

قانون دوم ترمودینامیک

وحید کریمی پور- دانشکده فیزیک - دانشگاه صنعتی شریف

۳ مهر ۱۳۹۸

۱ مقدمه

روز ۲۶ ماه مارس ۱۸۳۲ دشمن مهیبی که از سواحل رود گنگ در هند حرکت کرده و در مدت پانزده سال آسیا و نیمی از اروپا را قتل عام کرده بود به پایتخت فرانسه هجوم آورد: وبا. در ۳۱ مارس سیصد نفر به این مرض مبتلا شدند و در ۳۱ آوریل بیش از ۲۰ هزار نفر. در اولین روزهای ماه اوت تعداد کل تلفات به بیش از ۱۸ هزار نفر رسید. سپس بلا کم کم تخفیف یافت. دیگر هجوم مریض ها به مریض خانه ها زیاد نبود و پاریس زندگی از سر گرفت. در ۲۴ ماه اوت آخرین قربانی این حادثه که مهندس جوان ۳۶ ساله ای بود جان سپرد. این مرد گمنام که معاصرینش اطلاعی از احوال او نداشتند سادی کارنو^۱ بود که یک کتابچه صد صفحه ای و چندین یادداشت خطی از خود به میراث گذاشت که گورد کلوین در باره آنها گفته است: «در تمام قلمرو علم چیزی بزرگ تر از آن وجود ندارد.»^۲

همه ما این تجربه را داشته ایم که در یک روز سرد زمستانی دستهای خود را با مالیدن به یکدیگر گرم کنیم. هر چقدر که بخواهیم می توانیم این کار را ادامه دهیم و کار را تبدیل به گرما کنیم. انسانهای اولیه با همین روش یعنی چرخاندن یک قطعه چوب در یک سوراخ تعبیه شده در یک قطعه سنگ، می توانستند آتش درست کنند. قبایل ابتدایی هنوز هم از همین روش برای برافروختن آتش و ایجاد گرما استفاده می کنند.

^۱ Sadi Carnot

^۲ برگرفته از کتاب تاریخ علم نوشته پیر روسو، ترجمه حسن صفاری، انتشارات امیر کبیر.



شکل ۱: سادی کارنو:

در زندگی صنعتی امروز نیز این کار به شیوه های گوناگون و در مقیاس وسیع انجام می شود. در همه وسایل گرماسازی که در خانه و کارخانه استفاده می کنیم، کاری که سبب چرخاندن توربین های الکتریکی شده تبدیل به گرما می شود. در همه این موارد قانون بقای انرژی به صورت کامل رعایت می شود. هم چنین همه ما می دانیم که مخلوط کردن یک ظرف آب گرم با آب سرد یک ظرف آب ولرم تولید می کند. می دانیم که یخ در لیوان نوشیدنی مان ذوب شده و آب ولرم را سرد می کند. بازهم در همه این موارد قانون بقای انرژی یا قانون اول ترمودینامیک با دقت تمام رعایت می شود. اما هرگز معکوس این فرایندها را ندیده ایم. هیچ وقت نشده که گرما به تمامی تبدیل به کار شود. اگر می شد می توانستیم ذخیره بی نهایی از انرژی گرمایی ای را که در آب اقیانوس ها وجود دارد تبدیل به کار کنیم و نیروگاه های عظیم برقی را راه بیندازیم. هیچ وقت نشده که گرما از آب سرد به آب گرم منتقل شود و ظرف سرد، سردتر و ظرف گرم گرم تر شود. هیچ کدام از این فرایندها قانون بقای انرژی را نقض نمی کنند. با این وجود به نظر می رسد که در تبدیلات انرژی جهتی وجود دارد که تعیین می کند چه نوع فرایندهایی قابل انجام هستند و چه نوع فرایندهایی امکان پذیر نیستند. قانون دوم ترمودینامیک آن قانونی است که تعیین می کند این جهت کدام است و هر فرایندی دقیقا به چه میزان و

در چه جهتی می تواند انجام شود. به این جهت است که این قانون که تکمیل کننده قانون اول ترمودینامیک یا همان قانون بقای انرژی است، یکی از مهم ترین قوانین فیزیک کلاسیک است.

برای فهمیدن این موضوع مهم ترین کار این است که فرایند تبدیل کار به گرما و گرما به کار را به صورت مجرد و مستقل از هر نوع وسیله و روشی که اینجا و آنجا به کار می رود، بررسی کنیم. می بایست خود را از قید جزییات و مثال ها رها کنیم تا بتوانیم به کنه موضوع پی ببریم. این کاری است که در هر گام مهمی در دانش فیزیک برداشته شده و این بار هم توسط سادی کارنو برداشته شد.

سادی کارنو^۳ در سال ۱۸۱۹ خدمت نظام را ترک گفت و چون شوق علوم در سر داشت در سوربون و کولژدوفرانس رفت و آمد می کرد. در این اوقات بود که جیمز وات^۴ ماشین بخار را اختراع کرده و قبل از اینکه در خطوط راه آهن معمول شود در صنعت مقام مهمی را حایز شده بود. چگونه ممکن بود مهندس تیزهوشی مثل کارنو به این موضوع علاقمند نشود؟ پس با خود گفت: به نظر من بسیار لازم است قوانین دقیقی در باره آن ترتیب دهیم و به مدد این قوانین ماشین را اصلاح کنیم طوری که بازده آن بیشتر شود. اما هدف ماشین بخار عبارت از تولید نیروی محرک به وسیله حرارت است. بنابراین باید ابتدا تئوری این موضوع را بررسی کنیم که چگونه حرارت می تواند نیروی محرک ایجاد کند. کارنو خود را از مقام یک مهندس به مقام یک دانشمند بالا برد و در یادداشت های خود چنین نوشت: « برای اینکه اصل ایجاد حرکت به وسیله حرارت را در نهایت کلیت مسئله مورد مطالعه قرار دهیم باید آن را مستقل از هر نوع دستگاهی در نظر بگیریم و هیچ وسیله خاصی را وارد نکنیم.»^۵

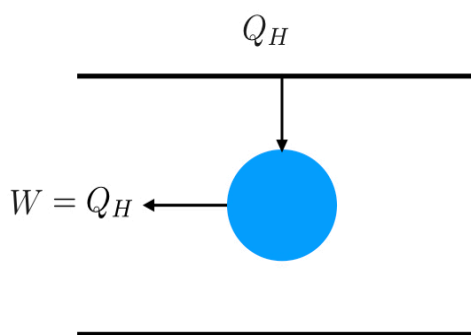
نخستین چیزی که توجه ما را به خود جلب می کند این است که کار را می توان به صورت مداوم به گرما تبدیل کرد. معنای این حرف این است که می توانیم یک چرخه^۶ را بارها و بارها طی کنیم و در هر بار طی کردن کار را به گرما تبدیل کنیم. در همه مثالهایی که در ابتدا نام بردیم چنین وضعیتی برقرار است. وقتی که دست هایمان را به هم می مالیم یا وقتی که قطعه چوبی را در شیار داخل سنگ حرکت می دهیم در واقع در حال طی کردن یک چرخه به دفعات هستیم و در هر بار طی کردن این چرخه کار خود را به گرما تبدیل می کنیم، گرمایی که به محیط اطراف جریان پیدا می کند. در این فرایندها دست ما گرم می شود و دمای آن بالا می رود، یا چوب بالاخره می سوزد و خاکستر می شود. اما نکته مهم این است که این ها همه جزییات است و می بایست از آنها صرف نظر کرد. آنچه که مهم است این است که محیط را می توان آنقدر بزرگ گرفت که عملاً دمایش تغییر نکند و چرخه را نیز ایده آل گرفت که بدون تغییر می تواند تکرار شود.

حال که خود را جزییات بی اهمیت رها کرده ایم سوال اساسی باوضوح تمام خود را به ما می نمایاند؟ آیا عکس این عمل نیز امکان پذیر

^۳Sadi Carnot

^۴James Watt

^۵برگرفته از کتاب تاریخ علم، نوشته پییر روسو، ترجمه حسن صفاری، انتشارات امیرکبیر.
^۶cycle



شکل ۲: آیا می توان ماشینی ساخت که در یک چرخه تمام گرما را به کار تبدیل کند؟

است؟ آیا مطابق با شکل (۱) می توان چرخه ای را طی کرد و طی آن مقداری گرما را از یک منبع گرفت و تمام آن به کار تبدیل کرد؟ آیا می توانیم یک موتور احتراق درست کنیم که تمام گرمای گرفته شده را به کار تبدیل کند؟ آیا تبدیل گرما به کار با بازدهی صد در صد امکان پذیر است؟

ممکن است بلافاصله به یک مثال ساده فکر کنیم که نشان می دهد پاسخ این سوال مثبت است. یک سیلندر محتوی گاز را در تماس با یک منبع گرمایی قرار می دهیم. گرما به داخل گاز جاری می شود و گاز را داغ می کند. این گاز داغ سپس منبسط شده و پیستون انتهایی سیلندر را حرکت می دهد و کار انجام می دهد. به این ترتیب تمام گرما را به کار تبدیل می کنیم. مگر نه این است که تمام موتورهای احتراق در ماشین ها و لکوموتیوها به همین شیوه کار می کنند؟ پاسخ این است که در این جا یک چرخه طی نشده است. پیستونی را که حرکت کرده کسی می بایست به سرجایش برگرداند تا چرخه کامل شود و برای این منظور باید کار انجام دهیم. در یک چرخه نمی توانیم تمام گرما را به کار تبدیل کنیم. ممکن است به اندازه کافی خلاقیت به خرج نداده باشیم، ممکن است افراد دیگری بتوانند مکانیزم های جدیدی طراحی کنند که طی آنها در یک چرخه تمام گرما به کار تبدیل شود. این همان سوالی است که بخش بزرگی از قرن نوزدهم را در بر گرفته است. یعنی قرنی که انقلاب صنعتی چهره اش را به کلی دگرگون کرده بود. باید خود را در بطن آن دوران تصور کنیم تا اهمیت چنین سوالی را به درستی درک کنیم. دورانی که هر روز خبری

از یک اختراع جدید، یک نوع موتور احتراق جدید، یک ماشین جدید، و یک کاربرد جدید از این ماشین ها می رسد. کارخانه ها یکی پس از دیگری تاسیس می شوند، لکوموتیوها و قطارها حمل و نقل را به کلی متحول می کنند، موتورها در انبوهی از معادن شروع به کار می کنند و در همه جا مهندسان و صنعتگران با یک سوال اساسی روبرو هستند: چگونه بازدهی این ماشین ها را زیاده تر کنیم؟ چه کنیم تا بیشترین مقدار نیروی آتش را به کار تبدیل کنیم؟

پاسخ مهندسان به این سوال آن چیزی است که همه انتظارش را داریم: اصطکاک پیستون و سیلندر را کم کنید، چرخ دنده ها و هر قسمت متحرکی را روغن کاری کنید، تا اتلاف انرژی به حداقل برسد، زیرا پیستونی که گرمای آتش یا بخار را به کار تبدیل می کند دارای اصطکاک با دیواره ها باشد طبیعتاً مقدار زیادی از انرژی گرمایی را هدر می دهد. اگر چرخ ها اصطکاک داشته باشند، اگر دنده ها خوب روغن کاری نشده باشند، به جای تولید کار گرمای بیشتر تولید می کنند. هر نوع اتلافی باعث کاهش بازده ماشین می شود. به اینجا که می رسیم فکر می کنیم به پاسخ نهایی رسیده ایم ولی یک بار دیگر بیایید سوال و جواب بالا را مرور کنیم:

سوال: چه ماشینی بازدهی بالا تری دارد؟

پاسخ: آن ماشینی که در فرایند تبدیل گرما به کار اتلاف کمتری داشته باشد؟

سوال: اتلاف کمتر یعنی چه؟

پاسخ: یعنی اینکه در فرایند تبدیل گرما به کار، گرمای کمتری ایجاد کند و بیشتر گرما را به کار تبدیل کند.

سوال: آیا این همان معنای داشتن بازدهی بالاتر نیست؟ آیا این یک دور بیهوده نیست؟

پاسخ: چرا هست!!

به این ترتیب معلوم می شود که با تعاریف شهودی ای که ما از اتلاف داریم نمی توانیم پاسخی دقیق برای سوال اولیه فراهم کنیم. چگونه

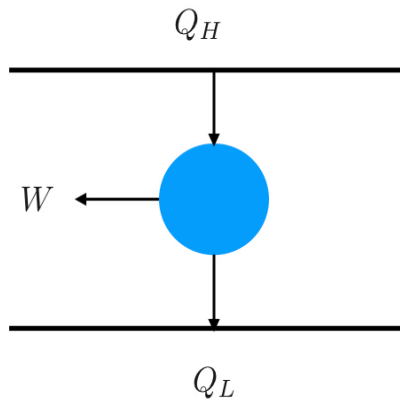
می توانیم بدون این که در دور و تسلسل گرفتار شویم پاسخی برای سوال فوق بیابیم؟. در اینجا وی از مقام یک مهندس و صنعتگر به مقام یک دانشمند ارتقا می یابد که قادر است مستقل از جزییات، مستقل از نوع ماشین ها مسئله ای را به صورت کلی و انتزاعی مطالعه کند و از این مطالعه اصول موضوع یک علم کاملاً جدید یعنی ترمودینامیک را بنا کند. چنین کاری در قرن بیستم نیز تکرار شده است وقتی که در سال ۱۹۴۸ مهندس مخبرات، کلاود شانون^۷ با گذر از مثال های خاص اصول موضوع علم کاملاً جدیدی یعنی نظریه اطلاعات را بنا نهاد. اتفاقاً این علم جدید نیز با مطالعه عمیق تریبی نظمی یا آنتروپی به درک بهتر ما از ترمودینامیک منجر شد.

روش کارنو برای مطالعه این مسئله و پاسخ به سوال فوق چیست؟ روش او ابداع یک مفهوم ذهنی و انتزاعی از یک ماشین ایده ال و سپس مطالعه خصوصیات این ماشین است. چنین ماشینی تعریف فوق العاده ساده ای دارد و با ماشین های واقعی تفاوت دارد، از آن رو که تمامی پیچیدگی های مهندسی و تمامی جزییات دست و پا گیر در آن به کناری نهاده شده اند تا ایده اصلی و مرکزی یعنی تبدیل گرما به کار به بهترین شکل ممکن فهمیده شود. نبوغ کارنو نیز دقیقاً در همین ساده سازی است. این ماشین ایده آل که به افتخار خود وی ماشین کارنو نامیده می شود چنین تعریف می شود.

تعریف: ماشین کارنو ماشینی است که گرمای Q_1 را از یک منبع در دمای T_1 می گیرد، و مقداری از آن یعنی Q_2 را به یک منبع در دمای T_2 تحویل می دهد و تفاوت این دو یعنی $Q_1 - Q_2$ را کاملاً به کار $W = Q_1 - Q_2$ تبدیل می کند. این ماشین یک چرخه را به صورت برگشت پذیری می کند و در هیچ مرحله دیگری گرما مبادله نمی کند. شکل های (۱) و (۱) این ماشین را به صورت شماتیک نشان می دهند. آیا ماشینی ساده تر از این قابل تصور هست؟ بدیهی است که خیر و تمام نبوغ کارنو نیز در سادگی همین تعریف و بخصوص در مفهوم برگشت پذیری این چرخه نهفته است. یعنی این ماشین می تواند همان چرخه را به صورت معکوس طی کند و گرمای Q_2 را از منبعی در دمای T_2 بگیرد و با انجام کار $W = Q_1 - Q_2$ گرمای Q_1 را به منبع در دمای T_1 تحویل دهد. در حالت اول ماشین مثل یک موتور و در حالت دوم مثل یک یخچال کار می کند، شکل (۱) چرا این ماشین دوم را یخچال نامیده ایم؟ برای پاسخ به این سوال توجه به نکته زیر ضروری است.

■ دمای بالاتر یعنی چه؟ قانون صفرم ترمودینامیک تنها اجازه می دهد که مفهوم همدمایی را تعریف کنیم و بر اساس آن دماسنجهایی بسازیم که به بنابر قرارداد دمای محیط های گوناگون را بسنجیم. در این قانون و قانون اول ترمودینامیک هیچ چیزی وجود ندارد که به طور اصولی دمای سردو گرم را تعریف کند. دمای سردو گرم تنها با احساس ما تعیین می شود. اما برای ساختن بنای ترمودینامیک نیازمند تعریف

Claude Shannon^۷



شکل ۳: ماشین کارنو. گرما را از یک منبع گرم می‌گیرد و مقداری از آن را به یک منبع سرد منتقل می‌کند و بقیه را به کار تبدیل می‌کند. تمامی چرخه به صورت برگشت پذیر طی می‌شود.

دقیقی از جهت دما هستیم. اکنون می‌توانیم این تعریف را ارایه دهیم.

■ **تعریف:** اگر یک دستگاه با دمای T_1 را در کنار یک دستگاه با دمای T_2 قرار دهیم و بدون اینکه هیچ تغییر دیگری در محیط پیرامون رخ دهد گرما (یعنی انرژی) از دستگاه با دمای T_1 به دستگاه با دمای T_2 انتقال یابد، آنگاه

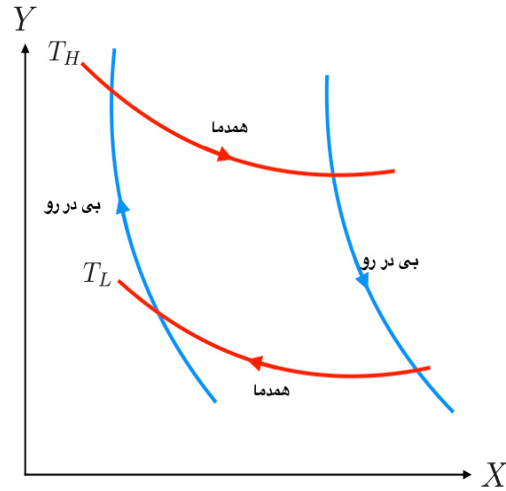
$$T_1 > T_2.$$

طبیع است که بازدهی یک ماشین کارنو را وقتی به صورت یک موتور کار می‌کند به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\eta_M := \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (1)$$

بنابراین هر چقدر که ماشین کارنو کسر کمتری از گرمای گرفته شده از منبع در دمای بالا را به منبع در دمای پایین تحویل دهد بازدهی بیشتری خواهد داشت و تنها در صورتی بازدهی آن به یک می‌رسد که تمامی گرمای گرفته شده را به کار تبدیل کند. برای یک موتور کارنو داریم:

$$0 \leq \eta_M < 1. \quad (2)$$



شکل ۴: ماشین کارنو در دیاگرام متغیرهای ترمودینامیکی برای یک سیستم دلخواه. در یک چرخه که به صورت برگشت پذیر طی می شود، گرما از یک منبع گرم گرفته می شود، مقداری از آن به یک منبع سرد منتقل می شود و بقیه آن به کار تبدیل می شود.

ایا این تعریف برای بازدهی یخچال کارنو هم مناسب است؟ پاسخ این سوال منفی است. یخچال ایده آل می بایست تمام گرما را از منبع سرد بگیرد و بدون نیاز به انجام کار خارجی تمام آن را به منبع در دمای بالا تحویل دهد. بنابراین تعریف مناسب برای بازدهی یخچال کارنو عبارت است از:

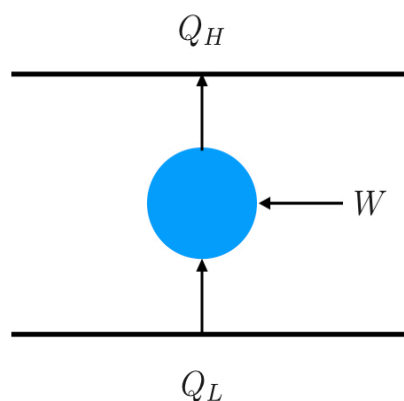
$$\eta_R := \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (3)$$

برای یخچال کارنو نیز داریم:

$$0 \leq \eta_R < 1. \quad (4)$$

۲ قانون دوم ترمودینامیک

قانون دوم ترمودینامیک حاصل تجربه های بیشمار است و می توان آن را به شکل های گوناگون بیان کرد. قانون دوم ترمودینامیک بیان می کند که بازدهی یک برای پاسخ به آن تنها کار رجوع به تجربه های بیشمار است. حاصل این تجربه های بیشمار این است که پاسخ این سوال منفی



شکل ۵: ماشین کارنو وقتی به صورت معکوس کار می کند و مثل یک یخچال عمل می کند. این مقداری کار انجام می دهد و گرما را از یک منبع سرد گرفته و به منبع گرم منتقل می کند.

است. نمی توان همه گرما را به کار تبدیل کرد. در هر چرخه ای هرچقدر هم که هوشمندانه طراحی شده باشد، حتما مقداری از گرما باقی می ماند که به کار تبدیل نمی شود و این گرما طبیعتا می بایست به منبعی در دمای پایین تر تحویل داده شود. این یکسویه بودن تبدیل انرژی ها به یک دیگر علیرغم آنکه توسط قانون بقای انرژی مجاز شمرده است، قانون دوم ترمودینامیک است. این قانون را می توان به شیوه های متفاوت بیان کرد که همه با هم معادل اند. دو بیان مهم عبارتند از بیان کلوین - پلانک و بیان کلازیوس. برای هر دو ی این بیان ها می بایست به شکل (??) رجوع کرد:

■ بیان کلوین - پلانک از قانون دوم ترمودینامیک

هیچ چرخه ای وجود ندارد که تنها اثر آن گرفتن گرما از یک منبع در دمای بالا و تبدیل همه آن به کار باشد.

■ **بیان کلازیوس از قانون دوم ترمودینامیک** هیچ چرخه ای وجود ندارد که تنها اثر آن گرفتن گرما از یک منبع در دمای پایین تر و انتقال همه آن به یک منبع در دمای بالاتر باشد.

براحتی می توان فهمید که این دو بیان هم ارز هستند. برای اثبات این هم ارزی نشان می دهیم که هر وقت یکی از این دو بیان نقض شود بیان دیگر هم نقض خواهد شد. برای سادگی بیان کلازیوس را با C و بیان کلونین - پلانک را با K نشان می دهیم. نقیض این دو بیان را نیز به ترتیب با \bar{C} و با \bar{K} نشان می دهیم. حال ثابت می کنیم که

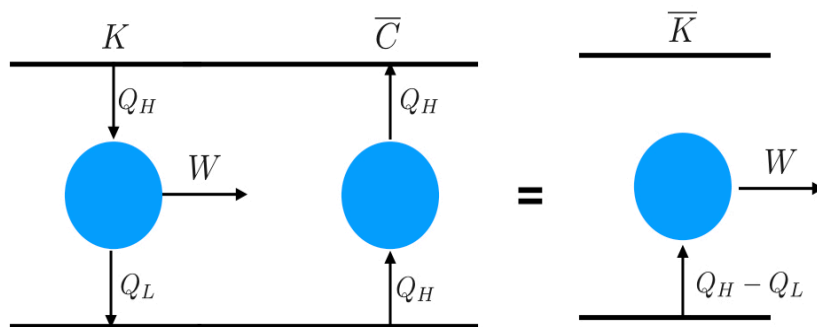
$$\bar{C} \rightarrow \bar{K} \quad , \quad \bar{K} \rightarrow \bar{C}. \quad (5)$$

برای اثبات رابطه $\bar{C} \rightarrow \bar{K}$ به شکل (۲) توجه می کنیم. در این شکل نشان داده شده که هرگاه قانون دوم ترمودینامیک به بیان کلازیوس نقض شود، یعنی \bar{C} برقرار باشد، می توان با ترکیب آن با یک موتور کارنو، ماشینی ساخت که تمام گرما را به کار تبدیل کند، یعنی قانون دوم ترمودینامیک را به بیان کلونین - پلانک نقض کند که به معنای \bar{K} است.

برای اثبات رابطه $\bar{K} \rightarrow \bar{C}$ به شکل (۲) توجه می کنیم. در این شکل نشان داده شده که هرگاه قانون دوم ترمودینامیک به بیان کلونین - پلانک نقض شود، یعنی \bar{K} برقرار باشد، می توان با ترکیب آن با یک یخچال کارنو، ماشینی ساخت که بدون انجام کار خارجی گرما از منبع سرد به منبع گرم منتقل کند، یعنی قانون دوم ترمودینامیک را به بیان کلازیوس نقض کند که به معنای \bar{C} است. حال می توانیم قضیه مهمی را ثابت کنیم که راه را برای تعریف یک مقیاس دمای مطلق که مستقل از هر نوع سیستمی است هموار می کند.

■ **قضیه:** بین دو منبع گرمایی یکسان بازده ماشین کارنو از بازده تمامی ماشین های دیگر بیشتر است.

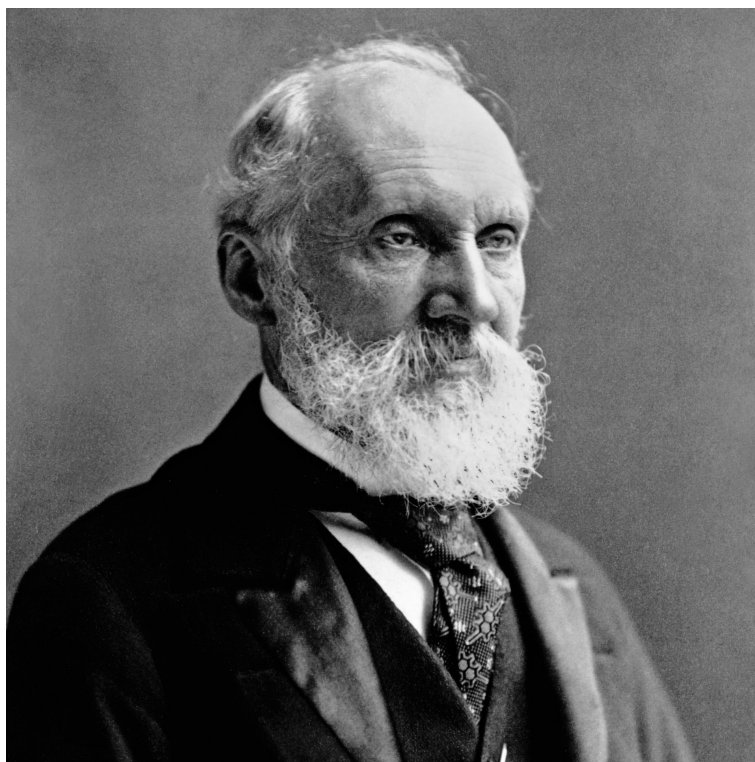
از نظر شهودی این قضیه بدیهی است چرا که ما فکر می کنیم ماشینی که به صورت برگشت پذیر کار می کند حتما اتلاف ندارد و طبیعتا بازدهی اش از ماشین های دیگری که اتلاف دارند بیشتر است، اما همه نکته همین جاست، چرا که دقیقا به واسطه همین قضیه است که ما ثابت می کنیم برگشت پذیری به معنای نبود اتلاف است. در واقع همانطور که در صفحات قبلی گفتیم، از نظر منطقی و اصولی راهی بدون افتادن در دور تسلسل برای تعریف اتلاف نداریم.



شکل ۶: ماشین کارنو وقتی به صورت معکوس کار می کند و مثل یک یخچال عمل می کند. این مقداری کار انجام می دهد و گرما را از یک منبع سرد گرفته و به منبع گرم منتقل می کند.

■ **اثبات:** از برهان خلف استفاده می کنیم و فرض می کنیم ماشین کارنو از یک ماشین دلخواه دیگر بازدهی کمتری دارد و نشان می دهیم که در این صورت قانون دوم ترمودینامیک نقض می شود. به شکل (۲) نگاه می کنیم. فرض کرده ایم که یک موتور معمولی بازدهی اش از بازدهی یک موتور کارنو بیشتر است. یعنی وقتی که هر دو ماشین گرمای Q_H را از منبع گرم می گیرند، ماشین کارنو مقدار گرمای Q_L را به منبع سرد پس می دهد و کار $W = Q_H - Q_L$ را تولید می کند، اما ماشین معمولی گرمای $Q_L - \Delta$ را به منبع سرد پس می دهد و مقدار کار $W' = W + \Delta$ را تولید می کند. حال ماشین کارنو را چون که برگشت پذیر است در جهت معکوس با ماشین معمولی به صورت نشان داده شده متصل می کنیم. نتیجه این است که این ماشین ترکیبی، گرمای Δ را از منبع سرد می گیرد و تمام آن را به صورت کار $w = \Delta$ به دنیای بیرون تحویل می دهد. به این ترتیب این ماشین مرکب، قانون بقای ترمودینامیک را به بیان کلوین-پلانک نقض می کند.

■ **تمرین:** در اثبات بالا فرض کرده ایم که بازده یک موتور دلخواه از بازدهی یک موتور کارنو بیشتر باشد و به نقض قانون دوم ترمودینامیک به بیان کلوین-پلانک منجر می شود. فرض کنید که یک یخچال دلخواه بازدهی بیشتری از یخچال کارنو دارد و نشان دهید که این بار



شکل ۷: سادی کارنو:

هم قانون دوم ترمودینامیک به بیان کلازیوس نقض می شود.

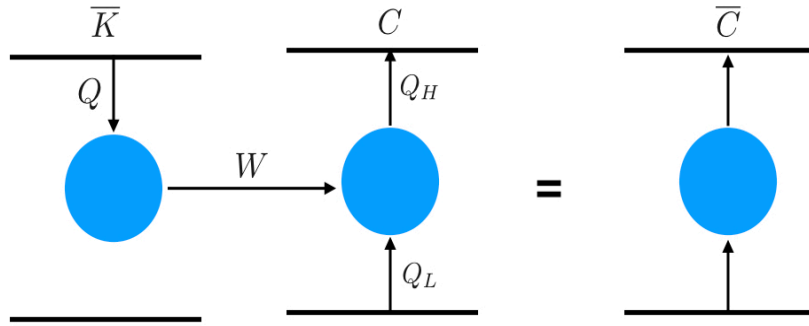
■ **نتیجه:** بازدهی همه ماشین های کارنویی که بین دو منبع مشخص کار می کنند یکسان است.

این نتیجه بسیار مهم است. اگر بازده ماشین کارنو به هیچ وجه به جزئیات و دیگر خواص ماشین بستگی ندارد پس این بازده تابع چیست؟ پاسخ آن است که این بازدهی تنها تابعی از دماهای منبع هاست یعنی

$$\eta = \eta(T_H, T_C). \quad (6)$$

این مسئله باعث می شود که ما بتوانیم یک مقیاس دمایی بسازیم که به کلی مستقل از هر نوع ماده ای باشد. این مقیاس، مقیاس ترمودینامیکی دما خوانده می شود. نخست یک خاصیت را در مورد تابع $\eta(T_H, T_C)$ بدست می آوریم. داریم

$$\eta(T_3, T_2) = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_3}, \quad \eta(T_2, T_1) = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2}, \quad \eta(T_3, T_1) = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3}. \quad (7)$$



شکل ۸: ماشین کارنو وقتی به صورت معکوس کار می کند و مثل یک یخچال عمل می کند. این مقداری کار انجام می دهد و گرما را از یک منبع سرد گرفته و به منبع گرم منتقل می کند.

از این روابط نتیجه می گیریم

$$\frac{Q_2}{Q_3} = 1 - \eta(T_3, T_2), \quad \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \eta(T_2, T_1), \quad \frac{Q_1}{Q_3} = 1 - \eta(T_3, T_1), \quad (۸)$$

و یا

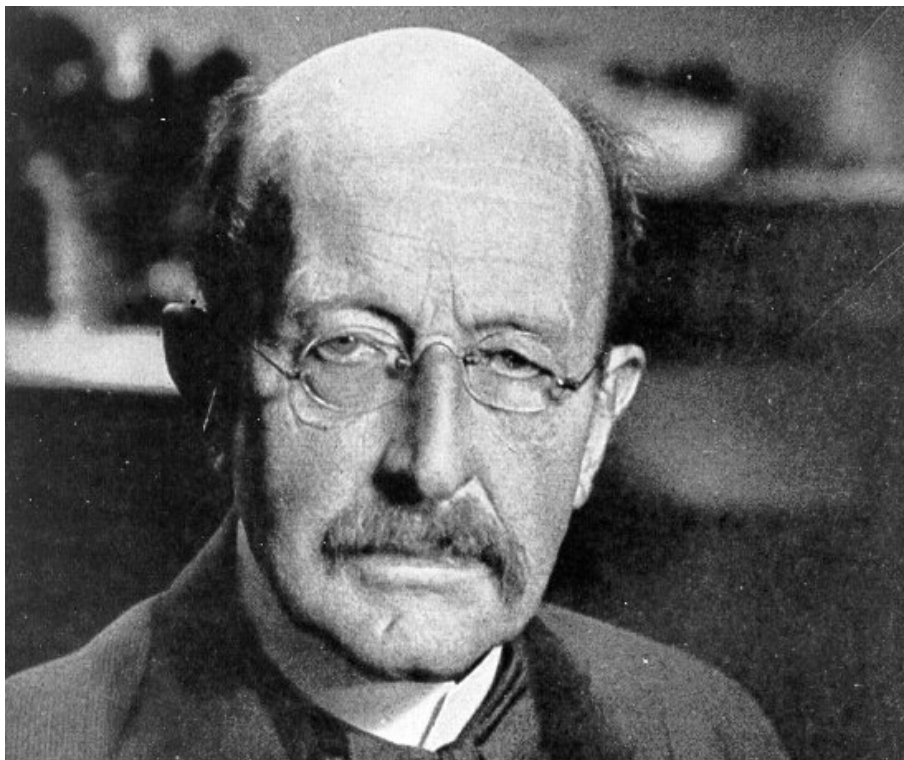
$$[1 - \eta(T_3, T_2)][1 - \eta(T_2, T_1)] = [1 - \eta(T_3, T_1)]. \quad (۹)$$

این رابطه به نتیجه زیر می رسد

$$1 - \eta(T_2, T_1) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)}. \quad (۱۰)$$

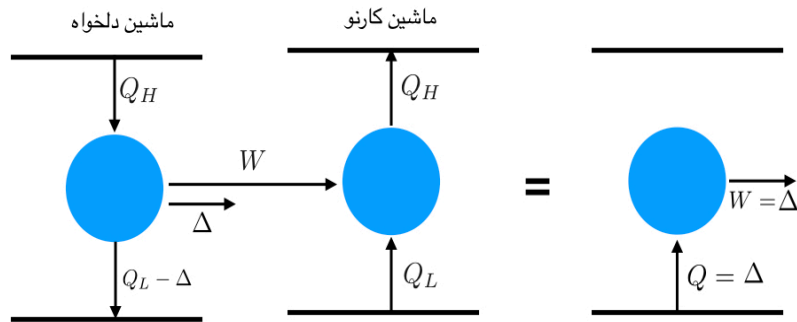
می توانیم قرار بگذاریم که $f(T)$ را همان T بگیریم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\eta(T_2, T_1) = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (۱۱)$$



شکل ۹: سادی کارنو:

از آنجا که $1 - \eta(T_3, T_2) = \frac{Q_1}{Q_2}$ نتیجه می‌گیریم که $\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$ این امر به این معناست که نسبت دمای دو منبع برابر است با نسبت گرمایی که این دو منبع به یک ماشین کارنو می‌دهند و از آن می‌گیرند. از آنجا که همه ماشین‌های کارنو بازدهی یکسان دارند، یعنی نسبت گرمایی که این دو منبع با ماشین کارنو مبادله می‌کنند، مستقل از نوع ماشین کارنوست و ربطی به این ندارد که آن ماشین چه چرخه‌ای را طی می‌کند، از چه چیزی ساخته شده است، ماده‌اش چیست، و سازوکارش کدام است، نسبت دمایی که بدست می‌آوریم یک نسبت کاملاً مطلق و مستقل از نوع ماده است. به همین دلیل است که آن را مقیاس دمای مطلق می‌نامیم. این رابطه هم چنین نشان می‌دهد که چرا دمای صفر مطلق نداریم، زیرا رسیدن به صفر مطلق به معنای ساختن یک ماشین کارنوست که هیچگونه گرمایی را به منبع سرد تحویل ندهد و این به معنای نقض قانون دوم ترمودینامیک است. چگونه به هر منبع گرمایی یک دما نسبت می‌دهیم؟ راه‌اش این است که یک ماشین کارنو بین آن منبع و منبعی که در تعال گرمایی با آب در نقطه سه گانه اش هست برقرار کنیم. شکل (۲). به منبعی که در تعادل گرمایی با آب در نقطه سه گانه اش است، دمای 273.15 درجه نسبت می‌دهیم و سپس بازده این ماشین تعیین می‌کند که دمای آن منبع چقدر است. به عبارت دیگر دمای آن منبع از رابطه زیر تعیین می‌شود:

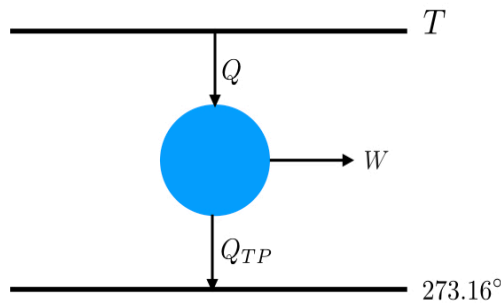


شکل ۱۰: هرگاه ماشینی بازدهی اش از ماشین کارنو بیشتر باشد، می توانیم با ترکیب آن با یک ماشین کارنو ماشینی بسازیم که قانون دوم ترمودینامیک را به بیان کلویین پلانک نقض کند.

$$T := 273.16 \times \frac{Q}{Q_{TP}}, \quad (12)$$

که در آن Q_{TP} گرمایی است که به منبع سرد (در دمای نقطه سه گانه آب تحویل داده می شود) و Q گرمایی است که از منبع ناشناخته گرفته می شود. باید تاکید کنیم که در عمل از این روش استفاده نمی شود. اهمیت این تعریف این است که نشان می دهد می توان دما را مستقل از هر نوع ماده ای بر اساس قانون اساسی ترمودینامیک و به صورت مجرد تعریف کرد.

حال می توانیم بررسی کنیم که رابطه این مقیاس دما با مقیاس دمای گاز ایده آل که قبلاً معرفی کرده ایم چیست؟ کمی بعد با انجام محاسبه نشان خواهیم داد که این دو مقیاس دما یکسان هستند. در واقع یک ماشین کارنوی بخصوص که ماده آن یک گاز ایده آل است در نظر خواهیم گرفت که بین دو دماهایی که در مقیاس گاز ایده آل به ترتیب θ_L و θ_H هستند، کار می کند. حال نشان می دهیم که دمایی که در مقیاس مطلق و مطابق با تعریف بالا به این دو منبع نسبت می دهیم همان دماهای بالاست. برای این کار ماشین کارنویی در نظر می گیریم که ماده آن یک گاز



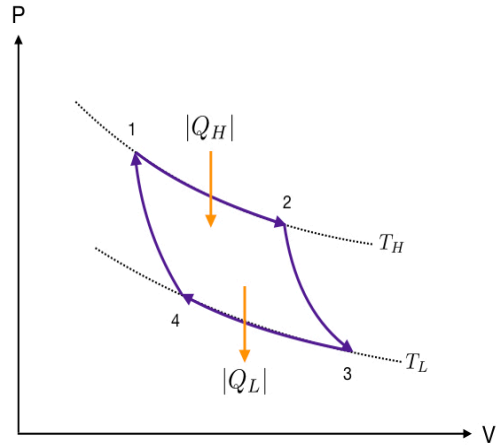
شکل ۱۱: هرگاه به نقطه سه گانه آب دمای 16.273 درجه کلوین را نسبت دهیم، ماشین کارنو می تواند یک دمای مطلق را به هر منبع دیگری نسبت دهد.

ایده آل باشد. بقیه جزئیات یعنی این که شکل ظرف در بردارنده این گاز و این که چگونه مختصات ترمودینامیکی این گاز مثل حجم، دما و فشار را تغییر می دهیم در این استدلال اهمیت ندارند. البته مهم است که بتوانیم همه این تغییرات را به صورت برگشت پذیر انجام دهیم. (یادآوری می کنیم که ماشین کارنو یک ماشین ایده آل و ذهنی است.) این گاز در تماس با یک منبع گرمایی در دمای θ_1 قرار می گیرد و گرمای Q_1 را جذب می کند. سپس به صورت بی در رو به دمای θ_2 رسانده می شود (حجم آن زیاد و فشار آن کم می شود). در این دما گرمای Q_2 را به منبع پس می دهد. سپس دو باره با افزایش فشار و کاهش حجم آن هم به صورت بی در رو به نقطه اولیه می رسد و چرخه کامل می شود. این مراحل در شکل (۲) نشان داده شده است.

می بایست چهار ضلع این چرخه را به دقت مطالعه کنیم و مقدار گرما های مبادله شده با دو منبع را حساب کنیم. نخست ضلع ۱ به ۲ را در نظر می گیریم. گاز ایده آل است و در دمای ثابت θ_1 قرار دارد. چون گاز ایده آل است انرژی داخلی اش فقط بستگی به دما دارد و در نتیجه در طول این فرایند انرژی داخلی اش ثابت باقی می ماند. هم چنین واضح است که در طول این فرایند که حجم گاز در حال افزایش است، گاز روی محیط بیرون کار انجام می دهد. پس این کار را به بهای گرمایی که دریافت کرده است انجام می دهد. از اینجا می توانیم میزان گرما را حساب کنیم:

$$|Q_1| = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nR\theta_1}{V} dV = nR\theta_1 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (13)$$

به همین ترتیب دانیم که در فرایند ۳ به ۴، روی گاز کار انجام می شود زیرا حجم گاز کم شده و در عین حال انرژی آن ثابت مانده (چون گاز



شکل ۱۲: یک ماشین کارنو که ماده اش یک گاز ایده آل است.

ایده آل انرژی داخلی اش تنها به دما بستگی دارد، بنابراین از گاز گرما گرفته شده است. مقدار این گرما برابر است با:

$$|Q_2| = \int_{V_4}^{V_3} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nR\theta_2}{V} dV = nR\theta_2 \ln \frac{V_3}{V_4}. \quad (14)$$

اما برای اینکه نسبت این دو مقدار گرما را به طرز معناداری حساب کنیم می بایست رابطه بین حجم های گوناگونی را که در این دو رابطه وجود دارند بفهمیم. برای این کار از این نکته استفاده می کنیم که فرایندهای ۲ به ۳ و هم چنین ۴ به ۱ هر دو فرایندهای بی در رو هستند. در هر فرایندی بی درویی برای گاز ایده آل می دانیم که روابط زیر برقرارند:

$$PV^\gamma = P'V'^\gamma, \quad (15)$$

از آنجا که با گاز ایده آل سروکار داریم می توانیم این رابطه را با معادله حالت گاز ایده آل یعنی $PV = nR\theta$ ترکیب کنیم تا به رابطه زیر

برسیم:

$$\theta V^{\gamma-1} = \theta' V'^{\gamma-1}. \quad (16)$$

به این ترتیب برای فرایندهای ۲ به ۳ داریم:

$$\theta_1 V_2^{\gamma-1} = \theta^2 V_3^{\gamma-1} \quad (17)$$

و هم چنین برای فرایندهای ۴ به ۱ داریم:

$$\theta_1 V_1^{\gamma-1} = \theta^2 V_4^{\gamma-1} \quad (18)$$

با تقسیم این دو رابطه بر هم بدست می آوریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (19)$$

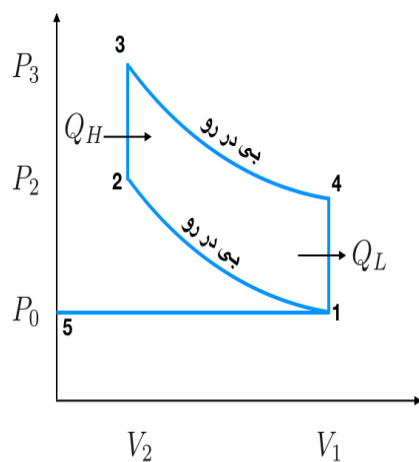
با ترکیب این رابطه با روابط (۱۳) و (۱۴) بدست می آوریم:

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{nR\theta_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{nR\theta_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (20)$$

این رابطه نشان می دهد که این دو مقیاس دمایی با هم متناسب اند.

۱.۲ مثالهای بیشتر و مسئله ها

نخست چند مثال ساده از ماشین های مختلف را بررسی می کنیم. حتما نام هایی مثل موتورهای احتراق خارجی: یا موتورهای احتراق داخلی را شنیده اید. موتورهای احتراق خارجی آنهایی هستند که ماده ای که در چرخه حرکت می کند، از بیرون گرم می شود، مثل توربین بخار. موتورهای احتراق داخلی آنهایی هستند که احتراق در درون ماده ی موتور صورت می گیرد، مثل موتور ماشین و اتومبیل. در توصیف مثالهای زیر از اثرات جنبی مثل اصطکاک، تلاطم، هدایت گرما از دیواره ها و نظایر آن که بحث دقیق و تحلیلی را دشوار می سازد صرف نظر می کنیم. در درسهای مهندسی مکانیک وقتی که این موتورها را مطالعه می کنند حتما خیلی از این جزئیات را بررسی می کنند، اما در این درس چندان علاقه ای به این کار نداریم. در فیزیک آنچه که برای ما مهم است استخراج قوانین کلی است و به مطالعه جزئیات موارد خاص آنهم از نوع کاربردی آنها چندان علاقمند نیستیم. بنابراین مثال های زیر را تنها برای آشنایی کلی با نحوه مطالعه این موتورها ذکر می کنیم.



شکل ۱۳: چرخه اوتو.

۲.۲ چرخه اوتو

این موتورها که به آنها موتور گازویلی نیز می‌گویند، در چرخه ای موسوم به چرخه اوتو^۸ کار می‌کنند، و این چرخه دارای شش مرحله مشخص است:

مرحله اول: ورود بنزین و هوا به درون سیلندر^۹

مرحله دوم: ۱۰ تراکم (افزایش دما و فشار). این مرحله به دلیل سریع بودن یک فرایند بی دروست.

مرحله سوم: احتراق^{۱۱} انفجار و افزایش بازهم بیشتر فشار

مرحله چهارم: انجام کار^{۱۲}

مرحله پنجم: افت فشار و سرد شدن در اثر باز شدن یک سوپاپ و خروج کمی از گاز

مرحله ششم: خارج شدن تمام گاز توسط پیستون^{۱۳}

Otto Cycle^۸
 Intake^۹
 Compression^{۱۰}
 Combustion^{۱۱}
 Power Stroke^{۱۲}
 Exhaust^{۱۳}

■ محاسبه بازده موتور گازوئیلی:

روی منحنی ۱ داریم:

$$P_0 V_1 = nRT_1 \quad (21)$$

روی منحنی ۲ داریم:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \quad (22)$$

روی منحنی ۴ داریم:

$$T_3 V_2^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1} \quad (23)$$

ولی می‌بایست Q_H و Q_L را پیدا کنیم. داریم:

$$Q_H = \int_{T_2}^{T_3} C_V dT = C_V(T_3 - T_2), \quad Q_L = \int_{T_1}^{T_4} C_V dT = C_V(T_4 - T_1).$$

نتیجه می‌گیریم:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (24)$$

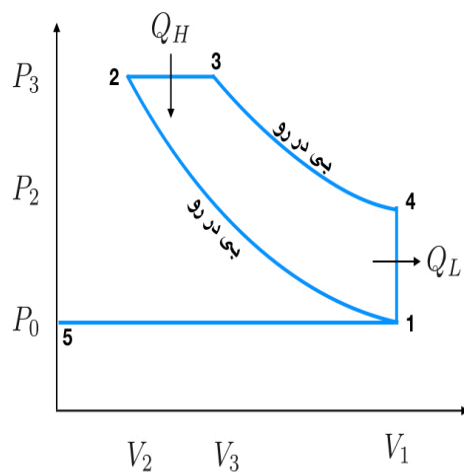
از ۱ و ۲ نتیجه می‌گیریم

$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \quad (25)$$

و در نتیجه

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (26)$$

در یک موتور گازوئیلی داریم $T_1 = 300^\circ C$ و $T_2 = 580^\circ C$ و در نتیجه $\eta = 48/100$.



شکل ۱۴: چرخه دیزلی.

۳.۲ موتور دیزلی

در موتور دیزلی در فاز (۱) تنها هوا وارد سیلندر می شود و این هوا به طور بی در رو فشرده می شود تا جاییکه آنقدر بالا رود که برای انفجار آماده شود. گازوئیل یا بنزین با نرخ معینی روی هوای فشرده و داغ پاشیده می شود به نحوی که در موقع انبساط فشار ثابت بماند. بقیه مراحل مثل موتور گازوئیلی است.

محاسبه بازده برای موتور دیزلی:

$$Q_H = \int_{T_2}^{T_3} C_p dT = C_p(T_3 - T_2) \quad (۲۷)$$

Intake^{۱۴}

$$Q_L = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = C_v(T_4 - T_1). \quad (28)$$

از این دو رابطه نتیجه می گیریم که:

$$\eta = 1 - \frac{C_V}{C_P} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}. \quad (29)$$

اما می دانیم که :

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}, \quad T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1}. \quad (30)$$

برای استفاده از این دو رابطه می بایست رابطه بین V_3 و V_2 را نیز پیدا کنیم. چون فشار ثابت است داریم:

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\lambda T_1 - T_1}{(\lambda^{\frac{1}{\gamma}} - 1) T_2} \quad (31)$$

و از آنجا

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(\lambda - 1) T_1}{(\lambda^{\frac{1}{\gamma}} - 1) T_2}. \quad (32)$$

اما می دانیم که

$$\lambda = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma, \quad \longrightarrow \quad \lambda^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{V_3}{V_2} =: r_E, \quad (33)$$

و در نتیجه

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(r_E^\gamma - 1) T_1}{(r_E - 1) T_2}. \quad (34)$$