

اهداف فصل ۹ عبارتند از:

■ ارزیابی عملکرد چرخه‌های توان گازی که در آن‌ها سیال عامل در تمام مراحل چرخه، به صورت گاز باقی می‌ماند.

■ تدوین فرضیات ساده‌ساز قابل کاربرد برای چرخه‌های توان گازی.

■ بررسی عملکرد موتورهای رفت و برگشتی.

■ تحلیل چرخه‌های توان گازی بسته و باز.

■ حل مسائل مربوط به چرخه‌های اتو، دیزل، استرلینگ و اریکسون.

■ حل مسائل مربوط به چرخه برایتون؛ چرخه برایتون با بازیابی؛ و چرخه برایتون با خنک‌کاری میانی، گرمایش مجدد و بازیابی.

■ تحلیل چرخه‌های پیش‌رانش جت.

■ انجام تحلیل قانون دوم ترمودینامیک برای چرخه‌های توان گازی.

دو حوزه مهم کاربرد ترمودینامیک، تولید توان و تبرید هستند. هر دوی این فرایندها معمولاً توسط سیستم‌هایی انجام می‌شوند که بر اساس یک چرخه ترمودینامیکی کار می‌کنند. چرخه‌های ترمودینامیکی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: چرخه‌های توان (که در این فصل و فصل ۱۰ به آن‌ها پرداخته می‌شود) و چرخه‌های تبرید (که در فصل ۱۱ مورد بحث قرار می‌گیرند).

دستگاه‌ها یا سیستم‌هایی که برای تولید توان خالص خروجی به کار می‌روند، اغلب موتور نامیده می‌شوند و چرخه‌های ترمودینامیکی حاکم بر آن‌ها، چرخه‌های توان نام دارند. دستگاه‌ها یا سیستم‌هایی که برای ایجاد اثر سرمایشی (تبرید) استفاده می‌شوند، یخچال، تهویه مطبوع یا پمپ حرارتی نامیده می‌شوند و چرخه‌های آن‌ها، چرخه‌های تبرید نام دارند.

چرخه‌های ترمودینامیکی را همچنین می‌توان بر اساس فاز سیال عامل، به چرخه‌های گازی و چرخه‌های بخاری طبقه‌بندی کرد. در چرخه‌های گازی، سیال عامل در تمام طول چرخه در فاز گازی باقی می‌ماند، در حالی که در چرخه‌های بخاری، سیال عامل در بخشی از چرخه به صورت بخار و در بخش دیگر به صورت مایع وجود دارد.

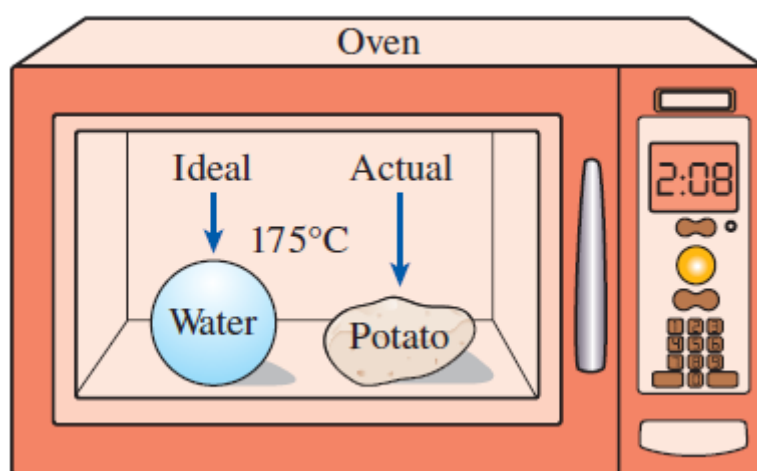
چرخه‌های ترمودینامیکی را می‌توان به روشی دیگر نیز دسته‌بندی کرد: چرخه‌های بسته و باز. در چرخه‌های بسته، سیال عامل در پایان چرخه به حالت اولیه بازمی‌گردد و دوباره به چرخه وارد می‌شود (بازگردش). در

چرخه‌های باز، سیال عامل در پایان هر چرخه تعویض (نو) می‌شود و به چرخه بازگردانده نمی‌شود. در موتورهای خودرو، گازهای حاصل از احتراق تخلیه شده و با مخلوط تازه هوا و سوخت جایگزین می‌شوند. موتور بر اساس یک چرخه مکانیکی کار می‌کند، اما سیال عامل یک چرخه ترمودینامیکی کامل را طی نمی‌کند.

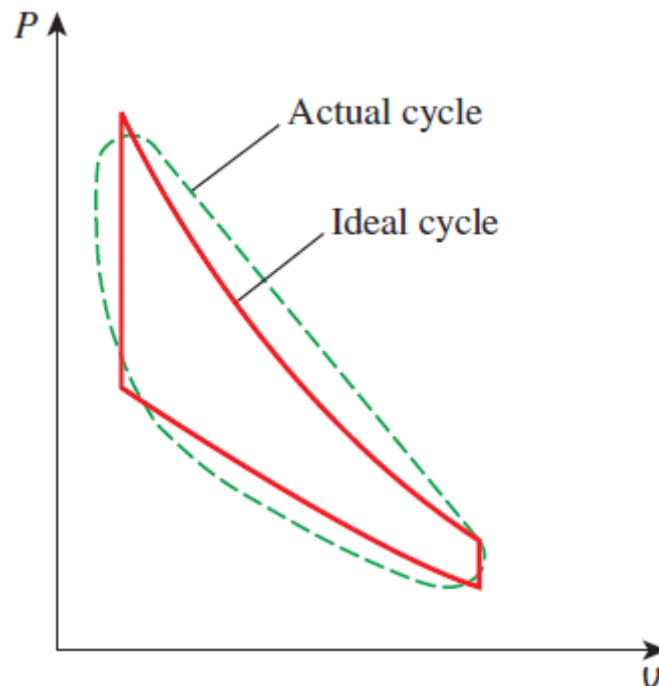
موتورهای حرارتی بر اساس نحوه تأمین گرما برای سیال عامل، به موتورهای احتراق داخلی و احتراق خارجی طبقه‌بندی می‌شوند. در موتورهای احتراق خارجی (مانند نیروگاه‌های بخار)، گرما از یک منبع خارجی—نظیر کوره، چاه زمین‌گرمایی، راکتور هسته‌ای یا حتی خورشید—به سیال عامل داده می‌شود. در موتورهای احتراق داخلی (مانند موتورهای خودرو)، این کار با سوزاندن سوخت در داخل مرزهای سیستم انجام می‌گیرد. در این فصل، چرخه‌های مختلف توان گازی تحت برخی فرض‌های ساده‌کننده تحلیل می‌شوند.

۹-۱ ■ ملاحظات اساسی در تحلیل چرخه‌های توان

بیشتر دستگاه‌های تولیدکننده توان بر اساس چرخه‌ها کار می‌کنند و مطالعه چرخه‌های توان بخش هیجان‌انگیز و مهمی از ترمودینامیک است. چرخه‌هایی که در دستگاه‌های واقعی با آنها مواجه می‌شویم، به دلیل وجود اثرات پیچیده‌ای مانند اصطکاک و عدم وجود زمان کافی برای ایجاد شرایط تعادل در طول چرخه، به سختی قابل تجزیه و تحلیل هستند. برای امکان‌پذیر کردن مطالعه تحلیلی یک چرخه، باید پیچیدگی‌ها را در سطح قابل مدیریت نگه داریم و از برخی ایده‌آل‌سازی‌ها استفاده کنیم (شکل ۹-۱). هنگامی که چرخه واقعی از تمام برگشت‌ناپذیری‌ها و پیچیدگی‌های داخلی عاری می‌شود، در نهایت چرخه‌ای خواهیم داشت که شباهت زیادی به چرخه واقعی دارد اما کاملاً از فرآیندهای برگشت‌پذیر داخلی تشکیل شده است. چنین چرخه‌ای، چرخه ایده‌آل نامیده می‌شود (شکل ۹-۲).



شکل ۹-۱ مدل‌سازی ابزار مهندسی قدرتمندی است که بینش عمیق و سادگی را به بهای اندکی کاهش در دقت، فراهم می‌آورد.



شکل ۹-۲ تحلیل بسیاری از فرآیندهای پیچیده را می‌توان با بهره‌گیری از برخی ساده‌سازی‌های آرمانی، به سطحی قابل‌مدیریت تقلیل داد.

یک مدل ایده‌آل ساده، مهندسان را قادر می‌سازد تا اثرات پارامترهای اصلی حاکم بر چرخه را بدون درگیر شدن در جزئیات مطالعه کنند. چرخه‌های مورد بحث در این فصل تا حدودی ایده‌آل هستند، اما همچنان ویژگی‌های کلی چرخه‌های واقعی خود را حفظ می‌کنند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل چرخه‌های ایده‌آل، برای چرخه‌های واقعی نیز قابل اجرا هستند. به عنوان مثال، بازده حرارتی چرخه اتو، چرخه ایده‌آل برای موتورهای خودرو با احتراق جرقه‌ای، با افزایش نسبت تراکم افزایش می‌یابد. این مورد در مورد موتورهای خودرو واقعی نیز صادق است. با این حال، مقادیر عددی به دست آمده از تجزیه و تحلیل یک چرخه ایده‌آل، لزوماً نمایانگر چرخه‌های واقعی نیستند و باید در تفسیر آنها دقت شود. تجزیه و تحلیل ساده ارائه شده در این فصل برای چرخه‌های مختلف قدرت مورد توجه عملی، می‌تواند به عنوان نقطه شروعی برای مطالعه عمیق‌تر نیز باشد. موتورهای حرارتی به منظور تبدیل انرژی حرارتی به کار طراحی شده‌اند و عملکرد آنها بر حسب راندمان حرارتی η_{th} بیان می‌شود که نسبت کار خالص تولید شده توسط موتور به کل گرمای ورودی است:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{OR} \quad \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} \quad (9-1)$$

به یاد داشته باشید که موتورهای حرارتی دارای چرخه کاملاً برگشت پذیر، مانند چرخه کارنو، در مقایسه با تمام موتورهای حرارتی که بین سطوح دمایی یکسانی کار می کنند، از بیشترین بازده حرارتی برخوردارند. به عبارت دیگر، هیچ کس نمی تواند چرخه ای با بازدهی بالاتر از چرخه کارنو ابداع کند. در این صورت، این پرسش به طور طبیعی مطرح می شود: اگر چرخه کارنو بهترین چرخه ممکن است، چرا به جای پرداختن به چندین چرخه موسوم به «ایده آل»، از آن به عنوان الگوی اصلی برای تمام موتورهای حرارتی استفاده نمی کنیم؟ پاسخ این پرسش به ملاحظات عملی و سخت افزاری مربوط می شود. بیشتر چرخه هایی که در عمل با آن ها سروکار داریم، تفاوت های چشمگیری با چرخه کارنو دارند و همین امر، استفاده از آن را به عنوان یک مدل واقع گرایانه نامناسب می سازد. هر یک از چرخه های ایده آلی که در این فصل بررسی می شوند، با دستگاهی خاص که کار تولید می کند مرتبط بوده و در واقع نسخه ای آرمانی شده از چرخه واقعی آن دستگاه هستند.

چرخه های ایده آل از نظر درونی برگشت پذیر هستند، اما برخلاف چرخه کارنو، لزوماً از نظر بیرونی برگشت پذیر نیستند. به عبارت دیگر، ممکن است شامل برگشت ناپذیری های خارجی نسبت به سیستم باشند، مانند انتقال حرارت ناشی از اختلاف دمای محسوس (محدود). بنابراین، بازده حرارتی یک چرخه ایده آل، به طور کلی، کمتر از بازده یک چرخه کاملاً برگشت پذیر است که بین همان حدود دمایی کار می کند. با این حال، به دلیل ایده آل سازی های به کاررفته، بازده آن همچنان به مراتب بالاتر از بازده حرارتی یک چرخه واقعی است (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۹ موتور خودرو با محفظه احتراق نمایان.

ایده آل سازی ها و ساده سازی هایی که معمولاً در تحلیل چرخه های توان به کار می روند، به شرح زیر خلاصه می شوند:

۱. چرخه فاقد هرگونه اصطکاک است. بنابراین، سیال عامل هنگام جریان در لوله‌ها یا تجهیزاتی مانند مبدل‌های حرارتی، دچار افت فشار نمی‌شود.

۲. تمام فرآیندهای انبساط و تراکم به صورت شبه تعادلی انجام می‌شوند.

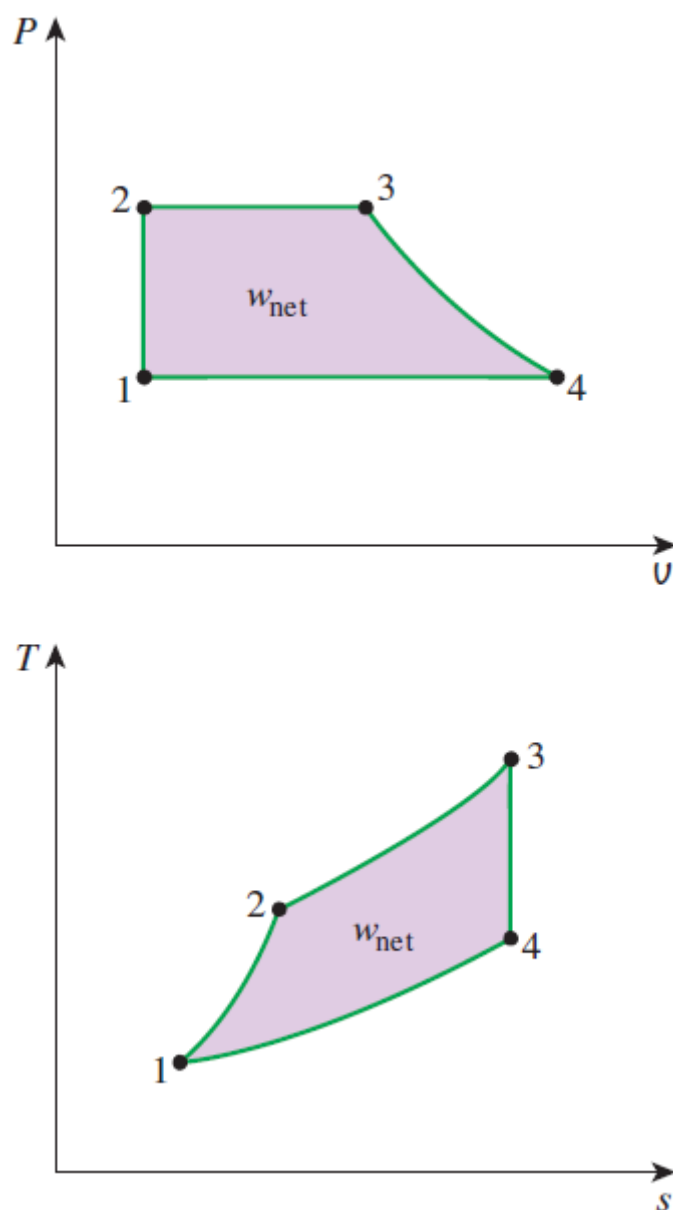
۳. لوله‌های متصل‌کننده اجزای مختلف سیستم به‌خوبی عایق‌بندی شده‌اند و انتقال حرارت از طریق آن‌ها ناچیز است.

صرف‌نظر کردن از تغییرات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل سیال عامل، ساده‌سازی رایج دیگری در تحلیل چرخه‌های توان است. این فرض معقولی است، زیرا در تجهیزاتی که شامل کار شفت هستند (مانند توربین‌ها، کمپرسورها و پمپ‌ها)، مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل معمولاً در مقایسه با سایر جملات معادله انرژی بسیار ناچیزند. سرعت سیال در تجهیزاتی مانند کندانسورها، بویلرها و محفظه‌های اختلاط معمولاً پایین است و جریان‌های سیال تغییرات سرعت اندکی را تجربه می‌کنند؛ این امر نیز باعث می‌شود تغییرات انرژی جنبشی ناچیز تلقی شود.

تنها تجهیزاتی که در آن‌ها تغییرات انرژی جنبشی قابل توجه است، نازل‌ها و دیفیوزرها هستند که به‌طور خاص برای ایجاد تغییرات بزرگ در سرعت طراحی شده‌اند.

در فصل‌های پیشین، نمودارهای خواص مانند نمودارهای $P-V$ و $T-S$ به عنوان ابزارهای کمکی ارزشمندی در تحلیل فرآیندهای ترمودینامیکی عمل کرده‌اند.

در هر دو نمودار $P-V$ و $T-S$ ، مساحت محصور بین منحنی‌های فرآیند یک چرخه، نشان‌دهنده کار خالص تولیدشده در طول چرخه است (شکل ۹-۴) که با انتقال حرارت خالص آن چرخه نیز برابر است. نمودار $T-S$ به‌ویژه به عنوان ابزاری بصری در تحلیل چرخه‌های توان ایده‌آل مفید است. یک چرخه توان ایده‌آل فاقد هرگونه برگشت‌ناپذیری داخلی است؛ بنابراین، تنها عاملی که می‌تواند در طول یک فرایند باعث تغییر آنتروپی سیال عامل شود، انتقال حرارت است.



شکل ۹-۴ در هر دو نمودار $P-v$ و $T-s$ ، مساحت محصور در میان منحنی فرایند نشان‌دهنده کار خالص چرخه است.

در نمودار $T-s$ ، فرآیند دریافت گرما در جهت افزایش آنتروپی و فرآیند دفع گرما در جهت کاهش آنتروپی پیش می‌رود؛ همچنین فرآیند آیزنتروپیک (که از نظر داخلی برگشت‌پذیر و بی‌دررو است) با آنتروپی ثابت انجام می‌شود. مساحت زیر منحنی فرآیند در نمودار $T-s$ ، نشان‌دهنده مقدار انتقال گرما در آن فرآیند است. مساحت زیر منحنی فرآیند دریافت گرما در نمودار $T-s$ ، معیاری هندسی از کل گرمای ورودی به چرخه (q_{in}) است و مساحت زیر منحنی فرآیند دفع گرما، معیاری از کل گرمای دفع‌شده (q_{out}) محسوب می‌شود. اختلاف میان این دو مقدار (یعنی مساحت محصور در منحنی چرخه)، نشان‌دهنده انتقال خالص گرماست که با کار خالص تولیدشده در چرخه نیز برابر است. بنابراین، در نمودار $T-s$ ، نسبت مساحت

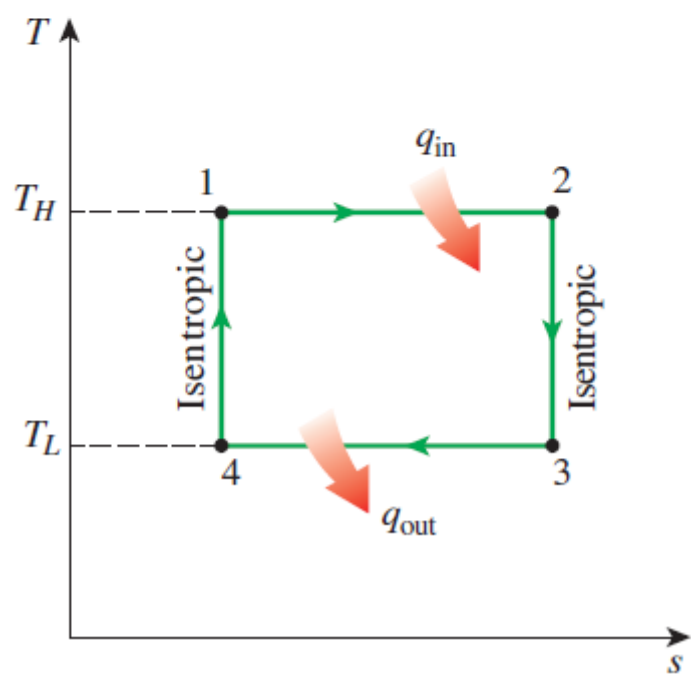
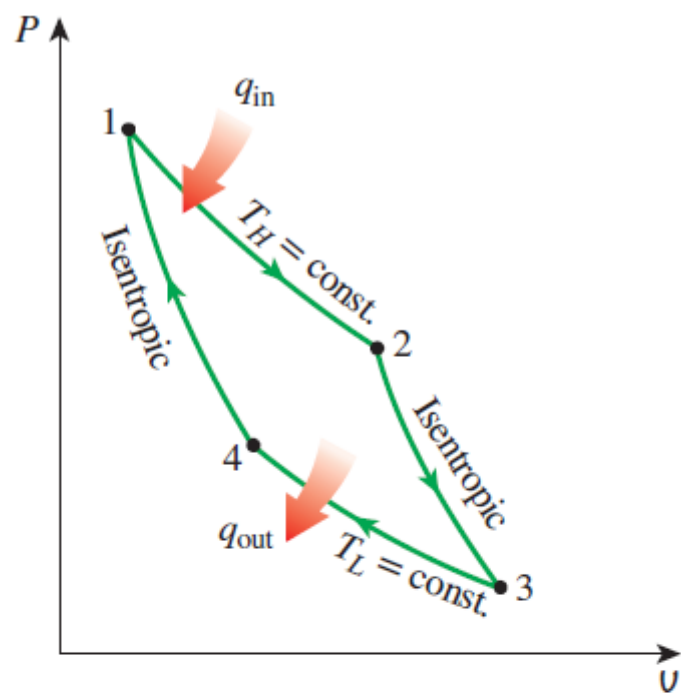
محصور در منحنی چرخه به مساحت زیر منحنی فرآیند دریافت گرما، بیانگر بازده حرارتی چرخه است. هر تغییری که موجب افزایش نسبت این دو مساحت شود، بازده حرارتی چرخه را نیز افزایش خواهد داد.

اگرچه سیال عامل در یک چرخه توان ایده‌آل در یک حلقه بسته جریان می‌یابد، اما ماهیت فرآیندهای تشکیل‌دهنده چرخه به تجهیزات خاصی بستگی دارد که برای اجرای آن چرخه به کار می‌روند. در چرخه رانکین که چرخه ایده‌آل برای نیروگاه‌های بخار است، سیال عامل از میان مجموعه‌ای از تجهیزات با جریان پایا (مانند توربین و کندانسور) عبور می‌کند؛ در حالی که در چرخه اتو (چرخه ایده‌آل برای موتورهای احتراق جرقه‌ای خودرو)، سیال عامل به‌طور متناوب در یک مجموعه پیستون-سیلندر منبسط و فشرده می‌شود. از این رو، برای تحلیل چرخه رانکین باید از معادلات مربوط به سیستم‌های جریان پایا و برای تحلیل چرخه اتو از معادلات مربوط به سیستم‌های بسته استفاده کرد.

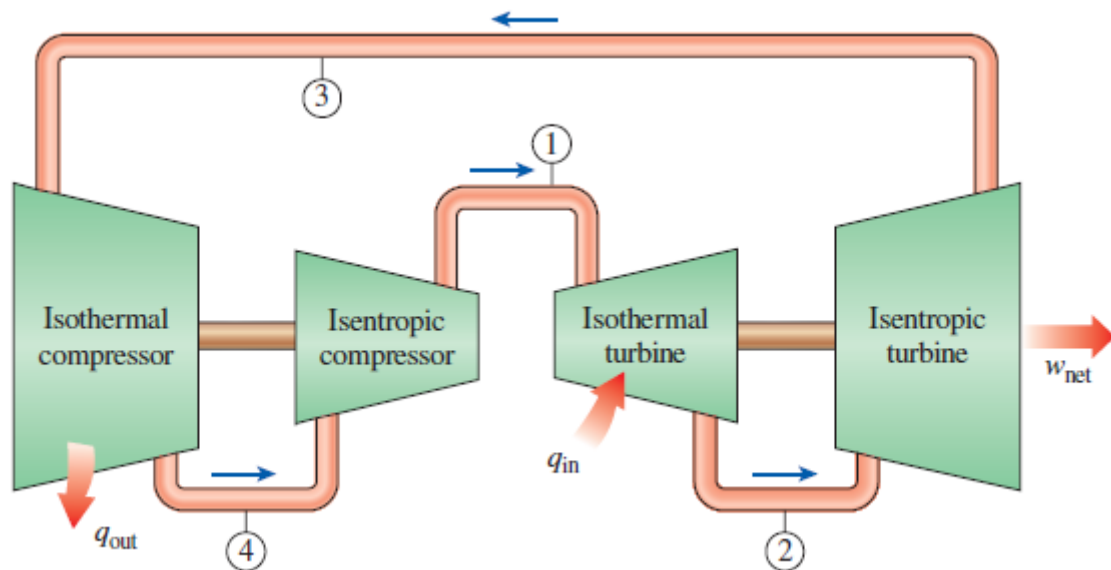
۹-۲ ■ چرخه کارنو و اهمیت آن در مهندسی

چرخه کارنو از چهار فرآیند کاملاً برگشت‌پذیر تشکیل شده است: دریافت گرما به صورت هم‌دما، انبساط آیزنتروپیک (هم‌آنتروپی)، دفع گرما به صورت هم‌دما و تراکم آیزنتروپیک. نمودارهای P-v و T-S چرخه کارنو در شکل ۹-۵ مجدداً رسم شده‌اند. چرخه کارنو می‌تواند در یک سیستم بسته (مجموعه پیستون-سیلندر) یا یک سیستم جریان پایا (با استفاده از دو توربین و دو کمپرسور، مطابق شکل ۹-۶) اجرا شود و سیال عامل آن می‌تواند گاز یا بخار باشد. چرخه کارنو کارآمدترین چرخه‌ای است که می‌تواند میان یک منبع حرارتی با دمای TH و یک چاهک حرارتی با دمای TL انجام شود و بازده حرارتی آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (9-2)$$



شکل ۵-۹ نمودارهای P - v و T - s چرخه کارنو.



شکل ۹-۶ موتور کارنو با جریان پایدار.

دستیابی به انتقال حرارت هم‌دمای برگشت‌پذیر در عمل بسیار دشوار است، زیرا نیازمند مبدل‌های حرارتی بسیار بزرگ بوده و زمان زیادی می‌برد (در حالی که یک چرخه توان در موتورهای معمولی در کسری از ثانیه کامل می‌شود). بنابراین، ساخت موتوری که بر اساس چرخه‌ای بسیار نزدیک به چرخه کارنو عمل کند، عملی نیست.

ارزش واقعی چرخه کارنو در این است که به عنوان معیاری برای مقایسه چرخه‌های واقعی یا ایده‌آل عمل می‌کند. بازده حرارتی چرخه کارنو تنها تابعی از دمای چاه حرارتی (سینک) و منبع حرارتی است؛ رابطه بازده حرارتی این چرخه (معادله ۹-۲) حاوی پیامی مهم است که هم برای چرخه‌های ایده‌آل و هم برای چرخه‌های واقعی صدق می‌کند: بازده حرارتی با افزایش میانگین دمای دریافت گرما توسط سیستم، یا با کاهش میانگین دمای دفع گرما از سیستم، افزایش می‌یابد.

با این حال، دماهای منبع و چاه حرارتی که در عمل قابل استفاده هستند، محدودیت‌هایی دارند. بالاترین دمای چرخه توسط حداکثر دمایی که اجزای موتور حرارتی (مانند پیستون یا پره‌های توربین) قادر به تحمل آن هستند، محدود می‌شود. پایین‌ترین دما نیز به دمای محیط خنک‌کننده مورد استفاده در چرخه (مانند دریاچه، رودخانه یا هوای جو) بستگی دارد و توسط آن محدود می‌شود.

مثال ۹-۱: استخراج رابطه بازده چرخه کارنو

نشان دهید که بازده حرارتی چرخه کارنو که بین دو دمای حدی T_H و T_L عمل می‌کند، تنها تابعی از این دو دماست و با معادله ۹-۲ بیان می‌شود.

حل: باید نشان داده شود که بازده چرخه کارنو تنها به دمای منبع (چشمه گرم) و چاهک (چشمه سرد) بستگی دارد.

تحلیل: نمودار $T-s$ چرخه کارنو در شکل ۷-۹ مجدداً رسم شده است. هر چهار فرآیند تشکیل دهنده چرخه کارنو برگشت پذیر هستند؛ بنابراین، سطح زیر منحنی هر فرآیند نشان دهنده انتقال حرارت در آن فرآیند است. در طول فرآیند ۱-۲ حرارت به سیستم داده می شود و در طول فرآیند ۳-۴ حرارت از سیستم دفع می گردد. از این رو، مقادیر حرارت ورودی و خروجی چرخه را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$q_{out} = T_L (s_3 - s_4) = T_L (s_2 - s_1) \text{ و } q_{in} = T_H (s_2 - s_1)$$

زیرا فرآیندهای ۲-۳ و ۴-۱ آیزنتروپیک (هم آنتروپی) هستند و در نتیجه $s_2 = s_3$ و $s_4 = s_1$ است. با جایگذاری این مقادیر در معادله ۹-۱، می بینیم که بازده حرارتی چرخه کارنو برابر است با:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_L (s_2 - s_1)}{T_H (s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

بحث: توجه داشته باشید که بازده حرارتی چرخه کارنو مستقل از نوع سیال عامل مورد استفاده (گاز ایده آل، بخار و غیره) و همچنین مستقل از این است که چرخه در یک سیستم بسته یا سیستم جریان پایا (steady-flow) اجرا شود.