



موتور ماشین‌های بنزینی تا حدود 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، حد بالایی برای بازده این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کل انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

## مقدمه

در موتور خودروها، از واکنش شیمیایی اکسیژن با بخار بنزین در سیلندرها، انرژی گرمایی تولید می‌شود. گاز داغ شده، پیستون‌ها را درون سیلندرها می‌فشارد و کار مکانیکی انجام می‌دهد و این کار باعث جابه‌جایی خودرو می‌شود. موتور خودروها، هواپیماها، قطارها، کشتی‌ها و نیروگاه‌های تولید برق براساس اصول ترمودینامیک طراحی و ساخته می‌شوند. مطالعه ترمودینامیک در قرن نوزدهم آغاز شده است. مهندسان طراح ماشین‌های گرمایی می‌خواستند بدانند قوانین فیزیک چه محدودیت‌هایی در عملکرد ماشین‌های بخار و ماشین‌های دیگری که با استفاده از انرژی گرمایی، انرژی مکانیکی تولید می‌کنند، به وجود می‌آورند. در ترمودینامیک به مطالعه رابطه بین گرما و کار و تبدیل گرما به کار مکانیکی می‌پردازیم. پایستگی انرژی و این واقعیت که گرما خود به خود از جسم سرد به جسم داغ منتقل نمی‌شود، بخشی از مبانی دانش ترمودینامیک را تشکیل می‌دهند.

در این علم، فرایندهای فیزیکی به وسیله گروهی از کمیت‌های مشاهده‌پذیر یا ماکروسکوپی که حتماً شامل دماست، توصیف می‌شود. مثلاً مهندسی که رفتار گازهای احتراقی در موتور یک خودرو را بررسی می‌کند، به کمک کمیت‌هایی مانند دما، فشار، حجم، گرمای ویژه و... رفتار گاز را توضیح می‌دهد، بدون آنکه درگیر جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های گاز شود. از این منظر بسیاری از مطالبی که در فصل پیش خواندیم در محدوده علم ترمودینامیک می‌گنجد.

در ترمودینامیک تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً به شکل گاز یا مایع است و با محیط پیرامون خود گرما و کار مبادله می‌کند. این جسم را **دستگاه** و اجسام پیرامون دستگاه را که می‌توانند با آن تبادل انرژی داشته باشند، **محیط** می‌نامیم. مثلاً در موتور خودرو، مخلوط هوا و بخار بنزین دستگاه نامیده می‌شود، در یخچال خانگی، گازی که در لوله‌های فلزی درون و بیرون یخچال جریان دارد و گرما را از درون یخچال به بیرون منتقل می‌کند، دستگاه نامیده می‌شود. همچنین آبی که در یک کتری برقی قرار می‌گیرد و به آن گرما داده می‌شود تا به بخار تبدیل شود را می‌توان دستگاه در نظر گرفت (شکل ۵-۱). در این بررسی، کتری، سیم گرمکن آن و هوا، اجزای محیط هستند.

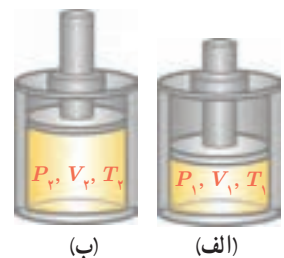


**شکل ۵-۱** آب درون کتری را می‌توان دستگاه ترمودینامیکی در نظر گرفت.

به طور ساده، منظور از دستگاه بخش مشخصی از ماده است که تحولات و مبادله انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود. دستگاه می‌تواند مقدار مشخصی آب، کلّ جو زمین یا حتی بدن یک موجود زنده باشد. نکته مهم آن است که بتوانیم مشخص کنیم چه ماده‌ای دستگاه و چه ماده‌ای محیط است. گستره ترمودینامیک فراتر از پدیده‌های گرمایی مربوط به گازهاست، ولی در این کتاب، بیشتر خود را به بررسی ترمودینامیک گازهای در حالت تعادل محدود می‌کنیم.

## ۱-۵ معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۵-۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی بدون اصطکاک مسدود شده است. پیستون می‌تواند درون استوانه حرکت کند (در اینجا دستگاه مورد بررسی، گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت ۱ (با حجم  $V_1$ ) نگه داشته شده باشد، دما و فشار آن در همه نقاط گاز یکسان خواهد بود؛ مثلاً برابر با  $T_1$  و  $P_1$ . در چنین وضعیت‌هایی می‌گوییم گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. این کمیت‌های  $T$ ،  $V$ ،  $P$  برای تعادل با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** گاز می‌نامیم. در حالت تعادل، متغیرهای ترمودینامیکی گاز، یک تک مقدار مشخص را دارند؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه‌ای در وضعیت شکل ۵-۲ الف قرار دارد این کمیت‌ها مقدارهای  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  را دارند. حال اگر گاز را به سرعت گرم یا سرد کنیم، یا پیستون را به سرعت جابه‌جا کنیم، نقاط مختلف گاز فشار یکسان و نیز دمای یکسانی نخواهند داشت. بنابراین، باید منتظر ماند تا پس از مدتی فشار و دما در همه نقاط گاز به مقادیر جدید دیگری چون  $P_2$  و  $T_2$  برسد. به عبارت دیگر، اکنون متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دارای مقادیر  $P_2$ ،  $V_2$  و  $T_2$  هستند (شکل ۵-۲ ب). خلاصه اینکه یک



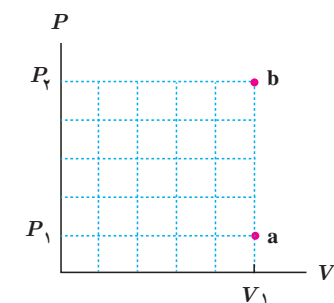
**شکل ۵-۲** گاز داخل استوانه در حالت‌های (الف) اولیه و (ب) نهایی در تعادل ترمودینامیکی است.

دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حالت تعادل ترمودینامیکی است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به طور خودبه خودی تغییر نکند.

متغیرهای ترمودینامیکی مستقل از یکدیگر نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می نامند. اگر گاز آرمانی (کامل) باشد، معادله حالت آن ساده و مستقل از نوع گاز است و با قانون گاز آرمانی (معادله ۴-۲)، یعنی  $PV=nRT$  داده می شود.

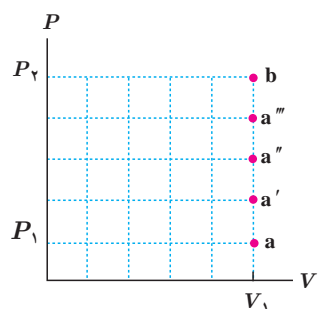
### ۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار

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

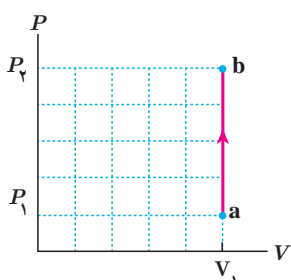


شکل ۳-۳ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت تعادل a به حالت تعادل b رفته است.

اکنون فرض کنید گاز در حالت اولیه  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  باشد. گاز را در حجم ثابت گرم می کنیم تا به حالت تعادل نهایی  $P_2$ ،  $V_1$  و  $T_2$  برسد. در این فرایند، حالت دستگاه در حجم ثابت از a به b تغییر کرده است (شکل ۳-۵). اگر حالت های بین a و b غیر تعادلی باشند، برای این فرایند نمی توان نمودار رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای یگانه ای را نمی توان به کل گاز نسبت داد. اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک گرمکن با دمای قابل تنظیم (منبع گرما) قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع را برابر با دمای اولیه دستگاه، یعنی  $T_1$ ، انتخاب می کنیم. تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. دمای منبع را اندکی افزایش می دهیم. گرمای کمی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر اندکی 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 ۴-۵ نشان داده شده است. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقطه های  $a''$ ،  $a'''$  و ... به دست می آیند. اگر گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک باشد، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۵-۵ رسم کرد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل بوده و سریع به تعادل می رسد. چنین فرایندی را **فرایند ایستاوار** می نامند. در ادامه این فصل، فرایندهای مورد بررسی عمده تاً ایستاوار در نظر گرفته می شوند. برای رسم نمودارهای ایستاوار، چند نقطه تعادلی را تعیین کرده و با وصل کردن آنها به یکدیگر نمودار ترمودینامیکی را رسم می کنیم.



شکل ۴-۴ دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می دهد.



شکل ۵-۵ نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم. وقتی فرایندی ایستاوار باشد، می توان برای آن نمودار رسم کرد.

### ۳-۵ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می گیرد و معمولاً فرض می شود که دستگاه در حین تبادل گرما، در تماس با یک **منبع گرما**<sup>۱</sup> است.

**الف) گرما:** در فصل ۴ دیدیم گرما انرژی ای است که به سبب اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می شود. محیط و دستگاه نیز هنگامی مبادله گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند. بنا به قرارداد،

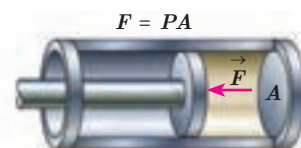
<sup>۱</sup> - quasi - static

<sup>۲</sup> - heat reservoir

گرمایی را که دستگاه می‌گیرد، با علامت مثبت، و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان می‌دهیم. در ترمودینامیک دستگاه با یک منبع گرما مبادله گرما می‌کند که در ادامه، آن را معرفی می‌کنیم.

**منبع گرما:** هرگاه یک استکان چای داغ یا یک قطعه یخ را در هوای اتاق بگذاریم، پس از مدتی چای خنک شده و یخ ذوب می‌شود و دمایشان با دمای هوا برابر می‌شود، بی‌آنکه دمای هوای اتاق تغییر محسوسی کند. در این مثال، هوای اتاق را برای چای یا قطعه یخ، اصطلاحاً منبع گرما می‌گویند. در حالت کلی، یک منبع گرما جسمی است که جرم آن در مقابل جرم دستگاهی که با آن تبادل گرما دارد، چنان بزرگ است که می‌تواند مقدار زیادی گرما بگیرد، یا از دست بدهد، بی‌آنکه تغییر دمای محسوسی بکند. در عمل (در آزمایشگاه)، منبع گرما می‌تواند وسیله‌ای باشد که تنظیم دمای آن توسط آزمایشگر صورت می‌گیرد و می‌تواند به دستگاه گرما بدهد، یا از آن گرما بگیرد.

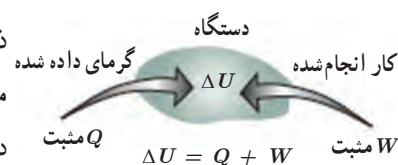
**(ب) کار:** شکل ۵-۶ گازی را درون یک استوانه نشان می‌دهد. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و پیستون که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت چپ جابه‌جا می‌گردد. در این جابه‌جایی نیروی  $\vec{F}$  که گاز به پیستون وارد می‌کند، کار انجام می‌دهد. مقدار این کار برابر با حاصل ضرب بزرگی نیروی  $\vec{F}$  در اندازه جابه‌جایی پیستون است. در این فرایند پیستون نیز روی گاز کار انجام می‌دهد که در بخش‌های بعد محاسبه آن را خواهیم آموخت.



شکل ۵-۶ در شکل بالا  $\vec{F}$ ، نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

## ۵-۴ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل‌دهنده آن ماده برابر است. به‌طور دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی ماده که آن را با  $U$  نشان می‌دهیم، با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل ذره‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، مقدار  $U$  مشخص است. این مقدار به متغیرهای ترمودینامیکی مانند  $P$  و  $T$  بستگی دارد. در مورد گاز آرمانی می‌توان نشان داد که انرژی درونی فقط تابع دمای گاز است، به طوری که با افزایش دما انرژی درونی گاز افزایش می‌یابد. هنگامی که دستگاه در یک فرایند ترمودینامیکی ایستاوار با مبادله کار، گرما، یا هر دو با محیط از حالت اولیه (۱) با انرژی درونی  $U_1$  به حالت نهایی (۲) با انرژی درونی  $U_2$  برسد، تغییر انرژی درونی  $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط بستگی دارد. اگر دستگاه در فرایندی ایستاوار، گرمای  $Q$  را بگیرد و کار  $W$  بر روی آن انجام شود (شکل ۵-۷)، این بستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۵-۷ قرارداد علامت‌ها برای قانون اول ترمودینامیک

$$\Delta U = Q + W \quad (۱-۵)$$

که به آن قانون اول ترمودینامیک گویند و بیانگر قانون پایستگی انرژی است. توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای مقدار معینی از یک گاز رخ می‌دهد و از حالت اولیه یکسان ( $T_1$ ،  $V_1$  و  $P_1$ ) آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان ( $T_2$ ،  $V_2$ ،  $P_2$ ) می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز ( $\Delta U$ ) برابر است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می‌توانند متفاوت باشند.

در رابطه ۵-۱ 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 می‌شود.

۱- در برخی کتاب‌ها از جمله کتاب‌های شیمی، تغییر انرژی درونی با  $\Delta E$  نشان داده شده است.

در رابطه ۱-۵، گرمای  $Q$  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 ( $\Delta U = 0$ ).

مثال ۱-۵

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه  $420\text{ J}$  گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد  $100\text{ J}$  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  $100\text{ J}$  است پس کار محیط روی دستگاه  $W = -100\text{ J}$  می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

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



کنت رامفورد

کنت رامفورد با نام اصلی بنیامین تامپسون در سال ۱۷۵۳ میلادی در ماساچوست آمریکا، که آن زمان مستعمره انگلستان بود، به دنیا آمد. نخست به ارتش پیوست و در این دوران شروع به آزمایش های با باروت کرد و در قدرت مواد منفجره سلاح های جنگی تغییرات چشمگیری به وجود آورد و به همین خاطر به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد. چندی نگذشت که به مقام های وزارت جنگ، وزارت کشور و خزانه داری نائل آمد. در ژانویه سال ۱۷۹۸ در انجمن سلطنتی لندن سخنرانی ای درباره «ایجاد گرما بر اثر مالش» ایراد کرد که بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. این سخنرانی جالب نتیجه مشاهداتی بود که سال ها پیش روی توپ جنگی انجام داده بود. کنت رامفورد اکتشافات و مشاهدات خود را در کتابی تحت عنوان «روش های انتقال گرما» چاپ و منتشر کرد و ثابت نمود نظریه لاوازیه در مورد وجود شماره ای به نام کالریک، به عنوان عامل انتقال انرژی گرمایی نادرست است. رامفورد، یک مؤسسه علمی در لندن دایر کرد و هدف او از تأسیس این سازمان، تشویق مردم برای پژوهش های علمی بود. کارهایی که در این مؤسسه انجام می شد اکثراً عملی بود و گاهی نتایجی به دست می آمد که نشان می داد تجربیات عملی همواره از مطالعات نظری ناشی می گردد. بنیامین تامپسون در سال ۱۸۱۴ دیده از جهان فروست. او نابغه و تجربه گر ماهر بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.

خوب است بدانید

سوخت و ساز بدن و قانون اول ترمودینامیک



وقتی غذا می خوریم انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد غذایی به بدن ما انتقال می یابد. از طرفی وقتی فعالیت انجام می دهیم انرژی درونی بدن کاهش می یابد و طبق قانون اول ترمودینامیک به کار و گرما تبدیل می شود. بنا به تعریف، آهنگ سوخت و ساز بدن، آهنگ تبدیل انرژی شیمیایی مواد غذایی جذب شده و اکسیژن به انرژی درونی بدن برای جبران کاهش انرژی درونی است و معمولاً برحسب کیلوکالری بر ساعت ( $\text{kcal/h}^1$ ) یا برحسب وات بیان می شود. جدول زیر آهنگ سوخت و ساز بدن را در برخی از فعالیت ها برای شخصی به جرم متوسط  $65\text{ kg}$  نشان می دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط  $65\text{ kg}$

آهنگ تقریبی سوخت و ساز		نوع فعالیت
Watt	kcal/h	
70	60	خوابیدن
115	100	نشستن
230	200	فعالیت های سبک (خوردن، لباس پوشیدن و ...)
460	400	فعالیت های متوسط (تنیس، راه رفتن و ...)
1150	1000	دویدن ( $15\text{ km/h}$ )
1270	1100	دوچرخه سواری سرعت

۱- در علوم تغذیه معمولاً kcal را با Cal نشان می دهند و آن را کالری بزرگ می خوانند. هر کالری بزرگ  $4/186$  کیلوژول است.

## ۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

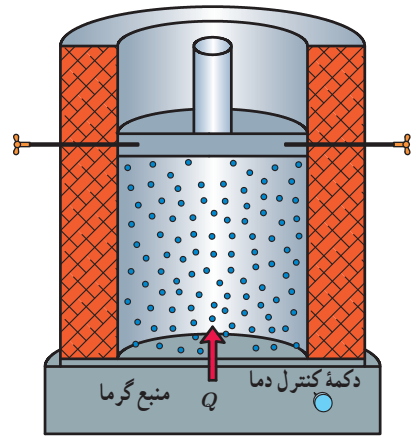
همان طور که گفتیم دستگاه‌های ترمودینامیکی می‌توانند فرایندهای مختلفی را طی کنند. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع‌تر است؛ از جمله: **فرایند هم‌حجم**<sup>۱</sup>، **فرایند هم‌فشار**<sup>۲</sup>، **فرایند هم‌دما**<sup>۳</sup> و **فرایند بی‌دررو**<sup>۴</sup>. در ادامه به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

**الف) فرایند هم‌حجم:** حجم گاز طی این فرایند ثابت می‌ماند و بنابراین کاری انجام نمی‌شود. در این فرایند، گاز با محیط فقط تبادل گرما می‌کند و تغییر انرژی درونی گاز برابر با گرمایی است که با محیط (منبع گرما) مبادله می‌کند.

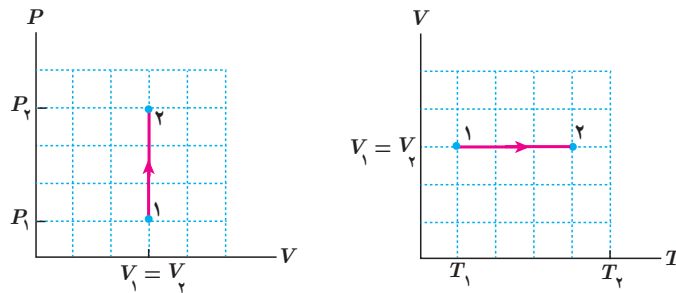
$$\Delta U = Q + W = Q + 0 = Q$$

برای بررسی این فرایند، گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می‌دهیم (شکل ۵-۸)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز برابر باشد. دمای منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز طی یک فرایند ایستاوار، با گذار از حالت‌های تعادلی به حالت نهایی مورد نظر برسد.

در شکل ۵-۹ نمودارهای  $V-T$  و  $P-V$  برای گرم کردن هم‌حجم یک گاز نشان داده شده است. در این فرایند دما و فشار گاز در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال، گاز به صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۵-۸ وارونه می‌شود.



**شکل ۵-۸** دمای گاز را در فرایند هم‌حجم با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می‌دهیم.



**شکل ۵-۹** نمودارهای  $V-T$  و  $P-V$  برای یک فرایند ایستاوار هم‌حجم.

## مثال ۵-۲

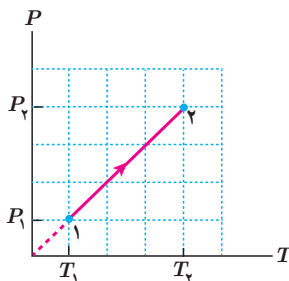
نشان دهید نمودار  $P-T$  برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحه  $P-T$  می‌گذرد.

**پاسخ:** چون گاز آرمانی است با استفاده از معادله حالت گاز آرمانی داریم:

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

چون  $(nR/V)$  ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات

می‌گذرد (شبیه خط  $y = ax$  در صفحه  $y-x$ ). با نقطه‌گذاری نیز می‌توان نمودار را رسم کرد.



۱ - Isochoric

۲ - Isobaric

۳ - Isothermal

۴ - Adiabatic

روی قوطی‌های افشانه (اسپری)، هشدار داده شده است که از انداختن آن در آتش خودداری کنید. علت این توصیه را براساس فرایند هم حجم توضیح دهید.

اکنون به تعیین گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در فصل ۴ با گرمای ویژه مولی آشنا شدیم. گرمای ویژه مولی یک گاز در حجم ثابت ( $C_V$ ) برابر است با مقدار گرمایی که باید به یک مول از آن گاز در حجم ثابت داده شود تا دمای آن  $1\text{ K}$  افزایش یابد.

$$C_V = \frac{Q}{n\Delta T}$$

بنابراین در فرایند هم حجم داریم:

$$Q = nC_V\Delta T \quad (2-5)$$

یکای  $C_V$  در SI برابر  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$  است.

گرمای ویژه مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۱-۵ آمده است. می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برای گازهای آرمانی تک اتمی برابر با  $\frac{3}{2}R$  و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{5}{2}R$  است.

گاز	$C_V$
Ar	۱۲/۵
He	۱۲/۵
Ne	۱۲/۵
CO	۲۰/۷
H <sub>۲</sub>	۲۰/۴
HCl	۲۱/۴
N <sub>۲</sub>	۲۰/۸
NO	۲۰/۹
O <sub>۲</sub>	۲۱/۲
Cl <sub>۲</sub>	۲۴/۸
CO <sub>۲</sub>	۲۸/۵
CS <sub>۲</sub>	۴۰/۹
H <sub>۲</sub> S	۲۵/۴
N <sub>۲</sub> O	۲۸/۵
SO <sub>۲</sub>	۳۱/۳

مثال ۵-۳

به  $2/00$  مول از گازهای آرمانی He، O<sub>۲</sub> و CO<sub>۲</sub>، در حجم ثابت،  $100$  ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۵-۲ و جدول ۱-۵ داریم:

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

$$\Delta T = \frac{100\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(12/5\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 4/00\text{ K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{100\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(21/2\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 2/36\text{ K} \quad \text{برای O}_2,$$

$$\Delta T = \frac{100\text{ J}}{(2/00\text{ mol})(28/5\text{ J/mol}\cdot\text{K})} = 1/75\text{ K} \quad \text{برای CO}_2,$$

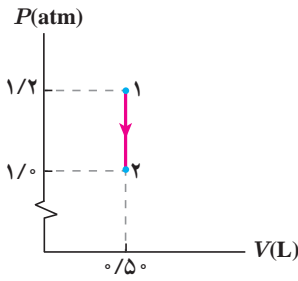
## مثال ۴-۵

شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم را در صفحه  $P-V$  نشان می‌دهد. گاز را آرمانی و تک اتمی فرض کنید. در این فرایند گاز چقدر گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟  
( $1 \text{ atm} = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ )

پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۵ داریم:

$$\begin{aligned} Q &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) \Delta T = \frac{3}{2} (nRT_2 - nRT_1) = \frac{3}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \\ &= \frac{3}{2} \left[ (1.0 \times 10^5 \text{ Pa})(0.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1.2 \times 10^5 \text{ Pa})(0.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \right] \\ &= -15 \text{ J} \end{aligned}$$

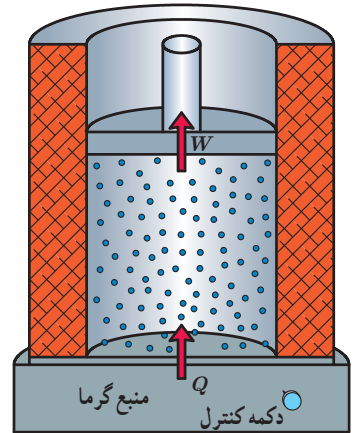
گرمای مبادله شده  $|Q| = 15 \text{ J}$  است. چون  $Q$  منفی شده است، گاز گرما از دست داده است.



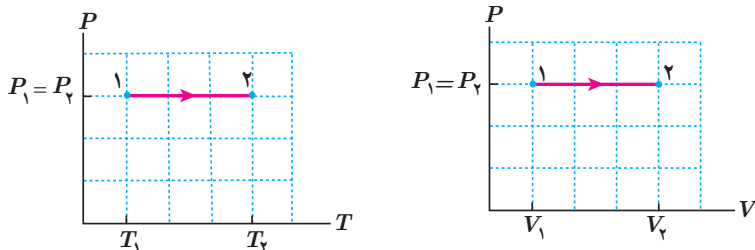
## تمرین ۱-۵

دمای  $n$  مول گاز با گرمای ویژه مولی در حجم ثابت  $C_V$ ، در یک فرایند هم‌حجم از  $T_1$  به  $T_2$  رسیده است. الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید. ب) اگر این گاز، گاز آرمانی و تک اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می‌شود؟

ب) **فرایند هم‌فشار:** فرایندی است که فشار گاز در طی آن ثابت می‌ماند. به‌عنوان مثالی از این فرایند، گازی آرمانی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱۰-۵ داخل استوانه‌ای است که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است و دمای اولیه گاز و منبع برابر است. گاز ابتدا در فشار، حجم، و دمای  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است. دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه، مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود و دمای گاز کمی افزایش می‌یابد و در نتیجه گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به طرف بالا جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش، به‌صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته به طرف بالا حرکت می‌کند. در این فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودارهای  $P-T$  و  $P-V$  این فرایند در شکل ۱۱-۵ رسم شده است.



شکل ۱۰-۵ گرم کردن گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم



شکل ۱۱-۵ نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیستند و از این رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قسمتی از محور را برش می‌دهیم و آن را با نماد  $\hookrightarrow$  مشخص می‌کنیم.



نشان دهید نمودار  $V-T$  برای فرایند هم فشار یک گاز آرمانی، خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد.

در فرایند هم فشار، گرما و کار هردو مبادله می‌شود. در اینجا ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز  $P$  باشد با توجه به تعریف فشار ( $P=F/A$ )، گاز طی این فرایند نیروی ثابت  $F=PA$  را به پیستون وارد می‌کند که در آن  $A$  مساحت پیستون است. اگر در این فرایند پیستون به اندازه  $d$  جابه‌جا شود (شکل ۵-۱۲)، کاری که گاز روی پیستون انجام می‌دهد برابر است با

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

ولی  $\Delta V$ ، تغییر حجم گاز و برابر است با  $\Delta V = V_2 - V_1$ ؛ در نتیجه،

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

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

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

در این کتاب، **کار محیط روی دستگاه** (مثلاً در اینجا کار پیستون روی گاز) را با  $W$  نشان می‌دهیم.

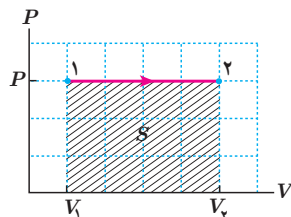
بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

$$W = -P \Delta V$$

(۳-۵) (کار در فرایند هم فشار)

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.

نشان دهید رابطه ۳-۵ که برای یک انبساط هم فشار به دست آمده، برای یک تراکم هم فشار نیز برقرار است.



با توجه به نمودار شکل روبه‌رو، نشان دهید در فرایند هم فشار، مساحت سطح زیر نمودار  $P-V$  برابر با قدرمطلق کار انجام شده است.

گرچه فعالیت ۵-۱ برای یک فرایند هم فشار است، ولی می‌توان نشان داد که نتیجه آن در حالت کلی نیز برای هر فرایندی برقرار است و همواره قدرمطلق کار انجام شده برابر با مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه  $P-V$  است.

## مثال ۵-۵

گازی آرمانی به حجم  $۱/۰۰$  لیتر در فشار ثابت  $۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ Pa}$  مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن به  $۰/۹۰۰$  لیتر می‌رسد. اگر دمای اولیه گاز  $۳۰۰ \text{ K}$  باشد، الف) دمای نهایی گاز و ب) کار انجام شده روی آن چقدر است؟  
**پاسخ:** چون گاز، آرمانی است و حجم آن به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

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

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = (300 \text{ K})(0/900) = 2/70 \times 10^2 \text{ K} = 270 \text{ K}$$

در نتیجه

کار انجام شده محیط روی گاز برابر است با

$$W = -P\Delta V = -(1/00 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0/900 - 1/00) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 10 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمای مبادله شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. مانند آنچه که در مورد گرمای ویژه مولی در حجم ثابت دیدیم، درمی‌یابیم که گرمای لازم برای تغییر دمای هم‌فشار یک گاز به اندازه  $\Delta T$ ، از رابطه زیر داده می‌شود:

$$Q = nC_p \Delta T \quad (4-5)$$

که در آن  $C_p$  گرمای ویژه مولی در فشار ثابت است. گرمای ویژه مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۵-۲ آمده است.

می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در فشار ثابت، برای گازهای آرمانی تک‌اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$  و برای اغلب گازهای آرمانی دو اتمی در دماهای معمولی  $\frac{7}{2}R$  است.

## مثال ۵-۶

گرمایی که  $۱/۰۰ \text{ L}$  گاز آرمانی  $\text{O}_2$  در فشار جو متعارف ( $1/01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) و با دمای اولیه  $300/0 \text{ K}$  از دست می‌دهد تا دمایش به  $270/0 \text{ K}$  برسد، چقدر است؟ ( $R=8/31 \text{ J/mol.K}$ )

**پاسخ:** تعداد مول گاز  $n$  با استفاده از قانون گازهای آرمانی برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/01 \times 10^5 \text{ Pa})(1/00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/31 \text{ J/mol.K})(300 \text{ K})} = 4/05 \times 10^{-3} \text{ mol} = 0/0405 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۵-۲ و رابطه ۴-۵ داریم:

$$Q = nC_p(T_2 - T_1) \\ = (0/0405 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol.K})(270/0 \text{ K} - 300/0 \text{ K}) = -35/7 \text{ J}$$

گرمای مبادله شده  $|Q|=35/7 \text{ J}$  است و با توجه به اینکه  $Q$  منفی شده است، نتیجه می‌گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می‌دهد.

جدول ۵-۲ گرمای ویژه مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب  $\text{J/mol.K}$

گاز	$C_p$
Ar	20/8
He	20/8
Ne	20/8
CO	29/1
H <sub>2</sub>	28/8
HCl	29/1
N <sub>2</sub>	29/1
NO	29/8
O <sub>2</sub>	29/4
Cl <sub>2</sub>	33/9
CO <sub>2</sub>	36/9
CS <sub>2</sub>	45/7
H <sub>2</sub> S	34/2
N <sub>2</sub> O	38/8
SO <sub>2</sub>	39/9

مقداری گاز تک‌اتمی آرمانی در یک انبساط هم‌فشار،  $100\text{ J}$  کار انجام می‌دهد.

الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟

ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) گرمای مبادله شده از رابطه  $45$  به دست می‌آید:

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

در رابطه بالا  $nR\Delta T$  مجهول است و باید آن را محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم‌فشار استفاده می‌کنیم:

$$W = -P\Delta V = -P(V_f - V_i) = -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) = -nR\Delta T$$

از صورت مسئله می‌دانیم که گاز منبسط شده و  $100\text{ J}$  کار انجام داده است. بنابراین،  $W = -100\text{ J}$  است و در نتیجه داریم:

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

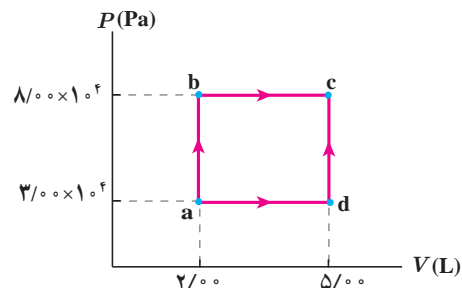
با قراردادن این مقدار در رابطه  $Q$  خواهیم داشت:

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

گرمای مبادله شده  $Q = 250\text{ J}$  است. علامت مثبت  $Q$  نشان می‌دهد که گاز (دستگاه) گرما گرفته است.

ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

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



در شکل روبه‌رو، نمودار  $P-V$  برای یک گاز آرمانی نشان داده شده است.

در فرایند  $ab$ ،  $150\text{ J}$  و در فرایند  $bc$ ،  $60\text{ J}$  گرما به دستگاه داده شده است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند  $ab$  چقدر است؟

ب) تغییر انرژی درونی گاز در فرایند  $abc$  چقدر است؟

پ) گرمای داده شده به گاز در فرایند  $adc$  را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) چون در فرایند  $ab$  هیچ تغییر حجمی نداریم،  $W_{ab} = 0$  و در نتیجه

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 150\text{ J}$$

ب) فرایند  $bc$  در فشار ثابت رخ می‌دهد و بنابراین، کار انجام شده روی دستگاه برابر است با

$$W_{bc} = -P\Delta V = -P(V_c - V_b) = -(4/00 \times 10^4\text{ Pa})(3/00 \times 10^{-2}\text{ m}^3) = -240\text{ J}$$

در نتیجه کل کار انجام شده در فرایند  $abc$  برابر است با

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = 0 - 240\text{ J} = -240\text{ J}$$

و از طرفی گرمای کل داده شده به دستگاه در فرایند  $abc$  برابر است با

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 150\text{ J} + 60\text{ J} = 210\text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 210\text{ J} - 240\text{ J} = -30\text{ J}$$

پ) می‌دانیم در فرایندهای مختلفی که از حالت اولیه یکسان آغاز می‌شوند و به حالت نهایی یکسان می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز یکسان است. بنابراین:

$$\Delta U_{\text{adc}} = \Delta U_{\text{abc}} = 51 \text{ J}$$

از طرفی کل کار انجام شده در فرایند adc برابر است با:

$$W_{\text{adc}} = W_{\text{ad}} + W_{\text{dc}} = -P(V_d - V_a) = -(3/0 \times 10^5 \text{ Pa})(3/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = -90 \text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U_{\text{adc}} = Q_{\text{adc}} + W_{\text{adc}}$$

و در نتیجه

$$Q_{\text{adc}} = \Delta U_{\text{adc}} - W_{\text{adc}} = (51 \text{ J}) - (-90 \text{ J}) = 141 \text{ J}$$

**پ) فرایند هم‌دما:** دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۱۳-۵ استوانه‌ای حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرمایی با دمای ثابت و برابر با دمای اولیه گاز قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه‌های فلزی روی پیستون به آهستگی کاهش داد. با افزودن تدریجی ساچمه‌ها، بر فشار گاز داخل استوانه افزوده می‌شود.

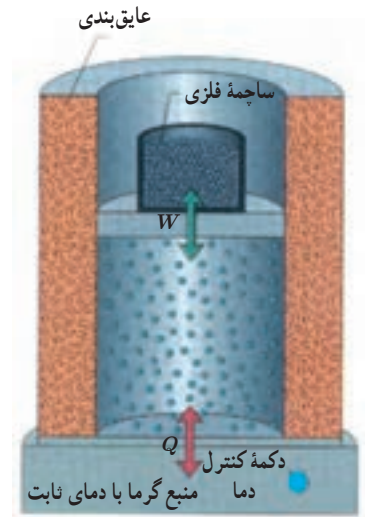
در فرایند هم‌دما، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم:

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

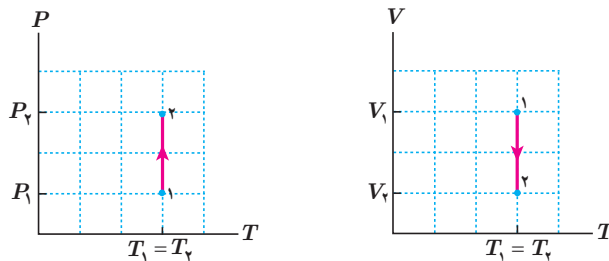
$$Q = -W$$

در نتیجه:

که چون در تراکم، کار انجام شده محیط روی گاز،  $W$ ، مثبت است،  $Q$  منفی می‌شود؛ یعنی در تراکم هم‌دما، گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  این فرایند در شکل ۱۴-۵ رسم شده است.



**شکل ۱۳-۵** استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی ساچمه‌ها، تراکمی هم‌دما رخ می‌دهد.



**شکل ۱۴-۵** نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  برای یک فرایند تراکم هم‌دما

## تمرین ۴-۵

مشابه آنچه که برای تراکم هم‌دما شرح دادیم، انبساط هم‌دمای گاز کامل را شرح دهید و علامت‌های  $Q$  و  $W$  را برای چنین فرایندی تعیین و نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  را برای آن رسم کنید.

انتهای یک سرنگ حاوی هوا را مسدود و آن را وارد حجم بزرگی از آب کنید. پس از مدتی، پیستون سرنگ را به آرامی بفشارید. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

مثال ۵-۹

گازی آرمانی را در دمای ثابت از حالت اولیه  $V_1 = 4/0 \text{ L}$  و  $P_1 = 1/0 \text{ atm}$  تا حالت نهایی با حجم  $V_2 = 1/0 \text{ L}$  متراکم می‌کنیم. الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هر یک از حجم‌های  $1/0 \text{ L}$ ،  $2/0 \text{ L}$  و  $3/0 \text{ L}$  حساب کنید و نمودار  $P-V$  را با استفاده از روش نقطه یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

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

پاسخ: الف) چون گاز، آرمانی و فرایند هم‌دماست داریم:

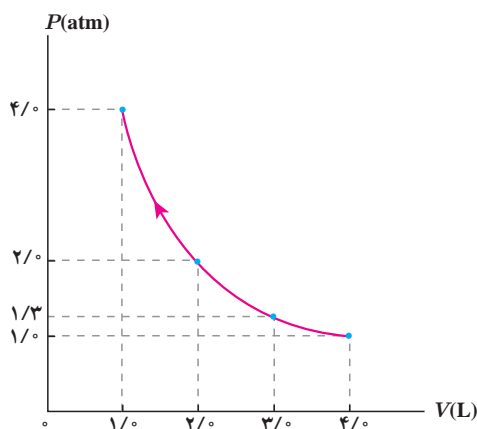
$$PV = nRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

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

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

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

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



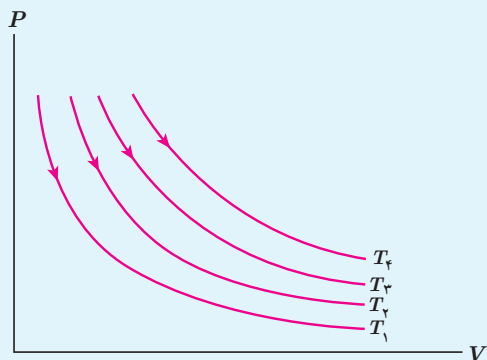
V(L)	P(atm)
4/0	1/0
3/0	1/3
2/0	2/0
1/0	4/0

ب) قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر با مساحت سطح زیر نمودار  $P-V$  است. افزون بر این، چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است؛ یعنی:

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

پ) برای فرایند هم‌دمای گاز کامل نشان دادیم  $Q = -W$  است. بنابراین، برای  $Q$  داریم:

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



در شکل روبه‌رو، نمودار  $P-V$  مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز آرمانی در دماهای مختلف رسم شده است.

الف) نشان دهید:  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ . (راهنمایی: خطی عمود بر محور  $V$  یا عمود بر محور  $P$  رسم کنید، به گونه‌ای که هر چهار نمودار را قطع کند و سپس قانون گازهای آرمانی را برای نقطه‌های برخورد با منحنی‌ها به کار ببندید)

ب) در یک تغییر حجم معین، اندازه کار انجام شده در کدام فرایند بیشتر است؟

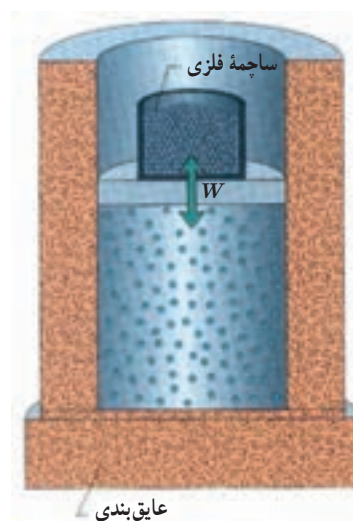
**ت) فرایند بی‌دررو:** در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط، گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن این فرایند یا باید دستگاه را مطابق شکل ۵-۱۵ کاملاً عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های فلزی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم و یا اینکه گاز را چنان به سرعت متراکم یا منبسط کنیم که گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نکند. بنابراین، در فرایند بی‌دررو  $Q = 0$  است. در نتیجه، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی‌آید:

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

یا

$$\Delta U = W$$

(۵-۵) (فرایند بی‌دررو)



**شکل ۵-۱۵** با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌ها روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

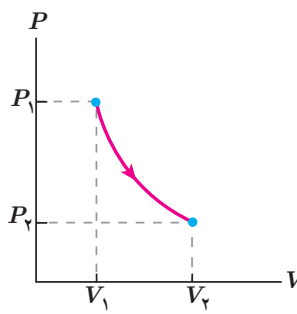
در انبساط بی‌درروی گاز آرمانی، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است، در نتیجه  $\Delta U < 0$  است و انرژی درونی گاز و دمای آن کاهش می‌یابد. در تراکم بی‌دررو، عکس این اتفاق رخ می‌دهد و انرژی درونی گاز و دمای آن افزایش می‌یابد.

## فعالیت ۳-۵

وقتی در یک نوشابه گازدار خیلی سرد را سریع باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که هاله رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.

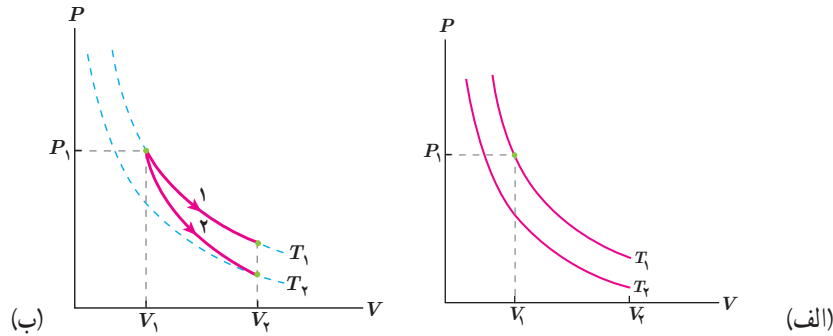


مثال ۵-۱۰



گازی آرمانی را با حجم  $V_1$  و فشار  $P_1$  در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار  $P-V$  آن خمی مشابه شکل روبه‌رو می‌شود که اندکی با خم یک فرایند هم‌دما متفاوت است. با فرض آنکه گاز در طی دو فرایند هم‌دما و بی‌دررو که از حجم و فشار یکسانی شروع می‌شوند، به حجم یکسانی انبساط یابد، نمودارهای این دو فرایند را در یک صفحه  $P-V$  رسم و با هم مقایسه کنید. در کدام فرایند مقدار کار بیشتر است؟

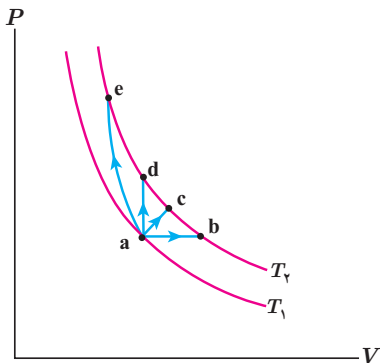
**پاسخ:** در شکل (الف) دو منحنی هم‌دما، با استفاده از نتیجه تمرین ۵-۵ برای دماهای  $T_1$  و  $T_2$  (الف) رسم شده است. در فرایند هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند. بنابراین، در انبساط هم‌دمای مسیر ۱ در شکل (ب) همواره  $T=T_1$  است، ولی همان‌طور که پیش‌تر گفتیم در انبساط بی‌دررو، دمای گاز آرمانی کاهش می‌یابد، پس گاز باید از مسیری مانند مسیر ۲ به دمایی پایین‌تر، مثل دمای  $T_2$  در شکل (ب) برسد. از اینجا همچنین نتیجه می‌شود که چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیشتر است، مقدار کار برای این فرایند بیشتر است.



تمرین ۵-۶

مثال ۵-۱۰ را با فرض آنکه گاز به‌جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

مثال ۵-۱۱



در شکل روبه‌رو گازی آرمانی را از طریق چند فرایند مختلف، از جمله یک فرایند هم‌حجم، یک فرایند هم‌فشار و یک فرایند بی‌دررو از دمای  $T_1$  به دمای  $T_2$  رسانده‌ایم. الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  به‌دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

$$C_P - C_V = R$$

پ) کار انجام شده روی گاز را در فرایند بی‌دررو بیابید.

**پاسخ: الف)** همان طور که می دانیم انرژی درونی گاز آرمانی فقط به دمای گاز بستگی دارد. بنابراین، با توجه به اینکه دماهای اولیه و نهایی در همه فرایندها یکی است، تغییر انرژی درونی در هر چهار فرایند برابر است. پس کافی است تغییر انرژی درونی را در یکی از فرایندها حساب کنیم؛ در فرایند هم حجم کار انجام شده برابر صفر است. بنابراین، می توانیم بنویسیم:

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

$$Q = nC_V \Delta T$$

$$\Delta U = nC_V \Delta T$$

ب) تغییر انرژی درونی در هر چهار فرایند برابر است. پس کافی است تغییر انرژی درونی فرایندهای هم فشار و هم حجم را مساوی هم بگیریم:

$$\Delta U_{\text{هم فشار}} = \Delta U_{\text{هم حجم}}$$

$$Q_{\text{هم فشار}} + W_{\text{هم فشار}} = Q_{\text{هم حجم}} + W_{\text{هم حجم}}$$

$$nC_P \Delta T + (-P\Delta V) = nC_V \Delta T + 0$$

اما می دانیم برای گاز آرمانی  $PV = nRT$  است و بنابراین، در فرایند هم فشار  $P\Delta V = nR\Delta T$  است. بنابراین، با تقسیم کردن دو طرف تساوی اخیر به  $n\Delta T$  خواهیم داشت:

$$C_P - R = C_V \quad \text{یا} \quad C_P - C_V = R$$

پ) قانون اول ترمودینامیک را برای فرایند بی دررو به کار می بریم:

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

و نیز با توجه به بند الف)،  $\Delta U = nC_V \Delta T$  است و بنابراین  $nC_V \Delta T = 0 + W$  و یا

$$W = nC_V \Delta T$$

نتایج مثال ۵-۱۱، کاربردهای فراوانی در ترمودینامیک گازهای آرمانی دارد.

### مثال ۵-۱۲

در یک فرایند بی دررو، دمای  $5/0^\circ \text{mol}$  گاز آرمانی تک اتمی از  $300^\circ \text{K}$  به  $285^\circ \text{K}$  می رسد.

الف) به نظر شما آیا حجم گاز افزایش پیدا کرده است یا کاهش؟

ب) کار انجام شده روی گاز در این فرایند را محاسبه کنید. ( $R = 8/31 \text{ J/mol.K}$ )

**پاسخ: الف)** با توجه به اینکه دمای گاز در فرایند بی دررو کاهش پیدا کرده است، پس حتماً فرایند انبساط بوده و حجم گاز افزایش پیدا کرده است.

ب) در مثال ۵-۱۱ دیدیم:

$$\Delta U_{\text{بی دررو}} = W = nC_V \Delta T$$

چون گاز تک اتمی است، خواهیم داشت:

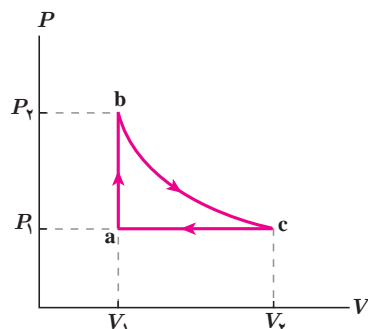
$$W = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T = 5/0^\circ \text{mol} \left(\frac{3}{2} \times 8/31 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}\right) (-15^\circ \text{K}) = -9/3 \times 10^2 \text{ J}$$





سرنگ آتش‌زنه<sup>۱</sup> استوانه کوچکی است مجهز به پیستونی که کاملاً بر سطح داخلی استوانه منطبق است. در فضای محبوس داخل سرنگ، فقط هوا و تکه کوچکی از پنبه قرار دارد. با راندن سریع پیستون به داخل، و تراکم بی‌درروی هوای محبوس، تکه پنبه مشتعل می‌شود. (معمولاً از کاغذ نیتروسولوز در این آزمایش استفاده می‌شود که نقطه اشتعال بسیار پایینی دارد.) چرا پنبه در این فرایند آتش می‌گیرد؟

### ۶-۵ چرخه ترمودینامیکی



شکل ۱۷-۵ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته‌ای را در صفحه  $P-V$  تشکیل می‌دهد.

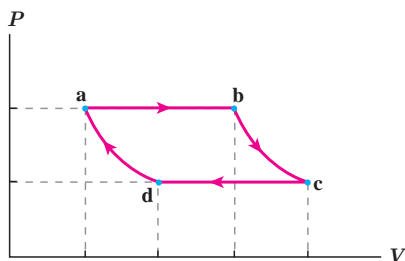
دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۱۶-۵، از سه فرایند هم‌حجم  $ab$ ، فرایند  $bc$  و فرایند هم‌فشار  $ca$  تشکیل شده است. مجموعه این فرایندها یک چرخه ترمودینامیکی را تشکیل داده است.

در واقع در چرخه ترمودینامیکی، دستگاه پس از طی چند فرایند مختلف به حالت اولیه خود بازمی‌گردد؛ 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:

$$Q = -W$$

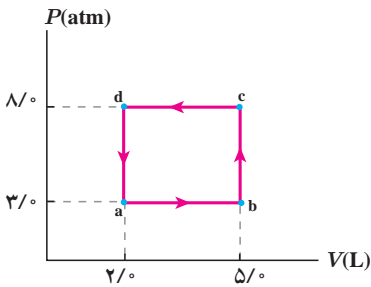
(۶-۵) (چرخه ترمودینامیکی)

### ۴-۵ فعالیت



شکل روبه‌رو یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می‌دهد.  
الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.  
ب) نشان دهید مقدار کار کل انجام‌شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.  
پ) کار کل انجام‌شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۴-۵ در یافتیم اندازه کار انجام‌شده در چرخه برابر با مساحت سطح داخل چرخه در صفحه  $P-V$  است و می‌توان نشان داد در چرخه‌های ساعتگرد در صفحه  $P-V$  کار انجام‌شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه‌های پادساعتگرد، مثبت است.



گازی چرخهٔ ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را می‌پیماید.

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) همان‌طور که دیدیم اندازه کار انجام شده روی گاز، برابر با مساحت

سطح داخل چرخه است:

$$|W| = S_{abcd} = (8/0 - 3/0) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5/0 - 2/0) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

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

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

با توجه به رابطهٔ ۵-۶ می‌توان 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 علامت منفی  $Q$  نشان می‌دهد در این چرخه، گاز به

محیط گرما داده است.

## ۵-۲ ماشین‌های گرمایی

تا حدود سه قرن 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 می‌آمد. 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. ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می‌کنند. از این ماشین‌ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، خودرو، هواپیما و فضاپیما استفاده می‌شود. همچنین در نیروگاه‌ها کار حاصل از این ماشین‌ها نخست به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکهٔ برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد و از این طریق، انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی تأمین می‌شود. از نظر تاریخی نخستین ماشین‌های گرمایی، **ماشین‌های برون‌سوز** مانند ماشین بخار بوده است. نوع دیگری از ماشین‌ها نیز وجود دارند که به‌خصوص در موتور خودروها استفاده می‌شوند و با سوخت‌هایی چون بنزین و گازوئیل کار می‌کنند که به آنها **ماشین‌های درون‌سوز** می‌گویند.

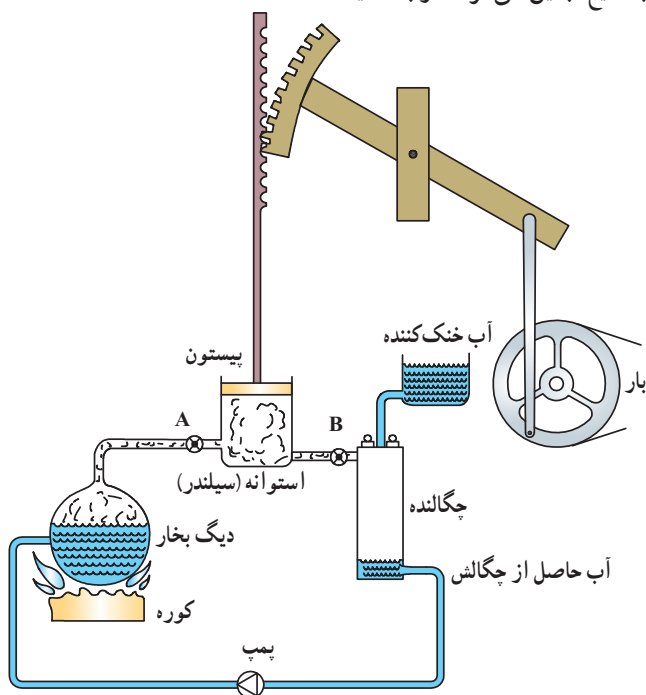
در ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند ترمودینامیکی، دستگاه مقداری گرما از محیط دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیهٔ خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از این ماشین‌ها در یک چرخهٔ معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود. در ادامه با ذکر مثال‌هایی چگونگی کار ماشین‌های برون‌سوز و درون‌سوز را توضیح می‌دهیم و با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شویم.

## الف) ماشین‌های گرمایی برون‌سوز

ماشین‌های برون‌سوز انواع مختلفی دارند که ابتدایی‌ترین نوع آنها ماشین نیوکامن<sup>۱</sup> است که از آن برای بیرون کشیدن آب از معادن استفاده می‌شد. انواع روزآمدتر این ماشین‌ها ماشین استرلینگ<sup>۲</sup> و ماشین بخار<sup>۳</sup> است. در ادامه به توضیح نمونه ساده‌ای از ماشین‌های بخار می‌پردازیم که توسط جیمزوات (۱۸۱۹-۱۷۳۶ م.) طراحی شد.

**ماشین بخار وات<sup>۴</sup>:** در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام دادن چند فرایند مختلف، که به توضیح آنها می‌پردازیم، به حالت اولیه خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود؛ چون گرما توسط کوره، از بیرون، به آب داده می‌شود، ماشین بخار از نوع ماشین‌های برون‌سوز محسوب می‌شود. با باز شدن شیر A بخار حاصل از دیگ بخار با فشار وارد استوانه (سیلندر) می‌شود و به این ترتیب، پیستون را به بالا می‌راند در حالی که شیر B بسته است. وقتی پیستون به بالای استوانه می‌رسد شیر A بسته می‌شود و به این ترتیب، دیگ بخار مسدود می‌گردد. همزمان شیر B باز می‌شود و بدین ترتیب، بخار از استوانه خارج و وارد محفظه چگالنده می‌گردد. با ورود بخار به چگالنده، پیستون پایین می‌آید و هنگامی که پیستون به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد، شیر B بسته و به طور همزمان شیر A باز می‌شود و این مراحل دوباره تکرار می‌گردد. آب خنک کننده، چگالنده را همواره خنک نگه می‌دارد و بدین ترتیب، بخاری که وارد محفظه چگالنده می‌گردد، به مایع تبدیل می‌گردد (توجه کنید که

آب خنک کننده وارد چگالنده نمی‌شود، بلکه اطراف آن را خنک می‌سازد). مایع پس از خروج از چگالنده توسط یک پمپ (تلمبه) به دیگ بخار برگردانده می‌شود و این چرخه بی‌دری تکرار می‌شود. تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بخار دشوار است. اما با برخی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه رانکین<sup>۵</sup>) رسید. منظور از چرخه آرمانی چرخه‌ای است که فرایندهای آن ایستاوار و بدون اصطکاک و هرگونه اتلافی باشد. همان‌طور که در ماشین بخار وات دیدیم دستگاه (آب) در هر چرخه با دو منبع گرمای دیگ بخار و چگالنده، تبادل گرما می‌کند و کار خالصی انجام می‌دهد. دیگ بخار را که در دمای بالاتری قرار دارد، منبع با دمای بالاتر و چگالنده را منبع با دمای پایین‌تر می‌نامند. گرمایی را که دستگاه از منبع با دمای بالاتر می‌گیرد با  $Q_H$ ، و گرمایی را که دستگاه به منبع با دمای پایین‌تر می‌دهد با  $Q_L$ ، و کار خالص انجام‌شده توسط دستگاه در طی چرخه را با  $|W|$  نمایش می‌دهیم.



شکل ۱۷-۵ طرحی از بخش‌های اصلی یک ماشین بخار وات شامل دیگ بخار، سیلندر، پیستون، چگالنده و پمپ

۱- Newcomen engine

۲- Stirling engine

۳- Steam engine

۴- James Watt engine

۵- این چرخه توسط مهندس اسکاتلندی ویلیام رانکین (۱۸۷۲-۱۸۲۰ م.) ارائه شد.

## فعالیت ۵-۵



در مورد ماشین‌های بخاری که امروزه در نیروگاه‌های گرمایی (حرارتی) استفاده می‌شوند و نحوه کارکرد آنها تحقیق کنید و نتیجه تحقیق را در کلاس ارائه نمایید.

## فعالیت ۶-۵



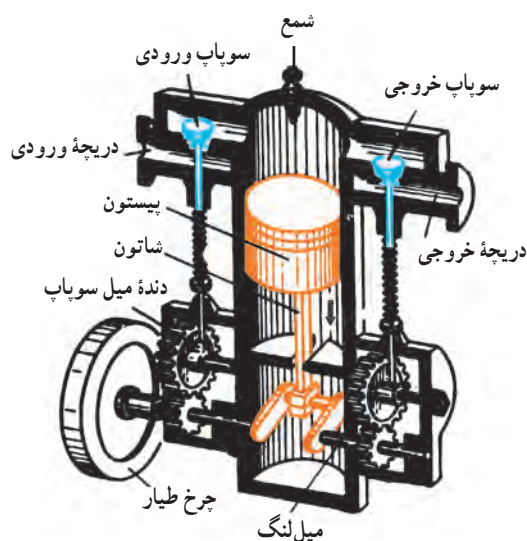
قایق پوت-پوت<sup>۱</sup>، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب‌بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

## ب) ماشین‌های گرمایی درون‌سوز

موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماها، برخی کشتی‌ها، قطارها و مولدهای کوچک برق (ژنراتور) درون‌سوزند. ماشین‌های گرمایی درون‌سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی<sup>۲</sup> می‌پردازیم.

**ماشین درون‌سوز بنزینی:** موتور ماشین بنزینی از یک یا چند استوانه (سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها داخل آنها حرکت می‌کنند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۵-۱۸ 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 چرخشی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت چرخشی 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.

ماشین بنزینی چرخه‌ای را طی می‌کند که شامل شش فرایند است. از این شش فرایند، چهار فرایند همراه با حرکت پیستون اند که به آنها ضربه<sup>۳</sup> می‌گویند. این فرایندها به طور وار در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.

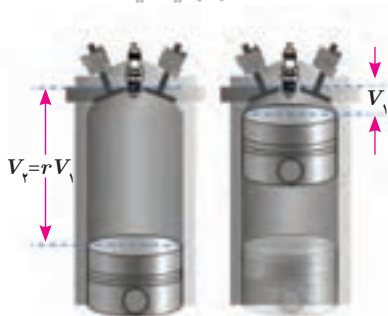


شکل ۱۸-۵ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

۱-put-put

۲-gasoline engine

۳-stroke



شکل ۱۹-۵ حجم فضای بالای پیستون در ابتدا  $V_1$  و در انتها  $rV_1$  است.

**۱- ضربه مکش:** با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد استوانه می‌شود. همان‌طور که شکل ۵-۱۹ نشان می‌دهد وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن  $V_1$  و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا  $V_2 = rV_1$  است ( $r$  را نسبت تراکم یا نسبت انبساط می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا داخل استوانه محبوس می‌گردد.

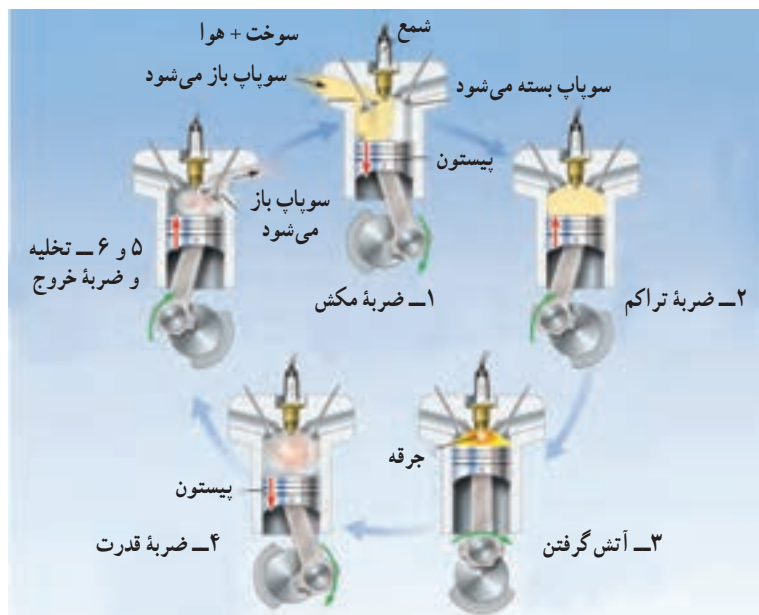
**۲- ضربه تراکم:** پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم  $V_1$  می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه، در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

**۳- آتش گرفتن:** هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت  $V_1$  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.

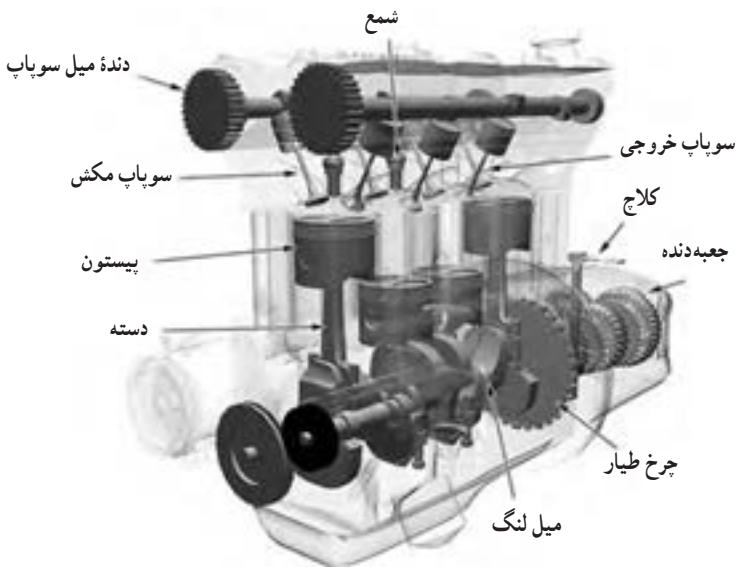
**۴- ضربه قدرت:** در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از  $V_1$  به  $V_2$  می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در نتیجه در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

**۵- تخلیه:** در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم  $V_2$ ) قرار دارد، سوپاپ دریچه خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود، تا اینکه فشار گاز داخل استوانه با فشار جو یکسان شود. در این مرحله پیستون ساکن است.

**۶- ضربه خروج گاز:** پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون می‌راند و حجم فضای بالای پیستون از  $V_2$  به مقدار اولیه  $V_1$  می‌رسد.



شکل ۲۰-۶ مراحل مختلف در جرقه موتورهای درون‌سوز



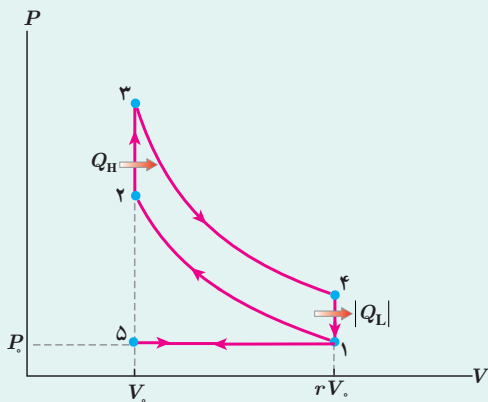
شکل ۵-۱۱ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

تحلیل دقیق چرخه یک ماشین بنزینی دشوار است. اما با بعضی ساده‌سازی‌ها می‌توان به تحلیل این ماشین‌ها پرداخت و به چرخه‌ای آرمانی (موسوم به چرخه اتو<sup>۱</sup>) رسید. در این ساده‌سازی‌ها می‌توان دستگاه را گازی آرمانی در نظر گرفت و بدین ترتیب، فرض کرد که گاز به جای مرحله آتش گرفتن، گرمای  $Q_H$  را از محیط (منبع با دمای بالا) دریافت می‌کند، به جای مرحله تخلیه و خروج گاز، گرمای  $Q_L$  را به محیط (منبع با دمای پایین) تحویل می‌دهد و سپس گاز سرد شده در فشار ثابت جو از استوانه خارج می‌شود. در طی این چرخه، کارخالص  $|W|$  را روی محیط انجام می‌دهد. شکل ۵-۲۱ طرحی از اجزای یک ماشین بنزینی چهار سیلندر را نشان می‌دهد.

### خوب است بدانید

**چرخه اتو:** همان‌طور که در متن درس اشاره شد چگونگی عمل یک ماشین درون‌سوز بنزینی را می‌توان با فرض مجموعه‌ای از ساده‌سازی‌ها به‌طور تقریبی بیان کرد و بر اساس این فرض‌ها به چرخه‌ای موسوم به چرخه اتو رسید و آن را در صفحه  $P-V$  رسم کرد. این فرض‌ها عبارت‌اند از:

- ۱- ماده کاری (ماده‌ای که در ماشین به‌عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) هواست و مانند یک گاز آرمانی با ظرفیت گرمایی ثابت رفتار می‌کند.
- ۲- تمام فرایندها ایستاوارند.
- ۳- هیچ اصطکاک یا تلاطمی وجود ندارد.
- ۴- هیچ اتلاف گرمایی از طریق دیواره‌های محفظه احتراق نداریم.
- ۵- فرایندها برگشت پذیرند. (یعنی در پایان هر فرایند، هم دستگاه و هم محیط می‌توانند دقیقاً به حالت‌های اولیه خود بازگردانده شوند)



چرخه اتو در شکل روبه‌رو رسم شده است که مراحل آن عبارت‌اند از:

- ۱ → ۵ مکش ایستاوار در فشار ثابت جو.
- ۵ → ۱ تراکم بی‌درروی ایستاوار.
- ۱ → ۲ افزایش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.
- ۲ → ۳ انبساط بی‌درروی ایستاوار.
- ۳ → ۴ کاهش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.
- ۴ → ۱ خروج ایستاوار در فشار ثابت جو.

۱- Otto Cycle - موتورهای درون‌سوز بنزینی در سال ۱۸۷۶ توسط مهندس آلمانی «نیکلاس اتو» ساخته شد و این چرخه به افتخار او چرخه اتو نامیده شده است. اما ایده موتورهای چهارضریه‌ای بیشتر در سال ۱۸۶۲ توسط مهندس فرانسوی «آلفونس روشا» مطرح شده بود.

**بازده ماشین گرمایی:** هدف از ساخت هر ماشین آن است که انرژی گرفته شده را تا بیشترین مقدار ممکن به انرژی مفید خروجی تبدیل کند. بنابراین بازده هر ماشین به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}} \quad (\text{برای هر ماشینی})$$

در ماشین های گرمایی، انرژی مفید خروجی همان کار  $|W|$  و انرژی داده شده به ماشین، همان گرمای  $Q_H$  است. بنابراین، برای بازده هر ماشین گرمایی داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (\text{برای هر ماشین گرمایی}) \quad (7-5)$$

در بررسی هر یک از ماشین های برون سوز بخار و درون سوز بنزینی برای ساده سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی فرض می کنند که در آنها هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به طور ایستوار انجام می شوند. در طی این چرخه ها مقداری گرما از یک منبع دمابالا گرفته شده  $(Q_H)$ ، مقداری کار انجام می شود  $(|W|)$  و مقداری گرما به یک منبع دماباین داده می شود  $(|Q_L|)$ . طرز کار همه ماشین های گرمایی در شکل ۲۲-۵ به طور طرح وار نشان داده شده است.

قانون اول ترمودینامیک  $\Delta U = Q + W$  برای چرخه ماشین های آرمانی به صورت زیر در می آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

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

$$Q_H = |W| + |Q_L|$$

در نتیجه بازده برای ماشین های گرمایی آرمانی چنین می شود:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \quad (\text{برای ماشین های گرمایی آرمانی}) \quad (8-5)$$

بازده ماشین های گرمایی واقعی از بازده ماشین های آرمانی کمتر است. بازده واقعی ماشین های درون سوز بنزینی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بازده ماشین های درون سوز دیزلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد، و بازده ماشین های برون سوز بخار ۳۰ تا ۴۰ درصد است.

**مثال ۵-۱۴**

بازده یک ماشین درون سوز بنزینی ۲۲/۰ درصد است. این ماشین در هر چرخه  $2/51 \times 10^3 \text{ J}$  کار انجام می دهد. الف) گرمای حاصل از سوخت و ب) گرمای خارج شده از موتور در هر چرخه چقدر است؟ ماشین را آرمانی فرض کنید.

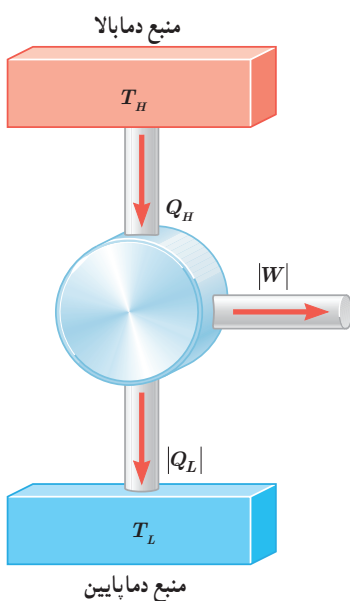
**پاسخ:** الف) با استفاده از رابطه ۷-۵ داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \Rightarrow 0.22 = \frac{2/51 \times 10^3}{Q_H}$$

$$Q_H = 1/141 \times 10^4 \text{ J} \approx 1/14 \times 10^4 \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه  $Q_H = |W| + |Q_L|$  داریم:

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 1/141 \times 10^4 \text{ J} - 2/51 \times 10^3 \text{ J} = 8/90 \times 10^3 \text{ J}$$



شکل ۲۲-۵ طرز کار طرح وار یک ماشین گرمایی آرمانی



شکل ۲۳۳ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

### نسبت تراکم ماشین‌ها: محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت

تراکم<sup>۲</sup> می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی رسید. اما در عمل ممکن نیست به هر نسبت تراکمی دست یافت؛ مثلاً نسبت تراکم ماشین‌های بنزینی معمولی تا حدود ۱۰ و ماشین‌های بنزینی مدرن تا حدود ۱۴ است. در نسبت‌های تراکم بالا، مخلوط سوخت و هوا در ضربه تراکم، چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل<sup>۱</sup> 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 به طوری دررو متراکم و در نتیجه داغ می‌شود تا اینکه بتواند گازوئیلی را که به داخل استوانه پاشیده می‌شود محترق کند (در این ماشین، شمع وجود ندارد). میزان پاشیده شدن گازوئیل طوری تنظیم می‌شود که احتراق تقریباً به طور هم فشار پیستون را به سمت پایین هل می‌دهد. بقیه چرخه، یعنی ضربه قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربه خروج دقیقاً مانند ماشین بنزینی است. در تحلیل ماشین دیزل نیز مانند ماشین بنزینی از اثرهای اتلافی چشم‌پوشی می‌شود. نسبت تراکم برای ماشین‌های دیزل را حتی تا مقدار ۲۳ نیز می‌توان افزایش داد. شکل ۲۳-۵ طرحی از سیلندر و اجزای جانبی این ماشین را نشان می‌دهد.

### ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بخش قبل و در بررسی ماشین‌های گرمایی، دیدیم که همه این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای  $Q_H$  را از یک منبع دمابالا می‌گیرد، مقداری از آن را به کار  $|W|$  تبدیل می‌کند و بقیه  $|Q_L|$  را به یک منبع دماپایین می‌دهد. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که آیا امکان تبدیل همه گرمای دریافتی به کار وجود دارد؟ در واقع، هیچ یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همه گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: "ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بیامید که در طی آن مقداری گرما را از منبع دمابالا جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند."

عبارت بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان **ماشین گرمایی** نامیده می‌شود؛<sup>۲</sup> 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 دمابالا 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.

۱- Rudolf Christian Karl Diesel (۱۸۵۸-۱۹۱۳)

۲- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلون-پلانک قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.





**نیکلاس سدی کارنو**  
 نیکلاس لئونارد  
 سدی کارنو<sup>۱</sup> در  
 سال ۱۷۹۶ میلادی  
 در پاریس و در  
 خانواده‌ای که در آن  
 علم و سیاست عجین  
 شده بود، به دنیا آمد.

او نخستین پسر لایزر کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لایزر بخش سوم نام فرزند 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-لوئیس-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» 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 این رو، از کارنو اغلب به عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در سال ۱۸۳۲ میلادی در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

**قضیه کارنو:** بر اساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از یک (۱۰۰ درصد) کمتر است و اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع با دماهای  $T_L$  و  $T_H$  کار می‌کند چقدر است؟ و ماده کاری (ماده‌ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می‌شود) چه تأثیری بر این بازده دارد؟ پاسخ به این پرسش‌ها را سدی 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 و دریافت که بازده چنین ماشینی مستقل از ماده کاری است که چرخه ماشین را طی می‌کند. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** می‌نامند.  
 محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (9-5) \quad (\text{برای ماشین کارنو})$$

که در آن  $T_L$  و  $T_H$  بر حسب کلوین است. همان‌طور که می‌بینید بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع دما بالا و دمای پایین که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.  
 بنا به **قضیه کارنو**، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای  $T_L$  و  $T_H$  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 ۵-۱۵**

توربین بخار یک نیروگاه برق بین دماهای  $T_H = 800 \text{ K}$  و  $T_L = 300 \text{ K}$  کار می‌کند. بازده ماشین کارنویی که بین این دو دما کار می‌کند چقدر است؟  
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۹-۵ داریم:

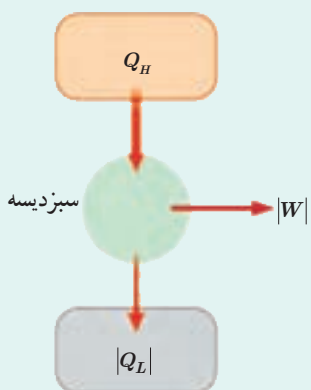
$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{800 \text{ K}} = 0.625$$

بازده واقعی توربین‌های بخار در عمل از این عدد کمتر و در حدود ۴۰ درصد است.

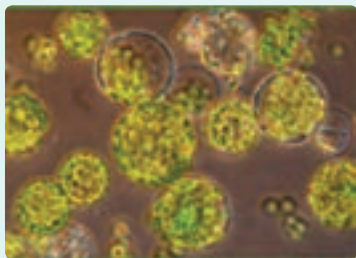
**خوب است بدانید**

**ترمودینامیک و فتوسنتز:** ترمودینامیک در پدیده‌های زیستی نیز کاربرد دارد. یکی از این کاربردها فتوسنتز است. در فتوسنتز، گیاهان درصد کوچکی از انرژی نور خورشید را که در بخشی از گستره نور مرئی واقع است به دام می‌اندازند و به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. در واقع فتوسنتز شامل دو مرحله است. در مرحله نخست، انرژی نور خورشید به دام می‌افتد و

۱- Nicolas Leonard Sadi Carnot



(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.



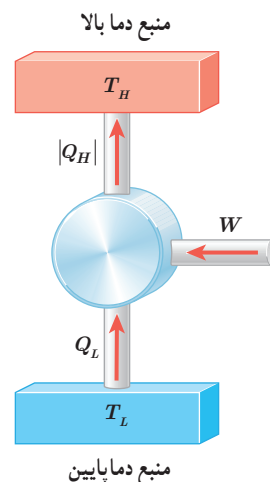
(ب) یک یاخته گیاهی شامل سبزدیسه‌هاست.

صرف تولید مولکول‌هایی می‌شود که این انرژی را به‌طور موقت ذخیره می‌کنند و در مرحله دوم انرژی شیمیایی ذخیره شده، صرف ساختن ترکیب‌های آلی می‌شود. شکل (الف) مرحله نخست فرایند فوتوسنتز را به گونه‌ای مشابه آنچه که یک ماشین گرمایی انجام می‌دهد نشان می‌دهد. انرژی حاصل از خورشید وارد گیاه می‌شود. سبزدیسه (کلروپلاست) گیاه (شکل ب) همچون یک ماشین گرمایی این انرژی را می‌گیرد و کار  $|W|$  را انجام می‌دهد و در همین زمان گرمای  $|Q_L|$  را به محیط، که همان هوا و خاک اطراف گیاه است، می‌دهد. در ماشین‌های گرمایی، ماشین کار را مثلاً به‌صورت چرخاندن یک چرخ انجام می‌دهد. در فوتوسنتز، سبزدیسه که شامل رنگیزه‌های سبزینه (کلروفیل) است، کار را به‌صورت انرژی شیمیایی در مولکول‌های خاصی مانند ATP (آدنوزین تری فسفات) ذخیره می‌کند. این انرژی شیمیایی می‌تواند بعداً وقتی جانوری گیاه را می‌خورد به‌صورت کار مکانیکی درآید.

## ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

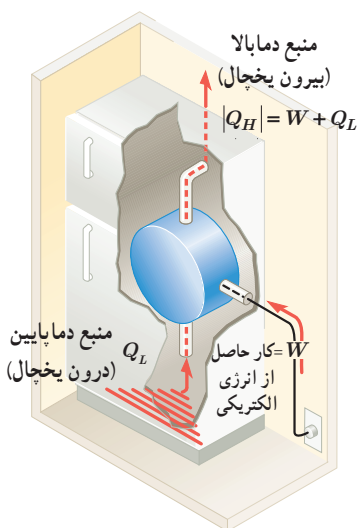
گرما همواره از جسمی با دمای بالا به جسمی با دمای پایین منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل به‌طور خودبه‌خود رخ نمی‌دهد. مثلاً اگر یک لیوان آب سرد در اتاق قرار داشته باشد گرما به‌طور خودبه‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود و ممکن نیست آب به‌طور خودبه‌خود سردتر شود. به‌عبارت دیگر: "ممکن نیست گرما به‌طور خودبه‌خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود." به این گزاره، **قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی** می‌گویند. اما با انجام کار می‌توان گرما را از جسمی سرد به جسمی گرم منتقل کرد. (می‌توان نشان داد دو بیان ماشین گرمایی و یخچالی قانون دوم ترمودینامیک معادل یکدیگرند؛ یعنی اگر قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی نقض شود، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نیز نقض می‌شود و برعکس.)

**یخچال** وسیله‌ای است که این عمل را انجام می‌دهد و با استفاده از کار، گرما را از منبعی دمایی پایین می‌گیرد و به منبعی دمایی بالا می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخه ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه (ماده کاری) کار  $W$  را انجام می‌دهد. دستگاه گرمای  $Q_L$  را از منبع دمایی پایین می‌گیرد و گرمای  $|Q_H|$  را به منبع دمایی بالا می‌دهد. به‌عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به‌طور طرح‌وار در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است.

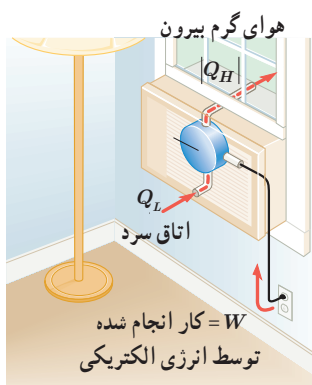


شکل ۵-۲۴ طرز کار طرح‌وار یک یخچال آرمانی

۱- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلاسیوس قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.



شکل ۵-۲۵ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی



شکل ۵-۲۷ طرحی از طرز کار یک کولرگازی

یخچال‌های خانگی، کولرهای گازی و تلمبه‌های گرمایی نمونه‌هایی از یخچال‌ها هستند؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار  $W$  توسط متر اکم‌ساز (کمپرسور) می‌شود، گرمای  $Q_L$  از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود و گرمای  $|Q_H|$  به هوای بیرون یخچال داده می‌شود (شکل ۵-۲۵). طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولر گازی منبع دماب پایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دماب بالا، هوای بیرون اتاق است (شکل ۵-۲۶).

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

$$K = \frac{Q_L}{W} \quad (۱۰-۵) \quad (\text{برای هر یخچالی})$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد برای یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و برای کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است.

در بررسی یخچال‌ها، مانند ماشین‌های گرمایی برای ساده‌سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی را فرض می‌کنیم که در آن هیچ اتلافی نداریم و فرایندها به‌طور ایستوار انجام می‌شوند. اکنون قانون اول ترمودینامیک ( $\Delta U = Q + W$ ) برای چرخه یخچال آرمانی به صورت زیر در می‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

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

$$|Q_H| = W + Q_L$$

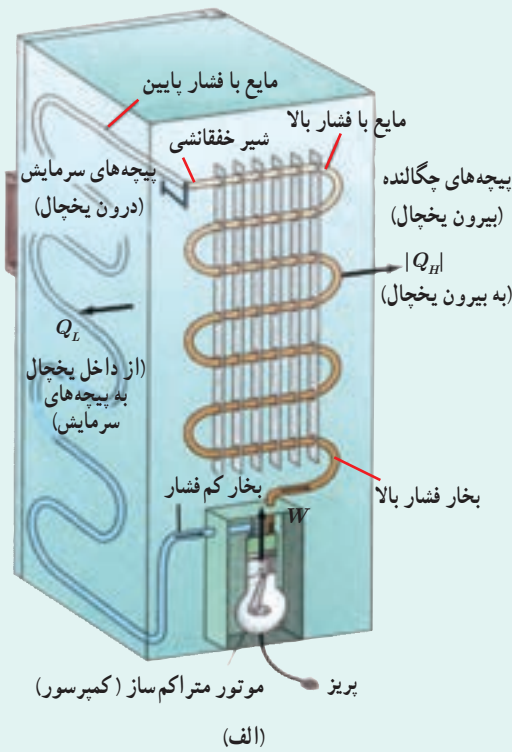
با قرار دادن  $W$  از رابطه بالا در رابطه ضریب عملکرد (معادله ۵-۱۰)، ضریب عملکرد یخچال‌های آرمانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} \quad (۱۱-۵) \quad (\text{برای یخچال‌های آرمانی})$$

مانند ماشین‌های گرمایی که بازده آنها حدّ بالایی دارد، برای ضریب عملکرد یخچال‌ها نیز حدّ بالایی وجود دارد. به این حدّ بالا، ضریب عملکرد **یخچال کارنو** گفته می‌شود و نشان داده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید.

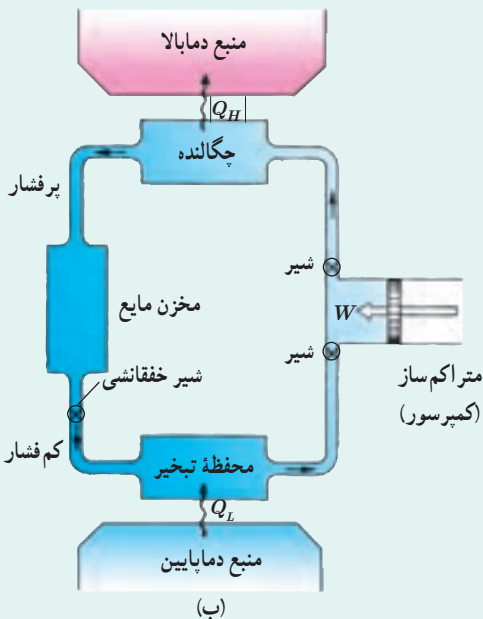
$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (۱۲-۵) \quad (\text{برای یخچال کارنو})$$

در این رابطه  $T_H$  و  $T_L$  به ترتیب، دمای منبع‌های دماب پایین و دماب بالا برحسب کلین است.



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 عبارت‌اند از: چگالنده، پیچه‌های سرمایش (محفظه تبخیر)، متراکم‌ساز (کمپرسور) و شیر خفقا نشی (شیر فشار شکن). چگالنده با منبع دما بالا (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع دما پایین (محتویات داخل یخچال) در تماس است. در یخچال‌های قدیمی‌تر ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است، اما 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 مایع در فشار زیاد تبدیل می‌شود و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم درمی‌آید.



طرز کار یخچال خانگی به‌طور مختصر به شرح زیر است: کمپرسور با انجام کار  $W$  گاز را از محفظه تبخیر به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع دما بالا (اتاق) بیشتر شده است، گرمای  $|Q_H|$  را به این منبع می‌دهد، مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پر فشار از شیر خفقا نشی می‌گذرد به شدت سرد می‌شود، به طوری که از منبع دما پایین (هوای داخل یخچال) هم سردتر می‌شود و از آن گرمای  $Q_L$  را می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.

با فرض آنکه بتوان ضریب عملکرد یک یخچال را با ضریب عملکرد یخچال کارنو توصیف کرد، به گمان شما یک کولر گازی برای رساندن دمای اتاق به یک دمای معین، در آب و هوای معتدل بهتر کار می‌کند، یا در آب و هوای گرم؟

فرض کنید در هر چرخه یک یخچال فرضی، دستگاه  $8/0 \text{ kJ}$  گرما از منبع دمای پایین بگیرد و کمپرسور  $2/0 \text{ kJ}$  کار روی دستگاه انجام دهد. با فرض آرمانی بودن یخچال،

الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟

ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه  $|Q_H| = W + Q_L$  برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = 2/0 \text{ kJ} + 8/0 \text{ kJ} = 10/0 \text{ kJ}$$

ب) با استفاده از رابطه  $5-1$  داریم:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{8/0 \text{ kJ}}{2/0 \text{ kJ}} = 4/0$$

توان یک یخچال  $100$  وات و ضریب عملکرد آن  $4/0$  است. با فرض آرمانی بودن یخچال،

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

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می‌شود؟ ( $L_F = 3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}$  و  $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ )

پاسخ: الف) گرمای  $Q_L$  که آب از دست می‌دهد، برابر است با

$$Q_L = mc_{\text{آب}}|\Delta\theta| + mL_F = (1/0 \text{ kg})(4/20 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot\text{C})(25/0^\circ \text{C}) + (1/0 \text{ kg})(3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) = 4/40 \times 10^5 \text{ J}$$

اکنون با استفاده از رابطه  $5-1$  برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_L}{K} = \frac{4/40 \times 10^5 \text{ J}}{4/0} = 1/10 \times 10^5 \text{ J}$$

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

$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/10 \times 10^5 \text{ J}}{1000 \text{ J/s}} = 1/10 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از رابطه  $|Q_H| = W + Q_L$  برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = 1/10 \times 10^5 \text{ J} + 4/40 \times 10^5 \text{ J} = 5/50 \times 10^5 \text{ J}$$

۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

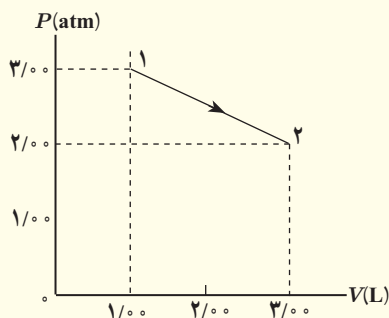
۱ ظرفی شامل  $3/0\text{ kg}$  آب است. با هم زدن آب داخل ظرف،  $40\text{ kJ}$  کار روی آن انجام می‌دهیم و در این مدت  $31\text{ kJ}$  گرما از ظرف به بیرون منتقل می‌شود. انرژی درونی آب چقدر تغییر می‌کند؟

۵-۵ برخی فرایندهای ترمودینامیکی

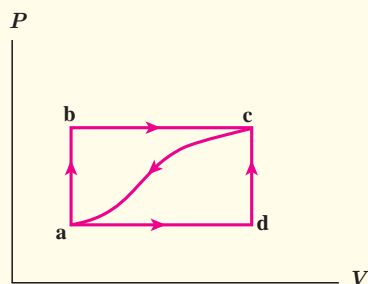
۲ الف) در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟  
ب) در فرایند هم فشار چگونه می‌توان حجم گاز را افزایش یا کاهش داد؟

۳ ته یک سرنگ را که دسته آن می‌تواند آزادانه حرکت کند مسدود می‌کنیم، آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

۴ حجم  $5/0$  مول از یک گاز آرمانی تک اتمی  $8/3$  لیتر و فشار آن  $1/5$  اتمسفر است. الف) مقداری گرما به گاز می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید. ب) اگر به جای گرما دادن به گاز، مقداری گرما از گاز بگیریم تا حجم آن در طی یک فرایند هم فشار نصف شود، کار و گرمای مبادله شده در این فرایند چقدر می‌شود؟

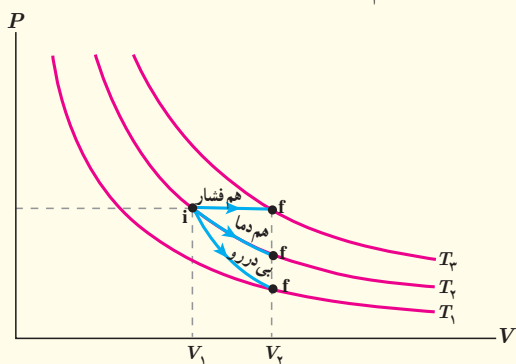


۵ نمودار  $P-V$  ی گازی رقیق در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. در این فرایند با فرض آنکه انرژی درونی در نقطه (۱) برابر  $456\text{ J}$  و در نقطه (۲) برابر  $912\text{ J}$  باشد، چقدر گرما مبادله شده است؟ آیا گاز گرما گرفته است یا از دست داده است؟



۶ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر،  $90$  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 خمیده از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن انرژی بگیریم؟

۷  $12/0\text{ g}$  گاز اکسیژن ( $O_2$ ) در فشار متعارف جو ( $1/01 \times 10^5\text{ Pa}$ ) از  $25/0^\circ\text{C}$  تا  $125^\circ\text{C}$  گرم می‌شود. نسبت تغییر انرژی درونی گاز به گرمای داده شده به آن را به دست آورید؟

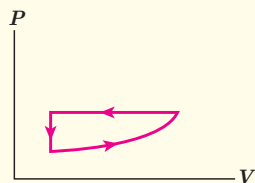


۸ یک مکعب آلومینیمی توپُر به ضلع  $20/0\text{ cm}$  از  $50/0^\circ\text{C}$  تا  $150/0^\circ\text{C}$  در فشار متعارف جو ( $1/01 \times 10^5\text{ Pa}$ ) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب و تغییر انرژی درونی آن را محاسبه کنید.

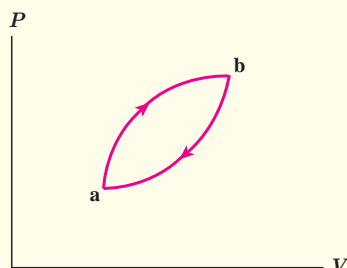
۹ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم فشار، هم دما و بی‌دررو از  $V_1$  به حجم بزرگ‌تر  $V_2$  می‌رسد.

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.

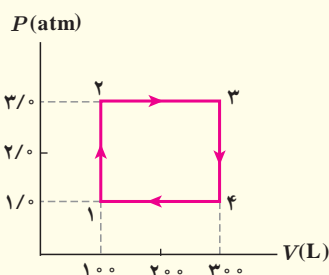
### ۵-۶ چرخه ترمودینامیکی



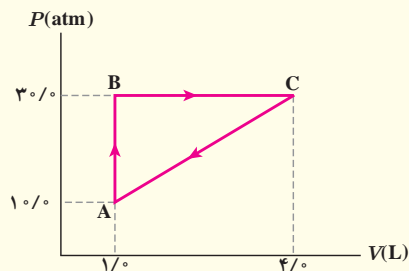
۱۰) برای چرخه گازی که نمودار  $P-V$  ی آن در اینجا نشان داده شده است،  $\Delta U$ ،  $W$  و  $Q$  مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



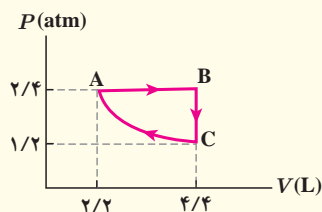
۱۱) شکل روبه‌رو چرخه‌ای را نشان می‌دهد که یک گاز طی کرده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است؟ ب) اگر مقدار گرمای مبادله شده در این چرخه  $400\text{ J}$  باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



۱۲) یک گاز کامل دو اتمی چرخه نشان داده شده در شکل روبه‌رو را می‌پیماید. دمای گاز در حالت (۱) برابر  $200\text{ K}$  است. الف) دما در سه نقطه دیگر چقدر است؟ ب) کار انجام شده در چرخه چقدر است؟ پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟ ت) در چه فرایندهایی گاز گرما از دست داده است؟

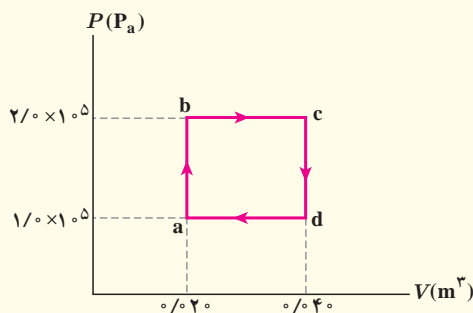


۱۳) گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای مبادله شده در این چرخه چند ژول است؟



۱۴) دستگاهی متشکل از  $0.32\text{ mol}$  گاز کامل تک‌اتمی حجمی برابر  $2/2\text{ L}$  را در فشار  $2/4\text{ atm}$  اشغال کرده است. این دستگاه چرخه‌ای مطابق شکل را می‌پیماید که در آن فرایند  $CA$  فرایندی هم‌دما است. الف) دما در نقاط  $A$ ،  $B$  و  $C$  چقدر است؟ ب)  $\Delta U$  را برای هر یک از سه فرایند چرخه به دست آورید.

### ۵-۷ ماشین‌های گرمایی



۱۵) یک مول از یک گاز کامل تک‌اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه‌ای را مطابق شکل روبه‌رو می‌پیماید. مطلوب است:  
الف) کار انجام شده توسط ماشین گرمایی در پیمودن یک چرخه،  
ب) گرمای مبادله شده در فرایند  $abc$ ،  
پ) گرمای مبادله شده در فرایند  $cda$ ،  
ت) تغییر انرژی درونی در فرایند  $abc$

- ۱۶ یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه  $J$   $100\%$  گرما از منبع دما بالا می‌گیرد و  $J$   $60\%$  گرما به منبع دما پایین می‌دهد. الف) بازده این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه  $s$   $500\%$  طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟
- ۱۷ بازده یک ماشین آرمانی  $25\%$  درصد است و در هر چرخه  $J$   $10^2 \times 8/2$  کار انجام می‌دهد. الف)  $Q_H$  و  $Q_L$  را در هر چرخه ماشین به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به  $30\%$  درصد افزایش یابد،  $Q_H$  و  $Q_L$  به ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟
- ۱۸ یک ماشین بخار در هر دقیقه  $MJ$   $10^5 \times 1/5$  گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و  $MJ$   $10^4 \times 9/0$  گرما در چگالنده از دست می‌دهد. با فرض آرمانی بودن این ماشین الف) کار انجام شده توسط ماشین در هر دقیقه چند مگاژول است؟ و ب) بازده این ماشین چقدر است؟
- ۱۹ یک ماشین گرمایی درون‌سوز در هر چرخه  $kJ$   $8/0$  گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و  $kJ$   $2/0$  کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت  $J/g$   $10^4 \times 5/0$  است و ماشین در هر ثانیه  $40\%$  چرخه را می‌پیماید. کمیت‌های زیر را حساب کنید.
- الف) بازده ماشین، ب) با فرض آرمانی بودن ماشین، گرمای تلف شده در هر چرخه، پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه و ت) توان ماشین.

### ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

- ۲۰ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه‌های جوش (در فشار متعارف جو) و انجماد آب کار می‌کند و بازده آن  $70\%$  درصد است. آیا ادعای این مخترع می‌تواند درست باشد؟ توضیح دهید.
- ۲۱ می‌خواهیم بازده یک ماشین کارنو را افزایش دهیم. با مثالی عددی بررسی کنید آیا بهتر است که دمای منبع دما بالا را افزایش دهیم یا دمای منبع دما پایین را به همان مقدار کاهش دهیم؟
- ۲۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع‌های با دمای  $K$   $300$  و  $K$   $400$  کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از:

ماشین A	$Q_H = 2000J$	$Q_L = -1750J$	$W = -40J$
ماشین B	$Q_H = 500J$	$Q_L = -200J$	$W = -400J$
ماشین C	$Q_H = 600J$	$Q_L = -200J$	$W = -400J$
ماشین D	$Q_H = 100J$	$Q_L = -90J$	$W = -10J$

با فرض آرمانی بودن این چهار ماشین:

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

- ۲۳ یک ماشین کارنو بین دماهای  $K$   $280$  و  $K$   $360$  کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه  $J$   $750$  گرما از منبع دما بالا می‌گیرد. الف) در هر چرخه  $|W|$  چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع دما پایین داده می‌شود؟

### ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

- ۲۴ قرار است نیم ساعت دیگر مهمانی برای شما برسد در حالی که هیچ یخی را برای نوشابه خود آماده نکرده‌اید. به سرعت  $L$   $1/0$  آب  $C$   $10$  را در قالب‌های یخ می‌ریزید و در فریزر قرار می‌دهید. آیا در زمانی که مهمان می‌رسد، یخ خواهید داشت؟ ضریب عملکرد یخچال  $4/0$  و توان آن  $W$   $110$  است. (فرض کنید همه توان الکتریکی یخچال صرف سرد کردن و یخ زدن آب می‌شود.)
- ۲۵ یک کولر گازی در هر دقیقه  $J$   $10^4 \times 9/0$  گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت  $J$   $10^5 \times 1/3$  گرما به فضای بیرون می‌دهد. با فرض آرمانی بودن کولر،  
الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟ ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟
- ۲۶ فرض کنید  $g$   $250$  آب صفر درجه سلسیوس در اختیار داریم. می‌خواهیم با قرار دادن این آب در یخچال، یخ تهیه کنیم. یخچال در اتاقی قرار دارد که دمای آن  $C$   $22$  است. دمای داخل یخچال در  $C$   $5$  ثابت نگه داشته شده است. کمترین مقدار انرژی الکتریکی که باید به یخچال داده شود تا یخ صفر درجه سلسیوس تشکیل شود، چقدر است؟



## محاسبه‌های جبری با رقم‌های بامعنا

هنگامی که عددها در هم ضرب یا بر هم تقسیم می‌شوند تعداد رقم‌های بامعنا در نتیجه محاسبه نمی‌تواند بیشتر از تعداد رقم‌های بامعناى عددی باشد که کمترین رقم بامعنا را دارد. مثلاً حاصل عبارت  $۳/۱۴۱۵ \times ۲/۹۲۳ \times ۷/۱۲$  هر چند برابر  $۶۵/۳۸۰۱۴۴۰۴$  می‌شود، ولی باید با سه رقم بامعنا، یعنی  $۶۵/۴$  بیان شود. در جمع یا تفریق عددها آنچه اهمیت دارد محل ممیز است و نه تعداد رقم‌های بامعنا. برای نمونه، حاصل عبارت  $۲۴۵/۴۱ + ۴/۸$  باید به صورت  $۲۵۰/۲$  بیان شود. اگر نتیجه به صورت  $۲۵۰/۲۱$  بیان شود نادرست است. همچنین حاصل عبارت  $۲۱/۴۳۵۶ - ۴۱/۳۴۲ + ۱۲/۰$  باید به صورت  $۳۱/۹$  بیان شود.

**چگونگی تشخیص رقم‌های بامعنا:** در جدول زیر و ادامه آن نحوه تعیین تعداد رقم‌های بامعنا به همراه مثال آمده است:

مثال	قاعده
۷۸۸/۶ چهار رقم بامعنا دارد.	تمام عددهای غیر صفر بامعنا هستند.
۴۰۸ سه رقم بامعنا دارد.	تمام صفرهایی که بین اعداد غیر صفر قرار دارند بامعنا هستند.
۰/۰۰۰۹۰۷ سه رقم بامعنا دارد.	صفرهایی که در طرف چپ اعداد قرار دارند، بامعنا نیستند.

صفرهایی که در طرف راست اعداد قرار دارند می‌توانند بامعنا باشند یا نباشند. برای مثال، اگر طول میله‌ای  $۲۳۰\text{mm}$  گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا ممکن است دو یا سه رقم باشد. اگر نتیجه اندازه‌گیری با نماد گذاری علمی، به صورت  $۲۳۰\text{mm} = ۲/۳ \times ۱۰^۲\text{mm}$  نوشته شود، دارای دو رقم بامعنا و اگر به صورت  $۲۳۰\text{mm} = ۲/۳۰ \times ۱۰^۲\text{mm}$  نوشته شود دارای سه رقم بامعنا است. در برخی از کتاب‌های درسی، برای سادگی، تمام صفرهای سمت راست اعداد را بامعنا فرض می‌کنند. در کتاب فیزیک (۱) نیز ما از این فرض استفاده کرده‌ایم. بنابراین وقتی طول میله‌ای  $۲۳۰\text{mm}$  گزارش شده باشد، تعداد رقم‌های بامعنا در این گزارش را سه رقم می‌گیریم.

## واژه نامه فارسی - انگلیسی

Crystalline Solid	جامدهای بلورین	Rate	آهنگ
Amorphous Solid	جامدهای بی شکل	Flow Rate	آهنگ جریان
Mass	جرم	Greenhouse Effect	اثر گلخانه‌ای
Turbulent Flow	شارش تلاطمی	Significant Figures	ارقام با معنا
Laminar Flow	جریان لایه‌ای	Cylinder	استوانه (سیلندر)
Floating Object	جسم شناور	Static Friction	اصطکاک ایستایی
Submerged Object	جسم غوطه‌ور	Principle	اصل
Earth Atmosphere	جو زمین	Archimedes' Principle	اصل ارشمیدس
Barometer	جو سنج	Bernoulli Principles	اصل برنولی
Boiling	جوشیدن	Expansion	انبساط
Cycle	چرخه	Volume Expansion	انبساط حجمی
Otto Cycle	چرخه اُتو	Linear Expansion	انبساط طولی
Viscosity	گران‌روی	Thermal Expansion	انبساط گرمایی
Source	چشمه	Freezing	انجماد
Condensation	چگالش	Measurement	اندازه‌گیری
Condenser	چگالنده	Potential Energy	انرژی پتانسیل
Density	چگالی	Gravitational Potential Energy	انرژی پتانسیل گرانشی
Phase	حالت (فاز)	Elastic Potential Energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Motion	حرکت	Kinetic Energy	انرژی جنبشی
Brownian Motion	حرکت براونی	Internal Energy	انرژی درونی
Error	خطا	Contraction	انقباض
Fundamental Knowledge	دانش بنیادی	Time Interval	بازه زمانی
Accuracy	درستی (صحت)	Efficiency	بازده
Valve	دریچه (سوآپ)	Resultant	برایند
International System Units	دستگاه بین‌المللی یکاها	Vector	بردار
Thermodynamics System	دستگاه ترمودینامیکی	Expansion Joint	بست انبساطی
Metric System	دستگاه متریک	Crystalline	بلورین
Precision	دقت	Conservation of Energy	پایستگی انرژی
Adhesion	دگرچسبی	Diffusion	پخش
Temperature	دما	Physical Phenomena	پدیده‌های فیزیکی
Thermostat	دماپا	Plasma	پلازما
Thermometer	دماسنج	Piston	پیستون
Thermometer Clinical	دماسنج طبی	Unit Prefixes	پیشوندهای یکا
Maximum - Minimum Thermometer	دماسنج کمینه- بیشینه	Thermal Radiation	تابش گرمایی
Standard Thermometer	دماسنج معیار	Vaporization	تبخیر
Thermograph	دمانگار	Evaporation	تبخیر سطحی
Dynamics	دینامیک (پویاشناسی)	Experimental	تجربی
Boiler	دیگ بخار	Estimate	تخمین (برآورد)
Elementary Particles	ذرات بنیادی	Compressibility	تراکم پذیری
Melting	ذوب	Wetting	ترشوندگی
Fusion	گداخت (همجوشی)	Sublimation	تصعید
Thermal Conduction	رسانش گرمایی	Thermal Equilibrium	تعادل گرمایی
Humidity	رطوبت	Pyrometer	تف سنسج
Micrometer	ریزسنسج	Optical Pyrometer	تف سنسج نوری
Light Year	سال نوری	Turbulent	متلاطم
Global Positioning System(GPS)	سامانه مکان‌یابی جهانی	Speed	تندی
Velocity	سرعت	Takeoff Speed	تندی برخاستن
The Fire Syringe	سرنگ آتش‌زنه	Average Speed	تندی متوسط
Valve	دریچه، سوآپ	Power	توان
Fluid	شاره	Gas Universal Constant	ثابت جهانی گازها
Dew	شبنم	Displacement	جابه‌جایی
Acceleration	شتاب	Solid	جامد

Steam engine	ماشین بخار	Spark Plug	شمع
Gasoline Engine	ماشین بنزینی	Exhaust Stroke	ضربه تخلیه
Diesel Engine	ماشین دیزل	Compression Stroke	ضربه تراکم
Carnot Engine	ماشین کارنو	Power Stroke	ضربه قدرت
Heat Engine	ماشین گرمایی	Intake Stroke	ضربه مکش
External Combustion Engine	ماشین گرمایی برون سوز	Conversion Factor	ضریب (عامل) تبدیل
Internal Combustion	ماشین گرمایی درون سوز	Coefficient of Performance	ضریب عملکرد
Environment	محیط	Heat Capacity	ظرفیت گرمایی
Model	مدل	Insulator	عایق
Modeling	مدل سازی	Uncertainty	عدم قطعیت
Order-of Magnitude	مرتبه بزرگی	Nanoscience	علوم نانو
Explosion Step	مرحله آتش گرفتن	Quasi-Static Process	فرایند ایستاوار
Exhaust Step	مرحله تخلیه	Adiabatic Process	فرایند بی دررو
Equation of Continuity	معادله پیوستگی	Thermodynamics Process	فرایند ترمودینامیکی
Equation of State	معادله حالت	Throttling Process	فرایند خفقا نشی (فشار شکن)
Approximate Value	مقدار تقریبی	Isochoric process	فرایند هم حجم
Temperature Scale	مقیاس دماسنجی	Isothermal process	فرایند هم دما
Nano-Scale	مقیاس نانو	Isobaric process	فرایند هم فشار
High-temperature Reservoir	منبع دما بالا	Pressure	فشار
Low-temperature Reservoir	منبع دما پایین	Gauge Pressure	فشار پیمانه ای (سنجهای)
Heat Reservoir	منبع گرما	Standard Atmospheric Pressure	فشار متعارف جو
Capillarity	مویبگی	Manometer	فشارسنج
Liquefaction	میعان	Technology	فناوری
Crank	میل لنگ	Spring	فنر
Nanoparticle	نانو ذره	Rule of Dulong-Petit	قاعده دولن - پتی
Nanolayer	نانو لایه	First Law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک
Nanotechnology	نانوفناوری	Second Law of Thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک
Scalar	نرده ای	Newtons Laws	قانون های نیوتون
Compression Ratio	نسبت تراکم	Work - kinetic Energy Theorem	قضیه کار - انرژی جنبشی
Physical Theory	نظریه فیزیکی	Carnot Theorem	قضیه کارنو
Freezing Point	نقطه انجماد	Carat	قیراط
Boiling Point	نقطه جوش	Work	کار
Melting Point	نقطه ذوب	Surface Tension	کشش سطحی
Triple Point	نقطه سه گانه	Physical Quantity	کمیت های فیزیکی
Scientific Notation	نماد گذاری علمی	Gravitational Work	کار گرانشی
Bi-Metal Strip	نوار دوفلزه	Temperature Quantity	کمیت دماسنجی
Force	نیرو	Macroscopic Quantity	کمیت ماکروسکوپی
Spring Balance	نیروسنج فنری	Vector Quantities	کمیت های برداری
Repulsive Force	نیروی رانشی	Scalar Quantities	کمیت های نرده ای
Attractive Force	نیروی ربایشی	Caliper	کولیس
Dissipative Forces	نیروهای اتلافی	Galaxy	کهکشان
Buoyant Force	نیروی شناوری	Ideal Gas	گاز آرمانی (کامل)
Air (Temperature) Inversion	وارونگی هوا (دما)	Gravitation	گرانش
Weight	وزن	Heat	گرما
Cohesion	هم چسبی	Calorimeter	گرماسنج
Convection	همرفت	Bomb Calorimeter	گرماسنج بمبی
Forced Convection	همرفت واداشته	Latent Heat	گرمای نهان
Unit	یکا	Specific Heat	گرمای ویژه
Base Units	یکاهای اصلی	Molar Specific Heat	گرمای ویژه مولی
Derived Units	یکاهای فرعی	Knot	گره (دریایی - هوایی)
Refrigerator	یخچال	Capillary Tube	لوله مویب
Astronomical Unit	یکای نجومی	Venturi Tube	لوله ونتوری

## فهرست منابع

### منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, Mc Graw – Hill.
2. Applied Physics, 10<sup>th</sup> Edition, Dale Ewen, 2012, Prentice Hall.
3. Physics, 4<sup>th</sup> Edition, James S. Walker, Pearson, 2010.
4. IGCSE Physics, 3<sup>th</sup> Edition, Tom Duncan, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, First edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7<sup>th</sup> Edition, 2014, Prentice – Hall International.
7. Physics, Allen Giambattista, Betty Richardson and Robert Richardson, Second Edition, 2008, McGraw– Hill.
8. Concept in Thermal Physics, first edition, S.J. Blundel and K.M. Blundel, 2006, Oxford University Press.
9. Physics for Scientists and Engineering, Randy Knight, 3<sup>th</sup> Edition, 2013, Pearson.
10. Physics, Mike Crundell, Cambridge International AS and A Level, 2<sup>th</sup> Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2<sup>th</sup> Edition, 2012, Pearson.
12. Heat and Thermodynamics, Mark Zemansky and Richard Dittman, Seventh edition, 1997, Mc Graw – Hill
13. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
14. College Physics, Sears & Zemansky and Hugh D. Young, 9<sup>th</sup> edition 2012, Addison–Wesely.
15. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9<sup>th</sup> Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.
16. Contemporary College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
17. Glencoe Physics, Paul W. Zizewitz, 2000, McGraw– Hill
18. Physics for Scientists and Engineers, Paul Tipler and Gene Morsca, 2008, W. H. Freeman.
19. Science at the Nanoscale, Chin Wee Shong, 2010, Pan Stanford Publishing.
20. Physical Science, Shipman, 13<sup>th</sup> Edition, 2013, Brooks/Cole.
21. Nanoscale Science: Activities for Grades 6–12, M. Gail Jones, 2007, NSTA Press.
22. Nanotechnology for Dummies, Richard Booker and Earl Boysen, 2005, John Wiley & Sons, Inc.
23. How Things Work, Louis A. Bloomfield, 5<sup>th</sup> Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.

### منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
  - ۲- مبانی فیزیک (جلد اول) مکانیک، گرما و شماره ها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و برل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
  - ۳- مبانی فیزیک (جلد اول و دوم) ریموند سروی و کریس ووئیل، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات فاطمی.
  - ۴- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۱-۱۳۸۷، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
  - ۵- دوره درسی فیزیک گ.س. لند سیرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
  - ۶- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، برل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
  - ۷- فیزیک تجربی (از مجموعه ۵ جلدی المپیاد فیزیک)، کمیته المپیاد فیزیک زاین، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات مدرسه.
  - ۸- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس اوهانیان، ترجمه یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
  - ۹- فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
  - ۱۰- فیزیک پایه، ویراست سوم، فرانک بلت، ترجمه محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
  - ۱۱- به علوم نانو خوش آمدید (به همراه DVD)، ویژه دوره آموزش متوسطه، اندرو اس مدن و دیگران، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و معصومه قاسمی، چاپ سوم ۱۳۹۵، انتشارات مدرسه.
- عکاس شروع فصل اول: آقای محمد یزدی راد

