

ترمودینامیک

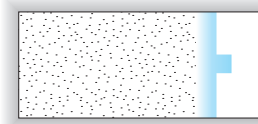


موتور ماشین‌های بنزینی بسیار ناکارآمد است و فقط حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کند. دانشمندان و مهندسان در پی کارآمدتر کردن این ماشین‌ها هستند. با این حال، مَدّ بالایی برای بازدهی این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کل انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

برای توصیف رفتار یک جسم باید برهم کنش آن جسم را با پیرامونش بررسی کنیم؛ مثلاً در مکانیک، جسم می‌تواند توپ در حال سقوطی باشد که با پیرامونش - یعنی زمین و هوا - برهم کنش دارد و برای توصیف رفتار آن باید کمیت‌های قابل مشاهده‌ای مانند مکان، سرعت و شتاب توپ را انتخاب کنیم که با عملیات آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند. در فرایندهایی که در آنها با مبادله گرما سروکار داریم، تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً گاز یا مایع است. این جسم را **دستگاه** و پیرامون آن را که می‌تواند با جسم تبادل انرژی داشته باشد، **محیط** می‌نامیم. بررسی‌های تجربی و نظری نشان می‌دهد رفتار یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را می‌توان برحسب کمیت‌هایی مانند فشار، حجم، دما، گرمای ویژه و ... توضیح داد. این کمیت‌ها به جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های تشکیل دهنده دستگاه وابسته نیستند و تنها به وضعیت دستگاه در مقیاس بزرگ بستگی دارند؛ مثلاً اگر دستگاه را آب درون لیوانی در نظر بگیریم که به تعادل گرمایی رسیده است، دمای آب ثابت می‌ماند، در حالی که مولکول‌های تشکیل دهنده آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتهای تغییر می‌کند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، **کمیت‌های ماکروسکوپی** نامیده می‌شوند.

قوانینی که کمیت‌های ماکروسکوپی را در فرایندهای گرمایی به هم مربوط می‌کنند، اساس علمی به نام **ترمودینامیک** را می‌سازند. در واقع، علم ترمودینامیک علمی است که قوانین حاکم بین کمیت‌های ماکروسکوپی یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را بیان می‌کند و به مطالعه مبادله انرژی و کاربرد آن در چنین دستگاه‌هایی می‌پردازد. از این منظر، بسیاری از مطالبی که در فصل ششم کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم در حیطه علم ترمودینامیک می‌گنجد. علم ترمودینامیک از دیرباز در زندگی بشر نقش داشته است و نمونه بارز آن ماشین‌های گرمایی اند که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و در پایان این فصل به آنها خواهیم پرداخت. مثال‌های بی‌شمار دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد چگونه علم ترمودینامیک در زندگی روزمره نقش بازی می‌کند. مثلاً مهندسان اتومبیل در پی بالا بردن بازده خودروها هستند، مهندسان هسته‌ای نگران آن‌اند که چطور دما و فشار بسیار بالای رآکتورهای هسته‌ای را کنترل کنند تا مبادا حوادث زیست محیطی فاجعه‌باری رخ دهد، مهندسان زیست محیطی به چگونگی مبادله گرما بین اقیانوس‌ها و جو علاقه‌مندند که می‌تواند بر شرایط جوی اثر بگذارد، مهندسان زیستی نگران آهنگ تولید گاز حاصل از تخمیر در زیست توده‌ها هستند و پزشکان در پی آن‌اند که چگونه دمای بدن یک بیمار می‌تواند نشانه‌ای از یک سرطان روبه‌رشد باشد.

(۱)



شکل ۱-۱: گاز داخل استوانه در حالت تعادل ترمودینامیکی است.

۱-۱- معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۱-۱ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در اینجا دستگاه مورد بررسی گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت (۱) (با حجم V_1) قرار داشته باشد، دما و فشار آن

در همه نقاط گاز یکسان، مثلاً برابر T_1 و P_1 ، خواهد بود. در این صورت می‌گوییم که گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. به عبارت دیگر یک دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حال تعادل است که مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری آن مانند دما، فشار، حجم و ... به طور خودبه‌خودی تغییر نکند.

فعالیت ۱-۱

اگر دما و فشار در داخل گاز شکل ۱-۱ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟

در حالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، حجم و دما گاز مقدار مشخصی دارد؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۱-۱ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت‌ها به ترتیب برابر با P_1 ، V_1 و T_1 است. حال اگر گاز را گرم یا سرد کنیم و یا پیستون را جابه‌جا کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همه آنها) تغییر خواهد کرد و پس از مدتی، این کمیت‌ها به مقدارهای مشخص دیگری چون P_2 ، V_2 و T_2 خواهند رسید. از کمیت‌های P ، V و T برای توصیف **حالت** دستگاه استفاده می‌کنیم. این کمیت‌های ماکروسکوپی را که حالت دستگاه با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** می‌نامیم. مثلاً برای گاز درون استوانه شکل ۱-۱ با تغییراتی که ایجاد کردیم گاز از **حالت** (P_1, V_1, T_1) به **حالت** (P_2, V_2, T_2) می‌رسد.

متغیرهای ترمودینامیکی از یکدیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می‌نامیم. معادله حالت یک دستگاه می‌تواند پیچیده باشد؛ ولی آزمایش نشان می‌دهد که اگر گازها بسیار رقیق باشند، معادله حالت آنها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این صورت، گاز را **گاز کامل (آرمانی)** می‌نامیم.

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که برای مقدار معینی گاز کامل، نسبت $\frac{PV}{T}$ مقدار ثابتی است. این مقدار ثابت مستقل از نوع گاز و متناسب با مقدار آن است. در نتیجه:

$$\frac{PV}{T} \propto n$$

در این رابطه n تعداد مول گاز است و مقدار آن از نسبت جرم گاز (m) به جرم مولی آن (M) به دست می‌آید:

$$n = \frac{m}{M} \quad (1-1)$$

بنابراین، معادله حالت گاز کامل که کمیت‌های P ، V و T را به یکدیگر مربوط می‌کند، به صورت زیر است:

$$PV = nRT \quad (2-1)$$

که به **R ثابت گازها** می‌گویند. اگر P برحسب پاسکال، V برحسب مترمکعب، n برحسب مول و T برحسب کلون باشد، مقدار R برابر $8/314 \text{ J/mol.K}$ است.

مثال ۱-۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به ابعاد $۳۶/۰ \text{ m}^3$ چند مول هوا وجود دارد؟

پاسخ: تعداد مول را با استفاده از قانون گازهای کامل به دست می آوریم:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/m}^2)(۳۶/۰ \text{ m}^3)}{(۸/۳۱ \text{ J/mol.K})(۲۷۳ \text{ K})} = ۱/۶۰ \times ۱۰^۳ \text{ mol}$$

۲-۱- فرایندهای ترمودینامیکی آرمانی

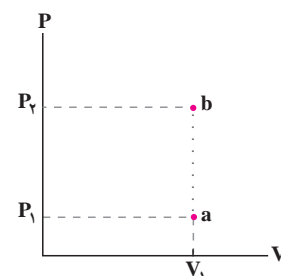
دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P ، V و T بیان کرد. همچنین در اثر گرم شدن گاز یا جابه جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می کند و گاز به حالت دیگری می رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می رود، می گوئیم که یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.

اکنون فرض کنید که گاز ابتدا در حالت P_1 ، V_1 و T_1 باشد و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه داشتن حجم، گاز به حالت P_2 ، V_1 و T_2 برسد. در این فرایند ترمودینامیکی حالت دستگاه در حجم ثابت از (a) با دمای T_1 و فشار P_1 به (b) با دمای T_2 و فشار P_2 تغییر کرده است.

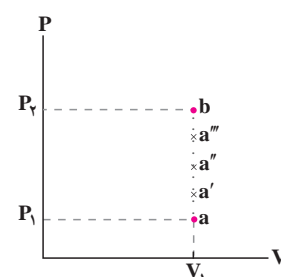
اگر حالت های بین a و b حالت های تعادلی نباشند، نمودار این فرایند ترمودینامیکی را نمی توان رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای گاز را نمی توان در این حالت ها تعیین کرد. به همین دلیل، این فرایند را با نقطه چین نمایش می دهیم (شکل ۲-۱).

اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک منبع گرما قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع گرما را برابر با T_1 ، یعنی دمای اولیه گاز، انتخاب می کنیم. در این صورت، تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. سپس دمای منبع را کمی افزایش می دهیم. در این صورت گرمای اندکی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر کمی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه a' در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. هرچه اختلاف دما بین دستگاه و منبع کمتر باشد، a' به a نزدیک تر خواهد بود و رسیدن به حالت تعادل جدید سریع تر رخ خواهد داد. به عبارت دیگر می توان گفت که در فرایند تحول دستگاه از a به a' ، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقاط a'' ، a''' و ... به دست می آیند. هرچه دمای منبع را در هر نوبت کمتر تغییر دهیم، این نقاط به یکدیگر نزدیک تر خواهند بود و دستگاه زودتر به حالت تعادل می رسد.

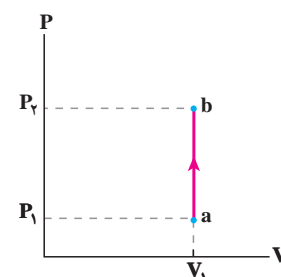
در حدی که گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک است، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۴-۱ به صورت یک خط نمایش داد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. چنین فرایندی را **فرایند آرمانی** می نامند.



شکل ۲-۱ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت a به حالت b رفته است.



شکل ۳-۱ دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می دهد.



شکل ۴-۱ نمودار تغییرات فشار برحسب حجم، هنگامی که دستگاه به صورت آرمانی در حجم ثابت گرمای Q را دریافت می کند و در نتیجه نمودار فرایند به صورت خط رسم می شود.

۳-۱- تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می گیرد.

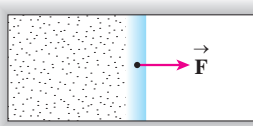
الف) گرما: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرما انرژی ای است که به علت اختلاف دما بین دو جسم مبادله می شود. به عبارت دیگر گرما، هنگامی بین محیط و دستگاه مبادله می شود که این دو با هم اختلاف دما داشته باشند. در این کتاب بنا به قرارداد، گرمایی را که دستگاه می گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می دهد، با علامت منفی نشان می دهیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می کند، معمولاً فرض می شود که با یک منبع گرما در تماس است. منبع گرما، جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن به طور قابل ملاحظه ای تغییر نکند؛ مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می توان منبع گرما در نظر گرفت. با سرد شدن چای، دمای اتاق به طور قابل ملاحظه ای تغییر نمی کند.

پرسش ۱-۱

آیا از مخلوط آب و یخ می توان به عنوان منبع گرما استفاده کرد؟ توضیح دهید.

ب) کار: شکل ۱-۵ گازی را درون یک استوانه با پیستونی نشان می دهد که اصطکاک آن ناچیز است. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می شود و نیرویی که گاز به پیستون وارد می کند، پیستون را که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت راست جابه جا می کند. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه به یاد داریم هرگاه نیروی وارد بر جسم موجب جابه جایی آن جسم شود، کار انجام می دهد. بنابراین، در اینجا نیز گاز روی پیستون کار انجام داده است. در ترمودینامیک هر جا حجم دستگاه تغییر کند، بین دستگاه و محیط، کار مبادله شده است. در بخش های بعد رابطه ای برای این کار مبادله شده به دست خواهیم آورد.



شکل ۱-۵ در شکل بالا \vec{F} نیرویی است که گاز به پیستون وارد می کند.

۴-۱- انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی های اجزای تشکیل دهنده آن ماده برابر است. به طور دقیق تر، می توان گفت که انرژی درونی U ماده با مجموع انرژی های جنبشی و پتانسیل ذره های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با P و T تعیین می شود، مقدار U مشخص است و به این متغیرها بستگی دارد. در مورد گاز کامل می توان نشان داد که **انرژی درونی فقط تابع دمای مطلق گاز** است. هنگامی که دستگاه در یک فرایند ترمودینامیکی با مبادله کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه با انرژی درونی U_1 ، به یک حالت دیگر می رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار U_2 برسد. تغییر انرژی درونی، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع **قانون اول ترمودینامیک** است. این قانون در واقع همان قانون پایستگی انرژی است که در مورد فرایندهای ترمودینامیکی به کار می رود.

اگر دستگاه در فرایندی، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود، تغییر انرژی درونی آن بر طبق این قانون با رابطه زیر نشان داده می شود:^۱

$$\Delta U = Q + W$$

(۳-۱)

این رابطه که بیان می دارد انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می گیرد، **قانون اول ترمودینامیک** نامیده می شود. در این رابطه، Q می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ($\Delta U > 0$)، یا کاهش ($\Delta U < 0$) یابد یا اینکه تغییر نکند ($\Delta U = 0$). گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می شود فقط در طی فرایند معنا دارد؛ یعنی نمی توانیم پس از انجام هر فرایند از کار یا گرمای موجود در دستگاه صحبت کنیم.

در رابطه ۳-۱ اگر W کار دستگاه روی محیط در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قرینه کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به صورت $\Delta U = Q - W$ نوشته می شود.

مثال ۲-۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه 420 J گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد 100 J باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

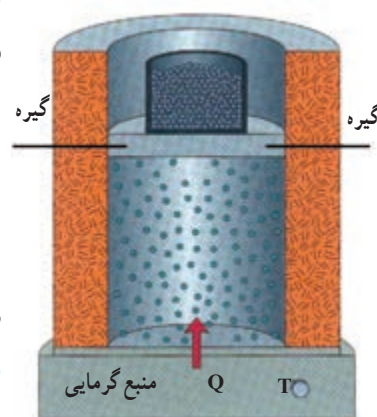
پاسخ: چون دستگاه از محیط گرما گرفته است $Q = +420 \text{ J}$ و چون کار دستگاه روی محیط 100 J است پس کار محیط روی دستگاه $W = -100 \text{ J}$ می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$\Delta U = Q + W = 420 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 320 \text{ J}$$

توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای یک گاز رخ می دهد و از حالت اولیه یکسان (T_i, V_i, P_i) آغاز می شوند و به حالت نهایی یکسان (T_f, V_f, P_f) می رسند، تغییر انرژی درونی گاز (ΔU) یکسان است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می تواند متفاوت باشد. در بخش بعد به بررسی چند نوع از این فرایندها می پردازیم.

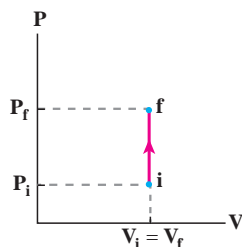
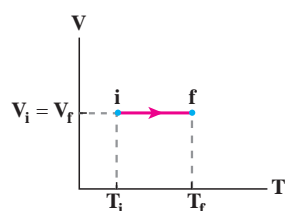
۵-۱- فرایندهای خاص

همان طور که گفتیم در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص فرایندهای متفاوتی می تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع تر است؛ از جمله: **فرایند هم حجم، فرایند هم فشار، فرایند هم دما و فرایند بی دررو**. در ادامه به توصیف این فرایندها می پردازیم. **الف) فرایند هم حجم:** حجم گاز طی این فرایند ثابت نگه داشته می شود و بنابراین، کار صفر است. در این فرایند گاز با محیط فقط تبادل گرما می کند. به این منظور گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می دهیم (شکل ۱-۶)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز با هم برابر باشد. دمای



شکل ۱-۶ دمای گاز را در حجم ثابت، با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می دهیم.

۱- در برخی کتاب ها از جمله کتاب شیمی ۳، تغییر انرژی درونی با ΔE نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ نمودارهای V-T و P-V برای یک فرایند هم حجم آرمانی

منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز با گذار از حالت‌های تعادلی، طی یک فرایند آرمانی به حالت نهایی مورد نظر برسد. در شکل ۷-۱ نمودارهای P-V و V-T برای یک فرایند هم حجم نشان داده شده است که در آن گاز گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال گاز به صورت هم حجم گرما از دست بدهد جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۷-۱ وارونه می‌شود.

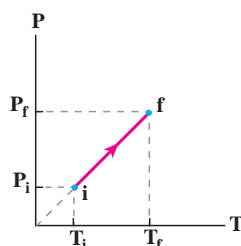
مثال ۳-۱

نمودار P-T را برای فرایند هم حجم آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

پاسخ: چون گاز کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم

$$P = \left(\frac{nR}{V} \right) T$$

چون $\frac{nR}{V}$ ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل زیر نشان داده شده است.



جدول ۱-۱ ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم برحسب J/mol.K

| گاز | C_v |
|------------------|-------|
| Ar | ۱۲/۵ |
| He | ۱۲/۵ |
| Ne | ۱۲/۵ |
| هوا | ۲۰/۸ |
| CO | ۲۰/۷ |
| H _۲ | ۲۰/۴ |
| HCl | ۲۱/۴ |
| N _۲ | ۲۰/۸ |
| NO | ۲۰/۹ |
| O _۲ | ۲۱/۲ |
| Cl _۲ | ۲۴/۸ |
| CO _۲ | ۲۸/۵ |
| CS _۲ | ۴۰/۹ |
| H _۲ S | ۲۵/۴ |
| N _۲ O | ۲۸/۵ |
| SO _۲ | ۳۱/۳ |

اکنون به محاسبه گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه ΔT با رابطه $Q = mc\Delta T$ داده می‌شود. با توجه به رابطه $m = nM$ داریم، $Q = nMc\Delta T$. حاصل ضرب Mc را **ظرفیت گرمایی مولی** می‌نامیم. در مورد گازها، ظرفیت گرمایی مولی به نوع فرایند بستگی دارد. ظرفیت گرمایی مولی گاز در فرایند هم حجم را با C_v نشان می‌دهیم. بنابراین

$$Q = nC_v\Delta T \quad (۴-۱)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت، J/mol.K است. ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۴-۱ آمده است. می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت با تقریب خوبی برای گازهای کامل تک اتمی برابر با $\frac{3}{2}R$ و برای اغلب گازهای کامل دو اتمی در دماهای معمولی برابر با $\frac{5}{2}R$ است.

مثال ۱-۴

به $2/00$ مول از گازهای He، O_2 و CO_2 ، در حجم ثابت، 100 ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟
پاسخ: از رابطه ۴-۱ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

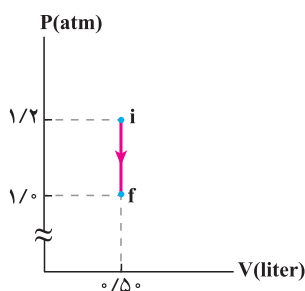
اکنون با استفاده از جدول ۱-۱ مقادیر C_V را برای این گازها در رابطه بالا قرار می‌دهیم:

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(2/5 \text{ J/mol.K})} = 4/00 \text{ K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(2/2 \text{ J/mol.K})} = 2/36 \text{ K} \quad \text{برای } O_2,$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(2/8 \text{ J/mol.K})} = 1/75 \text{ K} \quad \text{برای } CO_2,$$

مثال ۱-۵



شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم آرمانی را نشان می‌دهد که در صفحه $P-V$ رسم شده است. گاز را کامل و تک اتمی فرض کنید. در این صورت گرمای مبادله شده چقدر است؟ آیا در این فرایند گاز گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟
پاسخ: با استفاده از رابطه (۴-۱) داریم:

$$\begin{aligned} Q &= nC_V \Delta T = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T \\ &= - (nRT_f - nRT_i) = \frac{3}{2} (P_f V_f - P_i V_i) \\ &= \frac{3}{2} [(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3)] \\ &= -15 \text{ J} \end{aligned}$$

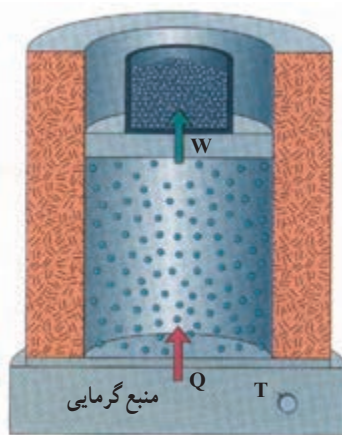
گرمای مبادله شده $|Q| = 15 \text{ J}$ است. چون مقدار Q منفی شده است، بنابراین گاز گرما از دست داده است.

تمرین ۱-۱

دمای n مول گاز با ظرفیت گرمایی مولی C_V در یک فرایند هم‌حجم از T_i به T_f رسیده است.
الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.
ب) اگر این گاز، گاز کامل و تک‌اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می‌شود؟

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیست و از این رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قطعه‌ای از محور را بُرش

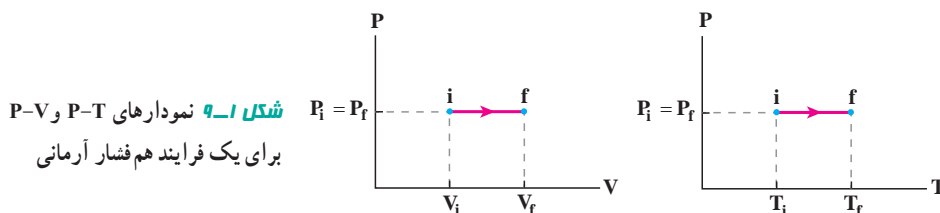
می‌دهیم و آن را با نماد \approx مشخص می‌کنیم.



شکل ۸-۱ گرم کردن آرمانی گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم.

(ب) فرایند هم فشار: فشار گاز طی این فرایند ثابت می ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۸-۱ داخل استوانه ای که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار P_i و حجم V_i در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.

دمای منبع را اندکی بالا می بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می شود که در نتیجه آن گاز، کمی منبسط می شود و پیستون را اندکی به طرف بالا جابه جا می کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش به صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می شود و پیستون بسیار آهسته به طرف بالا حرکت می کند. در این وضعیت، شتاب حرکت پیستون بسیار کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. بنابراین، می توان گفت که در طی گرمادادن همواره فشار گاز ثابت است؛ نمودارهای $P-T$ و $P-V$ ی این فرایند آرمانی در شکل ۹-۱ رسم شده است.



شکل ۹-۱ نمودارهای $P-V$ و $P-T$ برای یک فرایند هم فشار آرمانی

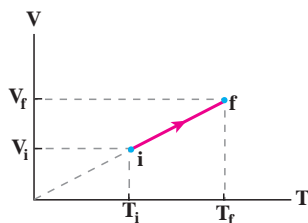
مثال ۴-۱

نمودار $V-T$ را برای فرایند هم فشار آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

پاسخ: چون گاز، کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم:

$$V = \left(\frac{nR}{P} \right) T$$

چون $\frac{nR}{P}$ ثابت است رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می گذرد. نمودار این رابطه در شکل روبه رو نشان داده شده است.



در این فرایند، هم گرما و هم کار مبادله می شود. ابتدا کار را محاسبه می کنیم. اگر فشار گاز P باشد با توجه به تعریف فشار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه ۲ ($P = \frac{F}{A}$)، گاز طی این فرایند نیروی PA را به پیستون وارد می کند که در آن A مساحت پیستون است. اگر جابه جایی پیستون برابر با d باشد، با استفاده از تعریف کار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه، کاری که گاز روی پیستون انجام می دهد از رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{کار گاز روی پیستون} = F d \cos \theta = (PA) d \cos 0^\circ = P(Ad)$$

ولی Ad ، تغییر حجم گاز درون استوانه است که برابر است با $\Delta V = V_f - V_i$ ، در نتیجه،

$$\text{کار گاز روی پیستون} = P \Delta V \quad (۵-۱)$$

بنا به قانون سوم نیوتون، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند و نیرویی که پیستون به گاز وارد می‌کند هم‌اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایه گاز مجاور آن هم‌اندازه و هم‌جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت

$$-P\Delta V = \text{منفی کار گاز روی پیستون} = \text{کار پیستون روی گاز}$$

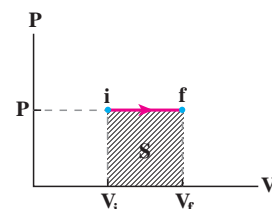
در این کتاب، کار محیط (در این مثال پیستون) روی دستگاه (در اینجا گاز) را با W نشان می‌دهیم. بنابراین، در فرایند هم‌فشار داریم:

$$W = -P\Delta V \quad (۱-۶)$$

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ($\Delta V > 0$) کار محیط روی دستگاه (W) منفی و اگر گاز متراکم شود ($\Delta V < 0$) کار محیط روی دستگاه (W) مثبت است.

از سوی دیگر در شکل ۱-۱۰ حاصل ضرب $P\Delta V$ برابر با سطح زیر نمودار $P-V$ (مساحت هاشورخورده) است. بنابراین، می‌توان گفت در فرایند هم‌فشار، قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر است با سطح زیر نمودار $P-V$.

گرچه این نتیجه برای یک فرایند هم‌فشار به‌دست آمد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر فرایندی آرمانی برقرار است و همواره قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه $P-V$ است.



شکل ۱-۱۰: سطح زیر نمودار $P-V$ برابر با قدرمطلق کار محیط روی دستگاه (یا کار دستگاه) است.

مثال ۷-۱

۱/۰۰ لیتر گاز کامل در فشار ثابت $1.0^5 \text{ atm} \times 1/00$ مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. اگر دمای اولیه گاز 300°K باشد دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟
پاسخ: چون گاز، کامل است و حجم آن به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

$$\frac{1/00}{300} = \frac{0.900}{T_f}$$

$$\Rightarrow T_f = 270^\circ \text{K}$$

در این فرایند، کار داده شده به گاز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W = -P\Delta V = -(1.00 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0.900 - 1.00) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 100 \text{ J}$$

مثال ۸-۱

گرمای تبخیر آب در نقطه جوش $226 \times 10^3 \text{ J/g}$ است. اگر $1/00 \text{ g}$ (یا $1/00 \text{ cm}^3$) آب بر اثر جوشیدن در فشار $1/00 \text{ atm}$ ($10^5 \text{ Pa} \approx 10^5 \times 1/00$) به $1/67 \times 10^3 \text{ cm}^3$ بخار تبدیل شود،
الف) کار محیط روی آب چقدر است؟
ب) افزایش انرژی درونی آب چقدر است؟

پاسخ:

الف) چون تبخیر آب در فشار ثابت رخ داده است می توان نوشت:

$$W = -P\Delta V = -(1/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1/67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1/0 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = -1/67 \times 10^2 \text{ J}$$

ب) برای محاسبه تغییر انرژی درونی از قانون اول ترمودینامیک استفاده می کنیم:

$$\Delta U = Q + W$$

کار (W) را در قسمت الف محاسبه کردیم، کافی است Q را در این فرایند محاسبه کنیم. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه

به یاد داریم:

$$Q = +mL_v = (1/0 \times 10^3 \text{ g})(2/26 \times 10^2 \text{ J/g}) = 2/26 \times 10^2 \text{ J}$$

و در نتیجه

$$\Delta U = 2/26 \times 10^2 \text{ J} + (-1/67 \times 10^2 \text{ J}) = 2/09 \times 10^2 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمایی می پردازیم که در فرایند هم فشار با دستگاه مبادله می شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه ΔT ، با رابطه $Q = mc\Delta T$ داده می شود. با توجه به رابطه ۲-۱، $m = nM$ است و در نتیجه داریم $Q = nMc\Delta T$. حاصل ضرب Mc را ظرفیت گرمایی مولی می نامیم و آن را در فرایند هم فشار با C_p نشان می دهیم. بنابراین:

$$Q = nC_p\Delta T \quad (7-1)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت، $\text{J/mol} \cdot \text{K}$ است.

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۲-۱ آمده است.

می توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، برای گازهای کامل تک اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ و برای اغلب گازهای کامل دواتمی در دماهای معمولی برابر با $\frac{7}{2}R$ است.

مثال ۹-۱

مقدار گرمایی که $1/0 \text{ liter}$ گاز کامل O_2 در فشار $1/0 \text{ atm}$ و دمای 300 K مبادله می کند تا دمایش به 270 K برسد چقدر است؟ آیا گاز گرما از دست می دهد یا گرما می گیرد؟

پاسخ: مقدار n برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(1/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/3 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})} = 0/4 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۲-۱ و رابطه ۷-۱ داریم:

$$Q = nC_p(T_f - T_i) = (0/4 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(270 \text{ K} - 300 \text{ K}) = -35 \text{ J}$$

مقدار گرمای مبادله شده $|Q| = 35 \text{ J}$ است و با توجه به اینکه Q منفی شده است، نتیجه

می گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می دهد.

جدول ۲-۱- ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب $\text{J/mol} \cdot \text{K}$

| گاز | C_p |
|----------------------|-------|
| Ar | 20/8 |
| He | 20/8 |
| Ne | 20/8 |
| هوا | 29/1 |
| CO | 29/5 |
| H_2 | 28/4 |
| HCl | 29/5 |
| N_2 | 29/1 |
| NO | 29/5 |
| O_2 | 29/4 |
| Cl_2 | 48/2 |
| CO_2 | 36/9 |
| CS_2 | 49/4 |
| H_2S | 41/2 |
| N_2O | 46/1 |
| SO_2 | 49/9 |

مثال ۱۰-۱

مقداری گاز کامل تک اتمی در یک انبساط هم فشار، 100 J کار انجام می دهد. الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟ ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) گرما از رابطه ۷-۱ به دست می آید:

$$Q = nC_p \Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)\Delta T$$

که در آن از ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت گازهای کامل تک اتمی استفاده کرده ایم. در رابطه بالا $n\Delta T$ مجهول است و آن را باید به طریقی محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم فشار استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned} W &= -P\Delta V = -P(V_f - V_i) \\ &= -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) \\ &= -nR\Delta T \end{aligned}$$

که در آن از قانون گازهای کامل ($PV = nRT$) استفاده کرده ایم. از صورت مسئله می دانیم که گاز منبسط شده و 100 J کار انجام داده است. بنابراین $W = -100 \text{ J}$ است و در نتیجه داریم:

$$nR\Delta T = 100 \text{ J}$$

با قراردادن این مقدار در رابطه Q خواهیم داشت:

$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(100) = 250 \text{ J}$$

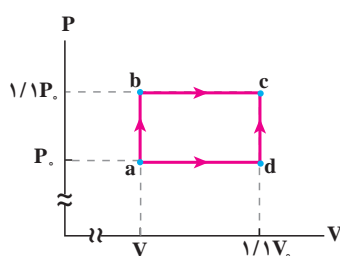
گرمای مبادله شده $|Q| = 250 \text{ J}$ است. علامت مثبت Q نشان می دهد که این گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته است. ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W$$

که در آن Q گرمایی است که دستگاه گرفته و W کاری است که روی دستگاه انجام شده است. بنابراین:

$$\Delta U = 250 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 150 \text{ J}$$

مثال ۱۱-۱



مقداری گاز کامل تک اتمی، مطابق شکل، از دو مسیر مختلف abc و adc به طور آرمانی از حالت اولیه a به حالت نهایی c رفته است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc را بیابید.

ب) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر adc را بیابید.

پ) از مقایسه قسمت های (الف) و (ب) به چه نتیجه ای می رسید؟

پاسخ:

برای محاسبه انرژی درونی در هر دو قسمت از قانون اول ترمودینامیک

($\Delta U = Q + W$) استفاده می کنیم که در آن Q گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته و W کار روی دستگاه است.

الف) کار در مسیر $a \rightarrow b \rightarrow c$ برابر مجموع کار در مسیر ab و مسیر bc است :

$$W_{ab} = W_{\text{هم حجم}} = 0$$

$$W_{bc} = W_{\text{هم فشار}} = -P \Delta V = -1/1 P_0 (V_c - V_b) = -0/1 P_0 V_0$$

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = -0/1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر $a \rightarrow b \rightarrow c$ برابر با مجموع گرما در مسیر ab و مسیر bc است :

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= Q_{\text{هم حجم}} = n C_V \Delta T = n \left(\frac{5}{2} R \right) (T_b - T_a) = \frac{5}{2} (P_b V_b - P_a V_a) \\ &= \frac{5}{2} (1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = 0/5 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{bc} &= Q_{\text{هم فشار}} = n C_P \Delta T = n \left(\frac{7}{2} R \right) (T_c - T_b) = \frac{7}{2} (P_c V_c - P_b V_b) \\ &= \frac{7}{2} (1/2 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = 0/2 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 0/7 P_0 V_0$$

در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر $a \rightarrow b \rightarrow c$ چنین می شود :

$$\Delta U_{abc} = W_{abc} + Q_{abc} = 0/3 P_0 V_0$$

ب) کار در مسیر $a \rightarrow d \rightarrow c$ برابر مجموع کار در مسیر ad و dc است :

$$W_{ad} = W_{\text{هم فشار}} = -P \Delta V = -P_0 (V_d - V_a) = -0/1 P_0 V_0$$

$$W_{dc} = W_{\text{هم حجم}} = 0$$

$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -0/1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر $a \rightarrow d \rightarrow c$ برابر مجموع گرما در مسیر ad و dc است :

$$\begin{aligned} Q_{ad} &= Q_{\text{هم فشار}} = n C_P \Delta T = n \left(\frac{7}{2} R \right) (T_d - T_a) = \frac{7}{2} (P_d V_d - P_a V_a) \\ &= \frac{7}{2} (1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = 0/2 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{dc} &= Q_{\text{هم حجم}} = n C_V \Delta T = n \left(\frac{5}{2} R \right) (T_c - T_d) = \frac{5}{2} (P_c V_c - P_d V_d) \\ &= \frac{5}{2} (1/2 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = 0/1 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{adc} = Q_{ad} + Q_{dc} = 0/3 P_0 V_0$$

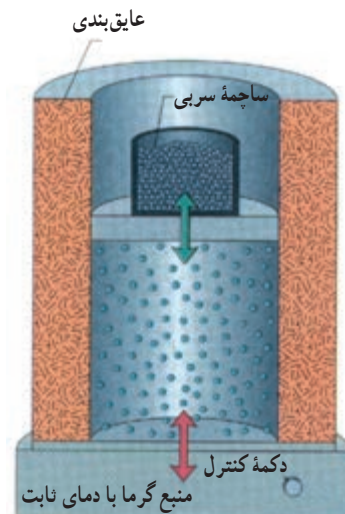
در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر $a \rightarrow d \rightarrow c$ چنین می شود :

$$\Delta U_{adc} = W_{adc} + Q_{adc} = 0/3 P_0 V_0$$

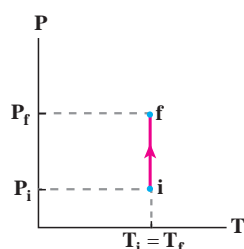
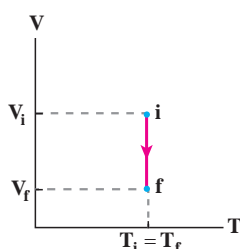
پ) از نتیجه‌های به دست آمده در قسمت‌های (الف) و (ب)، چنانکه پیش‌تر نیز اشاره شد، درمی‌یابیم در فرایندهای مختلفی که برای گاز (دستگاه) رخ می‌دهد، اگر گاز از حالت اولیه یکسان به حالت نهایی یکسانی برسد، تغییر انرژی درونی گاز مقدار ثابتی است و اصطلاحاً در ترمودینامیک می‌گویند تغییر انرژی درونی به مسیر بستگی ندارد.

پ) فرایند هم دما: دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم دما می توان مطابق شکل ۱۱-۱ استوانه حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرما با دمای ثابت قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه های سربی روی پیستون به آهستگی کاهش داد.

در هر تراکم جزئی، کار کوچکی روی گاز درون استوانه انجام می شود و بنا به قانون اول ترمودینامیک دمای گاز کمی افزایش می یابد و اختلاف دمای آن با منبع گرمایی باعث می شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد تا دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه تراکم های جزئی، گاز را به طور هم دما به فشار و حجم مورد نظر خود می رسانیم. در فرایند تراکم هم دما، کار محیط روی دستگاه مثبت است و گاز گرما از دست می دهد. نمودارهای $P-T$ و $V-T$ این فرایند در شکل ۱۲-۱ رسم شده است.



شکل ۱۱-۱ استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله های سربی؛ تراکمی هم دما رخ می دهد.



شکل ۱۲-۱ نمودارهای $V-T$ و $P-T$ برای یک تراکم هم دمای آرمانی

تمرین ۲-۱

مشابه آزمایشی که برای تراکم هم دما شرح دادیم، آزمایشی برای یک انبساط هم دما طراحی کنید، نمودارهای $P-T$ و $V-T$ را برای آن رسم و علامت های Q و W را برای چنین فرایندی تعیین کنید.

فعالیت ۲-۱

انتهای یک سرنگ بزرگ (مثلاً 10°C) را مسدود و آن را وارد مخلوط آب و یخ کنید. پس از مدتی گاز را به آرامی متراکم کنید. آیا می توان این فرایند را هم دما در نظر گرفت؟ توضیح دهید.

مثال ۱۲-۱

گاز کاملی را در دمای ثابت از حالت اولیه $V_1 = 4^\circ\text{liter}$ و $P_1 = 1^\circ\text{atm}$ تا حالت نهایی با حجم $V_f = 1^\circ\text{liter}$ متراکم می کنیم.

الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هریک از حجم های 3°liter ، 2°liter و 1°liter حساب کنید و نمودار $P-V$ را با استفاده از روش نقطه یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

ب) مساحت سطح زیر این نمودار $5 \times 10^2 \text{ J}$ است. Q و W در این فرایند چقدر است؟

پاسخ:

الف) چون گاز، کامل و فرایند همدماست داریم:

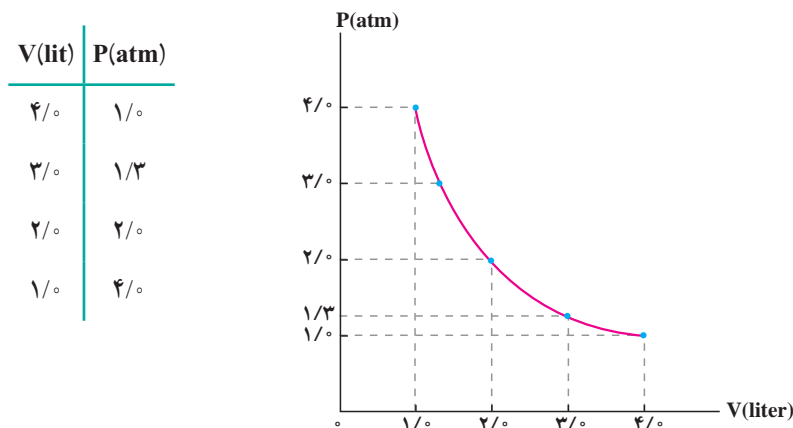
$$PV=nRT=\text{ثابت} \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

$$V_2 = 3 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(3/0) \Rightarrow P_2 = 1/3 \text{ atm}$$

$$V_2 = 2 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(2/0) \Rightarrow P_2 = 2/0 \text{ atm}$$

$$V_2 = 1 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(1/0) \Rightarrow P_2 = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار P-V را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم:



ب) چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است:

$$W = +5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

برای گاز کامل انرژی درونی فقط تابع دمای مطلق آن است و در فرایند هم‌دما، دما ثابت می‌ماند. بنابراین داریم:

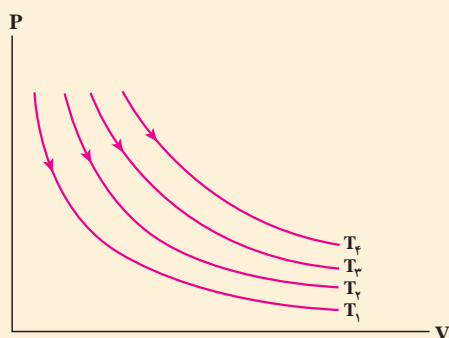
$$\Delta U = 0$$

آنگاه با استفاده از قانون اول ترمودینامیک گرمای داده شده به گاز به دست می‌آید:

$$\Delta U = Q + W \Rightarrow Q + 5/5 \times 10^2 = 0 \Rightarrow Q = -5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

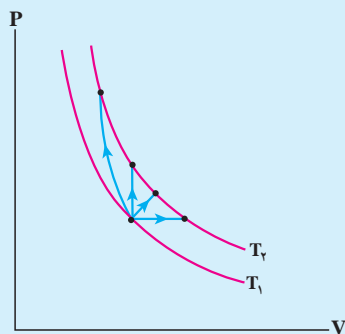
در حالت کلی، در فرایند هم‌دمای گاز کامل همواره $Q = -W$ است.

تمرین ۱-۳



در شکل مقابل، نمودار P-V مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز کامل در دماهای مختلف رسم شده است. نشان دهید: $T_1 > T_2 > T_3$

فعالیت ۳-۱



در شکل روبه‌رو گاز کاملی را از طریق چند فرایند مختلف از جمله یک فرایند هم‌حجم و یک فرایند هم‌فشار از دمای T_1 به دمای T_2 رسانده‌ایم.

(الف) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

$$C_p - C_v = R$$

(ب) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه $\Delta U = nC_v\Delta T$

به دست می‌آید.

ت) فرایند بی‌دررو: در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن این فرایند باید دستگاه را مطابق شکل ۱۳-۱ عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم. در فرایند بی‌دررو $Q=0$ است. بنابراین، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی‌آید:

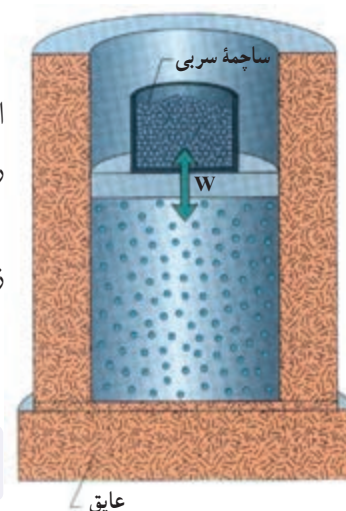
$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$W_{\text{بی‌دررو}} = \Delta U$$

(۸-۱)

همچنین هنگامی که یک گاز را به سرعت متراکم یا منبسط می‌کنیم؛ چون گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نمی‌کند، فرایند به صورت بی‌دررو در نظر گرفته می‌شود.

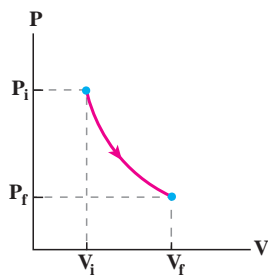


شکل ۱۳-۱ با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

فعالیت ۴-۱



گاهی اوقات وقتی یک نوشابه خیلی سرد را از یخچال بیرون می‌آوریم و در آن را بلافاصله باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که مه رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.



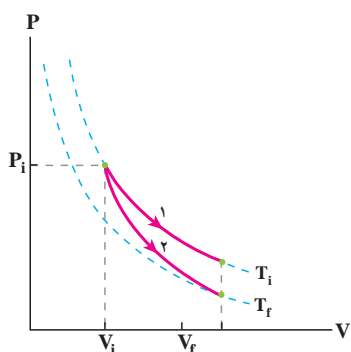
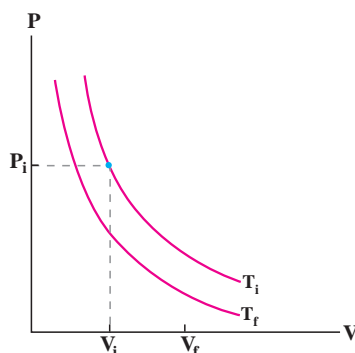
گاز کاملی را با حجم V_i و فشار P_i در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار $P-V$ آن خمی شبیه خم یک فرایند هم‌دما می‌شود. الف) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید گاز کامل در انبساط بی‌دررو سرد می‌شود.

ب) گاز کاملی با حجم V_i و فشار P_i را تا حجم نهایی V_f یک بار به صورت هم‌دما و بار دیگر به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. با استفاده از نتیجه قسمت الف، نمودارهای این دو فرایند را در یک صفحه $P-V$ رسم و با هم مقایسه کنید.

پ) در کدام فرایند $|W|$ بیشتر است؟

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه $\Delta U = W_{\text{بی‌دررو}}$ و با توجه به اینکه در انبساط، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است نتیجه می‌گیریم $\Delta U < 0$ است؛ چون گاز، کامل است کاهش انرژی درونی گاز با کاهش دمای آن همراه است؛ یعنی دمای گاز کاهش می‌یابد. این را می‌توانستیم از رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ که در فعالیت ۳-۱ به دست آوردید نیز نتیجه بگیریم. ب) در شکل زیر دو منحنی هم‌دما با دماهای T_i و T_f رسم شده‌اند. از تمرین ۴-۱ می‌دانیم $T_f < T_i$ است.



بدیهی است که در انبساط هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند و همواره $T = T_i$ است (مسیر ۱). ولی در قسمت الف نشان دادیم که در انبساط بی‌دررو دمای گاز کاهش می‌یابد، پس قاعدتاً گاز باید به دمایی پایین‌تر مثل دمای T_f در شکل برسد (مسیر ۲).

علاوه بر این برای رسم نمودار می‌توان فشارهای نهایی را با استفاده از قانون گازهای کامل با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌طور که در مثال ۱۴-۱ خواهید دید فشار نهایی در انبساط بی‌دررو کمتر از فشار نهایی در انبساط هم‌دما می‌شود.

پ) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیشتر است، $|W|$ برای این فرایند مقدار بیشتری دارد.

مثال ۱۳-۱ را با فرض آنکه گاز به جای انبساط، تراکم باید پاسخ دهید.

مثال ۱۴-۱

۵/۰۰ mol از یک گاز کامل تک‌اتمی را از حالت اولیه ($P_i, V_i, T_i = 300\text{ K}$) تا حجم نهایی V_f یک بار به صورت هم‌دما و بار دیگر به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. در انبساط بی‌دررو دمای مطلق گاز ۵/۰۰ درصد کاهش می‌یابد. الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی‌دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم‌دما است؟ ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی‌دررو را حساب کنید.

پاسخ:

$$\left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{بی‌دررو}} = \left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{هم‌دما}}$$

الف)

با توجه به اینکه حجم نهایی در دو فرایند یکسان است، داریم:

$$\left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{بی‌دررو}} = \left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{هم‌دما}} \Rightarrow \frac{P_{f, \text{بی‌دررو}}}{P_{f, \text{هم‌دما}}} = \frac{T_{f, \text{بی‌دررو}}}{T_{f, \text{هم‌دما}}} = \frac{285\text{ K}}{300\text{ K}} = 0.95$$

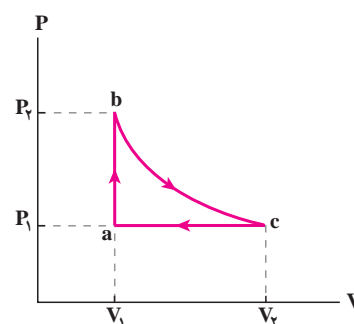
$$W_{\text{بی‌دررو}} = \Delta U = nC_V \Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T$$

ب)

$$= (5.00\text{ mol})\left(\frac{3}{2} \times 8.31\text{ J/mol.K}\right)(-150\text{ K}) = -935\text{ J}$$

۱-۶- چرخه ترمودینامیکی

دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱۴-۱ می‌بینید، از سه فرایند هم‌حجم، بی‌دررو و هم‌فشار تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه نخست از طریق یک فرایند هم‌حجم از حالت a (با حجم V_1 و فشار P_1) به حالت b (با حجم V_1 و فشار P_2) می‌رود. سپس از طریق یک انبساط بی‌دررو به حالت c (با حجم V_2 و فشار P_1) می‌رسد. در ادامه، دستگاه با فرایندی هم‌فشار به حالت اولیه a باز می‌گردد. مجموعه این فرایندها یک **چرخه ترمودینامیکی** را تشکیل می‌دهد. در چرخه ترمودینامیکی دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه خود برمی‌گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ($\Delta U = 0$). بنابراین از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه‌های ترمودینامیکی داریم:



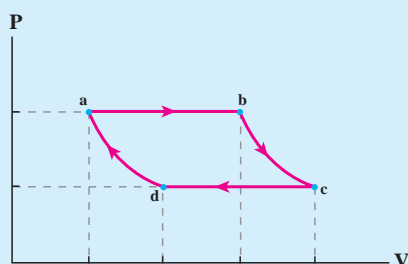
شکل ۱۴-۱ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته‌ای را در صفحه P-V تشکیل می‌دهد.

$$Q = -W$$

(۱-۹) (چرخه ترمودینامیکی)

فعالیت ۱-۵

شکل زیر یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می‌دهد که یک دستگاه ترمودینامیکی آن را طی کرده است.



الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر

نمودار آن بیان کنید.

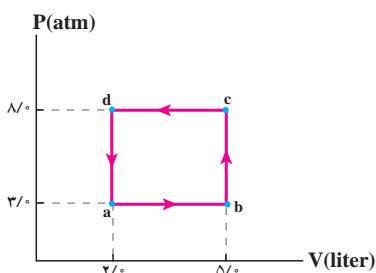
ب) نشان دهید اندازه کار کل انجام شده روی دستگاه برابر با مساحت

داخل چرخه است.

پ) کار کل انجام شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۱-۵ دریافتیم اندازه کار انجام شده در چرخه برابر با مساحت داخل چرخه در صفحه $P-V$ است و می توان نشان داد در چرخه های ساعتگرد در صفحه $P-V$ کار انجام شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه های پاد ساعتگرد، مثبت است.

مثال ۱-۱۵



گازی چرخه ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را طی می کند.

الف) کار انجام شده روی گاز در این چرخه چقدر است؟

ب) گرمای مبادله شده بین گاز و محیط در چرخه چقدر است؟

پاسخ:

الف) کار انجام شده برابر با مساحت سطح داخل چرخه است:

$$|W| = S_{abcd} = (8 - 3) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

چون چرخه در صفحه $P-V$ پاد ساعتگرد است، داریم

$$W = +1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

ب) با توجه به رابطه ۱-۹ می توان نوشت:

$$Q = -W = -1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط $|Q| = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$ است و در این چرخه گاز به محیط گرما داده است.

۱-۲- ماشین های گرمایی

تا حدود ۲۵۰ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به طور عمده از طریق نیروی ماهیچه ای انسان ها و حیوان ها تأمین می شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به دست می آمد. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان ها و مکان های خاصی امکان پذیر بود. امروزه بیشتر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین های گرمایی به دست می آید. این ماشین ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می کنند. از نظر تاریخی نخستین ماشین های گرمایی، **ماشین های برون سوز** مانند ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از این ماشین ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، فضاپیما و ... به طور مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد. در نیروگاه ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می شود و سپس از طریق شبکه برق رسانی به مکان های مختلف منتقل می گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می آید.

ماشین های درون سوز نوع دیگری از ماشین های گرمایی هستند که با سوخت هایی چون بنزین، گاز یا گازوئیل کار می کنند. این نوع ماشین ها در موتور اتومبیل ها و کامیون ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می شوند.

ماشین های گرمایی با ترکیب چند فرایند، مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می کنند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین ها به این

صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه خود برمی گردد؛ یعنی این ماشین ها در یک چرخه معین کار می کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می شود.

اساس کار همه ماشین های گرمایی یکسان است. در ادامه با ذکر مثال هایی چگونگی کار ماشین های برون سوز و درون سوز را توضیح می دهیم و با اساس کار ماشین های گرمایی آشنا می شویم.

الف) ماشین های گرمایی برون سوز: ماشین های برون سوز انواع مختلفی دارند که

ماشین های بخار و استرلینگ دو نوع آنها هستند. در ادامه به توضیح ماشین بخار می پردازیم.

ماشین بخار: ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده

قرار می گیرد. دیدیم که در ماشین های گرمایی، دستگاه در یک چرخه مقداری گرما دریافت می کند و بر

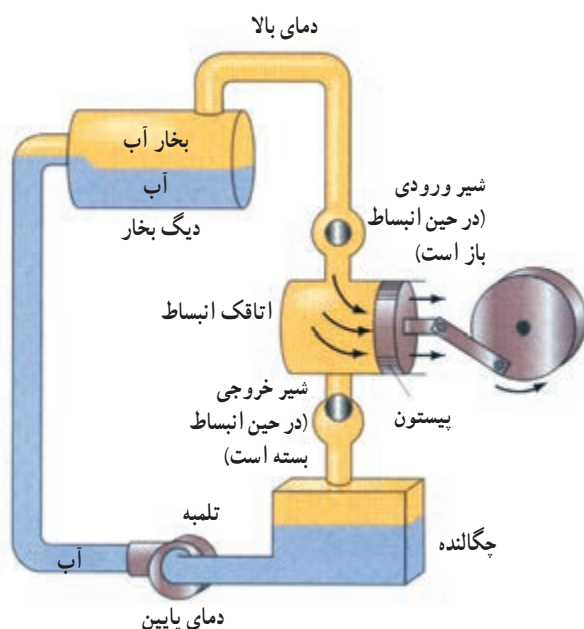
روی محیط کار انجام می دهد. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می کند، آب است. همان طور

که در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می کند و پس

از انجام دادن چند فرایند مختلف، که در زیر به توضیح آنها می پردازیم، به حالت اولیه خود در دیگ

بخار برمی گردد و این چرخه دائماً تکرار می شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به

آب داده می شود، ماشین بخار از ماشین های برون سوز محسوب می شود.



شکل ۱-۱۵: بخش های اصلی ماشین بخار عبارتند از: دیگ بخار، اتاقک انبساط، چگالنده، تلمبه، شیرهای ورودی و خروجی و لوله های رابط.

برای بررسی نحوه کار ماشین بخار، مقدار مشخصی از آب درون دیگ بخار را در نظر می گیریم،

و فرایندهایی را که این آب در ماشین بخار طی می کند با اندکی ساده سازی توضیح می دهیم. شکل

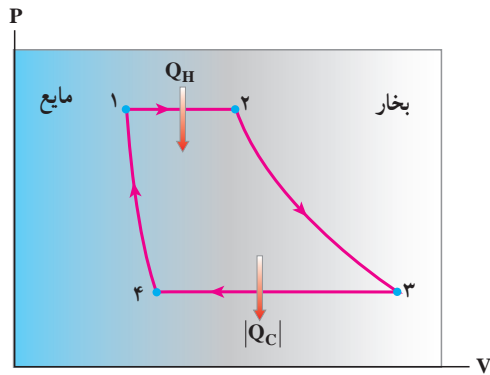
۱-۱۶ این فرایندها را به طور تقریبی نشان می دهد. تمام این فرایندها آرمانی فرض شده اند.

الف) مرحله اول (از ۱ تا ۲): در این مرحله آب، درون دیگ بخار در فشار ثابت و نسبتاً زیاد از

کوره گرما می گیرد و به بخار تبدیل می شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می یابد.

ب) مرحله دوم (از ۲ تا ۳): شیر ورودی باز می شود و بخار آب که دما و فشار آن بسیار زیاد

است، وارد اتاقک انبساط می شود؛ به پستون نیرو وارد می کند و آن را به حرکت درمی آورد. در نتیجه



شکل ۱-۱۷ نمودار ساده شده چرخه ماشین بخار در صفحه P-V (چرخه رانکین). توجه کنید که تمام فرایندها در این چرخه، آرمانی فرض شده‌اند.

این حرکت، بخار آب به سرعت منبسط می‌شود و دما و فشار آن کاهش می‌یابد. چون این انبساط بسیار سریع انجام می‌شود، این فرایند را می‌توان بی‌دررو در نظر گرفت. این حرکت پیستون برای به کار انداختن مولد برق، به حرکت درآوردن چرخ‌های لکوموتیو و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب) مرحله سوم (از ۳ تا ۴): طراحی ماشین به گونه‌ای است که وقتی پیستون به انتهای مسیر خود رسید، بازگردانده می‌شود. در هنگام بازگشت پیستون، شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز می‌شود و بخار آب به سمت چگالنده که لوله‌های آب سرد یا فن‌های خیلی قوی آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده، بخار آب در فشار ثابت گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. در این فرایند، حجم بخار آب کاهش می‌یابد.

ت) مرحله چهارم (از ۴ تا ۱): تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگر بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به طور بی‌دررو به فشار اولیه می‌رساند (فقط تغییرات کوچکی در دما و حجم مایع رخ می‌دهد) و بدین ترتیب یک چرخه ترمودینامیکی کامل می‌شود.

در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به طور عمده با دو منبع گرما (کوره و چگالنده) تبادل گرما می‌کند. کوره را که در دمای بالاتری قرار دارد، منبع گرم و چگالنده را منبع سرد می‌نامیم.

تمرین ۱-۵

با استفاده از نمودار P-V ی ماشین بخار

الف) مشخص کنید که آب در مرحله‌های ۱→۲، ۲→۳، ۳→۴ و ۴→۱، گرما گرفته یا از دست داده است؟

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید رابطه $Q_{12} + Q_{34} + W_{\text{چرخه}} = 0$ برقرار است.

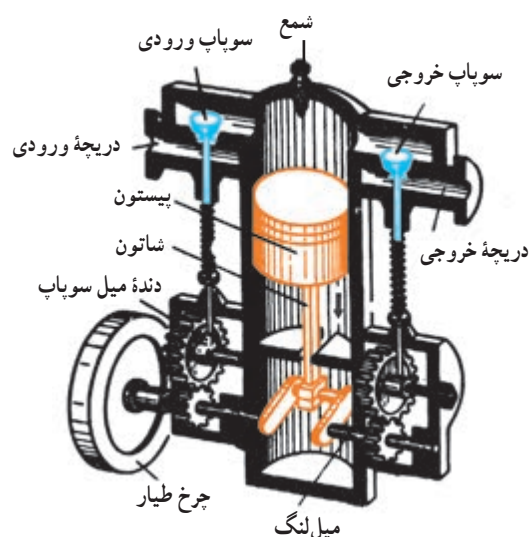
فعالیت ۱-۷

ماشین استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی (۱۱۹۵ هجری شمسی) توسط رابرت/سترلینگ اسکاتلندی اختراع شد. این ماشین که مدت‌ها به فراموشی سپرده شده بود، اکنون برای استفاده در خودروها، فضاپیماها و زیردریایی‌ها توسعه یافته است. درباره این ماشین و مراحل مختلف چرخه آن تحقیق کنید. برای ارائه این تحقیق سعی کنید از تصاویر و نمودارهای مناسب آموزشی استفاده و آن را به صورت پاورپوینت به کلاس گزارش کنید.

ب) ماشین‌های گرمایی درون‌سوز: موتور بیشتر خودروهای

سواری، هواپیماهای ملخ‌دار، برخی کشتی‌ها، قطارها و نیروگاه‌های کوچک درون‌سوزاند. ماشین‌های گرمایی درون‌سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی می‌پردازیم.

موتور بنزینی از یک یا چند استوانه (سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها در داخل آنها حرکت می‌کند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۱۷-۱ نشان داده شده است. در این نوع موتور، بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته (شاتون) و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ‌ها، اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.



شکل ۱۷-۱ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز بنزینی (شکل ۱-۱۸) به شرح زیر است:

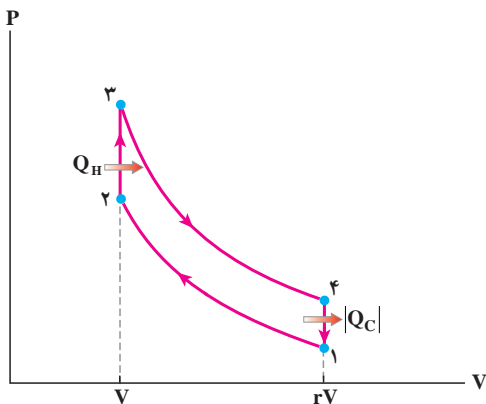
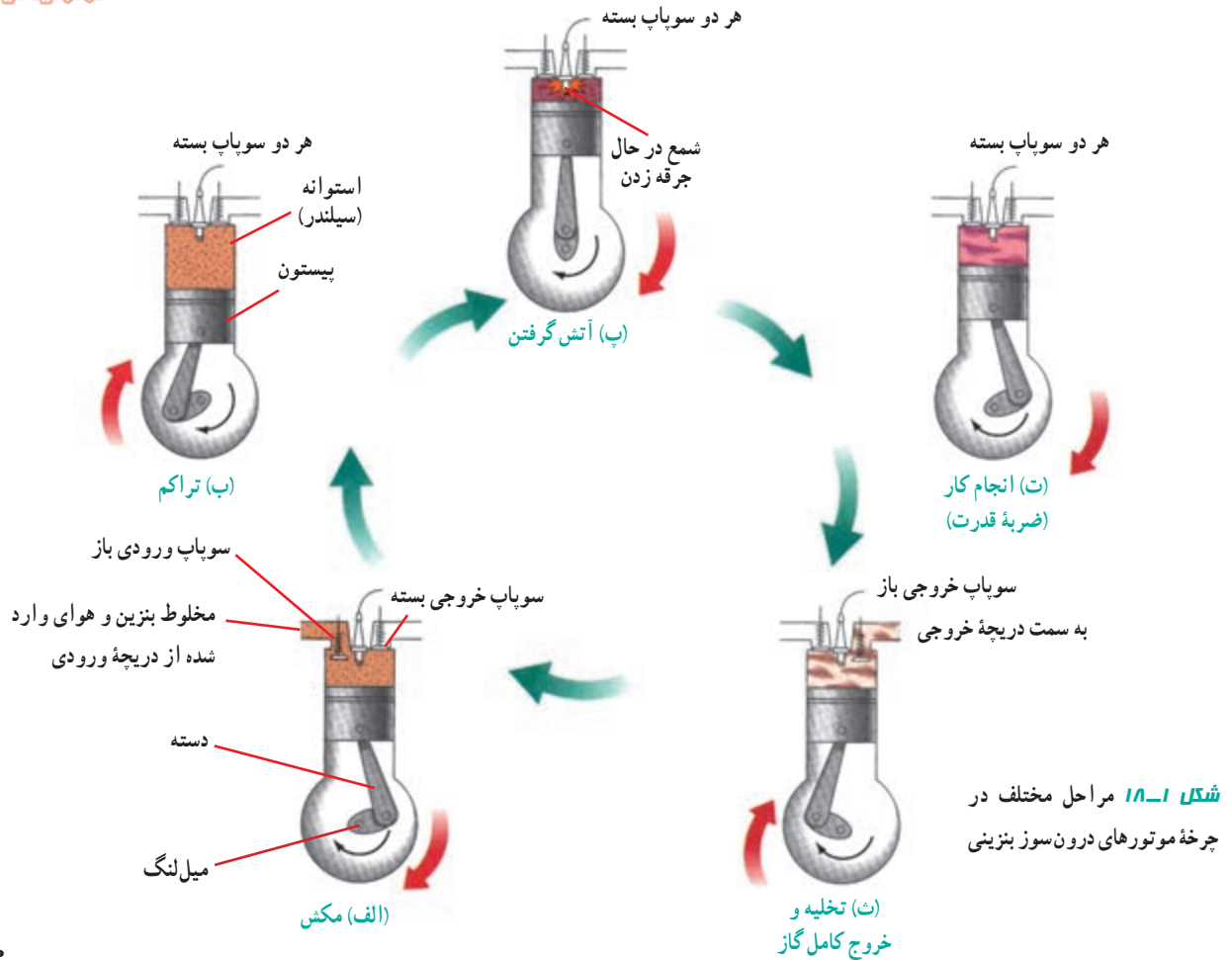
الف) مرحله مکش: با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن V و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا rV است (r را نسبت تراکم می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شود.

ب) مرحله تراکم: پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم V می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

پ) مرحله آتش‌گرفتن: هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V تا مقدار زیادی بالا می‌رود. چون آتش گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می‌دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی‌گیرد، این موتورها را درون‌سوز می‌گویند.

ت) مرحله انجام کار: در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از V به rV می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل‌لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

ث) مرحله تخلیه و خروج کامل گاز: این مرحله از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول، در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم rV) قرار دارد، سوپاپ دریچه خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود و فشار تا فشار جو کاهش پیدا می‌کند. در بخش دوم مرحله تخلیه، پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون



شکل ۱۸-۲ چرخه اتو که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها رسم شده است.

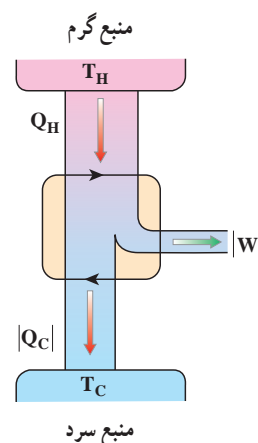
- ۱ تا ۲- دستگاه به سرعت متراکم می شود، فشار و دمای آن افزایش و حجم آن کاهش می یابد (مرحله تراکم).
- ۲ تا ۳- دستگاه گرمای Q_H را می گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می رود (معادل مرحله آتش گرفتن).
- ۳ تا ۴- دستگاه به سرعت منبسط می شود، دما و فشار آن کاهش می یابد و پیستون را به طرف پایین می راند (مرحله انجام کار).
- ۴ تا ۱- دستگاه گرمای $|Q_C|$ را از دست می دهد و دما و فشار آن کاهش می یابد (معادل مرحله تخلیه).

می راند و حجم فضای بالای پیستون به مقدار اولیه V می رسد. در مرحله تخلیه با خروج دود مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می شود.
چرخه اتو : نحوه عمل یک ماشین درون سوز بنزینی را می توان با فرض مجموعه ای از شرایط به طور تقریبی بیان کرد و براساس این فرض ها چرخه ای موسوم به **چرخه اتو** را در صفحه $P-V$ رسم کرد. این فرض ها عبارت اند از :

- ۱- دستگاه (مخلوط بنزین و هوا) همواره یک گاز کامل است و بنابراین، اشتعالی بر اثر واکنش شیمیایی در آن رخ نمی دهد. ولی با گرفتن گرمای Q_H از محیط به همان دما و فشار گاز در پایان مرحله آتش گرفتن ماشین واقعی می رسد.
 - ۲- تمام فرایندها آرمانی اند.
 - ۳- مرحله تخلیه گاز رخ نمی دهد، گاز در داخل استوانه باقی می ماند و با دادن گرمای $|Q_C|$ به محیط، دما و فشار آن کاهش می یابد.
- چرخه اتو در شکل ۱۹-۱ رسم شده است.

۸-۱- بازده ماشین گرمایی

در بررسی ماشین‌های بخار و درون‌سوز بنزینی دیدیم که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها، دستگاه یک چرخه کامل را می‌پیماید و در طی آن مقداری گرما از یک منبع گرم می‌گیرد (Q_H)، مقداری کار انجام می‌دهد ($|W|$) و مقداری گرما به یک منبع سرد می‌دهد ($|Q_C|$). با توجه به آنچه گفته شد، طرزکار همه ماشین‌های گرمایی آرمانی را می‌توان مانند شکل ۱-۲۰ به صورت طرح‌وار نشان داد. هدف هر ماشین گرمایی آن است که انرژی گرمایی گرفته شده Q_H را تا آنجا که ممکن است به کار بیشتری تبدیل کند. برای اندازه‌گیری اینکه در چرخه ماشین گرمایی چقدر از انرژی داده شده به دستگاه، به کار مکانیکی تبدیل می‌شود، بازده گرمایی η را تعریف می‌کنیم. بازده یک ماشین گرمایی با نسبت کار انجام شده در چرخه ماشین به انرژی گرمایی که ماشین دریافت می‌کند، تعریف می‌شود:



شکل ۱-۲۰ طرز کار طرح‌وار یک ماشین گرمایی آرمانی

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (۱-۱) \quad (\text{برای هر ماشین})$$

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخه ماشین و با چشم‌پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف‌های انرژی، قانون اول ترمودینامیک برای چرخه این ماشین‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta U = Q + W$$

همان‌طور که می‌دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ($\Delta U = 0$). از طرفی Q شامل دو جمله Q_H و Q_C است ($Q = Q_H + Q_C$). پس می‌توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه، Q_H مثبت و Q_C و W منفی است. بنابراین:

$$Q_H = |W| + |Q_C| \quad (۱-۱۱)$$

بنابراین، بازده برای ماشین‌های گرمایی آرمانی به صورت زیر درمی‌آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} \quad (۱-۱۲) \quad (\text{برای ماشین‌های آرمانی})$$

بازده واقعی ماشین‌های گرمایی با بازده ماشین‌های آرمانی متفاوت است. بازده واقعی ماشین‌های درون‌سوز بنزینی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، بازده واقعی ماشین‌های درون‌سوز دیزلی در حدود ۴۰ درصد و بازده ماشین‌های بخار نیز در حدود ۴۰ درصد است. رابطه ۱-۱۲ نشان می‌دهد که بازده ماشین‌های گرمایی نمی‌تواند بیشتر از یک باشد.

محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم r می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی دست یافت. اما در عمل ممکن نیست به نسبت تراکم بالاتر از ۴ یا ۵ دست یافت؛ زیرا در نسبت‌های تراکم بالاتر، مخلوط سوخت و هوا چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را **رودلف کریستین کارل دیزل** 'مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشین‌های در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا متراکم می‌شود. نسبت تراکم به ۱۱ تا ۱۲ می‌رسد و هوا تا حدود 600°C گرم می‌شود. در پایان تراکم، سوخت مایع به درون سیلندر پاشیده می‌شود. دربارهٔ مرحله‌های مختلف چرخه این ماشین و نمودار آن در صفحه P-V تحقیق کنید.

مثال ۱۴-۱

یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه $4/0 \text{ kJ}$ گرما از منبع گرم دریافت می‌کند و $2/4 \text{ kJ}$ گرما به منبع سرد می‌دهد.
الف) در هر چرخه چقدر کار روی محیط انجام می‌شود؟
ب) بازده این ماشین چقدر است؟
پاسخ: الف) از رابطه ۱۱-۱ داریم:

$$|W| = Q_H - |Q_C|$$

$$|W| = 4/0 \text{ kJ} - 2/4 \text{ kJ} = 1/6 \text{ kJ}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱۲-۱ بازده این ماشین به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{1/6 \text{ kJ}}{4/0 \text{ kJ}} = 0/40$$

بنابراین در این ماشین گرمایی 40% درصد از گرمای دریافت شده از منبع گرم، به منبع سرد داده شده و تنها 40% درصد آن به کار تبدیل شده است.

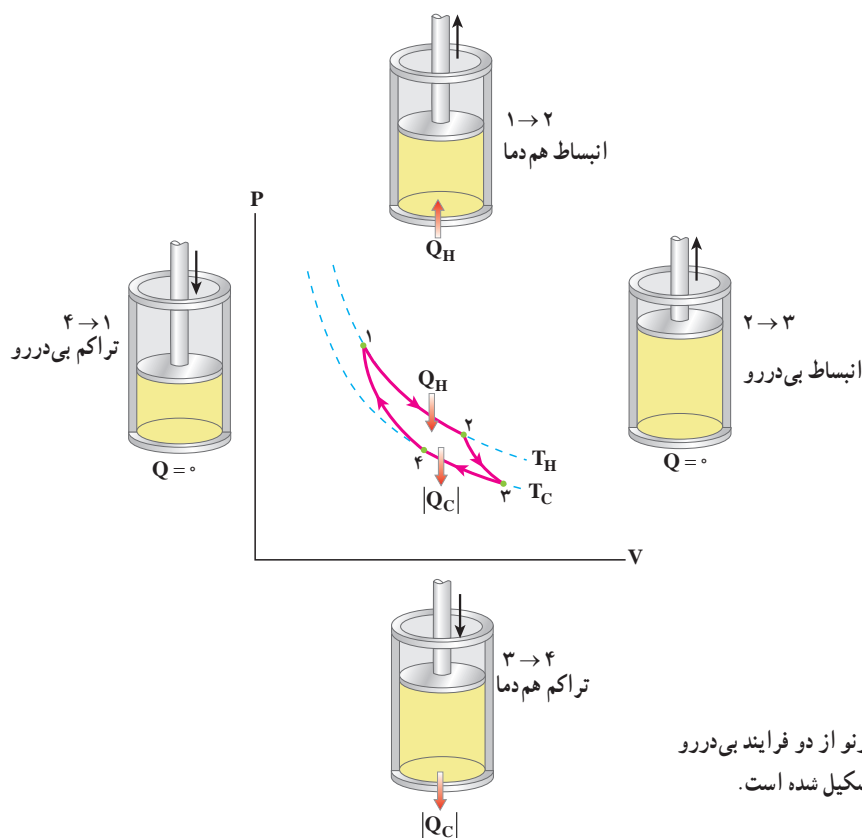
۹-۱- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که همهٔ این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای Q_H را از یک منبع گرم می‌گیرد، مقداری از آن را به کار ($|W|$) تبدیل می‌کند و بقیه ($|Q_C|$) را به یک منبع سرد می‌دهد. در واقع، هیچ‌یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همهٔ گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: **ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بسازیم که در طی آن مقداری گرما را از منبع گرم جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند.**

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نامیده می‌شود؛ یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰ درصد) شود. توجه داریم که، اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع گرم به کار تبدیل شود، قانون اول ترمودینامیک نقض نمی‌شود؛ اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است. اگر قانون دوم ترمودینامیک بر فرایندهای ترمودینامیک حاکم نبود، می‌توانستیم قطاری بسازیم که از هوا گرما بگیرد (هوا را سرد کند) و با تبدیل کامل آن به کار حرکت کند، یا نیروگاهی در کنار دریا بسازیم که با سرد کردن آب دریا انرژی الکتریکی تولید کند.

قضیه کارنو: براساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از ۱۰۰ درصد کمتر است. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع گرم و سرد با دماهای T_H و T_C کار می‌کند چقدر است؟ پاسخ به این پرسش را **سدهی کارنو** مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** و چرخه‌ای را که ماشین براساس آن کار می‌کند **چرخه کارنو** می‌نامند. چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است (شکل ۱-۲۱).

مراحل عمل چرخه کارنو به این ترتیب است:



شکل ۱-۲۱ چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است.



نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد سدی کارنو^۱ در اوّل ژوئن ۱۷۹۶ م. (۱۱۷۵ هجری شمسی) در پاریس و در خانواده‌ای که در آن علم و سیاست عجین شده بود، به دنیا آمد. او نخستین پسر لازار کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لازار بخش سوم نام‌فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدی کارنو در ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی - لوساک و بواسون قرار گرفت. پس از فارغ‌التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدی به عنوان افسر وارد رشته مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکه گرما»^۲ به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریه بازده ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها رودلف کلاسیوس و لرد کلوین با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام آنتروپی پرداختند. از این‌رو، از کارنو اغلب به عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در سال ۱۸۲۸ از ارتش استعفا داد و به تبعیدی خودخواسته رفت و چند سال بعد در حالی که از بیماری‌های روانی متعددی رنج می‌برد، در ۲۴ آگوست ۱۸۳۲ م (۱۲۱۱ هجری شمسی) در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

- ۱- گاز در دمای T_H انبساط هم‌دما می‌یابد و گرمای Q_H را از منبع گرم می‌گیرد (۱→۲).
 - ۲- گاز به‌طور بی‌دررو منبسط می‌شود و دمای آن تا T_C کاهش می‌یابد (۲→۳).
 - ۳- گاز در دمای T_C به‌طور هم‌دما متراکم می‌شود و گرمای $|Q_C|$ را به منبع سرد می‌دهد (۳→۴).
 - ۴- گاز به‌طور بی‌دررو متراکم می‌شود، دمای آن تا T_H افزایش می‌یابد و به حالت اول بازمی‌گردد (۴→۱).
- محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (۱۳-۱)$$

که در آن T_C و T_H برحسب کلوین است. از رابطه ۱-۱۳ درمی‌یابیم بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع سرد و گرم که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.

بنا به قضیه کارنو، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای T_H و T_C کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی کارنو $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$ است.

مثال ۱۷-۱

در چرخه یک ماشین درون‌سوز بنزینی بیشینه دمای مخلوط بنزین و هوا $3/3 \times 10^2 \text{ K}$ و دمای محصولات احتراق هنگام خروج از سیلندر (دمای منبع سرد) $1/3 \times 10^2 \text{ K}$ است. بازده ماشین کارنویی که بین دو منبع با همین دماها کار می‌کند چقدر است؟

پاسخ:

با استفاده از رابطه ۱-۱۳ داریم:

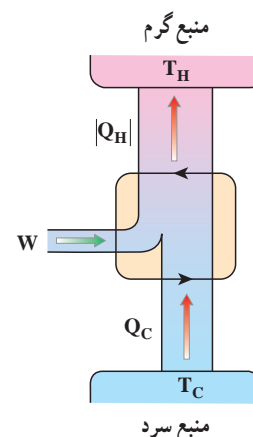
$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{1/3 \times 10^2 \text{ K}}{3/3 \times 10^2 \text{ K}} = 0/61$$

بازده یک ماشین درون‌سوز در عمل از این عدد کمتر است.

۱ - Nicolas Leonard Sadi Carnot

۲ - Reflections on motive power of fire

۱۰-۱- یخچال‌ها



شکل ۱۰-۱ طرز کار طرح وار یک یخچال آرمانی

یخچال وسیله‌ای است که با استفاده از کار، گرما را از منبعی سرد می‌گیرد و به منبعی گرم می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخهٔ ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه کار W را انجام می‌دهد، دستگاه گرمای Q_C را از منبع سرد می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع گرم می‌دهد. طرز کار یخچال به صورت طرح وار در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار به وسیلهٔ کمپرسور می‌شود (W)، گرما از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود (Q_C) و گرما به هوای بیرون یخچال داده می‌شود ($|Q_H|$). طرز کار کولرگازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولرگازی منبع سرد، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع گرم، هوای بیرون از اتاق است. نحوهٔ عمل یخچال‌ها عکس نحوهٔ عمل ماشین گرمایی است؛ یعنی همهٔ انتقال‌های انرژی چه به صورت گرما و چه به صورت کار در مقایسه با ماشین گرمایی وارونه شده است.

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخهٔ یخچال و با چشم‌پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف‌های انرژی می‌توانیم قانون اول ترمودینامیک را برای یخچال‌ها به شکل زیر بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W$$

همان‌طور که می‌دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ($\Delta U = 0$). از طرفی Q شامل دو جملهٔ Q_C و Q_H است. پس می‌توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه، Q_H ، منفی و Q_C و W مثبت است. بنابراین:

$$|Q_H| = W + Q_C \quad (10-1)$$

در هر یخچال، می‌خواهیم حداکثر گرما را از منبع سرد با صرف کمترین کار ممکن بگیریم. بنابراین، **ضریب عملکرد یخچال (K)** به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} \quad (10-2) \text{ (برای هر یخچالی)}$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن مقرون به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است. ضریب عملکرد یخچالی که در آن فرایندها آرمانی است، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{|Q_H| - Q_C} \quad (10-3) \text{ (برای یخچال‌های آرمانی)}$$

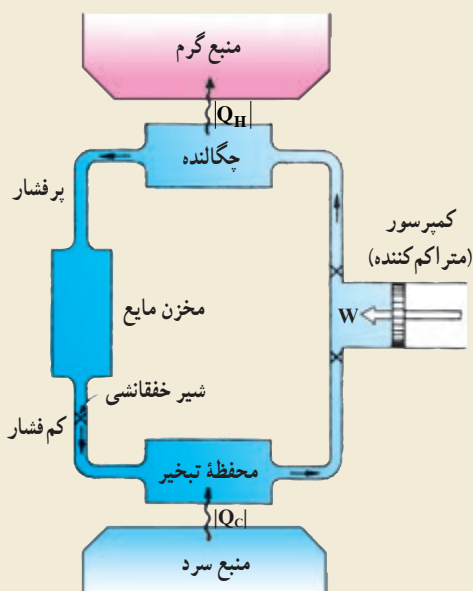
ساز و کار یخچال خانگی

یخچال خانگی یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌های خانگی را در اندازه‌های مختلف می‌سازند و آنها را با حجم داخلی مشخص می‌کنند؛ مثلاً یخچال ۹ فوت دارای حجم داخلی ۹ فوت مکعب یا حدود ۲۴۰ لیتر است.

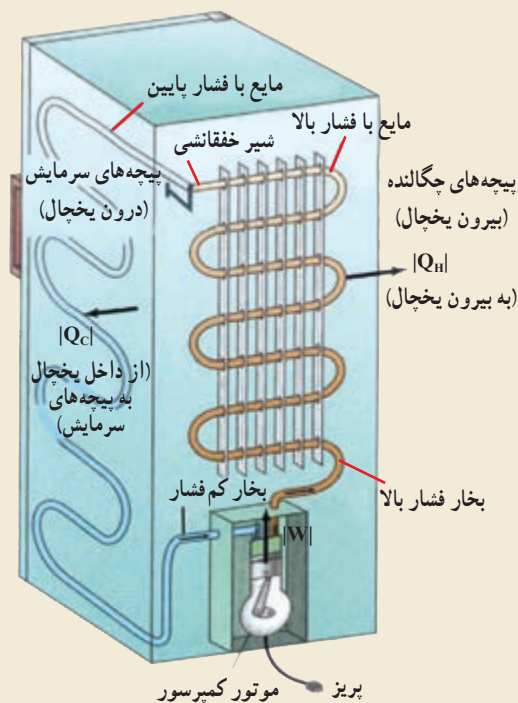
در شکل الف یک یخچال خانگی و در شکل ب نمایش طرح وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارتند از: چگالنده، محفظه تبخیر، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقا نشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است. این گاز از جمله گازهایی است که به لایه ازن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

طرز کار یخچال خانگی به طور مختصر به شرح زیر است:

کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظه تبخیر می‌گیرد و به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع گرم (اتاق) بالاتر رفته است، گرمای Q_H را به این منبع می‌دهد و مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر خفقا نشی می‌گذرد به شدت سرد می‌شود، به طوری که از منبع سرد (غذا و یخ) هم سردتر می‌شود و از آن گرما می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



(ب)

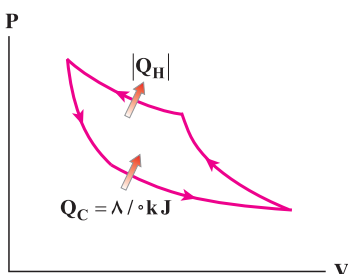


(الف)

پرسش ۲-۱

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

مثال ۱۸-۱



فرض کنید نمودار P-V ی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، به صورت شکل روبه‌رو است. اگر دستگاه در هر چرخه $8 / ^\circ\text{kJ}$ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه $2 / ^\circ\text{kJ}$ باشد،
الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟ و ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۱۴-۱ داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= W + Q_C \\ &= 2 / ^\circ\text{kJ} + 8 / ^\circ\text{kJ} = 10 / ^\circ\text{kJ} \end{aligned}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱۵-۱:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{8 / ^\circ\text{kJ}}{2 / ^\circ\text{kJ}} = 4 / ^\circ$$

۱۱-۱ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان یخچالی)

می‌دانیم که گرما از جسم گرم به جسم سرد منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل، خودبه‌خود صورت نمی‌گیرد. اگر یک لیوان آب خنک در اتاق قرار داشته باشد، گرما به‌طور خود به‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود، ولی وقتی آب را در داخل یخچال قرار می‌دهیم، یخچال با صرف انرژی مقداری گرما را از آب می‌گیرد و به هوای اتاق منتقل می‌کند. مطالب بالا موضوع قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی را تشکیل می‌دهد. براساس این بیان:

گرما به‌طور خود به‌خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل نمی‌شود.

می‌توان نشان داد که دو بیان ماشین گرمایی و یخچالی قانون دوم ترمودینامیک، معادل یکدیگرند. اگر قانون دوم به بیان یخچالی نقض شود (یعنی گرما به‌طور خود به‌خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود)، قانون دوم به بیان ماشین گرمایی نیز نقض می‌شود (یعنی می‌توان ماشینی ساخت که در یک چرخه تمام گرما را به کار تبدیل کند) و به عکس.

توان یک یخچال 100 وات و ضریب عملکرد آن $4/00$ است.

الف) چه مدت طول می کشد تا در این یخچال $1/00 \text{ kg}$ آب $25/0^\circ \text{C}$ به یخ $10/0^\circ \text{C}$ تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می شود؟ $L_f = 3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}$ و $c_{\text{یخ}} = 2/10 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ و $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$.

پاسخ: الف) گرمای Q_C یی که آب از دست می دهد، برابر است با

$$\begin{aligned} Q_C &= mc_{\text{آب}} |\Delta\theta_1| + mL_f + mc_{\text{یخ}} |\Delta\theta_2| \\ &= (1/00 \text{ kg}) (4/20 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (25/0^\circ \text{C}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (2/10 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (10/0^\circ \text{C}) \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۱۵-۱ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{4/61 \times 10^5 \text{ J}}{4/00} = 1/15 \times 10^5 \text{ J}$$

حال با استفاده از رابطه توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می آید:

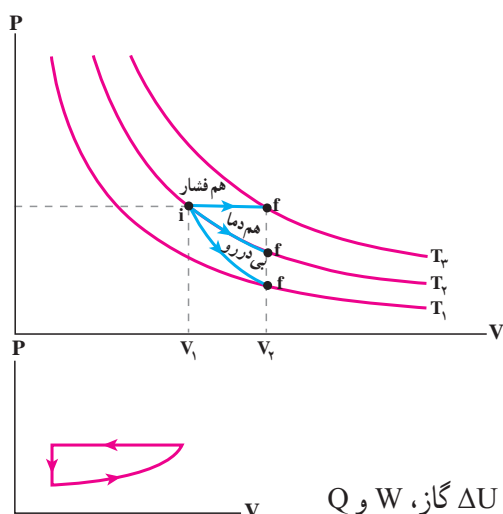
$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/15 \times 10^5 \text{ J}}{100 \text{ J/s}} = 1/15 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= Q_C + W \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} + 1/15 \times 10^5 \text{ J} \\ &= 5/76 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

پرسش‌ها

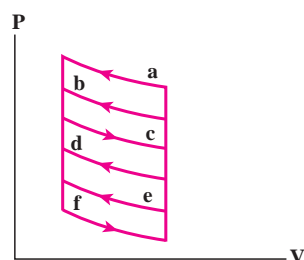
- ۱ در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟
- ۲ الف) نشان دهید در فرایند هم‌دما، هر چه دمای گاز کامل بیشتر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازه معین باید کار بیشتری انجام داد.
ب) نشان دهید در انبساط هم‌فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.
- ۳ ته یک سرنگ را می‌بندیم. آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟
- ۴ الف) آیا می‌توان با باز گذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح دهید.
ب) وجود برفک روی بدنه داخلی محفظه یخ‌ساز یخچال چه اثری بر کارکرد یخچال دارد؟



- ۵ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گاز کاملاً طی سه فرایند هم‌فشار، هم‌دما و بی‌دررو از V_1 به حجم بزرگ‌تر V_2 می‌رسد. الف) اندازه کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

- ۶ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه‌های جوش و انجماد آب کار می‌کند و بازده آن 70° درصد است. آیا ادعای این مخترع می‌تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

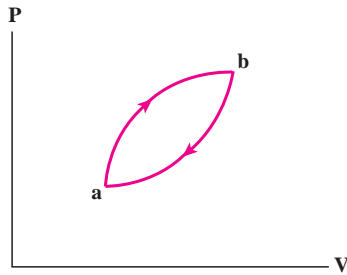
- ۷ برای چرخه گازی که نمودار $P-V$ آن در اینجا نشان داده شده است، ΔU ، Q و W مثبت است، یا منفی و یا برابر صفر است؟



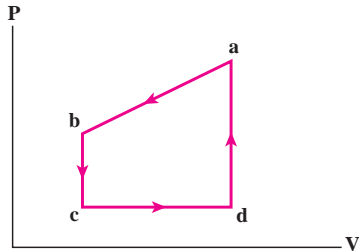
- ۸ شکل روبه‌رو نمودار $P-V$ ی چند چرخه متفاوت را که توسط گازی پیموده می‌شود، نشان می‌دهد. در کدام چرخه‌ها، کار انجام شده توسط گاز و محیط بیشینه است؟

مسئله‌ها

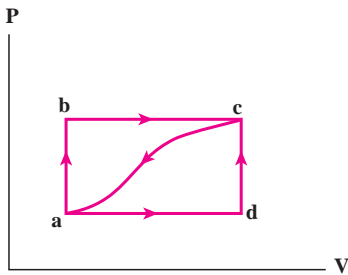
- ۱ حجم 50° مول از یک گاز کامل تک اتمی $8/3$ لیتر و فشار آن $1/5$ اتمسفر است. مقداری گرما به آن می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید. اگر به جای گرما دادن به گاز، حجم گاز را از طریق یک فرایند هم فشار نصف کنیم اکنون کار و گرمای مبادله شده چقدر می‌شود؟



- ۲ در شکل روبه‌رو فرایندی چرخه‌ای برای یک گاز نشان داده شده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است. ب) اگر قدرمطلق گرمای مبادله شده 400 J باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



- ۳ شکل روبه‌رو چرخه‌گازی را نشان می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز وقتی در مسیر abc از a به c می‌رود برابر 200 J - است. وقتی گاز از c به d می‌رود 180 J ، و وقتی از d به a می‌رود، 80 J گرما می‌گیرد. وقتی گاز از c به d می‌رود، چقدر کار انجام می‌دهد؟ ۴ یک ماشین کارنو بین دماهای 280 K و 360 K کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه 750 J گرما از منبع گرم می‌گیرد. الف) در هر چرخه، $|W|$ چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع سرد داده می‌شود؟



- ۵ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.

در این مسیر، گاز 90° ژول گرما می‌گیرد و 70° ژول کار انجام می‌دهد.

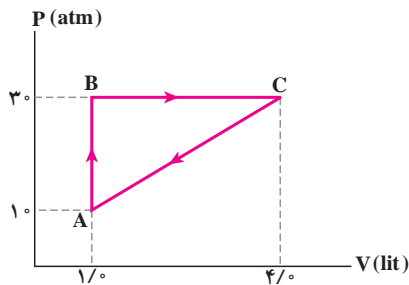
الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟

ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز

در مقایسه با مسیر abc بیشتر است یا کمتر؟ گرمای داده شده به گاز بیشتر است یا کمتر؟

پ) اگر گاز را از مسیر منحنی از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن

انرژی بگیریم؟



- ۶ گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای خالص داده شده به گاز در این چرخه چند ژول است؟

- ۷ یک ماشین بخار در هر دقیقه $1.5 \times 10^5\text{ MJ}$ گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و $1.0 \times 10^4\text{ MJ}$ گرما در چگالنده از دست می‌دهد.

الف) با فرض آرمانی بودن این ماشین، کار انجام شده توسط ماشین در هر دقیقه چند مگاژول است؟

ب) بازده این ماشین چقدر است؟

- ۸ یک ماشین گرمایی درون‌سوز در هر چرخه 8000 J گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و 2000 J کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت $5 \times 10^4\text{ J/g}$ است و ماشین در هر ثانیه 40° چرخه را می‌پیماید. با فرض آرمانی بودن ماشین، کمیت‌های زیر را حساب کنید.

الف) بازده ماشین،

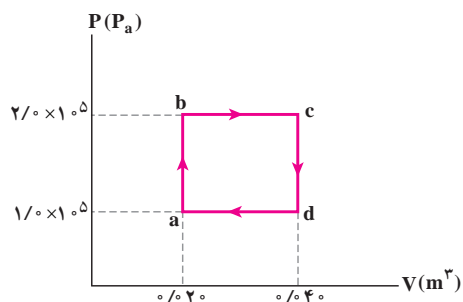
ب) گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت) توان ماشین.

- ۹ ضرب عملکرد یک یخ‌ساز (فریزر) $K = 4/^\circ$ است. این یخ‌ساز در هر ساعت، $1/5 \text{ kg}$ آب با دمای 2°C را به یخ با دمای $\theta_r = -1^\circ \text{C}$ تبدیل می‌کند. $C_{\text{آب}} = 4/2 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ، $C_{\text{یخ}} = 2/1 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ و $L_f = 3/3 \times 10^5 \text{ J/kg}$
- الف) چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟
- ب) یخ‌ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می‌کند؟
- پ) چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می‌شود؟

- ۱۰ یک کولر گازی در هر دقیقه $9/0 \times 10^4 \text{ J}$ گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت، $1/3 \times 10^5 \text{ J}$ گرما به فضای بیرون می‌دهد.
- الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟
- ب) ضرب عملکرد آن چند است؟



- ۱۱ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه‌ای را مطابق شکل زیر می‌پیماید. مطلوب است:
- الف) کار انجام شده توسط ماشین گرمایی در پیمودن یک چرخه،
- ب) گرمای مبادله شده در فرایند abc،
- پ) بازده ماشین گرمایی،
- ت) بازده ماشین کارنویی که بین بالاترین و پایین‌ترین دمای چرخه عمل می‌کند.

- ۱۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هریک بین منبع‌های با دمای ثابت 300 K و 400 K کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از:

| | |
|---|---------|
| $W = -40 \text{ J}$ ، $Q_C = -170 \text{ J}$ ، $Q_H = 2000 \text{ J}$ | ماشین A |
| $W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 500 \text{ J}$ | ماشین B |
| $W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 600 \text{ J}$ | ماشین C |
| $W = -10 \text{ J}$ ، $Q_C = -90 \text{ J}$ ، $Q_H = 100 \text{ J}$ | ماشین D |

- الف) کدام یک از این ماشین‌ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می‌کنند؟
- ب) کدام یک از این ماشین‌ها قابل ساخت هستند؟

- ۱۳ بازده یک ماشین آرمانی ۲۵ درصد است و در هر چرخه $8/2 \times 10^3 \text{ J}$ کار انجام می‌دهد. الف) Q_H و $|Q_C|$ را در هر چرخه به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به ۳۰ درصد افزایش یابد، Q_H و $|Q_C|$ به ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟
- ۱۴ می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب اقیانوس در دمای 27°C و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای 7°C باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به دست آورد (بازده چرخه ماشین کارنو) چقدر است؟