

فصل ۵

ترمودینامیک

- ۱-۵ معادلهٔ حالت
 - ۲-۵ فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار
 - ۳-۵ تبادل انرژی
 - ۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک
 - ۵-۵ برخی از فرایندهای ترمودینامیکی
 - ۶-۵ چرخهٔ ترمودینامیکی
 - ۷-۵ ماشین‌های گرمایی
 - ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)
 - ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال‌ها
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

پیامدها

دانش آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- با فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار و برخی از انواع آن آشنا می شوند.
- راه‌های تبادل انرژی بین دستگاه و محیط را می شناسند.
- با قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک و پیامدهای آنها آشنا می شوند.
- به نقش ترمودینامیک در ماشین‌های گرمایی و یخچال‌ها پی می برند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در بررسی یک تحول ترمودینامیکی، دستگاه و محیط باید مشخص شود.
- از متغیرهای ترمودینامیکی برای توصیف رفتار دستگاه در حالت ترمودینامیکی استفاده می شود.
- برای توصیف نموداری فرایندهای ترمودینامیکی باید فرایندها به صورت ایستاوار انجام شوند.
- تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو راه کار و گرما صورت می گیرد.
- تغییر انرژی درونی یک دستگاه از مجموع جبری گرمای مبادله شده و کار انجام شده روی دستگاه به دست می آید.
- دستگاه‌های ترمودینامیکی با فرایندهای مختلفی می توانند از یک حالت به حالت دیگر بروند.
- اگر دستگاه بتواند پس از انجام چند فرایند به حالت اولیه خود بازگردد، یک چرخه ترمودینامیکی را طی کرده است.
- ماشین‌های گرمایی با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از یک سوخت را به کار تبدیل می کنند.
- هدف از ساختن هر ماشین آن است که انرژی گرفته شده را تا بیشترین مقدار ممکن به انرژی مفید خروجی تبدیل کند.
- برای ماشین‌های گرمایی حد بالایی برای بازده آنها وجود دارد که مانع از تبدیل کل انرژی شیمیایی به کار مفید می شود.
- در هر یخچال می خواهیم با صرف کمترین کار ممکن، بیشترین گرما را از منبع دما پایین بگیریم.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شوند؟

- دستگاه و محیط در تحول‌های ترمودینامیکی چگونه تعیین می شوند؟
- برای توصیف یک فرایند ترمودینامیکی توسط متغیرهای ترمودینامیکی، دستگاه باید چگونه تغییر کند؟
- برای توصیف یک حالت ترمودینامیکی از چه متغیرهایی استفاده می شود؟
- دستگاه ترمودینامیکی از چه راه‌هایی با محیط تبادل انرژی می کند؟
- انرژی درونی یک دستگاه ترمودینامیکی به چه روش‌هایی تغییر می کند؟
- تغییر انرژی درونی، گرما و کار مقدار مشخصی از یک ماده در فرایندهای ترمودینامیکی مختلف هم حجم، هم فشار، هم دما و بی‌دررو چگونه است؟
- کار انجام شده در یک چرخه چگونه تعیین می شود و رابطه بین کار و گرمای مبادله شده چگونه است؟

- در یک چرخهٔ ماشین گرمایی درون سوز بنزینی، چه فرایندهایی انجام می شود؟
- بازدهٔ ماشین گرمایی چیست و چرا تعریف می شود؟
- قانون دوم ترمودینامیک به بیان های ماشین گرمایی و یخچالی چه محدودیت هایی بر ساخت ماشین ها و یخچال ها اعمال می کند؟
- ضریب عملکرد یخچال چیست و چرا تعریف می شود؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان چه دانش و مهارت های اساسی را کسب می کنند؟

الف) دانشی

- با مفاهیم دستگاه، محیط، تعادل ترمودینامیکی، متغیرهای ترمودینامیکی، فرایندهای ترمودینامیکی، فرایند ایستاوار، منبع گرما، انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک، فرایندهای هم حجم، هم فشار، هم دما و بی دررو، چرخهٔ ترمودینامیکی، ماشین های گرمایی برون سوز و درون سوز، ماشین بخار وات، بازده، قانون دوم ترمودینامیک به بیان های ماشین گرمایی و یخچالی، قضیهٔ کارنو، و ضریب عملکرد یخچال آشنا می شوند.

ب) مهارتی

- به مهارت های رسم نمودار برای فرایندهای ایستاوار ترمودینامیکی، محاسبهٔ تغییر انرژی درونی با تعیین درست علامت های کار و گرما، محاسبهٔ کار، گرما و تغییر انرژی درونی در فرایندهای خاص ترمودینامیکی، رسم نمودارهای مختلف فرایندهای خاص، محاسبهٔ کار و گرمای مبادله شده در چرخه های ترمودینامیکی، مهارت توصیفی مرحله های ماشین بخار و ماشین بنزینی، تعیین بازدهٔ یک ماشین گرمایی، تعیین حد بالای بازده بر اساس قضیهٔ کارنو، تعیین ضریب عملکرد یخچال و حد بالای آن دست می یابند.

بودجه بندی پیشنهادی

- جلسهٔ اول : تصویر شروع فصل، مقدمه و بخش ۱-۵ معادلهٔ حالت.
- جلسهٔ دوم : بخش ۲-۵، فرایندهای ترمودینامیکی ایستاوار و بخش ۳-۵ تبادل انرژی
- جلسهٔ سوم : بخش ۴-۵ انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک
- جلسهٔ چهارم : بخش ۵-۵، فرایندهای خاص هم حجم و هم فشار
- جلسهٔ پنجم : بخش ۵-۵، فرایندهای خاص هم دما و بی دررو
- جلسهٔ ششم و هفتم : بخش ۶-۵، چرخهٔ ترمودینامیک و بخش ۷-۵ ماشین های گرمایی
- جلسهٔ هشتم : بخش ۸-۵ قانون دوم ترمودینامیک
- جلسهٔ نهم : بخش ۹-۵ قانون دوم ترمودینامیک و یخچال
- جلسهٔ دهم : جمع بندی، رفع اشکال و حل پرسش ها و تمرین های باقیمانده در پایان فصل
- جلسهٔ یازدهم : آزمون تشریحی فصل پنجم

راهنمای تدریس

در اینجا حتماً باید به وجود دما در کنار کمیت‌های مشاهده‌پذیر در تعریف دانش ترمودینامیک تأکید شود. به عبارتی، تأکید شود این حضور دما در کنار کمیت‌های مشاهده‌پذیر است که علم ترمودینامیک را از سایر شاخه‌های علوم که مبتنی بر کمیت‌های مشاهده‌پذیر است، متمایز می‌کند.

ترمودینامیک

این علم به بررسی تغییرات انرژی در سیستم‌ها می‌پردازد. در این تصویر، یک موتور خودرو را می‌توانیم مشاهده کنیم که در حال کار است. موتور خودرو یک سیستم ترمودینامیکی است که در آن انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. در این فرآیند، دما نقش مهمی دارد و تغییرات دما در موتور می‌تواند به تغییرات در عملکرد آن منجر شود.

۱-۵-۱ معادله حالت
دانش‌آموزان در فصل قبل با معادله حالت گاز کامل آشنا شده‌اند و می‌دانند بنا به این معادله، هرگاه یکی از کمیت‌های V, P یا T را در یک گاز کامل تغییر دهیم، ناگزیر، دست کم یکی از دو کمیت دیگر از این سه کمیت نیز تغییر خواهد کرد. خوب است این دانش قبلی دانش‌آموزان، در طرح درس، مورد استفاده قرار بگیرد و سپس تأکید گردد که در گازهای واقعی نیز، معادله‌هایی وجود دارد که سه کمیت V, P و T را به هم مربوط می‌کند که البته این معادله‌ها پیچیده‌تر از معادله حالت گاز کامل است.

در این تصویر، یک دست یک قوطی فلزی را در دست گرفته است. این قوطی می‌تواند حاوی یک گاز واقعی باشد. در گازهای واقعی، علاوه بر دما، فشار و حجم نیز نقش مهمی دارند. تغییرات در این کمیت‌ها می‌تواند به تغییرات در خواص فیزیکی گاز منجر شود. در این بخش، به بررسی معادله‌هایی می‌پردازیم که این سه کمیت را به هم مرتبط می‌کنند.

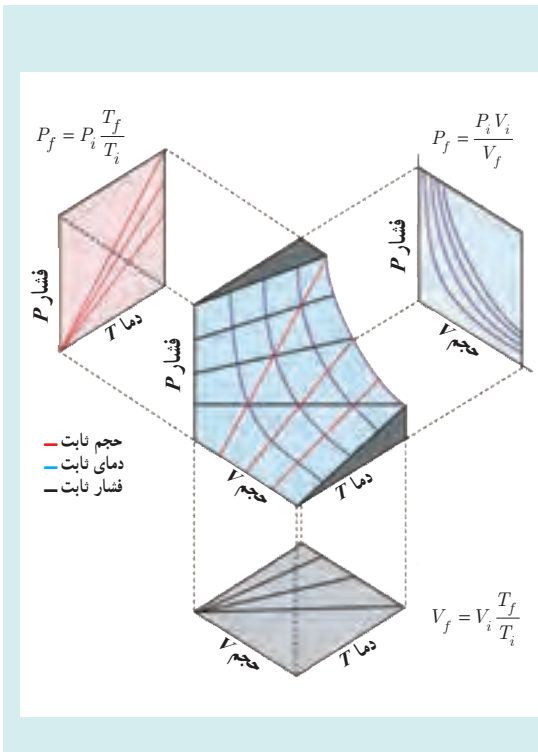
معادله حالت گاز کامل، رابطه بین دما، فشار و حجم را بیان می‌کند. در گازهای واقعی، این رابطه پیچیده‌تر است و به دلیل نیروهای بین‌مولکولی و حجم مولکول‌ها، تغییراتی در رفتار آن‌ها مشاهده می‌شود. معادله‌های واقعی‌تر، مانند معادله وان‌دروالس، این تغییرات را در نظر می‌گیرد و به ما کمک می‌کند تا رفتار گازهای واقعی را بهتر درک کنیم.



۲-۵- فرایندهای ترمودینامیکی ایستوار
 حتماً اشاره شود حالت دستگاه وقتی معلوم است که
 متغیرهای ترمودینامیکی آن معلوم باشد.

۳-۵- تبادل انرژی
 در ادامه بحث متغیرهای ترمودینامیکی، خوب است این
 پرسش برانگیزاننده برای دانش آموزان مطرح شود که چگونه
 می توان متغیرهای دینامیکی را تغییر داد، و ذهن دانش آموزان را
 در پاسخ به این پرسش، به سمت بحث داد و ستد کار و گرما بین
 محیط و شاره هدایت کرد.

دانستنی برای معلم



سطح $P-V-T$ ی گاز کامل

معادله حالت گاز کامل، $PV = nRT$ ، در دستگاه مختصات سه بُعدی $P-V-T$ ، معرف یک سطح است. این سطح در شکل نشان داده شده است. خطوط قرمز رنگ روی این سطح، مسیره های حجم ثابت را نشان می دهند. با تصویر کردن خطوط قرمز رنگ روی صفحه $P-T$ خط های راست مبدأ گذر حجم ثابت به دست می آیند و به خوبی دیده می شود که خط های مبدأ گذر با شیب بیشتر در صفحه $P-T$ ، تصویر مسیره های حجم ثابت با حجم کمتر روی سطح $P-V-T$ ی گاز هستند.

خطوط سیاه رنگ روی این سطح، مسیره های فشار ثابت را نشان می دهند. اگر این مسیره ها را روی صفحه $V-T$ تصویر کنیم، خط های راست مبدأ گذر فشار ثابت به دست می آیند و با اندکی دقت می بینید که خط های مبدأ گذر با شیب بیشتر در صفحه $V-T$ ، مربوط به مسیره های فشار ثابت با فشار کمتر روی سطح $P-V-T$ ی گاز هستند.

منحنی‌های آبی‌رنگ روی این سطح، مسیرهای دما ثابت هستند. اگر این منحنی‌ها را روی صفحه $P-V$ تصویر کنیم، خم‌های هم‌دما ایجاد می‌شوند و به‌سادگی دیده می‌شود که خم‌های هم‌دمای بالاتر در صفحه $P-V$ مربوط به مسیرهای دما ثابت با دمای بیشتر روی سطح $P-V-T$ گاز هستند.

به این ترتیب همه اطلاعات مربوط به سه صفحه $P-V$ ، $P-T$ و $V-T$ ، به‌صورت کامل و یک‌جا، در سطح $P-V-T$ گاز در فضای سه بعدی $P-V-T$ وجود دارد. هر نقطه از این سطح مربوط به یک حالت تعادلی گاز کامل است و برعکس، هر حالت تعادلی گاز کامل، با یک نقطه روی این سطح مشخص می‌شود. بنابراین هر فرایند ایستاواری که برای یک گاز کامل رخ دهد، با عبور از بی‌شمار حالت تعادلی، از بی‌شمار نقطه این سطح می‌گذرد و با مسیری روی این سطح مشخص می‌گردد. سطح $P-V-T$ یک گاز واقعی نیز به شکل مشابه، حاوی همین اطلاعات برای گاز واقعی است. سطح $P-V-T$ یک گاز واقعی، متفاوت از سطح $P-V-T$ یک گاز کامل است.

۵-۴- انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

همان‌طور که در فصل ۴ اشاره شد، انرژی درونی مجموع انرژی جنبشی ذرات تشکیل‌دهنده (انرژی گرمایی) و انرژی پتانسیل بین‌آنهاست. بنابراین، مجموع انرژی جنبشی ذرات ماده وابسته به انرژی درونی برای مخزن گازی که ساکن است و برای همان مخزن گاز، با همان دما، که مثلاً درون اتومبیلی در حالت حرکت قرار دارد، فرقی نمی‌کند. همین‌طور، منظور از انرژی پتانسیل هر ذره، انرژی پتانسیل مربوط به برهم‌کنش خود ذرات ماده با یکدیگر است و مثلاً انرژی پتانسیل گرانشی ذرات در اینجا موردنظر نیست. مثلاً وقتی یک مخزن گاز را از روی سطح زمین برمی‌داریم، انرژی پتانسیل وابسته به انرژی درونی تغییر نمی‌کند.

در این بخش باید با ارائه مثال‌هایی، به علامت‌های Q و W و توجیه و تعبیر اینکه دستگاه و محیط چیست پرداخته شود و توضیح داده شود که دستگاه و محیط اختیاری هستند.



در واقع، محتوای قانون اول ترمودینامیک چیزی بیش از اصل پایستگی انرژی است. این قانون از وجود متغیر حالتی به نام انرژی درونی برای یک دستگاه ترمودینامیکی در حالت تعادل صحبت می‌کند که مثلاً برای یک توده گاز رقیق، به تعداد مول و دمای گاز بستگی دارد. تغییر این متغیر حالت، با مجموع کار و گرمای مبادله شده با دستگاه در هر فرایند ایستاوار برابر است.



هدف از این «خوب است بدانید» آن است که به اهمیت قانون اول در زندگی روزمره پرداخته شود.

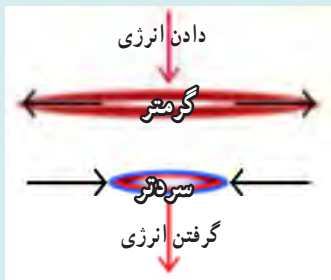
همچنین توجه کنید که در این بحث، به انرژی شیمیایی مواد غذایی ذخیره شده در بدن، انرژی درونی بدن گفته نشده است. بلکه هنگام یک فعالیت، در نتیجه سوختن مواد غذایی ذخیره شده در بدن، بخشی از انرژی شیمیایی این مواد آزاد شده و به صورت انرژی گرمایی به اندامها داده می شود. به این انرژی گرمایی (پس از سوختن مواد غذایی در بدن)، انرژی درونی بدن گفته شده است.

دانستنی برای معلم

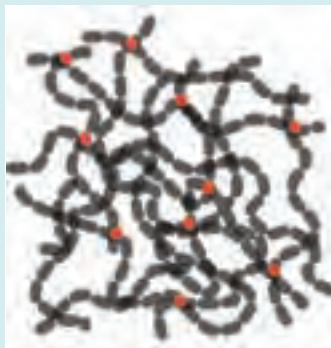
ترمودینامیک کس

وقتی کسی را که روی لب بالایی خود گذاشته اید به سرعت بکشید، کس به قدری گرم می شود که می توانید گرمای آن را حس کنید. حال اگر همان کس کشیده شده را برای چند دقیقه ای از لب خود دور کنید و سپس دوباره آن را روی لبتان قرار دهید و این بار بگذارید به سرعت منقبض شود، می توانید سرد شدن کس را حس کنید. قانون اول ترمودینامیک به بیان ساده شده بیان می دارد که وقتی شما کس را می کشید، انرژی شما باید به کس انتقال یابد و بدین ترتیب انرژی درونی آن افزایش پیدا کند. وقتی کس را روی لب خود می گذارید بخشی از این انرژی درونی افزوده شده به لب شما منتقل می شود (شکل الف). وقتی کس را رها می کنید، انرژی درونی آن نیز آزاد می شود و بدین ترتیب می توانید سرد شدن آن را حس کنید.

از دیدگاه میکروسکوپی می توان گفت لاستیک موجود در کس لاستیکی از مولکول های زنجیره ای بلندی تشکیل شده است که مثل ماکارونی چندین دور در هم پیچیده شده اند (شکل ب). وقتی کس را می کشید، در واقع دارید این مولکول ها را می کشید و بخشی از کار شما به حرکت گرمایی مولکول ها تبدیل می شود. گرمایی که روی لبتان حس می کنید ناشی از این حرکت گرمایی فزاینده است. اگر بگذارید کس منقبض شود، مولکول ها



(الف)



(ب)

برای درهم پیچیده شدن کار انجام می دهند؛ انرژی مورد نیاز برای این کار را انرژی گرمایی مولکول ها تأمین می کند، و از این رو کش سرد می شود. همین ساختار مولکولی است که می تواند رفتار ویژه لاستیک را توضیح دهد. وقتی کش گرم می شود، انرژی گرمایی اضافی مولکول ها باعث می شود که محکم تر درهم پیچیده شوند و در نتیجه طول کش کوتاه شود. و اگر کش سرد شود، از دست دادن انرژی گرمایی به این معناست که مولکول ها نمی توانند محکم درهم پیچیده شوند و در نتیجه طول کش زیاد می شود. البته مبحث ترمودینامیک کش مسئله ای جالب و فراتر از سطح این کتاب است و علاقه مندان می توانند به مراجع دیگری از جمله مقاله زیر که از اینترنت قابل دسترسی است رجوع کنند:

Exploring the thermodynamics of a rubber band, by David Roundy and Michael Rogers.

تمرین های پیشنهادی بخش ۵-۴

۱ گلوله ای به جرم $3/0\text{ g}$ با تندی 400 m/s وارد تنه درختی می شود و از طرف دیگر تنه با تندی 200 m/s خارج می شود. در این فرایند، چقدر انرژی منتقل شده است؟ (راهنمایی: گلوله و تنه درخت را به عنوان دستگاه در نظر بگیرید. هیچ کاری روی این دستگاه یا توسط آن انجام نمی شود، هیچ گرمایی به دستگاه اضافه یا کم نمی شود زیرا هیچ انرژی ای ناشی از انتقال دما به دستگاه وارد یا از آن خارج نمی شود. بنابراین انرژی جنبشی به انرژی درونی گلوله و درخت تبدیل می شود).

پاسخ: 180 J

۲ یخ را می توان با ساییدن دو قالب آن به یکدیگر، ذوب کرد. اگر بخواهیم 100 g یخ 0°C ذوب شود، چقدر کار برحسب ژول باید انجام گیرد؟

پاسخ: 333 J

۳ فرض کنید فلاسکی را با آب 19°C پر کرده اید و می خواهید با تکان دادن فلاسک، آب آن را به جوش آورید. با فرض اینکه هیچ انرژی گرمایی ای از فلاسک تلف نشود و شما در هر دقیقه ۲۷ بار فلاسک را تکان دهید و در هر تکان، آب به اندازه 32 cm سقوط کند، شما باید فلاسک را چه مدت تکان دهید تا آب آن به جوش آید؟ (راهنمایی: نتیجه به جرم آب بستگی دارد).

پاسخ: $4/0 \times 10^3\text{ min}$ یا تقریباً نزدیک به سه روز.

۴ فرض کنید 200 J کار توسط دستگاهی انجام شده است و 70% انرژی به صورت گرما از دستگاه گرفته شده است. تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

پاسخ: -493 J

پرسش پیشنهادی بخش ۵-۴

وقتی یک گاز کامل در ظرفی عایق‌بندی شده و با بالا بردن آرام یک پیستون به تدریج افزایش حجم دهد، دمای گاز به این دلیل افزایش می‌یابد که :

الف) مولکول‌ها فضای بیشتری برای حرکت دارند که این به این معنی است که آنها می‌توانند با تندی کمتری حرکت کنند و دما به تندی حرکت مولکول‌ها بستگی دارد.

ب) گاز باید کار انجام دهد. بنابراین انرژی درونی باید کاهش یابد و دما به انرژی درونی بستگی دارد.

پ) با حرکت پیستون، گرمای گاز از دست می‌رود و از دست رفتن گرما به معنی کاهش دما است.

پاسخ : ب



۵-۵- برخی از فرایندهای ترمودینامیکی

برای ایجاد انگیزه در شروع این بخش، خوب است به دیگ زودپزی اشاره شود که مقدار کمی آب درون آن ریخته شده است. پس از مدتی فنر سوپاپ باز می‌شود. در این فرایند، پیش از باز شدن فنر سوپاپ، دما و فشار برخلاف حجم که ثابت است، افزایش یافته است.

پاسخ پرسش ۱-۵

با داغ کردن قوطی، جنبش مولکول‌های گاز درون آن بسیار زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های آن افزایش می‌یابد و این می‌تواند موجب ترکیدن قوطی شود. در واقع این مثالی از یک فرایند ترمودینامیکی هم‌حجم است که در آن با افزایش دما، فشار افزایش می‌یابد.

در یک فرایند هم‌حجم، دما، فشار و جنبش مولکول‌های گاز درون آن بسیار زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های آن افزایش می‌یابد و این می‌تواند موجب ترکیدن قوطی شود. در واقع این مثالی از یک فرایند ترمودینامیکی هم‌حجم است که در آن با افزایش دما، فشار افزایش می‌یابد.

حالت اول	حالت دوم
$T_1 = 27^\circ\text{C}$	$T_2 = 127^\circ\text{C}$
$P_1 = 1 \text{ atm}$	$P_2 = ?$
$V_1 = 1 \text{ liter}$	$V_2 = 1 \text{ liter}$

محاسبات: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \Rightarrow P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 1 \text{ atm} \cdot \frac{300 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 1 \text{ atm}$ (Note: The image shows a calculation where pressure increases with temperature for a fixed volume).

گرمای ویژه مولی در حجم ثابت یک گاز به تعداد درجات آزادی گاز مربوط می‌شود. به ازای هر درجه آزادی، $\frac{1}{2}R$ به گرمای ویژه مولی در حجم ثابت تعلق می‌گیرد و چون گاز تک اتمی سه درجه آزادی انتقالی دارد، گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برای آن $\frac{3}{2}R$ و برای گازهای دو اتمی که سه درجه آزادی انتقالی و دو درجه آزادی چرخشی دارند، $\frac{5}{2}R$ است.

پاسخ تمرین ۱-۵

الف) از قانون اول ترمودینامیک (معادله ۱-۵) استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه در فرایند هم‌حجم $W=0$ است، داریم $\Delta U = Q + W = Q = nC_V \Delta T$

بنابراین، تغییر انرژی درونی گاز برابر است با

$$\Delta U = nC_V (T_f - T_i)$$

ب) برای گازهای تک اتمی، گرمای ویژه مولی در حجم ثابت برابر با $\frac{3}{2}R$ است. بنابراین، ΔU را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta U = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

در این فرایند، گاز در برابر فشار خارجی گسترش می‌یابد و کار انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز برابر است با $\Delta U = nC_V \Delta T$.

محاسبات: $W = P_{\text{ext}} \Delta V = 1 \text{ atm} \cdot (2 - 1) \text{ liter} = 1 \text{ liter} \cdot \text{atm}$

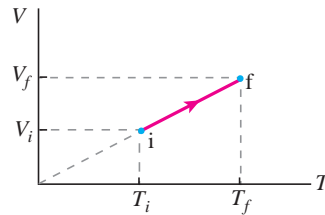


پاسخ تمرین ۲-۵

چون گاز، کامل (آرمانی) است با استفاده از معادله حالت گاز آرمانی داریم :

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

چون nR/P ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد (برون‌یابی) آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. بنابراین نمودار این رابطه به شکل زیر می‌شود :



پاسخ تمرین ۳-۵

در تراکم هم‌فشار، در شکل ۱۲-۵ کتاب، جابه‌جایی رو به پایین می‌شود، در حالی که سوی نیروی وارد از گاز به پیستون تغییر نمی‌کند و بنابراین کار گاز روی پیستون چنین می‌شود :

$$Fd \cos 180^\circ = -Fd = -PA \Delta V$$

اما توجه کنید که این بار برابر ΔV است (زیرا حجم کاهش یافته ΔV منفی می‌شود). پس خواهیم داشت :

$-PA \Delta V = -P(-\Delta V) = P \Delta V$ کار گاز روی پیستون ولی چون کار پیستون روی گاز (کار محیط) منفی این رابطه است، کار پیستون روی گاز $-P \Delta V$ می‌شود که همان رابطه ۳-۵ کتاب است.

در اینجا خوب است اشاره شود که چه در تراکم و چه در انبساط، سوی نیروی وارد از گاز به پیستون تغییر نمی‌کند.

بسیاری از دانش‌آموزان در پاسخ فعالیت ۱-۵ و نتیجه‌گیری پس از آن که در متن درس آمده است، دچار این مشکل می‌شوند که کار از جنس حاصل‌ضرب نیرو در جابه‌جایی (یا حاصل‌ضرب فشار در تغییر حجم) و یکای SI آن ژول است، در حالی که مساحت سطح هاشور خورده در شکل، از جنس حاصل‌ضرب دو طول و یکای SI آن مترمربع است. چگونه ممکن است کار با مساحت مساوی شود؟ این ابهام در بقیه جاهای دیگری که در آموزش فیزیک با سطح زیر نمودار سروکار داریم نیز وجود دارد. واقعیت این است که به کارگیری واژه مساحت در این موارد، با قدری مسامحه و ساده‌گیری همراه است و آنچه محاسبه می‌شود، در واقع مساحت نیست.

پاسخ فعالیت ۱-۵

از رابطه ۳-۵ می‌دانیم که کار در فرایند هم‌فشار از رابطه $W = -P\Delta V$ به دست می‌آید. از روی شکل داده شده برای فرایند هم‌فشار در می‌یابیم که حاصل ضرب $P\Delta V$ در واقع مساحت زیر نمودار $P-V$ (مساحت ناحیه هاشور خورده) است. بنابراین می‌توان گفت که در فرایند هم‌فشار، قدرمطلق کار انجام شده (قدرمطلق کار محیط روی دستگاه) برابر با سطح زیر نمودار $P-V$ است.

می‌توان برای ورود به بحث فرایند هم‌دما، با این پرسش شروع کرد: سرنگی را از هوا پرمی‌کنیم و سوراخ ته آن را می‌بندیم. سپس سرنگ را ته ظرف خیلی گودی قرار می‌دهیم که درون آن مقداری آب وجود دارد. اینک به آرامی درون ظرف آب می‌ریزیم؛ آبی که دمای آن با دمای آب اولیه درون ظرف برابر باشد. به نظر شما فشار، حجم، و دمای هوای درون سرنگ، چه تغییری می‌کند و هوای درون سرنگ چه فرایندی را تجربه می‌کند؟

توجه شود که اغلب دانش‌آموزان به سختی می‌پذیرند که در فرایند هم‌دما گاز با محیط تبادل گرما می‌کند، بی‌آنکه دمایش تغییر کند. باید تأکید کنیم که اهمیت فرایند هم‌دما در تبدیل کار و گرما به یکدیگر ($Q = -W$) است. در ضمن در صورت لزوم می‌توان با این توضیح، ابهام ذهن دانش‌آموزان را تا حدودی برطرف کرد که مثلاً در یک تراکم هم‌دمای واقعی، در هر تراکم جزئی، کار کوچکی روی گاز انجام می‌شود و بدین ترتیب دمای گاز به‌طور موقت، اندکی زیاد می‌شود. سپس گاز که اکنون دمای آن کمی بیشتر از دمای منبع شده است و در تماس با منبع است به منبع گرما می‌دهد تا دوباره به دمای منبع برسد. یعنی در یک تراکم هم‌دمای واقعی، دمای گاز نوسانات کوچکی در بالای دمای منبع دارد.

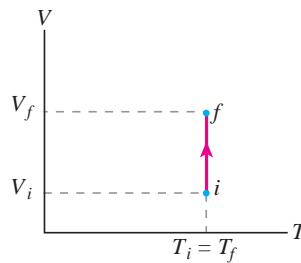
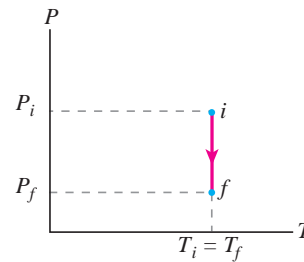
این شکل هم‌فشار بودن فرایند را نشان می‌دهد. در این فرایند، دمای گاز ثابت می‌ماند و تغییرات فشار و حجم به گونه‌ای انجام می‌گیرد که حاصل ضرب فشار در حجم ثابت بماند. در این حالت، کار انجام شده در فرایند هم‌فشار برابر است با مساحت ناحیه هاشور خورده در نمودار $P-V$.

در فرایند هم‌دما، دمای گاز ثابت می‌ماند. در این حالت، تغییرات فشار و حجم به گونه‌ای انجام می‌گیرد که حاصل ضرب فشار در حجم ثابت بماند. در این حالت، کار انجام شده در فرایند هم‌دما برابر است با مساحت ناحیه هاشور خورده در نمودار $P-V$.



پاسخ تمرین ۴-۵

الف) بدیهی است که باید ترتیبی دهیم که حجم گاز داخل استوانه حاوی گازی که در تماس با یک منبع گرما با دمای ثابت است به گونه‌ای تدریجی و ایستوار افزایش یابد. پس کاهش تدریجی ساچمه‌های سربی می‌تواند روشی قابل قبول باشد؛ البته این کار را می‌توان با روش‌های متفاوتی انجام داد. مثلاً می‌توان به جای ساچمه‌های سربی از کیسه‌های شنی استفاده کرد که سوراخ کوچکی در آن ایجاد شده، به گونه‌ای که شن به آرامی از آن خارج می‌شود. در هر حال، با کاهش وزن روی پیستون و در نتیجه فشار گاز، پیستون به سمت بالا حرکت می‌کند و در نتیجه گاز منبسط می‌شود. نمودارهای $P-T$ و $V-T$ این فرایند به صورت زیر می‌شود:



در مورد علامت‌های Q و W توجه کنید چون گاز منبسط شده است، پس گاز (دستگاه) روی محیط کار (مثبت) انجام داده و بنابراین $W < 0$ است. چون فرایند هم‌دما است، برای گاز کامل که انرژی درونی آن فقط به دما بستگی دارد $\Delta U = 0$ است و بنابراین از قانون اول ترمودینامیک درمی‌یابیم $Q + W = 0$ و در نتیجه با توجه به اینکه $W < 0$ است، Q باید مثبت باشند. این نتیجه را می‌توانیم این طور توجیه کنیم که در واقع در هر مرحله کوچک از فرایند، بر اثر انبساط گاز، دمای گاز اندکی کاهش می‌یابد که این کاهش دما با گرفتن گرما از منبع جبران می‌شود.

پاسخ فعالیت ۲-۵

وقتی سرنگ حاوی هوا را در آب می‌اندازیم و مدتی صبر می‌کنیم، هوای درون سرنگ با آب هم‌دما می‌شود. از این به بعد، هوای درون سرنگ (به عنوان دستگاه) در تماس گرمایی با حجم بزرگ آب (به عنوان منبع گرما) است. دستگاه و منبع، دمای مساوی دارند. با فشردن کُند و آرام پیستون، فشار هوای درون سرنگ افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد. ولی از آنجا که هوای سرنگ (دستگاه) در تماس گرمایی با آب (منبع گرما) است و فرایند به‌کندی رخ می‌دهد، دمای دستگاه همان دمای منبع باقی می‌ماند، یعنی دما ثابت است و بنابراین یک انبساط هم‌دما داریم (در واقع توجه کنید که در هر مرحله کوچک این فرایند، دما در ابتدا کمی زیاد می‌شود، ولی این افزایش دما با دادن گرما به آب جبران می‌شود تا اینکه هوا دوباره با آب هم‌دما شود). هدف از این پاسخ فعالیت و پاسخ تمرین ۴-۵ آن است که به دانش‌آموزان گوشزد کند در فرایند هم‌دما، گاز با محیط تبادل گرما می‌کند بی‌آنکه دمایش تغییر کند. در واقع اهمیت فرایند هم‌دما در تبدیل کامل کار و گرما به یکدیگر است. وقتی محیط روی دستگاه کار انجام دهد، به همان اندازه کار، دستگاه به محیط گرما می‌دهد.



پاسخ تمرین ۵-۵

الف) با توجه به معادله حالت گاز کامل داریم

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

اگر طبق راهنمایی، خطی عمودی بر محور حجم رسم کنیم به‌گونه‌ای که هرچهار نمودار را قطع کند از رابطه بالا درمی‌یابیم که برای چهار نقطه تلاقی که در آنها nR/V (ضریب T) برابر است، فشار کمتر مربوط به دمای کمتر است. بنابراین، منحنی T_1 که خط عمود بر محور حجم را در جا (فشار) پایین‌تری قطع کرده است کمترین دما را دارد و منحنی T_4 که خط عمود بر محور

را در جا (فشار) بالاتری قطع کرده است، بیشترین دما را دارد و بدین ترتیب $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ است. البته می‌توانستیم مسئله را به ازای یک فشار معین نیز بررسی کنیم. در آن صورت، معادله حالت گاز کامل را به صورت زیر بنویسیم:

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

حال اگر خطی به محور فشار رسم کنیم؛ به‌گونه‌ای که هرچهار نمودار را قطع کند، از رابطه بالا درمی‌یابیم در مقایسه این چهار نقطه تقاطع، کمترین حجم مربوط به کمترین دما و بیشترین حجم مربوط به بیشترین دما است. بنابراین داریم:

$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$

از این پاسخ تمرین درمی‌یابیم که نمودارهای هم‌دما برای ما حکم یک دماسنج را دارند و با مشاهده آنها در مقایسه با یکدیگر می‌توان درباره دما اظهار نظر کرد و با مشاهده نمودار یک فرایند در زمینه آنها می‌توان درباره تغییر دمای گاز در مسیر آن فرایند اظهار نظر کرد. (ب) همان‌طور که اشاره کردیم، مقدار کار برابر مساحت زیر نمودار $P-V$ است. چون مساحت زیر منحنی T_1 از همه کمتر و مساحت زیر منحنی T_4 از همه بیشتر است، بنابراین داریم:

$$|W_4| > |W_3| > |W_2| > |W_1|$$

(توجه کنید که هرچهار نمودار، فرایندهای انبساطی را نشان می‌دهند و در آنها W منفی است.)



خوب است دبیران محترم، مبحث فرایند بی‌دررو را با این پرسش از دانش‌آموزان آغاز کنند که به نظر شما برای دستگاهی که مبادلهٔ گرما ندارد چگونه می‌توان تغییر حالت ایجاد کرد؟

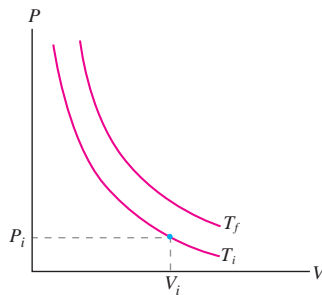
پاسخ فعالیت ۳-۵

وقتی در نوشابه باز می‌شود، گاز محبوس در بالای آن و نیز گاز کربن دی‌اکسید خارج‌شده از نوشابه انبساط می‌یابد. این انبساط چنان سریع صورت می‌گیرد که آن را می‌توان تقریباً بی‌دررو پنداشت. بنابراین انرژی لازم برای انبساط گاز صرفاً توسط انرژی درونی تأمین می‌شود که همان انرژی گرمایی خودِ گاز است. بنابراین، گاز انرژی گرمایی از دست می‌دهد و سردتر می‌شود که این باعث می‌گردد بخار آب موجود در گاز در حال انبساط به صورت قطرات آب درآید. این قطرات موجود در هوا، هالهٔ رقیقی را تشکیل می‌دهند که در اطراف دهانهٔ بطری دیده می‌شود. (توجه کنید اگر دمای مایع در نزدیک نقطهٔ انجماد باشد یخ زدن نوشابه نیز ممکن است رخ دهد. چرا که وقتی درِ بطری باز می‌شود، فشار داخل آن ناگهان تا فشار جو کاهش می‌یابد و این به بالا رفتن نقطهٔ انجماد مایع می‌انجامد. مایع که دمای آن اکنون زیر نقطهٔ انجماد جدید قرار دارد، شروع به یخ زدن می‌کند.)

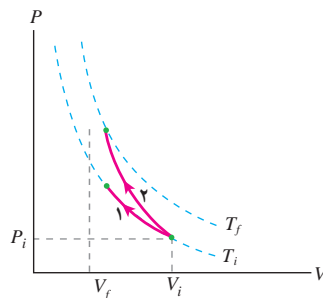
پاسخ تمرین ۵-۶

با توجه به رابطه ۵-۵ و با توجه به اینکه در تراکم، کار محیط روی گاز (دستگاه) مثبت است، نتیجه می‌گیریم $\Delta U > 0$ است. چون گاز، کامل (آرمانی) است افزایش انرژی درونی گاز با افزایش دمای آن همراه است؛ یعنی دمای گاز افزایش می‌یابد. این نتیجه از رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ نیز قابل مشاهده است.

چگونگی رسم منحنی‌های هم‌دما را در پاسخ تمرین ۵-۵ آموختیم و دریافتیم دمای بالاتر مربوط به خم (منحنی) بالاتر است؛ بنابراین نموداری مانند شکل زیر خواهیم داشت (در حل این پاسخ تمرین از نماد i و f به جای ۱ و ۲ کتاب استفاده کرده‌ایم.)



بدیهی است که در تراکم هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند و همواره $T = T_f$ است (مسیر ۱). ولی نشان دادیم که در تراکم هم‌دما، دمای گاز افزایش می‌یابد، پس گاز باید به دمای بالاتری مثل T_f برسد (مسیر ۲).



چون سطح زیر نمودار مربوط به تراکم بی‌دررو بیشتر است، $|W|$ برای این فرایند مقدار بیشتری دارد. (البته توجه کنید که در اینجا در هر دو فرایند هم‌دما و بی‌دررو تراکم رخ می‌دهد و بنابراین برای هر دو فرایند $W > 0$ است و می‌توانستیم از قدر مطلق استفاده نکنیم.)



فرایند بی‌درروی گاز کامل

می‌دانیم در فرایند بی‌دررو $Q = 0$ ، و قانون اول ترمودینامیک در شکل دیفرانسیلی به صورت زیر در می‌آید

$$dU = dW$$

بنابراین اگر گاز انبساط بی‌دررو بیابد، انرژی درونی کاهش می‌یابد و دمای آن کم می‌شود و برعکس در تراکم بی‌دررو، انرژی درونی و دما افزایش می‌یابد.

دانستن روابط بین حجم و فشار، یا حجم و دمای گاز، در فرایند بی‌دررو بسیار مفید است. می‌دانیم که رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ برای انرژی درونی گاز کامل در هر فرایند دلخواهی برقرار است. بنابراین داریم:

$$nC_V dT = -PdV$$

P را از معادله مشخصه گازهای کامل به صورت $P = nRT/V$ جای‌گذاری می‌کنیم. از آنجا پس از عملیات جبری ساده‌ای به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{dT}{T} = \left(\frac{R}{C_V} \right) \frac{dV}{V} = 0$$

با معرفی ضریب موسوم به ضریب اتمیسیته $\gamma = C_P/C_V$ می‌توانیم $\frac{R}{C_V}$ را چنین بنویسیم:

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_P - C_V}{C_V} = \frac{C_P}{C_V} - 1 = \gamma - 1$$

در نتیجه داریم:

$$\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0$$

در این رابطه dT و dV برای فرایند بی‌نهایت کوچک بی‌دررو به هم مربوط شده‌اند. با انتگرال‌گیری از طرفین این رابطه به ترتیب به نتایج زیر می‌رسیم:

$$\ln T + (\gamma - 1) \ln V = \text{ثابت}$$

$$\ln T + \ln V^{\gamma-1} = \text{ثابت}$$

$$\ln (TV^{\gamma-1}) = \text{ثابت}$$

و در نتیجه

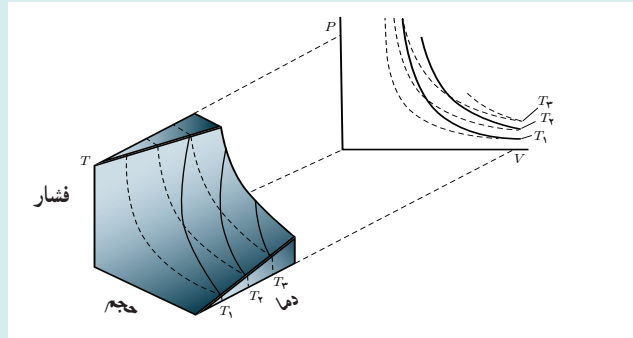
$$TV^{\gamma-1} = \text{ثابت}$$

و یا

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

توجه کنید که در این رابطه T باید برحسب کلین باشد.

در شکل صفحه بعد فرایندهای بی‌دررو با خط چین و فرایندهای هم‌دما با خطوط ضخیم نشان داده شده‌اند. از شکل درمی‌یابیم که شیب منحنی‌های هم‌دما کمتر از شیب منحنی‌های بی‌دررو است. یعنی اگر از راست به چپ، از یک منحنی بی‌دررو (در جهت تراکم) حرکت کنیم، این منحنی، منحنی‌های هم‌دما با دمای بیشتر از قبل را مرتباً قطع می‌کند که این نشان‌دهنده این واقعیت است که در تراکم بی‌دررو، دما افزایش می‌یابد.



هرگاه از رابطه گازهای کامل به صورت $T = PV/nR$ استفاده کنیم، به رابطه زیر خواهیم رسید :

$$\left(\frac{PV}{nR}\right) V^{\gamma-1} = \text{ثابت}$$

که چون n و R ثابت اند، می توان نوشت :

$$PV^{\gamma} = \text{ثابت}$$

و یا

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

در این فیلم، نمایشی از یک انبساط بی دررو را مشاهده می کنید.

فیلم

پاسخ پرسش ۲-۵

در اینجا برای هوای داخل سرنگ تراکمی بی دررو رخ می دهد، چرا که گفتیم هرگاه تغییر حجم گاز چنان به سرعت رخ دهد که گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نکند، آن فرایند تراکمی یا انبساطی، بی دررو است. در پاسخ تمرین ۵-۶ دیدیم که در یک تراکم بی دررو، دمای گاز کامل افزایش می یابد. بنابراین، در اینجا دمای هوای داخل سرنگ زیاد می شود و با توجه به اینکه نقطه اشتعال کاغذ نیتروسولوز بسیار پایین است، با اندک افزایش دمایی مشتعل می شود. البته این آزمایش را می توان با انواع دیگری از کاغذ نیز انجام داد ولی لازمه آن دقت فراوان در انجام آزمایش است، در حالی که با کاغذ نیتروسولوز، به سادگی می توان به نتیجه رسید.



در فیلم چگونه عمل یک سرنگ آتش زنه را که در واقع تراکمی بی دررو است، مشاهده می کنید.

فیلم

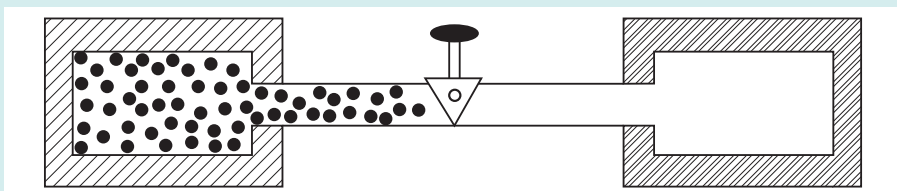
دانشتنی برای معلم

فرایند انبساط آزاد و تغییر دمای گاز

فرایند انبساط آزاد چنین تعریف می‌شود: «فرایندهای بی‌دررویی که در آنها هیچ کاری روی دستگاه یا به وسیله آن انجام نمی‌شود.» بنابراین $Q = W = 0$ است و آنگاه از قانون اول ترمودینامیک خواهیم داشت:

$$\Delta U = 0$$

شکل (۱) نشان می‌دهد که چگونه چنین انبساطی می‌تواند انجام گیرد. گازی که در تعادل گرمایی است، در آغاز به وسیله یک شیر بسته در یک نیمه اتاقک عایق‌بندی شده است؛ نیمه دیگر خلأ است. شیر به‌طور ناگهانی باز می‌شود و گاز با هجوم آوردن به نیمه اتاقک خالی، به‌طور آزاد برای پر کردن هر دو اتاقک منبسط می‌شود. به‌علت عایق‌بندی، هیچ گرمایی به گاز و یا از آن انتقال نمی‌یابد. چون گاز به خلأ وارد می‌شود، هیچ کاری به وسیله گاز انجام نمی‌گیرد و با انبساط آن توسط هیچ فشار ختنی‌کننده‌ای مخالفت نمی‌شود.



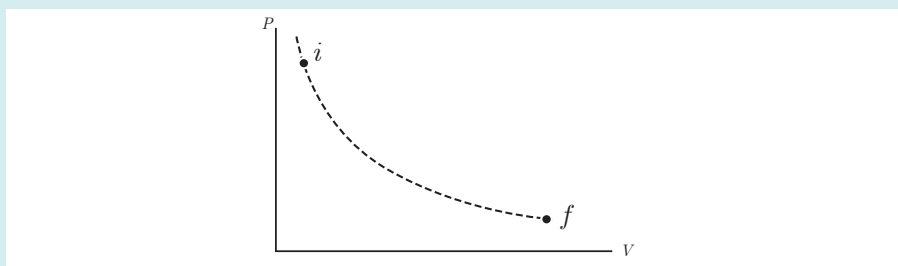
شکل ۱- گاز در یک نیمه اتاقک عایق‌بندی محصور است و با باز شدن شیر، به‌طور آزاد برای پر کردن هر دو اتاقک منبسط می‌شود.

همان‌طور که دیدیم در فرایند انبساط آزاد $\Delta U = 0$ می‌شود و در نتیجه نباید تغییر دمایی برای گاز کامل داشته باشیم. ولی از طرفی، چون فرایند انبساط آزاد فرایندی بی‌دررو است باید کاهش دما داشته باشیم. چرا که

$$T_f = T_i \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{\gamma-1}$$

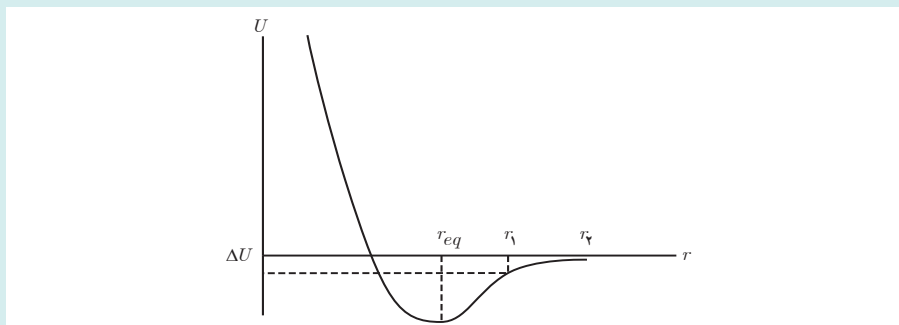
که در آن γ (ضریب اتمیسته) عددی بزرگ‌تر از یک و $V_f > V_i$ است و در نتیجه $T_f < T_i$ می‌شود.

این ناسازگاری از آنجا ناشی می‌شود که ما در ترمودینامیک فرایندهای اصطلاحاً ایستاوار را بررسی می‌کنیم که در آنها سرعت گاز خیلی کمتر از سرعت جنبش گرمایی مولکولی است. در حالی که در انبساط آزاد، به محض اینکه شیر را باز می‌کنیم گاز با سرعتی بیشتر از سرعت گرمایی مولکول‌ها به خلأ هجوم می‌برد. بنابراین در اینجا به کار بستن معادلهٔ بالا نادرست است و برای همین، این فرایند «غیر ایستاوار» را با خط‌چین نمایش می‌دهند. چرا که در هر لحظه ضمن انبساط ناگهانی، گاز در تعادل گرمایی نیست و فشار آن در همه‌جا یکسان نخواهد بود. بنابراین اگرچه حالت‌های اولیه و نهایی را می‌توان روی نمودار $P-V$ رسم کرد، ولی خود انبساط را نمی‌توان رسم کرد، و شکلی مانند شکل ۲ خواهیم داشت.



شکل ۲- نمودار $P-V$ برای یک فرایند انبساط آزاد

اگر گاز کامل نباشد، در این صورت مولکول‌ها با هم برهم کنش دارند و انرژی درونی گاز شامل انرژی جنبشی مولکول‌ها و انرژی پتانسیل برهم کنش آنهاست. نمودار انرژی پتانسیل برهم کنش دو مولکول برحسب فاصله r بین آنها مانند شکل ۳ می‌شود.



شکل ۳- نمودار انرژی پتانسیل برهم کنش بین دو مولکول برحسب فاصله آنها

اگر انرژی پتانسیل کمینه باشد (نقطه r_{eq})، ماده متراکم شده و به مایع تبدیل می‌شود. ولی چون ما در آغاز گاز داریم، بنابراین میانگین فاصله بین مولکول‌ها بزرگ‌تر از r_{eq} است و پس از برقراری دو برابر شدن حجم، میانگین فاصله بین مولکول‌ها به $r_1 = \sqrt[3]{2} r_0 > r_0$ می‌رسد. یعنی در حین انبساط آزاد، گاز در امتداد شیب چاه پتانسیل کمی به سمت بالا کشیده می‌شود. چه عاملی باعث افزایش انرژی پتانسیل به اندازه ΔU شده است؟ به نظر می‌رسد که این افزایش، ناشی از کاهش انرژی جنبشی مولکول‌هاست. پس دما که مقیاسی از انرژی جنبشی میانگین مولکول‌های گاز است، در حین انبساط آزاد کاهش می‌یابد.

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۵-۵

۱) گاز معینی در فشار $1/2 \text{ atm}$ و دمای 31°K حجمی برابر با $4/3 \text{ L}$ را اشغال می‌کند. این گاز به طوری در رو تا حجم $0/76 \text{ L}$ متراکم می‌شود و به فشار 14 atm می‌رسد. دمای نهایی گاز چقدر است؟
پاسخ: $6/2 \times 10^2 \text{ K}$

۲) در یک ماشین، $0/25$ مدل از یک گاز آرمانی تک اتمی در یک استوانه به سرعت انبساط می‌یابد و پیستونی را حرکت می‌دهد. در این فرایند، دمای گاز از 115°K به 40°K کاهش می‌یابد. گاز چقدر کار انجام داده است؟
پاسخ: 2300 J

۳) گرمای تبخیر آب در نقطه جوش $2/26 \times 10^3 \text{ J/g}$ است. اگر $1/00 \text{ g}$ (یا $1/00 \text{ cm}^3$) آب بر اثر جوشیدن در فشار جو متعارف $(1/01 \times 10^5 \text{ Pa})$ به $1/67 \times 10^2 \text{ cm}^3$ 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 :

$$W = -P\Delta V = -(1/0.1 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1/67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1/0.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = -1/69 \times 10^2 \text{ J}$$

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

$$Q = +mL_V = (1/0.0 \text{ g})(2/26 \times 10^3 \text{ J/g}) = 2/26 \times 10^3 \text{ J}$$

اینک با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$\Delta U = Q + W = 2/26 \times 10^3 \text{ J} + (-1/69 \times 10^2 \text{ J}) = 2/09 \times 10^3 \text{ J}$$

۴ 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 :

$$\left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{بی‌دررو}} = \left(\frac{P_2}{T_2} \right)_{\text{هم‌دما}} \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{285 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.95$$

ب) برای گاز آرمانی در فرایند بی‌دررو $W = nC_V \Delta T$ است. بنابراین،

$$W_{\text{بی‌دررو}} = nC_V \Delta T = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = (5/0 \text{ mol}) \left(\frac{3}{2} \times 8/314 \text{ J/mol.K} \right) (-15 \text{ K}) = -935 \text{ J}$$

پرسش‌های پیشنهادی بخش ۵-۵

۱ چرا هنگام باد کردن لاستیک دوچرخه، پمپ گرم می‌شود؟

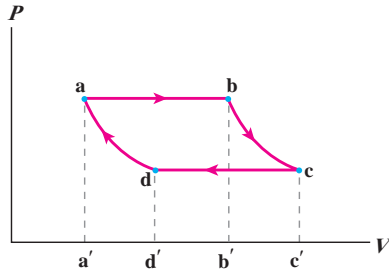
(راهنمایی : هوا چنان سریع گرم می‌شود که می‌توان از تبادل گرما با محیط چشم‌پوشی کرد.)

۲ چرا اگر با دهان باز نفس خود را بیرون بدهید، دست شما هوای گرمی را حس می‌کند در حالی که اگر دهان خود را به گونه‌ای

ببندید که هنگام سوت زدن انجام می‌دهید، دست شما هوای سردی را حس می‌کند؟

پاسخ فعالیت ۴-۵

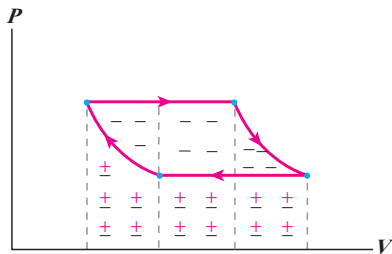
برای آنکه منظور مشخص شود، محل‌های تقاطع خط‌چین‌های عمودی با محور V را به ترتیب با a' ، b' ، c' و d' نمایش می‌دهیم:



بنابراین، قدرمطلق کار انجام شده در فرایند da برابر مساحت محصور در سطح $a'd'a$ ، قدرمطلق کار انجام شده در فرایند ab برابر مساحت محصور در سطح $abb'a'$ و قدرمطلق کار انجام شده در فرایند bc برابر مساحت محصور در سطح $bcc'b'$ و قدرمطلق کار انجام شده در فرایند cd برابر مساحت محصور در سطح $dcc'd'$ است. اما علامت‌های کار (محیط روی دستگاه) با توجه به اینکه در فرایندهای da و cd از حجم کاسته شده است، مثبت و در فرایندهای ab و bc که به حجم افزوده شده است، منفی است.

(ب) کار انجام شده در چرخه برابر جمع جبری کارهای انجام شده در هر چهار فرایند است. اگر مساحت‌ها و علامت‌های کار را که در قسمت (الف) بررسی کردیم لحاظ کنیم، در می‌یابیم کار محیط در این چرخه برابر با مساحت محصور در داخل چرخه است و بنابراین مقدار کار برابر مساحت داخل چرخه می‌شود.

(پ) بنا به توضیح قسمت (ب) کار کل انجام شده روی دستگاه در این چرخه، منفی است. به عبارت دیگر، شکلی مانند شکل زیر داریم که همان‌طور که مشاهده می‌کنیم در آن علامت منفی غالب شده است.



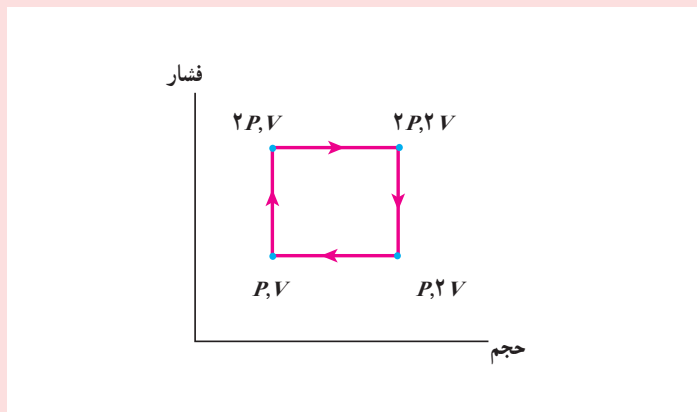
۴-۵-۶ چرخه ترمودینامیکی

خوب است پس از توصیف فرایند چرخه‌ای، از دانش‌آموزان بخواهیم چرخه‌هایی با شکل‌های دلخواه بکشند که در هر یک از آنها چند فرایند خاص استفاده شده باشد.

در این مورد خوب است اشاره شود که حفظ کردن علامت W برای چرخه‌ها چندان ضروری نیست و می‌توان در هر مورد به روشی که در توضیح پاسخ فعالیت ۴-۵ آمده است، با کمی تأمل، علامت W را فهمید.

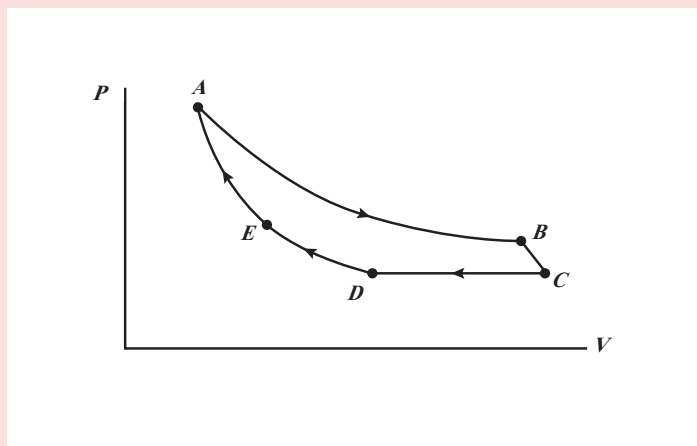
تمرین‌های پیشنهادی بخش ۵-۶

۱ یک گاز کامل تک اتمی چرخه نشان داده شده در نمودار $P-V$ ی شکل زیر را انجام می‌دهد. کار انجام شده توسط گاز و گرمای مبادله شده در طی این چرخه چقدر است؟



پاسخ: PV

۲ شکل زیر چرخه‌ای شامل ۵ مسیر را نشان می‌دهد. هم‌دما AB در $۳۰^\circ K$ ، بی‌دررو با کاری برابر $۵ J$ در CD در فشار ثابت $۵ atm$ ، هم‌دما، EA بی‌دررو با تغییر انرژی درونی $۸ J$. تغییر در انرژی درونی گاز در مسیر CD چقدر است؟



پاسخ: $۳ J$

در مورد ماشین بخار وات خوب است بدانید بازده ماشین بخاری که وات ساخت در حدود ۱٪ بود در حالی که بازده توربین های بخاری امروزی در حدود ۴۰٪ است.

۷-۵- ماشین های گرمایی

خوب است برای شروع بحث ماشین های برون سوز، دانش آموزان را ترغیب به انجام یا مشاهده فعالیت های ساده ای، از جمله ساختن یک توربین ساده بخار بکنید. به این ترتیب که پره چرخان (فرفره ای) را که بر محوری سوار است، مطابق شکل، رویه روی لوله یک کتری در حال جوشیدن قرار دهند. محور که با نخ به گیره کوچکی متصل است، با چرخش پره، گیره را بالا می کشد. به عبارتی، بخشی از گرمای حاصل از اجاق به انجام کار بلند کردن گیره می انجامد و بقیه گرمای بی آنکه به کاری بینجامد، به هوای اتاق وارد می شود.



ماشین بخار



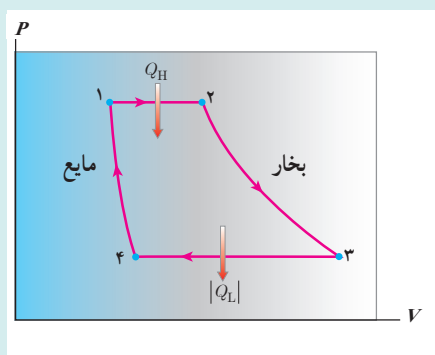
شکل ۱- بخش‌های اصلی ماشین بخار عبارت‌اند از: دیگ بخار، اتاقک انبساط، چگالنده، تلمبه، شیرهای ورودی و خروجی و لوله‌های رابط.

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

برای بررسی نحوه کار ماشین بخار، مقدار مشخصی از آب درون دیگ بخار را به‌عنوان دستگاه ترمودینامیکی در نظر می‌گیریم، و فرایندهایی را که این آب در ماشین بخار طی می‌کند با اندکی ساده‌سازی توضیح می‌دهیم. شکل ۲ این فرایندها را به‌طور تقریبی نشان می‌دهد. تمام این فرایندها ایستاوار فرض شده‌اند.

الف) مرحله اول (از ۱ تا ۲): در این مرحله آب، درون دیگ بخار در فشار ثابت و نسبتاً زیاد است کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

ب) مرحله دوم (از ۲ تا ۳): شیر ورودی باز می‌شود و بخار آب که دما و فشار آب بسیار زیاد است، وارد اتاقک انبساط می‌شود؛ به پیستون نیرو وارد می‌کند و آن را به حرکت در می‌آورد. در نتیجه این حرکت، بخار آب به‌سرعت منبسط می‌شود و دما و فشار آن کاهش می‌یابد. چون این انبساط بسیار سریع انجام می‌شود، این فرایند را می‌توان بی‌دررو در نظر گرفت. این حرکت پیستون برای به‌کار انداختن مولد برق، به حرکت درآوردن چرخ‌های لکوموتیو و... مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲- نمودار ساده شده چرخه ماشین بخار در صفحه $P-V$ (چرخه رانکین). توجه کنید که تمام فرایندها در این چرخه، ایستاوار فرض شده‌اند.

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

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

پاسخ فعالیت ۵-۵

در نیروگاه‌های حرارتی، انرژی گرمایی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. اساس کار کلیه نیروگاه‌های حرارتی گرم کردن آب، تبدیل آن به بخار آب و در پی آن چرخاندن یک توربین بخار است که یک مولد (ژنراتور) را به‌راه می‌اندازد. بخار پس از عبور از توربین، در یک چگالنده چگالیده شده و به آب تبدیل می‌گردد. سپس این آب به دیگ بخار برگردانده می‌شود و در آنجا به بخار داغ پُرفشار تبدیل گردیده و مجدداً به طرف توربین می‌رود و این چرخه دوباره تکرار می‌گردد که در واقع همان چرخهٔ رانکین ماشین‌های بخار است. منبع انرژی یک نیروگاه که از ساز و کار ماشین بخار استفاده می‌کند می‌تواند متفاوت باشد که البته سوخت‌های فسیلی غالب هستند، گرچه از انرژی هسته‌ای، انرژی زمین‌گرمایی (ژئوترمال)، و انرژی خورشیدی نیز استفاده می‌شود.



در این فیلم، یک ماشین گرمایی ساده را که براساس اختلاف دما کار می‌کند، مشاهده می‌کنید.



فیلم

پاسخ فعالیت ۶-۵

شاید قایق بوت پوت ساده‌ترین ماشین بخاری باشد که تا به حال دیده‌اید. این ماشین، سیلندر، پیستون، میل لنگ، سوپاپ‌های ورود و خروج بخار و ... ندارد ولی در آن چرخه‌ای مشابه چرخهٔ ماشین بخار رخ می‌دهد و این چرخه کار مکانیکی موردنیاز برای به حرکت درآوردن قایق در یک استخر یا حوض آب را تأمین می‌کند.

می‌توانید برای ساختن این قایق از یک بطری پلاستیکی استفاده کنید. بطری را مطابق شکل طوری از وسط نصف کنید که هر نیمهٔ آن شبیه یک قایق کوچک باشد. یک لولهٔ مسی به قطر تقریباً ۳ mm و طول تقریباً ۷ cm (بسته به بزرگی و کوچکی قایق) تهیه و آن را مطابق شکل خم کنید (این نوع لوله را می‌توانید از تعمیرگاه‌های یخچال بخرید). برای درست کردن بخش پیچیده‌ای شکل خم این لوله، می‌توانید لوله را دور یک میله بیجانید. دو سوراخ کوچک در انتهای قایق ایجاد کنید و دو سر لولهٔ مسی را مطابق شکل از این دو سوراخ عبور دهید. دقت کنید سوراخ‌ها خیلی کوچک باشند طوری که وقتی دو سر لولهٔ مسی را از آنها عبور می‌دهید، سوراخ‌ها به خوبی مسدود شوند و وقتی قایق روی آب قرار می‌گیرد، آب از کناره‌های این سوراخ‌ها وارد قایق نشود. یک شمع تزیینی که درون استوانه آلومینیمی کوچکی قرار دارد را مطابق شکل، زیر قسمت پیچیده مانند لولهٔ مسی قرار دهید، طوری که وقتی شمع روشن شد پیچیه را داغ کند. لولهٔ مسی را کاملاً از آب پر کنید. به این منظور می‌توانید یک سر لوله را درون آب قرار دهید و از سر دیگر لوله، هوای درون لوله را بکشید. با مکیدن هوای درون لوله، آب کل لوله را پر می‌کند. دو انتهای لوله را با انگشتانتان بگیرید و قایق را طوری در آب قرار دهید که دو انتهای لوله کاملاً درون آب باشد. اکنون شمع را روشن کنید.



مدتی طول می کشد تا آب داخل بخش پیچ‌ای شکل لوله به اندازه کافی داغ و بخار شود. حالا قایق به راه می افتد. با نگاه دقیق به حرکت قایق، مشاهده امواج آب که در محل دو انتهای لوله مسی تشکیل می شود، گوش دادن به صدای قایق و ... متوجه می شوید که حرکت قایق به صورت بُریده بُریده و منقطع انجام می شود. در واقع در هر ثانیه، چند ضربه به قایق زده می شود و با هر ضربه قایق کمی به جلو می جهد. اگر انگشتتان را پشت دو انتهای لوله و درون آب قرار دهید و البته با این کار مزاحم حرکت قایق نشوید، این ضربه‌ها را احساس خواهید کرد.

ولی این قایق چگونه کار می کند؟



وقتی آب داخل قسمت پیچ‌ای شکل لوله داغ و بخار می شود، این بخار پُرفشار، آب درون دو ساق لوله را از دو انتهای لوله، به سرعت و با فشار زیاد، به صورت دو جتِ آب به بیرون می راند. عکس‌العمل نیرویی که بخار پُرفشار به این دو جتِ آب وارد می کند، باعث جهش رو به جلوی قایق می شود. وقتی بخار داغ منبسط می شود، کمی سرد می گردد (انبساط سریع و بی دررو)، به علاوه اینکه بخار وارد بخش سرد لوله مسی، یعنی دو ساق متصل به پیچ شده است. بخار در این بخش سرد، چگالیده و کم فشار می گردد. در واقع این بخش از لوله مسی شبیه چگالنده عمل می کند. چگالش بخار و کاهش فشار درون لوله سبب می شود آب از دو انتهای لوله به درون لوله مکیده شود. دوباره آب حاصل از چگالش بخار، وارد پیچ داغ می شود، تبدیل به بخار داغ و پرفشار می گردد و همه ماجرا از نو تکرار می گردد. هنگام مکش آب از دو انتهای لوله به داخل لوله، نیروی کوچکی در خلاف جهت حرکت قایق به قایق وارد می شود ولی این نیرو به مراتب کوچک‌تر از نیروی پیشران قایق است که در مرحله انبساط بخار درون پیچ و خروج جت‌های آب از دو انتهای لوله به قایق وارد می شود، لذا حرکت کلی قایق رو به جلو باقی می ماند. در واقع مکش آب از دو انتهای لوله به درون آن، به صورت جتِ آب نیست و به آرامی رُخ می دهد. در مورد این قایق دو فیلم در سایت گروه قرار داده شده است.

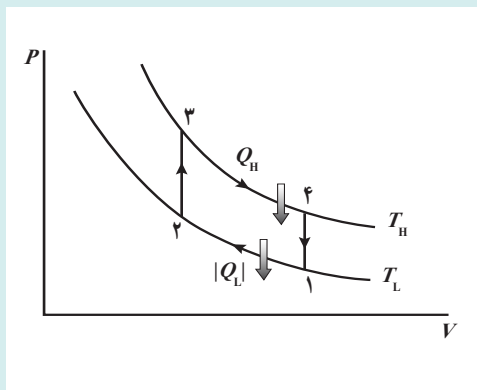
در این فیلم، ساختار و چگونگی کار قایق بوت بوت را مشاهده می کنید.



در این فیلم، چگونگی حرکت قایق بوت بوت را مشاهده می کنید.



ماشین استرلینگ



ماشین استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی (۱۱۹۵ ه. ش) توسط رابرت استرلینگ اسکاتلندی اختراع شد. این ماشین که مدت‌ها به فراموشی سپرده شده بود، امروزه برای استفاده در خودروها، فضاییماها و زیردریایی‌ها توسعه یافته است.

نمودار $P-V$ برای ماده کاری یک ماشین استرلینگ آرمانی در شکل روبه‌رو رسم شده است. در مقایسه با چرخه کارنو در می‌بایم که هر دوی این ماشین‌ها دارای انتقال گرمایی هم‌دما در دماهای T_L و T_H هستند، اما دو فرایند هم‌دما چرخه ماشین استرلینگ نه با فرایندهای بی‌دررو، بلکه با فرایندهای هم‌حجمی به هم متصل شده‌اند.

مراحل عمل یک ماشین استرلینگ آرمانی به این ترتیب است که دو پیستون، یکی پیستون انبساط در سمت چپ و دیگری پیستون تراکم در سمت راست به یک میله‌گردان (شفت) متصل‌اند. وقتی میله‌گردان می‌چرخد، این پیستون‌ها در فاز مخالف حرکت می‌کنند. فضای بین دو پیستون با گاز، که معمولاً هیدروژن یا هلیوم است، پر شده است و قسمت چپ این فضا به یک منبع دما بالا (سوخت در حال احتراق) وصل است، در حالی که سمت چپ آن در تماس با یک منبع دما پایین (جو) است. بین دو بخش گاز دستگاهی موسوم به بازمولد (regenerator) قرار دارد، که از یک بسته پشم فولاد^۱ و یا مواد دیگری که رسانش گرمایی بسیار پایینی دارند، تشکیل شده است، به طوری که می‌توانند اختلاف دمای بین دو انتهای گرم و سرد را، بدون رسانش گرمایی قابل ملاحظه‌ای حفظ کنند. مراحل چرخه استرلینگ به ترتیب زیر است:

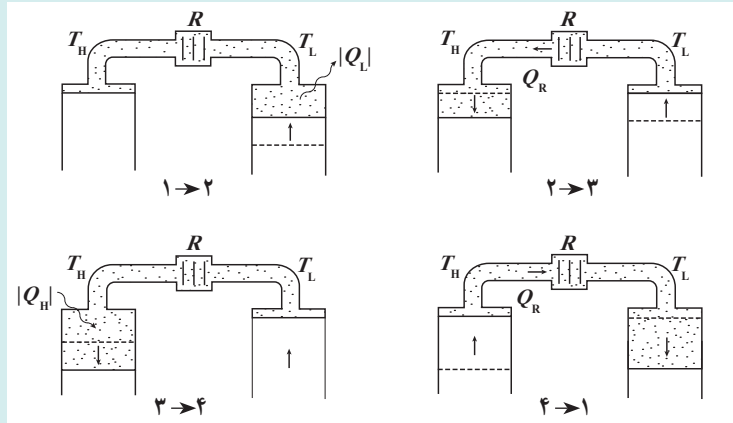
۱→۲ هنگامی که پیستون سمت چپ در بالا قرار می‌گیرد، پیستون سمت راست تا نیمه‌راه بالا می‌رود و گاز سرد را که در تماس با منبع سرد است، متراکم می‌کند و بنابراین باعث خروج گرمای $|Q_L|$ می‌شود. این تراکم تقریباً هم‌دما در دمای T_L است.

۲→۳ پیستون سمت چپ به پایین و پیستون سمت راست به بالا می‌رود، به طوری که هیچ‌گونه تغییر در حجم ایجاد نمی‌شود، اما گاز از طریق بازمولد از قسمت سرد به قسمت گرم رانده می‌شود و وارد قسمت چپ می‌شود که در دمای بالاتر T_H قرار دارد. برای انجام این کار، بازمولد گرمای Q_R را به گاز می‌دهد. توجه کنید که فرایند ۲→۳ در حجم ثابت رخ می‌دهد.

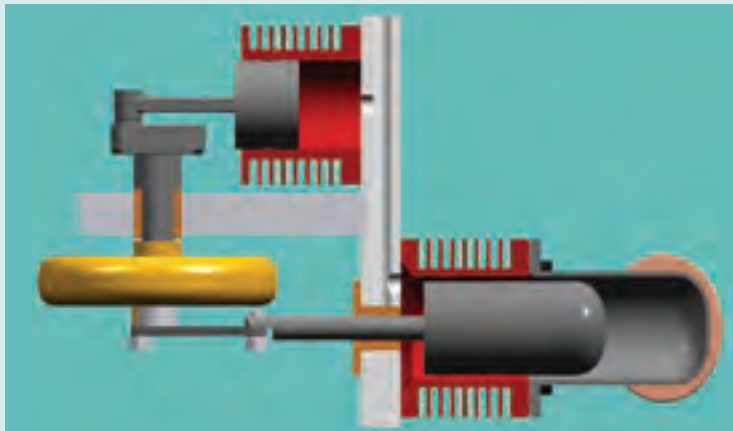
۳→۴ اکنون در حالی که پیستون سمت چپ به منبع دما بالا وصل است به حرکت خود به سوی پایین ادامه می‌دهد، پیستون سمت راست ساکن باقی می‌ماند و باعث می‌شود که گاز دستخوش یک انبساط تقریباً هم‌دما شود که در طی آن گرمای Q_H در دمای T_H جذب می‌شود.

^۱ metal sponge

۴→۱ هر دو پیستون در جهت مخالف یکدیگر حرکت می کنند. بنابراین، گاز را از طریق باز مولد از طرف گرم به طرف سرد می رانند و تقریباً همان مقدار گرمای Q_R را که در فرایند ۲→۳ جذب شده بود به باز مولد پس می دهد. این فرایند عملاً در حجم ثابت رخ می دهد. شکل زیر، طرحی از چهار مرحله چرخه استرلینگ را نشان می دهد.



نتیجه خالص این چرخه، جذب گرمای Q_H در دمای بالاتر T_H و پس دادن گرمای $|Q_L|$ در دمای پایین تر T_L و تحویل دادن کار $|W| = Q_H - |Q_L|$ به محیط است. در این چرخه هیچ انتقال گرمای خالصی در دو فرایند هم حجم رخ نمی دهد. شکل زیر، تصویری از یک فاز مرحله های چرخه یک ماشین استرلینگ را نشان می دهد.



در این فیلم، نمایشی از چگونگی کار یک ماشین استرلینگ را مشاهده می کنید.



خوب است دوباره اشاره شود که برای بررسی ساده و تطبیق طرز کار ماشین‌های درون‌سوز با چرخه‌های ترمودینامیکی فرض می‌شود که در مرحله آتش گرفتن، مخلوط آتش نگیرد ولی آنقدر گرم‌تر به آن داده شود که فشار و دمای نهایی آن به پایان مرحله آتش گرفتن برسد و در مرحله تخلیه نیز فرض می‌شود که هوا در داخل استوانه باقی بماند ولی آنقدر گرم‌تر از دست بدهد که به وضعیت اولیه برسد.

The diagram illustrates the four stages of an internal combustion engine cycle: 1. Compression (1-2), 2. Combustion (2-3), 3. Expansion (3-4), and 4. Exhaust (4-1). The graph shows the pressure (P) versus volume (V) for each stage, with the combustion stage (2-3) showing a sharp increase in pressure and temperature.

در چرخه اتو فرایندهای هم‌فشار ۱→۵ و ۵→۱، با فرایند هم‌فشاری که در شروع این فصل بررسی شد متفاوت است. در فرایند ۱→۵، دما ثابت است، گرمایی داد و ستد نمی‌شود و تعداد مول گاز از صفر تا مقدار معینی افزایش می‌یابد. در فرایند ۵→۱، دما ثابت است، گرمایی داد و ستد نمی‌شود، و تعداد مول گاز کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد. دقت کنید که در چرخه اتو، کمیت حجم، صفر است نه V .

The diagram shows a Rankine cycle with components: boiler, turbine, condenser, and pump. The graph plots pressure (P) against enthalpy (h) for the cycle, showing the phase changes of the working fluid (water/steam) as it moves through the cycle.

در تمام وسایل تبدیل انرژی یک وجه مشترک وجود دارد و آن این است که همه انرژی داده شده به وسیله، به نوع مطلوب تبدیل نمی‌شود، ولی در تمام آنها، پایداری انرژی برقرار است. آنچه مهم است بازده است. از دانش آموزان بپرسید آیا ممکن است ماشینی طراحی کرد که بازده آن به ۱۰۰٪ برسد؟

خوب است دوباره اشاره شود در حالی که رابطه $\eta = |W|/Q_H$ برای همه ماشین‌ها (چه آرمانی و چه غیر آرمانی) برقرار است، ولی رابطه $\eta = 1 - |Q_L|/Q_H$ فقط برای ماشین‌های آرمانی به کار برده می‌شود.

تمرین پیشنهادی بخش ۵-۷

بازدهٔ موتور اتومبیلی ۲۰٪ است و در هر ثانیه به طور متوسط $J 23000$ کار مکانیکی انجام می‌دهد. در هر ثانیه الف) چقدر گرما لازم است به موتور داده شود؟ ب) چقدر گرما از موتور تلف می‌شود؟
پاسخ:

الف) $Q_H = 115 \text{ kJ}$ ب) $Q_L = 92 \text{ kJ}$



توجه داده شود که ماشین‌های گرمایی به دو منبع با دماهای متفاوت و نه لزوماً سرد و گرم نیاز دارند.

۵-۸- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)
خوب است اشاره شود که قانون دوم کاملاً مستقل از قانون اول است. مثلاً، با اینکه یک ماشین با گرفتن گرما از هوا و تبدیل کامل آن به کار، قانون اول را نقض نمی‌کند، ولی این امر با قانون دوم ناسازگار است.

اغلب دانش‌آموزان تصور می‌کنند که این ناتوانی بشر است که مانع از ساختن ماشین با بازده ۱۰۰٪ می‌شود. باید این خطای رایج، در بحث و تبادل با دانش‌آموزان گوشزد شود.



همچنین خوب است دانش‌آموزان را به کوشش‌های تاریخی در ساختن ماشین‌های محرک دائمی که همگی خیال یا نیرنگی بیش نبودند، توجه داد.

اثبات اینکه بازده ماشین گرمایی کارنو بیشترین است

فرض کنید یک ماشین گرمایی با بازده بیشتر از ماشین گرمایی کارنو وجود دارد. این ماشین فرضی را به یک یخچال کارنو متصل می‌کنیم. ماشین فرضی را طوری تنظیم می‌کنیم که همان گرمایی را که یخچال از منبع دمایی می‌گیرد، ماشین فرضی به چشمه‌ی دما پایین بدهد. برای ماشین فرضی داریم

$$\eta' = \frac{|W'|}{Q'_H} = \frac{Q'_H - |Q_L|}{Q'_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q'_H}$$

و برای یخچال کارنو که وارونه‌ی ماشین کارنو است، داریم

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_L|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H}$$

بنا به فرض، بازده ماشین فرضی بیشتر از بازده ماشین کارنو است ($\eta' > \eta$). بنابراین

$$\frac{|Q_L|}{Q_H} > \frac{|Q_L|}{Q'_H} \Rightarrow Q'_H > Q_H$$

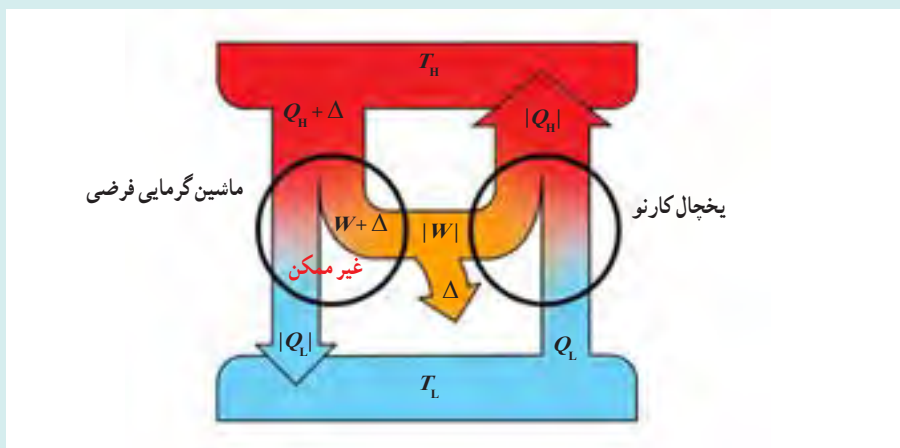
از این رابطه می‌توان دریافت که ماشین فرضی با بازده بیشتر، بیش از ماشین کارنو از منبع دما – بالا گرما دریافت کرده است. چون $|Q_L|$ در هر دو ماشین یکسان است، با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$Q'_H = |Q_L| + |W'|$$

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

$$\Rightarrow |W'| > |W|$$

بنابراین عملکرد مجموع یخچال کارنو و ماشین فرضی، آن است که مقدار خالص گرمای $Q'_H - Q_H$ گرما از چشمه‌ی دما – بالا دریافت و تماماً به معادل $|W'| - |W|$ کار تبدیل شده است. از آنجا که این عملکرد با قانون دوم ناسازگار است، چنین ماشینی وجود ندارد.



تمرین پیشنهادی بخش ۵-۸

یک ماشین کارنو که دمای منبع دما پایین آن 17°C است، بازدهی برابر 40% دارد. دمای منبع دما بالای آن باید چقدر افزایش یابد تا بازده ماشین 50% شود؟
پاسخ: 97K

پرسش پیشنهادی بخش ۵-۸

مخترعی ادعا می کند ماشینی ساخته است که در هر ثانیه گرمای ورودی به آن در دمای 435K برابر 9kJ و گرمای خروجی از آن در دمای 285K برابر 4kJ است. آیا این ادعا درست است؟
پاسخ: خیر. بازده ماشین پیشنهادی 56% می شود، در حالی که بازده کارنو برای این ماشین 34% است.

۹-۵- قانون دوم ترمودینامیک و یخچال ها

خوب است دوباره اشاره شود قانون دوم مستقل از قانون اول است و مثلاً در اینجا انتقال خود به خودی گرما از جسم سرد به جسم گرم، قانون اول را نقض نمی کند ولی با قانون دوم ناسازگار است.

خوب است توجه دانش آموزان را با این مثال آشنا از یخچال خانگی به موضوع جلب کنیم که یخچال با انجام کار، گرما را از محفظه یخچال که سردتر است به محیط گرم تر بیرون انتقال می دهد و با خاموش شدن موتور یخچال، فرایند خود به خودی انتقال گرما از محیط گرم به محیط سرد رخ می دهد و پس از مدتی دمای داخل و بیرون یکسان می شود.



خوب است دوباره اشاره شود، در حالی که رابطه $K=Q_L/W$ برای همه یخچال‌ها (چه آرمانی و چه غیر آرمانی) برقرار است، ولی رابطه $k=Q_L/(|Q_H|-Q_L)$ فقط برای ماشین‌های آرمانی به کار برده می‌شود.



دانستنی برای معلم

هم ارزی قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی (بیان کلین - پلانک) و قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی (بیان کلاسیوس)

در درس با دو بیان قانون دوم ترمودینامیک آشنا شدیم:

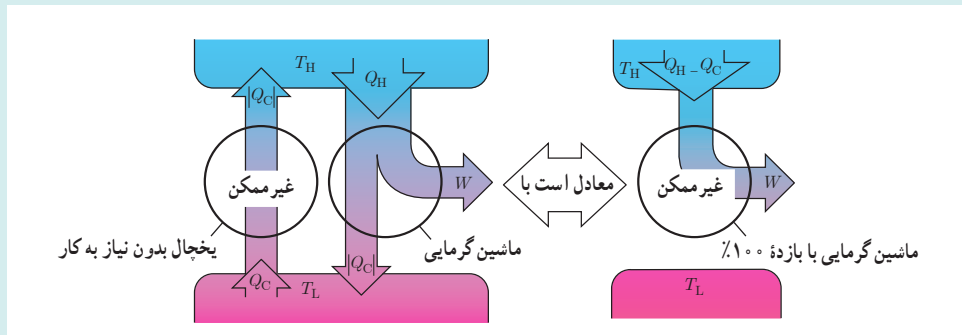
■ بیان ماشین گرمایی قانون دوم ترمودینامیک: ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بپیماید که در طی آن مقداری گرما را از منبع دما بالا جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند.

■ بیان یخچالی قانون دوم ترمودینامیک: ممکن نیست گرما به طور خود به خود از جسم با دمای پایین‌تر به جسم با دمای بالاتر منتقل شود.

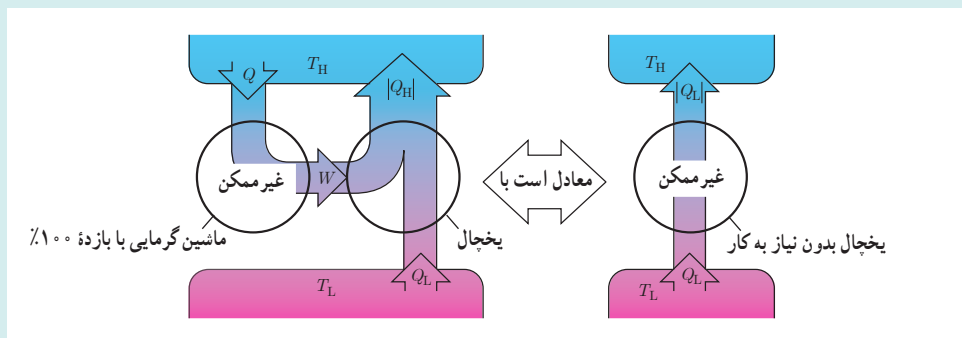
در نگاه اول ممکن است چنین به نظر برسد که این دو بیان ربطی به یکدیگر ندارند. در حالی که در واقع، هر دو بیان معادل یکدیگرند. مثلاً اگر بتوان یخچالی ساخت که بدون احتیاج به کار مکانیکی کار کند مخالف بیان دوم است. اگر این یخچال با ماشین گرمایی ترکیب شود که به همان منبع‌های دما-پایین و دما-بالای یخچال متصل باشد و همان مقدار گرمای دریافتی یخچال از منبع دما-پایین را به آن بازگرداند، مجموعه‌ی مرکب این یخچال و ماشین (شکل الف) به منزله‌ی ماشین گرمایی است که گرما را از یک منبع دریافت کرده و تمام آن را به کار تبدیل می‌کند. یعنی، با بیان قانون دوم مبتنی بر ماشین گرمایی در تناقض است.

اکنون فرض کنید ماشینی با بازده گرمایی صددرصد وجود دارد که این در تناقض با بیان قانون دوم ترمودینامیک مبتنی بر ماشین گرمایی است. هرگاه با کار حاصل از چنین ماشینی، یخچالی را به کار اندازند، که به همان دو منبع دما-پایین و دما-بالا متصل باشد (شکل ب)، مجموعه‌ی هر دو معادل یخچالی است که بدون احتیاج به کار، گرما را از منبع دما-پایین به منبع دما-بالا منتقل می‌کند،

یعنی با بیان یخچالی قانون دوم ترمودینامیک در تناقض است. پس هر اسبابی که عمل آن با یکی از بیان‌های قانون دوم در تناقض باشد، با بیان دیگری نیز متناقض است.



الف) اگر یخچال بدون نیاز به کار و وجود داشته باشد، در ترکیب با یک ماشین گرمایی معمولی، ماشینی با بازده ۱۰۰٪ را ایجاد می‌کند.

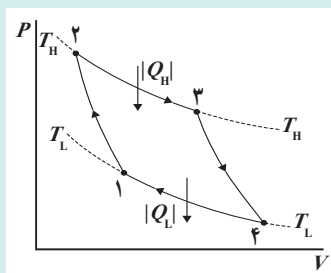


ب) اگر ماشینی گرمایی با بازده ۱۰۰٪ وجود داشته باشد، در ترکیب با یک یخچال معمولی، یخچالی بدون نیاز به کار را ایجاد می‌کند.

دانستنی برای معلم

اثبات رابطه (۵-۱۰)؛ بازده ماشین کارنو و رابطه (۵-۱۴)؛ ضریب عملکرد یخچال کارنو

برای اثبات رابطه بازده ماشین کارنو باید به معرفی چرخه کارنو بپردازیم. مراحل عمل چرخه کارنو از این قرارند:



۱ گاز در دمای T_H انبساط هم‌دما یافته و گرمای Q_H را می‌گیرد.

۲ به‌طور بی‌دررو انبساط می‌یابد تا دمای آن به T_L افت کند.

۳ در دمای T_L متراکم هم‌دما می‌یابد و گرمای Q_L را به منبع دما - پایین می‌دهد.

۴ به‌طور بی‌دررو متراکم می‌شود و به وضعیت اول بازگردد.

این مراحل در شکل روبه‌رو رسم شده است:

به منظور محاسبه بازده نیاز داریم به محاسبه کار در فرایندهای هم‌دما برای گاز کامل بیردازیم که قرینه گرمای مبادله شده در این فرایندها نیز هست. به این منظور از رابطه $P = nRT/V$ برای گازهای کامل استفاده می‌کنیم و آن را در رابطه کار ترمودینامیکی قرار می‌دهیم. برای کار (محیط) داریم

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

هرگاه دستگاه انبساط یافته باشد ($V_2 > V_1$).

بنابراین گرماهای مبادله شده برابرند با

$$Q_H = nRT_H \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_L = nRT_L \ln \frac{V_2}{V_1}$$

در نتیجه

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} \frac{(\ln V_2 / V_1)}{(\ln V_2 / V_1)}$$

اگر از رابطه بین دما و حجم در فرایند بی‌دررو استفاده کنیم، این نسبت ساده‌تر می‌شود:

$$T_L V_1^{\gamma-1} = T_H V_2^{\gamma-1}$$

$$T_L V_2^{\gamma-1} = T_H V_1^{\gamma-1}$$

که با جای‌گذاری در رابطه بالا به رابطه روبه‌رو می‌انجامد

$$\frac{Q_L}{Q_H} = -\frac{T_L}{T_H}$$

و از آنجا بازده چرخه کارنو چنین می‌شود:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

به دلیل برگشت‌پذیر بودن فرایندهای چرخه کارنو می‌توان همه چرخه را در جهت معکوس به انجام رسانید. در نتیجه، ماشین به یخچال تبدیل می‌شود. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} K &= \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} = \frac{Q_L / |Q_H|}{1 - Q_L / |Q_H|} \\ &= \frac{T_L / T_H}{1 - T_L / T_H} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \end{aligned}$$



دلیل گرم شدن گاز، تراکم بی درروی آن بر اثر حرکت سریع کمپرسور است که آن را می توان با لمس کردن لوله های پشت یخچال، در اطراف کمپرسور حس کرد.

هر مایعی در فرایند خفقانشی سرد نمی شود. برای فهم دقیق تر این پدیده، دانستنی مربوط به فرایند خفقانشی را مطالعه کنید.

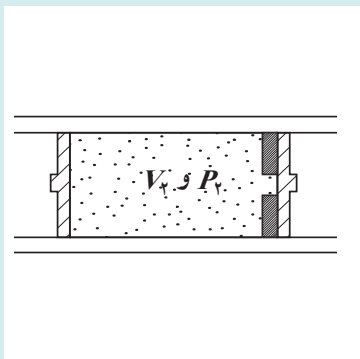
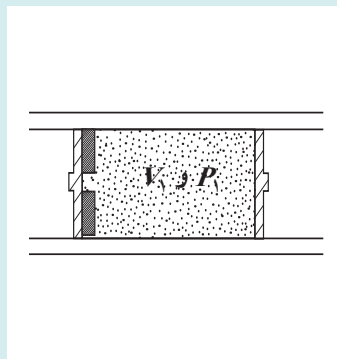
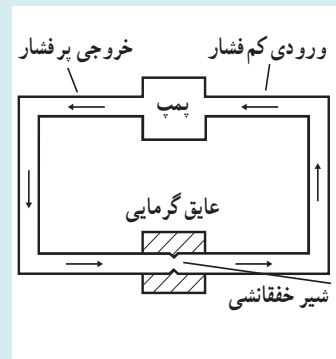
دانستنی برای معلم

فرایند خفقانشی

در خوب است بدانید «ساز و کار یخچال خانگی»، به نحوه کار یخچال ها اشاره مختصری شد. از آنجا که بررسی کامل و دقیق کار یک یخچال مستلزم آشنایی با فرایندی موسوم به فرایند خفقانشی است، این دانستنی به مرور این فرایند می پردازد.

در پدیده خفقانشی، شماره ای که ابتدا در فشار ثابت و زیادی است، پس از عبور از یک جدار متخلخل یا مجرای باریک (شیر سوزنی یا شیر خفقانشی)، بدون انتقال گرما به محیطی که فشار آن پایین است، وارد می شود. شکل ۱- الف شماره ای را نشان می دهد که با پمپ به محیط پرفشاری منتقل شده و پس از عبور از گلوگاهی باریک، به لوله ورودی پمپ که فشار آن کم است، وارد می شود.

هر جزء از شماره در جریان دائمی خود، دستخوش فرایند خفقانشی می شود. فرض کنید که مقداری شماره نظیر شکل ۱- ب، بین یک ستون و یک دریچه خفقانشی محبوس شده و پیستون دیگری در طرف مقابل روی دریچه قرار گرفته باشد. دو پیستون را به طرف راست حرکت می دهیم؛ به طوری که همواره P_1 ، فشار سمت چپ و P_2 فشار سمت راست، ثابت بماند و نیز P_1 بیشتر از P_2 باشد. پس از آنکه همه شماره به طرف راست منتقل شد، دستگاه به وضعیت نشان داده شده در شکل ۱- پ در می آید. کار انجام شده روی دستگاه برابر با تفاضل کار دریافتی از پیستون طرف چپ و کار انجام شده روی پیستون طرف راست است. هرگاه V_1 و V_2 به ترتیب حجم های ابتدایی و نهایی شماره باشند، چون شماره کم فشار از صفر تا V_2 تغییر حجم داده و فشار آن ثابت و برابر P_1 است، کار شماره در این قسمت برابر با $(V_2 - 0) P_1$ می شود. از طرف دیگر، شماره پرفشار از V_2 تا صفر تغییر حجم داده و فشار آن ثابت و برابر P_1 است. بنابراین، کار شماره در اینجا برابر با $(0 - V_1) P_1$ است و در نتیجه کار کل دستگاه، برابر با $P_1 V_2 - P_1 V_1$

شکل ۱- ب شماره در فشار پایین تر P_1 شکل ۱- ب شماره در فشار بالای P_1 

شکل ۱- الف دستگاهی با دو فشار

و کار محیط، قرینه آن می شود. چون فرایندی دررو است ($Q = 0$)، طبق قانون اول ترمودینامیک خواهیم داشت:

$$U_2 - U_1 = 0 - (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

و یا

$$U_2 + P_2 V_2 = U_1 + P_1 V_1$$

$U + PV$ را «آنتالپی» دستگاه می نامند. بنابراین نتیجه می گیریم که آنتالپی (که آن را با نماد H مشخص می کنند) در فرایند خفقانشی ثابت باقی می ماند.

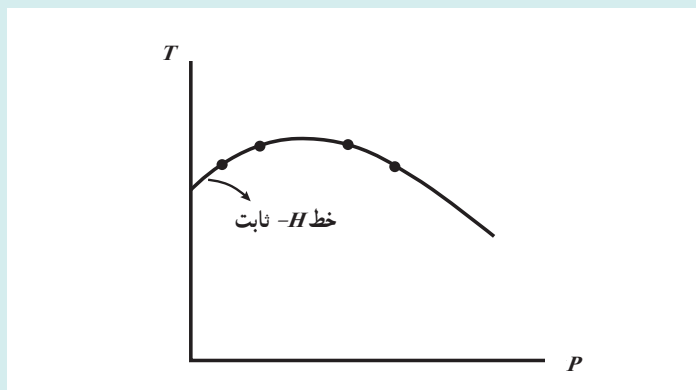
دمای یک شماره ممکن است بر اثر فرایند خفقانشی به شدت افت کند؛ که این امر در واقع اساس کار سردکن ها و دستگاه های تهویه مطبوع است؛ اما همیشه چنین نیست و دمای یک شماره گاهی ممکن است طی فرایند خفقانشی بدون تغییر بماند و یا حتی افزایش یابد. رفتار یک شماره در فرایند خفقانشی را ضریب موسوم به ضریب ژول-تامسون بیان می کند که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

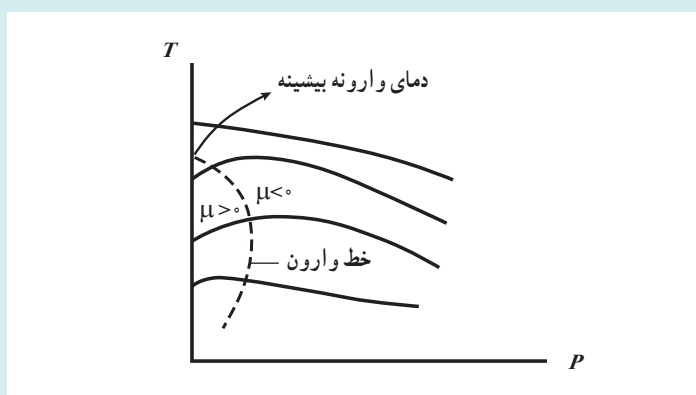
بنابراین ضریب ژول-تامسون میزان تغییرات دما نسبت به فشار، طی یک فرایند «آنتالپی- ثابت» است. باید توجه داشت که طی یک فرایند خفقانشی، اگر:

$$\mu \begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{دما افزایش می یابد} \\ = 0 \Rightarrow \text{دما ثابت می ماند} \\ > 0 \Rightarrow \text{دما کاهش می یابد} \end{cases}$$

یک نگاه دقیق به تعریف این ضریب روشن می سازد که ضریب ژول-تامسون، شیب خم ها (یا اصطلاحاً خطوط H) - ثابت روی نمودار $T-P$ را نشان می دهد. این نمودارها را می توان خیلی ساده از اندازه گیری دما و فشار طی فرایندهای خفقانشی به دست آورد. یک شماره در یک فشار و دمای معین، T_1 و P_1 واداشته می شود که از یک جدار متخلخل عبور کند تا دما و فشارش به T_2 و P_2 برسد. آزمایش را برای اندازه های مختلف جدار متخلخل تکرار می کنیم و از هر کدام یک T_2 و P_2 به دست می آوریم. بار رسم دماهای T_2 بر حسب فشارهای P_2 یک خم (خط) H - ثابت در نمودار $T-P$ به دست می آید (شکل ۲).



شکل ۲- به دست آوردن خط آنتالپی - ثابت در نمودار $T-P$



شکل ۳- خطوط آنتالپی ثابت مربوط به یک ماده در نمودار $T-P$

با تکرار آزمایش برای مقادیر مختلف فشار و دمای ورودی (P_1 و T_1) می‌توانیم یک نمودار $T-P$ برای یک ماده مطابق شکل (۳) رسم کنیم. بعضی از خطوط آنتالپی - ثابت در نمودار $T-P$ از یک نقطه با شیب صفر یا ضریب ژول - تامسون صفر عبور می‌کنند. خطی که از این نقاط عبور می‌کند، خط واریون نامیده می‌شود و دما در نقطه‌ای که یک خط آنتالپی - ثابت با خط واریون تقاطع دارد، دمای واریون نامیده می‌شود. دما در تقاطع خط $P=0$ و قسمت بالایی خط واریون، دمای واریون بیشینه نامیده می‌شود. توجه داشته باشید که شیب‌های خطوط H - ثابت در طرف راست خط واریون، منفی ($\mu < 0$) و در سمت چپ آن، مثبت ($\mu > 0$) هستند. یک فرایند خفقا نشی در طول یک خط آنتالپی ثابت، در جهت کاهش فشار، یعنی از راست به چپ پیش می‌رود. بنابراین، دمای شماره تا هنگامی که فرایند خفقا نشی در طرف راست خط واریون قرار دارد، افزایش می‌یابد. اما برای آن فرایندهای خفقا نشی‌ای که در طرف چپ خط واریون واقع‌اند، دمای شماره کاهش می‌یابد. با توجه به این نمودار، کاملاً روشن است که خنک‌سازی به وسیله فرایند خفقا نشی ممکن نیست مگر آن‌که شماره زیر دمای واریون بیشینه خود باشد. این موضوع برای موادی که دمای واریون بیشینه آنها بسیار کم است، مشکل به وجود می‌آورد. برای مثال، دمای واریون بیشینه هیدروژن 68°C - است. بنابراین، اگر بخواهیم سرمای بیشتری را با فرایند خفقا نشی ایجاد کنیم، باید هیدروژن را تا زیر این دما سرد کنیم. حال می‌خواهیم رابطه‌ای کلی برای ضریب ژول - تامسون برحسب کمیت‌های گرمای ویژه مولی فشار، حجم و دما به دست آوریم.

این کار را می‌توان به آسانی با اصلاح رابطه عمومی تغییر آنتالپی انجام داد^۱:

$$dH = C_p dT + [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P] dP$$

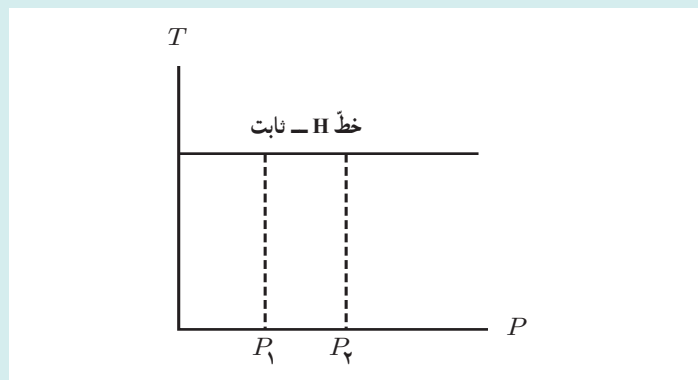
برای یک فرایند H - ثابت، $dH = 0$ است. پس می‌توان این رابطه را به شکل زیر مرتب کرد:

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = - \frac{1}{C_p} [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P]$$

بنابراین، ضریب ژول - تامسون را می‌توان با دانستن گرمای ویژه مولی در فشار ثابت و رفتار P - V - T ماده به دست آورد. یک مثال از به کارگیری رابطه بالا، محاسبه ضریب ژول - تامسون یک گاز کامل است. برای یک گاز کامل $V = \frac{RT}{P}$ است و بنابراین $\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P}$ می‌شود. با جای گذاری این رابطه در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\mu = \frac{-1}{C_p} [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P] = \frac{-1}{C_p} (V - T \frac{R}{P}) = \frac{1}{C_p} (V - V) = 0$$

این نتیجه، غیر منتظره نیست؛ زیرا آنتالپی گاز کامل فقط به دما بستگی دارد: $H = H(T)$. براساس آن، دما باید ثابت بماند؛ مگر اینکه آنتالپی تغییر کند. از آنجا که در صورت تغییر آنتالپی، فرایند خفقا نشی نیست. بنابراین، از یک فرایند خفقا نشی نمی‌توان برای سرد کردن گاز کامل استفاده کرد.



شکل ۴- دمای یک گاز کامل طی یک فرایند خفقا نشی ثابت می‌ماند

۱- اثبات این رابطه بسیار ساده است. ولی لازمه آن، دانستن روابط چهارگانه ماکسول است که بررسی این روابط، خارج از حد این دانستنی است. خواننده علاقه‌مند می‌تواند به صفحه ۲۹۱ ترجمه فارسی کتاب حرارت و ترمودینامیک زیمانسکی - دیتمن (ویراست هفتم) مراجعه کند.



پاسخ پرسش ۳-۵
ضریب عملکرد یخچال کارنو با استفاده از رابطه ۵-۱۴

$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

بنابراین هرچه دمای دو منبع گرما به یکدیگر نزدیک تر باشد (یعنی هرچه $T_H - T_L$ کوچک تر باشد) مقدار K بیشتر است. بنابراین نتیجه می گیریم کولر گازی در آب و هوای معتدل که اختلاف دمای دو منبع در آن کمتر از اختلاف دمای درون و بیرون خانه در هوای گرم است، بهتر عمل می کند.

زمان به دست آمده در این مثال ۵-۱۷، حدود ۱۹ دقیقه است ولی توجه کنید در واقع امر، در یک یخچال خانگی معمولی، مدت زمان لازم برای این رُخداد، خیلی بیشتر از این مقدار است و ممکن است چند ساعت طول بکشد، زیرا در یخچال خانگی که انبوهی از مواد درون یخچال وجود دارد (بدنه داخلی یخچال، هوای درون یخچال، مواد غذایی) و بنابراین، سرمایش فقط متوجه و متمرکز روی این آب نیست. به علاوه در یخچال، دائماً شارش خود به خودی گرما، از هوای گرم بیرون یخچال به هوای سرد درون آن وجود دارد. بخشی از فرایند سرمایش نیز صرف جبران این شارش خود به خودی و ثابت نگه داشتن دمای داخل یخچال می شود.



تمرین‌های پیشنهادی بخش ۵-۹

۱ یخچالی با ضریب عملکرد $2/8^\circ$ ، توانی برابر 200 W مصرف می‌کند. چقدر طول می‌کشد که این یخچال یخی به جرم 600 g را به آبی 0°C تبدیل کند؟
پاسخ: 360 s یا $6/00$ دقیقه

۲ برای ساختن یخ، فریزری که به صورت ماشین کارنوی معکوسی عمل می‌کند، در حین هر چرخه 42 kJ انرژی را به صورت گرما در دمای 15°C با ضریب عملکرد $5/7$ جذب می‌کند. دمای اتاق برابر $30/3^\circ\text{C}$ است. الف) چقدر انرژی در هر چرخه به صورت گرما در اتاق آزاد می‌شود و ب) کار لازم در هر چرخه برای راه‌انداختن فریزر چقدر است؟
پاسخ: الف) $|Q_H|=49\text{ kJ}$
ب) $|W|=7/0\text{ kJ}$

پرسش پیشنهادی بخش ۵-۹

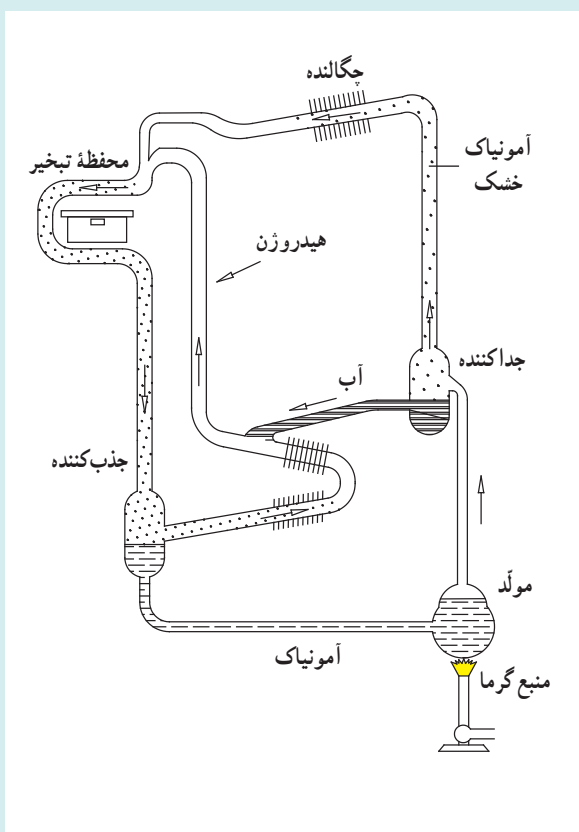
یک روش که گاهی برای سرد کردن آشپزخانه در یک روز گرم پیشنهاد می‌شود این است که در یخچال را باز بگذاریم. آیا واقعاً این کار آشپزخانه را خنک می‌کند؟
الف) بله، زیرا عمل یخچال‌ها مانند وسایل تهویه هوا هستند.
ب) نه، این کار آشپزخانه را گرم‌تر می‌کند.
پ) این کار هیچ تأثیری ندارد.
پاسخ: یخچال همواره به گرمای آشپزخانه می‌افزاید، چه در آن باز و چه در آن بسته باشد. باز کردن در یخچال باعث می‌شود یخچال بیشتر کار کند و بنابراین گرمای بیشتری هم به آشپزخانه نسبت به موقعی می‌دهد که در یخچال بسته است. پس گزینه ب درست است.

یخچال جذبی

یخچال جذبی، یخچالی است که با استفاده از یک منبع گرما انرژی لازم برای راه انداختن فرایند سرمایش را مهیا می‌کند. یخچال جذبی انواع مختلفی دارد که از معروف‌ترین آنها *یخچال اینشتین* – زیلارد است. نوع بدوی این یخچال‌ها، یخچالی است که اصطلاحاً آن را *یخچال نفتی* می‌نامند. در اینجا به معرفی این یخچال می‌پردازیم.

یخچال نفتی

در این یخچال که طرح ساده‌ای از آن را در شکل می‌بینید از منبع گرمای کوچکی (اجاق یا چراغ نفتی) برای جوشاندن محلول غلیظ آمونیاک در آب و تبخیر آن استفاده می‌شود. این بخش از یخچال را مولد یا ژنراتور می‌گویند. مخلوط بخار آب و آمونیاک پرفشار از بخش دیگری به نام جداکننده عبور می‌کند و بدین ترتیب بخار آب، تقطیر و از آمونیاک جدا می‌شود. به این آمونیاک، آمونیاک خشک می‌گویند. سپس آمونیاک خشک و پرفشار وارد چگالنده می‌گردد. در چگالنده، آمونیاک با دادن گرما به هوای پیرامون چگالنده، سرد و مایع می‌شود. در این مرحله، گاز هیدروژن به آمونیاک مایع اضافه شده و این مخلوط وارد محفظه تبخیر می‌گردد.



در محفظه تبخیر، آمونیاک مایع با گرفتن گرما از هوا و مواد درون یخچال که پیرامون محفظه تبخیر هستند، بخار می‌شود و این عمل، هوا و مواد را خنک می‌کند. هیدروژن اضافه شده به آمونیاک مایع، پیش از ورود به محفظه تبخیر، سبب سرعت بخشیدن به تبخیر آمونیاک در محفظه تبخیر می‌گردد. مخلوط بخار آمونیاک و هیدروژن پس از خروج از محفظه تبخیر وارد قسمت دیگری از یخچال به نام جذب‌کننده می‌شود. در این بخش، بخار آمونیاک در آب حل می‌شود اما هیدروژن در آب حل نشده و دوباره برای اضافه شدن به آمونیاک مایع هنگام ورود به محفظه تبخیر برگردانده می‌شود. آبی که در این مرحله آمونیاک در آن حل می‌شود قبلاً از مخلوط بخار داغ و پرفشار آمونیاک و آب، در جداکننده از آمونیاک جدا شده است. محلول آمونیاک در آب، از جذب‌کننده به مولد یا ژنراتور برمی‌گردد و دوباره با گرفتن گرما از منبع گرما (اجاق یا چراغ نفتی) تبخیر شده و همه این چرخه از نو تکرار می‌شود. در یخچال نفتی، چون قسمت‌های متحرک یخچال‌های برقی (موتور و کمپرسور) وجود ندارد، یخچال بدون سر و صدا کار می‌کند.

راهنمای پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵



۱ از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$\Delta U = Q + W = -31 \text{ kJ} + 40 \text{ kJ} = 9 \text{ kJ}$$

۲ الف) همان‌طور که در متن درس اشاره شد اگر پیستون را

با گیره‌های ثابت کنیم و دمای گاز را با استفاده از یک منبع گرما به تدریج افزایش یا کاهش دهیم، فشار گاز طی یک فرایند هم‌حجم ایستاوار، افزایش یا کاهش می‌یابد.

ب) این مورد نیز در متن درس توضیح داده شد. در اینجا نیز با افزایش دمای کند و تدریجی توسط منبع گرما، در هر مرحله به علت اختلاف دمای جزئی بین منبع و دستگاه، مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که در نتیجه آن گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را که حالا آزاد است اندکی به طرف بالا جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن را به همین روش به صورت آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون به‌طور ایستاوار به بالا حرکت می‌کند. شتاب حرکت پیستون چنان کم است که می‌توان گفت در طی گرما دادن همواره فشار گاز ثابت می‌ماند. برای کاهش حجم ایستاوار و هم فشار گاز نیز، به روش مشابه، دمای منبع گرما را به تدریج و به کندی کاهش می‌دهیم.

۳ این آزمایش مشابه حالتی است که گاز محبوس در استوانه‌ای با پیستون آزاد در تماس با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم است و دمای منبع به آرامی بالا می‌رود.

به علت اختلاف جزئی دمای بین منبع (آب) و هوای درون سرنگ، گرما به کندی به هوای محبوس درون سرنگ منتقل می‌شود و هوا به آرامی [در فشار ثابت] اندکی منبسط می‌گردد و پیستون، سرنگ را اندکی به جلو می‌راند. اگر گرما دادن را به همین روش تدریجی ادامه دهیم، ضمن افزایش دما و حجم هوای درون سرنگ، پیستون به آهستگی حرکت می‌کند. همان‌طور که گفتیم این فرایند در فشار ثابت رخ می‌دهد. زیرا وقتی سرنگ به‌طور افقی درون آب قرار گرفته است، اختلاف فشاری بین درون سرنگ و آب بیرون آن وجود ندارد و به محض اینکه یکی از این دو فشار اندکی افزایش یا کاهش یابد، پیستون جابه‌جا می‌گردد تا دوباره فشارها برابر شوند. و چون در اینجا فشار آب تغییر نمی‌کند، فشار درون سرنگ هم تغییر نخواهد کرد و انبساطی هم فشار خواهد داشت.

۴ الف) در فرایند هم‌حجم، کار برابر صفر است. برای محاسبه گرمای مبادله شده از رابطه $Q = nC_V \Delta T$ استفاده می‌کنیم و به جای ΔT از قانون گازهای آرمانی (کامل) جای‌گذاری خواهیم کرد. با نمو گرفتن از قانون گازهای کامل (با توجه به اینکه $\Delta V = 0$ است) داریم

$$V \Delta P = nR \Delta T$$

و از آنجا $\Delta T = \frac{V \Delta P}{nR}$ می‌شود. با توجه به اینکه برای گاز کامل تک اتمی $C_V = \frac{3}{2} R$ است، داریم

$$Q = n \left(\frac{3}{2} R \right) \left(\frac{V \Delta P}{nR} \right) = \frac{3}{2} V \Delta P$$

که در یکاهای SI چنین به دست می‌دهد:

$$Q = \frac{3}{2} (8/3 \times 10^{-2} \text{ m}^3) (3/0 - 1/5) (10^5 \text{ N/m}^2) = 1/9 \times 10^2 \text{ J}$$



توجه کنید که در حجم ثابت برای افزایش فشار باید به گاز گرما داد و علامت مثبت Q نیز نشان می‌دهد که این گرمایی است که گاز می‌گیرد تا افزایش فشار دهد.

ب) حال اگر حجم گاز را کم کنیم، برای کار در یکای SI خواهیم داشت :

$$W = -P\Delta V = -(1/5 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left(\frac{8}{3} - 1 \right) \times 10^{-2} \text{ m}^3 \\ = 6/2 \times 10^3 \text{ J}$$

توجه کنید که علامت W مثبت شده است و این به معنای آن است که کار روی دستگاه انجام شده است. برای محاسبه گرمای مبادله شده از رابطه $Q = nC_p\Delta T$ استفاده می‌کنیم. در این رابطه به جای ΔT دوباره از قانون گازهای کامل قرار می‌دهیم :

$$Q = nC_p \left(\frac{P\Delta V}{nR} \right)$$

با توجه به اینکه C_p برای گازهای کامل تک اتمی برابر $\frac{5}{2}R$ است، $Q = \frac{5}{2}P\Delta V$ می‌شود و از آنجا در یکاهای SI خواهیم داشت :

$$Q = \frac{5}{2} (1/5 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left(\frac{8}{3} - 1 \right) \times 10^{-2} \text{ m}^3 = -1/6 \times 10^3 \text{ J}$$

توجه کنید علامت Q منفی شده است و این به معنای آن است که گاز به محیط گرما داده است.

۵

کار محیط = - (کار گاز) = - (مساحت دوزنقه) =

$$= -\frac{1}{2} [(3/00 + 2/00)(1/01 \times 10^5 \text{ N/m}^2)] (2/00 \times 10^{-2} \text{ m}^2) = -50.5 \text{ J}$$

و آنگاه با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$Q = \Delta U - W_{\text{محیط}} = (912 \text{ J} - 456 \text{ J}) + 50.5 \text{ J} = 961 \text{ J}$$

چون Q مثبت شده است این بدین معنی است که گاز گرما گرفته است.

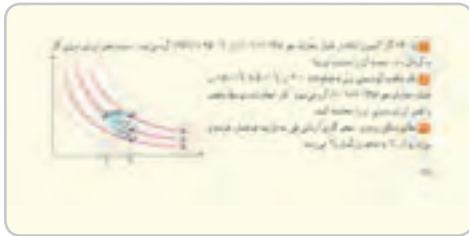
۶ الف) نخست قانون اول ترمودینامیک را برای مسیر abc می‌نویسیم :

$$\Delta U_{abc} = Q_{abc} + W_{abc} = 90 \text{ J} + (-70 \text{ J}) = 20 \text{ J}$$

ب) قدر مطلق کار انجام شده برابر با مساحت زیر نمودار فرایند در صفحه $P-V$ است. بنابراین، بدیهی است که مساحت زیر مسیر adc کمتر از مساحت زیر مسیر abc است و در نتیجه مقدار کار در مسیر abc کمتر از مقدار کار در مسیر adc است. از طرفی در هر دو فرایند گاز انبساط یافته است و بنابراین کار محیط منفی و کار دستگاه (گاز) مثبت است. بنابراین کار گاز نیز در مسیر adc کمتر از مسیر abc است. برای مقایسه گرمای داده شده به گاز، باید از قانون اول ترمودینامیک استفاده کنیم: $Q = \Delta U - W$. چون ΔU برای هر دو مسیر یکسان است باید W ها را با هم مقایسه کنیم. چون مقدار کار در مسیر adc کوچک است و از طرفی W کار محیط روی گاز و در هر دو مسیر منفی است پس $W_{adc} > W_{abc}$ است و در نتیجه Q در مسیر adc کوچک‌تر است.

پ) چرخه بسته‌ای را در نظر بگیرید که شامل مسیر abc و مسیر خمیده بازگشت است. چون

$$\Delta U = \Delta U_{abc} + \Delta U_{ca} = 0$$



نتیجه می‌گیریم که باید به اندازه $\Delta U_{abc} = 20 \text{ J}$ از گاز انرژی بگیریم. البته چون در این بخش، هنوز چرخه مطرح نشده است می‌توانیم این طور نیز استدلال کنیم:

$$\Delta U_{abc} = U_c - U_a \quad \Delta U_{ca} = U_a - U_c \\ \Rightarrow \Delta U_{ca} = -\Delta U_{abc} = -20 \text{ J}$$

۷ آنچه مورد نظر است نسبت $\Delta U/Q$ است. داریم

$$\Delta U = nC_V \Delta T \quad \text{و} \quad Q = nC_P \Delta T$$

در نتیجه

$$\frac{\Delta U}{Q} = \frac{C_V}{C_P} = \frac{5}{7} \approx 0.7$$

توجه کنید در این مسئله نیازی به جرم اکسیژن نداشتیم.

۸ با استفاده از تعریف کار و رابطه انبساط حجمی داریم:

$$W_{\text{کار مکعب روی هوا}} = -W = P \Delta V = P (\beta V \Delta T) = (1/0.1 \times 10^5 \text{ N/m}^2) [(3 \times 23 \times 10^{-6} / \text{C}) (10^0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) (100/0 \text{ C})] = 5/8 \text{ J}$$

از طرفی

$$Q = mc \Delta T = (\rho V) c \Delta T$$

$$= (2/7 \times 10^2 \text{ kg/m}^3) (10^0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) (900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) (100/0 \text{ K}) = 1/94 \times 10^6 \text{ J}$$

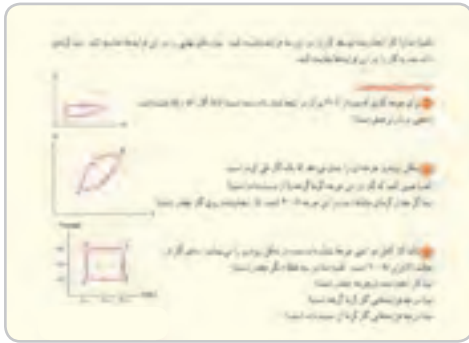
$$\Rightarrow \Delta U = Q + W = 1/94 \times 10^6 \text{ J} - 5/8 \text{ J} = 1/94 \times 10^6 \text{ J}$$

توجه کنید که کار انجام شده در برابر Q بسیار ناچیز و اهمیت ندارد که این فرایند در خلأ صورت گیرد ($W=0$) یا خیر. تغییر انرژی درونی در دو حالت یکسان است.

۹ الف) قدرمطلق کار برابر با مساحت زیر نمودار فرایند ترمودینامیک‌ها در صفحه $P-V$ است. از روی شکل دیده می‌شود که

مساحت زیر نمودار فرایند هم‌فشار از همه بیشتر و مساحت زیر نمودار فرایند بی‌دررو از همه کمتر است. بنابراین مقدار کار انجام شده از کمترین تا بیشترین به ترتیب بی‌دررو، هم‌دما و هم‌فشار است. البته در این سؤال از کار گاز روی محیط پرسیده شده است که با توجه به انبساطی بدون هر سه فرایند، برای هر فرایند مقداری مثبت است. پس همین مقایسه در مورد خود کارها نیز درست است. ب) از قانون گازهای کامل در می‌یابیم که در فرایند هم‌فشار با افزایش حجم، دما افزایش می‌یابد. در فرایند هم‌دما نیز بدیهی است که دما ثابت می‌ماند. در فرایند بی‌دررو نیز از قانون اول ترمودینامیک در می‌یابیم که در انبساط، کاهش دما داریم. این موارد همگی در شکل نیز مشخص شده است. بنابراین دمای نهایی در این سه فرایند از کمترین تا بیشترین به ترتیب بی‌دررو، هم‌دما و هم‌فشار می‌شود.

پ) در فرایند بی‌دررو $Q=0$ و در فرایندهای هم‌دما و هم‌فشار $Q>0$ است. برای مقایسه فرایندهای هم‌دما و هم‌فشار نیز باید به قانون اول ترمودینامیک رجوع کنیم. با توجه به اینکه تغییر انرژی درونی و مقدار کار در فرایند هم‌دما از فرایند هم‌فشار کمتر است و نیز کار در هر دو فرایند منفی است، بنابراین در این مورد نیز ترتیب گرمای داده شده به ترتیب از کمترین تا بیشترین، بی‌دررو، هم‌دما و هم‌فشار می‌شود.



۱۰ از درس آموختیم که در چرخه‌های پادساعتگرد در صفحه $P-V$ کار محیط (W) مثبت است. با این حال اینجا می‌خواهیم اثباتی برای این چرخه ارائه دهیم. از قانون اول ترمودینامیک داریم $\Delta U = Q + W$ که در آن W کار محیط است. توجه کنید که در اینجا فرایندی چرخه‌ای داریم و $\Delta U = 0$ است. در مورد علامت W نیز می‌توانیم این فرایند چرخه‌ای را به سه بخش تقسیم کنیم. بدیهی

است که در فرایند هم‌حجم، کار صفر است. اما مساحت زیر فرایند هم‌فشاری که در آن حجم کاهش یافته است، بیشتر از فرایند دیگری است که در آن افزایش حجم داریم. بنابراین کار محیط مثبت و کار دستگاه منفی است. اکنون با توجه به قانون اول ترمودینامیک برای فرایند چرخه‌ای می‌دانیم $Q = -W$ است و بنابراین Q نیز منفی می‌شود.

۱۱ الف) در فرایند چرخه‌ای $\Delta U = 0$ است و در نتیجه از قانون اول ترمودینامیک نتیجه می‌گیریم $Q = -W$ است. با توجه به اینکه چرخه ساعتگرد طی شده است کار محیط منفی است (توجه کنید که نیازی به حفظ کردن نیست و می‌توانید همواره با مقایسه مساحت زیر منحنی‌ها به منفی یا مثبت بودن کار پی ببرید). بنابراین Q مثبت می‌شود و دستگاه گرما می‌گیرد.
ب) در قسمت الف دیدیم که Q مثبت است و در نتیجه داریم

$$W = -Q = -400 \text{ J}$$

۱۲ الف) با استفاده از قانون گازهای کامل داریم:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

با جای گذاری $P_1 = 1/0 \text{ atm}$ ، $P_2 = 3/0 \text{ atm}$ ، $V_1 = V_2$ و $T_1 = 200 \text{ K}$ به $T_2 = 600 \text{ K}$ می‌رسیم. که با توجه قواعد محاسبه ارقام معنی‌دار باید به صورت $6/0 \times 10^2 \text{ K}$ بیان شود. اکنون با استفاده از قانون گازهای کامل T_2 و T_3 را نیز به دست می‌آوریم.

$$T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = T_1 \frac{V_2}{V_1} = (600 \text{ K}) \left(\frac{3/0 \text{ L}}{1/0 \text{ L}} \right) = 1800 \text{ K} = 1/8 \times 10^3 \text{ K}$$

$$T_3 = T_2 \frac{P_3 V_3}{P_2 V_2} = T_2 \frac{P_3}{P_2} = (1800 \text{ K}) \left(\frac{1/0 \text{ atm}}{3/0 \text{ atm}} \right) = 600 \text{ K} = 6/0 \times 10^2 \text{ K}$$

ب) مقدار کار انجام شده برابر با مساحت محصور در چرخه است که چنین می‌شود.

$$|W| = [(300 - 100)(10^{-2} \text{ m}^2)(3/0 - 1/0)(10^5 \text{ N/m}^2)] = 4/0 \times 10^4 \text{ J}$$

پ) در فرایندهای ۱→۲ و ۲→۳ دمای گاز زیاد شده است و با توجه به رابطه‌های $Q = nC_V \Delta T$ و $Q = nC_P \Delta T$ درمی‌یابیم گاز گرما می‌گیرد.

ت) در فرایندهای ۳→۴ و ۴→۱ دمای گاز کم شده است و با توجه به رابطه‌های $Q = nC_V \Delta T$ و $Q = nC_P \Delta T$ درمی‌یابیم گاز گرما از دست می‌دهد.



توجه: می‌توانیم مقدار این گرماها را نیز محاسبه کنیم. مثلاً برای قسمت پ) انجام می‌دهیم. برای این گرما داریم

$$Q_{in} = Q_H = Q_{12} + Q_{23} = nC_V \Delta T_{12} + nC_P \Delta T_{23} \\ = \frac{5}{2} nR \Delta T_{12} + \frac{7}{2} nR \Delta T_{23}$$

برای محاسبه nR از قانون گازهای کامل استفاده می‌کنیم:

$$nR = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{(1/0 \text{ atm})(1/0 \text{ L})}{200 \text{ K}} = 0/50 \text{ L} \cdot \text{atm/K}$$

در نتیجه داریم

$$Q_{in} = \left[\frac{5}{2} (600 \text{ K} - 200 \text{ K}) + \frac{7}{2} (1800 \text{ K} - 600 \text{ K}) \right] (0/50 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{K}}) = 2/6 \times 10^2 \text{ atm} \cdot \text{L} \\ = (2/6 \times 10^2 \text{ atm} \cdot \text{L}) (1/01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (10^{-2} \text{ m}^3) = 2/6 \times 10^5 \text{ J}$$

۱۲ چون فرایندی چرخه‌ای داریم $\Delta U = 0$ است. بنابراین $Q = -W$ می‌شود که در آن W کار محیط است. از طرفی می‌دانیم مقدار کار انجام شده در چرخه برابر مساحت محصور در چرخه است و در چرخه‌های ساعتگرد کار انجام شده بر روی دستگاه منفی است. بنابراین

$$W = -S_{ABC} = -\frac{1}{2} [(3/0 - 1/0) \times 10^5 \text{ N/m}^2] [(4/0 - 1/0) \times 10^{-2} \text{ m}^2] \\ = -3/0 \times 10^2 \text{ J}$$

و از آنجا $Q = 3/0 \times 10^2 \text{ J}$ می‌شود.

۱۴ الف)

$$T_C = T_A = \frac{P_A V_A}{nR} \\ = \frac{(2/4 \times 1/01 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(2/2 \times 10^{-2} \text{ m}^3)}{(0/32 \text{ mol})(8/314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})} \\ = 200/4 \text{ K} \approx 2/0 \times 10^2 \text{ K}$$

$$T_B = \frac{P_B V_B}{nR} = \frac{P_A (2V_A)}{nR} = \frac{2P_A V_A}{nR} \\ = 2T_A = 400/9 \text{ K} \approx 4/0 \times 10^2 \text{ K}$$

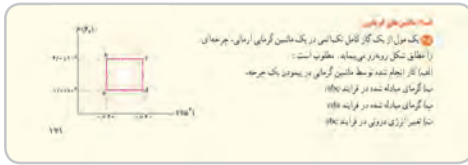
ب) فرایند $A \rightarrow B$ را با شاخص پایین ۱ و فرایند $B \rightarrow C$ را با شاخص پایین ۲ و فرایند $C \rightarrow A$ را با شاخص پایین ۳ نشان می‌دهیم.

$$\Delta U_1 = Q_1 + W_1$$

$$Q_1 = nC_P \Delta T = \frac{5}{2} nR \Delta T \\ = \frac{5}{2} (0/32 \text{ mol})(8/314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(201 \text{ K}) \\ = 1337 \text{ J} \approx 1/3 \text{ kJ}$$

$$W_1 = -P_A \Delta V = -P_A (V_B - V_A) \\ = -(2/4 \times 1/01 \times 10^5 \text{ Pa})(2/2 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \\ = -533/3 \text{ J} \approx -0/53 \text{ kJ}$$

$$\Rightarrow \Delta U_1 = Q_1 + W_1 = 1/3 \text{ kJ} - 0/53 \text{ kJ} = 0/77 \text{ kJ} \approx 0/8 \text{ kJ}$$



که البته این نتیجه را می توانیم از رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ نیز به دست آوریم.

$$\Delta U_T = Q_T + W_T \quad \text{و} \quad W_T = 0$$

$$\begin{aligned} Q_T &= nC_V \Delta T = \frac{3}{2} nR \Delta T \\ &= \frac{3}{2} (0.32 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(-200/5 \text{ K}) = -800/1 \text{ J} \approx -0.8 \text{ kJ} \\ \Rightarrow \Delta U_T &= 0 + (-0.8 \text{ kJ}) \approx -0.8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

توجه کنید که ΔU_T را می توانستیم به طور مستقیم، با توجه به اینکه در چرخه انرژی درونی کل برابر صفر است و فرایند $C \rightarrow A$ فرایندی هم دما است ($\Delta U_T = 0$) برابر قرینه ΔU_1 بگیریم. توجه کنید تفاوت ΔU_1 و ΔU_T به دست آمده، با در نظر گرفتن محاسبات با ارقام معنی دار رخ داده است.

۱۵ الف) مقدار کار انجام شده روی دستگاه برابر با مساحت محصور در چرخه است و چون چرخه به صورت ساعتگرد پیموده شده است، علامت آن منفی است.

$$\begin{aligned} W &= -S_{abcd} = -[(2/0 \times 10^5 - 1/0 \times 10^5) \text{ N/m}^2 \times (0/0.4 - 0/0.2) \text{ m}^2] \\ &= -2/0 \times 10^3 \text{ J} = -2/0 \text{ kJ} \end{aligned}$$

کار انجام شده توسط ماشین قرینه این مقدار و برابر $|W| = 2/0 \text{ kJ}$ می شود. (ب) فرایند abc از دو فرایند ab (هم حجم) و bc (هم فشار) تشکیل شده است. بنابراین

$$\begin{aligned} Q_{abc} &= Q_{ab} + Q_{bc} = nC_V \Delta T_{ab} + nC_P \Delta T_{bc} \\ &= n \left(\frac{3}{2} R \right) \left(\frac{V \Delta P}{nR} \right)_{ab} + n \left(\frac{5}{2} R \right) \left(\frac{P \Delta V}{nR} \right)_{bc} = \frac{3}{2} (V \Delta P)_{ab} + \frac{5}{2} (P \Delta V)_{bc} \\ &= \frac{3}{2} (0/0.2 \text{ m}^2)(1/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + \frac{5}{2} (2/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0/0.2 \text{ m}^2) = 1/3 \times 10^4 \text{ J} = 13 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(پ) فرایند cda از دو فرایند cd (هم حجم) و da (هم فشار) تشکیل شده است. بنابراین

$$\begin{aligned} Q_{cda} &= Q_{cd} + Q_{da} = nC_V \Delta T_{cd} + nC_P \Delta T_{da} \\ &= n \left(\frac{3}{2} R \right) \left(\frac{V \Delta P}{nR} \right)_{cd} + n \left(\frac{5}{2} R \right) \left(\frac{P \Delta V}{nR} \right)_{da} \\ &= \frac{3}{2} (V \Delta P)_{cd} + \frac{5}{2} (P \Delta V)_{da} \\ &= \frac{3}{2} (0/0.4 \text{ m}^2)(-1/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + \frac{5}{2} (1/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(-0/0.2 \text{ m}^2) \\ &= -11000 \text{ J} = -11 \times 10^3 \text{ J} = -11 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(ت) تغییر انرژی درونی در فرایند abc برابر است با

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

یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه ۱۰۰۰ گرم از منبع دما بالا می‌گیرد و ۳۰۰ گرم به منبع دما پایین می‌دهد. الف) بازده این ماشین چقدر است؟ ب) اگر هر چرخه ۱۰۰۰ طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟
 الف) بازده یک ماشین آرمانی ۲۵ درصد است و در هر چرخه ۱۰۰۰ گرم از منبع دما بالا می‌گیرد و ۷۵۰ گرم به منبع دما پایین می‌دهد. ب) اگر هر چرخه ۱۰۰۰ طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟
 الف) بازده یک ماشین بخار در هر دقیقه ۱۰۰۰ گرم از منبع دما بالا می‌گیرد و ۷۵۰ گرم به منبع دما پایین می‌دهد. ب) اگر هر چرخه ۱۰۰۰ طول بکشد، توان خروجی این ماشین چقدر است؟

Q_{abc} را در قسمت (ب) به دست آوریم. کافی است W_{abc} را محاسبه کنیم.

$$W_{abc} = -P\Delta V = -(2/0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0/02 \text{ m}^3) = -4/0 \times 10^2 \text{ J} = -4/0 \text{ kJ}$$

بنابراین داریم

$$\Delta U_{abc} = 1/3 \times 10^4 \text{ J} - 4/0 \times 10^2 \text{ J} = 9 \times 10^2 \text{ J} = 9 \text{ kJ}$$

۱۶ الف) بازده ماشین گرمایی آرمانی برابر است با

$$\frac{|W|}{Q_H} = \eta = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} = 1 - \frac{60/0}{100/0} = 0/400 = 40\%$$

(ب)

$$P = \frac{|W|}{t} = \frac{1}{t}(\eta Q_H) = \frac{Q_H}{t} \eta = (0/400) \left(\frac{100/0 \text{ J}}{0/500 \text{ s}} \right) = 80/0 \text{ W}$$

۱۷ الف) با استفاده از رابطه بازده برای ماشین دمای گرمایی داریم

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

و از آنجا

$$Q_H = \frac{|W|}{\eta} = \frac{8/2 \times 10^3 \text{ J}}{0/25} = 3/28 \times 10^4 \text{ J}$$

حال با استفاده از قانون اول ترمودینامیک $|Q_L|$ را برای ماشین گرمایی آرمانی به دست می‌آوریم.

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 3/28 \times 10^4 \text{ J} - 8/2 \times 10^3 \text{ J} = 2/46 \times 10^3 \text{ J} \approx 2/5 \times 10^4 \text{ J}$$

(ب) اکنون Q_H چنين می‌شود

$$Q_H = \frac{|W|}{\eta} = \frac{8/2 \times 10^3 \text{ J}}{0/30} = 2/73 \times 10^4 \text{ J}$$

و از آنجا

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 2/7 \times 10^4 \text{ J} - 8/2 \times 10^3 \text{ J} = 1/91 \times 10^4 \text{ J} \approx 1/9 \times 10^4 \text{ J}$$

۱۸ الف) چون ماشین بخار یک فرایند چرخه‌ای را طی می‌کند، از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$W = -Q$$

توجه کنید که این کار محیط است. چون مسئله کار دستگاه (ماشین) را خواسته این رابطه به صورت $W_{\text{ماشین}} = Q$ در می‌آید. از طرفی $Q = Q_H - |Q_L|$ است. بنابراین داریم:

$$W_{\text{ماشین}} = 1/5 \times 10^5 \text{ MJ} - 9/0 \times 10^4 \text{ MJ} = 6/0 \times 10^4 \text{ MJ}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۷-۵ داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{6/0 \times 10^4 \text{ MJ}}{1/5 \times 10^5 \text{ MJ}} = 0/40$$

بنابراین بازده این ماشین بخار ۴۰٪ است.



۱۹ الف) از رابطه ۷-۵ برای بازده ماشین داریم :

$$\eta = \frac{|W|}{Q} = \frac{200 \text{ kJ}}{800 \text{ kJ}} = 0.25$$

پس بازده ۲۵٪ است.

ب) اکنون با استفاده از رابطه ۹-۵، $|Q_L|$ را به دست می آوریم :

$$\begin{aligned} |Q_L| &= (1-\eta)Q_H = (1-0.25)(8000) \\ &= 6000 \text{ J} \end{aligned}$$

که آن را با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نیز می توانیم به دست آوریم :

$$|Q_L| = Q_H - W = 8000 \text{ J} - 2000 \text{ J} = 6000 \text{ J}$$

پ) گرمای حاصل از سوخت $5/0 \times 10^4 \text{ J/g}$ است. بنابراین، مقدار سوخت مصرف شده در هر چرخه چنین می شود :

$$m = \frac{8000 \text{ J}}{5/0 \times 10^4 \text{ J/g}} = 0.16 \text{ g}$$

ت) ماشین در هر ثانیه ۴۰ چرخه را می پیماید. بنابراین، زمان پیمودن یک چرخه، $\frac{1}{40} \text{ s}$ می شود. پس توان ماشین برابر است با :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{2000 \text{ J}}{\frac{1}{40} \text{ s}} = 80000 \text{ W} = 80 \text{ kW}$$

۲۰ باید از بازده ماشین کارنو (معادله ۵-۱) استفاده کنیم :

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

توجه کنید که در این رابطه T_H و T_L برحسب کلون هستند. بنابراین، باید نقطه انجماد و نقطه جوش را به کلون تبدیل کنیم :

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{(0 + 273) \text{ K}}{(100 + 273) \text{ K}} \approx 0.27$$

بنابراین، بازده ماشین کارنو ۲۷٪ است و ادعای مخترع درست نیست؛ زیرا بازده ماشین او از بیشترین بازده محتمل بیشتر است.

۲۱ این مسئله راه حلی کلی دارد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. ولی چون در اینجا مثالی عددی خواسته است، مثلاً فرض کنید

دماهای منبع های دما-بالا و دما-پایین به ترتیب 300 K و 200 K باشد و بنابراین بازده ماشین کارنو چنین می شود :

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{200 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.333$$

حال فرض کنید دمای منبع دما-بالا را 50 K افزایش دهیم

$$\eta = 1 - \frac{200 \text{ K}}{350 \text{ K}} = 0.428$$

و اگر دمای منبع دما-پایین را 50 K کاهش دهیم

$$\eta = 1 - \frac{150 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.50$$

پس کاهش دمای منبع دما-پایین مؤثرتر است.

۱. در هر یک از ماشین‌ها که در شکل نشان داده شده است، انرژی مکانیکی ورودی را به انرژی مکانیکی خروجی تبدیل می‌کند. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید.

۲. در هر یک از ماشین‌ها که در شکل نشان داده شده است، انرژی مکانیکی ورودی را به انرژی مکانیکی خروجی تبدیل می‌کند. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید.

۳. در هر یک از ماشین‌ها که در شکل نشان داده شده است، انرژی مکانیکی ورودی را به انرژی مکانیکی خروجی تبدیل می‌کند. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید. در هر یک از ماشین‌ها، دمای منبع سرد را به دمای منبع گرم‌تر از دمای منبع سرد تعیین کنید.

اثبات کلی: اگر دمای منبع دما - پایین را به اندازه ΔT بکاهیم،
 $\eta_1 = 1 - \frac{T_L - \Delta T}{T_H}$ و اگر دمای منبع دما - بالا را به اندازه ΔT بیافزاییم $\eta_2 = 1 - \frac{T_L}{T_H + \Delta T}$ می‌شود. برای آنکه η_1 و η_2

η_2 را مقایسه کنیم، دو روش داریم. یکی این است که جمله‌های دوم را مقایسه کنیم. جمله دوم هر کدام که بزرگ‌تر بود، بازده آن کمتر است. فرض کنید $\eta_2 > \eta_1$ باشد:

$$\frac{T_L - \Delta T}{T_H} > \frac{T_L}{T_H + \Delta T}$$

چون T_H و $T_H + \Delta T$ مقادیر مثبتی هستند می‌توانیم طرفین را در مقدار مثبت $T_H(T_H + \Delta T)$ ضرب کنیم. آنگاه پس از محاسبه ساده‌ای خواهیم داشت

$$T_L > T_H + \Delta T$$

که غیرممکن است. پس حتماً جمله دوم η_1 کوچک‌تر از جمله دوم η_2 است و بنابراین $\eta_1 > \eta_2$. یعنی برای افزایش بازده ماشین کارنو، کاهش دمای منبع دما - پایین از افزایش دمای منبع دما - بالا مؤثرتر است. روش دیگر آن بود که مخرج مشترک بگیریم و کل جمله‌ها را با هم مقایسه کنیم:

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_L - \Delta T}{T_H} = \frac{T_H - T_L + \Delta T}{T_H}$$

و افزایش دمای منبع دما - بالا به رابطه زیر:

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_L}{T_H + \Delta T} = \frac{T_H - T_L + \Delta T}{T_H + \Delta T}$$

اگر توجه کنید، صورت‌های این دو کسر یکسان است، ولی مخرج η_2 بزرگ‌تر از مخرج η_1 است و بنابراین

$$\eta_2 > \eta_1$$

۲۲ الف) چون ماشین‌ها یک چرخه را طی می‌کنند، قانون اول ترمودینامیک برای ماشین‌های آرمانی به صورت $Q + W = 0$ درمی‌آید که در آن

$Q = Q_L + Q_H$ است. برای ماشین A داریم:

$$Q_L + Q_H = -1750 \text{ J} + 2000 \text{ J} = 250 \text{ J}$$

بنابراین این ماشین قانون اول را نقض می‌کند.

برای ماشین B داریم:

$$Q_L + Q_H = -200 \text{ J} + 500 \text{ J} = 300 \text{ J}$$

بنابراین ماشین B هم قانون اول را نقض می‌کند.

برای ماشین C داریم:

$$Q = -200 \text{ J} + 600 \text{ J} = 400 \text{ J}$$

پس ماشین C قانون اول را نقض نمی‌کند.

تجزیه آرمی می کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع های با دماهای 400 K و 300 K کار می کند. داده های هر ماشین در فرجه عبارتند از:

ماشین A: $Q_H = 200\text{ J}$, $Q_C = 175\text{ J}$, $Q_L = 25\text{ J}$
 ماشین B: $Q_H = 400\text{ J}$, $Q_C = 300\text{ J}$, $Q_L = 100\text{ J}$
 ماشین C: $Q_H = 400\text{ J}$, $Q_C = 200\text{ J}$, $Q_L = 200\text{ J}$
 ماشین D: $Q_H = 100\text{ J}$, $Q_C = 40\text{ J}$, $Q_L = 60\text{ J}$

ا فرض آرمی وین این چهار ماشین:
 الف) که آیا یک از ماشین ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می کند؟
 ب) که آیا یک از ماشین ها قابل ساخت هستند؟
 ج) که ماشین کاروین با دماهای 300 K و 200 K کار می کند. این ماشین بر فرجه (1) 75 J گرما از منبع دما بالا می گیرد. مقدار در هر فرجه (2) چقدر است؟ آیا بر فرجه چقدر گرما به منبع دما پایین (3) می شود؟

توجه: این فرجه ها در فرجه های دیگر قرار است به هم وصل شوند و در هر فرجه ای که هیچ یکی از این فرجه ها به هم وصل نشده اند، به سرعت 100 K است. اگر این فرجه ها به هم وصل شوند و در هر فرجه ای که به هم وصل شده اند، به سرعت 300 K است. اگر این فرجه ها به هم وصل شوند و در هر فرجه ای که به هم وصل شده اند، به سرعت 400 K است. اگر این فرجه ها به هم وصل شوند و در هر فرجه ای که به هم وصل شده اند، به سرعت 400 K است.

برای ماشین D داریم :

$$Q = -90\text{ J} + 100\text{ J} = 10\text{ J}$$

بنابراین این ماشین نیز قانون اول را نقض نمی کند.

(ب) بدیهی است ماشین هایی که قانون اول ترمودینامیک را نقض می کنند قابل ساختن نیستند و بنابراین آنها را کنار می گذاریم. پس می ماند ماشین های C و D. برای آنکه ماشینی قابل ساخت

باشد، بازده ماشین نباید از بازده بیشینه (بازده ماشین کارنو) بیشتر باشد. بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می آید

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300\text{ K}}{400\text{ K}} = 0.25$$

بنابراین بازده ماشین کارنویی که بین این دو دما عمل می کند ۲۵٪ است. حال ببینیم بازده ماشین های C و D چقدر است؟

$$\eta_C = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} = 1 - \frac{200\text{ K}}{600\text{ K}} = 0.66$$

پس بازده این ماشین بیشتر از ماشین کارنو است و آن نیز قابل ساختن نیست. تنها می ماند ماشین D. برای این ماشین داریم :

$$\eta_D = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} = 1 - \frac{90\text{ J}}{100\text{ J}} = 0.1$$

یعنی بازده این ماشین ۱۰٪ و کمتر از بازده ماشین کارنو است و بنابراین تنها این ماشین قابل ساختن است.

۲۲ الف) نخست بازده را برای این ماشین کارنو محاسبه می کنیم :

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{280\text{ K}}{360\text{ K}} = 0.22222 \approx 0.2222$$

بنابراین بازده این ماشین کارنو حدوداً ۲۲٪ است. توجه کنید رابطه $\eta = |W|/Q_H$ برای هر ماشینی برقرار است و آن را می توان برای ماشین کارنو نیز به کار برد.

$$|W| = (\eta) Q_H = (0.2222)(750\text{ J}) = 166.67\text{ J} \approx 166.67\text{ J}$$

(ب) این بار از رابطه $\eta = 1 - |Q_L|/Q_H$ استفاده می کنیم. در نتیجه

$$|Q_L| = (1 - \eta) Q_H = (1 - 0.2222)(750\text{ J}) = 583.33\text{ J} \approx 583.33\text{ J}$$

به این نتیجه با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نیز می توانیم برسیم :

$$|Q_L| = Q_H - |W| = 750\text{ J} - 166.67\text{ J} = 583.33\text{ J} \approx 583.33\text{ J}$$

۲۴ از تعریف توان داریم

$$P = \frac{W}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = W/P$$

از طرفی ضریب عملکرد برابر است با

$$K = \frac{Q_L}{W} \Rightarrow \Delta t = Q_L/PK$$

پس باید Q_L را محاسبه کنیم

$$Q_L = |Q| + |Q_{\text{سردشدن}}| + |Q_{\text{یخ بستن}}| = mc|\Delta T| + mL_F$$

$$= (1/0^\circ \text{ kg})(4/187 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1/0^\circ \text{ K})$$

$$+ (1/0^\circ \text{ kg})(333/3 \text{ kJ/kg}) \approx 376 \text{ kJ}$$

از آنجا Δt را محاسبه می کنیم :

$$\Delta t = \frac{376 \times 10^3 \text{ J}}{(110/0^\circ \text{ J/s})(4/0^\circ)} = 854/5 \text{ s} = 14/24 \text{ min} \approx 14 \text{ min}$$

۲۵ توان از رابطه $P = W/t$ به دست می آید. به این منظور باید نخست W را محاسبه کنیم. از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$|Q_H| = W - Q_L$$

و در نتیجه

$$W = |Q_H| - Q_L = 1/3 \times 10^5 \text{ J} - 9/0 \times 10^4 \text{ J} = 13 \times 10^4 \text{ J} - 9/0 \times 10^4 \text{ J} = 4 \times 10^4 \text{ J}$$

بنابراین توان چنین می شود

$$P = \frac{W}{t} = \frac{4/0 \times 10^4 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 6/7 \times 10^2 \text{ W} \approx 7 \times 10^2 \text{ W}$$

(ب) ضریب عملکرد برابر است با

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{9/0 \times 10^4 \text{ J}}{4 \times 10^4 \text{ J}} = 2/25 \approx 2$$

۲۶ بیشترین ضریب عملکرد ممکن مربوط به یخچال کارنو است.

$$K_{\text{max}} = K = \frac{Q_L}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

مقدار گرمایی که باید از آب گرفته شود تا یخ ببندد از رابطه زیر به دست می آید :

$$Q = mL_F$$

در نتیجه W چنین می شود

$$W = Q_L \frac{T_H - T_L}{T_L} = (mL_F) \left(\frac{T_H - T_L}{T_L} \right)$$

$$= (0/250^\circ \text{ kg})(333/7 \text{ kJ/kg}) \frac{(273/15 + 22/0^\circ) \text{ K} (237/15 - 5/0^\circ) \text{ K}}{(273/15 - 5/0^\circ) \text{ K}} \approx 8/40 \text{ kJ}$$

توجه: در این محاسبه، فرض شده است که یخچال کارنو است. در واقع، یخچال‌های واقعی ضریب عملکرد کمتری دارند. همچنین، در این محاسبه، تغییر دمای آب در فرایند سرد شدن و یخ بستن نادیده گرفته شده است. در واقع، برای سرد کردن آب از ۱۰۰ درجه سانتیگراد به ۰ درجه سانتیگراد، انرژی بیشتری نیاز است. همچنین، در این محاسبه، تغییر دمای یخ در فرایند یخ بستن نادیده گرفته شده است. در واقع، برای یخ بستن یخ، انرژی بیشتری نیاز است. در واقع، برای سرد کردن یخچال، انرژی بیشتری نیاز است. در واقع، برای سرد کردن یخچال، انرژی بیشتری نیاز است.



منابع فارسی استفاده شده در تألیف فصل‌های ۴ و ۵

- در تألیف فصل‌های ۴ و ۵ علاوه بر برخی از منابع انگلیسی و چندین مقاله، عمدتاً از منابع فارسی زیر استفاده شد:
- ۱ حرارت و ترمودینامیک، ویراست هفتم، مارک دبلیو. زیمانسکی و ریچارد ایچ. دیتمن، ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۹۵، انتشارات نیاز دانش.
 - ۲ دوره درسی فیزیک، گ. س. لندسبرگ (جلد اول)، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
 - ۳ فیزیک برای سرگرمی، یاکوب ایپسوویچ پرلمان، ترجمه احسان قوام‌زاده، چاپ چهارم ۱۳۶۸، نشر جوان.
 - ۴ مبانی فیزیک (جلد اول) مکانیک، گرما و شاره‌ها، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
 - ۵ مکانیک سیالات، گرما و موج، فرانسیس سرز، مارک زیمانسکی، هیویانگ، ترجمه فضل‌الله فروتن، چاپ پنجم ۱۳۷۰، انتشارات نشر علوم دانشگاهی.
 - ۶ مبانی فیزیک (جلد اول)، ب. م. یاورسکی و ا. ا. پینسکی، ترجمه محمدتقی توسلی و دیگران، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
 - ۷ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر و رسول جعفری‌نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.