



### نیروگاه شهید سلیمی نکا

نیروگاه شهید سلیمی نکا واقع در استان مازندران از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های حرارتی در خاورمیانه است که به منظور تأمین بخش قابل توجهی از برق کشور، طراحی و نصب گردیده است. ظرفیت اسمی نیروگاه جمعاً ۳۵۰۲ مگاوات است. قسمت‌های اصلی نیروگاه عبارتند از: دیگ بخار، ساختمان میانی، سالن توربین، مبدل‌ها و ساختمان‌های کمکی. سوخت اصلی نیروگاه، گاز طبیعی و سوخت دوم آن نفت کوره یا مازوت است.

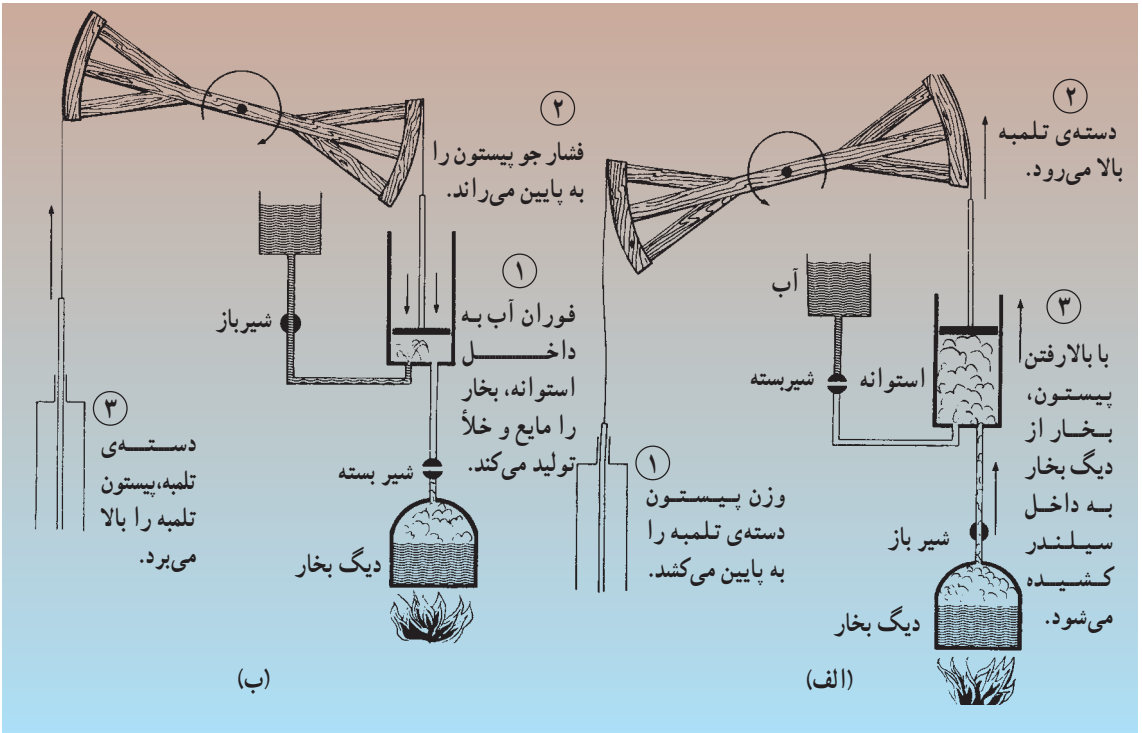
## ترمودینامیک

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که انواع مختلف انرژی می‌توانند به یک‌دیگر تبدیل شوند، هنگامی که جسمی روی سطح حرکت می‌کند، مقداری از انرژی جنبشی آن به انرژی درونی جسم و سطح تبدیل می‌شود، یا وقتی ظرف آبی را در مقابل نور آفتاب قرار می‌دهیم، ظرف و آب گرم‌تر می‌شوند. در این حالت، بخشی از انرژی نورانی به انرژی درونی ظرف و آب تبدیل می‌شود. برخی از این تبدیل‌ها خودبه‌خود رخ می‌دهند ولی برای وقوع تبدیل‌های دیگر، دستگاه‌هایی طراحی و ساخته شده‌اند؛ مثلاً در گذشته، برای ایجاد روشنایی از تبدیل انرژی شیمیایی موجود در شمع یا نفت به انرژی نورانی استفاده می‌شد ولی بعدها که انسان به انرژی الکتریکی دست یافت، لامپ را اختراع کرد که انرژی الکتریکی را به انرژی نورانی تبدیل می‌کند. موتورهای الکتریکی که در وسایل خانگی نظیر جاروبرقی، پنکه، یخچال و ... به کار می‌روند، برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی طراحی و ساخته شده‌اند. در فصل ۴ در مورد این موتورها صحبت خواهیم کرد.

در این فصل به بررسی وسایلی می‌پردازیم که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این وسیله‌ها ماشین‌های گرمایی نامیده می‌شوند. در شکل ۱-۱ طرح یکی از اولین ماشین‌های گرمایی (ماشین نیوکامن) نشان داده شده است. در این ماشین، گرمایی که به دیگ بخار داده می‌شود برای به کار انداختن یک تلمبه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل ۱-۱ الف در اثر وزن پیستون دسته‌ی تلمبه به طرف پایین حرکت می‌کند و بخار آب وارد استوانه می‌شود. با باز شدن شیر در شکل ۱-۱ ب، آب به داخل استوانه فوران می‌کند که در نتیجه‌ی آن مقداری از بخار، مایع می‌شود و فشار گاز در داخل استوانه کاهش می‌یابد. سپس فشار هوا پیستون را به طرف پایین می‌راند و دسته‌ی دیگر تلمبه به طرف بالا کشیده می‌شود. بدین ترتیب، حرکت تلمبه ادامه می‌یابد.

ماشین‌های گرمایی در طول زمان کامل‌تر شده‌اند و امروزه ما با انواع پیشرفته‌ی آن‌ها سروکار داریم. برای آشنایی با طرز کار این ماشین‌ها و این که از چه قانون‌هایی پیروی می‌کنند، لازم است با علم ترمودینامیک آشنا شویم.



شکل ۱-۱- ماشین نیوکامن

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در مایع‌ها و گازها، مولکول‌ها آزادانه به اطراف حرکت و با یکدیگر برخورد می‌کنند و مکان و سرعت آن‌ها پیوسته در حال تغییر است. اکنون ممکن است این سؤال مطرح شود که برای درک رفتار یک گاز یا مایع، آیا لازم است از چگونگی حرکت تک تک مولکول‌ها اطلاع داشته باشیم؟

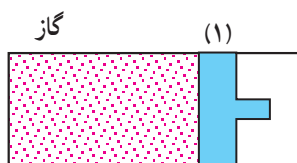
بررسی‌های تجربی و نظری نشان داده‌اند که رفتار ماده را می‌توان برحسب کمیت‌هایی چون فشار، دما، گرما، ویژه و... توضیح داد. این کمیت‌ها به وضعیت ماده در مقیاس بزرگ بستگی دارند و به جزئیات رفتار تک تک مولکول‌ها وابسته نیستند. این موضوع را می‌توان در این مثال مشاهده کرد که دمای یک لیوان آب که در اتاق به تعادل گرمایی رسیده است، ثابت می‌ماند؛ در حالی که مولکول‌های تشکیل دهنده‌ی آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتشان تغییر می‌کند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، کمیت‌های ماکروسکوپی نامیده می‌شوند. علم ترمودینامیک رفتار ماده را برحسب این کمیت‌ها توصیف می‌کند؛ برای مثال، در فیزیک ۲ دیدیم که اگر به جرم  $m$  و گرمای ویژه  $c$  مقدار  $Q$  گرما بدهیم، دمای آن به

اندازه‌ی  $\Delta T = \frac{Q}{mc}$  افزایش می‌یابد. در این مثال ما برای توضیح دادن چگونگی رفتار جسم از کمیت‌های ماکروسکوپیک دما، گرما و گرمای ویژه استفاده کرده‌ایم؛ یعنی علم ترمودینامیک را برای این منظور به کار برده‌ایم.

در این فصل، به بررسی و توصیف قانون‌های ترمودینامیک و کاربرد آن‌ها در ماشین‌های گرمایی می‌پردازیم. به همین منظور، تحولات ماده‌ی خاصی را که معمولاً به صورت گاز یا مایع است، در نظر می‌گیریم. این ماده را دستگاه می‌نامیم. آنچه در اطراف دستگاه قرار دارد و می‌تواند با آن تبادل انرژی داشته باشد، محیط نامیده می‌شود.

## ۱-۱- معادله‌ی حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۲-۱ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در این جا 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 همه‌ی نقاط گاز یکسان (مثلاً برابر  $T_1$  و  $P_1$ ) خواهد بود. در این صورت، می‌گوییم که گاز در حالت تعادل است.



شکل ۲-۱

### فعالیت ۱-۱

اگر دما و فشار در داخل گاز در شکل ۲-۱ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟ این پرسش را در کلاس به بحث بگذارید.

در حالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، دما و حجم گاز مقدار مشخصی دارد؛ مثلاً، هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۲-۱ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت‌ها به ترتیب برابر با  $P_1$ ،  $T_1$  و  $V_1$  است. حال اگر گاز را گرم کنیم یا پیستون را به طرف راست یا چپ جابه‌جا

کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همه‌ی آن‌ها) تغییر خواهد کرد و اگر مدتی نسبتاً طولانی صبر کنیم، این کمیت‌ها مقدارهای مشخص دیگری چون  $P_2$ ،  $T_2$  و  $V_2$  را اختیار خواهند کرد. از این کمیت‌ها برای توصیف حالت دستگاه می‌توان استفاده کرد و گفت که دستگاه در ابتدا در حالتی بود که کمیت‌های فشار، دما و حجم به ترتیب مقدارهای  $P_1$ ،  $T_1$  و  $V_1$  را داشتند. سپس در اثر گرم شدن یا جابه‌جایی پیستون، دستگاه به حالتی تحول یافت که در آن این کمیت‌ها مقادیر  $P_2$ ،  $T_2$  و  $V_2$  را اختیار کردند. این کمیت‌های ماکروسکوپی که حالت دستگاه را می‌توان برحسب آن‌ها توصیف کرد، متغیرهای ترمودینامیکی نامیده می‌شوند. متغیرهای ترمودینامیکی از یک‌دیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند؛ مثلاً، اگر در شکل ۱-۲ با ثابت نگه‌داشتن پیستون (یعنی، در حجم ثابت) گاز را تادمای معینی گرم کنیم، فشار آن تغییر خواهد کرد و مقدار متفاوتی خواهد داشت. حال اگر بخواهیم این مقدار فشار باز هم تغییر کند، باید دما یا حجم یا هر دو را تغییر دهیم.

رابطه‌ی بین متغیرهای ترمودینامیکی معادله‌ی حالت نامیده می‌شود. معادله‌ی حالت یک دستگاه در حالت کلی بسیار پیچیده است ولی آزمایش نشان می‌دهد هنگامی که گازها بسیار رقیق‌اند، معادله‌ی حالت آن‌ها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این حالت، گاز را گاز کامل می‌نامند.

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که برای مقدار معینی گاز کامل نسبت  $\frac{PV}{T}$  مقدار ثابتی

دارد. این مقدار ثابت به مقدار گاز بستگی دارد و مستقل از نوع گاز است. در نتیجه،

$$\frac{PV}{T} \propto n \quad (1-1)$$

که در آن  $n$  مقدار گاز برحسب مول است که به صورت نسبت جرم گاز ( $m$ ) به جرم مولکولی آن ( $M$ ) تعریف می‌شود.

$$n = \frac{m}{M} \quad (2-1)$$

تعداد مولکول‌های موجود در هر مول از یک ماده برابر با عدد آووگادرو است. ثابت تناسب در

رابطه‌ی ۱-۱ ثابت گازها نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با  $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$ .

بنابراین، معادله‌ی حالت گاز کامل که کمیت‌های  $P$ ،  $V$  و  $T$  را به یک‌دیگر مربوط می‌کند،

به صورت زیر است:

$$PV = nRT \quad (3-1)$$

## مثال ۱-۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر، دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به ابعاد  $4\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$  چند مول هوا وجود دارد؟  
حل: حجم اتاق برابر با  $36\text{m}^3$  است.

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 10^5 \times 36}{8.314 \times 273} = 1589 \text{ mol}$$

## ۱-۲ فرایندهای ترمودینامیکی

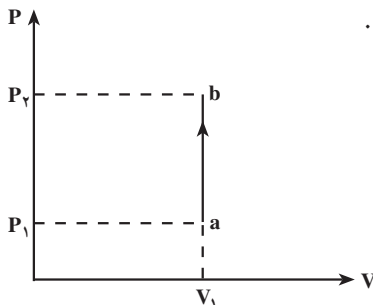
در بخش قبل دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می‌توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی  $P$ ،  $V$  و  $T$  بیان کرد. هم‌چنین، در اثر گرم شدن گاز یا جابه‌جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می‌کند و گاز به حالت دیگری می‌رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می‌رود، می‌گوییم که یک فرایند ترمودینامیکی انجام شده است.

برای مثال، در بخش قبل دیدیم که گاز ابتدا در حالت  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  بود و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه‌داشتن حجم، گاز به حالت  $P_2$ ،  $V_1$  و  $T_2$  رسید. 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.

## ۲-۱ فعالیت

چند فرایند ترمودینامیکی را که در اطراف شما رخ می‌دهد، ذکر کنید.

فرایندهای ترمودینامیکی را می‌توان در دستگاه مختصات  $P$ - $V$  (که بر روی یک محور  $P$  و روی محور دیگر  $V$  مشخص می‌شود) و یا دستگاه  $V$ - $T$  یا دستگاه  $P$ - $T$  نمایش داد. نمودار  $P$ - $V$  فرایند مثال بالا، در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱

## تمرین ۱-۱

نمودار V-T را برای مثال بالا رسم کنید.

به همین طریق نیز می‌توان یک فرایند ترمودینامیکی انجام داد که در آن با جابه‌جا کردن پیستون گاز منبسط یا متراکم شود. در این فرایند نیز می‌توان نمودارهای مربوط را رسم کرد. در ادامه‌ی فصل با فرایندهای ترمودینامیکی مختلف آشنا می‌شویم.

لازم به تذکر است که ترمودینامیک فقط به بررسی وضعیت ماده در حالت‌های تعادل می‌پردازد؛ بنابراین، برای بررسی رفتار گاز با استفاده از این علم، باید فرایند (مثلاً گرم کردن یا جابه‌جا کردن پیستون) را آن قدر آهسته انجام دهیم که گاز در هر لحظه، به حالت تعادل بسیار نزدیک باشد و در نتیجه، متغیرهای ترمودینامیکی  $P$ ،  $V$  و  $T$  گاز در حین فرایند در همه جا یکسان و مقدار مشخصی داشته باشند. در این صورت، با معلوم بودن متغیرهای ترمودینامیکی می‌توان همه‌ی مراحل فرایند را در نمودارهای مربوط نمایش داد.

## ۱-۳- تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق گرما و کار صورت می‌گیرد.

**الف - گرما:** در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرما انرژی‌ای است که به علت اختلاف دما بین دو جسم مبادله می‌شود. به عبارت دیگر گرما، هنگامی بین محیط و دستگاه مبادله می‌شود که این دو با هم اختلاف دما داشته باشند. در این کتاب بنا به قرارداد گرمایی را که جسم (دستگاه) می‌گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان داده‌ایم. در این فصل نیز این قرارداد را رعایت می‌کنیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، معمولاً فرض می‌شود 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 ملاحظه‌ای تغییر نکند؛ مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می‌توان منبع گرما در نظر گرفت. با سرد شدن چای، دمای اتاق به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند.

## پرسش ۱-۱

آیا از مخلوط آب و یخ می‌توان به عنوان منبع گرما استفاده کرد؟

ب- کار: در بخش قبل دیدیم که ممکن است در یک فرایند ترمودینامیکی، حجم گاز نیز تغییر کند و گاز متراکم یا منبسط شود؛ مثلاً، برای متراکم کردن گاز داخل استوانه در شکل ۱-۲ باید به پیستون نیرو وارد و آن را به طرف چپ جابه‌جا کنیم. در این صورت، همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندیم، کار انجام داده‌ایم. در این مثال، می‌توان گفت که تبادل انرژی بین دستگاه و محیط از طریق کار صورت گرفته است.

### فعالیت ۱-۳

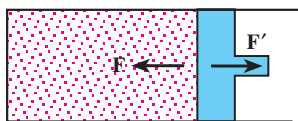
با انگشت خود انتهای یک سرنگ (یا تلمبه‌ی دوچرخه) را مسدود کنید و الف) سعی کنید گاز داخل آن را متراکم کنید؛ ب) پیستون سرنگ را بکشید و سعی کنید گاز داخل آن را منبسط و سپس آن را رها کنید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.

در فعالیت ۱-۳ در حالت الف گاز بر پیستون نیرو وارد می‌کند و ما برای متراکم کردن گاز باید حداقل نیرویی برابر با این نیرو به پیستون وارد کنیم. در حالت ب، پیستون پس از رهاشدن به وضعیت اولیه برمی‌گردد. در این حالت نیز گاز به پیستون نیرو وارد می‌کند ولی نیرویی که محیط (به علت فشار هوا) به پیستون وارد می‌کند، بیش‌تر است. در فعالیت ۱-۳ حضور دو نیرو را به ترتیب در بخش الف و ب تجربه می‌کنیم:

۱) نیروی  $F$  که محیط (که پیستون را نیز شامل می‌شود) به گاز وارد می‌کند؛

۲) نیروی  $F'$  که گاز به محیط وارد می‌کند (شکل ۱-۴).

این دو نیرو کنش و واکنش‌اند و اندازه‌ی آن‌ها با یک‌دیگر برابر است. هنگامی که پیستون جابه‌جا می‌شود، هر دوی این نیروها کار انجام می‌دهند.



شکل ۱-۴

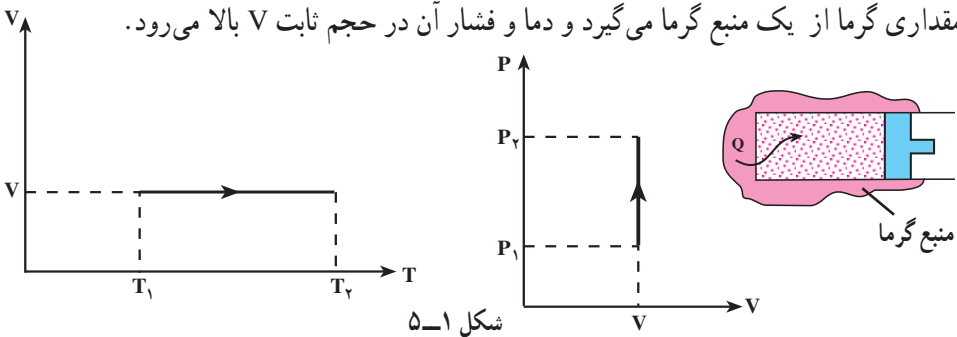
علامت کار این نیروها مخالف یک‌دیگر است؛ مثلاً در فعالیت ۱-۳ الف کار محیط روی دستگاه مثبت و کار دستگاه بر روی محیط منفی است (چرا؟). کار محیط روی دستگاه را با  $W$  و کار دستگاه روی محیط را با  $W'$  نشان می‌دهیم. با توجه به مطالب گفته‌شده،  $W' = -W$  است. در تراکم  $W > 0$  و در انبساط  $W < 0$  است.



## ۱-۴- فرایندهای خاص

در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص (مثلاً حالت‌های a و b در شکل ۱-۳) فرایندهای متفاوتی می‌تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارند که کاربرد آن‌ها وسیع‌تر است؛ از جمله: فرایند هم‌حجم، فرایند هم‌فشار، فرایند هم‌دما و فرایند بی‌دررو. در ادامه، به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

**الف) فرایند هم‌حجم:** حجم گاز در حین این فرایند ثابت نگه داشته می‌شود. در فرایند هم‌حجم، کار صفر است (چرا؟) و گاز فقط می‌تواند با محیط تبادل گرما کند. در شکل ۱-۵ نمودارهای P-V و P-T برای یک فرایند هم‌حجم نشان داده شده است. طی این فرایند، گاز مقداری گرما از یک منبع گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V بالا می‌رود.



اگر در این مثال، گاز به صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، نمودارهای شکل ۱-۵ به چه صورت درمی‌آیند؟

### مثال ۱-۲

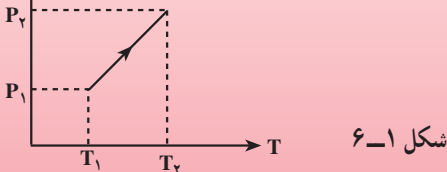
نمودار P-T فرایند شکل ۱-۵ را در صورتی که گاز کامل باشد، رسم کنید.

**حل:** چون گاز کامل است، با استفاده از رابطه‌ی ۱-۳ داریم:

$$P = \frac{nRT}{V}$$

از آن‌جا که  $\frac{nR}{V}$  ثابت است، رابطه‌ی بالا معادله‌ی یک خط راست است که

امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این معادله در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است.



اکنون به محاسبه‌ی گرمایی که در فرایند هم حجم به دستگاه داده می‌شود، می‌پردازیم.

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه‌ی  $\Delta T$  با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$Q = mc\Delta T \quad (4-1)$$

در این رابطه،  $m$  جرم جسم و  $c$  گرمای ویژه‌ی آن است. باید توجه داشت که در مورد گازها مقدار گرمای ویژه به نوع فرایند بستگی دارد. در نتیجه، در رابطه‌ی ۴-۱ باید گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم حجم را، که در زیر تعریف می‌شود، قرارداد.

گرمای ویژه‌ی یک گاز در حجم ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در حجم ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. گرمای ویژه در حجم ثابت را با  $c_v$  نشان می‌دهیم؛ بنابراین، رابطه‌ی ۴-۱ به صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = mc_v\Delta T \quad (5-1)$$

معمولاً مقدار گازها را برحسب مول بیان می‌کنند. در نتیجه، اگر با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱ جرم گاز را برحسب مول قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Q = nMc_v\Delta T \quad (6-1)$$

کمیت  $Mc_v$  را با  $C_{MV}$  نشان می‌دهند و آن را ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت می‌نامند.  $C_{MV}$  مقدار گرمایی است که در حجم ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. با استفاده از این کمیت، رابطه‌ی ۶-۱ به صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MV}\Delta T \quad (7-1)$$

ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در ستون سوم جدول ۱-۱ آمده است. با تقریب خوبی می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک اتمی برابر با  $\frac{3}{2}R$ ، برای گازهای دو اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$  است.

### مثال ۳-۱

به  $0.2^\circ$  مول از گازهای He،  $O_2$  و  $CO_2$ ، در حجم ثابت،  $100^\circ$  ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چه قدر افزایش می‌یابد؟  
حل: از رابطه‌ی ۱-۷ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{n C_{MV}}$$

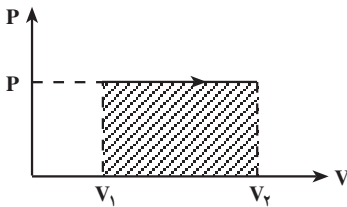
با استفاده از جدول ۱-۱ مقادیر  $C_{MV}$  را برای این گازها در رابطه‌ی بالا قرار می‌دهیم.

$$\Delta T = \frac{100}{0.2(12/5)} = 40^\circ K \quad \text{برای He}$$

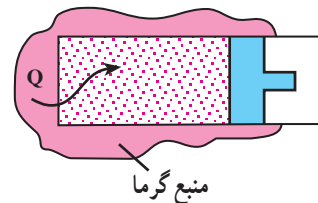
$$\Delta T = \frac{100}{0.2(21/2)} = 23.8^\circ K \quad \text{برای } O_2$$

$$\Delta T = \frac{100}{0.2(28/5)} = 17.9^\circ K \quad \text{برای } CO_2$$

ب- فرایند هم فشار: فشار گاز در حین این فرایند ثابت می‌ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۱-۷ الف در داخل استوانه‌ای که با یک منبع گرما در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار  $P$  و حجم  $V_1$  در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۷

در این صورت، فشار گاز با فشار محیط برابر است (چرا؟) دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که در نتیجه‌ی آن گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به سمت راست جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش به صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته

به طرف راست حرکت می‌کند. در این حالت، شتاب حرکت پیستون بسیار کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. در نتیجه، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند، باید با نیرویی که محیط به پیستون وارد می‌کند، برابر باشد. بنابراین، می‌توان گفت که در حین گرم‌آدم‌آدن همواره فشار گاز با فشار محیط برابر است؛ یعنی، در حین فرآیند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودار P-V این فرآیند در شکل ۷-۱ ب نشان داده شده است.

در این فرآیند، هم گرما و هم کار مبادله می‌شوند. در ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز P باشد، گاز در حین فرآیند نیروی PA را به پیستون وارد می‌کند که در آن A مساحت پیستون است. اگر جابه‌جایی پیستون برابر با d باشد، با استفاده از رابطه‌ی ۴-۱ در فیزیک ۲ و آزمایشگاه، کار  $W'$  که دستگاه روی محیط انجام می‌دهد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$W' = (PA)d$$

ولی  $Ad$ ، تغییر حجم استوانه است که برابر است با  $\Delta V = V_2 - V_1$ . در نتیجه،

$$W' = P\Delta V \quad (8-1)$$

در بخش قبل دیدیم که کار محیط روی دستگاه (W) و کار دستگاه روی محیط ( $W'$ ) برابرند و علامت مخالف دارند. در نتیجه داریم:

$$W = -P\Delta V \quad (9-1)$$

## تمرین ۲-۱

در بخش ۱-۳ دیدیم که W در تراکم مثبت و در انبساط منفی است. نشان دهید که این نتیجه از رابطه‌ی ۹-۱ نیز به دست می‌آید.

## پرسش ۲-۱

علامت  $W'$  در تراکم و انبساط گاز چیست؟

با توجه به شکل ۷-۱ ب، حاصل ضرب  $P\Delta V$  برابر با سطح زیر نمودار P-V (مساحت هاشورزده) است. این نتیجه برای حالت خاص فرآیند هم‌فشار به دست آمد ولی می‌توان نشان داد که در مورد تمام فرآیندهای دیگر نیز درست است. یعنی، در هر فرآیند، قدرمطلق کار انجام‌شده را با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار P-V می‌توان به دست آورد. علامت کار را نیز می‌توان با

توجه به ملاحظات صفحه‌ی قبل تعیین کرد. در آنچه از این پس می‌آید، که به جز در مواردی که به صراحت قید شود، منظور از کار،  $W$ ، یعنی کار انجام‌شده بر روی دستگاه است.

### مثال ۴-۱

در یک فرایند هم‌فشار یک لیتر گاز کامل  $O_2$  در دمای  $300\text{K}$  مقداری گرما از دست می‌دهد و حجم آن در فشار یک اتمسفر به  $0/9$  حجم اولیه‌اش می‌رسد. دمای نهایی و کار انجام‌شده را محاسبه کنید.

حل: چون حجم گاز به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{1}{300} = \frac{0/9}{T_2}$$

$$T_2 = 270\text{K}$$

در این فرایند، کار انجام‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۱-۹، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$W = P\Delta V = 1 \times 10^5 (0/9 - 1) \times 10^{-3} = 10\text{J}$$

اکنون به محاسبه‌ی گرمای مبادله‌شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. در این حالت نیز می‌توانیم از رابطه‌ی ۴-۱ استفاده کنیم ولی همان‌طور که در مورد فرایند هم‌حجم انجام دادیم، باید از گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم‌فشار که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده کنیم. گرمای ویژه‌ی یک گاز در فشار ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در فشار ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. گرمای ویژه در فشار ثابت را با  $C_p$  نشان می‌دهیم؛ بنابراین، رابطه‌ی ۴-۱ در مورد فرایند هم‌فشار به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (10-1)$$

در این‌جا نیز مقدار گاز را برحسب مول بیان می‌کنیم و به جای  $m$  مقدار  $nM$  را در رابطه‌ی ۱۰-۱ قرار می‌دهیم. سپس کمیت  $Mc_p$  را با  $C_{MP}$  نمایش می‌دهیم که ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت نامیده می‌شود.  $C_{MP}$  مقدار گرمایی است که در فشار ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. در این صورت، رابطه‌ی ۱۰-۱ به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MP}\Delta T \quad (11-1)$$

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در ستون چهارم جدول ۱-۱ آمده است. می توان نشان داد که با تقریب خوبی  $C_{MP}$  به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$ ، برای گازهای دو اتمی برابر با  $\frac{7}{2}R$  است.

### مثال ۵-۱

مقدار گرمایی را که گاز  $O_2$  در مثال ۱-۴ از دست می دهد، محاسبه کنید.  
 حل: مقدار  $n$  در مثال ۱-۴ برابر است با:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 10^5 \times 1 \times 10^{-3}}{8.314 \times 300} = 0.04 \text{ مول}$$

با استفاده از جدول ۱-۱ و رابطه‌ی ۱-۱۱ داریم:

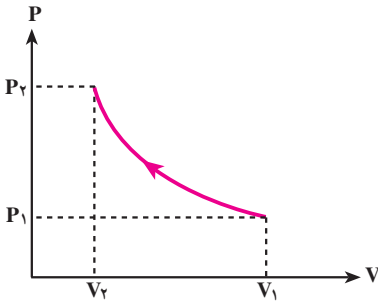
$$Q = nC_{MP}(T_2 - T_1) = 0.04(29/4)(270 - 300) = 35/3 J$$

جدول ۱-۱ – ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در حجم ثابت و در فشار ثابت

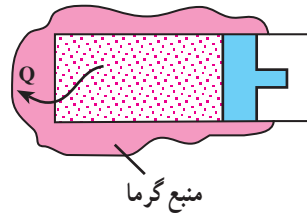
$C_{MP}$ J/mol K	$C_{MV}$ J/mol K	گاز	
۲۰/۸	۱۲/۵	He	گازهای تک اتمی
۲۰/۸	۱۲/۵	Ar	
۲۸/۸	۲۰/۴	$H_2$	گازهای دو اتمی
۲۹/۸	۲۰/۸	$N_2$	
۲۹/۴	۲۱/۲	$O_2$	
۳۷	۲۸/۵	$CO_2$	گازهای چند اتمی
۳۶/۸	۲۷/۸	$NH_3$	

پ – فرایند هم دما: دمای دستگاه در حین این فرایند ثابت می ماند؛ مثلاً، برای انجام تراکم هم دما در یک گاز، می توان استوانه‌ی شکل ۱-۲ را مطابق با شکل ۱-۸ الف در تماس با یک منبع گرما قرار داد و گاز را بسیار آهسته متراکم کرد. قبل از تراکم، گاز و منبع در حالت تعادل اند.

در نتیجه‌ی تراکم، دمای گاز اندکی بالا می‌رود و اختلاف دمای آن با منبع سبب می‌شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد و دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه‌ی تراکم، گاز مقداری گرما از دست می‌دهد و دمای آن در حین تراکم ثابت باقی می‌ماند. نمودار P-V ی این تراکم در شکل ۸-۱ ب نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸-۱

### پرسش ۳-۱

در فرایند هم‌دما (شکل ۸-۱) علامت Q و W چیست؟

### فعالیت ۴-۱

انتهای یک سرنگ را مسدود و آنرا وارد مخلوط آب و یخ کنید. پس از مدتی گاز را به آرامی متراکم کنید. آیا می‌توان این فرایند را هم‌دما در نظر گرفت؟

### مثال ۶-۱

۲/۱ مول از یک گاز کامل در دمای  $300\text{ K}$  در داخل استوانه‌ای به حجم ۵ لیتر قرار دارد. گاز را به‌طور هم‌دما متراکم می‌کنیم. مطلوب است: (الف) فشار گاز در حجم‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لیتر؛ (ب) رسم نمودار P-V ی این فرایند. حل: (الف) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل داریم:

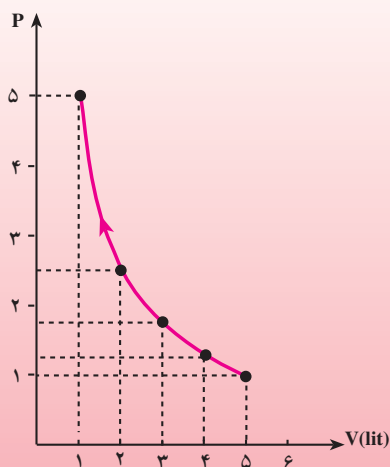
$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{2 \times 8.314 \times 300}{5 \times 10^{-3}} = 99600 \approx 1 \text{ atm}$$

به همین ترتیب، برای حجم‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لیتر به ترتیب فشارهای ۱/۲۵،

۱/۷، ۲/۵ و ۵ آتمسفر به دست می‌آیند.

ب) با استفاده از مقادیرهای بالا به کمک نقطه‌یابی نمودار P-V ی این فرایند در

شکل ۹-۱ رسم شده است.



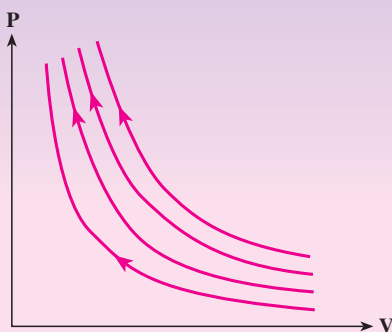
شکل ۹-۱

### تمرین ۳-۱

در شکل ۱۰-۱ نمودار P-V ی مربوط به تراکم هم‌دمای یک گاز در دماهای

$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$  نشان داده شده است. تعیین کنید که هر نمودار مربوط به کدام

دماست.



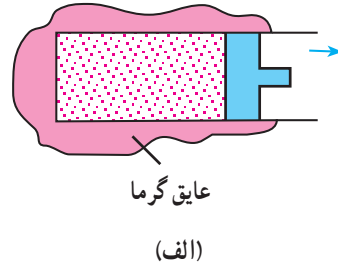
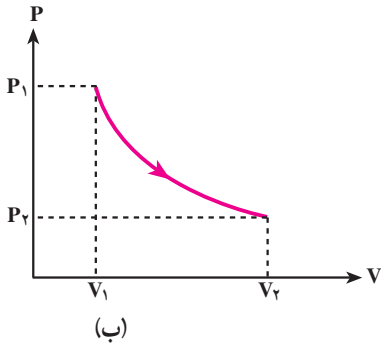
شکل ۱۰-۱

ت- فرایند بی‌دررو: در این فرایند بین دستگاه و محیط گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن

این فرایند، باید دستگاه را مطابق شکل ۱۱-۱ الف عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را بسیار

آهسته انجام دهیم. نمودار P-V ی انبساط بی‌درروی گاز در شکل ۱۱-۱ ب نشان داده شده است.





شکل ۱۱-۱

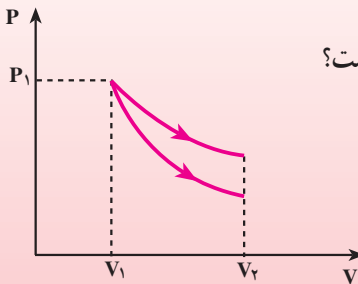
## پرسش ۴-۱

چگونه می‌توان تراکم گاز را در فعالیت ۴-۱ به صورت بی‌دررو انجام داد؟ توضیح دهید.

هنگامی که یک گاز را به سرعت متراکم (یا منبسط) می‌کنیم، گاز فرصت تبادل گرما را با محیط پیدا نمی‌کند. در این صورت نیز می‌توان گفت که فرایند به صورت بی‌دررو انجام شده است.

## مثال ۷-۱

گازی را در حجم  $V_1$  و فشار  $P_1$  در نظر بگیرید. آن را یک بار به صورت هم‌دما و یک بار به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. نمودارهای مربوط در شکل ۱۲-۱ رسم شده‌اند. الف) کدام یک از نمودارها به فرایند بی‌دررو و کدام یک به فرایند هم‌دما مربوط است؟



ب) در کدام فرایند  $|W|$  بیش‌تر است؟

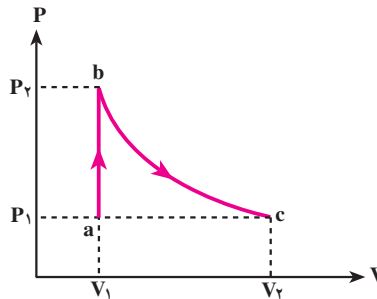
شکل ۱۲-۱

حل: الف) در انبساط هم‌دما فشار گاز کاهش می‌یابد (چرا؟) ولی چون گاز در این فرایند با یک منبع گرما در تماس است، مقداری گرما از منبع گرما می‌گیرد و در نتیجه کاهش فشار در آن در مقایسه با فرایند بی‌دررو، که در طی آن گاز گرما نمی‌گیرد، کم‌تر است. بنابراین، نمودار هم‌دما در بالای نمودار بی‌دررو قرار می‌گیرد. ب) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیش‌تر است،  $|W|$  برای این فرایند مقدار بیش‌تری دارد.

## تمرین ۴-۱

نمودارهای P-V مربوط به تراکم هم‌دما و تراکم بی‌درروی یک گاز کامل را از فشار و حجم اولیه  $P_1$  و  $V_1$  رسم کنید.

دستگاه‌ها می‌توانند فرایندی را طی کنند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱۳-۱ می‌بینید، از دو فرایند هم‌حجم و بی‌دررو تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه 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.

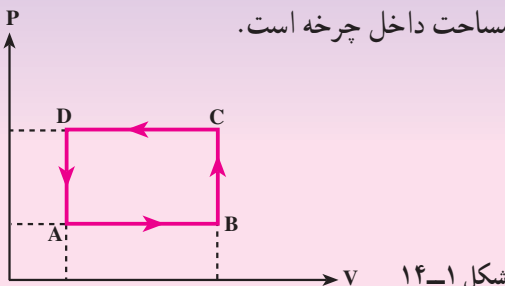


شکل ۱۳-۱

در این مثال، گاز را مثلاً می‌توان از طریق یک فرایند هم‌فشار به حالت اولیه (نقطه‌ی a) برگرداند. فرایندی که در طول آن دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد، چرخه نامیده می‌شود.

## تمرین ۵-۱

الف) در چرخه‌ی شکل ۱۴-۱ توضیح دهید که در هر مرحله، چه فرایندی انجام می‌شود. ب) تعیین کنید که کار انجام شده در چرخه مثبت است یا منفی؟ پ) نشان دهید که کار کل برابر با مساحت داخل چرخه است.



شکل ۱۴-۱

## تمرین ۷-۱

گاز کاملی را با حجم و فشار اولیه  $V_1$  و  $P_1$  در نظر بگیرید که چرخه‌ای به شرح زیر را طی می‌کند. (۱) حجم و فشار آن از طریق یک انبساط هم‌دما به  $V_2$  و  $P_2$  می‌رسد. (۲) سپس حجم و فشار آن از طریق یک انبساط بی‌دررو به  $V_3$  و  $P_3$  می‌رسد. (۳) در اثر یک تراکم هم‌دما حجم و فشار آن به  $V_4$  و  $P_4$  می‌رسد؛ (۴) سپس یک تراکم بی‌دررو طوری انجام می‌شود که حجم و فشار گاز را به مقدار اولیه‌ی آن‌ها برمی‌گرداند. این چرخه را در دستگاه  $P-V$  رسم کنید. (این چرخه، چرخه‌ی کارنو نامیده می‌شود).

## ۵-۱- انرژی درونی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن ماده برابر است. به‌طور دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی  $U$  با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل مولکول‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با  $P$ ،  $T$  تعیین می‌شود، مقدار  $U$  مشخص است و به این متغیرها بستگی دارد. در مورد گاز کامل می‌توان نشان داد که انرژی درونی فقط تابع دمای مطلق گاز است. هنگامی که دستگاه در یک فرایند با مبادله‌ی کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه، که مثلاً انرژی درونی آن  $U_1$  است، به یک حالت دیگر می‌رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار  $U_2$  برسد. مقدار تغییر انرژی درونی، یعنی  $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به مقدار گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع قانون اول ترمودینامیک است.

## پرسش ۵-۱

تغییر انرژی درونی یک دستگاه در یک چرخه چه قدر است؟

## ۶-۱- قانون اول ترمودینامیک

این قانون در واقع همان قانون پایستگی انرژی است که در مورد فرایندهای ترمودینامیکی به کار

می‌رود. 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 رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$\Delta U = Q + W \quad (12-1)$$

این رابطه قانون اول ترمودینامیک نامیده می‌شود. در این رابطه،  $Q$  می‌تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد.  $W$  نیز می‌تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ( $\Delta U > 0$ )، یا کاهش ( $\Delta U < 0$ ) یابد یا این که تغییر نکند ( $\Delta U = 0$ ).

### مثال ۸-۱

در مثال‌های ۴-۱ و ۵-۱ تغییر انرژی درونی گاز چه قدر است؟  
 حل: در مثال‌های ۴-۱ و ۵-۱ دیدیم که دستگاه  $35/3$  J گرما از دست می‌دهد و کار انجام شده بر روی دستگاه  $10$  J است. تغییر انرژی درونی دستگاه از رابطه‌ی ۱۲-۱ به دست می‌آید:

$$\Delta U = Q + W = -35/3 + 10 = -25/3 \text{ J}$$

### تمرین ۷-۱

دستگاهی در یک انبساط بی‌دررو  $5$  J کار بر روی محیط انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی آن چه قدر است؟

گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می‌شوند، فقط در حین فرایند معنا دارند. در واقع، می‌توان گفت که انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می‌گیرد. پس از اتمام فرایند، انرژی‌های منتقل شده به صورت انرژی درونی دستگاه درمی‌آیند و دیگر نمی‌توانیم از موجودی کار یا گرمای دستگاه صحبت کنیم. حتی نمی‌توانیم مشخص کنیم که کدام بخش از افزایش انرژی درونی از کار و کدام بخش از گرما ناشی شده است. این وضع را می‌توان به دریاچه‌ای تشبیه کرد که آب آن در اثر بارش باران و وارد شدن رودها افزایش می‌یابد. پس از این افزایش نمی‌توان گفت که کدام بخش از آب دریاچه از طریق رود و کدام بخش از آن از طریق باران تأمین شده است.

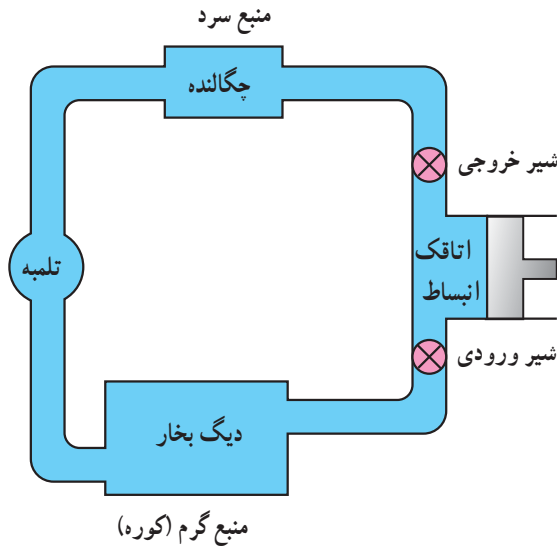
## ۱-۷- ماشین‌های گرمایی

تا حدود ۲۵ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوان‌ها تأمین می‌شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب‌های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به‌دست می‌آید. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان‌ها و مکان‌های خاصی امکان‌پذیر بود. امروزه بیش‌تر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین‌های گرمایی به‌دست می‌آید. این ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می‌کنند. از نظر تاریخی اولین ماشین گرمایی، ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از ماشین بخار در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار و ... به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نیروگاه‌ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکه‌ی برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می‌آید. ماشین‌های درون‌سوز نوع دیگری از ماشین‌های گرمایی هستند که با سوخت‌هایی چون بنزین یا گازوئیل کار می‌کنند. این نوع ماشین‌ها در موتور اتومبیل‌ها و کامیون‌ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می‌شوند.

ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند (مانند شکل فرایندهای تمرین‌های ۱-۵ و ۱-۶) مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کنند. از آن‌جا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها عموماً به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به‌حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد؛ یعنی، این ماشین‌ها در یک چرخه‌ی معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود.

اساس کار همه‌ی ماشین‌های گرمایی یکسان است. در زیرچگونگی کار ماشین بخار و ماشین‌های گرمایی درون‌سوز را توضیح می‌دهیم. با بررسی این دو نمونه، با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شوید.

**الف - ماشین بخار:** ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به‌طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیدیم که در ماشین‌های گرمایی، دستگاه در یک چرخه مقداری گرما دریافت می‌کند و بر روی محیط کار انجام می‌دهد. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام دادن چند فرایند مختلف، که در زیر به توضیح آن‌ها می‌پردازیم، به‌حالت اولیه‌ی خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به آب داده می‌شود، این ماشین را برون‌سوز می‌نامند.



شکل ۱-۵-۱- بخش‌های اصلی ماشین بخار عبارت‌اند از: دیگ بخار، اتاقک انبساط، چگالنده، تلمبه، شیرهای ورودی و خروجی و لوله‌های رابط.

برای بررسی نحوه‌ی کار ماشین بخار، مقدار مشخصی آب را در دیگ بخار در نظر می‌گیریم. فرایندهایی را که آب در ماشین بخار طی می‌کند، به چهار مرحله‌ی اصلی تقسیم می‌کنیم.

**الف) مرحله‌ی اول:** در این مرحله، آب درون دیگ بخار در فشار ثابت از کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

**ب) مرحله‌ی دوم:** شیر ورودی باز می‌شود و بخار آب که دما و فشار آن بسیار زیاد است، وارد اتاقک انبساط می‌شود؛ به پیستون نیرو وارد می‌کند و آن را به حرکت درمی‌آورد. در نتیجه‌ی 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. کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد (یعنی، کاری که ماشین گرمایی انجام می‌دهد) در این مرحله به دست می‌آید.

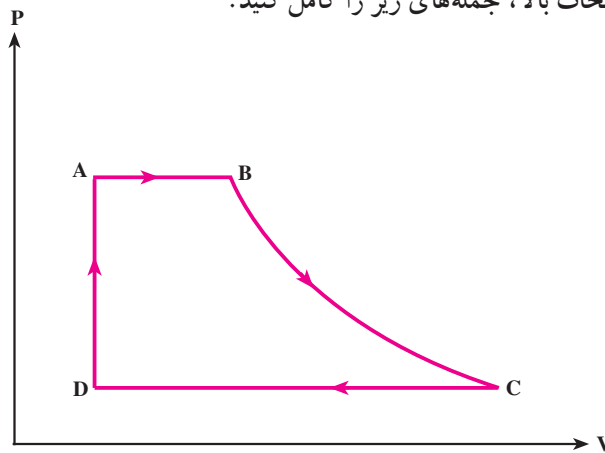
**پ) مرحله‌ی سوم:** طراحی ماشین به گونه‌ای است که وقتی پیستون به انتهای مسیر خود رسید، بازگردانده می‌شود. در هنگام بازگشت پیستون، شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز می‌شود و بخار آب به سمت چگالنده، که لوله‌های آب سرد آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده،

بخار آب در فشار ثابت گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود (میعان). در این فرایند، دما و حجم (بخار آب) کاهش می‌یابد.

ت) مرحله‌ی چهارم: تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به فشار اولیه می‌رساند و یک چرخه‌ی ترمودینامیکی کامل می‌شود. در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به‌طور 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.

## فعالیت ۱-۵

نمودار P-V ی یک ماشین بخار در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است. با توجه به توضیحات بالا، جمله‌های زیر را کامل کنید.



شکل ۱-۱۶- نمودار P-V ی یک ماشین بخار آرمانی

از A تا B — تبدیل آب به بخار آب داغ در فشار ثابت

از B تا C — انبساط بی‌درروی بخار آب (در این مرحله، انرژی مکانیکی مورد نیاز از ماشین بخار به‌دست می‌آید)

از C تا D — میعان بخار آب در فشار ثابت

از D تا A — افزایش فشار آب تا فشار اولیه در حجم تقریباً ثابت

الف - در مسیر A تا B، آب با گرفتن گرما از کوره به ... تبدیل می‌شود و حجم و دمای آن ... می‌یابد.

ب - در مسیر B تا C بخار آب داغ وارد استوانه می‌شود و سبب ... می‌شود. در نتیجه‌ی این عمل، فشار و دمای بخار آب ... می‌یابد.

پ - در مسیر C تا D بخار آب گرما از دست می‌دهد. دمای آن پایین می‌آید و ... می‌شود.

ت - در مسیر D تا A تلمبه آب را به دیگ بخار برمی‌گرداند. در این عمل، فشار آب به ...

ث - در یک چرخه‌ی کامل ماشین بخار، دستگاه از ..... مقداری گرما می‌گیرد، مقداری کار انجام می‌دهد و بقیه را به ... می‌دهد.

## فعالیت ۶-۱

با استفاده از نمودار P-V ی ماشین بخار

الف - نوع فرایند را در هر مرحله بیان کنید.

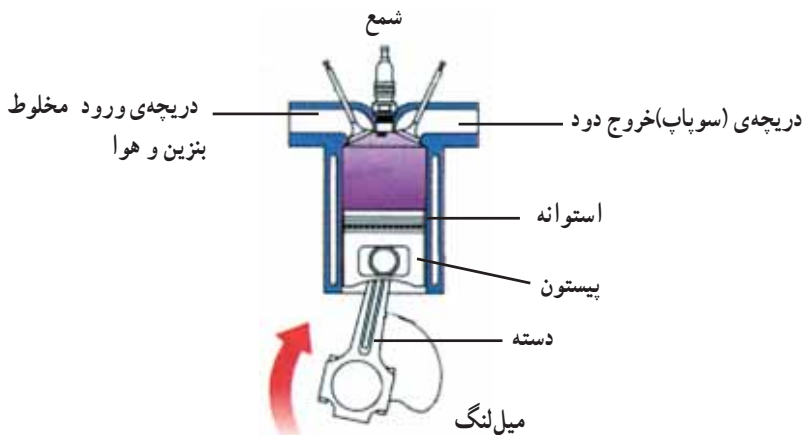
ب - مشخص کنید که آب در مراحل AB، BC و CD گرما گرفته یا از دست داده است؟

پ - کار انجام شده را در هر مرحله با استفاده از سطح زیر نمودار مشخص کنید و علامت کار انجام شده در چرخه‌ی کامل را تعیین کنید.

ت - انرژی درونی دستگاه در فرایند B تا C افزایش می‌یابد یا کاهش؟

ب - ماشین گرمایی درون سوز: موتورهای بیستونی یکی از متداول‌ترین انواع موتورهای درون سوزاند. موتور همه‌ی اتومبیل‌ها، هواپیماهای ملخ‌دار، بعضی از کشتی‌ها و قطارها و نیروگاه‌های کوچک، درون سوز است. موتور گرمایی درون سوز در دو نوع بنزینی و دیزلی طراحی شده است. در این جا به توصیف موتور بنزینی می‌پردازیم. قسمت اصلی این موتور از یک استوانه که پیستون در داخل آن حرکت می‌کند، تشکیل شده است. اجزای موتور در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. در این نوع موتور بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ‌ها





شکل ۱-۱۷- اجزای موتور

اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله‌ی خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز به شرح زیر است.

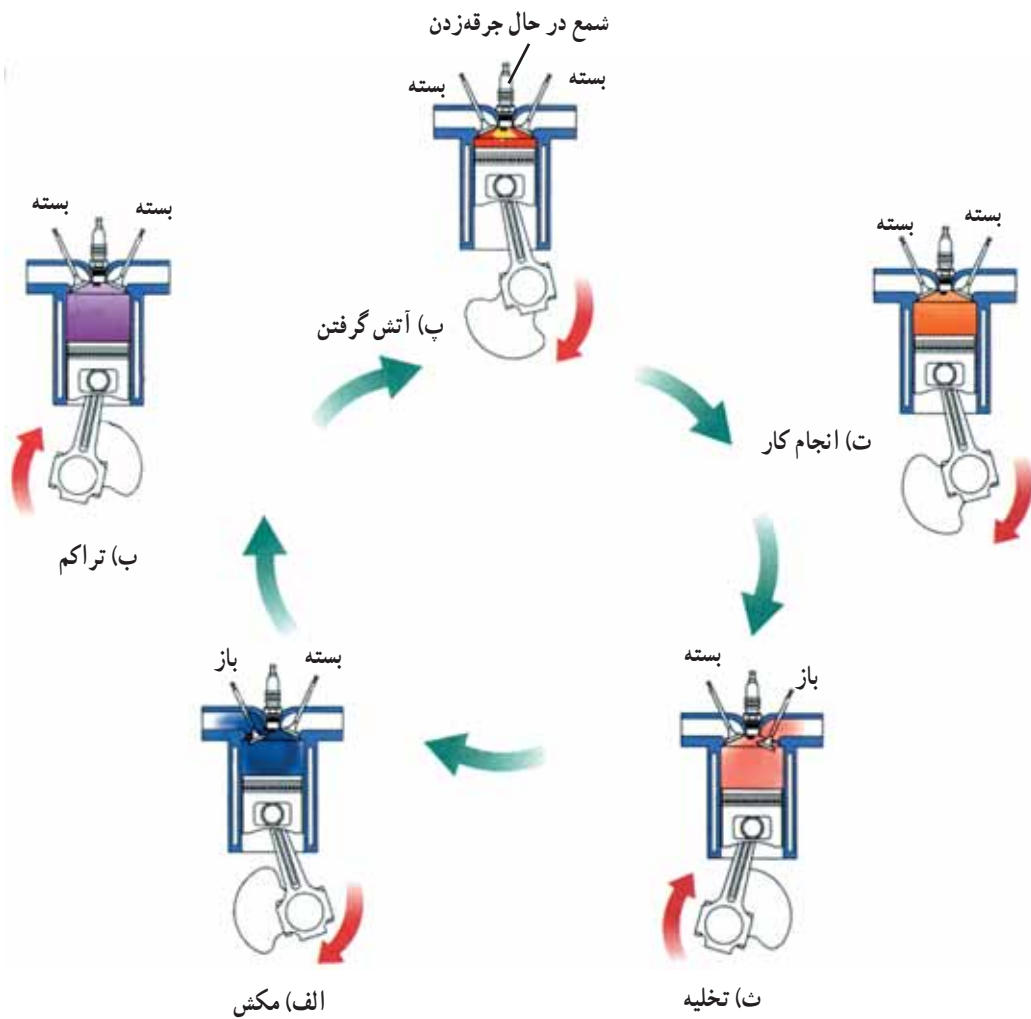
**الف) مرحله‌ی مکش:** با پایین آمدن پیستون (از یک وضعیت اولیه) مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، این دریچه بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شوند.

**ب) مرحله‌ی تراکم:** پیستون بالا می‌آید، مخلوط را تراکم می‌کند و به حجم اولیه می‌رساند. در این وضعیت، دمای مخلوط بسیار بالا می‌رود.

**پ) مرحله‌ی آتش‌گرفتن:** هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن 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.

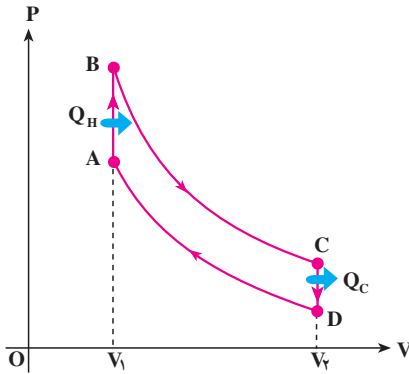
**ت) مرحله‌ی انجام کار:** در این مرحله در اثر فشار زیاد، دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به طرف پایین می‌راند. کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد، در این مرحله حاصل می‌شود.

**ث) مرحله‌ی تخلیه:** در این مرحله، بخشی از دود حاصل از سوختن مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی خروج دود، که در این مرحله باز می‌شود، خارج می‌گردد و سپس پیستون بالا آمده و بقیه‌ی دود را خارج می‌کنند. به این ترتیب، مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می‌شود. موتور دائماً این چرخه را تکرار می‌کند. مرحله‌های مختلف کار موتور درون‌سوز در شکل ۱-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۸- مراحل مختلف در چرخه‌ی موتورهای درون‌سوز

معمولاً برای بررسی ساده‌تر و تطبیق طرز کار این موتورها با چرخه‌های ترمودینامیکی، فرض می‌شود که مخلوط آتش‌نگیر ولی آن قدر گرما به آن داده شود که به فشار و دمای نهایی در مرحله‌ی آتش‌گرفتن، برسد. در مرحله‌ی تخلیه نیز فرض می‌شود که دستگاه در داخل استوانه باقی بماند ولی آن قدر از آن گرما گرفته شود تا به وضعیت اولیه برگردد. به این ترتیب، چرخه‌ی معادلی به نام چرخه‌ی اتو (مطابق شکل ۱-۱۹) برای این ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود.



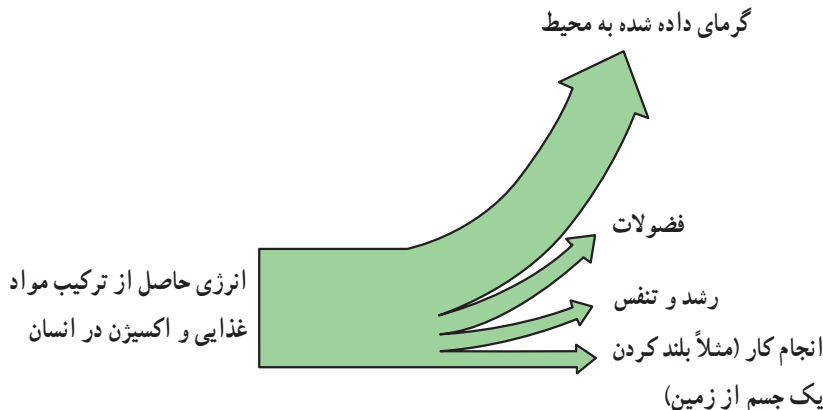
شکل ۱-۱۹- چرخه‌ی اتو

A تا B - دستگاه مقداری گرما می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله‌ی آتش گرفتن)  
 B تا C - دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به طرف پایین می‌راند.  
 C تا D - دستگاه مقداری گرما از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله‌ی تخلیه)  
 D تا A - دستگاه متراکم می‌شود و فشار و حجم آن به وضعیت اولیه برگردانده می‌شود.

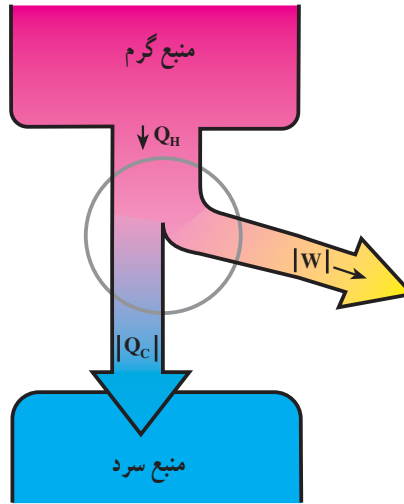
## ۱-۸- بازدهی ماشین گرمایی

در بررسی ماشین‌های بخار و درون‌سوز دیدیم که دستگاه مقداری گرما  $Q_H$  از منبع گرم می‌گیرد. قسمتی از آن را به کار  $|W|$  تبدیل می‌کند و بقیه‌ی گرما  $|Q_C|$  را به منبع سرد می‌دهد. این نتیجه برای ماشین‌های بخار و درون‌سوز به دست آمد ولی ماشین‌های گرمایی دیگر نیز بر همین اساس کار می‌کنند. حتی بدن انسان نیز در حدود ۲۵ درصد از انرژی حاصل از مواد غذایی را به کار تبدیل می‌کند و بقیه را به صورت گرما و ... به محیط بیرون می‌دهد (شکل ۱-۲۰).

با توجه به آن چه گفته شد، طرز کار ماشین‌های گرمایی را می‌توان در شکل ۱-۲۱ خلاصه کرد.



شکل ۱-۲۰



شکل ۱-۲۱

در این شکل طرز کار ماشین‌های گرمایی به صورت وار نشان داده شده است. بخشی از گرمای گرفته شده  $Q_H$  به کار  $|W|$  تبدیل می‌شود و بقیه‌ی آن،  $|Q_C|$ ، به منبع سرد داده می‌شود. قانون اول ترمودینامیک را می‌توان برای یک چرخه‌ی این ماشین‌ها به صورت زیر نوشت:

$$\Delta U = Q_H - |Q_C| - |W| \quad (۱۳-۱)$$

چون دستگاه پس از طی کردن یک چرخه به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد،  $\Delta U = 0$  است. در نتیجه، کاری که ماشین گرمایی بر روی محیط انجام می‌دهد، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$|W| = Q_H - |Q_C| \quad (۱۴-۱)$$

بازدهی ( $\eta$ ) ماشین‌های گرمایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (۱۵-۱)$$

این کمیت نشان می‌دهد که چه کسری از گرمای حاصل از سوخت به کار تبدیل می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۱۴-۱)  $|W| \leq Q_H$  است. در نتیجه، بازدهی ماشین‌های گرمایی نمی‌تواند بیش‌تر از ۱ باشد. بازدهی ماشین‌های بخار در حدود  $5^\circ$  درصد و ماشین‌های درون‌سوز در بهترین وضعیت در حدود  $40^\circ$  درصد است.

## پرسش ۱-۶

یکای بازده چیست؟

## پرسش ۷-۱

چگونه می‌توان بازدهی ماشین گرمایی را افزایش داد؟

### مثال ۹-۱

یک ماشین گرمایی در هر چرخه  $4000\text{ J}$  گرما را از منبع گرم دریافت می‌کند و  $2500\text{ J}$  گرما به منبع سرد می‌دهد. الف) در هر چرخه چه مقدار کار بر روی محیط انجام می‌شود؟ ب) بازدهی این ماشین چه قدر است؟  
حل: الف) از رابطه‌ی ۱-۱۳ داریم:

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

$$|W| = 4000 - 2500 = 1500\text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۴ بازدهی این ماشین به دست می‌آید.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H}$$

$$\eta = \frac{1500}{4000} = 0.375$$

در این ماشین گرمایی حدود ۶۲ درصد از گرمای دریافت شده به منبع سرد داده شده و تنها حدود ۳۸ درصد آن به کار تبدیل شده است.

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

در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که همه‌ی 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 همه‌ی گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند.

## پرسش ۸-۱

اگر ماشینی همه‌ی گرمای دریافتی را به کار تبدیل کند، آیا قانون اول ترمودینامیک

نقض می‌شود؟

اکنون این سؤال پیش می‌آید که آیا فناوری امروز بشر به حدی نرسیده است که ماشینی بسازد که تمام گرمای دریافتی را به کار تبدیل کند؟ آیا در آینده ممکن است چنین ماشینی ساخته شود یا این که در آینده نیز ساختن چنین ماشینی امکان‌پذیر نیست؟

قانون دوم ترمودینامیک به این سؤال پاسخ می‌دهد. براساس این قانون، ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بسازیم که در حین 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. توجه داریم که، همان‌طور که در پرسش ۱-۸ مطرح شد، اگر در یک چرخه تمام گرما 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.

## فعالیت ۱-۷

جمله‌های زیر را تکمیل کنید:

الف) بنا بر قانون دوم ترمودینامیک، در یک چرخه مقدار مشخصی ..... نمی‌تواند به طور کامل به ..... تبدیل شود. (ب) بازدهی یک ماشین گرمایی هرگز نمی‌تواند ..... باشد.

بیش‌ترین بازدهی یک ماشین گرمایی را سعیدی کارنو مشخص کرده است. این بازده از ماشینی به دست می‌آید که با چرخه‌ی کارنو (که در تمرین ۱-۶ معرفی شده است)، بین دو منبع گرم و سرد به ترتیب با دماهای  $T_H$  و  $T_C$ ، کار می‌کند. بازدهی ماشین کارنو از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (16-1)$$

این بازده از بازدهی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، بیش‌تر است. به این علت، بازده با زیرنویس max مشخص شده است.

## مثال ۱۰-۱

می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب سطح اقیانوس در دمای  $27^{\circ}\text{C}$  و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای  $7^{\circ}\text{C}$  باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به دست آورد (بازدهی ماشین کارنو) چه قدر است؟

$$T_C = 273 + 7 = 280\text{K}$$

حل:

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

با استفاده از رابطه‌ی ۱۶-۱ داریم:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

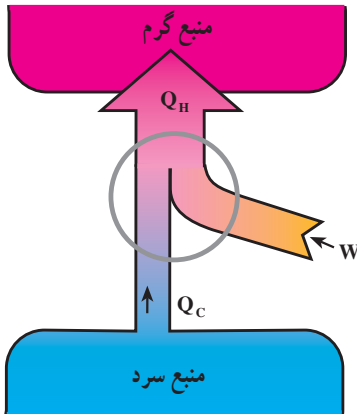
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{280}{300} = 0.067 = 6.7\%$$

بازدهی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، از این مقدار کم‌تر است.

## ۱۰-۱-۱ یخچال

اگر جسم سردی را در کنار جسمی گرم قرار دهیم، چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا ممکن است گرما خودبه‌خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود؟ یعنی جسم گرم گرما بگیرد و گرم‌تر شود و جسم سرد گرما از دست بدهد و سردتر شود؟

چه پدیده‌ای اتفاق می‌افتد که محتویات داخل یخچال سرد می‌شود؟ اگر یخچال به برق وصل نباشد، آیا باز هم این امر رخ می‌دهد؟



یخچال وسیله‌ای است که گرما را از جسم سرد به جسم گرم منتقل می‌کند. در یخچال هم دستگاه یک چرخه را طی می‌کند و در حین آن محیط با انجام کار  $W$  بر روی دستگاه گرمای  $Q_C$  را از منبع سرد (محتویات درون یخچال) می‌گیرد و گرمای  $Q_H$  را به منبع گرم (هوای بیرون یخچال) می‌دهد.

طرز کار یخچال به صورت طرح‌وار در شکل ۲۲-۱ نشان داده شده است.

شکل ۲۲-۱

همان‌طور که در شکل ۱-۲۲ می‌بینید، یخچال مانند یک ماشین گرمایی است که در جهت عکس کار می‌کند. طرز کار یخچال در بخش مطالعه‌ی آزاد آمده است.

## تمرین ۱-۸

علامت  $W$ ،  $Q_H$  و  $Q_C$  را در یخچال مشخص کنید.

$$\Delta U = |Q_H| + Q_C + W$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک،

چون در چرخه  $\Delta U = 0$  است،

$$|Q_H| = Q_C + W \quad (1-17)$$

ملاحظه می‌شود گرمایی که یخچال به هوای اطراف خود می‌دهد، بیش‌تر از گرمایی است که از داخل یخچال می‌گیرد.

## مطالعه‌ی آزاد

### ساز و کار یخچال

یخچال یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌ها 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.

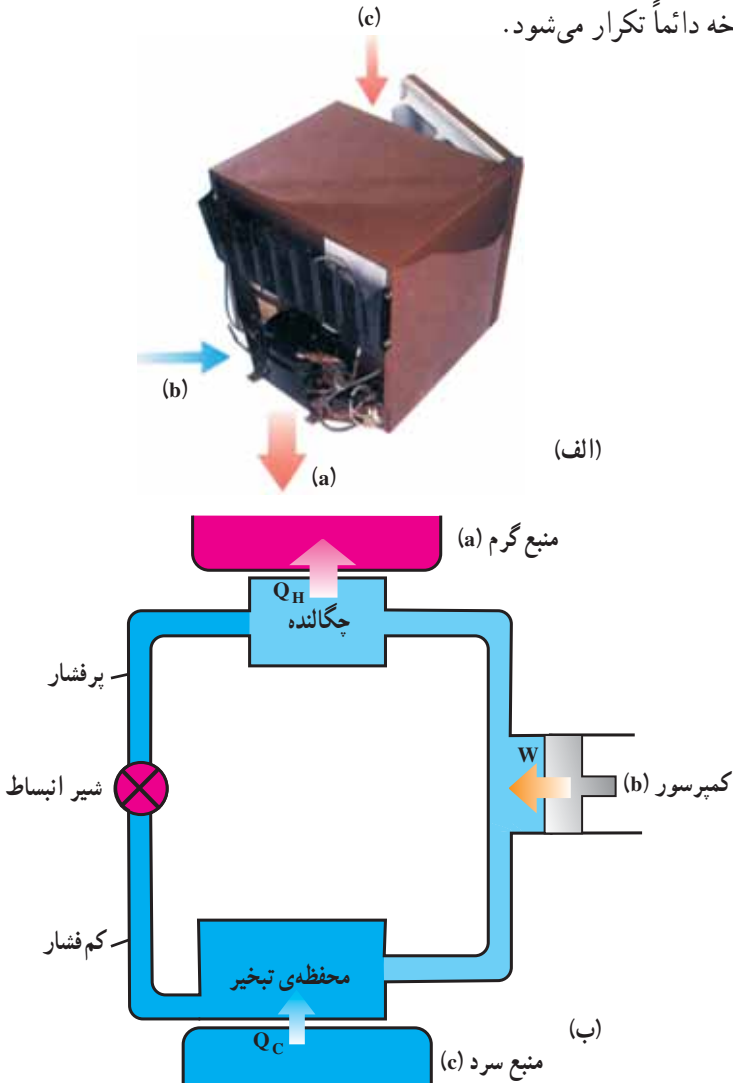
در شکل ۱-۲۳ الف یک یخچال و در شکل ۱-۲۳ ب نمایش طرح‌وار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال عبارت‌اند از: چگالنده، محفظه‌ی تبخیر، کمپرسور و شیر انبساط. چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه‌ی تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه‌ی ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است. این گاز از جمله گازهایی است که به لایه‌ی اُزن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به‌صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه‌ی تبخیر به‌صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

شیر انبساط راه بسیار باریکی است که این دو ناحیه‌ی کم‌فشار و پرفشار را به یک‌دیگر وصل می‌کند.



طرز کار یخچال به طور مختصر به شرح زیر است.

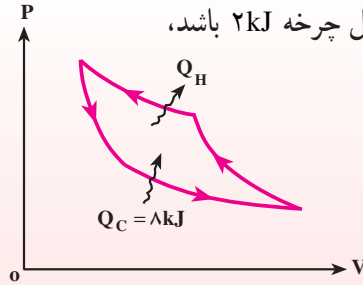
کمپرسور با انجام کار  $W$  گاز را از محفظه‌ی تبخیر می‌گیرد و به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع گرم بالاتر است، گرمای  $Q_H$  را به این منبع می‌دهد و مایع می‌شود. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر انبساط می‌گذرد و وارد محفظه‌ی تبخیر با فشار کم می‌شود، به بخار تبدیل می‌گردد و گرمای نهان تبخیر  $Q_C$  را از منبع سرد می‌گیرد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



شکل ۱-۲۳- الف) یخچال، ب) نمایش طرح وار آن

## مثال ۱۱-۱

نمودار P-V ی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، در شکل ۱-۲۴ نشان داده شده است. اگر دستگاه در هر چرخه ۸kJ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه ۲kJ باشد،



شکل ۱-۲۴

الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟  
 ب) فضایی که یخچال در آن قرار دارد، یک اتاق در بسته به ابعاد  $۳\text{m} \times ۴\text{m} \times ۲\text{m}$  است. در هر چرخه، دمای اتاق چند کلون افزایش می‌یابد؟ فرض کنید دمای اتاق  $۲۷^\circ\text{C}$  و فشار آن یک اتمسفر و ظرفیت گرمایی مولی هوا در حجم ثابت  $۲۰\text{J/mol}\cdot\text{K}$  است. ( $R \approx ۸\text{ J/mol}\cdot\text{K}$ )

حل: الف) با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۷ داریم:

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = ۸ + ۲ = ۱۰\text{kJ}$$

ب) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل تعداد مول‌های موجود در اتاق را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{۱.۰^۵ \times ۲۴}{۳۰.۰ \times ۸} = ۱.۰^۳ \text{ مول}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۷ تغییر دمای اتاق به دست می‌آید.

$$\Delta T = \frac{|Q_H|}{nC_{MV}}$$

$$\Delta T = \frac{۱۰ \times ۱.۰^۳}{۱.۰^۳ \times ۲۰} = ۰.۵\text{K}$$

ضریب عملکرد یخچال: از نظر اقتصادی بهترین یخچال، یخچالی است که با انجام کار (صرف انرژی الکتریکی) کم‌تر گرمای بیشتری را از درون یخچال (منبع سرد) به بیرون منتقل کند. ضریب عملکرد (K) یخچال به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد، تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} \quad (18-1)$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیش‌تر باشد، استفاده از آن بیش‌تر مقرون به صرفه است. ضریب عملکرد یخچال‌های تجاری بین ۲ تا ۷ است.

## پرسش ۹-۱

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

## مثال ۱۲-۱

توان یک یخچال  $25^\circ\text{C}$  وات و ضریب عملکرد آن ۴ است.  
الف) چه مدت طول می‌کشد تا در این یخچال ۱ kg آب  $25^\circ\text{C}$  به یخ  $4^\circ\text{C}$  تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می‌شود؟

$$c_{\text{آب}} = 4200 \text{ J/kgK} \text{ و } c_{\text{یخ}} = 2100 \text{ J/kgK} \text{ و } L_f = 335000 \text{ J/kg}$$

حل: الف) گرمای  $Q_C$  که آب از دست می‌دهد، برابر است با:

$$Q_C = mc_{\text{آب}} \Delta T_1 + mL_f + mc_{\text{یخ}} \Delta T_2$$

$$Q_C = 1 \times 4200 \times 25 + 1 \times 335000 + 1 \times 2100 \times 4 = 448400 \text{ J}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۱ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{448400}{4} = 112100 \text{ J}$$

با استفاده از رابطه‌ی توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می‌آید:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{112100}{250} = 448/4 \text{ s} = 7/5 \text{ دقیقه}$$

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = 448400 + 112100 = 560500 \text{ J}$$

طرز کار کولر گازی مانند یخچال است. در کولر گازی منبع سرد در داخل اتاق و منبع گرم در بیرون قرار دارد. کولر با انجام کار، گرما را از داخل اتاق می‌گیرد و به هوای بیرون می‌دهد.

## تمرین ۹-۱

توان مصرفی یک کولر گازی  $700$  وات و ضریب عملکرد آن  $2/5$  است. این کولر در هر دقیقه چه مقدار گرمای اتاق را می‌گیرد و چه مقدار گرما به فضای بیرون می‌دهد؟

### ۱-۱-۱ 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 خود به خود 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:

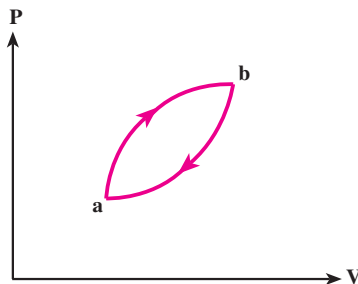
گرما به خودی خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل نمی‌شود.

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 بخود 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.

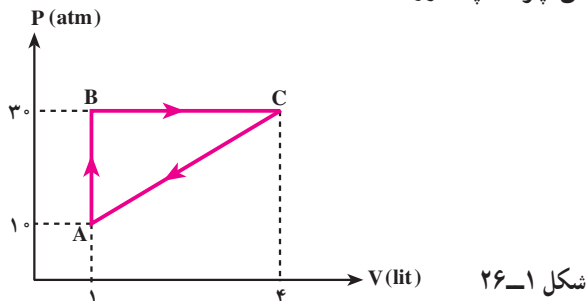
## تمرین های فصل اول

- ۱- در فرایند هم حجم چگونه می توان فشار گاز را افزایش داد؟
- ۲- حجم  $0.5$  مول از یک گاز کامل تک اتمی  $8/3$  لیتر و فشار آن  $1/5$  اتمسفر است. مقداری گرما به آن می دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.
- ۳- در مسأله ی ۲ فرض کنید که به جای گرما دادن حجم گاز را از طریق یک فرایند هم فشار نصف کنیم. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.
- ۴- نشان دهید در فرایند هم دما، هر چه دمای گاز بیش تر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازه ی معین باید کار بیش تری انجام داد.
- ۵- نشان دهید در انبساط هم فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.
- ۶- در یک فرایند  $50^\circ\text{J}$  کار بر روی دستگاه انجام می شود و دستگاه  $40^\circ\text{J}$  گرما دریافت می کند، تغییر انرژی درونی آن چه قدر است؟
- ۷- فرایندی را نام ببرید که در آن دمای دستگاه بدون دریافت یا انتقال گرما تغییر می کند.
- ۸- در یک انبساط بی دررو گاز  $50^\circ\text{J}$  کار بر روی محیط انجام می دهد. تغییر انرژی درونی گاز چه قدر است؟
- ۹- در شکل ۱-۲۵ فرایند چرخه ای برای گازی نشان داده شده است. الف) تعیین کنید که گاز در این فرایند گرما گرفته یا از دست داده است؟ ب) اگر قدر مطلق گرمای مبادله شده  $40^\circ\text{J}$  باشد، کار انجام شده چه قدر است؟

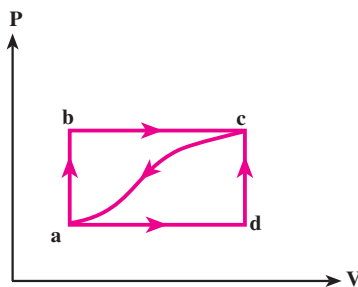


شکل ۱-۲۵

۱۰- گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل ۱-۲۶ را می‌پیماید. گرمای خالص داده شده به گاز در این چرخه چند ژول است؟



۱۱- دستگاهی مطابق شکل ۱-۲۷ از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.



- در این مسیر، دستگاه ۹۰ ژول گرما می‌گیرد و ۷۰ ژول کار انجام می‌دهد.
- الف) تغییر انرژی درونی دستگاه در مسیر abc چه قدر است؟
- ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرآیند از مسیر adc انجام شود، قدر مطلق کار انجام شده روی دستگاه 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) به حالت a برگردانیم، چه قدر باید از آن انرژی بگیریم؟
- ۱۲- 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؟
- ۱۳- چرا برخی نیروگاه‌ها را در کنار رودهای بزرگ یا دریاها احداث می‌کنند؟
- ۱۴- یک ماشین بخار  $2/254 \times 10^4$  kJ گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و  $1/915 \times 10^4$  kJ گرما در چگالنده از دست می‌دهد.

الف) کار انجام شده در یک چرخه چند کیلوژول است؟

ب) بازدهی این ماشین چه قدر است؟

پ) بازدهی واقعی از این مقدار کم تر است؟ چرا؟

۱۵- یک موتور درون سوز در هر چرخه  $8000 \text{ J}$  گرما از سوزاندن سوخت دریافت می کند و

$2000 \text{ J}$  کار تحویل می دهد. گرمای حاصل از سوخت  $5 \times 10^4 \text{ J/g}$  است و موتور در هر ثانیه  $40$

چرخه را می پیماید. کمیت های زیر را حساب کنید.

الف - بازدهی موتور،

ب - گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ - سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت - توان موتور.

۱۶- ضریب عملکرد یک یخساز (فریزر)  $K = 4$  است. این یخساز در هر ساعت،  $1/5 \text{ kg}$

آب با دمای  $20^\circ \text{C}$  را به یخ با دمای  $10^\circ \text{C}$  تبدیل می کند.  $\theta_1 = 20^\circ \text{C}$  را به یخ با دمای  $10^\circ \text{C}$  تبدیل می کند.

$$L_F = 335000 \text{ J/kg} \text{ و } C_{\text{یخ}} = 2100 \text{ J/kg.K} , C_{\text{آب}} = 4200 \text{ J/kg.K}$$

الف - چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟

ب - یخساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می کند؟

پ - چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می شود؟

۱۷- آیا می توان با بازگذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح

دهید.

۱۸- وجود برفک روی بدنه ی داخلی محفظه ی یخساز یخچال چه اثری بر عملکرد دستگاه

دارد؟

۱۹- یک کولر گازی در هر دقیقه  $9 \times 10^4 \text{ J}$  گرما از اتاق می گیرد و در همان مدت،  $1/3 \times 10^5 \text{ J}$

گرما به فضای بیرون می دهد.

الف - توان مصرفی این کولر چند وات است؟

ب - ضریب عملکرد آن چند است؟

۲۰- یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی چرخه ای را مطابق شکل

۲۸-۱ می پیماید. مطلوب است :

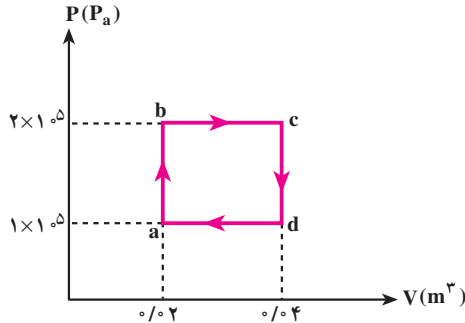
الف - کار انجام شده در طی چرخه،

ب - گرمای مبادله شده در فرایند abc،

پ - بازدهی چرخه،

ت - بازدهی یک ماشین گرمایی کارنو که بین بالاترین و پایین ترین دمای چرخه عمل می کند،

چه قدر است؟



شکل ۱-۲۸

۲۱- کمیت های  $Q_H$ ،  $Q_C$  و  $W$  که در یک چرخه در یک ماشین گرمایی یا یخچال مبادله

می شود، به صورت زیر داده شده است.

(۱)  $Q_C = 40\text{J}$  ،  $W = 60\text{J}$  ،  $Q_H = 100\text{J}$

(۲)  $Q_C = 0$  ،  $W = 100\text{J}$  ،  $Q_H = 100\text{J}$

(۳)  $Q_C = 40\text{J}$  ،  $W = 60\text{J}$  ،  $Q_H = 100\text{J}$

(۴)  $Q_C = 100\text{J}$  ،  $W = 0$  ،  $Q_H = 100\text{J}$

(۵)  $Q_C = 50\text{J}$  ،  $W = 60\text{J}$  ،  $Q_H = 100\text{J}$

الف) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی نقض می شود؟

ب) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نقض می شود؟

پ) در کدام مورد قانون اول ترمودینامیک نقض می شود؟