

# Chapter 6

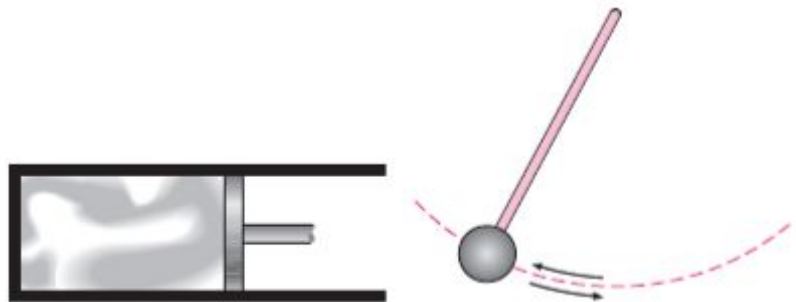
## THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

### فرآیندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر

قانون دوم ترمودینامیک می گوید هیچ ماشین گرمایی نمی تواند دارای بازده ۱۰۰ درصد باشد. بنابراین سوال می کنیم، بیشترین بازدهی که یک ماشین گرمایی می تواند داشته باشد چقدر است؟ قبل از این که پاسخ این پرسش را بدهیم، ابتدا باید یک فرآینده ایده آلی را، به نام فرآیند برگشت پذیر، تعریف کنیم.

فرآیندهایی که در قسمت ۵-۱ مورد بحث قرار گرفتند در جهت معینی روی می دهند. این فرآیندها پس از وقوع نمی توانند خود به خود در جهت معکوس روی دهند و سیستم را به حالت اول برگردانند. به این دلیل، آنها را فرآیندهای برگشت ناپذیر می گویند. وقتی فنجان قهوه سرد می شود، نمی تواند گرمایی را که به اطراف داده است دوباره به دست آورد. اگر می توانست، اطراف و سیستم (قهوه) به حالت اولیه خود برمی گشتند، و این یک فرآیند برگشت پذیر بود.

فرآیند برگشت پذیر فرآیندی است که بدون بر جای گذاشتن هیچ اثری روی اطراف می تواند معکوس شود. یعنی، سیستم و اطراف، هر دو، در انتهای فرآیند برگشت پذیر به حالت های اولیه خود برمی گردند. این فقط وقتی امکان دارد که گرمای خالص و کار خالص مبادله شده بین سیستم و اطراف برای فرآیند ترکیبی (فرآیند اولیه و معکوس آن) صفر باشد. فرآیندهایی را که برگشت پذیر نیستند فرآیندهای برگشت ناپذیر می گویند.



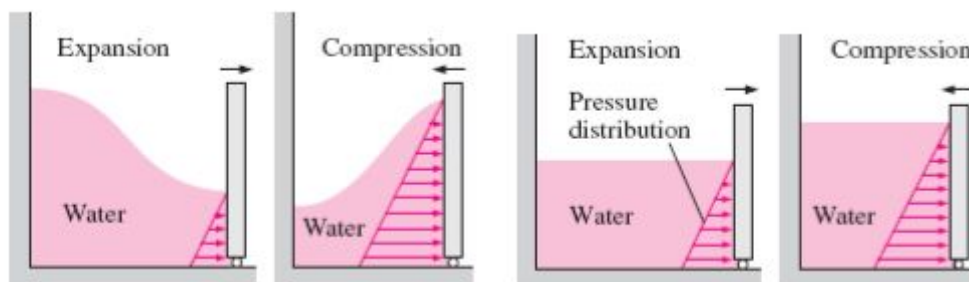
توجه کنید که یک سیستم را با پیوری از فرآیند، بدون توجه به این که فرآیند برگشت پذیر است یا برگشت ناپذیر، می توان به حالت اولیه برگرداند. اما برای فرآیندهای برگشت پذیر، این بازگردانی به حالت اولیه بدون بر جای گذاردن هیچ انرژی روی اطراف انجام می شود، در حالی که در فرآیند برگشت ناپذیر، اطراف معمولاً مقداری کار روی سیستم انجام می دهد و بنابراین به حالت اولیه خود بر نمی گردد.

فرآیند برگشت پذیر واقعاً در طبیعت روی نمی دهند آنها صرفاً ایده آل سازی های فرآیندهای واقعی اند. فرآیندهای برگشت پذیر را می توان به طور تقریبی، نه به طور دقیق، به دست آورد. یعنی تمام فرآیندهایی که در طبیعت روی می دهند برگشت ناپذیرند. بنابراین، شاید تعجب کنید که چرا خودمان را با اینفرآیندهای خیالی رنج می دهیم. دو دلیل وجود دارد. اول اینکه تحلیل آنها

ساده است، زیرا سیستم در فرآیند برگشت پذیر از مجموعه حالت های تعادلی می گذرد؛ دوم، آنها به عنوان مدل های ایده آلی اند که فرآیندهای واقعی را می توان با آنها مقایسه کرد.

مهندسان به فرآیندهای برگشت پذیر علاقه مندند زیرا وسایل مولد کار مانند اتومبیل و توربین های گازی یا بخاری وقتی از فرآیندهای برگشت پذیر استفاده می کنند بیشترین کار را می دهند و وسایل مصرف کننده کار مانند کمپرسورها، فن ها، پمپ ها وقتی از فرآیندهای برگشت پذیر استفاده می کنند کمترین کار را نیاز دارند.

فرآیندهای برگشت پذیر را به عنوان حدود نظری فرآیندهای برگشت ناپذیر متناظر می توان دانست. بعضی از فرآیندها از بعضی دیگر برگشت ناپذیرترند. هرگز نمی توانیم فرآیند برگشت پذیر داشته باشیم، اما می توانیم کم به آن نزدیک شویم. هر چه فرآیند به برگشت پذیر بودن نزدیکتر باشد، کار تولید شده توسط وسیله مولد کار بیشتر است، یا کار مورد نیاز وسیله مصرف کننده ی کار کمتر است.



## برگشت ناپذیری ها

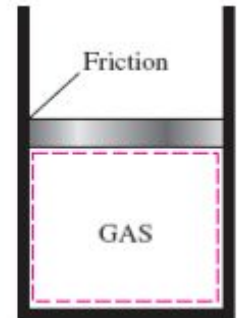
عواملی را که باعث می شوند فرآیندی برگشت ناپذیر باشد برگشت ناپذیری گویند. این عوامل شامل اصطکاک، انبساط نامقید، اختلاط دو گاز، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، مقاومت الکتریکی، تغییر شکل غیر الاستیک جامدات، و واکنش های شیمیایی هستند. وجود هر یک از این عوامل باعث می شود فرآیند برگشت ناپذیر باشد. هیچ یک از عوامل بالا در فرآیند برگشت پذیر وجود ندارد. بعضی از برگشت ناپذیری هایی که اغلب با آنها روبرو می شویم در زیر توضیح داده شده اند.

## اصطکاک

اصطکاک از عوامل شناخته شده ی برگشت ناپذیری است که به اجسام متحرک مربوط می شود. وقتی می خواهیم دو جسم را که با هم تماس دارند نسبت به یکدیگر به حرکت در آوریم، نیروی اصطکاک در سطح مشترک این دو جسم با این حرکت مخالف می کند، و بر غلبه بر این نیروی اصطکاک مقدار کار لازم است. کار انجام شده در فرآیند به گرما تبدیل می شود و به اجسامی که با هم تماس دارند داده می شود، و دما در سطح مشترک دو جسم افزایش می یابد. وقتی جهت حرکت معکوس شود، اجسام به حرکت اولیه بر می گردند، اما سطح مشترک خنک نمی شود، و گرما تبدیل به کار نمی شود. بلکه، کار بیشتری، ضمن غلبه بر نیروهای اصطکاکی که با حرکت معکوس نیز مخالفت می کنند. به گرما تبدیل می شود. چون سیستم ( اجسام متحرک) و اطراف نمی توانند به حالت اولیه خود برگردند، این فرآیند برگشت ناپذیر است. بنابراین، هر فرآیندی که با اصطکاک س و کار دارد برگشت ناپذیر است، و هر چه نیروی اصطکاک موجود بیشتر باشد، فرآیند برگشت ناپذیرتر است.

اصطکاک فقط به اجسام جامدی که با هم تماس دارند محدود نمی شود. اصطکاک بین سیال و جامد، و حتی بین لایه های سیالی که با سرعت های متفاوت حرکت می کنند وجود دارد. کسر قابل توجهی از قدرت تولید شده توسط موتور یک اتومبیل

صرف غلبه بر اصطکاک (نیروی دراگ) بین هوا و سطوح خارجی اتومبیل می‌شود، و به صورت قسمتی از انرژی داخلی هوا در می‌آید. این فرآیند را نمی‌توان معکوس کرد و قدرت هدر رفته را بازیافت، اگر چه انجام چنین کاری اصل پایداری انرژی را نقض نمی‌کند.

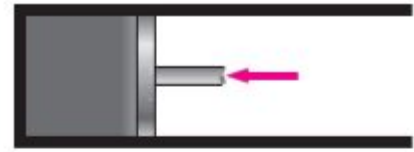


### انبساط و تراکم غیر شبه تعادلی

در فصل ۱، فرآیند شبه تعادلی را به عنوان فرآیندی تعریف کردیم که سیستم در طی آن همیشه به طور بی‌نهایت کوچک نزدیک حالت تعادلی است. وسیله سیلندر - پیستونی آدیاباتیک بی اصطکاک را در نظر بگیرید. این وسیله حاوی مقداری گاز است. اکنون پیستون را به داخل سیلندر رانده، و گاز را متراکم می‌کنیم. اگر سرعت پیستون خیلی زیاد نباشد، فشار و دما به طور بکثرت در سرتاسر گاز افزایش می‌یابد. چون سیستم همیشه نزدیک به حالت تعادلی است، این یک فرآیند شبه تعادلی است.

اکنون نیروی خارجی موثر بر پیستون را کمی کاهش می‌دهیم و گاز را کمی منبسط می‌کنیم. اگر گاز به طور آهسته منبسط شود، فرآیند انبساط نیز شبه تعادلی است. وقتی پیستون به حالت اولیه اش بر می‌گردد، تمام کار مرزی ( $p dv$ ) انجام شده روی گاز در تراکم در فرآیند انبساط به اطراف داده می‌شود. یعنی، کار خالص در این فرآیند ترکیبی صفر است. همچنین، در این فرآیند انتقال گرما وجود ندارد، و سیستم و اطراف در انتهای فرآیند معکوس به حالت اولی خود بر می‌گردند. بنابراین، انبساط یا تراکم بی اصطکاک آدیاباتیک آهسته گازها یک فرآیند برگشت پذیر است.

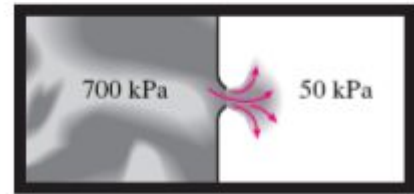
اکنون این فرآیند آدیاباتیک را با روش غیر شبه تعادلی تکرار می‌کنیم. اگر پیستون را خیلی سریع به داخل سیلندر برانیم، مولکولهای گاز در نزدیک سطح پیستون فرصت کافی را برای فرار ندارند، و در جلوی پیستون انباشته می‌شوند. این باعث می‌شود فشار در نزدیک سطح پیستون افزایش یافته، و از فشار موجود در بقیه قسمتهای داخل سیلندر بیشتر باشد. عدم یکنواختی فشار باعث می‌شود این فرآیند برگشت ناپذیر باشد. کار مرزی واقعی تابعی از فشار در سطح پیستون است. به علت وجود فشار بالاتر در سطح پیستون، فرآیند تراکم غیر شبه تعادلی در مقایسه با فرآیند تراکم شبه تعادلی، احتیاج به کار بیشتری دارد وقتی فرآیند با انبساط سریع گاز معکوس می‌شود، مولکولهای گاز در سیلندر نمی‌توانند از پیستون پیروی کنند، و یک ناحیه کم فشار در جلوی سطح پیستون به وجود آید. به علت این فشار کم در سطح پیستون، فرآیند غیر شبه تعادلی، در مقایسه با نوع تعادلی، کار کمتری تولید می‌کند. در نتیجه کار انجام شده توسط اطراف روی گاز در فرآیند تراکم است، و از این رو اطراف دارای کمبود کار خالص است. وقتی پیستون به وضعیت اولیه خود بر می‌گردد، گاز دارای انرژی داخلی مازادی است، که با کمبود کار خالص اطراف برابر است.



(a) Fast compression



(b) Fast expansion



(c) Unrestrained expansion

سیستم را با انتقال این انرژی داخلی مازاد (به صورت گرما) به اطراف می توان به حالت اولیه اش برگرداند. اما تنها راه برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه اش، این است که این گرما به طور کامل به کار تبدیل شود، و آن هم توسط یک ماشین گرمایی انجام می شود که دارای بازده ۱۰۰ باشد. ولی، انجام آن حتی به طور نظری غیر ممکن است، زیرا قانون دوم ترمودینامیک را نقض می کند. چون فقط سیستم، نه سیستم و اطراف، را می توان به حالت اولیه برگرداند نتیجه می گیریم که فرآیندهای انبساط یا تراکم غیر شبه تعادلی آدیاباتیک بازگشت ناپذیرند.

مثال دیگر برای انبساط غیر شبه تعادلی انبساط نامقید گازی است که توسط غشائی از خلاء جدا شده است. وقتی غشاء پاره می شود، گاز تمام تانک را پر می کند. تنها راه برای بازگرداندن سیستم به حالت اولیه اش این است که آن را تا حجم اولیه متراکم کنیم، و ضمناً گرما را از گاز دفع کنیم تا به دمای اولیه اش برسد. با توجه به پایستاری انرژی، به سهولت می توان نشان داد که مقدار گرمای دفع شده از گاز برابر است با مقدار کاری که توسط اطراف روی گاز انجام می شود. برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه، باید این گرما را به طور کامل به کار تبدیل کنیم و، در نتیجه، قانون دوم نقض می شود. بنابراین، انبساط نامقید گازها یک فرایند برگشت ناپذیر است.

## انتقال گرما

شکل دیگر از برگشت ناپذیری که برای همه ما آشناست انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین است. یک قوطی لیموناد سرد را که در اتاق گرمی قرار دارد در نظر بگیرید. گرما از هوای گرم اتاق به لیموناد سرد منتقل می شود. با استفاده از یخچال می توان این فرآیند را معکوس کرد و لیموناد را به دمای اولیه برگرداند، که آن هم نیازمند مقداری کار است. در انتهای فرآیند معکوس، لیموناد به حالت اولیه اش برمی گردد، اما اطراف برنمی گردد. انرژی داخلی اطراف به اندازه کاری که به یخچال داده شده است افزایش می یابد.

بازگردانی اطراف به حالت اولیه را فقط با تبدیل کامل این انرژی داخلی مازاد به کار می‌توان انجام داد، که غیرممکن است زیرا قانون دوم را نقض می‌کند. از آنجا که فقط سیستم، نه سیستم و اطراف، را می‌توان به حالت اولیه برگرداند، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است.

انتقال گرما فقط وقتی می‌تواند روی دهد که اختلاف دمای معینی بین سیستم و اطرافش وجود داشته باشد. بنابراین، از نظر فیزیکی نمی‌توان فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر داشت. اما وقتی اختلاف دمای بین دو جسم به صفر نزدیک می‌شود، انتقال گرما کمتر می‌شود. بنابراین انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای دیفرانسیلی  $dT$  را می‌توان برگشت‌پذیر دانست. وقتی  $dT$  صفر نزدیک می‌شود، جهت فرآیند را، بدون تبرید، می‌توان معکوس کرد (حداقل به طور نظری). توجه کنید که انتقال گرمای برگشت‌پذیر یک فرآیند خیالی است و در عمل نمی‌توان به آن رسید.

هر چه اختلاف دمای بین دو جسم کمتر باشد؛ آهنگ انتقال گرمای نیز کمتر است. هر گونه انتقال گرمای زیاد بر اثر اختلاف دمای کوچک نیازمند یک سطح بسیار بزرگ و مدت زمان بسیار طولانی است. بنابراین، اگر چه نزدیک شدن به انتقال گرمای برگشت‌پذیر از نقطه نظر ترمودینامیکی مطلوب است، عملاً غیر ممکن است و از نظر اقتصادی نشدنی است.

فرآیندهای برگشت‌پذیر داخلی و برگشت‌پذیر خارجی

فرآیند عبارت است از بر هم کنش بین سیستم و اطرافش و فرآیند برگشت‌پذیر شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری منسوب به سیستم با اطرافش نمی‌باشد.

فرآیند را برگشت‌پذیر داخلی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در داخل مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. در فرآیند برگشت‌پذیر داخلی، سیستم از یک مجموعه حالت‌های تعادلی می‌گذرد، و وقتی فرآیند معکوس می‌شود، سیستم ضمن بازگشت به حالت اولیه اش دقیقاً از همان حالت‌های تعادلی می‌گذرد؛ یعنی، مسیر فرآیندهای رو به جلو و رو به عقب بر هم منطبق‌اند. فرآیند شبه تعادلی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت نمونه‌ای از فرآیند برگشت‌پذیر داخلی است.

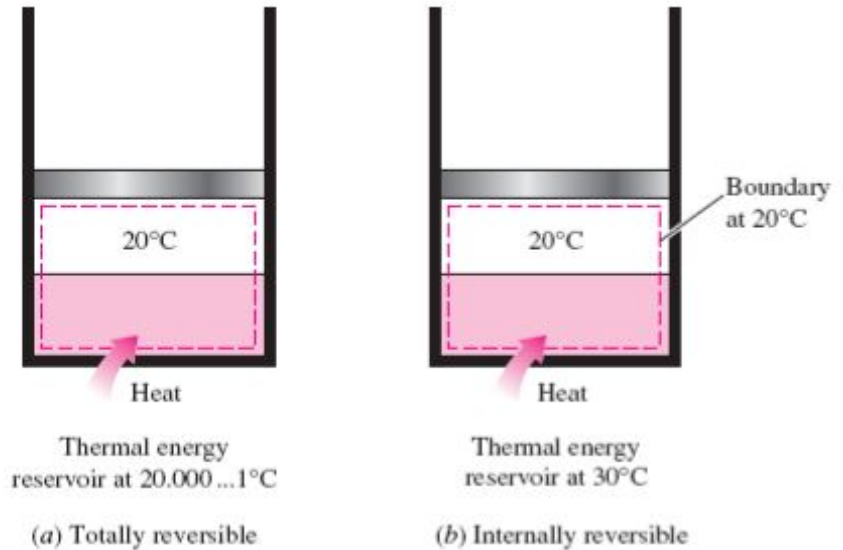
فرآیند را برگشت‌پذیر خارجی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در خارج مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. انتقال گرما بین یک منبع و یک سیستم یک فرآیند برگشت‌پذیر خارجی خواهد بود هرگاه سطح تماس بین سیستم و منبع در دمای منبع باشد.

فرآیند را بازگشت‌پذیر کلی، یا فقط بازگشت‌پذیر، می‌گویند هرگاه شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در سیستم یا در اطرافش نباشد. فرآیند برگشت‌پذیر کلی شامل هیچ گونه انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، شامل هیچ گونه تغییرات غیر شبه تعادلی، و شامل هیچ گونه اصطکاک یا اثرات اتلافی دیگر نیست.

No  
irreversibilities  
outside  
the system



به عنوان مثال انتقال گرما برای دو سیستم همسان را که شامل فرآیند تغییر فاز با فشار ثابت (و از این رو با دمای ثابت) هستند در نظر بگیرید. هر دو فرآیند برگشت پذیر داخلی اند، زیرا هر دو تک دما هستند و هر دو دقیقاً از حالت های تعادلی یکسان می گذرند. فرآیند اول برگشت پذیر خارجی نیز می باشد، زیرا انتقال گرما در این فرآیند بر اثر اختلاف دمای بی نهایت کوچک  $dT$  روی می دهد. ولی، فرآیند دوم برگشت ناپذیر خارجی است، زیرا شامل انتقال گرما بر اثر اختلاف دمای معین  $\Delta T$  است.



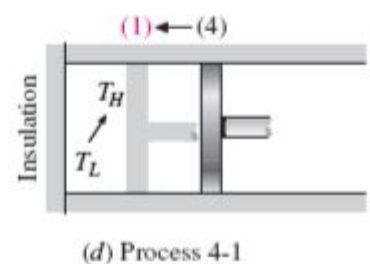
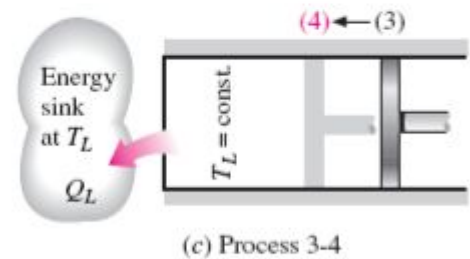
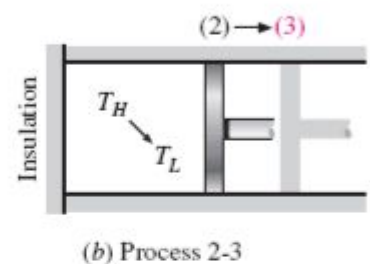
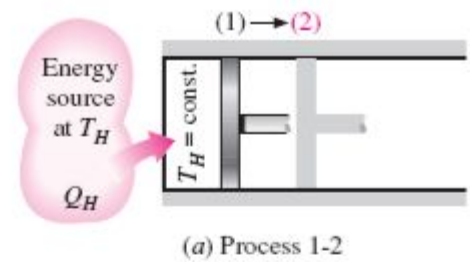
## سیکل کارنو

قبلاً گفتیم که ماشین های گرمایی وسایل سیکلی اند و گفتیم که سیال عامل ماشین گرمایی در انتهای هر سیکل به حالت اولیه اش باز می گردد. سیال عامل در قسمتی از سیکل کار انجام می دهد و در قسمت دیگر سیکل روی آن کار انجام می شود. اختلاف بین این دو، کار خالصی است که ماشین گرمایی می دهد. بازده سیکل هر ماشین گرمایی شدیداً به نحوه انجام فرآیندهای تشکیل دهنده سیکل بستگی دارد. کار خالص، و بازده سیکل، را با استفاده از فرآیندهایی که نیاز به حداقل کار دارند و حداکثر کار را تحویل می دهند، یعنی، با استفاده از فرآیندهای برگشت پذیر، می توان به حداکثر رساند. بنابراین، تعجب ندارد که سیکل های برگشت پذیر، یعنی سیکل هایی که تماماً از فرآیندها برگشت پذیر تشکیل شده اند، کارآمدترین سیکل ها هستند.

سیکل های برگشت پذیر را در عمل نمی توان به دست آورد زیرا برگشت ناپذیری ها را در یک فرآیند نمی توان حذف کرد. ولی، عملکرد سیکل های برگشت پذیر بالاترین محدوده عملکرد سیکل های واقعی را تشکیل می دهند. ماشین های گرمایی و یخچال هایی که در سیکل های برگشت پذیر کار می کنند به عنوان مدل هایی هستند که ماشین های گرمایی و یخچال های واقعی را می توان با آنها مقایسه کرد. همچنین، سیکل های برگشت پذیر به عنوان نقاط شروع بررسی سیکل های واقعی به کار می روند، و با تغییرات لازم در آنها، سیکل های واقعی تحلیل می شوند.

سیکل کارنو معروف ترین سیکل برگشت پذیر است، که برای اولین بار توسط مهندس فرانسوی سعیدی کارنو در سال 1824 مطرح شد. ماشین گرمایی نظری را که بر مبنای سیکل کارنو کار می کند ماشین گرمایی کارنو می گویند. سیکل کارنو از چهار فرآیند برگشت پذیر تشکیل شده است دو فرآیند تک دما و دو فرآیند آدیاباتیک و آن را در یک سیستم بسته یا در یک سیستم با جریان پایا می توان اجرا کرد.

سیستم بسته متشکل از گاز درون وسیله سیلندر - پیستونی آدیاباتیکی را در نظر بگیرید. عایق‌بندی سر سیلندر طوری است که می‌توان آن را برداشت و، برای انتقال گرما، سیلندر را با منبعی تماس داد. چهار فرآیندی که سیکل کارنو را تشکیل می‌دهند عبارتند از:



**انبساط تک دمای برگشت پذیر** (فرآیند 1-2، ثابت  $T_H$ ). در ابتدا (حالت 1)، دمای گاز  $T_H$  است و سر سیلندر با یک منبع دما بالا با دمای  $T_H$  تماس نزدیک دارد. گاز به طور آهسته منبسط می‌شود، و روی اطراف کار انجام می‌دهد. با انبساط گاز، دمای گاز می‌خواهد کاهش یابد. اما به محض این که دما به اندازه بی‌نهایت کوچک  $dT$  افت می‌کند، مقداری گرما از منبع به طرف گاز جریان می‌یابد، و دمای گاز را تا  $T_H$  بالا می‌برد. بنابراین دمای گاز در  $T_H$  ثابت می‌ماند. چون اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ‌وقت از مقدار دیفرانسیلی  $dT$  بیشتر نمی‌شود، این یک فرآیند انتقال گرمای برگشت پذیر است. این فرآیند ادامه می‌ابد تا پیستون به وضعیت 2 می‌رسد. مقدار گرمای کل داده شده به گاز در این فرآیند  $Q_H$  است.

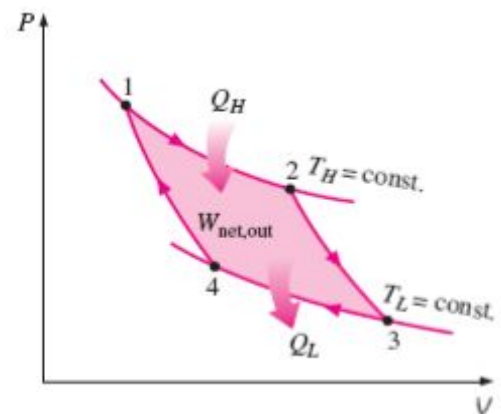


**انبساط آدیاباتیکی برگشت پذیر** (فرآیند 2-3، کاهش دما از  $T_H$  تا  $T_L$ ). در حالت 2، منبعی که با سر سیلندر تماس داشت برداشته می شود و عایق بندی جای آن را می گیرد و به این ترتیب، سیستم آدیاباتیکی می شود. گاز به آهستگی به انبساط خود ادامه می دهد، روی اطراف کار انجام می دهد تا این که دمای آن از  $T_H$  تا  $T_L$  افت می کند (حالت 3). پیستون را بی اصطکاک و فرآیند را شبه تعادلی می گیریم، بنابراین فرآیند برگشت پذیر و آدیاباتیکی است.

**تراکم تک دمای برگشت پذیر** (فرآیند 3-4، ثابت  $T_L$ ). در حالت 3، عایق بندی در سر سیلندر برداشته می شود، و سیلندر با یک منبع دما پایین با دمای  $T_L$  تماس داده می شود. اکنون پیستون با نیروی خارجی به طرف داخل رانده می شود، و روی گاز کار انجام می دهد. با تراکم گاز، دمای آن می خواهد افزایش یابد. اما به محض این که دما به مقدار بی نهایت کوچک  $dT$  بالا می رود، گرما از گاز به طرف منبع جریان می یابد، و دمای گاز تا  $T_L$  افت می کند. به این ترتیب، دمای گاز در  $T_L$  ثابت می ماند. از آنجا که اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ وقت از مقدار دیفرانسیلی  $dT$  بیشتر نمی شود، این یک فرآیند انتقال گرمای برگشت پذیر است. این فرآیند ادامه می یابد تا پیستون به حالت 4 می رسد. مقدار گرمای دفع شده از گاز در این فرآیند  $Q_L$  است.

**تراکم آدیاباتیکی برگشت پذیر** (فرآیند 4-1، دما از  $T_L$  تا  $T_H$  افزایش می یابد). در حالت 4، منبع دما پایین حذف می شود و جای آن را عایق بندی می گیرد. گاز به طور برگشت پذیر متراکم می شود، و به حالت اولیه اش برمی گردد (حالت 1). دما در این فرآیند تراکم آدیاباتیکی برگشت پذیر از  $T_L$  تا  $T_H$  افزایش می یابد، و سیکل تکمیل می شود.

نمودار  $p-v$  این سیکل در شکل 5-44 نشان داده شده است. می دانیم که سطح زیر منحنی نمودار  $p-v$  کار مرزی را برای فرآیندهای شبه تعادلی (برگشت پذیر داخلی) نشان می دهد، و در این فرآیند سطح زیر منحنی 1-2-3-4 کار انجام شده توسط گاز در قسمت انبساطی سیکل است، و سطح زیر منحنی 3-4-1 کار انجام شده روی گاز در قسمت تراکمی سیکل است. مساحت محصور بین مسیرهای مختلف سیکل (سطح 1-4-3-2-1) اختلاف بین این دو سطح است و کار خالص انجام شده را در سیکل نشان می دهد.



توجه کنید اگر، برای صرفه جویی  $Q_L$ ، گاز را در مرحله 3 به جای تک دما به طور آدیاباتیکی متراکم می کردیم، سیکل در حالت 2 خاتمه می یافت و فرآیند روی مسیر 3-2 برمی گشت. با انجام این کار  $Q_L$  را صرفه جویی می کردیم اما نمی توانستیم هیچ کار خالص خروجی از این ماشین داشته باشیم. بار دیگر دیده می شود که یک ماشین گرمایی برای انجام سیکل و تولید مقداری کار خالص باید حداقل با دو منبع، با دماهای متفاوت، کار کند.



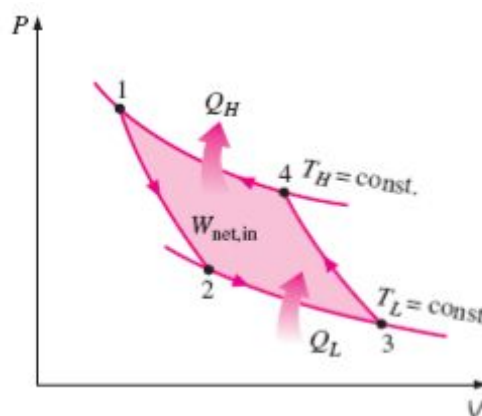
سیکل کارنو را در سیستم‌های با جریان پایا نیز می‌توان اجر کرد. این موضوع را در فصل 8 در ارتباط با سایر سیکل‌های قدرت بررسی می‌کنیم.

سیکل کارنو، به عنوان یک سیکل برگشت‌پذیر، کارآمدترین سیکلی است که بین دو دمای مشخص کار می‌کند. اگر چه سیکل کارنو را در عمل نمی‌توان به دست آورد، بازه سیکل‌های واقعی را با نزدیک‌تر کردن به سیکل کارنو می‌توان بهبود بخشید.

### سیکل کارنوی معکوس

سیکل کارنوی ماشین گرمایی که در بالا توضیح داده شده یک سیکل برگشت‌پذیر است. بنابراین، تمام فرآیندهای آن را می‌توان معکوس کرده، و آن را به سیکل تبرید کارنو تبدیل کرد. این سیکل دقیقاً همان سیکل قبلی است، با این تفاوت که جهت برهم کنش‌های گرما و کار معکوس می‌شوند: گرما با مقدار  $Q_L$  از منبع دما پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار  $Q_H$  به منبع دما بالا پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار  $Q_H$  به منبع دما بالا دفع می‌شود، و برای انجام این فرآیندها کار خالص ورودی  $W$  مورد نیاز است.

نمودار  $P-v$  سیکل کارنوی معکوس مانند نموداری است که برای سیکل کارنو داده شد، به جز این که جهت فرآیندها معکوس می‌شوند.

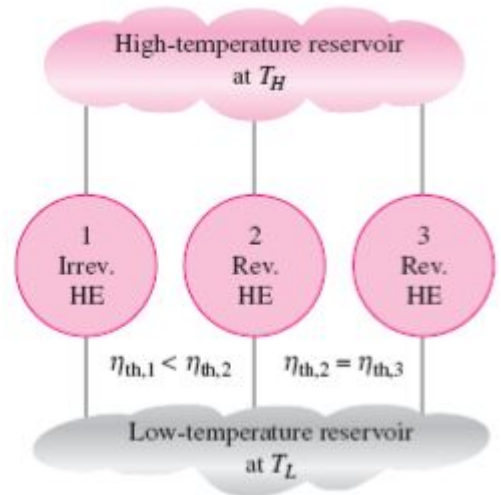


### 5-9 اصول کارنو

قانون دوم ترمودینامیک برای کارکرد وسایل سیکلی محدودیت‌هایی قائل می‌شود که با بیان‌های کلین-پلانک و کلازیوس توضیح داده شده‌اند. ماشین گرمایی از طریق تبادل گرما با یک منبع نمی‌تواند کار کند، و یخچال نمی‌تواند بدون دریافت کار خالص از منبع خارجی کار کند.

از این عبارات نتایج مهمی می‌گیریم، دو تا از این نتایج مربوط می‌شوند به بازه گرمایی ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر (یعنی، واقعی)، و آنها را اصول کارنو می‌گویند با تعریف‌های زیر:

- 1- بازه ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر همیشه کمتر از بازه ماشین برگشت‌پذیری است که بین همان دو منبع کار می‌کند.
  - 2- بازه‌های تمام ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر که بین دو منبع یکسان کار می‌کنند با هم برابرند.
- می‌توان نشان داد که نقض هر یک از دو عبارت بالا منجر به نقض قانون دوم ترمودینامیک می‌شود و به این ترتیب صحت آنها اثبات می‌شود.

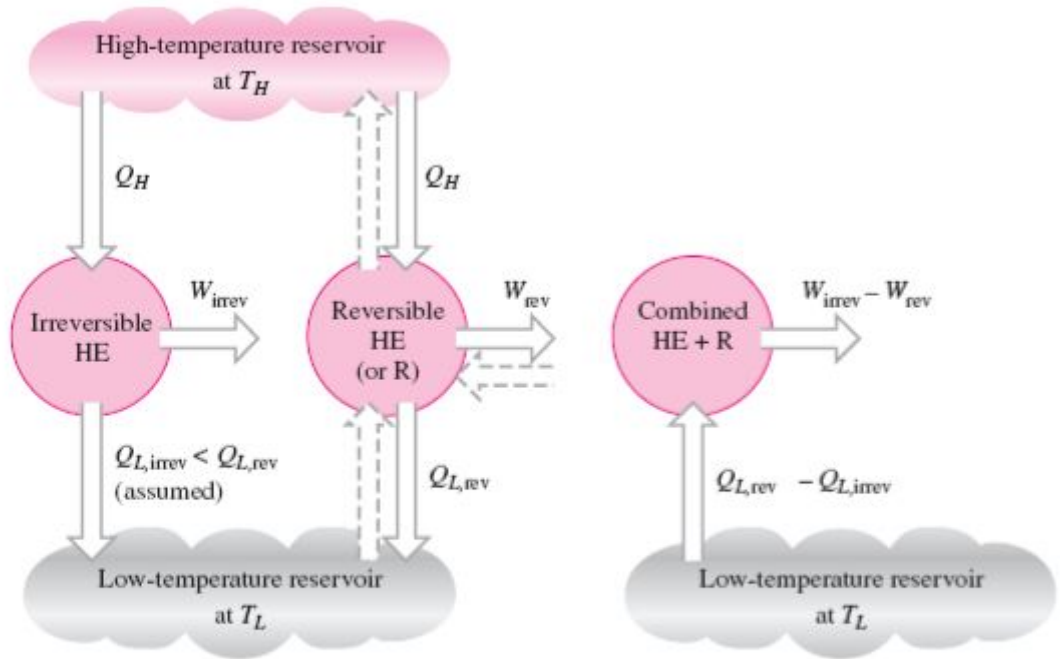


برای اثبات صحت اصل اول کارنو، دو ماشین گرمایی را که بین منابع یکسان کار می کنند. در نظر بگیرید. یکی از ماشین ها برگشت پذیر، و دیگری برگشت ناپذیر است. به هر ماشین مقدار گرمای یکسان  $Q_H$  می دهیم. مقدار کار تولید شده توسط ماشین گرمایی برگشت پذیر  $W_{rev}$ ، و توسط ماشین گرمایی برگشت ناپذیر  $W_{irrev}$  است.

برای نقض اصل اول کارنو، فرض می کنیم که ماشین گرمایی برگشت ناپذیر از ماشین گرمایی برگشت پذیر کارآمدتر است (یعنی،  $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$ ) و از این رو، در مقایسه با ماشین گرمایی برگشت پذیر، کار بیشتری تولید می کند و اکنون ماشین گرمایی برگشت پذیر را معکوس می کنیم تا مانند یخچال کار کند. این یخچال کار  $W_{rev}$  را دریافت می کند و به منبع دما بالا گرما می دهد. چون یخچال مقدار  $Q_H$  گرما را به منبع دما بالا می دهد و ماشین گرمایی برگشت ناپذیر همان مقدار گرما را از این منبع دریافت می کند، تبادل خالص گرما برای این منبع صفر است. بنابراین، این تبادل گرما را با داشتن یخچالی که  $Q_H$  را مستقیماً به ماشین گرمایی برگشت ناپذیر می دهد می توان حذف کرد.

اکنون با در نظر گرفتن ترکیب یخچال- ماشین برگشت ناپذیر ماشینی داریم که کار خالص با مقدار  $W_{irrev} - W_{rev}$  را تولید می کند و فقط با یک منبع تبادل گرما دارد- نقض بیان کلونین- پلانک. بنابراین، فرض اول،  $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$  نادرست است. و نتیجه می گیریم هیچ ماشین گرمایی نمی تواند کارآمدتر از یک ماشین گرمایی برگشت پذیری باشد که بین همان دو منبع کار می کند.

اصل دوم کارنو را نیز به طور مشابه می توان ثابت کرد. در اینجا، ماشین برگشت ناپذیر را با یک ماشین برگشت پذیر، که از ماشین برگشت پذیر اول کارآمدتر است و کار بیشتری تولید می کند، جایگزین می کنیم. با دنبال کردن استدلال بالا، نتیجه می گیریم ماشینی داریم که مقداری کار تولید می کند. در حالی که با یک منبع تنها تبادل گرما دارد، که نقض قانون دوم است. بنابراین، نتیجه می گیریم که هیچ ماشین برگشت پذیری نمی تواند از ماشین برگشت پذیر دیگری که بین همان دو منبع کار می کند کارآمدتر باشد، و این موضوع به نحوه تکمیل سیکل یا به سیال عامل بستگی ندارد.



(a) A reversible and an irreversible heat engine operating between the same two reservoirs (the reversible heat engine is then reversed to run as a refrigerator)

(b) The equivalent combined system

## ماشین گرمایی کارنو

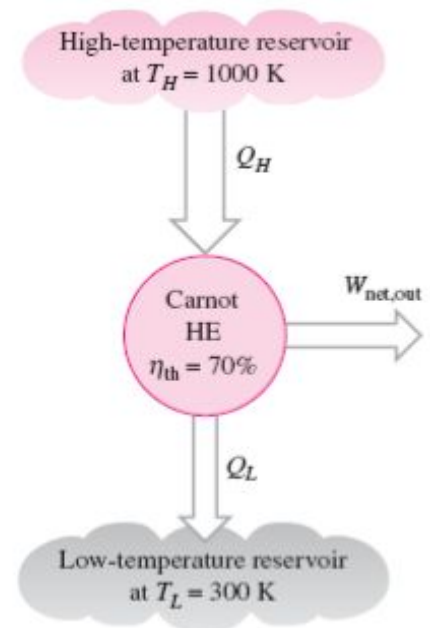
ماشین گرمایی فرضی را که در سیکل برگشت پذیر کارنو کار می کند ماشین گرمایی کارنو می گویند. بازده گرمایی هر ماشین گرمایی، برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر، با معادله 5-6 داده می شود.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

که در آن  $Q_H$  گرمای منتقل شده از منبع دما بالا با دمای  $T_H$  به ماشین گرمایی است، و  $Q_L$  گرمای دفع شده به منبع دما پایین با دمای  $T_L$  است برای ماشین های گرمایی برگشت پذیر، نسبت انتقال گرما در رابطه بالا را با نسبت دماهای مطلق دو منبع می توان جایگزین کرد، (معادله 5-18). بنابراین بازده ماشین کارنو، یا هر ماشین گرمایی برگشت پذیر، به صورت زیر است

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (20-5)$$

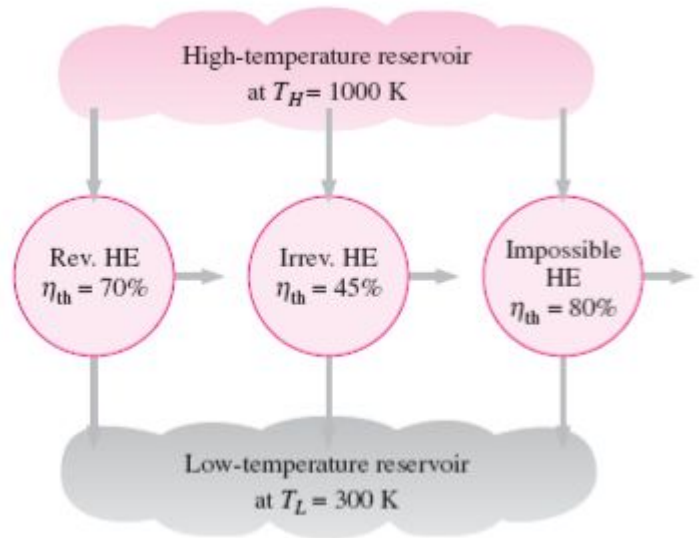
این رابطه را بازده کارنو می گویند، زیرا ماشین گرمایی کارنو معروفترین ماشین برگشت پذیر است. این بیشترین بازدهی است که هر ماشین گرمایی که بین دو منبع گرمایی با دماهای  $T_H$  و  $T_L$  کار می کند می تواند دارا باشد. تمام ماشین های گرمایی برگشت ناپذیر (یعنی، واقعی) که بین این حدود دما ( $T_H$  و  $T_L$ ) کار می کنند دارای بازده کمتری هستند. بازده ماشین گرمایی واقعی نمی تواند به این ماکزیمم مقدار نظری برسد زیرا نمی توان تمام بازگشت ناپذیری های مربوط به سیکل واقعی را از بین برد.



توجه کنید که  $T_H$  و  $T_L$  در معادله 5-20 دماهای مطلق اند.

استفاده از  $^{\circ}\text{C}$  یا  $^{\circ}\text{F}$  برای دما در این معادله نتایج اشتباه می دهد.

بازده گرمایی ماشین های گرمایی واقعی و برگشت پذیر که بین حدود دمایی یکسان کار می کنند به صورت زیر با هم مقایسه می شوند.



(21-5)

ماشین گرمایی برگشت ناپذیر  $\eta_{th} < \eta_{th,rev}$

ماشین گرمایی برگشت پذیر  $\eta_{th} = \eta_{th,rev}$

ماشین گرمایی غیر ممکن  $\eta_{th} > \eta_{th,rev}$

بیشتر وسایل مولد کار (ماشین های گرمایی) دارای بازده کمتر از 40 درصد هستند، که در مقایسه با 100 درصد، مقدار پایینی است. ولی، هنگام ارزیابی عملکرد ماشین های گرمایی واقعی، بازده را نباید با 100 درصد مقایسه کنیم؛ بلکه، باید آن را با بازده یک ماشین گرمایی برگشت پذیری که بین همان حدود دما کار می کند مقایسه کنیم زیرا این بالاترین بازده نظری است، نه 100 درصد.

ماکزیمم بازده نیروگاه بخاری که بین  $T_H = 750\text{ k}$  و  $T_L = 300\text{ k}$  کار می کند، از معادله 5-20، برابر با 60 درصد است. در مقایسه با این مقدار، بازده واقعی 40 درصد چندان بد نیست، اگر چه هنوز جای افزایش دارد. از معادله 5-20 دیده می شود که بازده ماشین گرمایی کارنو با افزایش  $T_H$ ، یا با کاهش  $T_L$ ، افزایش می یابد. انتظار چنین نتیجه ای را داریم زیرا با کاهش  $T_L$ ، مقدار گرمای دفع شده نیز کاهش می یابد، و بازده کارنو به 1 نزدیک می شود. این حالت برای ماشین های گرمایی واقعی نیز صحت دارد. بازده گرمایی ماشین های گرمایی واقعی را با انتقال گرما به ماشین در بالاترین دمای ممکن (که توسط مقاومت مصالح محدود می شود) و با دفع گرما در پایین ترین دمای ممکن (که توسط محیط خنک کن از قبیل رودخانه ها، دریاچه ها، یا اتمسفر محدود می شود) می توان به حداکثر رساند.

## یخچال و پمپ گرمای کارنو

یخچال یا پمپ گرمایی را که بر مبنای سیکل کارنوی معکوس کار می کند یخچال کارنو، یا پمپ گرمای کارنو می گویند. ضریب عملکرد هر یخچال یا پمپ گرما، برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر، با معادلات 5-11 و 5-13 داده می شود

$$COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{و} \quad COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

که در آن  $Q_L$  مقدار گرمای جذب شده از محیط دما پایین، و  $Q_H$  مقدار گرمای دفع شده به محیط دما بالاست. با قرار دادن نسبت دماهای مطلق محیط‌های دما بالا و دما پایین به جای نسبت انتقال گرما در روابط بالا (بر طبق معادله 5-18)، می‌توان ضریب عملکرد تمام یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر (مانند یخچال و پمپ گرمای کارنو) را تعیین کرد. بنابراین روابط COP برای یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر به صورت زیر درمی‌آیند

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (22-5)$$

و

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (23-5)$$

اینها بیشترین ضرایب عملکردی هستند که یخچال یا پمپ گرمایی که بین حدود دمایی  $T_H, T_L$  کار می‌کند می‌تواند دارا باشد. تمام یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی که بین این حدود دما ( $T_H, T_L$ ) کار می‌کنند دارای ضریب عملکرد پایین‌ترند.

ضرایب عملکرد یخچال‌های واقعی و برگشت‌پذیر را که بین حدود دمای یکسان کار می‌کنند به صورت زیر می‌توان با هم مقایسه کرد

$$COP_R \begin{cases} < COP_{R,rev} \\ = COP_{R,rev} \\ > COP_{R,rev} \end{cases}$$

با جایگزین کردن مقادیر  $COP_R$  در معادله 5-24 توسط  $COP_{HP}$ ، می‌توان رابطه مشابهی را برای پمپ‌های گرما به دست آورد.

COP یخچال یا پمپ گرمای برگشت‌پذیر بیشترین مقدار نظری برای حدود دمای داده شده است. با بهبود طرح یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی می‌توان ضرایب عملکرد آنها را به این مقدار نظری نزدیک کرد، اما هیچ وقت نمی‌توان به آن رسید. شایان ذکر است که COP یخچال‌ها و پمپ‌های گرما با کاهش  $T_L$  کاهش می‌یابد. یعنی، برای جذب گرما از محیط‌های دما پایین، کار بیشتری لازم دارند. وقتی دمای فضای سرد شده به صفر نزدیک می‌شود، مقدار کار لازم برای تولید مقدار معینی تبرید به بی‌نهایت میل می‌کند و  $COP_R$  به صفر نزدیک می‌شود.

