



موتور ماشین‌های بنزینی تا حدود ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کنند. 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. پایداری 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 و سیم گرمکن آن، اجزای محیط هستند.

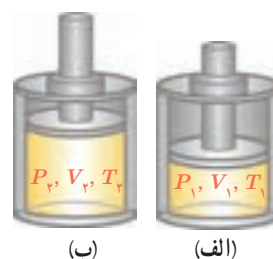


شکل ۵-۱ آب درون کتری را می‌توان دستگاه ترمودینامیکی در نظر گرفت.

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. 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 مقدار یگانه و مشخصی دارند؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه‌ای در وضعیت شکل ۵-۲ الف قرار دارد مقدار این کمیت‌ها مقدارهای یگانه P_1 ، V_1 و T_1 است، 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، نمی‌توان فشار و دمای یگانه‌ای به کلّ گاز نسبت داد. باید منتظر ماند تا پس از مدتی فشار و دما در همه نقاط گاز به مقادیر یگانه و جدید دیگری چون P_2 و T_2 برسد. به عبارت دیگر، اکنون متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دارای مقادیر یگانه P_2 ، V_2 و T_2 هستند (شکل ۵-۲ ب).



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

خلاصه اینکه یک 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^۱

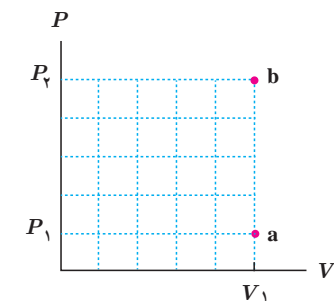
دیدیم حالت تعادل یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P ، V و T بیان کرد. همچنین دیدیم در اثر گرم شدن گاز یا جابه جا شدن پیستون، حالت تعادل گاز تغییر می کند. هنگامی که دستگاه از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر می رود، می گوئیم یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.

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_2 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.

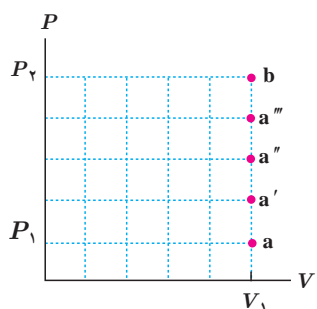
۳-۵ تبادل انرژی

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**^۲ است.

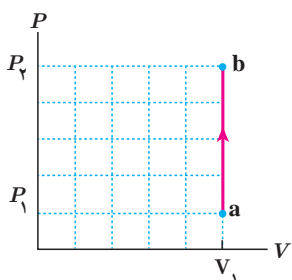
الف) گرما: در فصل ۴ دیدیم گرما انرژی ای است که به سبب اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می شود. محیط و دستگاه نیز هنگامی مبادله گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند. بنا به قرارداد،



شکل ۳-۵ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت تعادل a به حالت تعادل b رفته است.



شکل ۴-۵ 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.

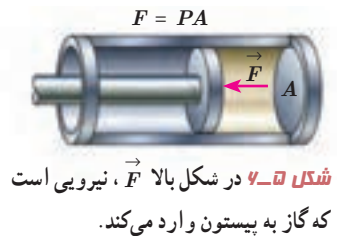
^۱ quasi - static

^۲ 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.

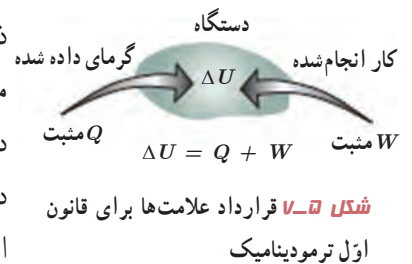
منبع گرما: هرگاه یک استکان چای داغ یا یک قطعه یخ را در هوای اتاق بگذاریم، پس از مدتی چای خنک شده و یخ ذوب می‌شود و دمای آن با دمای هوا برابر می‌شود، بی‌آنکه دمای هوای اتاق تغییر محسوسی کند. در این مثال، هوای اتاق را برای چای یا قطعه یخ، اصطلاحاً منبع گرما می‌گویند. در حالت کلی، یک منبع گرما جسمی است 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.



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، 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 ۵-۷)، این بستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:



$$\Delta U = Q + W \quad (۵-۱)$$

که به آن قانون اول ترمودینامیک گویند و بیانگر اصل پایستگی انرژی است. توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای 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 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 قریباً 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 نایفه و تجربه‌گر ماهر بود و برای نخستین بار اصول علم ترمودینامیک را بنا نهاد.

در رابطه ۱-۵، 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 ۱-۵

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه 420 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 $Q = +420\text{ J}$ و چون کار دستگاه روی محیط 100 J است پس کار محیط روی دستگاه $W = -100\text{ J}$ می‌شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

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

خوب است بدانید

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 فعالیت 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 و

اکسیرن 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 65 kg نشان می‌دهد.

آهنگ سوخت و ساز بدن برای شخصی با جرم متوسط 65 kg		
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

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

۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

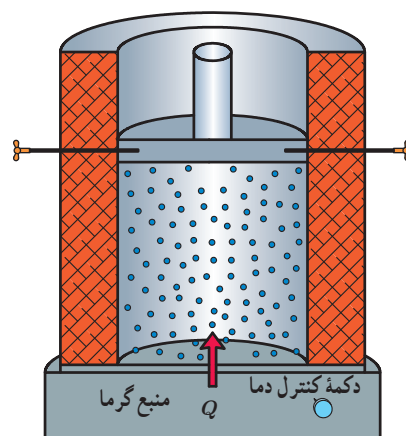
همان‌طور که گفتیم دستگاه‌های ترمودینامیکی می‌توانند فرایندهای مختلفی را طی کنند. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع‌تر است؛ از جمله: **فرایند هم‌حجم^۱**، **فرایند هم‌فشار^۲**، **فرایند هم‌دما^۳** و **فرایند بی‌دررو^۴**. در ادامه به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

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.

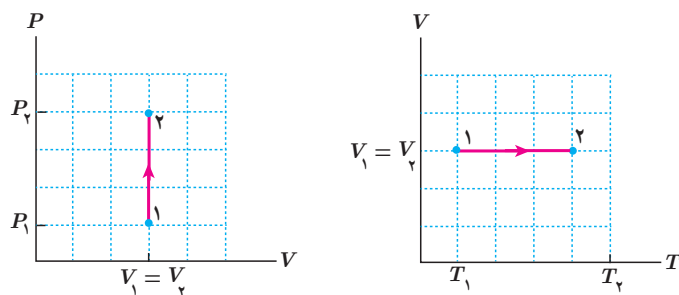
$$\Delta U = Q + W = Q + 0 = Q$$

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 ایستوار، با گذار از حالت‌های تعادلی به حالت نهایی مورد نظر برسد.

در شکل ۵-۹ نمودارهای $P-V$ و $V-T$ 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 $P-V$ و $V-T$ برای یک فرایند ایستوار هم‌حجم.

مثال ۵-۲

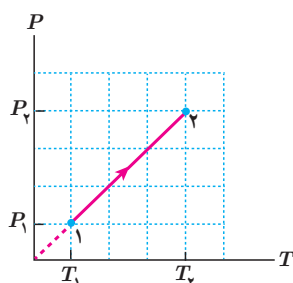
نشان دهید نمودار $P-T$ برای فرایند هم‌حجم یک گاز آرمانی خط راستی است که امتداد آن از مبدأ مختصات صفحه $P-T$ می‌گذرد.

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 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 ۱ K افزایش یابد.

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

بنابراین در فرایند هم حجم داریم:

$$Q = nC_V\Delta T \quad (۲-۵)$$

یکای C_V در SI برابر J/mol.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 با تقریب خوبی 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.

مثال ۵-۳

به ۲/۰۰ مول از گازهای آرمانی He، O_۲ و CO_۲، در حجم ثابت، ۱۰۰۰ ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟

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

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

$$\Delta T = \frac{۱۰۰۰ \text{ J}}{(۲/۰۰ \text{ mol})(۱۲/۵ \text{ J/mol.K})} = ۴/۰۰ \text{ K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{۱۰۰۰ \text{ J}}{(۲/۰۰ \text{ mol})(۲۱/۲ \text{ J/mol.K})} = ۲/۳۶ \text{ K} \quad \text{برای O}_۲,$$

$$\Delta T = \frac{۱۰۰۰ \text{ J}}{(۲/۰۰ \text{ mol})(۲۸/۵ \text{ J/mol.K})} = ۱/۷۵ \text{ K} \quad \text{برای CO}_۲,$$

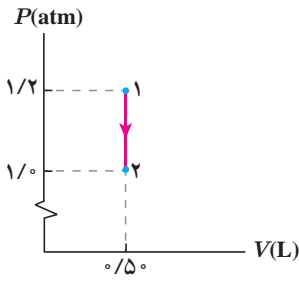
جدول ۱-۵ گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم برحسب J/mol.K

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

مثال ۵-۴

شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم را در صفحه $P-V$ نشان می‌دهد^۱. گاز را آرمانی و تک اتمی فرض کنید. در این فرایند گاز چقدر گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۲ داریم:



$$Q = nC_V\Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T = \frac{3}{2}(nRT_2 - nRT_1) = \frac{3}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$= \frac{3}{2}\left[(1/0 \times 1/5 \text{ Pa})(0/5 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 1/5 \text{ Pa})(0/5 \times 10^{-3} \text{ m}^3)\right]$$

$$= -15 \text{ J}$$

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

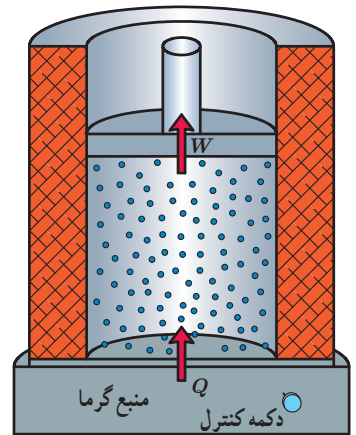
تمرین ۵-۱

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.

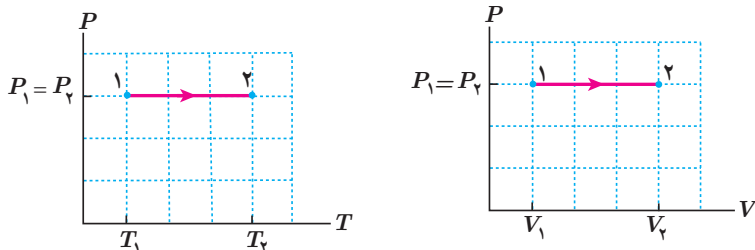
الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.

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 ۵-۱۰ 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 و حجم P_1 و V_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 ۵-۱۱ رسم شده است.



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

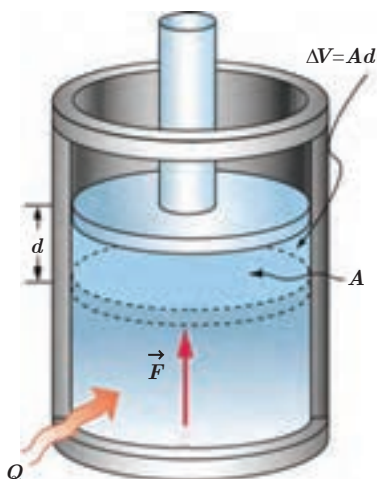


شکل ۵-۱۱ نمودارهای $P-T$ و $P-V$ برای یک فرایند انبساط هم‌فشار

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

تمرین ۵-۲

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



شکل ۵-۱۲ در این انبساط هم فشار، پیستون به اندازه d روبه بالا جابه‌جا شده و گاز کاری برابر $P\Delta V$ روی پیستون انجام داده است.

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 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

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

ولی Ad ، تغییر حجم گاز و برابر است با $\Delta V = V_f - V_i$ ؛ 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:

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

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

بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

$$W = -P\Delta V$$

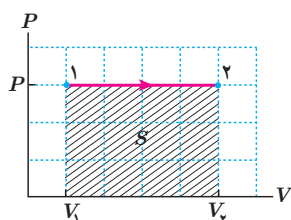
(۵-۳) (کار در فرایند هم فشار)

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.

تمرین ۵-۳

نشان دهید رابطه ۵-۳ 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 قدرمطلق کار انجام شده است.

گرچه فعالیت ۱-۵ 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 $۱/۰۰۰$ 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 $۳۰۰/۰^\circ \text{K}$ باشد، دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟
پاسخ: چون گاز، آرمانی است و حجم آن به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

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

در نتیجه

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

کار انجام شده محیط روی گاز برابر است با

$$W = -P \Delta V = -(۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/m}^2) (۰/۹۰۰ - ۱/۰۰۰) \times ۱۰^{-۳} \text{ m}^3 = ۱۰/۰ \text{ J}$$

مثال ۶-۵

گرمای تبخیر آب در نقطه جوش $۲/۲۶ \times ۱۰^۳ \text{ J/g}$ است. اگر $۱/۰۰ \text{ g}$ (یا $۱/۰۰ \text{ cm}^3$) آب بر اثر جوشیدن در فشار جو متعارف^۱ ($۱/۰۱ \times ۱۰^۵ \text{ Pa}$) به $۱/۶۷ \times ۱۰^۲ \text{ cm}^3$ بخار تبدیل شود،
 الف) کار محیط روی آب چقدر است؟
 ب) افزایش انرژی درونی آب چقدر است؟
پاسخ: الف) چون تبخیر آب در فشار ثابت رخ داده است می‌توان نوشت:

$$W = -P \Delta V = -(۱/۰۱ \times ۱۰^۵ \text{ N/m}^2) (۱/۶۷ \times ۱۰^{-۳} \text{ m}^3 - ۱/۰۰ \times ۱۰^{-۶} \text{ m}^3) = -۱/۶۹ \times ۱۰^۲ \text{ J}$$

ب) برای محاسبه تغییر انرژی درونی آب، نخست گرمای داده شده به آن را به دست می‌آوریم:

$$Q = +mL_V = (۱/۰۰ \text{ g}) (۲/۲۶ \times ۱۰^۳ \text{ J/g}) = ۲/۲۶ \times ۱۰^۳ \text{ J}$$

اینک با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W = ۲/۲۶ \times ۱۰^۳ \text{ J} + (-۱/۶۹ \times ۱۰^۲ \text{ J}) = ۲/۰۹ \times ۱۰^۳ \text{ J}$$

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 ΔT ، از رابطه زیر داده می‌شود:

$$Q = nC_p \Delta T \quad (۴-۵)$$

^۱ Standard Atmospheric Pressure

جدول ۲-۵ گرمای ویژه مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب J/mol.K

گاز	C_p
Ar	۲۰/۸
He	۲۰/۸
Ne	۲۰/۸
هوا	۲۹/۱
CO	۲۹/۱
H _۲	۲۸/۸
HCl	۲۹/۱
N _۲	۲۹/۱
NO	۲۹/۸
O _۲	۲۹/۴
Cl _۲	۳۳/۹
CO _۲	۳۶/۹
CS _۲	۴۵/۷
H _۲ S	۳۴/۲
N _۲ O	۳۸/۸
SO _۲	۳۹/۹

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

می‌توان نشان داد که گرمای ویژه مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، 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 ۲-۵

گرمایی که $1/100$ L گاز آرمانی O_۲ در فشار جو متعارف ($1/10 \times 10^5$ Pa) و با دمای اولیه 300°K از دست می‌دهد تا دمایش به 270°K برسد، چقدر است؟

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

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/10 \times 10^5 \text{ Pa})(1/100 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/314 \text{ J/mol.K})(300^\circ\text{K})} = 0.0405 \text{ mol}$$

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

$$Q = nC_p(T_f - T_i) \\ = (0.0405 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol.K})(270^\circ\text{K} - 300^\circ\text{K}) = -35/7 \text{ J}$$

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.

مثال ۸-۵

مقداری گاز تک‌اتمی آرمانی در یک انبساط هم‌فشار، 100°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 ۴-۵ 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°J کار انجام داده است. بنابراین، $W = -100^\circ\text{J}$ است و در نتیجه

داریم:

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

با قراردادن این مقدار در رابطه Q خواهیم داشت :

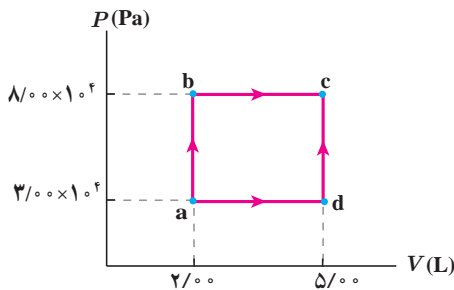
$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(1000\text{ J}) = 2500\text{ J}$$

گرمای مبادله شده $|Q| = 2500\text{ J}$ است. علامت مثبت Q نشان می‌دهد که گاز (دستگاه) گرما گرفته است.

(ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U = Q + W = 2500\text{ J} + (-1000\text{ J}) = 1500\text{ J}$$

مثال ۵-۹



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

در فرایند ab ، 1500 J و در فرایند bc ، 600 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

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 1500\text{ J}$$

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

$$W_{bc} = -P\Delta V = -P(V_c - V_b) = -(8.00 \times 10^5\text{ Pa})(3.00 \times 10^{-3}\text{ m}^3) = -2400\text{ J}$$

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

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = 0 - 2400\text{ J} = -2400\text{ J}$$

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

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 1500\text{ J} + 600\text{ J} = 2100\text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 2100\text{ J} - 2400\text{ J} = 300\text{ J}$$

(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 :

$$\Delta U_{adc} = \Delta U_{abc} = 300\text{ J}$$

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

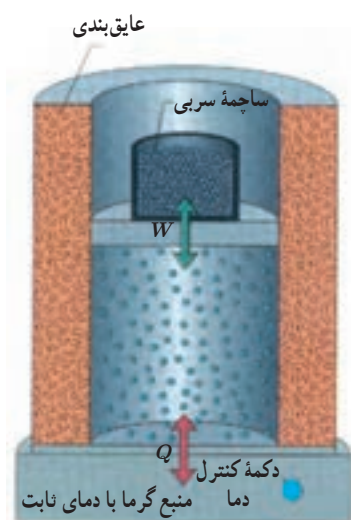
$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -P(V_d - V_a) + 0 = -(3.00 \times 10^5\text{ Pa})(3.00 \times 10^{-3}\text{ m}^3) = -900\text{ J}$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

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

و در نتیجه

$$Q_{adc} = \Delta U_{adc} - W_{adc} = (300\text{ J}) - (-900\text{ J}) = 1200\text{ J}$$



شکل ۵-۱۳ استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله‌های سربی، تراکی هم‌دمای می‌دهد.

(پ) فرایند هم‌دمای: دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دمای می‌توان مطابق شکل ۵-۱۳ 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 ساجمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی کاهش داد. با افزودن تدریجی ساجمه‌های سربی بر فشار گاز داخل استوانه افزوده می‌شود.

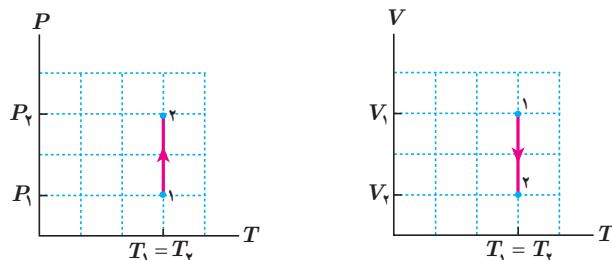
در فرایند هم‌دمای، دمای گاز تغییر نمی‌کند. بنابراین، برای گاز آرمانی که انرژی درونی آن فقط تابعی از دماست، تغییر انرژی درونی صفر است و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توانیم بنویسیم:

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

در نتیجه:

$$Q = -W$$

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



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

تمرین ۵-۴

مشابه آنچه که برای تراکم هم‌دمای 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.

فعالیت ۵-۲

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 ۵-۱۰

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

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

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

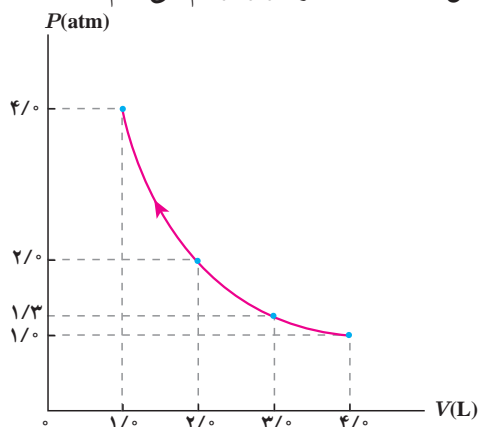
$$PV = nRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

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

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

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

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



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

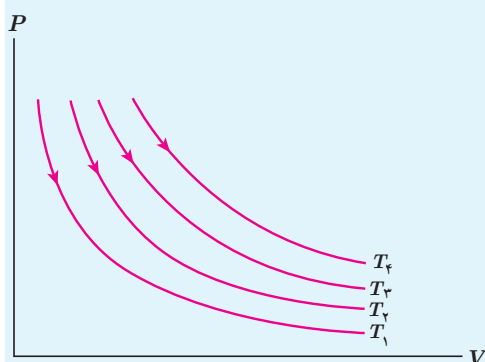
ب) قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر با مساحت سطح زیر نمودار $P-V$ است. افزون بر این، چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است؛ یعنی:

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

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

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

تمرین ۵-۵



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 سربی 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 درمی آید :

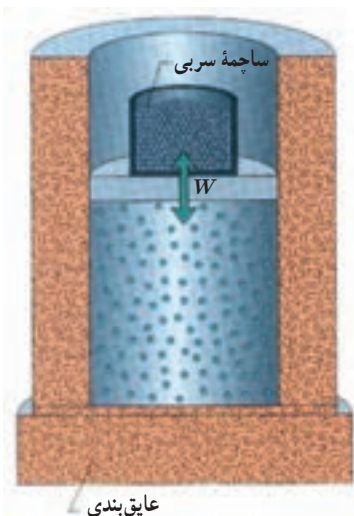
$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$\Delta U = W$$

(۵-۵) (فرایند بی دررو)

در انبساط بی دررو، گاز آرمانی، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است، در نتیجه $\Delta U < 0$ است و انرژی درونی گاز و دمای آن کاهش می یابد. در تراکم بی دررو، عکس این اتفاق رخ می دهد و انرژی درونی گاز و دمای آن افزایش می یابد.



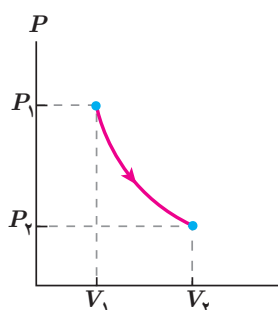
شکل ۵-۵ با کاستن یا افزودن تدریجی ساجمه های سربی روی پیستون، گاز درون استوانه عایق پوش شده، انبساط یا تراکم بی دررو پیدا می کند.



فعالیت ۳-۵

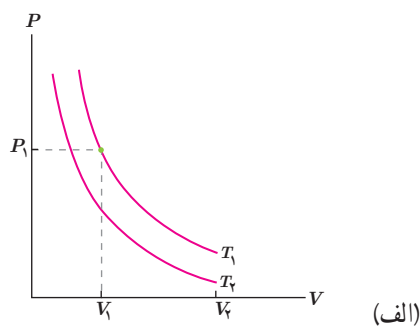
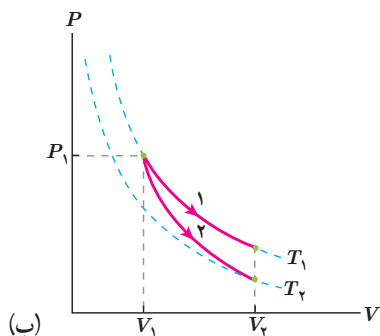
وقتی در یک نوشابه گازدار خیلی سرد را سریع باز می کنیم، مشاهده می شود که هاله رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می شود. این پدیده را توجیه کنید.

مثال ۱۱-۵



گازی آرمانی را با حجم V_1 و فشار P_1 در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی دررو منبسط کنیم، نشان داده می شود که نمودار $P-V$ آن خمی مشابه شکل روبه رو می شود که اندکی با خم یک فرایند هم دما متفاوت است. با فرض آنکه گاز در طی دو فرایند هم دما و بی دررو که از حجم و فشار یکسانی شروع می شوند، 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؟

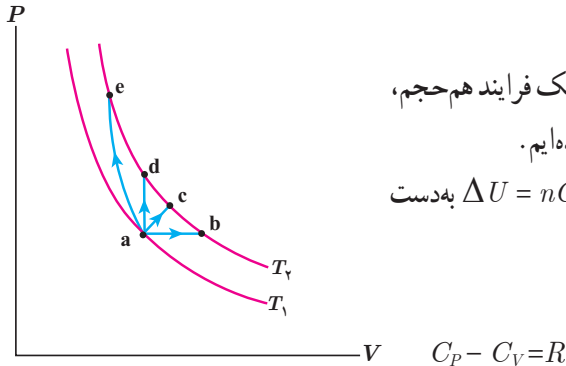
پاسخ: در شکل (الف) دو منحنی هم دما، با استفاده از نتیجه تمرین ۵-۵ برای دماهای T_1 و T_2 ($T_1 > T_2$) رسم شده است. در فرایند هم دما، دما تغییر نمی کند. بنابراین، در انبساط هم دما مسیر ۱ در شکل (ب) همواره $T = T_1$ است، ولی همان طور که پیش تر گفتیم در انبساط بی دررو، دمای گاز آرمانی کاهش می یابد، پس گاز باید از مسیری مانند مسیر ۲ به دمایی پایین تر، مثل دمای T_2 در شکل (ب) برسد. از اینجا همچنین نتیجه می شود که چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم دما بیشتر است، مقدار کار برای این فرایند بیشتر است.



تمرین ۵-۶

مثال ۵-۱۱ را با فرض آنکه گاز به جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

مثال ۵-۱۲



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

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

پاسخ: الف) 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. پس کافی است تغییر انرژی درونی را در یکی از فرایندها حساب کنیم؛ در فرایند هم‌حجم کار انجام شده برابر صفر است. بنابراین، می‌توانیم 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 هم‌فشار و هم‌حجم را مساوی هم بگیریم:

$$\Delta U_{\text{هم‌فشار}} = \Delta U_{\text{هم‌حجم}}$$

$$Q_{\text{هم‌فشار}} + W_{\text{هم‌فشار}} = Q_{\text{هم‌حجم}} + W_{\text{هم‌حجم}}$$

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

اما می‌دانیم برای گاز آرمانی $PV = nRT$ است و بنابراین، در فرایند هم‌فشار $P \Delta V = nR \Delta T$ است. بنابراین، $nC_P \Delta T - nR \Delta T = nC_V \Delta T$ 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 بی‌دررو به کار می‌بریم:

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

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 ۵-۱۲، کاربردهای فراوانی در ترمودینامیک گازهای آرمانی دارد.

مقدار $5/0 \text{ mol}$ از یک گاز آرمانی تک‌اتمی با فشار و حجم اولیه P_1 و V_1 و دمای اولیه $T_1 = 300 \text{ K}$ را تا حجم نهایی V_2 یک‌بار به‌صورت هم‌دما و بار دیگر به‌صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. در انبساط بی‌دررو دمای مطلق گاز به 285 K می‌رسد.

الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی‌دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم‌دماست؟

ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی‌دررو را حساب کنید.

پاسخ: الف) با استفاده از قانون گازهای آرمانی داریم:

$$\left(\frac{P_2 V_2}{T_2} \right)_{\text{بی‌دررو}} = \left(\frac{P_2 V_2}{T_2} \right)_{\text{هم‌دما}}$$

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

$$\left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{بی‌دررو}} = \left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{هم‌دما}} \Rightarrow \frac{P_{2 \text{ بی‌دررو}}}{P_{2 \text{ هم‌دما}}} = \frac{T_{2 \text{ بی‌دررو}}}{T_{2 \text{ هم‌دما}}} = \frac{285 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.95$$

ب) در مثال ۵-۱۲ دیدیم برای گاز آرمانی در فرایند بی‌دررو $W = nC_V \Delta T$ است. بنابراین،

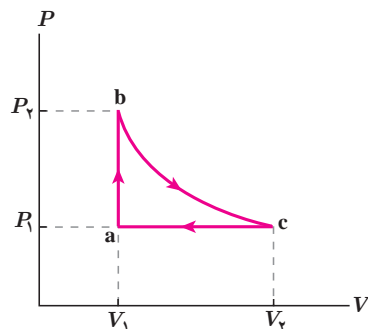
$$W_{\text{بی‌دررو}} = nC_V \Delta T = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = (5/0 \text{ mol}) \left(\frac{3}{2} \times 8.314 \text{ J/mol.K} \right) (-15 \text{ K}) = -935 \text{ J}$$

پرسش ۵-۲



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 کاغذ کوچکی قرار دارد. با راندن سریع پیستون به داخل، و تراکم بی‌درروی هوای محبوس، تکه کاغذ مشتعل می‌شود. معمولاً از کاغذ نیتروسلولز در این آزمایش استفاده می‌شود که نقطه اشتعال بسیار پایینی دارد. چرا کاغذ در این فرایند آتش می‌گیرد؟

۵-۶ چرخه ترمودینامیکی



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

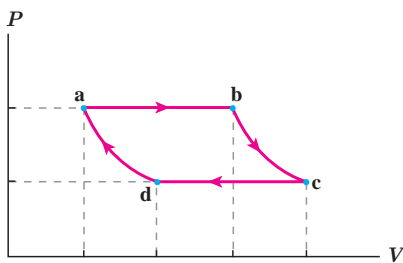
دستگاه می‌تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایند شکل ۵-۱۶، از سه فرایند هم‌حجم ab ، فرایند bc و فرایند هم‌فشار ca تشکیل شده است. مجموعه این فرایندها یک **چرخه ترمودینامیکی** را تشکیل داده است.

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:

$$Q = -W$$

(۵-۶) (چرخه ترمودینامیکی)

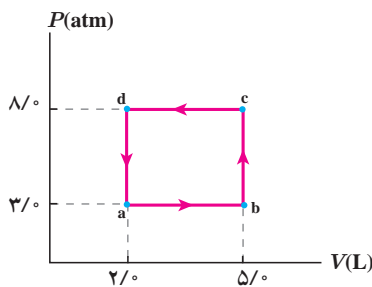
فعالیت ۴-۵



- 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 دریافتیم 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 ۵-۱۴



- گازی چرخه ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را می‌پیماید.
- الف) کار انجام‌شده 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 انجام‌شده 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 صفحه $P-V$ پاد ساعتگرد است، داریم:

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

با توجه به رابطه 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.

۷-۵ ماشین‌های گرمایی

تا حدود سه قرن پیش، انرژی مکانیکی موردنیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوانات 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 موردنیاز 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 شبکه 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 به خصوص در موتور خودروها استفاده می‌شوند و با سوخت‌هایی چون بنزین و گازوئیل کار می‌کنند که به آنها **ماشین‌های درون‌سوز** می‌گویند.

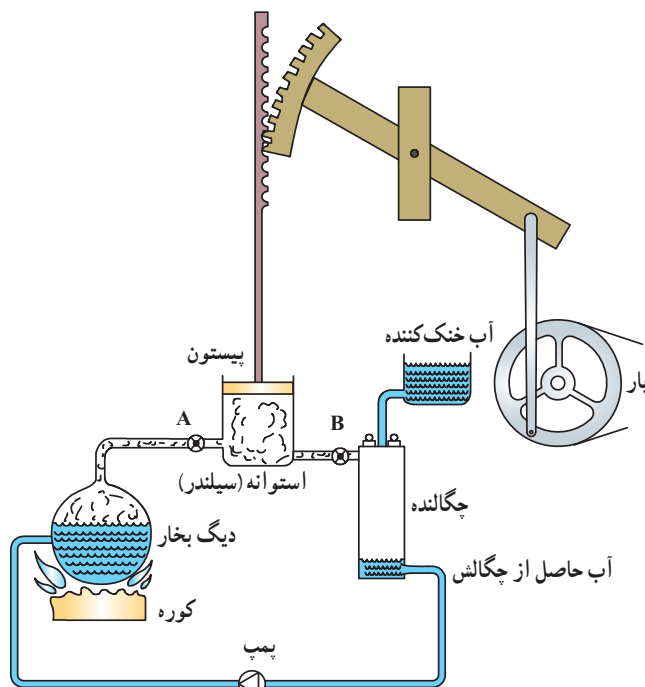
در ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند ترمودینامیکی، دستگاه مقداری گرما از محیط دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه خود برمی‌گردد؛ یعنی هر یک از این ماشین‌ها در یک چرخه 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 جیمز وات (۱۸۱۹-۱۷۳۶ م.) طراحی شد.

ماشین بخار وات^۴: در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را

طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ 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



شکل ۵-۱۷ 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

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^۱) 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.

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^۲، نوعی قایق اسباب بازی است که اساس کار آن مانند ماشین‌های برون‌سوز است. در مورد این قایق‌های اسباب بازی تحقیق کرده و سعی کنید آن را بسازید.

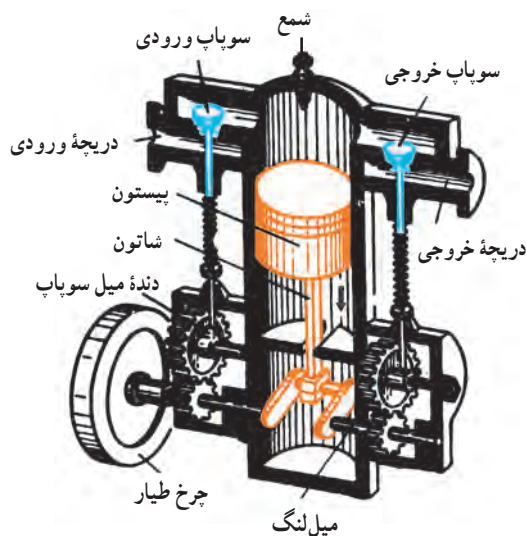
ب) ماشین‌های گرمایی درون سوز

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^۳ می‌پردازیم.

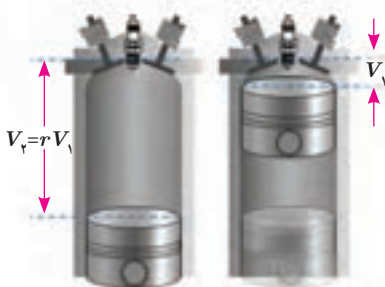
۱- این چرخه توسط مهندس اسکاتلندی ویلیام رانکین (۱۸۷۲-۱۸۲۰م.) ارائه شد.

۲- put-put

۳- gasoline engine



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



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

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 ۵-۱۸ 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 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 پیستون‌اند که به آنها ضربه^۱ می‌گویند. این فرایندها به طور طرح وار در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده 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^۲ 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

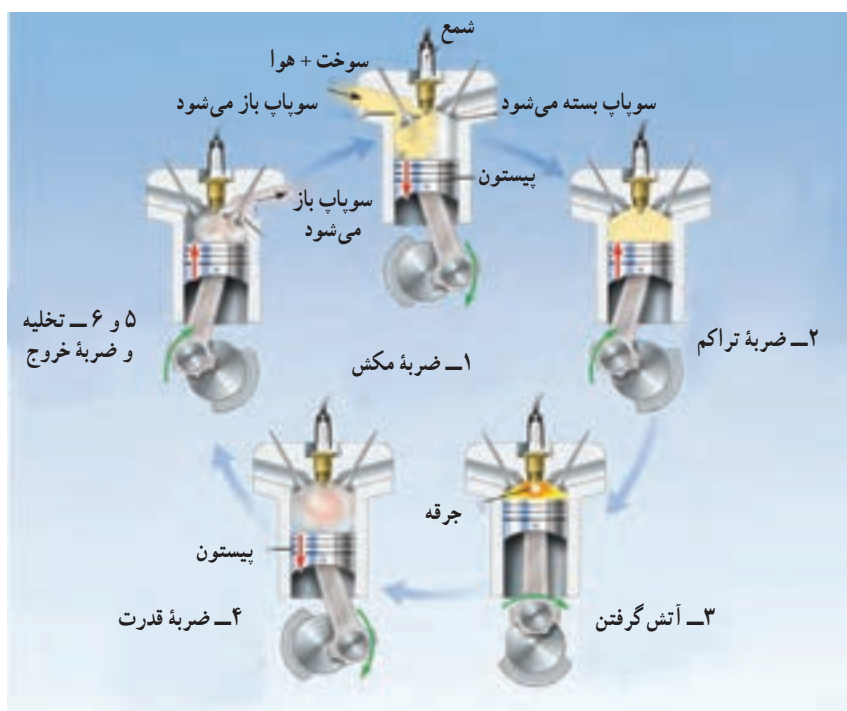
خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود، تا اینکه فشار گاز داخل استوانه با فشار جو یکسان شود. در این مرحله پیستون ساکن است.

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.

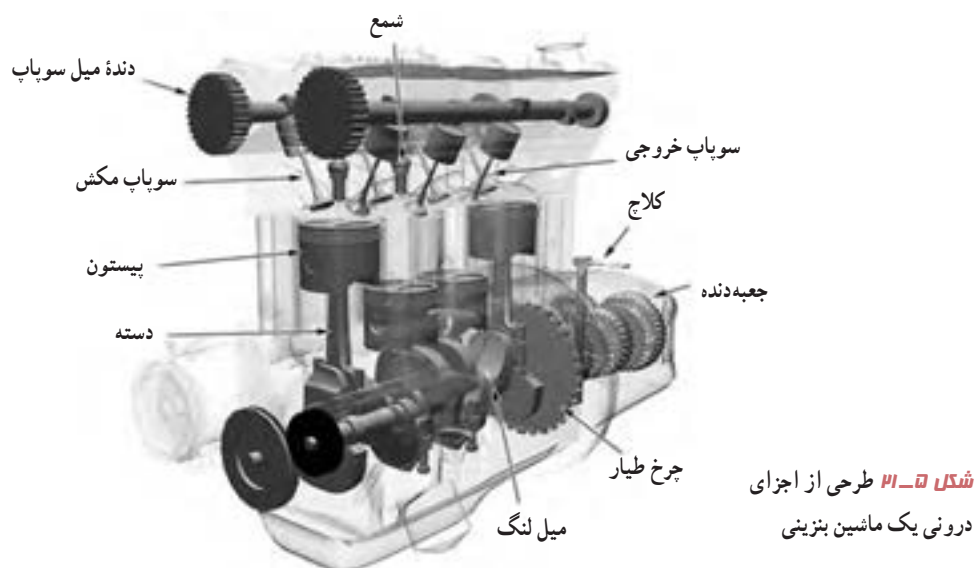
۱- Stroke

۲- Compression ratio or expansion ratio



شکل ۵-۲۰. مراحل مختلف در حركت موتورهای درون سوز

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) رسید. در این ساده‌سازی‌ها می‌توان دستگاه را گازی کامل در نظر گرفت و بدین ترتیب، فرض کرد که گاز به جای آتش گرفتن، گرمای Q_H را از محیط (منبع با دمای بالا) دریافت می‌کند، به جای تخلیه و خروج گاز، گرمای Q_L را به محیط (منبع با دمای پایین) تحویل می‌دهد و در طی این چرخه، کار خالص $|W|$ را روی محیط انجام می‌دهد. شکل ۵-۲۱ طرحی از اجزای یک ماشین بنزینی چهار سیلندر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۱ طرحی از اجزای درونی یک ماشین بنزینی

۱- Otto Cycle - موتورهای درون سوز بنزینی در سال ۱۸۷۶ توسط مهندس آلمانی «نیکلاس اُتو» ساخته شد و این جرچه به افتخار او جرچه اُتو نامیده شده است. اما ایده موتورهای چهار ضربه‌ای بیشتر در سال ۱۸۶۲ توسط مهندس فرانسوی «آلفونس روشا» مطرح شده بود.

چرخه اتو: همان طور که در متن درس اشاره شد چگونگی عمل یک ماشین درون سوز بنزینی را می توان با فرض مجموعه ای از ساده سازی ها به طور تقریبی بیان کرد و بر اساس این فرض ها به چرخه ای موسوم به چرخه اتو رسید و آن را در صفحه $P-V$ رسم کرد. این فرض ها عبارت اند از:

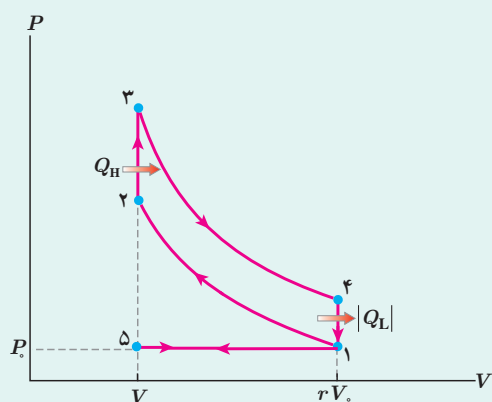
۱- ماده کاری (ماده ای که در ماشین به عنوان دستگاه در نظر گرفته می شود) هواست و مانند یک گاز آرمانی با ظرفیت گرمایی ثابت رفتار می کند.

۲- تمام فرایندها ایستاوارند.

۳- هیچ اصطکاک یا تلاطمی وجود ندارد.

۴- هیچ اتلاف گرمایی از طریق دیواره های اتاقک احتراق نداریم.

۵- فرایندها برگشت پذیرند. (یعنی در پایان فرایند، هم دستگاه و هم محیط می توانند دقیقاً به حالت های اولیه خود بازگردانده شود) چرخه اتو در شکل زیر رسم شده است که مراحل آن عبارت اند از:



۱ → ۵ مکش ایستاوار در فشار ثابت جو.

۲ → ۱ تراکم بی درروی ایستاوار.

۳ → ۲ افزایش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۴ → ۳ انبساط بی درروی ایستاوار.

۱ → ۴ کاهش ایستاوار دما و فشار در حجم ثابت.

۵ → ۱ خروج ایستاوار در فشار ثابت جو.

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:

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

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 اتلاfi نداریم و فرایندها به طور ایستاوار انجام می شوند. در طی این چرخه ها مقداری گرما از یک منبع دما بالا^۱ گرفته شده (Q_H)، مقداری کار انجام می شود ($|W|$) و

^۱ - High-temperature reservoir

مقداری گرما به یک منبع دمایی^۱ داده می‌شود ($|Q_L|$). طرز کار همه ماشین‌های گرمایی در شکل ۵-۲۲ به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است.

قانون اول ترمودینامیک $\Delta U = Q + W$ برای چرخه ماشین‌های آرمانی به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

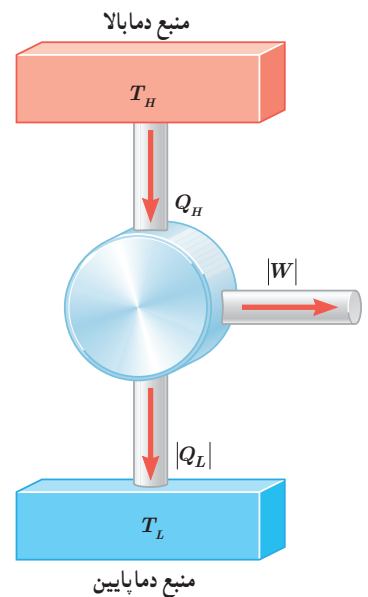
در این رابطه، Q_H مثبت و Q_L و W منفی است. بنابراین:

$$Q_H = |W| + |Q_L| \quad (\text{ماشین‌های گرمایی آرمانی}) \quad (۸-۵)$$

در نتیجه بازده برای ماشین‌های گرمایی آرمانی چنین می‌شود:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \quad (\text{برای ماشین‌های گرمایی آرمانی}) \quad (۹-۵)$$

بازده ماشین‌های گرمایی واقعی از بازده ماشین‌های آرمانی کمتر است. بازده واقعی ماشین‌های درون‌سوز بنزینی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بازده ماشین‌های درون‌سوز دیزلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد، و بازده ماشین‌های برون‌سوز بخار ۳۰ تا ۴۰ درصد است.



شکل ۵-۲۲ طرز کار طرح‌وار یک ماشین گرمایی آرمانی

مثال ۵-۱۵

بازده یک ماشین درون‌سوز بنزینی ۲۲٪ درصد است. این ماشین در هر چرخه $2/51 \times 10^3 \text{ J}$ کار انجام می‌دهد. 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 ۵-۷ 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 ۵-۸ داریم:

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

فناوری و کاربرد

نسبت تراکم ماشین‌ها: محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم r 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^۲ 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 به‌طور بی‌دررو متراکم و در



شکل ۳۳.۵ طرحی از اجزای یک ماشین دیزل

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 پستون 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 چشم پوشی 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 همهٔ 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 همهٔ گرمای دریافتی به کار وجود دارد؟ درواقع، هیچ یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همهٔ گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: "ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بپیماید 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^۱؛ 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.

قضیه کارنو: براساس 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_H و T_L 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 **سدهی کارنو** مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد و دریافت که بازده چنین ماشینی مستقل از ماده کاری است که چرخه ماشین را طی می‌کند. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** می‌نامند.



نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد

سدهی کارنو^۲ در اوّل

ژوئن ۱۷۹۶ میلادی

در پاریس و در

خانواده‌ای که در آن

علم و سیاست عجین

شده بود، به دنیا آمد.

او نخستین پسر لایزار کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لایزار بخش سوم نام فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدهی کارنو در ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی-لوساک و پواسون قرار گرفت. پس از فارغ التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدهی 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 ۲۴ آگوست ۱۸۳۲ میلادی در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

۱- Nicolas Leonard Sadi Carnot

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

محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (۵-۱) \quad (\text{برای ماشین کارنو})$$

که در آن T_L و T_H برحسب کلوین است. همان‌طور که می‌بینید بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع دمابالا و دماب 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_H و T_L 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 ۵-۱۶

توربین بخار یک نیروگاه برق بین دماهای $T_H = 80^\circ\text{C}$ و $T_L = 30^\circ\text{C}$ کار می‌کند. بازده ماشین کارنویی که بین این دو دما کار می‌کند چقدر است؟

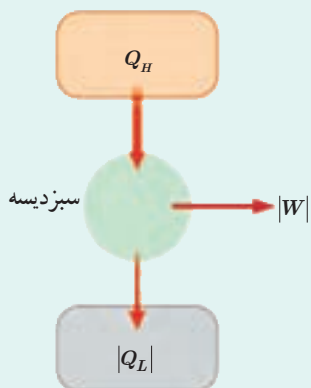
پاسخ: با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{30^\circ\text{C}}{80^\circ\text{C}} = 0.625$$

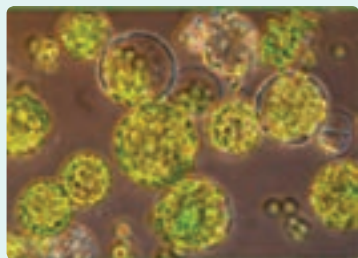
بازده واقعی توربین‌های بخار در عمل از این عدد کمتر و در حدود ۴۰ درصد است.

خوب است بدانید

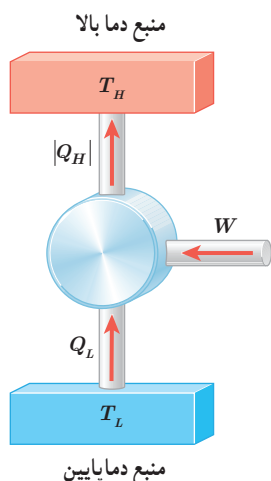
ترمودینامیک و فوتوسنتز: ترمودینامیک در پدیده‌های زیستی نیز کاربرد دارد. یکی از این کاربردها فوتوسنتز است. در فوتوسنتز، گیاهان درصد کوچکی از انرژی نور خورشید را که در بخشی از گستره نور مرئی واقع است به دام می‌اندازند و به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. در واقع فوتوسنتز شامل دو مرحله است. در مرحله نخست،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



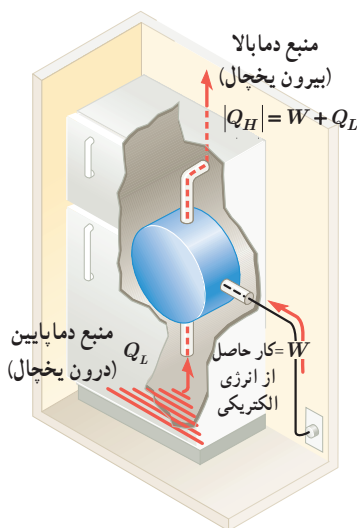
(الف) سبزدیسه همچون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند.



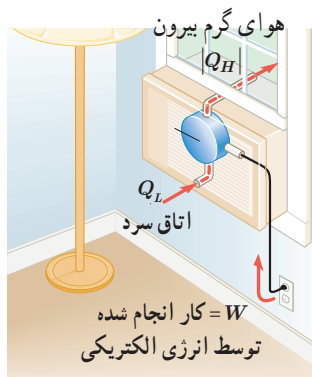
(ب) یک یاخته گیاهی شامل سبزدیسه‌هاست.



شکل ۵-۲۴ طرز کار طرح وار یک یخچال آرمانی



شکل ۵-۲۵ طرحی از طرز کار یک یخچال خانگی



شکل ۵-۲۶ طرحی از طرز کار یک کولرگازی

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. به عبارت 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^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 دما پایین می‌گیرد و به منبعی دما 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 دما پایین می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع دما بالا می‌دهد. به عبارت دیگر، یخچال وارون یک ماشین گرمایی عمل می‌کند. طرز کار یخچال به‌طور طرح‌وار در شکل ۵-۲۴ 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 کمپرسور (مترام‌کننده) 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 دما پایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دما 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 دما پایین بگیریم. بنابراین، **ضریب عملکرد یخچال** (K) به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع دما پایین (Q_L) به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد (W) تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_L}{W} \quad (۱۱-۵) \quad (\text{برای هر یخچالی})$$

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 درمی‌آید:

$$0 = Q_H + Q_L + W$$

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

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

$$|Q_H| = W + Q_L \quad (12-5) \quad (\text{برای یخچال آرمانی})$$

با قرار دادن W از رابطه (۱۲-۵) در رابطه ضریب عملکرد (معادله ۵-۱۱)، ضریب عملکرد یخچال‌های آرمانی از رابطه زیر به دست می‌آید :

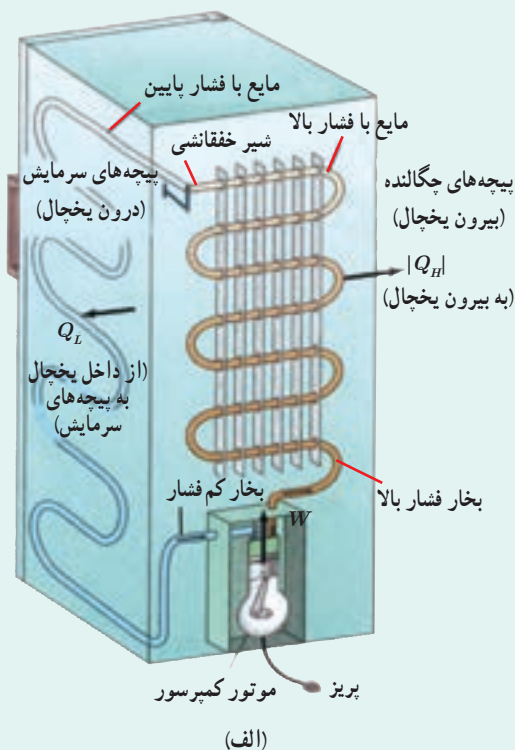
$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} \quad (13-5) \quad (\text{برای یخچال‌های آرمانی})$$

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

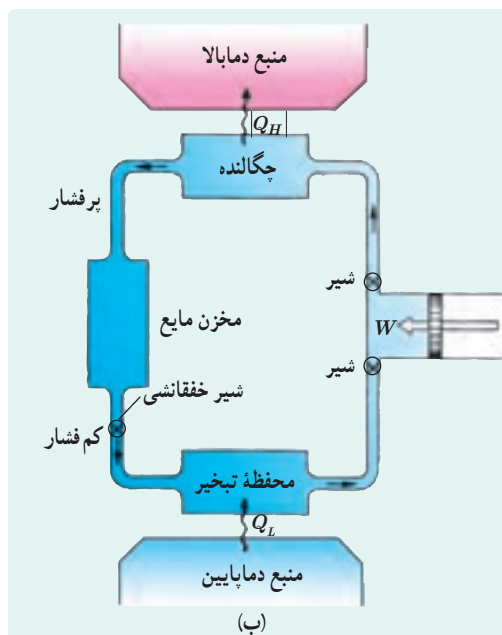
$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (14-5) \quad (\text{برای یخچال کارنو})$$

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

خوب است بدانید



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 طرح‌وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارت‌اند از : چگالنده، پیچ‌های سرمایش (محفظه تبخیر)، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقانشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). 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 اُزن 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 به طور مختصر به شرح زیر است :
کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظه تبخیر به چگالنده منتقل می کند و دما و فشار آن را بالا می برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع دمای بالا (اتاق) بیشتر شده است، گرمای $|Q_H|$ را به این منبع می دهد، مایع می شود و وارد مخزن مایع می گردد. هنگامی که این مایع پر فشار از شیر خفقا نشی می گذرد به شدت سرد می شود، به طوری که از منبع دمای پایین (هوا، غذا و یخ داخل یخچال) هم سردتر می شود و از آن گرمای Q_L را می گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می شود.

پرسش ۳-۵

با فرض آنکه بتوان ضریب عملکرد یک یخچال را با ضریب عملکرد یخچال کارنو توصیف کرد، به گمان شما یک کولر گازی در آب و هوای معتدل بهتر کار می کند، یا در آب و هوای گرم؟

مثال ۵-۱۷

فرض کنید در هر چرخه یک یخچال فرضی، دستگاه $8/^\circ\text{kJ}$ گرما از منبع دمای پایین بگیرد و کمپرسور $2/^\circ\text{kJ}$ کار روی دستگاه انجام دهد. با فرض آرمانی بودن یخچال،
(الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می دهد؟
(ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟
پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۵-۱۲ داریم:

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

(ب) با استفاده از رابطه ۵-۱۱ داریم:

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

مثال ۵-۱۸

توان یک یخچال 1000 وات و ضریب عملکرد آن $4/^\circ$ است. با فرض آرمانی بودن یخچال،
(الف) چه مدت طول می کشد تا در این یخچال $1/^\circ\text{kg}$ آب $25/^\circ\text{C}$ به یخ $-10/^\circ\text{C}$ تبدیل شود؟
(ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می شود؟ $L_F = 335 \times 10^3 \text{ J/kg}$ و $c_{\text{یخ}} = 2/10 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ و $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$.

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

$$Q_L = mc_{\text{آب}}|\Delta\theta| + mL_F + mc_{\text{یخ}}|\Delta\theta| = (1/0 \cdot \text{kg})(4/20 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(25/^\circ\text{C}) \\ + (1/0 \cdot \text{kg})(3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) + (1/0 \cdot \text{kg})(2/10 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(10/^\circ\text{C}) = 4/61 \times 10^5 \text{ J}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۵-۱۱ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

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

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

$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/15 \times 10^5 \text{ J}}{1000 \text{ J/s}} = 1/15 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از رابطه ۵-۱۲ برای یخچال آرمانی داریم:

$$|Q_H| = W + Q_L = 1/15 \times 10^5 \text{ J} + 4/61 \times 10^5 \text{ J} = 5/76 \times 10^5 \text{ J}$$

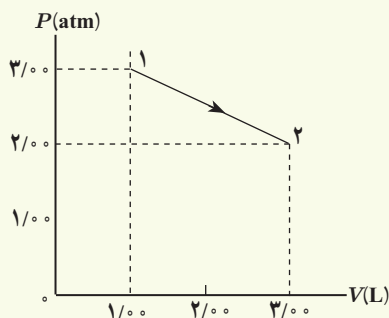
۵-۴ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

- ۱) ظرفی شامل 3 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؟

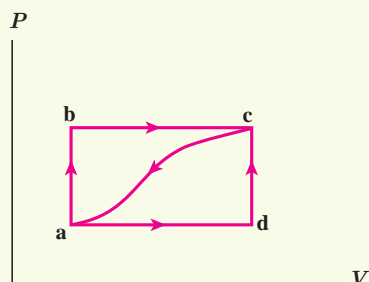
۵-۵ برخی فرایندهای ترمودینامیکی

- 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°C 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؟

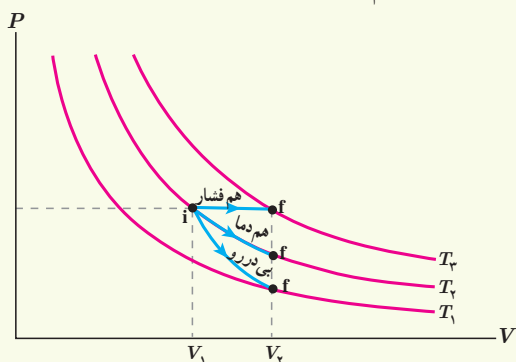


- ۵) نمودار $P-V$ ی گازی رقیق در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. در این فرایند با فرض آنکه انرژی درونی در نقطه (۱) برابر 456 J و در نقطه (۲) برابر 912 J باشد، چقدر گرما مبادله شده است؟ آیا گاز گرما گرفته است یا از دست داده است؟



- ۶) گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c، می‌رود. گاز در این مسیر، 9° ژول گرما می‌گیرد و 7° 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 g گاز اکسیژن (O_2) در فشار متعارف جو ($1.01 \times 10^5\text{ Pa}$) از 25°C تا 125°C گرم می‌شود. نسبت تغییر انرژی درونی گاز به گرمای داده شده به آن را به دست آورید؟

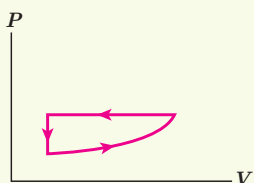


- ۸) یک مکعب آلومینیمی توپر به ضلع 20 cm از 50°C تا 150°C در فشار متعارف جو ($1.01 \times 10^5\text{ Pa}$) گرم می‌شود. کار انجام شده توسط مکعب و تغییر انرژی درونی آن را محاسبه کنید.
۹) مطابق شکل روبه‌رو، حجم گازی آرمانی طی سه فرایند هم فشار، هم دما و بی‌دررو از V_1 به حجم بزرگ‌تر V_2 می‌رسد.

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

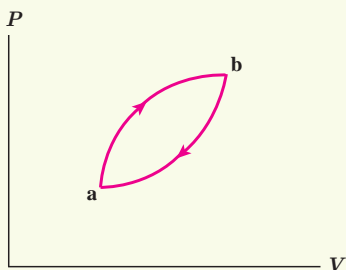
۱۰ برای چرخه گازی که نمودار $P-V$ ی آن در اینجا نشان داده شده است، ΔU گاز، W و Q مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



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 J باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



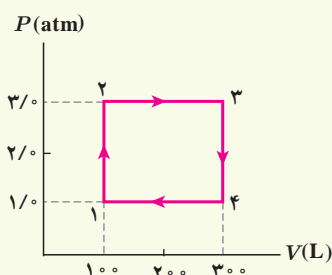
۱۲ یک گاز کامل دو اتمی چرخه نشان داده شده در شکل زیر را می‌پیماید. دمای گاز در

حالت (۱) برابر 200 K است. الف) دما در سه نقطه دیگر چقدر است؟

ب) کار انجام شده در چرخه چقدر است؟

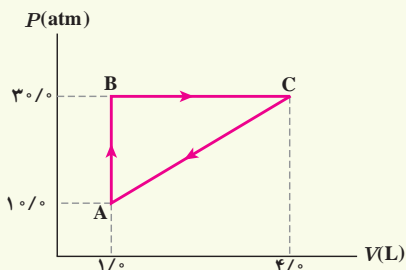
پ) در چه فرایندهایی گاز گرما گرفته است؟

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



۱۳ گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل روبه‌رو را می‌پیماید. گرمای مبادله شده

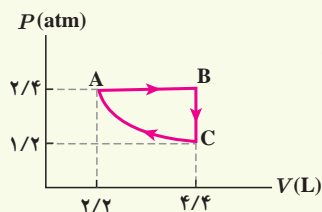
در این چرخه چند ژول است؟



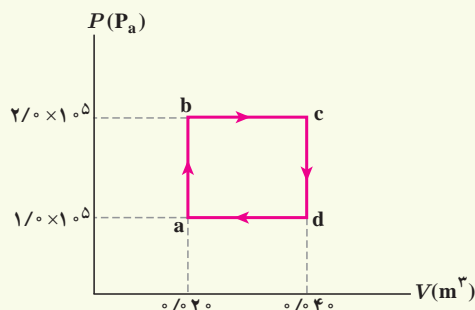
۱۴ دستگاهی متشکل از 2 mol گاز کامل تک اتمی حجمی برابر 2 L را در فشار $2/4\text{ atm}$ اشغال

کرده است. این دستگاه چرخه‌ای مطابق شکل را می‌پیماید که در آن فرایند CA فرایندی هم‌دما است.

الف) دما در نقاط A، B، C و چقدر است؟ ب) ΔU را برای هریک از سه فرایند چرخه به دست آورید.



۵-۲ ماشین های گرمایی



۱۵ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه ای

را مطابق شکل روبه رو می بینیم. 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 1000 J گرما از منبع دما بالا می گیرد و 600 J گرما به منبع دما پایین می دهد. الف) بازده

این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه 0.5 s طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟

۱۷ بازده یک ماشین آرمانی 25% درصد است و در هر چرخه 10^3 J کار انجام می دهد. 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 می شود؟

۱۸ یک ماشین بخار در هر دقیقه 10^5 MJ گرما از دیگ بخار دریافت می کند و $9 \times 10^4 \text{ MJ}$ گرما در جگالنده از دست

می دهد. 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 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 $5 \times 10^4 \text{ J/g}$ است و ماشین در هر ثانیه 40% چرخه را می بینیم. کمیت های 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.

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

۲۰ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه های جوش (در فشار متعارف جو) و انجماد آب کار می کند و بازده آن 70%

درصد است. آیا ادعای این مخترع می تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

۲۱ می خواهیم 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 می کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع های با دمای 300 K و 400 K کار می کنند. داده های هر ماشین

در هر چرخه عبارت اند از :

$$\text{ماشین A} \quad W = -40 \text{ J}, \quad Q_L = -175 \text{ J}, \quad Q_H = 200 \text{ J}$$

$$\text{ماشین B} \quad W = -400 \text{ J}, \quad Q_L = -200 \text{ J}, \quad Q_H = 500 \text{ J}$$

$$\text{ماشین C} \quad W = -400 \text{ J}, \quad Q_L = -200 \text{ J}, \quad Q_H = 600 \text{ J}$$

$$\text{ماشین D} \quad W = -10 \text{ J}, \quad Q_L = -90 \text{ J}, \quad Q_H = 100 \text{ J}$$

با فرض آرمانی بودن این چهار ماشین :

الف) کدام یک از ماشین ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می کنند؟

ب) کدام یک از ماشین ها قابل ساخت هستند؟

۲۳ یک ماشین کارنو بین دماهای 280°K و 360°K کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه 75% 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 $1/00\text{ L}$ آب 10°C 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 110 W است. (فرض کنید همه توان الکتریکی یخچال صرف سرد کردن و یخ زدن آب می‌شود.)

۲۵ یک کولر گازی در هر دقیقه $10^4 \times 9/0$ گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت $10^5 \times 1/3$ 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 250 g 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 22°C است. دمای داخل یخچال در 5°C ثابت نگه داشته شده است. کمترین مقدار انرژی الکتریکی که باید به یخچال داده شود تا یخ صفر درجه سلسیوس تشکیل شود، چقدر است؟

واژه نامه

Evaporation	تبخیر سطحی	Rate	آهنگ
Experimental	تجربی	Flow Rate	آهنگ جریان
Estimate	تخمین (برآورد)	Greenhouse Effect	اثر گلخانه‌ای
Compressibility	تراکم پذیری	Significant Figures	ارقام بامعنا
Wetting	ترشوندگی	Cylinder	استوانه (سیلندر)
Sublimation	تصعید	Static Friction	اصطکاک ایستایی
Thermal Equilibrium	تعادل گرمایی	Principle	اصل
Pyrometer	تف سنج	Archimedes' Principle	اصل ارشمیدس
Optical Pyrometer	تف سنج نوری	Bernoulli Principles	اصل برنولی
Turbulent	تلاطم	Expansion	انبساط
Speed	تندی	Volume Expansion	انبساط حجمی
Takeoff Speed	تندی برخاستن	Linear Expansion	انبساط طولی
Average Speed	تندی متوسط	Thermal Expansion	انبساط گرمایی
Power	توان	Freezing	انجماد
Gas Universal Constant	ثابت جهانی گازها	Measurement	اندازه‌گیری
Displacement	جاب‌جایی	Potential Energy	انرژی پتانسیل
Solid	جامد	Gravitational Potential	انرژی پتانسیل گرانشی
Crystalline Solid	جامدهای بلورین	Energy	انرژی
Amorphous Solid	جامدهای بی‌شکل	Elastic Potential Energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Mass	جرم	Kinetic Energy	انرژی جنبشی
Turbulent Flow	جریان تلاطمی	Internal Energy	انرژی درونی
Laminar Flow	جریان لایه‌ای	Contraction	انقباض
Floating Object	جسم شناور	Time Interval	بازه زمانی
Submerged Object	جسم غوطه‌ور	Efficiency	بازده
Earth Atmosphere	جو زمین	Resultant	برایند
Barometer	جو سنج	Vector	بردار
Boiling	جوشیدن	Expansion Joint	بست انبساطی
Cycle	چرخه	Crystalline	بلورین
Otto Cycle	چرخه اُتو	Conservation of Energy	پایستگی انرژی
Viscosity	چسبندگی (وکشیانی)	Diffusion	پخش
Source	چشمه	Physical Phenomena	پدیده‌های فیزیکی
Condensation	چگالش	Plasma	پلازما
Condenser	چگالنده	Piston	پیستون
Density	چگالی	Unit Prefixes	پیشوندهای یکا
Phase	حالت (فاز)	Thermal Radiation	تابش گرمایی
Motion	حرکت	Vaporization	تبخیر

Conversion Factor	ضرب (عامل) تبدیل	Brownian Motion	حرکت براونی
Coefficient of Performance	ضرب عملکرد	Error	خطا
Heat Capacity	ظرفیت گرمایی	Fundamental Knowledge	دانش بنیادی
Insulator	عایق	Accuracy	درستی (صحت)
Uncertainty	عدم قطعیت	Valve	دریچه (سوپاپ)
Nanoscience	علوم نانو	International System Units	دستگاه بین‌المللی یکاها
Quasi-Static Process	فرایند ایستوار	Thermodynamics System	دستگاه ترمودینامیکی
Adiabatic Process	فرایند بی‌دررو	Metric System	دستگاه متریک
Thermodynamics Process	فرایند ترمودینامیکی	Precision	دقت
Throttling Process	فرایند خفقا نشی	Adhesion	دگرچسبی
Isochoric process	فرایند هم‌حجم	Temperature	دما
Isothermal process	فرایند هم‌دما	Thermostat	دماپا
Isobaric process	فرایند هم‌فشار	Thermometer	دماسنج
Pressure	فشار	Thermometer Clinical	دماسنج طبی
Gauge Pressure	فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای)	Maximum – Minimum Thermometer	دماسنج کمینه-بیشینه
Standard Atmospheric Pressure	فشار متعارف جو	Standard Thermometer	دماسنج معیار
Manometer	فشارسنج	Thermograph	دمانگاشت
Technology	فناوری	Dynamics	دینامیک
Spring	فنر	Boiler	دیگ بخار
Rule of Dulong–Petit	قاعدهٔ دولن - پتی	Elementary Particles	ذرات بنیادی
First Law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک	Fusion	ذوب
Second Law of Thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک	Thermal Conduction	رسانش گرمایی
Newtons Laws	قانون‌های نیوتون	Humidity	رطوبت
Work – kinetic Energy Theorem	قضیهٔ کار – انرژی جنبشی	Micrometer	ریزسنج
Carnot Theorem	قضیهٔ کارنو	Light Year	سال نوری
Carat	قیراط	Global Positioning System(GPS)	سامانه مکان‌یابی جهانی
Work	کار	Planetary Nebula	سحابی سیاره‌ای
Surface Tension	کشش سطحی	Velocity	سرعت
Physical Quantity	کمیت‌های فیزیکی	The Fire Syringe	سرنگ آتش‌زنه
Gravitational Work	کار گرانشی	Valve	سوپاپ (دریچه)
Temperature Quantity	کمیت دماسنجی	Fluid	شماره
Macroscopic Quantity	کمیت ماکروسکوپی	Dew	شبنم
Vector Quantities	کمیت‌های برداری	Acceleration	شتاب
Scalar Quantities	کمیت‌های نرده‌ای	Spark Plug	شمع
Caliper	کولیس	Exhaust Stroke	ضربهٔ تخلیه
Galaxy	کهکشان	Compression Stroke	ضربهٔ تراکم
Ideal Gas	گاز آرمانی (کامل)	Power Stroke	ضربهٔ قدرت
Gravitation	گرانش	Intake Stroke	ضربهٔ مکش

Liquefaction	میعان	Heat	گرما
Crank	میل لنگ	Calorimeter	گرماسنج
Nanoparticle	نانو ذره	Bomb Calorimeter	گرماسنج بمبی
Nanolayer	نانو لایه	Latent Heat	گرمای نهان
Nanotechnology	نانوفناوری	Specific Heat	گرمای ویژه
Scalar	نرده‌ای	Molar Specific Heat	گرمای ویژه مولی
Compression Ratio	نسبت تراکم	Knot	گره (دریایی - هوایی)
Physical Theory	نظریه فیزیکی	Capillary Tube	لوله موین
Freezing Point	نقطه انجماد	Venturi Tube	لوله ونتوری
Boiling Point	نقطه جوش	Steam engine	ماشین بخار
Melting Point	نقطه ذوب	Gasoline Engine	ماشین بنزینی
Triple Point	نقطه سه‌گانه	Diesel Engine	ماشین دیزل
Abbreviation	نماد	Carnot Engine	ماشین کارنو
Scientific Notation	نمادگذاری علمی	Heat Engine	ماشین گرمایی
Bi-Metal Strip	نوار دوفلزه	External Combustion Engine	ماشین گرمایی برون سوز
Force	نیرو	Internal Combustion	ماشین گرمایی درون سوز
Spring Balance	نیروسنج	Environment	محیط
Repulsive Force	نیروی رانشی	Model	مدل
Attractive Force	نیروی ربایشی	Modeling	مدل سازی
Dissipative Forces	نیروهای اتلافی	Order-of Magnitude	مرتبه بزرگی
Buoyant Force	نیروی شناوری	Explosion Step	مرحله آتش گرفتن
Air (Temperature) Inversion	وارونگی هوا (دما)	Exhaust Step	مرحله تخلیه
Weight	وزن	Exhaust Step	مرحله تخلیه
Cohesion	هم چسبی	Equation of Continuity	معادله پیوستگی
Convection	همرفت	Equation of State	معادله حالت
Forced Convection	همرفت واداشته	Approximate Value	مقدار تقریبی
Unit	یکا	Temperature Scale	مقیاس دماسنجی
Base Units	یکاهای اصلی	Nano-Scale	مقیاس نانو
Derived Units	یکاهای فرعی	High-temperature Reservoir	منبع دما بالا
Refrigerator	یخچال	Low-temperature Reservoir	منبع دما پایین
Astronomical Unit	یکای نجومی	Heat Reservoir	منبع گرما
		Capillarity	موینگی

فهرست منابع

منابع انگلیسی

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 فلاحتی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد اول) مکانیک، گرما و شارها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزینیک و یرل 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 ووثیل، 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 سبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
- ۶- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل 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 ژاپن، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، چاپ اول ۱۳۹۴، انتشارات مدرسه.
- ۸- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس اوہانیان، 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 مَدَن و دیگران، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و معصومه قاسمی، چاپ سوم ۱۳۹۵، انتشارات مدرسه.

عکاس شروع فصل اول: آقای محمد یزدی راد

