

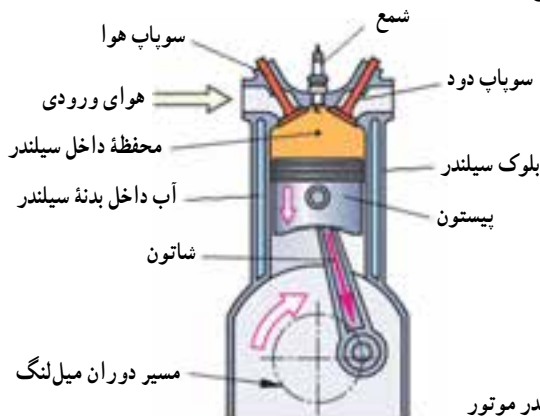
عملکرد موتورهای احتراق داخلی

هدف‌های رفتاری: پس از آموزش این فصل از هنرجو انتظار می‌رود:

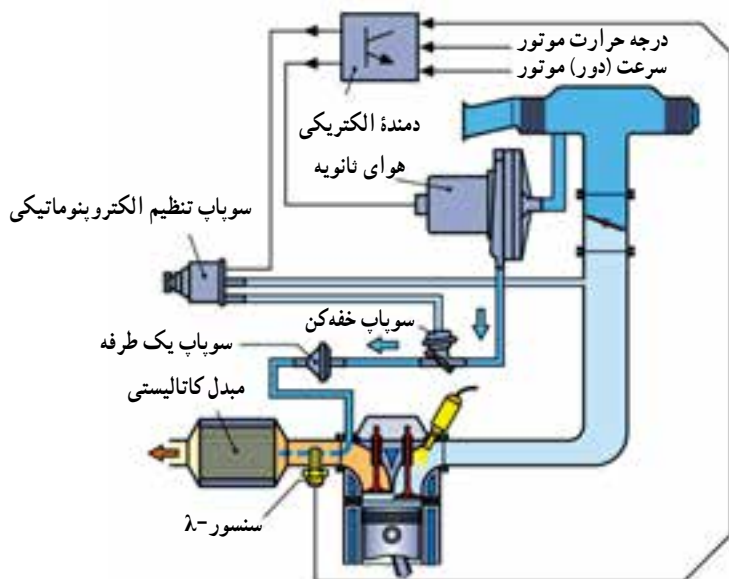
- ۱- اساس کار موتورهای چهار زمانه اتو را توضیح دهد.
- ۲- سیستم خنک‌کاری موتور را توضیح دهد.
- ۳- موازنه انرژی در موتور را توضیح دهد.
- ۴- سایر سیستم‌های خنک‌کاری را توضیح دهد.

۱-۵- اساس کار موتورهای چهار زمانه اتو

در موتور چهارزمانه، یک دوره (سیکل) کار در چهار زمان (کورس) انجام می‌شود. یعنی برای انجام کار مکانیکی در هر سیکل، چهار مرتبه پیستون به طرف بالا و پایین حرکت می‌کند (دو حرکت به بالا و دو حرکت به پایین). برای بی‌بردن به نحوه کار موتور احتراق به یک واحد (سیلندر) از آن در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، توجه می‌کنیم. در این شکل، سیلندر به صورت شفاف نشان داده شده تا قطعات داخلی آن قابل رؤیت باشد. قسمت‌های مختلف آن عبارت است از: سیلندر، پیستون، شاتون، دريچه‌ها، سوپاپ‌ها، شمع و



شکل ۱-۵- (الف) اجزای سیلندر موتور



شکل ۱-۵- (ب) اساس کارکرد کلی موتور

۱-۱-۵- مرحله (کورس) مکش : در کورس تنفس، پیستون از بالا به طرف پایین حرکت می‌کند. به علت آب بندی بودن پیستون در سیلندر و سریع پایین رفتن آن و بزرگ شدن ناگهانی حجم بالای پیستون، فشار این منطقه کمتر از فشار هوای محیط می‌شود (خلاً نسبی به وجود می‌آید) و با باز شدن سوپاپ گاز (دریچه ورودی)، مخلوطی از سوخت و هوا وارد سیلندر می‌شود و فضای خالی پیستون را پر می‌کند. مقدار بنزین به اندازه لازم به وسیله کاربراتور در هوای مصرفی موتور به صورت ذره پخش گردیده، از طریق لوله‌های انتقال (مانیفولد گاز) به سیلندر ارسال می‌شود. در بیشتر مدت تنفس سیلندر، سوپاپ دود بسته می‌ماند (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵- کورس مکش موتور، در این مرحله سوپاپ گاز باز و دود بسته است.

از نظر تئوری چون سوپاپ گاز باز می‌شود و قسمت داخلی سیلندر با هوای محیط مرتبط می‌گردد، بنابراین عمل تنفس در فشار ثابت به وقوع می‌پیوندد. اما از نظر عملی، سرعت پیستون بیشتر از سرعت هوای ورودی است. زیرا ذرات سوخت و هوا دارای اینرسی بوده و تمایل به حرکت کردن ندارند. لذا خلأی در داخل سیلندر ایجاد می‌شود و فشار داخل سیلندر کمتر از فشار جو می‌گردد و در نتیجه سوخت و هوا از موضع پرفشارتر به سیلندر جریان می‌یابد.

۲-۱-۵- مرحله (کورس) تراکم: در این مرحله، پیستون از پایین به بالا حرکت می‌کند و هر دو سوپاپ بسته می‌ماند. در نتیجه مخلوط هوا و سوخت در محفظه احتراق فشرده می‌شود و فشار درون سیلندر در پایان زمان تراکم به ۸ تا ۱۶ اتمسفر می‌رسد. اندازه فشار نهایی گاز در پایان کورس تراکم به عوامل گوناگونی بستگی دارد، از جمله: فضای اطاق احتراق، حجم کل سیلندر، درجه حرارت موتور، فشار هوا، راندمان حجمی موتور و غیره (شکل ۳-۵).

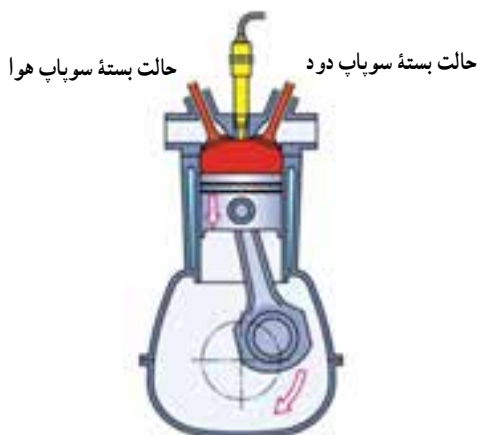


شکل ۳-۵- کورس تراکم، هر دو سوپاپ بسته هستند.

در نزدیکی رسیدن پیستون به بالاترین نقطه حرارت خود، شمع جرقه می‌زند و مخلوط سوخت و هوای تراکم شده را که به علت کوچک شدن فضای سیلندر مولکول‌هایش بیشتر با هم تصادف کرده و گرم شده‌اند، می‌سوزاند. از نظر عملی درصد یز شدن سیلندر کمتر می‌باشد زیرا به علت اینرسی گاز، نمی‌توان در زمان مکش، تمام فضای سیلندر را از سوخت و هوا اشباع کرد. به علاوه حرارت ایجاد شده در اثر تراکم گاز از دیواره به هوا و آب و روغن، انتقال پیدا می‌کند.

۳-۱-۵- مرحله (کورس) قدرت: پس از انفجار گاز فشار در فضای کوچک شده بالای پیستون، به شدت افزایش می‌یابد و گاهی تا ۴۰ اتمسفر می‌رسد که وقتی بر سطح پیستون تأثیر کند

نیروی قابل توجهی را به پیستون وارد می‌سازد. مثلاً هر گاه قطر پیستون را 10 cm فرض کنیم نیروی فشاری معادل است با: 314 kg $10 \times 785 / 40 \times \pi \times F.P.A$ یعنی بیش از سه تن نیرو وارد می‌کند (شکل ۴-۵).



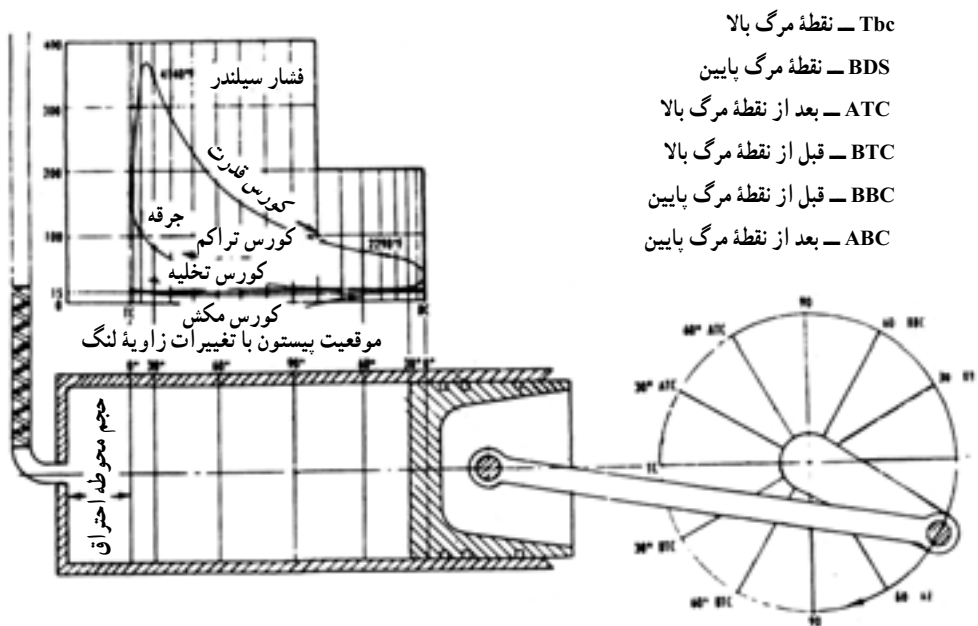
شکل ۴-۵- کورس قدرت، هر دو سوپاپ بسته هستند.

علت بالا رفتن فشار، به طور ناگهانی، احتراق گاز در حجم ثابت است که از نظر تئوری این عمل کاملاً در حجم ثابت فرض شده است و در یک لحظه، تمام هیدروکربورهای متراکم شده منجر می‌گردد؛ ولی از نظر عملی به دلایل زیر چنین نمی‌باشد:

۱- اشتعال گاز دفعتاً نیست و عمل سوخت $\frac{3}{1000}$ ثانیه طول می‌کشد که در این مدت حجم سیلندر تغییر می‌کند.

۲- با حرکت پیستون و ازدیاد حجم سیلندر، منحنی فشار احتراق عملاً به شکل منحنی خواهد بود که دستگاه ثبت کننده فشار (اندیکاتور) چگونگی تغییرات فشار را نشان می‌دهد (شکل ۵-۵).

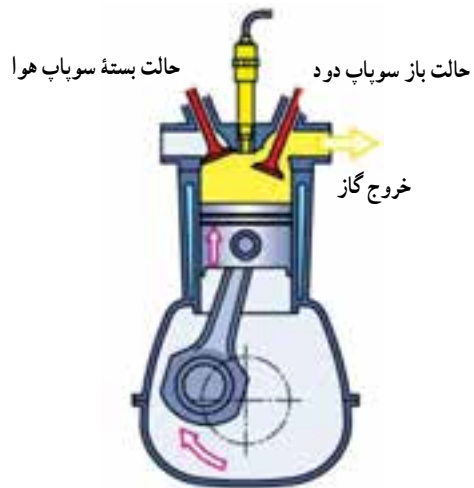
در این زمان، پیستون از بالاترین نقطه به طرف پایین حرکت کرده، به واسطه شاتون، میل‌لنگ را به حرکت در می‌آورد. تنها کورس مفید موتور همین زمان است. در این زمان هر دو سوپاپ بسته می‌مانند.



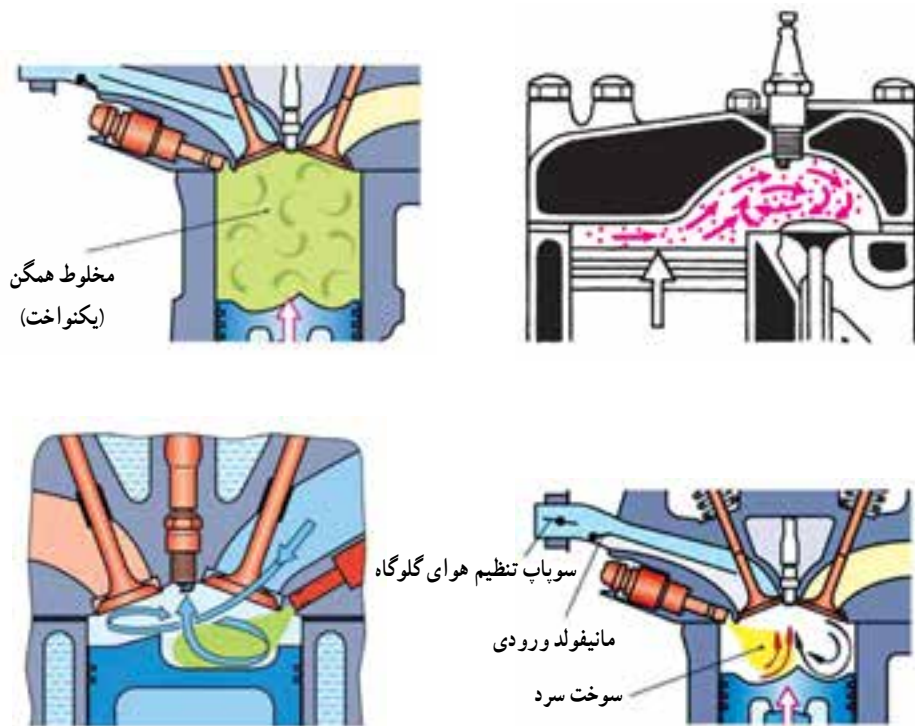
- Tbc — نقطه مرگ بالا
- BDS — نقطه مرگ پایین
- ATC — بعد از نقطه مرگ بالا
- BTC — قبل از نقطه مرگ بالا
- BBC — قبل از نقطه مرگ پایین
- ABC — بعد از نقطه مرگ پایین

شکل ۵-۵- دستگاه اندیکاتور

۴-۱-۵- مرحله (کورس) تخلیه : پیستون از پایین ترین نقطه به طرف بالا حرکت می کند و با باز شدن سوپاپ دود پس مانده های حاصل از احتراق، موتور را ترک می کنند. از نظر عملی سوپاپ دود کمی قبل از رسیدن به نقطه مرگ پایین، شروع به باز شدن می کند (در زمان قدرت) تا عمل تخلیه در فرصت بیشتری انجام شود. به طوری که وقتی پیستون تغییر جهت داده و به طرف بالا حرکت می کند مقدار دود خروجی به حداکثر می رسد. همچنین زمان بسته شدن سوپاپ دود را طوری طراحی می کنند که پس از کورس تخلیه کمی باز بماند تا عمل تخلیه کامل تر صورت پذیرد. ممکن است تصور شود که با باز بودن سوپاپ دود و پایین رفتن پیستون در زمان مکش، دود به داخل سیلندر کشیده می شود. ولی چنین نیست؛ زیرا دود از مدتی قبل حرکت کرده، در اثر ازدیاد فشار داخل سیلندر نسبت به خارج، سرعت و اینرسی لازم را باز یافته است. به علاوه گاز ورودی سنگین تر از دود می باشد (شکل ۵-۶).



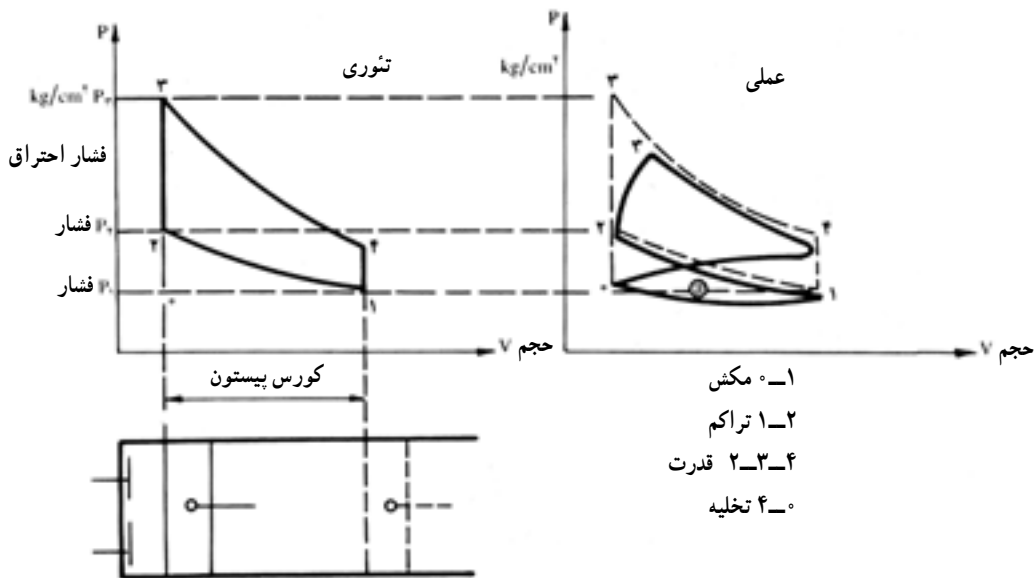
شکل ۵-۶- کورس تخلیه، سوپاپ دود باز و سوپاپ گاز بسته است.



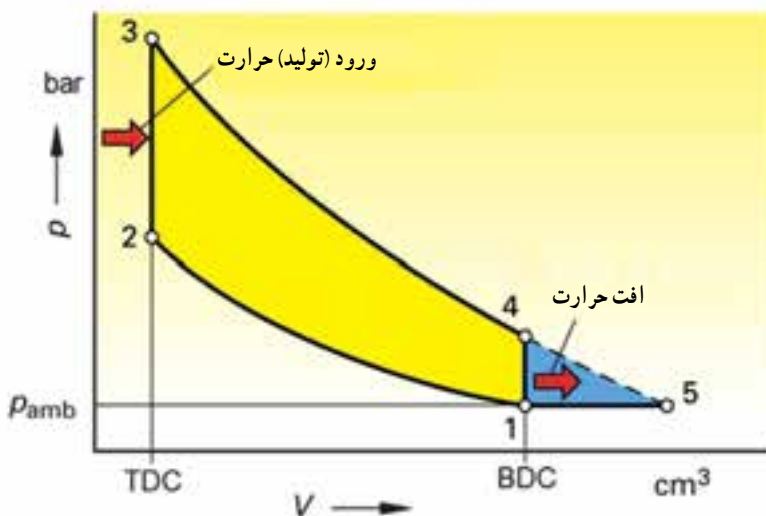
شکل ۵-۷- اشکال مختلف محفظه احتراق به منظور اختلاط بهتر سوخت و هوا

۵-۱-۵- منحنی احتراق سیکل چهار زمانه اتو: با نصب دستگاه ثبت کننده فشار

به سیلندر، می توان تغییرات فشار داخل سیلندر را هر لحظه از سیکل موتور به دست آورد (شکل ۵-۸ الف).

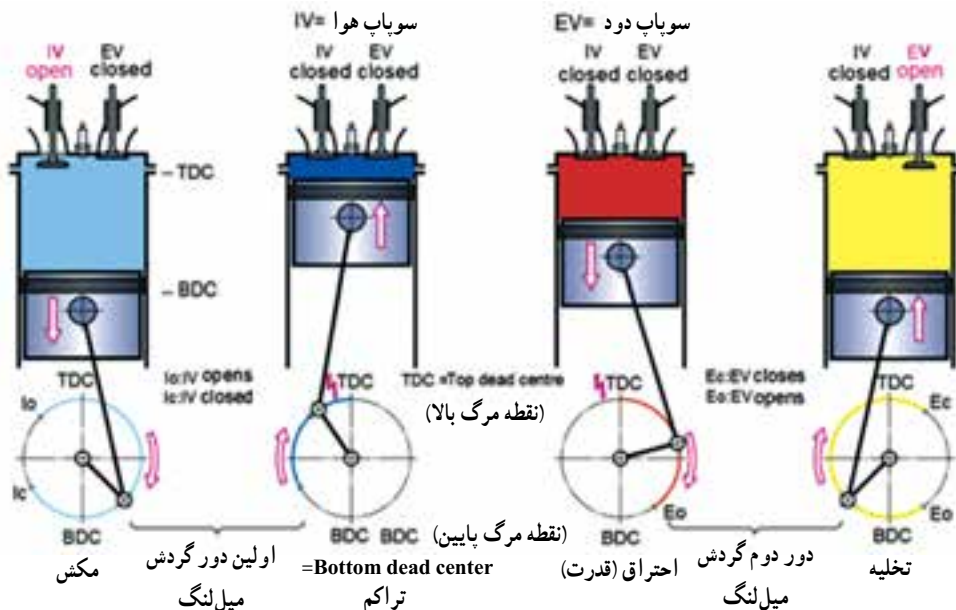


شکل ۵-۸ الف)



شکل ۵-۸ ب)

۶-۱-۵- جدول وضعیت کار موتور در زمان‌های مختلف: در جدول ۱-۵ مقادیر به‌عنوان مثال داده شده است.



- | | | | |
|--|---|---|--|
| ۱- کورس مکش | ۲- کورس تراکم | ۳- کورس قدرت | ۴- کورس تخلیه |
| سوپاپ گاز باز شده و سوپاپ دود بسته است. با پایین رفتن پیستون، مخلوط هوا و سوخت وارد سیلندر می‌شود. | هر دو سوپاپ بسته‌بده، با بالا رفتن پیستون، مخلوط هوا و سوخت، تحت فشار قرار می‌گیرد و در نتیجه فشار و درجه حرارت آن بالا می‌رود. | هر دو سوپاپ بسته می‌مانند و گاز فشرده شده با جرقه شمع منفجر می‌شود. در نتیجه پیستون با نیروی زیاد به طرف پایین حرکت می‌کند. | سوپاپ گاز بسته مانده و سوپاپ دود کمی قبل از این زمان باز شده است. دود از سیلندر خارج می‌شود. |

شکل ۹-۵- مراحل احتراق یک موتور چهار زمانه

جدول ۱-۵- کار موتور چهار زمانه

زمان	منحنی های زمان ها	وضع سوپاپ ها	اندازه فشار سنج	حجم سیلندر	درجه حرارت سیلندر	دیاگرام زمانی کار موتور بر حسب زاویه گردش میل لنگ
	تئوری	تئوری	گاز باز	زیاد می شود	کم می شود	
			دود بسته			
مکش	عملی	عملی	گاز باز دود فقط ۱۰° باز است	زیاد می شود	کم می شود	 طول مکش ۱۰° ۱۸۰° = ۲۳۵°
	تئوری	تئوری	گاز بسته	کم می شود	زیاد می شود	
			دود بسته			
تراکم	عملی	عملی	گاز فقط ۴۵° باز	کمتر از مقدار تئوری	کم می شود	 طول تراکم ۱۸۰° = ۱۳۵°
			دود بسته			
	تئوری	تئوری	گاز بسته	زیاد می شود	کم می شود	
			دود بسته			
قدرت	عملی	عملی	گاز بسته	کمتر از مقدار تئوری	کم می شود	 طول قدرت ۱۸۰° = ۱۳۵°
			دود ۴۵° باز			
	تئوری	تئوری	گاز بسته	برابر فشار جو	کم می شود	
			دود باز			
تخلیه	عملی	عملی	گاز ۱۰° باز	بیشتر از فشار جو	کم می شود	 طول تخلیه ۱۸۰° = ۲۳۵°
			دود باز			

۲-۵- سیستم خنک کاری موتور

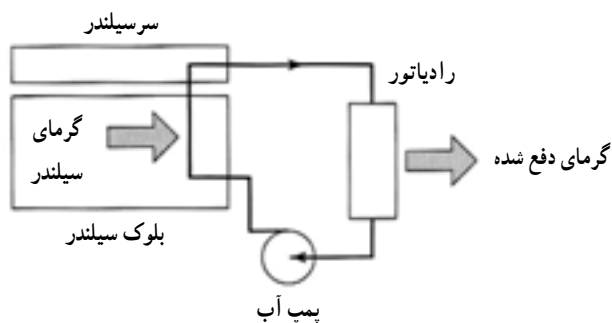
۲-۵-۱- مقدمه: انتقال حرارت رضایت بخش در موتور به دلایل زیادی از قبیل محدودیت‌های دمای مواد، محدودیت عملکرد روغن روانکاری، آلاینده‌ها و کوبش اهمیت زیادی دارد. از آن جایی که فرایند احتراق در یک موتور احتراق داخلی بر خلاف یک موتور احتراق خارجی به شکل ممتد و ادامه‌دار نیست، دمای قطعات از دمای بیشینه احتراق بسیار کمتر خواهد بود. البته دمای برخی نواحی حساس می‌بایست پایین‌تر از محدودیت‌های طراحی ماده تشکیل‌دهنده نگه داشته شود. آلیاژهای آلومینیوم در دماهای بیشتر از ۷۷۵K شروع به ذوب شدن می‌کنند و دمای جوش آهن حدود ۱۸۰۰K است. دماهای در حال تغییر حول بدنه داخلی سیلندر موجب اعوجاج بدنه داخلی سیلندر شده و منجر به نشتی، مصرف روغن و سایش پیستون خواهد شد. همچنین خنک کاری موتور به منظور جلوگیری از کوبش در موتورهای احتراق جرقه‌ای لازم است.

انتقال حرارت سیستم آگزوز نیز یک عامل مهم در عملکرد توربین آگزوز و آلاینده‌هاست. عملکرد راضی‌کننده یک مبدل کاتالیزوری پس از یک دمای آستانه رخ می‌دهد. دمای آستانه (بهره‌وری اکسیداسیون بیش از ۵٪) برای اکسیداسیون کاتالیز شده هیدروکربن و مونواکسید کربن حدود ۵۰۰K است. پس در نتیجه در دماهای کمتر از ۵۰۰K عملکرد مبدل کاتالیزوری به شکل نامطلوبی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. به علاوه اکسیداسیون مداوم و مستمر آلاینده‌های هیدروکربنی و دیگر آلاینده‌ها در سیستم آگزوز تابعی از دمای سیستم آگزوز است. انتقال حرارت به جریان هوا در چند راهه ورودی، بازده تنفسی را کاهش می‌دهد، زیرا چگالی دمای ورودی کاهش می‌یابد.

مطالعه آزاد

نرخ انتقال حرارت در یک موتور بیش از هر متغیر دیگری به دمای واسط خنک‌کاری و ابعاد موتور وابسته است. تعاملات پیچیده‌ای میان پارامترهای عملکردی گوناگون وجود دارد. به عنوان مثال با کاهش دمای واسط خنک‌کاری انتقال حرارت به آن افزایش می‌یابد و دمای احتراق کاهش می‌یابد، این باعث کاهش راندمان احتراق و افزایش بازده تنفسی می‌شود، همچنین موجب افزایش تنش‌های حرارتی در پوسته سیلندر و افزایش ابعاد رادباتور مورد نیاز می‌گردد زیرا اختلاف دمای محیط و واسط خنک‌کاری افزایش می‌یابد. تشکیل اکسیدهای نیتروژن کاهش یافته و اکسیداسیون هیدروکربن‌ها افزایش می‌یابد. دمای آگزوز نیز افزایش می‌یابد، برای اطلاعات بیشتر در مورد انتقال حرارت موتور به کتاب بورمن ونیشیواکی (۱۹۸۷) مراجعه شود.

۲-۲-۵- انواع سیستم‌های خنک‌کاری موتور: دو نوع سیستم خنک‌کاری برای انتقال حرارت بلوک سیلندر و سرسیلندر وجود دارد. سیستم‌های هوا خنک و آب خنک، در سیستم‌های آب خنک، گرما با استفاده از یک واسط خنک‌کاری مایع، توسط کانال‌های خنک‌کاری داخلی تعبیه شده در بلوک سیلندر به بیرون هدایت می‌شود. این عمل به طور شماتیک در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. با واسط خنک‌کاری هوا، گرما با استفاده از پره‌های متصل به دیوار سیلندر به بیرون هدایت می‌شود، مکانیزم این نوع سیستم‌ها به شکل شماتیک در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. هر دو نوع سیستم خنک‌کاری مزایا و معایبی دارند. سیستم‌های آب خنک بسیار کم سر و صدا را جذب می‌کند، سیستم‌های هوا خنک می‌باشند، زیرا کانال‌های خنک‌کاری صدای فرآیندهای احتراق را جذب می‌کند، سیستم‌های مایع نیز در معرض مشکلاتی چون یخ زدن، خوردگی و نشتی هستند، در حالی که این مشکلات در سیستم‌های هوا خنک وجود ندارد.



شکل ۵-۱۰- سیستم خنک‌کاری با سیال خنک‌کننده مایع



شکل ۵-۱۱- سیستم خنک‌کاری با سیال خنک‌کننده هوا

سیستم آب خنک یک حلقه منفرد بوده و یک پمپ آب، سیال خنک‌کاری را به بلوک سیلندر و از آنجا به سر سیلندر می‌فرستد، سپس سیال واسط خنک‌کاری به یک رادیاتور یا مبدل حرارتی جریان یافته و از آنجا به پمپ باز می‌گردد. نقطه جوش واسط خنک‌کاری را می‌توان با افزایش فشار یا با اضافه کردن مواد افزودنی با دمای جوش بالاتر (مثل اتیل گلیکول) افزایش داد. طی گرم شدن موتور یک شیر که به شکل ترمواستاتیکی کنترل می‌شود واسط خنک‌کاری را مجدداً وارد سیکل خنک‌کاری بلوک سیلندر می‌کند و از جریان یافتن آن به مبدل حرارتی جلوگیری می‌کند. زمانی که موتور گرم می‌شود شیر باز شده و اجازه ورود سیال خنک‌کاری به رادیاتور را می‌دهد. زمان لازم برای گرم شدن موتور و رسیدن به یک حالت ثابت به ابعاد موتور، سرعت و بار وارده بستگی داشته و معمولاً از مرتبه 10° دقیقه برای یک موتور خودرو است. مدارهای خنک‌کاری دوگانه با مدارهای جداگانه برای سرسیلندر و بلوک سیلندر مورد استفاده قرار گرفته است.

مطالعه آزاد

طراحی مسیرهای خنک‌کاری مایع در بلوک و سرسیلندر به شکل آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. یکی از مهمترین ملاحظات در طراحی سیستم‌های خنک‌کاری، فراهم کردن جریان خنک‌کننده کافی برای نواحی با شار گرمایی بالا نظیر راهگاه‌های خروجی می‌باشد. از آنجا که خنک‌سازی فاصله بین سوپاپ‌های خروجی مشکل است، در برخی طرح‌های موتور خودرو تنها از یک سوپاپ دود استفاده می‌کنند تا گرمادهی مخلوط سوخت و هوای ورودی کاهش یافته و بازده تنفسی افزایش یابد. مطالعه دقیق پارامترهای خنک‌کاری در مرجع رایینسون ۱۹۹۹ داده شده است.

شارهای حرارتی و دماهای سطحی نزدیک به چند راهه و درگاه خروجی به قدری بالاست که می‌تواند باعث جوشش هسته‌ای سیال خنک‌کاری در نقاط مذکور گردد. ضرایب انتقال حرارت جوششی بسیار بزرگتر از فاز منفرد انتقال حرارت جابجایی اجباری است. دماهای سطحی به همان نسبت کمتر خواهند بود. برای شارهای حرارتی از مرتبه $1/5 \text{ MW/m}^2$ دمای سطوح خنک‌کاری حدود 2 تا 3 درجه بیشتر از دمای اشباع (که معمولاً 13°C است) خواهد بود. از آنجایی که حباب‌های شکل یافته روی سطح کانال خنک‌کاری به سمت پایین دست جریان جاروب شده و در سیال خنک‌تر چگالش می‌یابند، تحلیل فرآیند جوشش هسته‌ای، بسیار پیچیده است.

موتورهایی با توان خروجی نسبتاً پایین (کمتر از 2 kW) از سیستم‌های هوا خنک استفاده می‌کنند. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی هوا بسیار کمتر از آب است، سیستم‌های هوا خنک از پره‌هایی برای کاهش دمای سطحی سمت هوا استفاده می‌کنند. برای افزایش تولید توان خروجی از یک فن خارجی برای افزایش ضریب انتقال حرارت سمت هوا استفاده می‌شود. بیشتر اوقات موتور هواپیماها به صورت هوا خنک طراحی

می‌شود از آنجایی که موتور هواپیماها معمولاً محصور نیستند و اصولاً بعد از ملخ جاسازی می‌شوند، فراهم نمودن هوای مورد نیاز، به‌سادگی انجام می‌شود. موتورهایی که برای مدت زمان‌های کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، از سیستم‌های خنک‌کاری استفاده نمی‌کنند. در این موتورها از ظرفیت گرمایی بلوک سیلندر برای نگه داشتن دماهای محیطی سمت گاز در محدوده‌های تعیین شده استفاده می‌کنند.

به دلیل اینکه حدود یک سوم انرژی سوخت به صورت انتقال حرارت به واسطه خنک‌کاری از بین می‌رود، به نظر می‌رسد که کاهش مقدار این اتلاف حرارت منطقی است. کاهش انتقال حرارت مذکور می‌تواند باعث افزایش بازده موتور گردد. یکی از راه‌های کاهش انتقال حرارت به سیال خنک‌کاری، افزایش مقاومت حرارتی بلوک سیلندر با استفاده از موادی با هدایت حرارتی پایین از قبیل سرامیک‌ها و با اضافه کردن عایق حرارتی به موتور است. برخی از مواد مورد استفاده در دیواره‌های سرامیکی که می‌توانند در دماهای بالاتر عمل کنند و هدایت حرارتی کمتری نسبت به چدن دارند، نیتريد سيليكون و زیرکونیوم می‌باشند.

نتایج تجربی حاصل از این موتورها نشان می‌دهد کاهش اتلاف حرارت به سیال خنک‌کاری موجب افزایش بازده موتور نمی‌گردد. اولاً از آنجایی که موتور احتراق داخلی مبتنی بر یک سیکل ترمودینامیکی است، بازده تبدیل حرارت به کار توسط قانون دوم ترمودینامیک محدود خواهد شد. در حین انبساط، موتور حدود ۳٪ گرمای ورودی را به کار تبدیل می‌کند، بنابراین حداکثر همان نسبت از انتقال حرارت به واسطه خنک‌کاری می‌تواند به کار تبدیل شود. ثانیاً، با عایق‌بندی موتور، دمای متوسط سیلندر افزایش می‌یابد و دمای گازهای خروجی و آنتالپی آن افزایش می‌یابد. ثالثاً به دلیل آن که عمق نفوذ شار حرارتی احتراق تنها حدود ۱ mm است، انتقال حرارت به سیال خنک‌کاری در سیکل ترمودینامیکی، یک فرایند پایا می‌باشد، لیکن کار مثبت تنها طی عمل انبساط تولید می‌شود. انتقال حرارت انجام شده در کورس‌های دیگر، قابلیت تبدیل به کار را ندارد. در نهایت دمای بیشتر دیواره، گاز وارد شده طی فرایند مکش را گرم کرده و باعث کاهش بازده تنفسی موتور می‌گردد. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای، افزایش دمای دیواره طی عمل تراکم می‌تواند مشکلات مربوط به کوبش را افزایش دهد. بنابراین اکثر موتورهایی که سیلندر آنها مقاومت حرارتی بالایی دارد موتورهای احتراق تراکمی هستند.

۳-۵- موازنه انرژی در موتور

بالانس انرژی در موتور به وسیله آزمایش‌های انجام شده روی موتورهای آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. شکل ۱۲-۵ یک موتور تنظیم شده برای تعیین مقدار حرارت دفع شده به روغن، آب و هوای محیط را نشان می‌دهد. جریان سنج‌ها داخل آب نصب شده‌اند و مدارهای روغن و ترموکوپل‌ها دماهای ورودی و خروجی را اندازه‌گیری می‌کنند. بالانس انرژی اعمال شده بر آب خنک‌کننده و روغن جاری شده در موتور روابط زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\dot{Q}_{\text{water}} = (\dot{m}c_p)_{\text{water}}(T_3 - T_4)$$

$$\dot{Q}_{\text{oil}} = (\dot{m}c_p)_{\text{oil}}(T_1 - T_2)$$

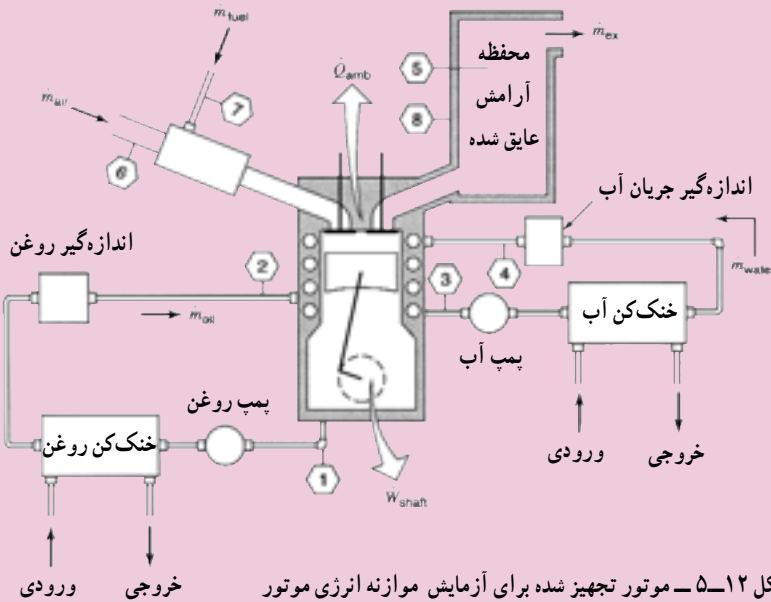
تعیین حرارت دفع شده به هوای محیط پیچیده تر است با اعمال قانون اول ترمودینامیک به سیستم موتور، خواهیم داشت :

$$\dot{Q}_{amb} = (\dot{m}h)_{air} + (\dot{m}h)_{fuel} - (\dot{m}h)_{ex}$$

$$- \dot{Q}_{water} - \dot{Q}_{oil} - \dot{W}_{shaft}$$

نرخ جریان جرم در آگروز با استفاده از نرخهای جریان اندازه گیری شده هوا و سوخت بدست می آید :

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}$$



آنتالپیهای گازهای خروجی و مخلوط هوا و سوخت به ترتیب بر اساس دماهای اندازه گیری شده T_p, T_f, T_e بدست می آیند ترکیب گازهای خروجی را می توان به صورت تئوری از نسبت سوخت به هوا بدست آورد و یا اندازه گیری نمود این مسئله در هر دو حالت مهم است، چرا که دمای T_e با دمای متوسط جرم خروجی معادل است، به همین دلیل یک انباره عایق شده وجود دارد که وظیفه مخلوط کردن گاز خروجی که زودتر در سیکل وارد شده و گاز خروجی سردتر که دیرتر وارد سیکل شده را بر عهده دارد یکی دیگر از پیچیدگی ها، تأثیرات انتقال حرارت بر دمای اندازه گیری توسط ترموکوپل است برای تعیین دمای گاز این مقادیر باید تصحیح گردند بالانس انرژی در انتهای ترموکوپل می دهد :

$$T_{ex} = T_f + \frac{\varepsilon\sigma}{h} T_{\Delta}^f - T_{\Delta}^f$$

ε نفوذ انتهای ترموکوپل بوده، σ ثابت استفان- بولتزمان، h ضریب انتقال حرارت در انتها، T_e دمای

انتها و T_{Δ} دمای دیواره داخلی مجموعه می باشد

در عمل برای انجام بالانس انرژی موتور، حداکثر گرمای بازیافت شده از گاز خروجی را اندازه گیری می کنند این کار به وسیله یک بالانس انرژی روی اگزوز یعنی جایی که تا دمای محیط خنک می شود صورت می گیرد:

$$\dot{Q}_{ex} = \dot{m}_{ex} [h_{ex}(T_{ex}) - (h_{ex}(T_{amb}))]$$

برای اندازه گیری آنتالپی خروجی در دمای محیط، باید از کیفیت آب تعادلی، استفاده شود:

$$\dot{Q}_{amb} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{ex} - \dot{Q}_{water} - \dot{Q}_{oil} - \dot{W}_{shaft}$$

جدول ۲-۵ - موازنه انرژی برای یک موتور دیزل با سرعت متوسط، چهارزمانه، تزریق مستقیم و تاج پیستون گود

\dot{Q}_{loss}	$\dot{W}_{friction}$	\dot{W}_{shaft}	$\dot{Q}_{ambient}$	\dot{Q}_{oil}	\dot{Q}_{water}	$\dot{Q}_{exhaust}$	Bmep(bar)	N(rpm)
/ ۱۲۴	/ ۱	/ ۳۱۷	/ ۶۹	/ ۳۷	/ ۱۱۸	/ ۴۵۹	۹/۹	۵
/ ۸۷	/ ۱۷۸	/ ۲۹۸	/ ۹۲	/ ۶۵	/ ۱۸	/ ۴۳۷	۳/۵۲	۵
/ ۱۵۹	/ ۹۲	/ ۳۱۵	/ ۲۶	/ ۷۴	/ ۱۵۱	/ ۴۳۲	۳/۵	۴

موتور: $b = 3.4 / 8 \text{ mm}$ و $r = 12 / 85$

محیط: $T = 293 \text{ K}$ ، $P = 1.01 \text{ bar}$

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_{water} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{ambient} - \dot{W}_{friction}$$

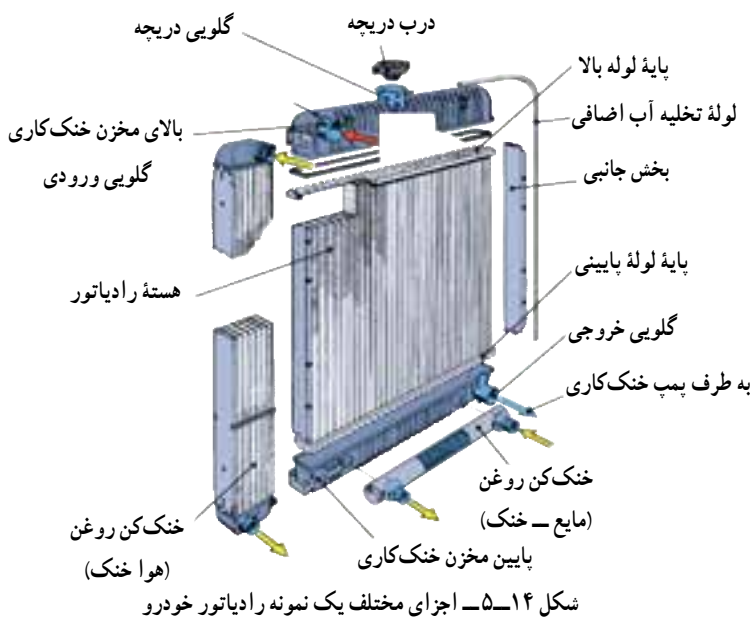
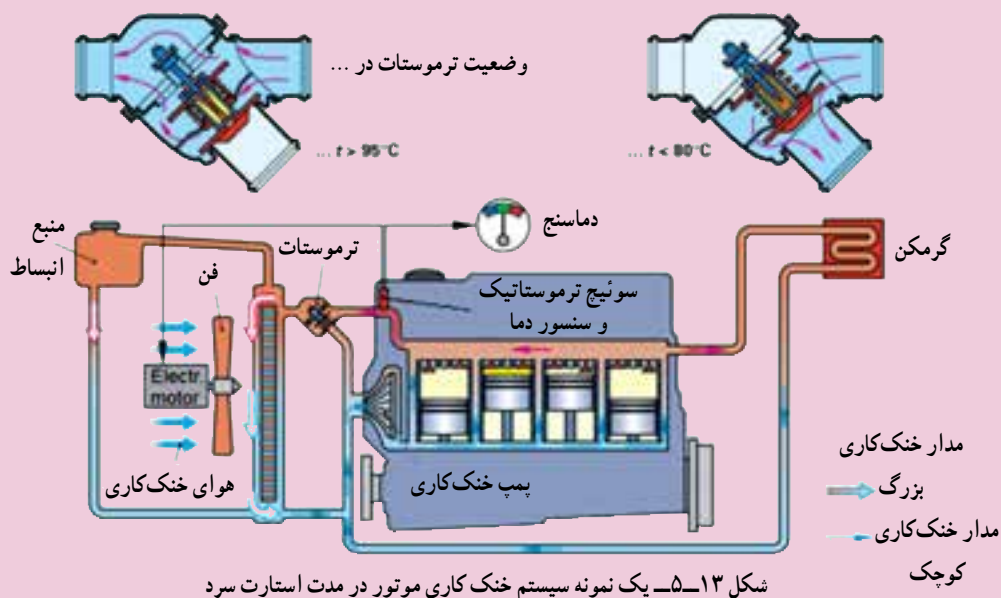
تمامی مقادیر نرخ انرژی بر حسب انرژی سوخت ورودی \dot{Q}_{in} نرمال شده اند به طوری که بر اساس تعریف:

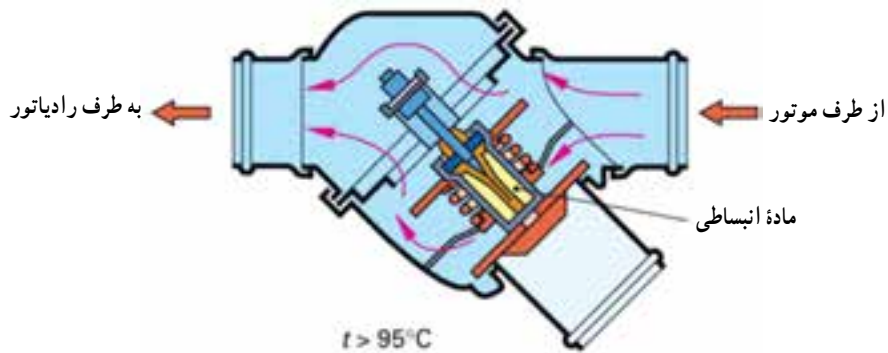
$$\dot{Q}_{in} = (\dot{m}h)_{air} + (\dot{m}h)_{fuel} - \dot{m}_{ex} h_{ex}(T_{amb})$$

در نهایت اگر سوخت و هوا در دمای محیط باشند، موتور به صورت رقیق و یا استوکیومتریکی کار می کند در این حالت دمای محیط و فشار برابر دما و فشار مرجع خواهند بود، بنابراین آنتالپی ورودی برابر حاصلضرب نرخ جریان سوخت و گرمای احتراق استوکیومتری سوخت است

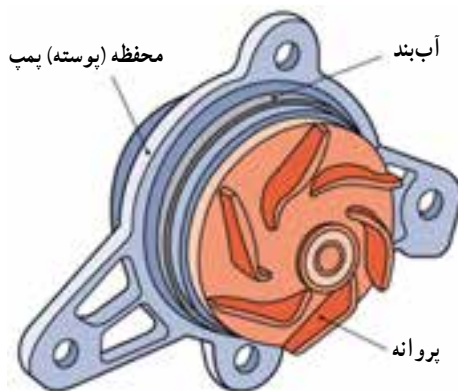
برخی نتایج بدست آمده توسط وایت هاوس (۷۱-۱۹۷) برای یک موتور دیزل با سرعت متوسط در جدول ۲-۵ آورده شده است موتور دیزل ذکر شده، یک موتور آزمایشی تک سیلندر با قطر داخلی $3.4 / 8 \text{ mm}$ و ارتفاع 381 mm می باشد همچنین این جدول معادل حرارتی اصطکاک را به نحوی نمایش می دهد که بتوان تشخیص داد چه مقدار از گرمای دفع شده به هوای محیط، روغن و آب ناشی از انتقال حرارت سیال کاری و چه مقدار آن از اصطکاک بوده است کل گرمای دفع شده برابر مجموع انتقال حرارت به آب، روغن و هوای

ورودی است که کار اصطکاکی از آن کاسته شده است. مقادیر داخل جدول به وسیله انرژی ورودی سوخت به بعد شده اند. با مشاهده کار مربوط به محور میل لنگ، می توان فهمید که بازده حرارتی ترمزی موتور حدود ۳٪ است. حدود ۴۵٪ انرژی از سیستم آگزوز خارج می شود، ۱ تا ۱۵ درصد توسط اصطکاک هدر رفته و ۱ تا ۱۵ درصد دیگر نیز، به وسیله اتلاف حرارتی از بین خواهد رفت.

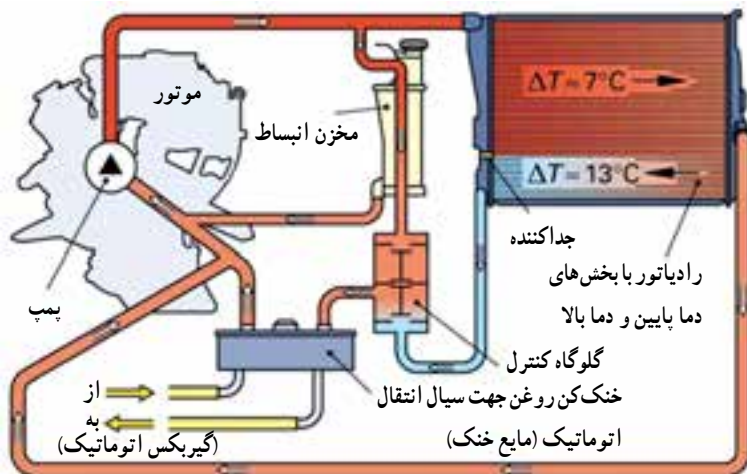




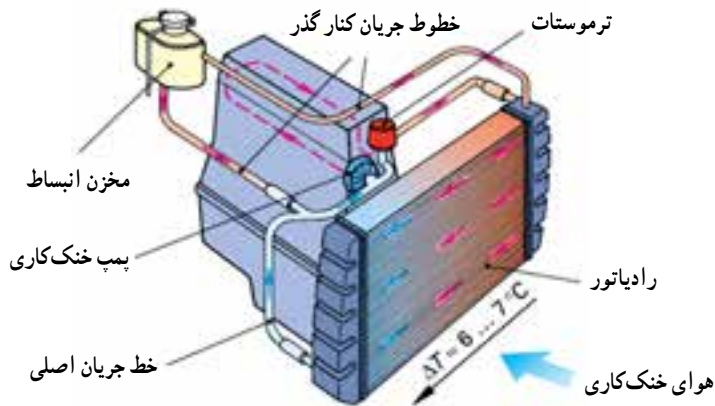
شکل ۱۵-۵- ترموستات انبساطی با شیر دابل در حالت سرد موتور



شکل ۱۶-۵- یک نمونه پمپ آب



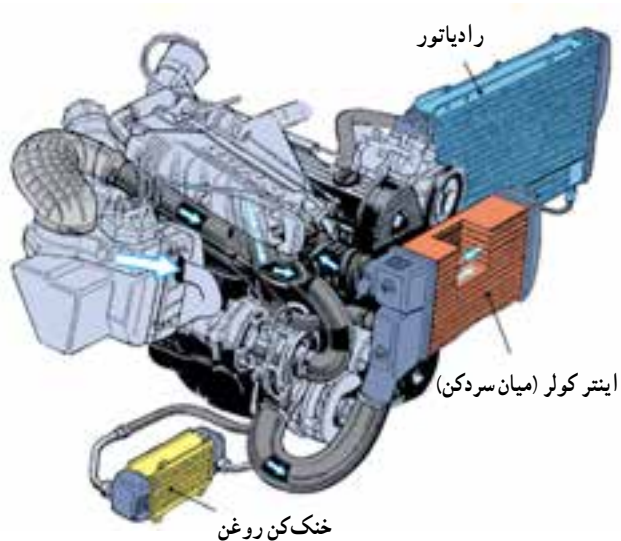
شکل ۱۷-۵- نمایش بخش دمای بالا و دمای پایین رادیاتور در یک سیستم خنک کاری



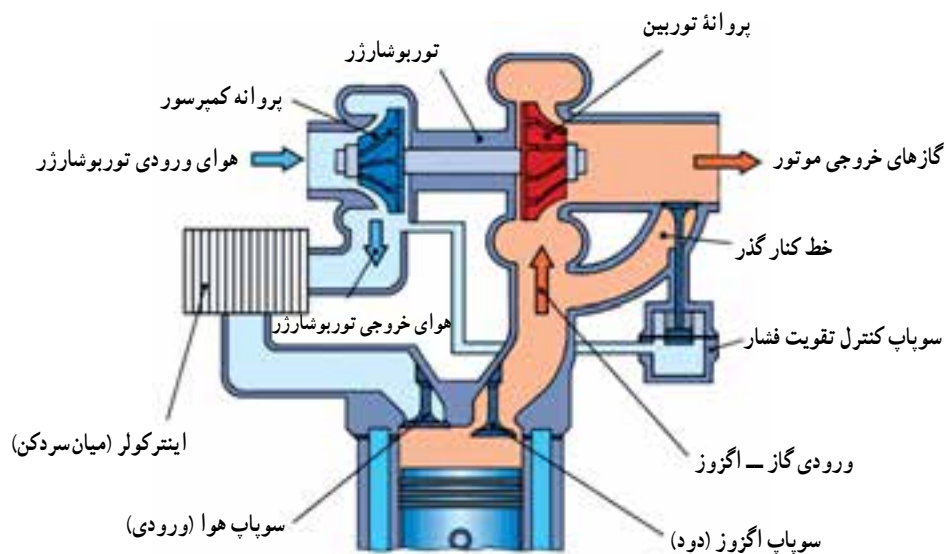
شکل ۱۸-۵- نمایش جریان عرضی متقاطع با رادیاتور در یک سیستم خنک کاری موتور

۴-۵- سایر سیستم های خنک کاری

علاوه بر سیستم خنک کاری موتور که در بالا اشاره شد برخی از موتورها که از سیستم های تکمیلی و تقویتی مانند توربوشارژر و سوپرشارژر برخوردارند نیاز به سیستم خنک کاری مجزایی دارند. مأموریت این سیستم ها در حقیقت تأمین هوای اضافی برای احتراق بهتر و تقویت موتور می باشد که اصطلاحاً عمل پرخورانی نامیده می شود. در عمل پرخورانی هوای بیرون توسط یک دستگاه متراکم کننده هوا به نام توربوشارژر به سیلندر وارد می شود. در اثر تراکم هوا فشار و درجه حرارت بالا می رود. افزایش دما تا حدی مطلوب است ولی از یک اندازه معینی بالاتر می تواند اثر منفی روی عملکرد موتور داشته باشد. برای این منظور هوای فشرده شده قبل از ورود به موتور وارد اینترکولر شده و سپس به داخل سیلندر می رود. اینترکولر شبیه رادیاتور بوده و جلوتر از رادیاتور نصب می شود. معمولاً عمل خنک کاری هوای داخل لوله های آن با یک یا دو فن صورت می گیرد. شکل ۱۹-۵ محل نصب اینترکولر در جلوی موتور را نشان می دهد. شکل ۲۰-۵ اجزای مختلف یک توربوشارژر را نشان می دهد که از یک کمپرسور جهت متراکم کردن هوا و یک توربین که توسط فشار گازهای داغ خروجی موتور به گردش درمی آید و سبب گردش پروانه کمپرسور می شود.



شکل ۱۹-۵- محل نصب اینتر کولر در قسمت جلوی رادیاتور



شکل ۲۰-۵- موتور مجهز به توربوشارژر گاز خروجی، جهت پر خورانی هوای ورودی به موتور