لباس‌های مرطوب روی بند می‌شود؟ عامل اصلی ایجاد باد و جریان هوا چیست؟ پاسخ این سؤال‌ها و بسیاری از سؤال‌های مشابه را می‌توان با بررسی گرما و اثرهای آن به دست آورد. شما در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با مفهوم‌های فیزیکی دما و گرما آشنا شدید. در این فصل ضمن یادآوری آن مفهوم‌ها به بررسی روش گرماسنجی و اندازه‌گیری گرمای ویژه، تغییر حالت مواد و گرمای نهان ذوب و تبخیر می‌پردازیم. علاوه بر این اثر تغییر دما بر طول و حجم جامدها، مایع‌ها و گازها را بررسی می‌کنیم و راه‌های انتقال گرما را مورد بحث قرار می‌دهیم و سرانجام قانون گازها را شرح می‌دهیم.

۱-۶- دما، انرژی درونی و گرما

در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که دما معیاری است که میزان سردی و گرمی جسم‌ها را مشخص می‌کند.

فعالیت ۱-۶

در فصل ۱ گفتیم برای آن که تعریف یک کمیت فیزیکی کامل شود، باید یکای آن و روش و ابزار اندازه‌گیری آن مشخص شود.

دما را به عنوان یک کمیت فیزیکی تعریف کنید، یعنی برای آن یک روش اندازه‌گیری بنویسید، یکای آن را مشخص کنید و ابزار اندازه‌گیری آن را توضیح دهید. (برای این کار می‌توانید از کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه و یا هر کتاب فیزیک مناسب دیگری استفاده کنید.) عیب‌ها و مزیت‌های روش و ابزار اندازه‌گیری‌ای را که معرفی کرده‌اید بنویسید.

تعریف دما به صورتی که با انجام این فعالیت ارائه کرده‌اید، یک تعریف عملیاتی نامیده می‌شود. یکای دما: همان‌گونه که با انجام فعالیت بالا، بیان کرده‌اید، یکای دما درجه سلسیوس^۱ است، که با نماد °C نمایش داده می‌شود. دما بر حسب درجه سلسیوس را معمولاً با θ نشان می‌دهند. مقیاس دمای مطلق (یا کلوین): در SI به جای سلسیوس، یکای دیگری به نام کلوین^۲ را به کار می‌برند که با نماد K نمایش داده می‌شود. دما بر حسب کلوین را معمولاً با T نشان می‌دهند. صفر کلوین تقریباً برابر °C ۲۷۳- است^۳. به این ترتیب برای تبدیل دما از مقیاس سلسیوس به کلوین باید مقدار دما بر حسب سلسیوس را با ۲۷۳ جمع کرد، یعنی:

$$T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273 \quad (1-6)$$

تمرین ۱-۶

دمای ذوب یخ، °C و دمای جوش آب، °C ۱۰۰، و دمای بدن انسان سالم، °C ۳۷، هر یک برابر چند کلوین است؟

مثال ۱-۶

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

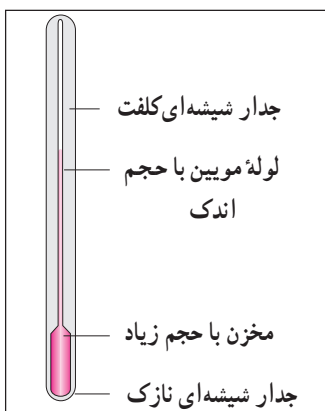
حل: داریم

$$\begin{aligned} \Delta T(K) &= T_2(K) - T_1(K) \\ &= [\theta_2(^{\circ}C) + 273] - [\theta_1(^{\circ}C) + 273] \\ &= \theta_2(^{\circ}C) - \theta_1(^{\circ}C) \end{aligned}$$

در نتیجه:

$$\Delta T(K) = \Delta (^{\circ}C) \quad (2-6)$$

- ۱- درجه بندی سلسیوس را نخستین بار منجم سوئدی آندرس سلسیوس در سال ۱۱۲۱ هجری شمسی به کار برد.
- ۲- این مقیاس دما را ویلیام تامسون (لرد کلوین)، فیزیک و ریاضی‌دان اسکاتلندی که در سال‌های ۱۲۰۳ تا ۱۲۸۶ (از ۱۸۲۴ تا ۱۹۰۷ میلادی) هجری شمسی می‌زیست طرح‌ریزی کرد.
- ۳- صفر کلوین به‌طور دقیق‌تر برابر °C ۲۷۳/۱۵- است، ولی برای محاسبه‌های این کتاب همان مقدار تقریبی °C ۲۷۳- مناسب است.



شکل ۱-۶- دماسنج جیوه‌ای

دماسنج جیوه‌ای (و یا الکلی): در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با دماسنج جیوه‌ای و الکلی (شکل ۱-۶) و هم چنین طرز مدرج کردن آن‌ها آشنا شدید. برای اندازه‌گیری دمای یک جسم باید دماسنج را در تماس با آن جسم قرار دهیم به گونه‌ای که مخزن دماسنج در تماس کامل با آن باشد. مدتی (حدود دو الی سه دقیقه) صبر می‌کنیم تا ارتفاع مایع در لوله دماسنج دیگر تغییر نکند. عددی را که در مقابل سطح مایع در لوله ثبت شده است می‌خوانیم. این عدد دمای آن جسم را نشان می‌دهد.

تعبیر مولکولی دما: آنچه تاکنون درباره دما گفته‌ایم

به تعریف عملیاتی آن مربوط می‌شود. در مبحث‌های تخصصی فیزیک تعبیری برای دما وجود دارد که می‌توانیم آن را با مراجعه به تعریف انرژی درونی دریابیم. در فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که:

الف - انرژی درونی هر جسم، مجموع انرژی‌های مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن از جمله انرژی جنبشی این ذره‌هاست.

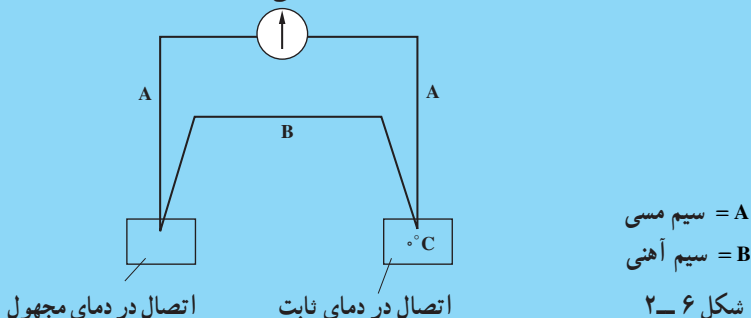
ب - افزایش انرژی درونی هر جسم غالباً به صورت افزایش دمای آن جسم ظاهر می‌شود. از این‌جا تعبیر مولکولی زیر برای دما ارائه می‌شود. دمای هر جسم متناسب است با انرژی جنبشی متوسط مولکول‌های سازنده آن.

آزمایش ۶-۱

وسایل لازم: دو تکه سیم فلزی غیر هم جنس A و B (برای مثال سیم A مسی و سیم B آهنی)، یک آمپرسنج حساس (میلی آمپرسنج یا میکروآمپرسنج)، سه پایه، شعله پخش کن، چراغ گازی یا الکلی، یک ظرف شیشه‌ای نسوز برای گرم کردن آب، یک سطل کوچک برای یخ، مقداری یخ، یک دماسنج جیوه‌ای

- ۱- با سیم‌های فلزی و آمپرسنج مداری مطابق مدار شکل (۴-۶) ببندید.
- ۲- در ظرف شیشه‌ای کمی بیش از نصف آب بریزید و آن را روی سه پایه بالای شعله قرار دهید و یک دماسنج درون آن قرار دهید، به طوری که هر وقت لازم باشد بتوانید دمای آب گرم را اندازه بگیرید.

آمپرسنج حساس



۳- سطل را از یخ در حال ذوب پر کنید. دمای یخ در حال ذوب ثابت است. این دما در فشار یک اتمسفر برابر 0°C است.

۴- یکی از دو محل اتصال دو فلز را درون یخ در حال ذوب که دمای آن مشخص و ثابت است فرو ببرید.

۵- اتصال دیگر را درون ظرف آب گرم که دمای آن را توسط دماسنج درون آب اندازه گرفته‌اید قرار دهید. با این کار مشاهده خواهید کرد که آمپرسنج عبور جریانی را نشان می‌دهد.

۶- این آزمایش را چند بار تکرار کنید، هر بار آب گرم را در دمای بالاتری به کار برید و شدت جریان حاصل را اندازه بگیرید.

۷- یافته‌های خود را در جدولی وارد کنید.

با انجام این آزمایش درمی‌یابید که هرچه اختلاف دمای دو اتصال بیش تر باشد، شدت جریان مدار بیش تر می‌شود، اگر آزمایش را چندین بار و برای اختلاف دماهای متفاوت تکرار کنید، می‌توانید شدت جریان مربوط به هر اختلاف دمایی را مشخص کنید. حتی می‌شود آمپرسنج را به جای شدت جریان برحسب اختلاف دما مدرج کرد و به این ترتیب یک دماسنج ساخت.

این نوع دماسنج را دماسنج ترموکوپل می‌نامند. دماسنج‌های ترموکوپل برتری‌هایی نسبت به دماسنج‌های دیگر دارند که برخی از آن‌ها در زیر آمده است.

— کوچک بودن اتصال سیم‌ها باعث می‌شود که اتصال به سرعت به تغییر دما پاسخ دهد و این دقت اندازه‌گیری را بالا می‌برد.

— خروجی این دماسنج، یک علامت الکتریکی (یک جریان) است، به عبارت دیگر، در این دماسنج، تغییر دمای مورد اندازه‌گیری باعث تغییر جریان الکتریکی می‌شود و این تغییر جریان می‌تواند

مستقیماً یک دستگاه هشداردهنده تغییرات ناگهانی دما را به کار اندازد و یا برای ثبت کردن تغییرات پیوسته دما به کار رود.

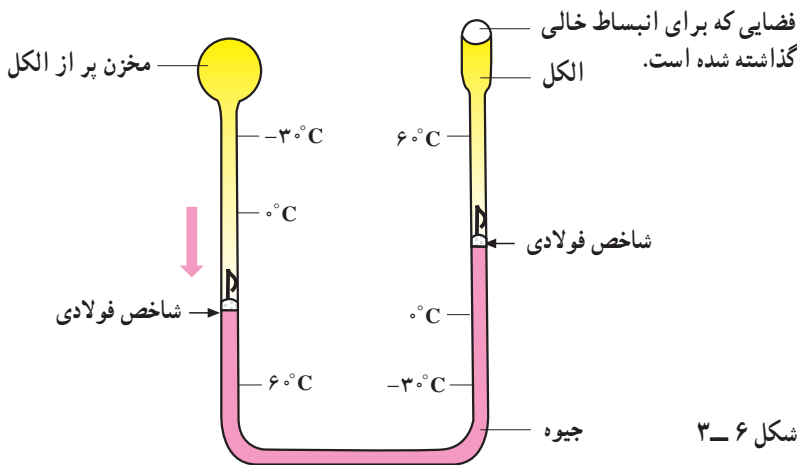
— این دماسنج‌ها نسبت به اختلاف دماهای بسیار کوچک، حتی به کوچکی 0.001°C نیز حساس اند.

— دماسنج‌های ترموکوپل را می‌توان برای اندازه‌گیری دماهای بالا تا حدود 1500°C به کار برد. برای این کار باید سیم‌های فلزی A و B را از جنس‌های خاصی انتخاب کرد که در آن دماها ذوب نشوند.

مطالعه آزاد

دماسنج فرینه: این دماسنج نوع ویژه‌ای از دماسنج‌های مایعی است که بیشینه و کمینه دما را در مدت یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. ویژگی‌های این دماسنج مطابق شکل ۳-۶ عبارتند از:

الف — یک شاخص فولادی که روی سطح جیوه در هر طرف لوله U شکل شناور است.



ب — هنگامی که دما بالا می‌رود، به سبب انبساط الکل (در لوله سمت چپ شکل)، جیوه در لوله سمت راست به بالا رانده می‌شود و شاخص فولادی لوله سمت راست را با خود بالا می‌برد. در این مرحله سطح الکل در لوله سمت راست نیز بالا می‌رود.

پ - در این هنگام محل تماس شاخص لوله سمت راست با جیوه، بالاترین دما، یا دمای بیشینه‌ای را که هوا به آن رسیده است نشان می‌دهد. اگر سطح جیوه در لوله راست پایین بیاید، شاخص فولادی همراه با آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای بیشینه می‌ایستد.

ت - هنگامی که الکل به علت کاهش دما، منقبض می‌شود، جیوه از طرف چپ لوله U شکل بالا می‌رود و شاخص فولادی دیگر را در این طرف لوله بالا می‌راند. محل تماس شاخص فولادی با جیوه پایین‌ترین دما یا دمای کمینه را نشان می‌دهد. محل این شاخص نیز با گرم‌تر شدن هوا دیگر تغییر نمی‌کند.

ث - با استفاده از آهنربا، این دو شاخص در پایان ۲۴ ساعت شبانه‌روز به سطح جیوه برگردانده می‌شوند تا برای روز بعد آماده باشند.

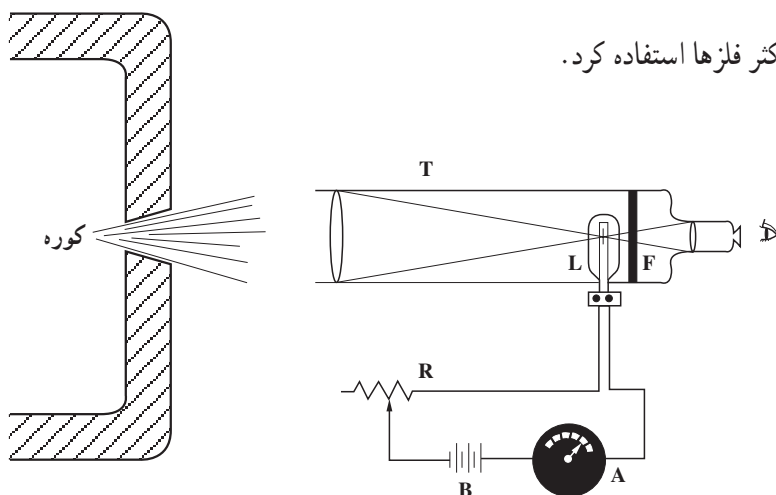
مطالعه آزاد

تف‌سنج نوری: برای اندازه‌گیری دماهایی که بیش‌تر از گستره دماسنج ترموکوپل قرار دارند، از وسیله‌ای به نام تف‌سنج نوری استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۶-۴ دیده می‌شود این وسیله از یک تلسکوپ T، که در لوله آن یک صافی شیشه‌ای F به رنگ قرمز و یک لامپ کوچک L تعبیه شده، تشکیل شده است. اگر تف‌سنج به طرف کوره گرفته شود، شخصی که به داخل تلسکوپ نگاه می‌کند، رشته تیره لامپ را بر روی زمینه روشن کوره، مشاهده می‌کند. لامپ به باتری B و مقاومت متغیر (رئوستای) R وصل است. با حرکت دادن پیچ رئوستا و کاهش مقاومت آن می‌توان جریان عبوری از مدار را افزایش و در نتیجه روشنایی لامپ را زیاد کرد. مقاومت رئوستا را آن قدر کم می‌کنیم تا روشنایی لامپ درست برابر روشنایی زمینه شود.

با استفاده از دستگاهی که قبلاً در دماهای معلوم درجه‌بندی شده، آمپرسنج A را در مدار، می‌توان درجه‌بندی کرد تا مستقیماً دمای مجهول را اندازه بگیرد. در این روش چون لازم نیست که هیچ قسمتی از دستگاه با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، تماس یابد، می‌توان از آن برای اندازه‌گیری دماهای بالاتر از نقاط ذوب

اکثر فلزها استفاده کرد.



شکل ۶-۴- قسمت‌های اصلی یک تفسیح نوری

گرما و تعادل (تراز مندی) گرمایی: در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که گرما مقدار انرژی‌ای است که به دلیل اختلاف دما، بین یک جسم و جسم دیگری که با آن در تماس است مبادله می‌شود. با توجه به قانون پایستگی انرژی، انرژی‌ای که جسم با دمای بالاتر از دست می‌دهد، برابر انرژی‌ای است که جسم با دمای پایین‌تر می‌گیرد. این مبادله انرژی تا زمانی که دمای دو جسم یکی شود ادامه می‌یابد. به این ترتیب آیا اگر دو جسم هم‌دما در تماس با یکدیگر قرار گیرند، گرمایی بین آن‌ها مبادله می‌شود؟ روشن است که گرمای خالصی مبادله نمی‌شود. به عبارت کامل‌تر گرمایی که جسم اول به جسم دوم می‌دهد درست برابر گرمایی است که جسم دوم به جسم اول می‌دهد، پس به‌طور خالص گرمایی مبادله نشده است.

در این وضعیت یعنی وقتی گرمایی بین دو جسم مبادله نشود می‌گوییم دو جسم با هم در تعادل گرمایی‌اند و دمای مشترک را **دمای تعادل** می‌نامیم.

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

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

می شود به صورت زیر تعریف کردیم :

گرمای ویژه هر جسم مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از آن جسم داده شود تا دمای آن یک درجه سلسیوس (یا یک کلونین) افزایش یابد.

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

$$Q = mc\Delta\theta = mc(\theta_2 - \theta_1) \quad (3-6)$$

و یا

$$Q = mc\Delta T = mc(T_2 - T_1) \quad (4-6)$$

در این رابطه ها Q (گرما) بر حسب ژول، m (جرم) بر حسب کیلوگرم، $\Delta \theta$ (تغییر دما) بر حسب درجه سلسیوس و یا ΔT بر حسب کلونین است. یکای c با استفاده از رابطه های (3-6) و (4-6) برابر است با ژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس یا ژول بر کیلوگرم بر کلونین. گرمای ویژه برخی از مواد در جدول (1-6) داده شده است.

جدول 1-6 - گرمای ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم بر کلونین

ماده	گرمای ویژه	ماده	گرمای ویژه
آب	4200	گرانیت	820
آب دریا	3900	مس	380
یخ	2100	سرب	126
اتانول	2500	آلومینیوم	900
روغن پارافین	2100	سدیم	1240
هیدروژن	14300	جیوه	150
هوا	993	آهن	390
هلیوم	5240	فولاد	420
اکسیژن	930	سنگ مرمر	900

مثال ۲-۶

یک سماور حاوی 2kg آب $20^\circ C$ است. گرمای لازم برای افزایش دمای آب

تا 100°C را حساب کنید.

حل: افزایش دما برابر است با:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = 100 - 20 = 80^{\circ}\text{C}$$

گرمای ویژه آب با استفاده از جدول (۶-۱) برابر است با $c = 4200 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$

در نتیجه با استفاده از رابطه (۶-۳) داریم:

$$Q = mc(\theta_2 - \theta_1) = 2 \times 4200 \times 80 = 672000 \text{ J}$$

$$\approx 0.67 \text{ MJ}$$

اگر دمای جسم در اثر مبادله گرما بالا رود، $\theta_2 > \theta_1$ و $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 > 0$ و رابطه (۶-۳) مقدار مثبتی برای Q به دست می دهد، ($Q > 0$).

در حالی که اگر دمای جسم با مبادله گرما کاهش یابد، داریم $\theta_2 < \theta_1$ ، آن گاه $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 < 0$ و مقداری که برای Q به دست می آید منفی خواهد بود، ($Q < 0$).

پس می توان گفت که علامت Q در رابطه (۶-۳) مشخص می کند که جسم در یک فرآیند تبادل انرژی، گرما گرفته است ($Q > 0$) یا گرما داده است ($Q < 0$). از این پس در این کتاب همواره گرمای گرفته شده را با علامت مثبت و گرمای از دست داده شده را با علامت منفی منظور می کنیم.

مثال ۶-۳

یک قطعه 100°C گرمی از مس را که دمای آن 9°C است در یک ظرف آب سرد

می اندازیم، دمای تعادل به 24°C می رسد. گرمای مبادله شده را حساب کنید.

حل: داریم $m = 100 \text{ g} = 0.1 \text{ kg}$ ، $\theta_1 = 9^{\circ}\text{C}$ ، $\theta_2 = 24^{\circ}\text{C}$ و گرمای ویژه

مس با استفاده از جدول (۶-۱) برابر است با: $c = 380 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$

در نتیجه از رابطه (۶-۳) برای مس، به دست می آوریم:

$$Q = mc\Delta\theta = 0.1 \times 380 \times (24 - 9)$$

$$= 38 \times (-66) = -2508 \text{ J} \approx -2.5 \text{ kJ}$$

علامت منفی Q نشان می دهد که مس گرما از دست داده است.

مثال ۶-۴

فرستنده‌ها و گیرنده‌های الکترونیکی درون ماهواره‌ها نیز مانند فرستنده‌ها و گیرنده‌های زمینی دارای یک بازده مشخص هستند و تنها بخشی از انرژی دریافتی را به انرژی مورد نظر تبدیل می‌کنند. فرض کنید انرژی‌ای که چنین دستگاهی از سلول‌های خورشیدی متصل به ماهواره دریافت می‌کند 10 W و انرژی‌ای که فرستنده‌ی امواج به سمت زمین گسیل می‌کند 3 W باشد. همچنین فرض کنید جنس این دستگاه از سیلیکون و جرم آن 0.5 کیلوگرم باشد. این دستگاه در مدت 100 ثانیه چقدر گرم می‌شود؟ گرمای ویژه سیلیکون $700\text{ J/kg}\cdot\text{C}$ است.

حل: می‌دانیم $P = Q/t$ ، و از طرفی $Q = mc\Delta$ است. از تلفیق این دو رابطه

$$Pt = mc\Delta \quad \text{به رابطه روبرو می‌رسیم}$$

$$\Delta = \frac{Pt}{mc} \quad \text{و از آن جا برای افزایش } \Delta \text{ ما خواهیم داشت:}$$

حال با گذاشتن مقادیر، Δ را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta = \frac{(3\text{ J/s})(100\text{ s})}{(0.5\text{ kg})(700\text{ J/kg}\cdot\text{C})} = 2\text{ C}$$

دمای تعادل: دیدیم که اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند، پس از مدتی هم‌دما می‌شوند. دمای تعادل را می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی محاسبه کرد. این محاسبه در مثال ۶-۵ انجام شده است.

مثال ۶-۵

یک قطعه 140 گرمی آلومینیوم را که دمای آن 8 C است در ظرف عایقی که حاوی 250 گرم آب در دمای 22 C است می‌اندازیم، دمای تعادل را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و آب چشم‌پوشی کنید.

حل: در این مثال دو جسم داریم که تغییر دما داده‌اند، برای سادگی مشخصه‌های

آن‌ها را با زیرنویس‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهیم، یعنی:

$$m_1 = 140\text{ g} = 0.14\text{ kg} = \text{جرم آلومینیوم}$$

$$\theta_1 = 8\text{ C} = \text{دمای اولیه آلومینیوم}$$

$$c_1 = 900\text{ J/kg}\cdot\text{C} = \text{گرمای ویژه آلومینیوم} \quad \text{و از جدول (۶-۱)}$$

و همین طور برای آب داریم :

$$m_2 = m_1 = 250 \text{ g} = 0.25 \text{ kg}$$

$$\theta_2 = 22^\circ \text{C}$$

$$c_2 = 4200 \text{ J/kg}^\circ \text{C}$$

و دمای تعادل که دمای نهایی مشترک آب و آلومینیوم است را با θ نمایش می‌دهیم. با استفاده از رابطه (۳-۶) مقدار گرمایی که آلومینیوم از دست می‌دهد تا به دمای تعادل θ برسد برابر است با :

$$Q_1 = m_1 c_1 (\theta - \theta_1) = m_1 c_1 \Delta_1$$

و مقدار گرمایی که آب می‌گیرد تا به دمای تعادل برسد برابر است با :

$$Q_2 = m_2 c_2 (\theta - \theta_2) = m_2 c_2 \Delta_2$$

از قانون پایستگی انرژی داریم :

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

زیرا مجموعه آلومینیوم و آب نه به بیرون گرما داده و نه از بیرون گرما گرفته است. در نتیجه داریم :

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) = 0$$

$$0.14 \times 900 \times (\theta - 80) + 0.25 \times 4200 \times (\theta - 22) = 0$$

پس از محاسبه حاصل می‌شود :

$$\theta = 28^\circ \text{C}$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرگاه چند جسم متفاوت با گرمای ویژه c_1, c_2, c_3, \dots به جرم‌های m_1, m_2, m_3, \dots با دماهای اولیه $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ را در تماس کامل با یکدیگر قرار دهیم برای یافتن دمای تعادل θ ، می‌توانیم حاصل جمع گرماهایی را که هریک مبادله کرده‌اند، یعنی Q_1, Q_2, Q_3, \dots را برابر صفر قرار دهیم، یعنی :

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0 \quad (5-6)$$

و از آنجا معادله‌ای به دست آوریم که دمای تعادل را از آن محاسبه کنیم. به عبارت دیگر :

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) + m_3 c_3 (\theta - \theta_3) + \dots = 0 \quad (6-6)$$

از معادله (۶-۶) می‌توانیم برای یافتن گرمای ویژه یک جسم نیز استفاده کنیم. مثال بعد نحوه

محاسبه را نشان می‌دهد.

مثال ۶-۶

در ظرف عایقی حاوی ۵۰۰ گرم آب 2°C ، یک قطعه مس 100 گرمی به دمای 5°C و یک قطعه فلز دیگری به جرم 150 گرم و به دمای $62/5^{\circ}\text{C}$ که گرمای ویژه آن را نمی‌دانیم می‌اندازیم و دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. اگر دمای تعادل 22°C باشد، گرمای ویژه فلز را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و آب چشم‌پوشی کنید.

حل: با استفاده از داده‌های این مثال و جدول (۶-۱) داریم:

$$\text{جرم آب} = m_1 = 500 \text{ g} = 0/5 \text{ kg}, \theta_1 = 2^{\circ}\text{C}, c_1 = 4200 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{جرم مس} = m_2 = 100 \text{ g} = 0/1 \text{ kg}, \theta_2 = 5^{\circ}\text{C}, c_2 = 380 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{جرم فلز} = m_3 = 150 \text{ g} = 0/15 \text{ kg}, \theta_3 = 62/5^{\circ}\text{C}, c_3 = ?$$

$$\text{دمای تعادل} = \theta = 22^{\circ}\text{C}$$

با درج این داده‌ها در رابطه (۶-۶) داریم:

$$0/5 \times 4200 \times (22 - 2) + 0/1 \times 380 \times (22 - 5) +$$

$$0/15 \times c_3 \times (22 - 62/5) = 0$$

پس از محاسبه حاصل می‌شود:

$$c_3 \approx 516 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$$

تمرین ۶-۶

جسمی به جرم 250 گرم در دمای 3°C را به درون ظرف عایقی حاوی 500 گرم آب 25°C می‌اندازیم. پس از چند دقیقه دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. اگر دمای تعادل 21°C باشد، گرمای ویژه جسم را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین آب و ظرف چشم‌پوشی کنید.

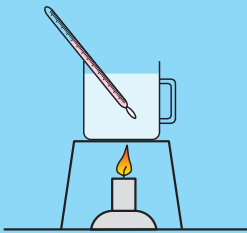
آزمایش ۶-۶

گرماسنجی — تعیین ظرفیت گرمایی گرماسنج

وسایل لازم: ترازو، یک ظرف آب، چراغ الکلی یا گازی، سه پایه و شعله پخش‌کن، ظرف شیشه‌ای نسوز برای گرم کردن آب، یک فلاسک (یا ظرفی که به خوبی عایق بندی شده باشد)، دو عدد همزن، دو عدد دماسنج جیوه‌ای، یک عدد دستگیره

آزمایش زیر را به طور گروهی انجام دهید.

- ۱- ۲/۰ کیلوگرم آب (m_1) درون فلاسک بریزید و همزن و دماسنج را درون آن قرار دهید و صبر کنید تا آب و فلاسک و همزن به تعادل گرمایی برسند.
- ۲- در این فاصله ۴/۰ کیلوگرم آب (m_2) نیز درون ظرف شیشه‌ای نسوز بریزید.
- ۳- ظرف نسوز را مطابق شکل (۵-۶) روی سه پایه بالای چراغ قرار دهید.
- ۴- چراغ را روشن کنید و آب را تا دمای θ_1 گرم کنید.
- ۵- دمای آب درون فلاسک θ_1 و آب درون ظرف شیشه‌ای θ_2 را به کمک دماسنج‌هایی که در هریک از این ظرف‌ها قرار دارد اندازه بگیرید و یادداشت کنید. سپس آب گرم درون ظرف شیشه‌ای نسوز را (به کمک دستگیره) به درون فلاسک بریزید.



شکل ۵-۶

۶- آب درون فلاسک را با همزنی که درون آن است هم بزنید و دمای تعادل (θ) را اندازه‌گیری و یادداشت کنید.

- ۷- اگر گرمای ویژه آب را با c_w ، گرمای ویژه فلاسک را با c_F ، گرمای ویژه همزن را با c_M ، گرمای ویژه دماسنج را با c_T ، جرم فلاسک را با M ، جرم همزن را با M' و جرم دماسنج را با M' نمایش دهیم با استفاده از معادله (۶-۶) خواهیم داشت:

$$m_1 c_w (\theta - \theta_1) + m_2 c_w (\theta - \theta_2) + M c_F (\theta - \theta_1) + M' c_M (\theta - \theta_1) + M' c_T (\theta - \theta_1) = 0$$

- دقت کنید که دمای اولیه فلاسک و همزن و دماسنج با دمای اولیه آب درون فلاسک برابر است و همین‌طور هم دمای تعادل برای همه آن‌ها یکسان است.
- ۸- از رابطه بالا داریم:

$$[M c_F + M' c_M + M' c_T] (\theta - \theta_1) + m_1 c_w (\theta - \theta_1) + m_2 c_w (\theta - \theta_2) = 0$$

- ۹- در این رابطه تنها عبارت داخل کروشه مجهول است، مقدار آن را به کمک اعدادی که در آزمایش به دست آورده‌اید محاسبه کنید. این کمیت را ظرفیت گرمایی مجموعه فلاسک و همزن و دماسنج درون آن می‌نامند و آن را با نماد A نمایش

می‌دهند.

مجموعهٔ فلاسک و همزن و دماسنج درون آن را معمولاً گرماسنج می‌نامند. با انجام این آزمایش شما ظرفیت گرمایی گرماسنج را که به صورت زیر تعریف می‌شود اندازه گرفته‌اید.

$$Mc_F + M'c_M + M'c_T = A$$

ظرفیت گرمایی گرماسنج

آزمایش ۶-۳

تعیین گرمای ویژهٔ یک جسم

وسایل لازم: گرماسنج (فلاسک، همزن، دماسنج) با ظرفیت گرمایی معین که قبلاً اندازه گرفته‌اید، یک جسم کوچک فلزی (مثل یک کلید)، یک همزن و یک دماسنج دیگر، ترازو، ظرف شیشه‌ای نسوز، چراغ الکلی یا گازی، سه پایه و شعله‌بخش کن، یک انبرک، دستگیره

۱- ۲/۰ کیلوگرم آب (m_1) درون گرماسنج بریزید و صبر کنید تا دمای گرماسنج و آب یکی شود.

۲- جرم جسم فلزی را به کمک ترازو اندازه بگیرید و یادداشت کنید. (m_2)

۳- جسم فلزی را درون ظرف شیشه‌ای نسوز قرار دهید و مقداری آب درون آن بریزید و همزن و دماسنج اضافی را نیز درون ظرف قرار دهید.

۴- ظرف شیشه‌ای را مطابق شکل (۶-۵) روی چراغ بگذارید و چراغ را روشن کنید و آب درون ظرف را به کمک همزن به هم بزنید.

۵- پس از چند دقیقه چراغ را خاموش کنید و همزمان دمای آب درون گرماسنج (θ_1) و دمای آب گرمی را که جسم فلزی در آن است (θ_2) به کمک دماسنج‌های مربوط اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۶- جسم داغ شده را توسط انبرک هرچه سریع‌تر به درون آب درون فلاسک بیندازید.

۷- آب درون فلاسک را با همزن به هم بزنید و دمای تعادل θ را اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۸- با استفاده از معادلهٔ (۶-۶) داریم:

$$A(\theta - \theta_1) + m_1c_{\text{آب}}(\theta - \theta_1) + m_2c_{\text{جسم}}(\theta - \theta_2) = 0$$

۹- در این رابطه تنها جسم مجهول است. مقدار آن را به کمک اعدادی که در آزمایش به دست آورده‌اید، محاسبه کنید.

فعالیت ۲-۶

گرمای ویژه یک فلز یا مایع معلوم را اندازه بگیرید. مقداری را که به دست می‌آورد، با مقدار داده شده در جدول (۶-۱) مقایسه کنید. دلیل اختلاف بین عددی که شما به دست آورده‌اید و رقمی که در جدول درج شده چیست؟ موضوع را با همکلاسان خود به بحث بگذارید.

۲-۶ - حالت‌های ماده

همان‌طور که در فصل ۵ دیدیم موادی که در اطراف ما وجود دارند در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز یافت می‌شوند. برای مثال H_2O هم به حالت جامد (یخ) و هم به حالت مایع (آب) و هم به حالت گاز (بخار آب) یافت می‌شود. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. هر تغییر حالت (در فشار ثابت) در دمای ثابتی صورت می‌گیرد که آن را دمای گذار می‌نامند. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراهند. علاوه بر این حجم و چگالی نیز با تغییر حالت تغییر می‌کند.

فعالیت ۳-۶

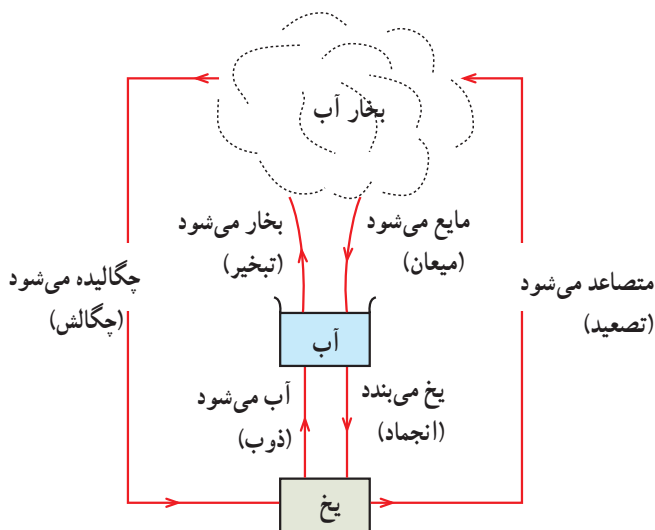
آزمایشی طراحی کنید و انجام دهید که در آن تغییر حجم آب به هنگام انجماد (یخ بستن) و یا تغییر حجم یخ به هنگام ذوب شدن (آب شدن) مشخص شود.

برای مثال در شکل (۶-۶) انواع تغییر حالت‌هایی که برای آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است.

تبدیل جامد به مایع را ذوب، تبدیل مایع به بخار را تبخیر، تبدیل مایع به جامد را انجماد و تبدیل بخار به مایع را میعان می‌نامیم.

امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم (بدون گذر از حالت مایع) صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، تصعید و تغییر حالت وارون آن یعنی از بخار به جامد چگالش نام دارد.

برای مثال نفتالین در دمای اتاق به‌طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود (تصعید). در صبح‌های بسیار سرد زمستان برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشه پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است (چگالش).



شکل ۶-۶- انواع تغییر حالت های آب

در ادامه هر یک از تغییر حالت ها را به طور جداگانه بررسی می کنیم.

ذوب: پیش از این دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما بدهیم، دمای آن افزایش می یابد. اگر عمل گرما دادن را ادامه دهیم، هنگامی که دمای جسم به مقدار مشخصی رسید، افزایش دما متوقف می شود (دما ثابت می ماند) و جسم شروع به ذوب شدن می کند (به مایع تبدیل می شود). این دمای ثابت را که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد «دمای ذوب» یا «نقطه ذوب» می نامیم.

افزایش فشار وارد بر جسم به جز در چند مورد سبب بالا رفتن نقطه ذوب آن می شود. در بعضی از جسم ها مانند یخ، افزایش فشار سبب کاهش نقطه ذوب می شود. نقطه ذوب یخ در فشار یک اتمسفر برابر صفر درجه سلسیوس است.

فعالیت ۶-۴

درباره علت دیرتر آب شدن برف روی قله کوه ها تحقیق کنید. نتیجه تحقیق خود را به کلاس گزارش دهید.

عمل ذوب گرماگیر است. یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود.

گرمای نهان ذوب، گرمای نهان ویژه ذوب: گرمایی که جسم جامد در نقطه ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی‌شود، بلکه صرف تغییر حالت آن خواهد شد. از این رو به این گرما، گرمای نهان ذوب می‌گوییم. دادن گرمای نهان ذوب به جامدی که به نقطه ذوب خود رسیده است، آن را ذوب می‌کند.

گرمای نهان ویژه ذوب (L_F)^۱ یک جامد، برابر است با مقدار انرژی‌ای که باید به یک کیلوگرم از آن جامد در دمای نقطه ذوب بدهیم تا به مایع در همان دما تبدیل شود. یکای گرمای نهان ویژه در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است.

بنابراین گرمای نهان ذوب m کیلوگرم جامد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = mL_F \quad (7-6)$$

گرمای نهان ویژه ذوب و نقطه ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقادیر برای برخی از

مواد در جدول (۲-۶) داده شده است.

جدول ۲-۶- نقطه ذوب و گرمای نهان ویژه ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)
هیدروژن	-۲۵۹	۵۸/۶
ازت	-۲۰۹	۲۵/۵
اکسیژن	-۲۱۸	۱۳/۸
جیوه	-۳۹	۱۱/۸
یخ	۰	۳۳۴
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۳	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

۱- زیرنویس F حرف اول واژه انگلیسی Fusion به معنای ذوب است.

مثال ۷-۶

گرمای لازم برای ذوب ۱۰ گرم طلا را محاسبه کنید. فرض کنید که طلا در نقطه ذوب خود باشد.

حل: با استفاده از جدول (۶-۲) داریم:

$$L_F = 64/5 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$m = 10 \text{ g} = 0.01 \text{ kg}$$

بنابراین از رابطه (۶-۷) داریم:

$$Q = mL_F = 0.01 \times 64/5 \times 10^3 = 645 \text{ J}$$

مثبت بودن مقدار گرما نشان دهنده گرماگیر بودن عمل ذوب است.

فعالیت ۵-۶

آزمایشی برای اندازه‌گیری گرمای نهان ذوب یخ طراحی کنید و آن را انجام دهید.

انجماد: فرآیند انجماد وارون فرآیند ذوب یعنی تبدیل مایع به جامد است. اگر مایعی را سرد کنیم (یعنی از آن گرما بگیریم) هنگامی که به دمای انجماد یا نقطه انجماد خود می‌رسد، شروع به جامد شدن می‌کند. دمای نقطه ذوب یک ماده در شرایط یکسان با دمای نقطه انجماد آن برابر است. یعنی برای مثال اگر در فشار یک اتمسفر به یخ صفر درجه سلسیوس گرما دهیم شروع به ذوب می‌کند و نیز اگر در همان فشار از آب صفر درجه سلسیوس گرما بگیریم شروع به انجماد می‌کند. هر جسم به هنگام انجماد همان قدر گرما از دست می‌دهد که به هنگام ذوب می‌گیرد. بنابراین گرمای نهان ویژه انجماد منفی گرمای نهان ویژه ذوب است. به این ترتیب گرمای نهان انجماد m کیلوگرم مایع از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = -mL_F \quad (6-8)$$

علامت منفی نشان دهنده آن است که مایع به هنگام انجماد گرما از دست می‌دهد. جوشیدن و تبخیر: وقتی به مایعی گرما می‌دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرما دادن را ادامه دهیم، هنگامی که دمای مایع به مقدار مشخصی رسید، افزایش دما متوقف می‌شود و دما ثابت می‌ماند. مایع در این موقع به جوش می‌آید و تبدیل به بخار می‌شود. این دمای ثابت را «دمای جوش» یا «نقطه جوش» می‌نامند.

جدول ۳-۶ — نقطه جوش و گرمای نهان ویژه تبخیر برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطه جوش (°C)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیوم	-۲۶۹	۲۰/۹
هیدروژن	-۲۵۳	۴۵۲
ازت	-۱۹۶	۲۰۱
اکسیژن	-۱۸۳	۲۱۳
جیوه	۳۵۷	۲۷۲
آب	۱۰۰	۲۲۵۶
گوگرد	۴۴۵	۳۲۶
سرب	۱۷۵۰	۸۷۱
قلع	۱۴۴۰	۵۶۱
نقره	۲۱۹۳	۲۳۳۶
طلا	۲۶۶۰	۱۵۷۸
مس	۱۱۸۷	۵۰۶۹

نقطه جوش هر مایع به جنس آن و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطه جوش آن می‌شود.

فعالیت ۶-۶

علت سریع تر پخته شدن غذا در دیگ زودپز را با افراد گروه خود مورد بحث قرار دهید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

گرمای نهان تبخیر و گرمای نهان ویژه تبخیر: گرمایی را که یک مایع در نقطه جوش خود می‌گیرد تا به بخار در همان دما تبدیل شود گرمای نهان تبخیر می‌گویند.

گرمای نهان ویژه تبخیر (L_V)^۱ یک مایع، برابر است با مقدار گرمایی که باید به یک کیلوگرم از آن مایع در دمای نقطه جوش بدهیم تا به بخار در همان دما تبدیل شود. در SI یکای گرمای نهان ویژه تبخیر نیز همانند گرمای نهان ویژه ذوب ژول بر کیلوگرم است.

۱- حرف اول واژه انگلیسی Vaporization به معنای تبخیر است.

بنابراین گرمای نهان تبخیر m کیلوگرم مایع از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = mL_V \quad (9-6)$$

گرمای نهان ویژه تبخیر و نقطه جوش مایع‌های مختلف، متفاوت است. این مقادیرها برای برخی از مواد در جدول (۳-۶) داده شده است.

مثال ۶-۸

یک کتری برقی را که $1/6 \text{ kg}$ آب دارد روشن می‌کنیم، از لحظه آغاز جوشیدن، چه قدر انرژی برای تبدیل همه آب به بخار مصرف می‌شود و چه قدر طول می‌کشد تا کتری $2/5$ کیلوواتی همه آب را تبخیر کند؟ (از اتلاف انرژی صرف نظر شود).
حل: از جدول (۳-۶) برای آب داریم:

$$L_V = 2256 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$m = 1/6 \text{ kg}$$

انرژی مصرفی را از رابطه (۹-۶) به دست می‌آوریم.

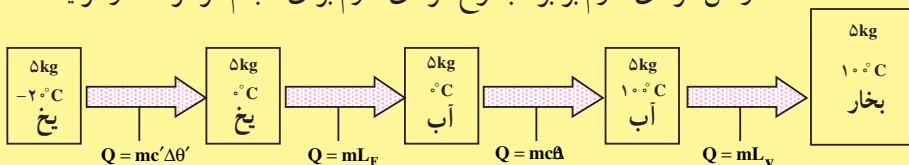
$$Q = 1/6 \times 2256 \times 10^3 = 3610 \times 10^3 \text{ J} = 3610 \text{ kJ}$$

با استفاده از رابطه $P = \frac{Q}{t}$ داریم:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{3610 \times 10^3 \text{ J}}{2/5 \times 10^3 \text{ W}} = 1/44 \times 10^3 \text{ s}$$

مثال ۶-۹

گرمای لازم برای تبدیل 5 kg یخ 2°C به بخار آب 100°C را حساب کنید.
حل: شکل (۷-۶) مراحل تغییر یخ 2°C به بخار آب 100°C و رابطه مربوط به گرمای لازم برای هر تغییر را نشان می‌دهد.
مقدار کل گرمای لازم برابر مجموع گرمای لازم برای انجام هر مرحله از فرآیند



شکل ۷-۶

است. با استفاده از جدول‌های (۱-۶) و (۲-۶) و (۳-۶) داریم:

$$Q_{\text{کل}} = mc_{\text{یخ}} \Delta T_{\text{یخ}} + mL_F + mc_{\text{آب}} \Delta T_{\text{آب}} + mL_V$$

$$= 5 \times 2100 \times [0 - (-20)] + 5 \times 334 \times 10^3 + 5 \times 4200 \times (100 - 0) + 5 \times 2256 \times 10^3$$

با انجام محاسبه به دست می‌آوریم:

$$Q = 1526 \times 10^4 \text{ J} = 15/26 \text{ MJ}$$

میعان: فرآیند میعان وارون فرآیند تبخیر، یعنی تبدیل بخار به مایع است. اگر مقداری بخار یک ماده را سرد کنیم (یعنی از آن گرما بگیریم) هنگامی که به دمای میعان یا «نقطه میعان» خود می‌رسد، شروع به مایع شدن می‌کند. دمای نقطه میعان یک ماده در شرایط یکسان با دمای نقطه جوش آن برابر است. یعنی برای مثال اگر در فشار یک اتمسفر به آب صد درجه سلسیوس گرما دهیم شروع به جوشیدن می‌کند و نیز اگر در همان فشار از بخار آب صد درجه سلسیوس گرما بگیریم شروع به مایع شدن می‌کند. هر بخار به هنگام میعان همان قدر گرما از دست می‌دهد که به هنگام تبخیر می‌گیرد. بنابراین گرمای نهان ویژه میعان منفی گرمای نهان ویژه تبخیر است. به این ترتیب گرمای نهان میعان m کیلوگرم بخار یک ماده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = -mL_V \quad (10-6)$$

علامت منفی نشان‌دهنده آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد.

مثال ۶-۱۰

یک لیوان شیشه‌ای بزرگ به جرم ۱۵ گرم حاوی 20°C آب 20°C است. چند قطعه یخ 4°C ، به جرم 40°C گرم به درون لیوان می‌اندازیم، دمای پایانی آب را حساب کنید. گرمای ویژه شیشه را 360 J/kgK بگیرید.

حل: با توجه به آن که مقدار گرمایی که یخ 4°C می‌گیرد تا به آب 20°C و سپس به آب در دمای تعادل تبدیل شود برابر با مقدار گرمایی است که لیوان شیشه‌ای و آب درون آن از دست می‌دهند تا از 20°C به دمای تعادل برسند. می‌توانیم با در نظر گرفتن m_1 برای لیوان و m_2 برای آب درون آن و m_3 برای یخ، بنویسیم:

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) + m_3 L_F + m_3 c_3 (\theta - \theta_3) = 0 \quad (11-6)$$

با استفاده از داده‌های این مثال و جدول‌های (۱-۶ و ۲-۶) داریم :

$$m_1 = 15 \times 10^{-3} \text{ kg}, c_1 = \text{گرمای ویژه شیشه} = 360 \text{ J/kgK}, \theta_1 = 20^\circ \text{C}$$

$$m_2 = \text{جرم آب درون لیوان} = 20 \text{ g} = 0.02 \text{ kg}, c_2 = 4200 \text{ J/kgK}$$

$$\theta_2 = \theta_1 = 20^\circ \text{C}$$

$$m_3 = 40 \text{ g} = 0.04 \text{ kg}, L_F = \text{گرمای نهان ویژه ذوب یخ} = 334 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$c_3 = 4200 \text{ J/kgK} \quad \theta_3 = 0^\circ \text{C}$$

با درج این مقادیر در رابطه (۱۱-۶) و انجام محاسبه به دست می‌آوریم :

$$\theta = 3/5^\circ \text{C}$$

تبخیر سطحی: پارچه خیزی را روی سنگ فرش پهن کنید. پس از یکی دو ساعت می‌بینید کاملاً خشک شده است. آب آن کجا رفته است؟

پاسخ آن است که آب تبخیر شده است. تجربه‌هایی مانند این نشان می‌دهند که در سطح آزاد هر مایع همواره در هر دمایی عمل تبخیر روی می‌دهد. این پدیده را تبخیر سطحی می‌گویند. مایع در اثر تبخیر سطحی گرمای نهان تبخیر خود را از دست می‌دهد و در اثر آن دمایش پایین می‌آید. تجربه نشان می‌دهد که آهنگ تبخیر سطحی به عامل‌های مختلفی از جمله دما و مساحت سطح مایع بستگی دارد.

فعالیت ۶-۷

الف - بررسی کنید که تبخیر سطحی با افزایش دما و افزایش سطح مایع سریع‌تر صورت می‌گیرد یا کندتر؟

ب - با بررسی تبخیر سطحی در شرایط مختلف سعی کنید از راه تجربه عامل یا عامل‌های دیگری را که بر آهنگ تبخیر سطحی اثر می‌گذارند پیدا کنید.

فعالیت ۶-۸

تحقیق کنید و توضیح دهید چرا :

۱- با پوشیدن لباس‌های تر احساس سرما می‌کنید؟

۲- عرق کردن به خنک نگه داشتن بدن کمک می‌کند؟

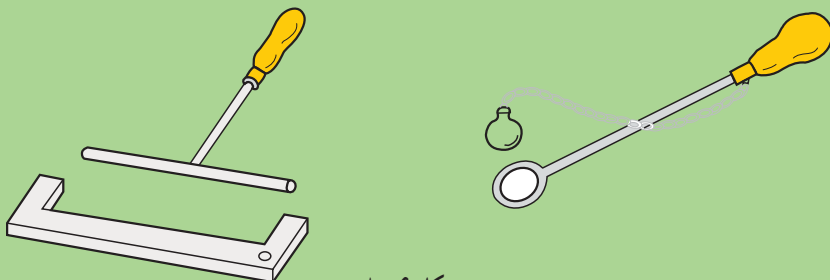
۳- هنگامی که دوش می‌گیرید بخار آب روی شیشه پنجره حمام مایع می‌شود؟

۳-۶- اثر تغییر دما بر طول و حجم جسم‌ها

اکثر اجسام چه جامد، چه مایع و چه گاز به هنگام افزایش دما انبساط می‌یابند، یعنی حجم آن‌ها افزایش می‌یابد و با کاهش دما حجمشان کاهش می‌یابد. این پدیده که در ساختن برخی وسیله‌ها مانند دماسنج‌ها و دماپاها مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند مشکل‌هایی در ساختن ماشین‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها و خط آهن ایجاد کند. مثال‌هایی از افزایش حجم در اثر افزایش دما را در کتاب‌های علوم دبستان و راهنمایی دیده‌اید.

فعالیت ۶-۹

توضیح دهید که چگونه می‌توان با استفاده از ابزارهایی که در شکل (۸-۶) نشان داده شده است پدیده انبساط در اثر افزایش دما را نمایش داد.

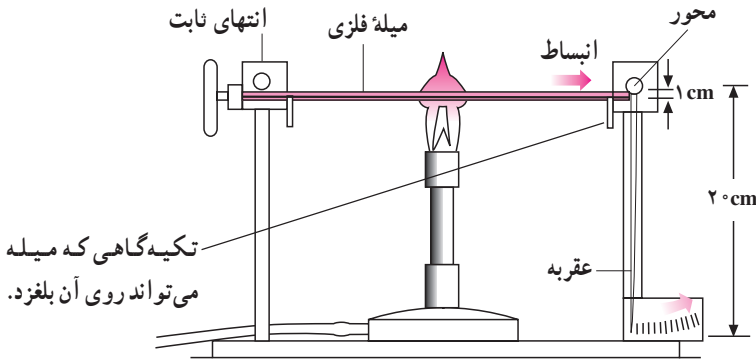


شکل ۸-۶

وقتی یک ورقه فلزی را گرم می‌کنیم حجم آن زیاد می‌شود، یعنی ضخامت و مساحت سطح آن هر دو زیاد می‌شوند. اگر ضخامت ورقه در مقایسه با ابعاد سطح آن ناچیز باشد، انبساط سطحی آن بهتر مشاهده می‌شود. همین‌طور هم درباره یک میله، اگر طول آن در مقایسه با قطر مقطع آن بسیار بزرگ‌تر باشد، انبساط طولی آن بهتر دیده می‌شود.

انبساط طولی: برای دیدن انبساط طولی یک میله فلزی می‌توان از دستگاهی که در شکل (۹-۶) نشان داده شده است، استفاده کرد. وقتی میله فلزی گرم و منبسط می‌شود، عقربه را حول محور می‌چرخاند و انتهای عقربه انبساط طولی میله را چند بار (در شکل ۲۰ بار) بزرگ‌تر نشان می‌دهد و اندازه‌گیری دقیق آن را میسر می‌سازد.

با اندازه‌گیری انبساط طولی میله‌های از جنس‌های مختلف درمی‌یابید که اندازه انبساط میله‌های فلزی از جنس‌های مختلف با یک‌دیگر متفاوت است. برای محاسبه انبساط طولی کمیتی به نام ضریب انبساط طولی به صورت زیر تعریف می‌کنیم و آن را با α نمایش می‌دهیم.



شکل ۶-۹

ضریب انبساط طولی (α) برابر است با افزایش طول واحد طول ماده به ازای افزایش دمای یک کلوین.

انبساط طولی یا تغییر طول (ΔL) یک میله از جنس معین به دو عامل بستگی دارد:

– طول اولیه میله (L_1).

– مقدار تغییر دما (ΔT).

هنگامی که دمای میله‌ای به طول L_1 به اندازه ΔT افزایش یابد، طول آن به اندازه ΔL افزایش

می‌یابد. به این ترتیب انبساط یا افزایش طول واحد طول میله برای افزایش دمای ΔT برابر $\frac{\Delta L}{L_1}$

خواهد بود. افزایش طول واحد طول میله برای افزایش دمای یک کلوین برابر می‌شود با $\frac{\Delta L}{L_1 \Delta T}$.

این همان ضریب انبساط طولی میله (α) است.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T} \quad (12-6)$$

یکای ضریب انبساط طولی در SI، بر کلوین ($\frac{1}{K}$) یا بر درجه سلسیوس ($\frac{1}{^\circ C}$) نام دارد.

مقدار افزایش طول ΔL را می‌توان از رابطه (۱۲-۶) به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \quad (13-6)$$

ضریب انبساط طولی ماده‌های مختلف با هم تفاوت دارند. ضریب انبساط طولی برخی از

ماده‌ها در جدول (۴-۶) داده شده است. توجه کنید که این مقادارها بسیار کوچکند. ولی همین

مقدارهای کوچک هم اثرهای قابل توجهی در ساختمان‌ها و دستگاه‌های مختلف دارد.

جدول ۴-۶- ضریب انبساط طولی ماده‌های مختلف

ماده	ضریب انبساط طولی ($\frac{1}{K}$)
آلمینیوم	23×10^{-6}
آجر	9×10^{-6}
مس	17×10^{-6}
الماس	تقریباً صفر
بتون	12×10^{-6}
آهن	12×10^{-6}
کوارتز	0.4×10^{-6}
روی	31×10^{-6}
برنج	19×10^{-6}

مثال ۱۱-۶

انبساط طولی یک پل بتونی به طول 100 m را هنگامی که دما به اندازه 20°C افزایش یابد حساب کنید.

حل: از جدول (۴-۶) داریم:

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

با استفاده از رابطه (۶-۱۳)، داریم:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = 12 \times 10^{-6} \times 100 \times 20 = 2/4 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta L = 2/4 \text{ cm}$$

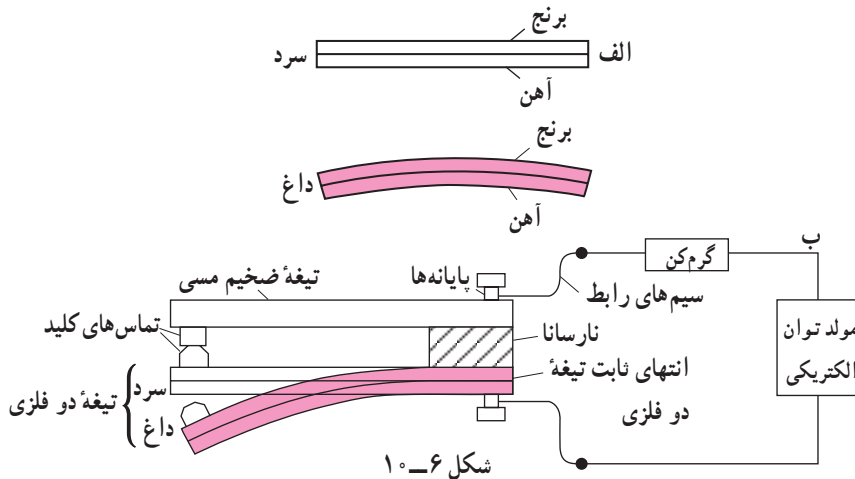
اگر در ساختمان پل پیش‌بینی فضای لازم برای این انبساط طولی نشده باشد، همین مقدار انبساط می‌تواند باعث تخریب پل گردد.

فناوری و کاربرد

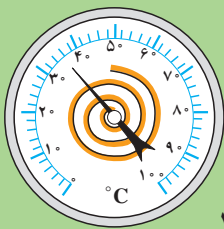


دمپا (ترموستات): دمپا از دو تیغه از فلزهای متفاوت مانند برنج و آهن ساخته شده است که سرتاسر به هم جوش داده شده یا میخ پرچ شده‌اند. در دمای کم محیط، دمپا، مدار الکتریکی دستگاه گرمکن را، مطابق شکل (۶-۱۰) کامل می‌کند. به علت عبور

جریان الکتریکی از گرمکن الکتریکی گرما ایجاد می‌شود و دمای محیط بالا می‌رود. همان‌طور که در جدول (۶-۴) مشاهده می‌کنید ضریب انبساط طولی برنج بزرگ‌تر از آهن است. در نتیجه برنج بیش‌تر منبسط می‌شود و دمایا به طرف آهن خم می‌شود. وقتی دما به مقدار معینی رسید، تماس دمایا با تیغه مسی قطع شده و مدار الکتریکی باز می‌شود. وقتی دوباره دما کم شود، دمایا به حالت اول برمی‌گردد و مدار بار دیگر متصل می‌شود. در نتیجه وجود دمایا در مدار گرمکن الکتریکی می‌تواند دما را تقریباً ثابت نگه دارد.



فعالیت ۶-۱۰



شکل (۶-۱۱) دماسنجی را نشان می‌دهد که در آن از یک نوار دو فلزی حلزونی شکل استفاده شده است. اساس کار این دماسنج را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

شکل ۶-۱۱

انبساط سطحی: برای محاسبه انبساط سطحی هم می‌توانیم به روشی مشابه برای هر ماده یک ضریب انبساط سطحی تعریف کنیم.

ضریب انبساط سطحی برابر است با افزایش مساحت واحد سطح یک جسم جامد به ازای افزایش دمای یک کلوین. می‌توان نشان داد که ضریب انبساط سطحی یک جسم تقریباً دو برابر ضریب انبساط طولی آن است. یکای ضریب انبساط سطحی نیز بر کلوین ($\frac{1}{K}$) یا بر درجه سلسیوس ($\frac{1}{C}$) است.

اگر سطحی به مساحت A با افزایش دمای ΔT ، افزایش مساحتی برابر ΔA پیدا کرده باشد،

داریم:

$$\left(\frac{1}{K}\right) = \alpha \frac{\Delta A}{A_1 \Delta T} \quad (14-6)$$

و یا:

$$\Delta A = \alpha A_1 \Delta T \quad (15-6)$$

انبساط حجمی: برای انبساط حجمی نیز می‌توانیم ضریب انبساط حجمی را تعریف کنیم: ضریب انبساط حجمی یک ماده نیز برابر است با افزایش حجم واحد حجم ماده به ازای افزایش دمای یک کلوین. یکای ضریب انبساط حجمی نیز بر کلوین ($\frac{1}{K}$) یا بر درجه سلسیوس ($\frac{1}{C}$) است. ضریب انبساط حجمی را معمولاً با β نشان می‌دهند. می‌توان نشان داد که ضریب انبساط حجمی یک جامد تقریباً سه برابر ضریب انبساط طولی آن است. یعنی $\beta = 3\alpha$. در این جا نیز می‌توانیم بنویسیم:

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_1 \Delta T} \quad (16-6)$$

و یا:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T \quad (17-6)$$

مثال ۶-۱۲

ابعاد یک شمش آلومینیومی در دمای $10^\circ C$ برابر $5\text{cm} \times 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ است حجم این شمش را در دمای $90^\circ C$ حساب کنید.

حل: با استفاده از جدول (۴-۶) داریم:

$$\beta = 3\alpha = 3 \times 23 \times 10^{-6} \frac{1}{C} = 69 \times 10^{-6} \frac{1}{C}$$

$$V_1 = 5 \times 10 \times 20 \text{cm}^3 = 1000 \text{cm}^3$$

$$\Delta T = 90 - 10 = 80^\circ C$$

از رابطه (۱۷-۶) داریم:

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T = 69 \times 10^{-6} \times 1000 \times 80 = 5.52 \text{cm}^3$$

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

$$V_2 = \Delta V + V_1 = 1000 + 5.52 = 1005.52 \text{cm}^3$$

انبساط مایع‌ها: بیشتر مایع‌ها نیز با افزایش دما، افزایش حجم پیدا می‌کنند. انبساط مایع‌ها اساس کار دماسنج‌های جیوه‌ای و الکلی را تشکیل می‌دهد. ضریب انبساط حجمی چند مایع مختلف در جدول (۶-۵) داده شده است.

آزمایش ۶-۴

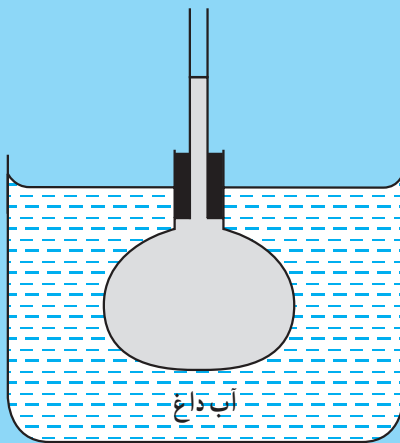
وسایل لازم: یک بالون شیشه‌ای، مقداری آب که با جوهر رنگی شده باشد، درپوش سوراخ‌دار همراه با یک لوله شیشه‌ای بلند با مجرای بسیار نازک، چراغ الکلی، سه پایه و شعله پخش‌کن، ظرف شیشه‌ای بزرگ نسوز

۱- بالون شیشه‌ای را از آب رنگی پر کنید و درپوش همراه با لوله شیشه‌ای بلند را مطابق شکل (۶-۱۲) طوری در دهانه بالون جای دهید که هیچ هوایی در بالون نباشد و آب مقداری در لوله بالا بیاید. ارتفاع آب در لوله شیشه‌ای را با علامت مشخص کنید.

۲- ظرف شیشه‌ای بزرگ را پر از آب کرده روی شعله چراغ قرار دهید تا آب آن گرم شود.

۳- بالون شیشه‌ای را مطابق شکل ۶-۱۲ درون آب فرو برید و نحوه تغییر ارتفاع آب در لوله شیشه‌ای را مشاهده کنید.

۴- مشاهده‌های این آزمایش را با توجه به انبساط ظرف (بالون شیشه‌ای) و انبساط آب توضیح دهید.



شکل ۶-۱۲- انبساط مایع‌ها

در آزمایش (۶-۴) اگر ارتفاع مایع درون لوله باریک (به مساحت مقطع A) از مقدار h_1 قبل از گذاشتن بالون در آب داغ به مقدار h_2 در انتهای آزمایش رسیده باشد، مایع ظاهراً به اندازه $\Delta V = (h_2 - h_1)A$ افزایش حجم پیدا کرده است، که به آن انبساط ظاهری مایع می‌گویند.

فعالیت ۱۱-۶

آیا واقعاً مایع به اندازه انبساط ظاهری خود افزایش حجم پیدا کرده است؟ توضیح دهید. اگر پاسخ شما به این سؤال منفی است تحقیق کنید که انبساط واقعی مایع‌ها را چگونه اندازه می‌گیرند.

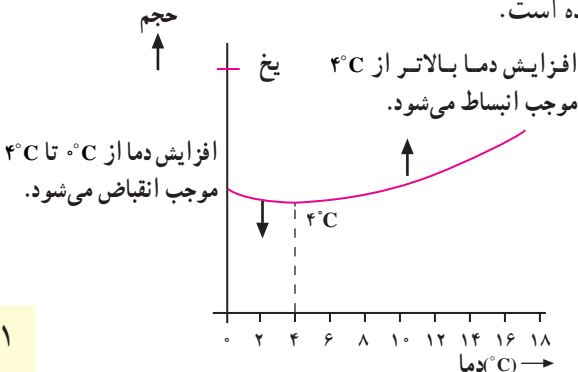
جدول ۵-۶- ضریب انبساط حجمی چند مایع

ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
آتر معمولی	$1/6 \times 10^{-3}$
الکل اتیلیک	$1/1 \times 10^{-3}$
بنزن	$1/2 \times 10^{-3}$
گلیسرین	$0/5 \times 10^{-3}$
جیوه	$0/18 \times 10^{-3}$

تغییرات چگالی با دما: افزایش دما تغییری در جرم جسم ایجاد نمی‌کند ولی حجم آن را (به جز در مورد های استثنا) افزایش می‌دهد. از این رو انتظار داریم که چگالی $\rho = \frac{m}{V}$ با افزایش دما تغییر کند. با توجه به این که با افزایش دما، V در مخرج کسر افزایش می‌یابد، پس نتیجه می‌گیریم که افزایش دما باعث کاهش چگالی می‌شود.

هنگامی که مایع (یا گازی) را در یک نقطه گرم می‌کنیم، چگالی قسمت گرم شده کم می‌شود (کمتر از مایع (یا گاز) اطراف آن نقطه). در نتیجه چون قسمت گرم شده چگالی کم‌تری دارد به بالا رانده می‌شود و جای خود را به مایع (یا گاز) سردتر می‌دهد.

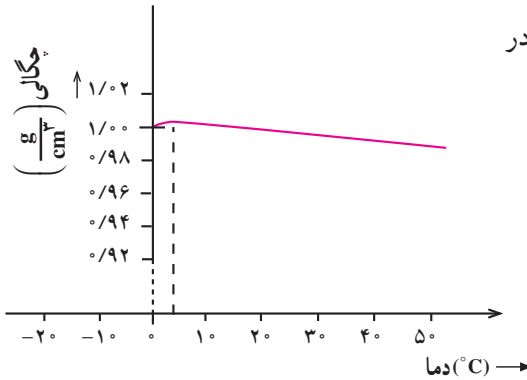
انبساط غیرعادی آب: حجم بیش‌تر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش می‌یابد و با رسیدن به نقطه انجماد این کاهش حجم بیش‌تر می‌شود. ولی آب رفتاری متفاوت دارد. به این ترتیب که آب از 10°C تا 4°C مانند هر مایع معمولی با کاهش دما کاهش حجم پیدا می‌کند. ولی از 4°C تا 0°C این رفتار عوض می‌شود و کاهش دما باعث افزایش حجم آب می‌شود. تغییرات حجم آب نسبت به دما در شکل (۶-۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۳- تغییر حجم آب و یخ

تمرین ۶-۵

آب در چه دمایی کمترین حجم را دارد؟ در این دما چگالی بیشترین مقدار خود را دارد یا کمترین آن را؟



تغییرات چگالی آب نسبت به دما در شکل (۶-۱۴) نشان داده شده است.

شکل ۶-۱۴ تغییرات چگالی آب با دما

فعالیت ۶-۱۲

تحقیق کنید که :

- الف - این نوع تغییر غیرعادی حجم و چگالی آب چه تأثیری بر نحوه قرار گرفتن لایه‌های آب با دماهای متفاوت در اقیانوس‌ها دارد؟
- ب - این نحوه قرار گرفتن چه تأثیری بر محیط زیست اقیانوس‌ها داشته است؟

۶-۴ انتقال گرما

دیدیم که اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. این شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارتند از همرفتی، رسانش و تابش. در ادامه به بررسی ساز و کار هریک از این روش‌ها می‌پردازیم. ولی باید گفته شود که در هر فرآیند انتقال گرما، هر سه این ساز و کارها می‌توانند دخالت داشته باشند.

فعالیت ۶-۱۳

مبحث رسانش گرما را از کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه بخوانید و آن را در چند سطر خلاصه بنویسید.

رسانش

با انجام این فعالیت به یاد آورده‌اید که رسانش گرما در مواد مختلف متفاوت است، از ماده‌های عایق مخصوص در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا از شارش برون‌سوی گرما در زمستان و شارش درون‌سوی آن در تابستان جلوگیری کنند. اکنون می‌دانید که فلزها رساناهای خوب گرما هستند.

در حالی که ماده‌هایی از قبیل شیشه، چوب، آزیست، آجر و جز این‌ها، رساناهای چندان خوبی نیستند. برای محاسبه آهنگ شارش گرما در یک ماده (یعنی مقدار گرمایی که در واحد زمان از هر مقطع فرضی در آن می‌گذرد)، میله‌ای به طول L و به سطح مقطع A از یک ماده معین در نظر می‌گیریم. فرض کنید که یک سر این میله (سر داغ) را در دمای ثابت θ_1 (نسبتاً زیاد) و سر دیگر آن (سر سرد) را در دمای ثابت θ_2 (نسبتاً کم) قرار داده باشیم. آهنگ شارش گرما به عامل‌های زیر بستگی دارد:

۱- اختلاف دما: $\theta_1 - \theta_2 = \Delta$ هر چه اختلاف دما بیش‌تر باشد، گرما با آهنگ بالاتری در میله شارش می‌کند.

۲- طول میله: هر چه طول میله بیش‌تر باشد، آهنگ شارش گرما کندتر می‌شود.

۳- سطح مقطع میله: هر چه سطح مقطع میله بیش‌تر باشد آهنگ شارش گرما بیش‌تر می‌شود. در نتیجه: Q ، گرمایی که در t ثانیه در یک میله شارش می‌کند برابر است با:

$$Q = K \frac{At\Delta}{L} \quad (6-18)$$

A در این معادله مساحت سطح مقطع میله و L طول آن است. Δ اختلاف دمای دو سر میله است. ثابت تناسب K رسانندگی گرمایی نام دارد.

یکای رسانندگی گرمایی $J/s.m.K$ یا $W/m.K$ است.

رسانندگی گرمایی چند ماده مختلف در جدول (۶-۶) درج شده است.

جدول ۶-۶ رسانندگی گرمایی ماده‌های مختلف

رسانندگی گرمایی (J/s.m.K)	ماده	رسانندگی گرمایی (J/s.m.K)	ماده
۸۲	آهن	۳۵	سرب
۴۱۸	نقره	۱	شیشه
۰/۰۲۴	هوا	۰/۰۹	پنبه نسوز
~۰/۶	آجر	۰/۰۴	آب
~۰/۰۸	چوب	۲/۲	یخ
۴۰۰	مس	۰/۰۳	چوب پنبه
		۲۳۸	آلومینیوم

مثال ۶-۱۳

یک سر یک میله آهنی ۳ متری را در آب جوش و سر دیگر آن را در یک مخلوط آب و یخ قرار می‌دهیم. اگر شعاع مقطع میله ۲ سانتی‌متر باشد، چه مقدار انرژی در هر دقیقه از طریق رسانش در میله منتقل می‌شود؟

حل: مساحت سطح مقطع میله برابر است با:

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times (0.02)^2 \approx 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

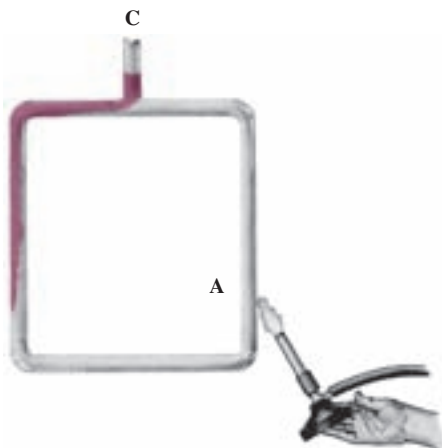
با به کار بردن معادله (۶-۱۸) و با استفاده از مقدار K برای آهن از جدول

(۶-۶) داریم:

$$Q = \frac{KA\Delta T}{L} = \frac{82 \times 1.26 \times 10^{-3} \times 60 \times 100}{3} \approx 207 \text{ J}$$

همرفتی: در مبحث انبساط مایع‌ها دیدیم که اگر در یک نقطه درون مایعی به آن گرما بدهیم، دمای آن نقطه بالا می‌رود و با افزایش دما حجم مایع در اطراف آن نقطه زیاد و چگالی کم می‌شود. کم شدن چگالی باعث بالا رفتن مایع با دمای زیادتر شده و مایع با دمای کم‌تر جای آن را می‌گیرد. این حرکت مایع باعث انتقال گرما به همه نقاط ظرف می‌شود.

جریان همرفتی را می‌توانیم به سادگی با انجام آزمایش زیر نمایش دهیم. لوله شیشه‌ای مستطیلی شکلی را که در شکل (۶-۱۵) نشان داده شده است پر از آب می‌کنیم و با یک چراغ الکلی یا گازی آن را در نقطه A گرم می‌کنیم. اگر چند قطره مایع رنگی از نقطه C به درون لوله بریزیم، حرکت مایع را به خوبی می‌توانیم مشاهده کنیم. همراه با این حرکت، مایع در همه جای لوله گرم می‌شود.



شکل ۶-۱۵- نمایش جریان همرفتی

جریان همرفتی در هوا نیز وجود دارد. در یک روز آفتابی زمین و صخره‌ها با دریافت انرژی از نور خورشید گرم می‌شوند و دمای لایه هوای مجاور خود را زیاد می‌کنند. هوای با دمای زیادتر به بالا می‌رود و هوای با دمای کم‌تر جای آن را می‌گیرد. این جریان هوای رو به بالا در برخی نقاط می‌تواند بسیار شدید باشد.

فعالیت ۶-۱۴

درباره جهت وزش نسیم از خشکی به طرف دریا و برعکس در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

مطالعه آزاد

وارونگی هوا: در بعضی شرایط خاص بین زمین و لایه هوای گرم‌تر که معمولاً همراه با دود و آلودگی‌های دیگر هوای شهری به بالا صعود کرده است، یک لایه هوای سرد قرار می‌گیرد. در این وضعیت لایه آلوده و با دمای زیادتر، به دلیل وجود آلاینده‌ها در آن قسمت عمده انرژی خورشید را می‌گیرد و مانع نفوذ آن به لایه ساکن زیرین می‌شود. در نتیجه هوای آلوده شهری دیگر امکان بالا رفتن پیدا نمی‌کند. این پدیده را وارونگی هوا می‌نامند.

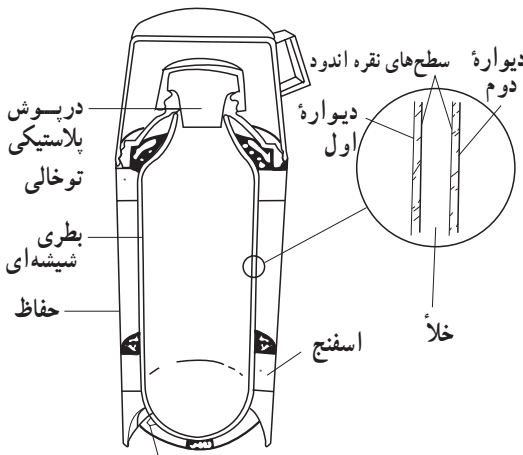
این پدیده اثرهای زیان‌باری بر سلامتی افراد دارد. کودکان، سالمندان و کسانی که از بیماری‌های تنفسی رنج می‌برند در چنین شرایطی بهتر است درون خانه‌ها بمانند.

تابش: همه ما تجربه گرم شدن در نور خورشید را داریم. این نور برای رسیدن به ما از خلأ می‌گذرد. این نوع انتقال گرما را که نیاز به محیط مادی ندارد، تابش می‌نامند.

سرعت انتقال گرما از طریق تابش بسیار زیاد است. اگر در مقابل شعله بایستید، گرمای آتش را روی پوست خود احساس می‌کنید. در این هنگام، اگر شخصی بین شما و شعله قرار گیرد، در همان لحظه که شعله پنهان می‌شود، احساس گرما روی پوست شما نیز از بین می‌رود و باز هنگامی که شخص کنار رود احساس گرما با همان سرعت بازمی‌گردد.

همه جسم‌ها، در حال تابش از سطح خود هستند. در نتیجه همه جسم‌ها تابش جسم‌های دیگر را که در اطراف آنها قرار دارند دریافت می‌کنند. از این تابش دریافتی بخشی را جذب می‌کنند (که باعث زیادتر شدن دمای آن‌ها می‌شود) و بخش دیگری را باز می‌تابانند. آن جسم‌هایی که سطح صیقلی‌تری دارند بازتابش بیش‌تری انجام می‌دهند و بخش کم‌تری از تابش دریافتی را جذب می‌کنند.

فلاسک خلأ: برای آن که چای یا نوشیدنی در فلاسک داغ بماند، باید انتقال گرما از آن به محیط اطراف، از هر سه طریق همرفتی، رسانش و تابش به حداقل برسد. خلأ بین دو دیواره شیشه‌ای بطری، از رسانش گرما از دیواره‌های فلاسک به طور کامل جلوگیری می‌کند. درپوش چوب پنبه‌ای یا پلاستیکی توخالی نیز حاوی هواست که رسانای ضعیف گرماست. در خلأ بین دو دیواره شیشه‌ای جریان همرفتی نیز وجود ندارد، تنها هنگامی که درپوش فلاسک برداشته می‌شود، جریان همرفتی می‌تواند باعث



نقطه مهر و موم که هوا از آنجا تخلیه شده است.

شکل ۶-۱۶

انتقال گرما شود. جلوگیری از تابش گرما از همه مشکل‌تر است، زیرا این تابش می‌تواند از خلأ بین دو دیواره بگذرد. پوشش نقره‌ای روی دیواره‌های شیشه‌ای بطری باعث کاهش انتقال گرما از طریق تابش می‌شود.

فعالیت ۶-۱۵

پاسخ دهید که چرا:

- ۱- در لباس‌های آتش‌نشانی از پوشش‌های فلزی براق استفاده می‌شود؟
- ۲- هنگامی که در یخچال را باز می‌کنید، هوای سرد از پایین آن بیرون می‌آید؟
- ۳- در کشورهای با آب و هوای گرم، رنگ سفید برای نمای بیرون خانه‌ها مناسب‌تر است؟
- ۴- در زمستان وقتی با پاهای برهنه روی کف سنگی یا سیمانی راه می‌روید، پاهای شما احساس سرما می‌کند، اما وقتی روی کف اتاق با کف پوش چوبی (با همان دما) راه می‌روید احساس سرما نمی‌کنید؟

۶-۵- قانون گازها

دیدیم که گازها هم مانند مایع‌ها و جامدها با زیاد شدن دما افزایش حجم پیدا می‌کنند. اگر بخواهیم این افزایش حجم صورت نگیرد باید فشار بیش‌تری بر گاز وارد کنیم. دانشمندانی چون بویل، ماریوت، شارل و گئی لوساک با انجام آزمایش‌های متعدد و دقیق، رابطه بین حجم و فشار، حجم و دما، فشار و دمای گازها را مورد بررسی قرار دادند. پیامد این بررسی‌ها را می‌توان چنین بیان کرد:

برای مقدار معینی از یک گاز کامل، کمیت $\frac{PV}{T}$ یعنی حاصل ضرب فشار گاز در حجم آن تقسیم بر دمای گاز بر حسب کلون همواره ثابت است. یعنی اگر در یک فرآیند، حجم و فشار و دمای مقدار معینی از یک گاز کامل را از V_1 و P_1 و T_1 به V_2 ، P_2 و T_2 برسانیم داریم:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (۶-۱۹)$$

دما در این رابطه برحسب کلون است. یکاهای فشار در دو طرف رابطه و همین‌طور یکاهای حجم در دو طرف باید یکسان باشند.

گازهای واقعی معمولاً به‌طور کامل از این قانون پیروی نمی‌کنند. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که رفتار یک گاز واقعی، هرچه فشار آن کم‌تر باشد، بیش‌تر به رفتار گاز کامل نزدیک است. گازهای واقعی در دماهای کم‌تر از دمای نقطه میعان دیگر به حالت گاز نیستند و مایع می‌شوند.

مثال ۶-۱۴

حجم استوانه موتور یک اتومبیل ۱۲ cm^3 است. این استوانه حاوی مخلوطی از هوا و بنزین در فشار یک اتمسفر است. اکنون اگر حجم استوانه را در دمای ثابت به ۱۵ cm^3 برسانیم، فشار آن چه قدر می‌شود؟

$$T_1 = T_2 \quad \text{حل: چون دما ثابت است داریم:}$$

در نتیجه رابطه (۶-۱۹) به صورت زیر درمی‌آید:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (۶-۲۰)$$

(این رابطه را حدود ۳۵° سال پیش بویل انگلیسی و ماریوت فرانسوی به‌طور مستقل از یک‌دیگر به‌دست آوردند و به قانون بویل - ماریوت مشهور است.)

در این مثال داریم :

$$P_1 = 1 \text{ atm}$$

$$V_1 = 120 \text{ cm}^3$$

$$P_2 = ?$$

$$V_2 = 15 \text{ cm}^3$$

در نتیجه با درج در معادله (۶-۲) داریم :

$$1 \times 120 = P_2 \times 15$$

با انجام محاسبه به دست می آوریم :

$$P_2 = 8 \text{ atm}$$

مثال ۶-۱۵

راننده‌ای فشار هوای درون تایر اتومبیل خود را در صبح یک روز سرد که دمای هوا 3°C - است، روی $2/7$ آتمسفر تنظیم می‌کند. اگر او به منطقه گرم‌تری سفر کند به طوری که وقتی به مقصد می‌رسد دمای هوا 27°C باشد، فشار هوای درون تایر چه قدر است؟

حل: در این مثال حجم تایر ثابت مانده است، یعنی :

$$V_1 = V_2$$

در نتیجه رابطه (۶-۱۹) به صورت زیر درمی‌آید :

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (۶-۲۱)$$

با استفاده از داده‌های مثال داریم :

$$P_1 = 2/7 \text{ atm}$$

$$T_1 = 273 - 3 = 270 \text{ K}$$

$$P_2 = ?$$

$$T_2 = 273 + 27 = 300 \text{ K}$$

با درج در معادله (۶-۲۱) داریم :

$$\frac{2/7}{270} = \frac{P_2}{300}$$

با انجام محاسبه به دست می آوریم :

$$P_2 = 3 \text{ atm}$$

مثال ۶-۱۶

دمای یک مقدار معین گاز اکسیژن را در فشار ثابت از صفر سلسیوس به 273°C می‌رسانیم، اگر حجم گاز در ابتدا برابر $2 \times 10^3 \text{ cm}^3$ باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

حل: در این آزمایش فشار ثابت مانده است، در نتیجه داریم:

$$P_1 = P_2$$

بنابراین رابطه (۶-۱۹) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (6-22)$$

(این رابطه را حدود 20° سال پیش شارل و گی لوساک به طور مستقل از یکدیگر به دست آوردند و به قانون شارل - گی لوساک معروف است.)

با استفاده از داده‌های این مثال داریم:

$$T_1 = 0 + 273 = 273\text{K} \quad V_1 = 2 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

$$T_2 = 273 + 273 = 546\text{K} \quad V_2 = ?$$

با درج در معادله (۶-۲۲) داریم:

$$\frac{2 \times 10^3}{273} = \frac{V_2}{546}$$

با انجام محاسبه به دست می‌آوریم:

$$V_2 = 4 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

فعالیت ۶-۱۶

با استفاده از تجهیزاتی که در آزمایشگاه فیزیک دبیرستان خود دارید، آزمایشی را طراحی کنید که در آن قانون گازها یا یکی از صورت‌های خاص آن مورد تحقیق قرار گیرد. آزمایش را به طور گروهی انجام دهید. گزارش کار آن را بنویسید و شرح دهید که برای کم کردن خطاها چه تمهیداتی باید اعمال کرد.

تمرین‌های فصل ششم

۱- چگونگی درجه‌بندی سلسیوس را با استفاده از کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه بنویسید.

۲- دماهای زیر را بر حسب درجه سلسیوس مشخص کنید :

الف - $^{\circ}\text{K}$ ب - 273K پ - 546K

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

۴- هنگامی که ۱ کیلوگرم آب را با گرمکن غوطه‌ور در آب به مدت ۵ دقیقه گرم می‌کنیم، دمای آب 3°C بالا می‌رود.

الف - توان متوسط گرمکن را حساب کنید.

ب- اگر همین گرمکن آب را به مدت ۹ دقیقه گرم کند، دمای آن را چه قدر افزایش خواهد داد؟

۵- دمای یک قطعه فلز $6/0$ کیلوگرمی را توسط یک گرمکن 5° واتی در 11° ثانیه از 18°C

به 38°C رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژه فلز چه مقداری را ارائه می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این جواب از مقدار واقعی برای گرمای ویژه بیش‌تر است یا کم‌تر؟ توضیح دهید.

۶- چه روش‌هایی پیشنهاد می‌کنید که نتیجه یک آزمایش اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی گرماسنج

و یا یک آزمایش اندازه‌گیری گرمای ویژه از دقت بیش‌تری برخوردار باشد؟ توضیح دهید.

۷- گرماسنجی به جرم 200 گرم از مس ساخته شده است. یک قطعه 80 گرمی از یک ماده

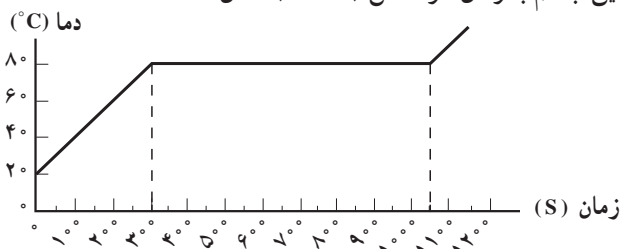
نامعلوم همراه با 50 گرم آب به درون گرماسنج ریخته می‌شود. دمای این مجموعه 3°C است.

در این هنگام 100 گرم آب 7°C به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل 52°C می‌شود. گرمای

ویژه ماده نامعلوم را محاسبه کنید.

۸- به یک جسم جامد $5/0$ کیلوگرمی توسط یک گرمکن 100 واتی گرما می‌دهیم. منحنی

تغییرات دمای این جسم با زمان در شکل (۶-۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۷

الف - چه زمانی طول می کشد تا این جامد به نقطه ذوب خود برسد؟

ب - با استفاده از نمودار، گرمای ویژه جامد و گرمای نهان ویژه ذوب آن را محاسبه کنید.

۹- گرمکنی در هر ثانیه 20° ژول انرژی فراهم می کند. چه مدت زمان طول می کشد تا این

گرمکن $1/8$ کیلوگرم آب 10°C را به بخار آب 10°C تبدیل کند؟ این گرمکن در همین مدت زمانی چه مقدار یخ 0°C را به آب 0°C تبدیل می کند؟

۱۰- یک گرمکن که با آهنگ ثابت 50° وات انرژی تولید می کند، به طور کامل در یک قطعه

یخ بزرگ با دمای 0°C گذاشته شده است. در مدت 1320 ثانیه، 2 کیلوگرم آب با دمای 0°C تولید می شود. گرمای نهان ویژه ذوب یخ را حساب کنید.

۱۱- یک گرمکن 50° وات غوطه ور در آب به طور کامل در 100° گرم آب درون یک گرماسنج

قرار داده می شود.

الف - این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از 20°C به 25°C

می رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.

ب - چه مدت طول می کشد تا دمای آب درون گرماسنج از 25°C به نقطه جوش

(100°C) برسد؟

پ - چه مدت طول می کشد تا 20° گرم آب درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۱۲- با استفاده از مقدارهای ضریب انبساط طولی در جدول (۴-۶)، انبساط تیرآهنی با طول

اولیه 25 متر، در اثر افزایش دمای از 1°C تا 30°C را حساب کنید.

۱۳- با استفاده از جدول (۴-۶) حساب کنید که چه مقدار افزایش دما باعث می شود که طول

یک خط کش $5/100$ متری برنجی $1/1000$ میلی متر افزایش یابد.

۱۴- در روزی که دما 0°C است برای پنجره ای، شیشه ای به طول 6m انداخته شد. برای

پیش بینی انبساط شیشه، فاصله کوچکی به اندازه $1/35$ میلی متر بین شیشه و چارچوب منظور شد.

روزی که دما 25°C است مشاهده می شود که این فاصله از بین رفته است. با چشم پوشی از انبساط

چارچوب پنجره، ضریب انبساط شیشه را حساب کنید.

۱۵- از شیشه پنجره ای به عرض 2 متر و ارتفاع 1 متر و ضخامت 4mm :

الف - در یک روز زمستانی که دمای بیرون 0°C و دمای درون اتاق 20°C است چه

مقدار گرما در هر ثانیه به خارج نشت می کند؟

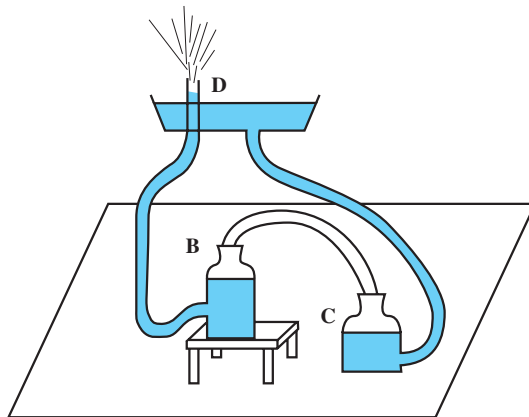
ب - چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می شود؟

پ- اگر در طول سال دمای داخل اتاق به طور متوسط 8°C بالاتر از دمای بیرون باشد، چه مقدار انرژی توسط رسانش از همین یک پنجره تلف می‌شود؟
 ۱۶- گازی در دمای 20°C دارای حجم 10^3cm^3 است. این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا حجم آن در فشار ثابت 20^3cm^3 شود؟ این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم 5^3cm^3 خواهد شد؟
 ۱۷- هوا با فشار یک اتمسفر درون استوانه‌ی یک دستگاه باد دوچرخه به طول 24cm محبوس است.

الف- اگر طول استوانه را در دمای ثابت به 3°cm افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چه قدر خواهد شد؟
 ب- برای آن که در دمای ثابت فشار هوای محبوس ۳ اتمسفر شود، طول استوانه را چه قدر باید کاهش دهیم؟

۱۸- تایر یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا 17°C است فشار اندازه‌گیری شده در تایر ۲ اتمسفر بیش از فشار جو است. پس از یک اتومبیل‌رانی بسیار سریع، فشار هوای تایر دوباره اندازه‌گیری می‌شود. مشاهده می‌شود که فشار $2/3$ اتمسفر بیش از فشار جو است. دمای هوای درون تایر در این وضعیت چه قدر است (حجم تایر را ثابت بگیرید)؟

۱۹- در شکل ۶-۱۸ فواره هرون (ریاضی‌دان مصری عهد باستان) نشان داده شده است. فرض کنید که ظرف B در ابتدا پر و ظرف C خالی است. توضیح دهید چرا آب از لوله D فوران می‌کند؟



شکل ۶-۱۸

واژه‌نامه

Cohesion	چسبندگی	Superconductor	ابر رسانا
Adhesion	چسبندگی سطحی	Freezing	انجماد
Condensation	چگالش	Measurement	اندازه‌گیری
Density	چگالی	Potential Energy	انرژی پتانسیل
Phase	حالت	Kinetic Energy	انرژی جنبشی
Motion	حرکت	Internal Energy	انرژی درونی
Kinematics	حرکت‌شناسی	Resultant	برآیند
Uniform Motion	حرکت یکنواخت	Vector	بردار
Temperature	دما	Position Vector	بردار مکان
Thermostat	دماپا	Crystalline	بلورین
Thermometer	دماسنج	Conservation of Energy	پایستگی انرژی
	دماسنج فرینه	Diffusion	پخش
Maximum and Minimum Thermometer		Radiation	تابش
Dynamics	دینامیک	Vaporization	تبخیر
Fusion	ذوب	Evaporation	تبخیر سطحی
Elementary Particles	ذرات بنیادی	Sublimation	تصعید
Conductor	رسانا	Thermal Equilibrium	تعادل گرمایی
Conduction	رسانش	Optical Pyrometer	تف‌سنج نوری
Instantaneous Velocity	سرعت لحظه‌ای	Power	توان
Average Velocity	سرعت متوسط	Displacement	جاب‌جایی
Instantaneous Acceleration	شتاب لحظه‌ای	Mass	جرم

Heat	گرما	Average Acceleration	شتاب متوسط
Latent Heat	گرمای نهان		ضریب اصطکاک ایستایی
Specific Heat	گرمای ویژه	Coefficient of Static Friction	
Condensed Matter	مادهٔ چگال	Heat Capacity	ظرفیت گرمایی
Temperature Scale	مقیاس دماسنجی	Ultrasound	فراصوت
Capillarity	موینگی	Pressure	فشار
Liquefaction	میعان	Gage Pressure	فشار بیمانه‌ای
Scalar	نرده‌ای	Barometer	فشارسنج
Scientific Notation	نمادگذاری علمی	Technology	فناوری
Force	نیرو	Atomic Physics	فیزیک اتمی
Dynamometer	نیروسنج	Nuclear Physics	فیزیک هسته‌ای
Semiconductor	نیم‌رسانا	Newton's Laws	قانون‌های نیوتون
Repulsive Force	نیروی رانشی	Work - Energy Theorem	قضیه کار و انرژی
Attractive Force	نیروی ربایشی	Work	کار
Weight	وزن	Tension	کنش
Convection	همرفت	Surface Tension	کنش سطحی
Unit	یکا	Quantity	کمیت
Base Units	یکاهای اصلی	Ideal gas	گاز کامل
Derived Units	یکاهای فرعی	Gravitation	گرانش

فهرست منابع

منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویرایش نهم، هیویانگ و راجر فریدمن، ترجمه فضل‌الله فروتن، چاپ چهارم ۱۳۸۱، نشر علوم دانشگاهی.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد اول)، ویرایش هفتم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و جرل واکر، ترجمه محمدرضا جلیلیان نصرتی، محمد عابدینی و محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۸۴، انتشارات صفار.
- ۳- درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمه روح‌الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ اول ۱۳۸۵، انتشارات مدرسه.
- ۴- حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمه حسین توتونچی، حسن شریفیان عطار و محمدهادی هادیزاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۵- فیزیک عمومی (جلد سوم)، مارچلو آلوسنو و ادوارد جی. فین، ترجمه ناصر میرفخرایی و ایرج هرمزدیاری، چاپ اول ۱۳۷۰، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۶- فیزیک آماری، ف. رایف، ترجمه سیروس ضیاء و ابوالحسن فرحزاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک PSSC، یوری هابر-شیم، جان اچ، داج و جیمز، ای والتر، ترجمه احمد خواجه نصیرطوسی، ناصر مقبلی و هوشنگ شریفزاده، چاپ اول ۱۳۷۳، انتشارات فاطمی.

منابع انگلیسی

۱. Physics, Ken Dobson, 1995, Thomas Nelson and Sons Ltd.
۲. Understanding Physics, Robin Millar, 1989, Collins Educational.
۳. Foundation Physics, Keith Gibbs and Robert Hutchings, 1998, University of Cambridge.
۴. Basic Physics 1 and 2, David Sang, 1996, University Press.
۵. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison - Wesley.
۶. Focus on Physical Science, Charles H. Heimler and Jack Price, 1987, Merrill Publication Company.
۷. Fundamental of Physics, David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker, 1993, John Wiley and Sons.
۸. Physics, Frederick Keller, Edward Gettys and Malcolm Skove, 1993, McGraw - Hill.
۹. Physics, Douglas C. Giancoli, 1991, Prentice - Hall International.
۱۰. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.
۱۱. Principles of Physics, Fredrick J. Bueche, David A. Jerde, 1995, MC Graw- Hill.

تصویرهای شروع فصل‌های ۲، ۱، ۳ و ۶ از کتاب مجموعه تصاویر نیکول فریدنی، چاپ ۱۳۸۱، انتخاب شده‌اند.

فهرست کتاب‌های مناسب فیزیک که چاپ اول آن‌ها در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ انجام شده است:

- ۱- آسمان شب؛ برایان جوتز؛ تهران؛ کانون پرورش فکری کودکان و نوجوانان.
- ۲- آموزش فیزیک؛ ادوارد اف. ردیش؛ ترجمه فاطمه احمدی؛ تهران؛ دانشگاه تربیت دبیری شهید رجایی.
- ۳- اختر فیزیک مقدماتی؛ بابک کبیری منش؛ تهران؛ مبتکران، پیشروان.
- ۴- توری و مسایل نجوم؛ سری شوم؛ استیسی‌ای. پلن؛ ترجمه صمد غلامی؛ تهران؛ دانش پژوهان جوان.
- ۵- تاریخ نجوم در ایران؛ حمیدرضا گیاهی یزدی؛ تهران؛ دفتر پژوهش‌های فرهنگی.
- ۶- جهان به کجا می‌رود؟ سرنوشت سیاره زمین در صد سال آینده؛ علی افضل صمدی؛ تهران؛ مؤسسه فرهنگی هنری جهان کتاب.
- ۷- راهنمای رصد اجرام اعماق آسمان (نقشه آسمان)؛ پاتریک مور؛ تهران؛ دانش پژوهان جوان.
- ۸- فرهنگ نامه نجوم و فضا؛ هیتروپر؛ ترجمه شادی حامدی آزاد؛ تهران؛ طلایی.
- ۹- فیزیک ستاره‌ها؛ سی فیلیپس؛ ترجمه محمود بهار و دیگران؛ تهران؛ مبتکران، پیشروان.
- ۱۰- فیزیک مفهومی؛ ۴ جلد؛ پل جی هیوئیت؛ ترجمه منیژه رهبر؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۱- فیزیک ۲ و آزمایشگاه؛ احمد احمدی و دیگران؛ تهران؛ مبنای خرد؛ نقش سیمرخ.
- ۱۲- کتاب کار - فیزیک دوم دبیرستان؛ سیداکبر ساداتیان و دیگران؛ تهران؛ مرآت دانش.
- ۱۳- مسئله‌های مکانیک؛ احمدرضا حسینی؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۴- مکانیک؛ امیرآقا محمدی؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۵- مکانیک و پرتوزایی*؛ مارک الس و دیگران؛ ترجمه روح‌الله خلیلی بروجنی؛ تهران؛ مدرسه.
- ۱۶- موج‌ها و جهان ما؛ مارک الس و دیگران؛ ترجمه روح‌الله خلیلی بروجنی؛ تهران؛ مدرسه.



فهرست کتاب‌های مناسب فیزیک که چاپ اول آن‌ها در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ انجام شده است:

- ۱- آسمان شب؛ برایان جونز؛ تهران؛ کانون پرورش فکری کودکان و نوجوانان.
- ۲- آموزش فیزیک؛ ادوارد اف. ردیش؛ ترجمه فاطمه احمدی؛ تهران؛ دانشگاه تربیت دبیری شهید رجایی.
- ۳- اختر فیزیک مقدماتی؛ بابک کبیری منش؛ تهران؛ مبتکران، پیشروان.
- ۴- توری و مسایل نجوم؛ سری شوم؛ استیسی‌ای. پلن؛ ترجمه صمد غلامی؛ تهران؛ دانش پژوهان جوان.
- ۵- تاریخ نجوم در ایران؛ حمیدرضا گیاهی یزدی؛ تهران؛ دفتر پژوهش‌های فرهنگی.
- ۶- جهان به کجا می‌رود؟ سرنوشت سیاره زمین در صد سال آینده؛ علی افضل صمدی؛ تهران؛ مؤسسه فرهنگی هنری جهان کتاب.
- ۷- راهنمای رصد اجرام اعماق آسمان (نقشه آسمان)؛ پاتریک مور؛ تهران؛ دانش پژوهان جوان.
- ۸- فرهنگ نامه نجوم و فضا؛ هیتروکوپر؛ ترجمه شادی حامدی آزاد؛ تهران؛ طلایی.
- ۹- فیزیک ستاره‌ها؛ سی فیلیپس؛ ترجمه محمود بهار و دیگران؛ تهران؛ مبتکران، پیشروان.
- ۱۰- فیزیک مفهومی؛ ۴ جلد؛ پل جی هیوئیت؛ ترجمه منیژه رهبر؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۱- فیزیک ۲ و آزمایشگاه؛ احمد احمدی و دیگران؛ تهران؛ مبنای خرد؛ نقش سیمرخ.
- ۱۲- کتاب کار - فیزیک دوم دبیرستان؛ سیداکبر ساداتیان و دیگران؛ تهران؛ مرآت دانش.
- ۱۳- مسئله‌های مکانیک؛ احمدرضا حسینی؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۴- مکانیک؛ امیرآقا محمدی؛ تهران؛ فاطمی.
- ۱۵- مکانیک و پرتوزایی*؛ مارک الس و دیگران؛ ترجمه روح‌الله خلیلی بروجنی؛ تهران؛ مدرسه.
- ۱۶- موج‌ها و جهان ما؛ مارک الس و دیگران؛ ترجمه روح‌الله خلیلی بروجنی؛ تهران؛ مدرسه.



مطمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظر اصلاحی خود را در باره ی مطالب

این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۳۶۳ ۱۵۸۵۵ - گروه درسی مربوطه و یا پیام نگار (Email):

talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دقت نظر نامه یزنی در این کتاب نامی می