



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 خواندید 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.

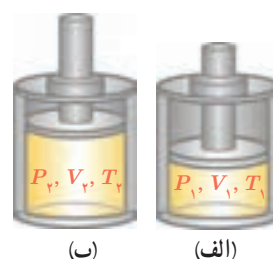
به طور ساده، منظور از دستگاه بخش مشخصی از ماده است که تحولات و مبادله انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود. دستگاه می‌تواند مقدار مشخصی آب، کل جو زمین یا حتی بدن یک موجود زنده باشد. نکته مهم آن است که بتوانیم مشخص کنیم چه ماده‌ای دستگاه و چه ماده‌ای محیط است. گستره ترمودینامیک فراتر از پدیده‌های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



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

۵-۱ معادله حالت و فرایندهای ترمودینامیکی ایستوار

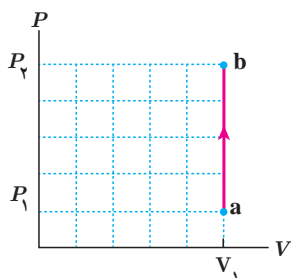
مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۵-۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی بدون اصطکاک مسدود شده است. پیستون می‌تواند درون استوانه حرکت کند (در اینجا دستگاه مورد بررسی، گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت ۱ (با حجم V_1) نگه داشته شده باشد، دما و فشار آن در همه نقاط گاز یکسان خواهد بود؛ مثلاً برابر با T_1 و P_1 . در چنین وضعیت‌هایی می‌گوییم گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. از کمیت‌های P ، V و T برای توصیف حالت تعادل ترمودینامیکی گاز استفاده می‌کنیم. این کمیت‌های ماکروسکوپی را که حالت 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 دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حالت تعادل ترمودینامیکی است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به‌طور خودبه‌خودی تغییر نکند.



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

متغیرهای ترمودینامیکی مستقل از یکدیگر نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می‌نامند. اگر گاز آرمانی (کامل) باشد، معادله حالت آن ساده و مستقل از نوع گاز است و با قانون گاز آرمانی (معادله ۴-۱۶)، یعنی $PV=nRT$ داده می‌شود.

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



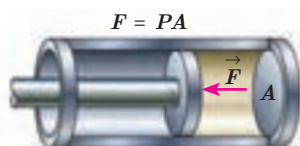
شکل ۳-۵ نمودار تغییرات فشار برحسب حجم. وقتی فرایندی ایستاوار باشد، می‌توان برای آن نمودار رسم کرد.

اگر گرمای داده شده به دستگاه بسیار کوچک باشد، فرایند گرمادهی را می‌توان مانند شکل ۳-۵ رسم کرد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل بوده و سریع به تعادل می‌رسد. چنین فرایندی را **فرایند ایستاوار**^۱ می‌نامند. در ادامه این فصل، فرایندهای مورد بررسی عمدتاً ایستاوار در نظر گرفته می‌شوند. برای رسم نمودارهای ایستاوار، چند نقطه تعادلی را تعیین کرده و با وصل کردن آنها به یکدیگر نمودار ترمودینامیکی را رسم می‌کنیم.

۲-۵ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می‌گیرد و معمولاً فرض می‌شود که دستگاه در حین تبادل گرما، در تماس با یک **منبع گرما**^۲ است.

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



شکل ۴-۲ در شکل بالا \vec{F} ، نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

ب) کار: شکل ۴-۵ 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.

^۱ quasi-static

^۲ heat reservoir

۳-۵ 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، به‌طوری که با افزایش دما انرژی درونی گاز افزایش می‌یابد. هنگامی که دستگاه در یک فرایند ترمودینامیکی ایستوار 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^۱، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط بستگی دارد. اگر دستگاه در فرایندی ایستوار، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود (شکل ۵-۵)، این بستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

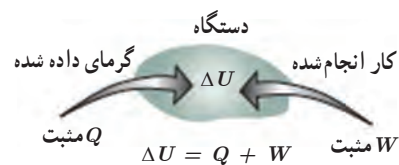
$$\Delta U = Q + W \quad (۵-۱)$$

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 و P_2) می‌رسند، تغییر انرژی درونی گاز (ΔU) برابر است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می‌تواند متفاوت باشند. در رابطه ۵-۱، گرمای 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 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 ۵-۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه 42°J گرما از محیط می‌گیرد و انبساط می‌یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می‌دهد 100°J باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟
پاسخ: چون دستگاه از محیط گرما گرفته است $Q = +42^\circ\text{J}$ و چون کار دستگاه روی محیط 100°J است پس کار محیط روی دستگاه $W = -100^\circ\text{J}$ می‌شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = 42^\circ\text{J} + (-100^\circ\text{J}) = -58^\circ\text{J}$$



شکل ۵-۵ قرارداد علامت‌ها برای قانون اول ترمودینامیک

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 ΔE نشان داده شده است.



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 آزمایش‌هایی با باروت کرد و در قدرت مواد منفجره سلاح‌های جنگی تغییرات چشمگیری به وجود آورد و به همین خاطر به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد. چندی نگذشت که به مقام‌های وزارت جنگ، وزارت کشور و خزانه‌داری نائل آمد. در ژانویه سال ۱۷۹۸ در انجمن سلطنتی لندن سخنرانی‌ای درباره «ایجاد گرما بر اثر مالش» ایراد کرد که بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. این سخنرانی جالب نتیجه مشاهداتی بود که سال‌ها پیش روی توپ جنگی انجام داده بود. کنت رامفورد اکتشافات و مشاهدات خود را در کتابی تحت عنوان «روش‌های انتقال گرما» چاپ و منتشر کرد و ثابت نمود نظریه لاوازیه در مورد وجود شاره‌ای 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 پژوهش‌های علمی بود. کارهایی که در این مؤسسه انجام می‌شد اکثراً عملی بود و گاهی نتایجی به دست می‌آمد که نشان می‌داد تجربیات عملی همواره از مطالعات نظری ناشی می‌گردد. بنیامین تامپسون در سال ۱۸۱۴ دیده از جهان فروست. او نابغه و تجربه‌گر ماهر بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.



سوخت و ساز بدن و قانون اول ترمودینامیک

وقتی غذا می‌خوریم انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد غذایی به بدن ما انتقال می‌یابد. از طرفی وقتی فعالیتی انجام می‌دهیم انرژی درونی بدن کاهش می‌یابد و طبق قانون اول ترمودینامیک به کار و گرما تبدیل می‌شود. 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 (kcal/h) یا برحسب وات بیان می‌شود. جدول زیر آهنگ سوخت و ساز بدن را در برخی از فعالیت‌ها برای شخصی به جرم متوسط 65kg نشان می‌دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط 65kg		
آهنگ تقریبی سوخت و ساز		نوع فعالیت
Watt	kcal/h	
۷۰	۶۰	خوابیدن
۱۱۵	۱۰۰	نشستن
۲۳۰	۲۰۰	فعالیت‌های سبک (خوردن، لباس پوشیدن و ...)
۴۶۰	۴۰۰	فعالیت‌های متوسط (تنیس، راه رفتن و ...)
۱۱۵۰	۱۰۰۰	دویدن (15 km/h)
۱۲۷۰	۱۱۰۰	دوچرخه‌سواری سرعت

۴-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

همان‌طور 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^۲**، **فرایند هم‌فشار^۳**، **فرایند هم‌دما^۴** و **فرایند بی‌دررو^۵**. 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.

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

۱- در علوم تغذیه معمولاً kcal را با Cal نشان می‌دهند و آن را کالری بزرگ می‌خوانند. هر کالری بزرگ 4186 کیلوژول است.

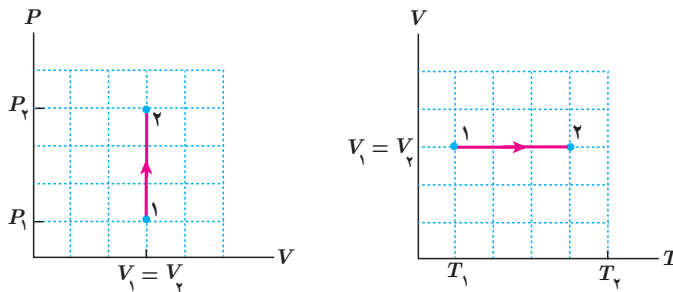
۲ - Isochoric

۳ - Isobaric

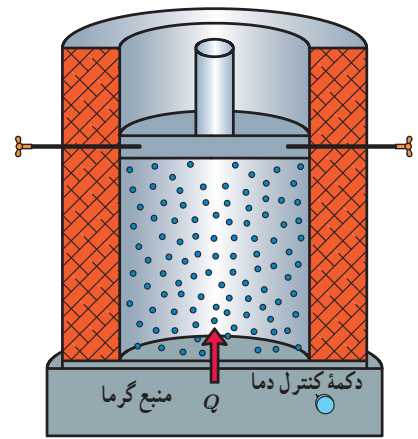
۴ - Isothermal

۵ - Adiabatic

برای بررسی این فرایند، گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می‌دهیم (شکل ۵-۶)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز برابر باشد. دمای منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز طی یک فرایند ایستوار، با گذر از حالت‌های تعادلی به حالت نهایی مورد نظر برسد. در شکل ۵-۷ 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 ۵-۷ وارونه می‌شود.



شکل ۵-۷ نمودارهای $V-T$ و $P-V$ برای یک فرایند ایستوار هم‌حجم.



شکل ۵-۶ دمای گاز را در فرایند هم‌حجم با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می‌دهیم.

مثال ۵-۲

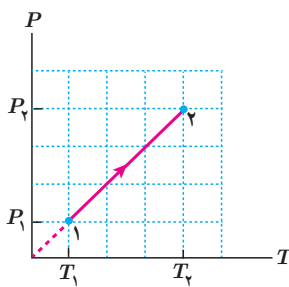
نشان دهید نمودار $P-T$ برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحه $P-T$ می‌گذرد.

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

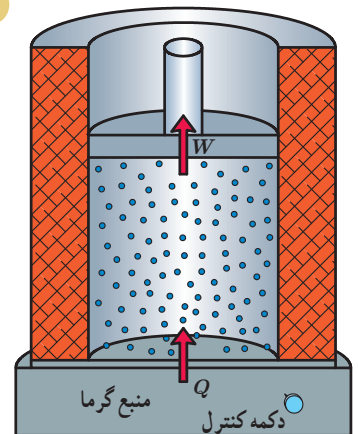
می‌گذرد (شبیه خط $y = ax$ در صفحه $y-x$). با نقطه‌گذاری نیز می‌توان نمودار را رسم کرد.



پرسش ۵-۱

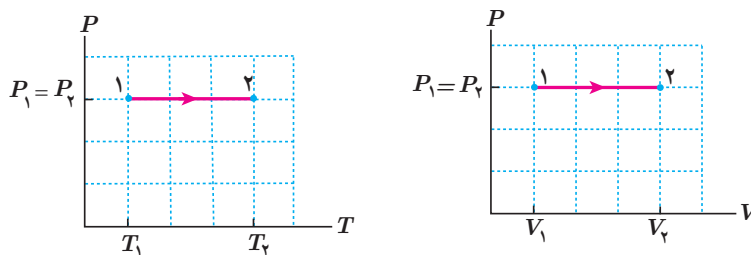
روی قوطی‌های افشانه (اسپری)، هشدار داده شده است که از انداختن آن در آتش خودداری کنید. علت این توصیه را براساس فرایند هم‌حجم توضیح دهید.

ب) فرایند هم‌فشار: فرایندی است که فشار گاز در طی آن ثابت می‌ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی آرمانی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۵-۸ 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



شکل ۵-۸ گرم کردن گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم

را اندکی به طرف بالا 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 بالا حرکت می‌کند. در این فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودارهای $P-T$ و $P-V$ این فرایند در شکل ۹-۵ رسم شده است.



شکل ۹-۵ نمودارهای $P-T$ و $P-V$ برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

تمرین ۵-۱

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

در فرایند هم‌فشار، گرما و کار هردو مبادله می‌شود. در اینجا فقط 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 ۹-۵)، 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 $\Delta V = V_2 - V_1$ و برابر است با ΔV ؛ 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 هم‌اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایه گاز مجاور آن، هم‌اندازه و هم‌جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت:

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

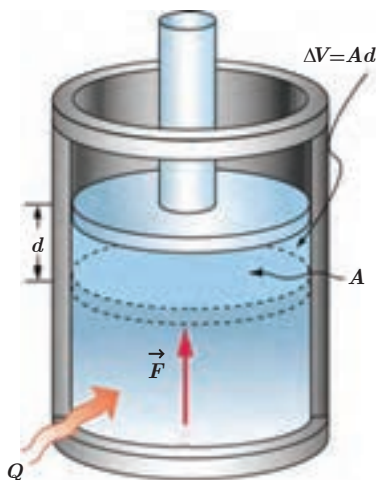
در این کتاب، **کار محیط روی دستگاه** (مثلاً در اینجا کار پیستون روی گاز) را با W نشان می‌دهیم.

بنابراین، در فرایند هم‌فشار داریم:

$$W = -P \Delta V$$

$$(۲-۵) \quad \text{(کار در فرایند هم‌فشار)}$$

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.

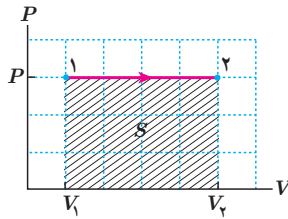


شکل ۹-۵ در این انبساط هم‌فشار، پیستون به اندازه d روبه بالا جابه‌جا شده و گاز کاری برابر $P \Delta V$ روی پیستون انجام داده است.

تمرین ۵-۲

نشان دهید رابطه ۵-۲ که برای یک انبساط هم فشار به دست آمده، برای یک تراکم هم فشار نیز برقرار است.

فعالیت ۵-۱



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

مثال ۵-۳

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

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

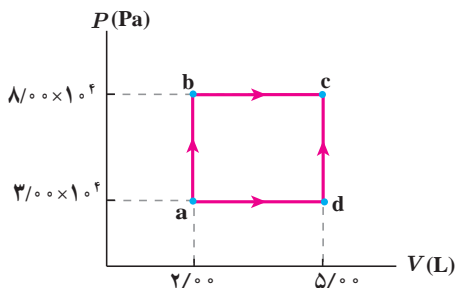
در نتیجه

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = (۳۰۰ \text{ K})(۰/۹۰۰) = ۲/۷۰ \times ۱۰^۲ \text{ K} = ۲۷۰ \text{ K}$$

کار انجام شده محیط روی گاز برابر است با

$$W = -P \Delta V = -(۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/m}^2)(۰/۹۰۰ - ۱/۰۰) \times ۱۰^{-۳} \text{ m}^3 = ۱۰ \text{ J}$$

مثال ۵-۴



در شکل روبه‌رو، نمودار $P-V$ برای یک گاز آرمانی نشان داده شده است. در فرایند ab، ۱۵۰ J و در فرایند bc، ۶۰۰ 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، و در نتیجه $W_{ab} = 0$

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = ۱۵۰ \text{ J}$$

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

$$W_{bc} = -P \Delta V = -P(V_c - V_b) = -(۸/۰۰ \times ۱۰^۴ \text{ Pa})(۳/۰۰ \times ۱۰^{-۲} \text{ m}^3) = -۲۴۰ \text{ J}$$

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

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 150 \text{ J} + 600 \text{ J} = 750 \text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 750 \text{ J} - 240 \text{ J} = 510 \text{ J}$$

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:

$$\Delta U_{adc} = \Delta U_{abc} = 510 \text{ J}$$

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

$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -P(V_d - V_a) + 0 = -(3/0 \times 10^5 \text{ Pa})(3/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = -900 \text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

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

و در نتیجه

$$Q_{adc} = \Delta U_{adc} - W_{adc} = (510 \text{ J}) - (-900 \text{ J}) = 1410 \text{ J}$$

پ) فرایند هم‌دما: دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک

تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۵-۱۱ استوانه 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.

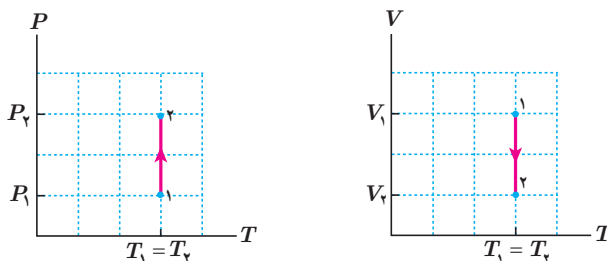
در فرایند هم‌دما، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم:

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

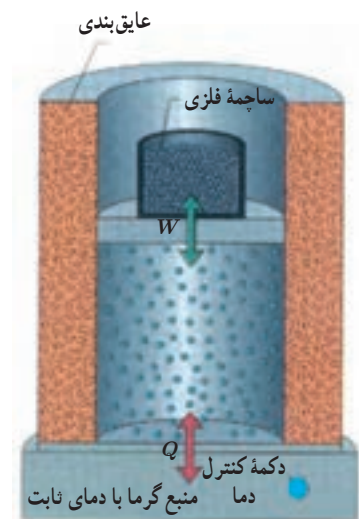
در نتیجه:

$$Q = -W$$

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 $V-T$ و $P-T$ این فرایند در شکل ۵-۱۲ رسم شده است.



شکل ۵-۱۲ نمودارهای $P-T$ و $V-T$ برای یک فرایند تراکم هم‌دما



شکل ۵-۱۱ استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی ساچمه‌ها، تراکم هم‌دما رخ می‌دهد.

تمرین ۳-۵

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

فعالیت ۲-۵

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 می کند؟

مثال ۵-۵

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 $V_f = 1/0 \text{ L}$ متراکم می کنیم. الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هر یک از حجم های $1/0 \text{ L}$ ، $2/0 \text{ L}$ ، $3/0 \text{ L}$ و $4/0 \text{ L}$ 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 Q در این فرایند چقدر است؟
پاسخ: الف) چون گاز، آرمانی و فرایند همدماست داریم:

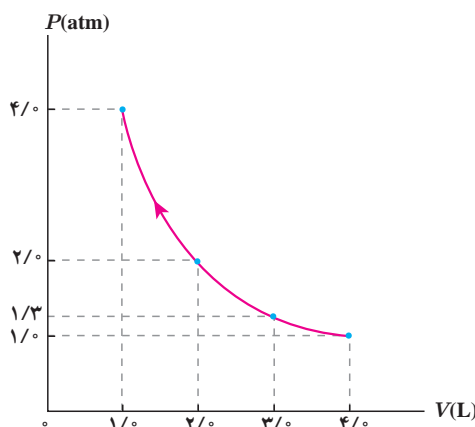
$$PV = nRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_f V_f = \dots$$

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

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

$$V_f = 1/0 \text{ L} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_f)(1/0) \Rightarrow P_f = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه های مربوط به نمودار $P-V$ را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می کنیم:



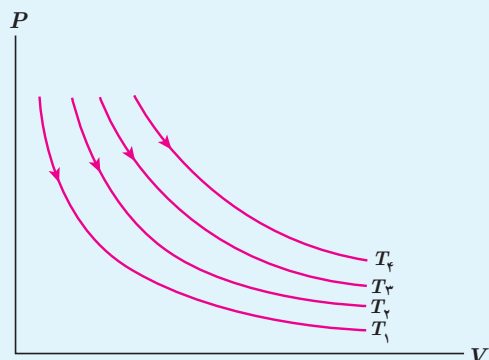
$V(\text{L})$	$P(\text{atm})$
4/0	1/0
3/0	1/3
2/0	2/0
1/0	4/0

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:

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

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

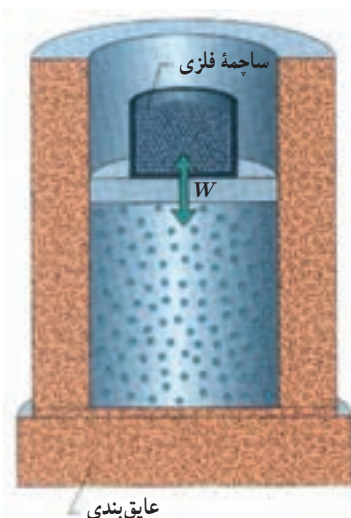
$$Q = -W = -5/5 \times 10^2 \text{ J}$$



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 ۵-۱۳ کاملاً عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساجمه‌های 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

$$\Delta U = W$$

(۳-۵) (فرایند بی‌دررو)

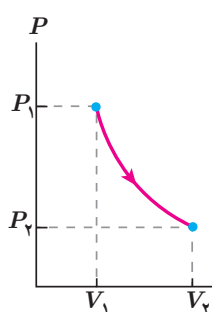
شکل ۵-۱۳ با کاستن یا افزودن تدریجی ساجمه‌ها روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

در انبساط بی‌دررو 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.



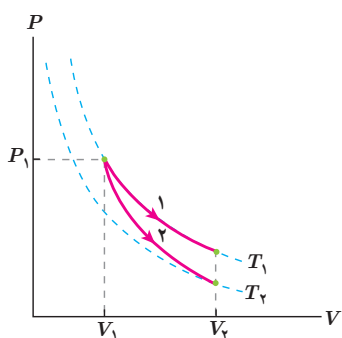
وقتی در یک نوشابه گازدار خیلی سرد را سریع باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که هاله رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.

مثال ۵-۶

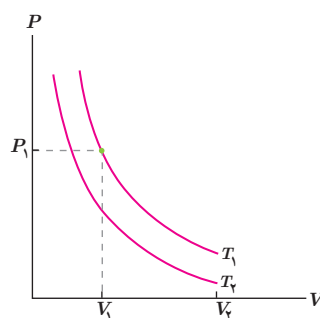


گازی آرمانی را با حجم V_1 و فشار P_1 در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار $P-V$ ی آن خمی مشابه شکل روبه‌رو می‌شود که اندکی با خم یک فرایند هم‌دما متفاوت است. با فرض آنکه گاز در طی دو فرایند هم‌دما و بی‌دررو که از حجم و فشار یکسانی شروع می‌شوند، به 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 ۵-۴ برای دماهای T_1 و T_2 (الف) رسم شده است. در فرایند هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند. بنابراین، در انبساط هم‌دما، 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.



(ب)

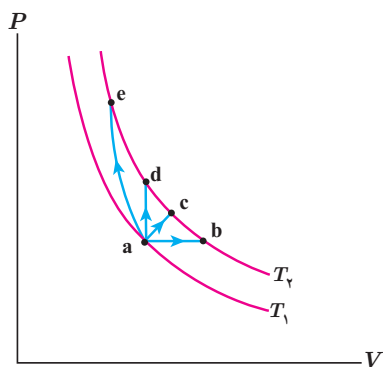


(الف)

تمرین ۵-۵

مثال ۵-۶ را با فرض آنکه گاز به‌جای انبساط، تراکم باید پاسخ دهید.

مثال ۵-۷



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. توضیح دهید چرا تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها یکسان است.

پاسخ: همان‌طور که می‌دانیم 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.



سرنگ آتش‌زنه^۱ 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؟

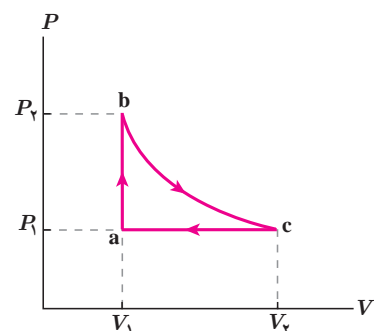
۵-۵ چرخه ترمودینامیکی

دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۵-۱۴، 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:

$$Q = -W$$

(۵-۴) (چرخه ترمودینامیکی)



شکل ۵-۱۴ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته‌ای را در صفحه $P-V$ تشکیل می‌دهد.

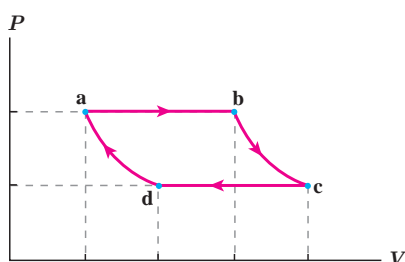
فعالیت ۵-۴

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.

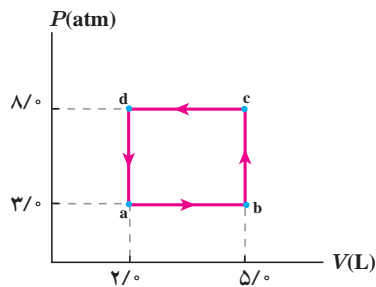
ب) نشان دهید مقدار کار کل انجام‌شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.

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



با انجام فعالیت ۵-۴ دریافته‌ایم 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.

مثال ۵-۸



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:

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

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

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

با توجه به رابطهٔ ۴-۵ 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.

۶-۵ 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 لوکوموتیو، 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.

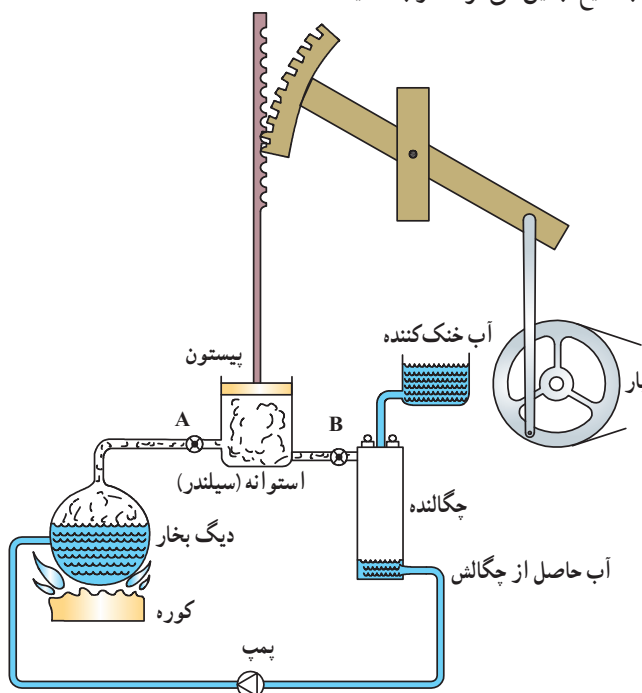
در ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند ترمودینامیکی، دستگاه مقداری گرما از محیط دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیهٔ خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از 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^۱ است که از آن برای بیرون کشیدن آب از معادن استفاده می‌شد. انواع روزآمدتر این ماشین‌ها ماشین استرلینگ^۲ و ماشین بخار^۳ است. در ادامه به توضیح نمونه ساده‌ای از ماشین‌های بخار می‌پردازیم که توسط جیمزوات (۱۸۱۹-۱۷۳۶ م.) طراحی شد.

ماشین بخار وات^۴: در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱۵-۵ 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 پی‌درپی 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^۵) رسید. منظور از چرخه آرمانی چرخه‌ای است که فرایندهای آن ایستوار 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 ۱۵-۵ طرحی از بخش‌های اصلی یک ماشین بخار وات شامل دیگ بخار، پیستون، چگالنده و پمپ

۱-Newcomen engine

۳-Steam engine

۲-Stirling 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 ۵-۶



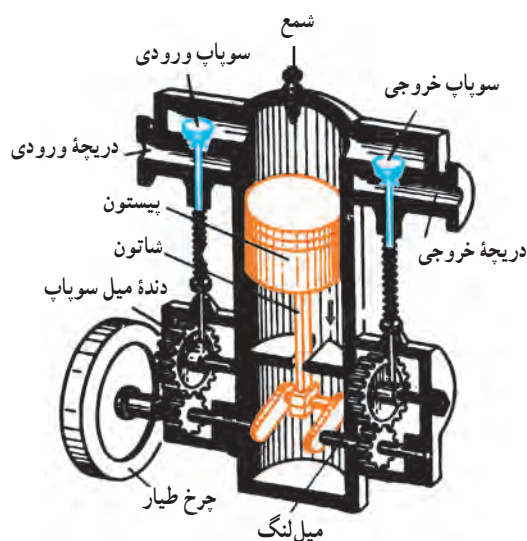
قایق پوت-پوت^۱، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب‌بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

ب) ماشین‌های گرمایی درون سوز

موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماها، برخی کشتی‌ها، قطارها و مولدهای کوچک برق (ژنراتور) درون سوزند. ماشین‌های گرمایی درون سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی^۲ می‌پردازیم.

ماشین درون سوز 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 ۵-۱۶ 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 میل لنگ 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^۳ می‌گویند. این فرایندها به‌طور طرح وار در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

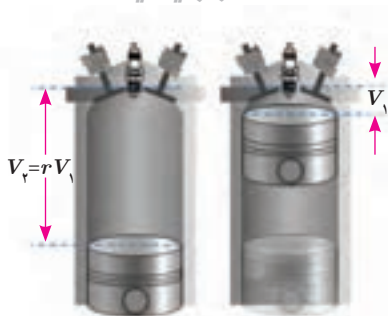


شکل ۵-۱۷ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

۱ - put-put

۲ - gasoline engine

۳ - stroke



شکل ۱۷-۵ 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 می شود. همان طور که شکل ۵-۱۷ نشان می دهد 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 می گویند). وقتی پیستون به پایین ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می شود و مخلوط بنزین و هوا داخل استوانه محبوس می گردد.

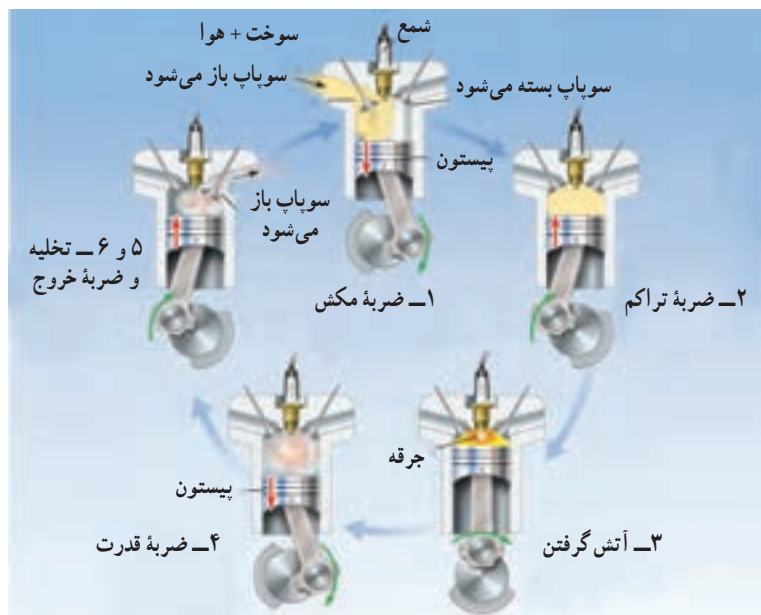
۲- ضربه تراکم: پیستون بالا می آید، مخلوط را متراکم می کند و آن را به حجم V_1 می رساند. این تراکم به سرعت رخ می دهد. بنابراین، می توان آن را بی دررو در نظر گرفت. در نتیجه، در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

۳- آتش گرفتن: هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می زند، مخلوط آتش می گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V_1 تا مقدار زیادی بالا می رود؛ چون آتش گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی گیرد، این موتورهای درون سوز می گویند.

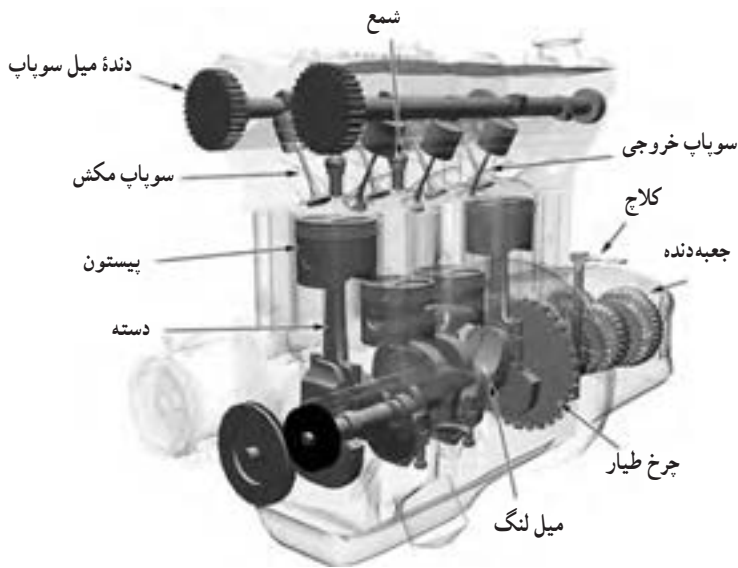
۴- ضربه قدرت: در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می شود و حجم آن از V_1 به V_2 می رسد. این انبساط به سرعت رخ می دهد. بنابراین، می توان آن را بی دررو در نظر گرفت. در نتیجه در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می راند و روی آن کار انجام می دهد. این کار توسط میل لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می شود.

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

۶- ضربه خروج گاز: پیستون بالا می آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون می راند و حجم فضای بالای پیستون از V_2 به مقدار اولیه V_1 می رسد.



شکل ۱۸-۵ مراحل مختلف در جرقه موتورهای درون سوز



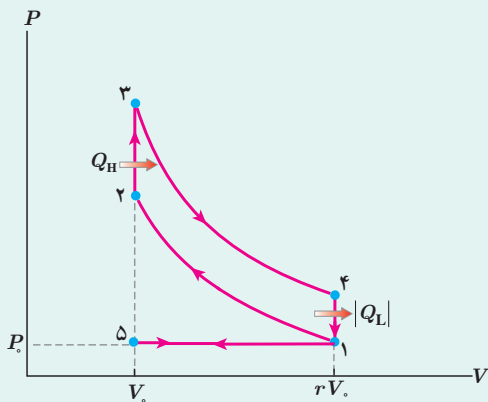
شکل ۵-۱۹ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

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^۱) 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 ۵-۱۹ 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 → ۵ 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 چهارضربه‌ای 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:

$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}}$$

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:

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

بازده ماشین های درون سوز بنزینی در حدود 20° تا 30° درصد، بازده ماشین های درون سوز دیزلی در حدود 30° تا 35° درصد، و بازده ماشین های برون سوز بخار 30° تا 40° درصد است.

مثال ۵-۹

بازده یک ماشین درون سوز بنزینی 22% درصد است. این ماشین در هر چرخه $2/51 \times 10^3 \text{ J}$ کار انجام می دهد. گرمای حاصل از سوخت در هر چرخه چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۵ داریم:

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

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

فناوری و کاربرد



شکل ۵-۲۰ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

نسبت تراکم ماشین ها: محاسبه نشان می دهد که با بالا بردن نسبت تراکم r می توان به بازده بیشتری برای ماشین های درون سوز بنزینی رسید. اما در عمل ممکن نیست به هر نسبت تراکمی دست یافت؛ مثلاً نسبت تراکم ماشین های بنزینی معمولی تا حدود 10° و ماشین های بنزینی مدرن تا حدود 14° است. در نسبت های تراکم بالا، مخلوط سوخت و هوا در ضربه تراکم، چنان گرم می شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل^۱ مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشینی در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا به طور بی دررو متراکم و در نتیجه

^۱ – Rudolf Christian Karl Diesel (۱۸۵۸–۱۹۱۳)

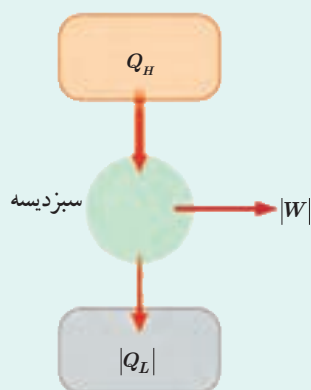
داغ می‌شود تا اینکه بتواند گازوئیلی را که به داخل استوانه پاشیده می‌شود محترق کند (در این ماشین، شمع وجود ندارد). میزان پاشیده شدن گازوئیل طوری تنظیم می‌شود که احتراق تقریباً به طور هم فشار پیستون را به سمت پایین هل می‌دهد. بقیه چرخه، یعنی ضربه قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربه خروج دقیقاً مانند ماشین بنزینی 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 ۵-۲۰ طرحی از سیلندر و اجزای جانبی این ماشین را نشان می‌دهد.

۵-۲ 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 دمابالین می‌دهد. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که آیا امکان تبدیل همه گرمای دریافتی به کار وجود دارد؟ درواقع، 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 بسازیم 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؛ 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.

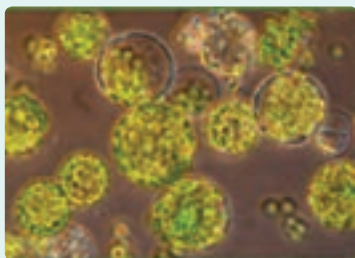
خوب است بدانید



(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.

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 صرف تولید مولکول‌هایی می‌شود که این انرژی را به طور موقت ذخیره می‌کنند و در مرحله دوم انرژی شیمیایی ذخیره شده، صرف ساختن ترکیب‌های آلی می‌شود. شکل (الف) مرحله نخست فرایند فتوسنتز را به گونه‌ای مشابه آنچه که یک ماشین گرمایی انجام می‌دهد نشان می‌دهد. انرژی حاصل از خورشید

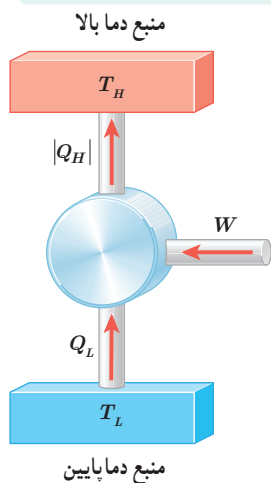
۱- در کتاب‌های ترمودینامیک به این گزاره، بیان کلین - پلانک قانون دوم ترمودینامیک نیز گفته می‌شود.



(ب) یک یاخته گیاهی شامل سبزدیسه هاست.

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 به صورت چرخاندن یک چرخ انجام می‌دهد. در فتوسنتز، سبزدیسه که شامل رنگیزه‌های سبزینه (کلروفیل) است، کار را به صورت انرژی شیمیایی در مولکول‌های خاصی مانند ATP (آدنوزین تری فسفات) ذخیره می‌کند. این انرژی شیمیایی می‌تواند بعداً وقتی جانوری گیاه را می‌خورد به صورت کار مکانیکی درآمد.

۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها

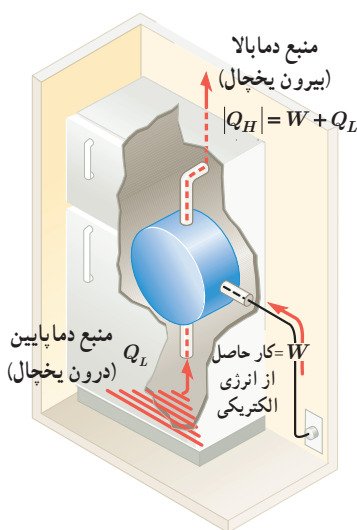


شکل ۸-۵ طرز کار طرح وار یک یخچال آرمانی

گرمای همواره از جسمی با دمای بالا به جسمی با دمای پایین منتقل می‌شود، ولی عکس این عمل به طور خودبه‌خود رخ نمی‌دهد. مثلاً اگر یک لیوان آب سرد در اتاق قرار داشته باشد گرما به طور خودبه‌خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود و ممکن نیست آب به طور خودبه‌خود سردتر شود. به عبارت دیگر: «ممکن نیست گرما به طور خودبه‌خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود.» به این گزاره، **قانون دوم ترمودینامیک** به بیان **یخچالی** می‌گویند^۱. 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 بر عکس.)

یخچال وسیله‌ای است که این عمل را انجام می‌دهد و با استفاده از کار، گرما را از منبعی دمایی می‌گیرد و به منبعی دمایی بالاتر 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 می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع دمایی بالاتر می‌دهد. به عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به طور طرح وار در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. یخچال‌های خانگی، کولرهای گازی و تلمبه‌های گرمایی نمونه‌هایی از یخچال‌ها هستند؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار W توسط تراکم‌ساز (کمپرسور) می‌شود، گرمای Q_L از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود و گرمای $|Q_H|$ به هوای بیرون یخچال داده می‌شود (شکل ۵-۲۲).

طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولر گازی منبع دمایی، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دمایی بالاتر، هوای بیرون اتاق است.



شکل ۸-۲۲ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی

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

۳-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

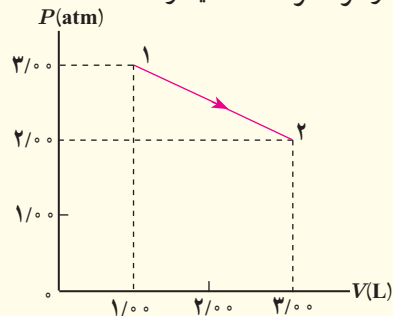
۱ ظرفی شامل $3/0 \text{ kg}$ آب است. با هم زدن آب داخل ظرف، 40 kJ کار روی آن انجام می‌دهیم و در این مدت 31 kJ گرما از ظرف به بیرون منتقل می‌شود. انرژی درونی آب چقدر تغییر می‌کند؟

۴-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

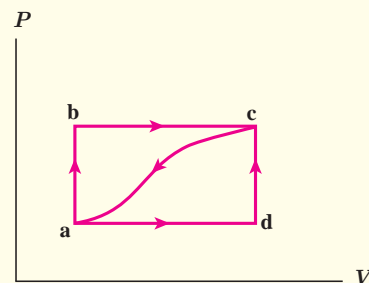
۲ الف) در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟ ب) در فرایند هم فشار چگونه می‌توان حجم گاز را افزایش یا کاهش داد؟

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



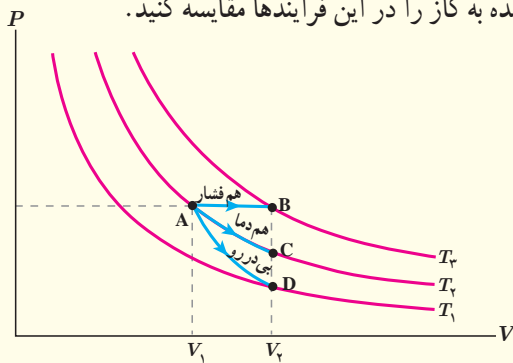
۵ گازی مطابق شکل زیر، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر، 90° ژول گرما می‌گیرد و 70° ژول کار انجام می‌دهد. الف) تغییر انرژی درونی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟ ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز در مقایسه با مسیر abc بیشتر



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؟

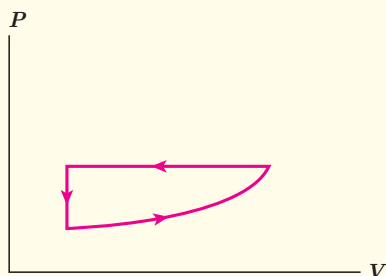
۶ یک مکعب آلومینیومی توپر به ضلع 2.0 cm از 50°C تا 150°C در فشار متعارف جو ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب را محاسبه کنید.

۷ مطابق شکل زیر، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم فشار، هم دما و بی دررو از V_1 به حجم بزرگ تر 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.

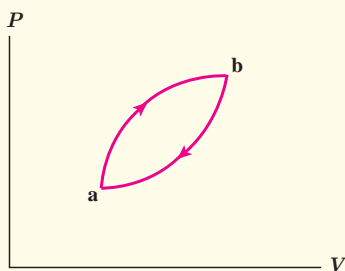


۵-۵ چرخه ترمودینامیکی

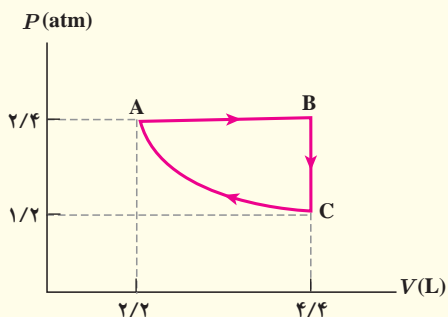
۸ برای چرخه گازی که نمودار $P-V$ ی آن در اینجا نشان داده شده است، ΔU ، گاز، W و Q مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



۹ شکل زیر چرخه‌ای را نشان می‌دهد که یک گاز طی کرده است.



۱۲) دستگاهی متشکل از 32 mol گاز کامل تک اتمی حجمی برابر $2/2 \text{ L}$ را در فشار $2/4 \text{ atm}$ اشغال کرده است. این دستگاه چرخه ای مطابق شکل زیر را می پیماید که در آن فرایند CA فرایندی هم دما است. الف) دما در نقاط A، B و C چقدر است؟ ب) ΔU را برای فرایند هم دما به دست آورید. پ) انرژی درونی نقطه ها را با هم مقایسه نمایید.



۵-۶ ماشین های گرمایی

۱۳) یک ماشین گرمایی در هر چرخه 1000 J گرما از منبع دما بالا می گیرد و 600 J گرما به منبع دما پایین می دهد و بقیه آن تبدیل به کار می شود. الف) بازده این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه 500 s طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟ ۱۴) یک ماشین گرمایی درون سوز در هر چرخه 800 kJ گرما از سوزاندن سوخت دریافت می کند و 200 kJ کار تحویل می دهد. گرمای حاصل از سوخت $50 \times 10^4 \text{ J/g}$ است و ماشین در هر ثانیه 400 چرخه را می پیماید. کمیت های زیر را حساب کنید. الف) بازده ماشین، ب) سوخت مصرف شده در هر چرخه و ب) توان ماشین.

الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است؟

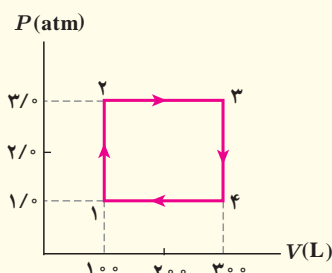
ب) اگر مقدار گرمای مبادله شده در این چرخه 400 J باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟

۱۵) یک گاز کامل چرخه نشان داده شده در شکل زیر را می پیماید. دمای گاز در حالت (۱) برابر 200 K است. الف) دما در سه نقطه دیگر چقدر است؟

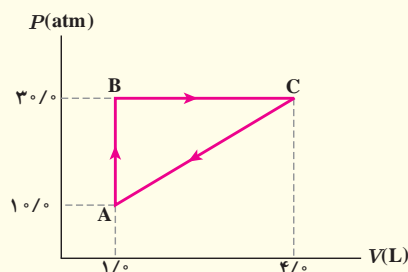
ب) کار انجام شده در چرخه چقدر است؟

پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟

ت) در چه فرایندهایی گاز گرما از دست داده است؟



۱۱) گاز داخل یک استوانه، چرخه ای مطابق شکل زیر را می پیماید. گرمای مبادله شده در این چرخه چند ژول است؟



واژه نامه فارسی - انگلیسی

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

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

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, Mc Graw – Hill.
2. Applied Physics, 10th Edition, Dale Ewen, 2012, Prentice Hall.
3. Physics, 4th Edition, James S. Walker, Pearson, 2010.
4. IGCSE Physics, 3th Edition, Tom Duncan, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, First edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th 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, 3th Edition, 2013, Pearson.
10. Physics, Mike Crundell, Cambridge International AS and A Level, 2th Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2th 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, 9th edition 2012, Addison–Wesely.
15. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9th Edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.
16. Contemporary College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
17. Glencoe Physics, Paul W. Zitzewitz, 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, 13th 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, 5th 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 شارها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و پرل 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، پرل 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

