مجموعه مقالات نهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱۹ تا ۲۱ بهمن ۱۴۰۰، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز
FCCI-2022-0042

بررسی تجربی صحت عملکرد سامانه‌ی خنک‌کاری یک نمونه موتور بنزینی ارتقاء یافته جهت کاربری دریایی

محمد امین زمانی[1*]، وحیدحسینی[2]، محمدحسن سعیدی[3]
۱- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mohamadaminzamani74@gmail.com
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، vhosseini@sharif.edu
۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، saman@sharif.edu
* نویسنده مخاطب

چکیده
موتورهای درون سوز، جزء جدایی ناپذیر تولید توان در بخش‌های مختلفی از صنعت، اعم از حمل و نقل زمینی،دریایی و هوایی تا نیروگاه‌ها و... می‌باشند. هدف از ارتقاء موتورهای درون سوز، افزایش توان خروجی به ازای ابعاد ثابت موتور می باشد. در موتور ارتقاء یافته همواره سعی می‌شود نزدیک توان بیشینه خود کار کند در حالیکه یک موتور خودرویی در بار میانی کار می‌کند. هدف این مقاله بررسی تجربی صحت عملکرد سامانه خنک کاری یک نمونه موتور بنزینی ارتقاء یافته برای تغییر کاربری دریایی است. در ابتدا پس از شناخت وجوه تمایز و تشابه مدارهای خنک کاری موتورهای ارتقاء یافته ومعمولی(مبنا) و بررسی مدار خنک کاری سیستم‌های مشابه، مدار خنک کاری موتور ارتقاء یافته طراحی شده و سپس برای تعیین صحت عملکرد، در آزمون تجربی تست می‌شود. برای جلوگیری از خوردگی و کاهش عمر موتور به علت آب شور دریا، از مدار بسته در سامانه خنک‌کاری موتور ارتقا یافته استفاده می‌شود. یک مبدل حرارتی آب شور و شیرین و پمپ آب شور به مدار اضافه خواهد شد. همچنین از یک مبدل روغن و پمپ روغن با ظرفیت بالاتر استفاده خواهد شد. در انتها به کمک انجام آزمون های تجربی و استخراج محدودیت های کاری در دامنه عملکرد موتور،نقطه کاری بهینه آن تعیین می شود.

کلمات کلیدی: موتورهای درون ســـوز،موتورهای ارتقاءیافته،مبدل حرارتی،آزمون تجربی

مقدمه
سامانه خنک‌کاری موتور نقشی بسیار مهم در حفظ دمای مناسب موتور دارد. این سامانه باید در تمامی شرایط به درستی عمل خنک‌کاری را انجام دهد[۱]. در موتورهای ارتقاء یافته، افزایش توان تولیدی توسط موتور، افزایش حرارت تولیدی را به دنبال دارد لذا برای حفظ دما مناسب موتور،لازم است بخش زیادی از حرارت تولید شده در موتور از طریق سیال خنک کار دفع گردد. این حرارت در صورت دفع نشدن علاوه بر افت عملکردی و افزایش برخی آلاینده ها، ممکن است دمای بدنه و اجزای موتور از دما ذوب بالاتر رفته و موجب خسارات شدیدی شود. بنابراین استفاده از یک سامانه انتقال حرارت از نوع اجباری برای خنک کاری موتور ضروری به نظر می‌رسد[۲, ۳].سامانه خنک‌کاری در موتورهای ارتقاءیافته در مقایسه با موتورهای خودرویی زمینی(با کاربری معمولی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا رفتار سامانه روغن‌کاری و تا حدودی احتراقی و در نتیجه عملکرد موتور مستقیما به سامانه خنک‌کاری بستگی دارد. این بستگی به خاطر این است که نسبت توان به وزن و توان به حجم در موتورهای ارتقاء یافته ، بزرگتر از موتورهای معمولی است.

یکی از کاربری‌های راهبردی موتورهای بنزینی، کاربرد آن در مصارف دریایی است. از آنجایی که طراحی و ساخت موتورهای بنزینی با توان بالا با مشکلاتی در هزینه و زمان همراه است توسعه موتورهای موجود در کشور یکی از راه‌های برطرف نمودن نیازها می‌باشد. از آنجایی که ساخت موتورهای دریایی در انحصار چندین کشور خارجی می‌باشد و ممکن است با شرایط موجود در کشور سازگار نباشد؛ لازم است موتورهای موجود در کشور بازطراحی شده و درکاربری دریایی استفاده شوند. علاوه بر آن، می‌توان با بهبود شرایط عملکرد و تقویت توان تولیدی بسیاری از موتورهای موجود در بازار یا صنعت، که دیگر از آن‌ها استفاده نمی‌شود، دوباره به چرخه فعالیت بازگرداند. این کار به نوبه خود می‌تواند سبب صرفه جویی در هزینه، زمان و مواد اولیه برای تولید پایه یک موتور با توان کاری بیشتر باشد.

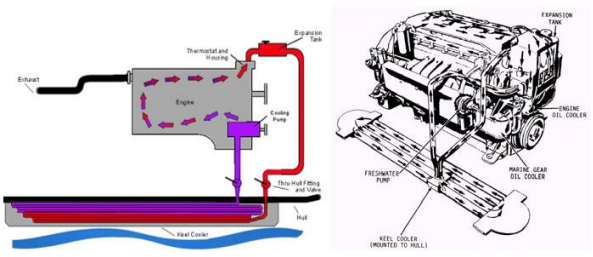
برای خنک کاری موتورهای دریایی به طور عمده سه روش وجود دارد:

۱- خنک کاری در فضا کف کشتی[1]

۲- مدار خنک کاری باز با آب دریا

۳- مدار خنک کاری بسته و باز

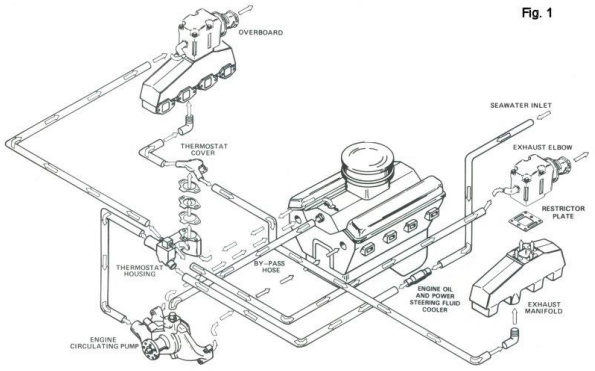
در شکل۱، خنک کاری در فضا کف کشتی نشان داده شده است. در این روش آب شیرین پس از جذب گرمای موتور به سمت شبکه‌ای که در کف کشتی تعبیه شده است هدایت شده و در تماس مستقیم با آب دریا، حرارت مورد نیاز را دفع می‌کند. این روش بیشتر برای موتورهای کوچک و در اعماق کم مناسب می‌باشد.



شکل ۱: روش خنک کاری در فضای کف کشتی [۴]

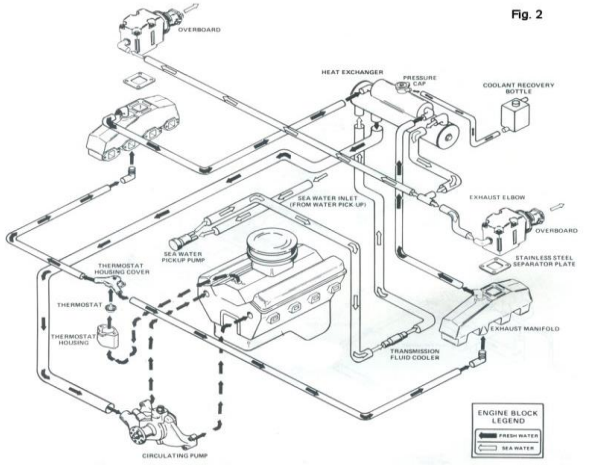
در شکل۲، مدار خنک کاری باز با آب دریا نشان داده شده است. در این سیستم آب دریا مستقیما توسط پمپی که بر روی موتور و یا داخل شناور نصب است، وارد موتور می شود و پس از خنک‌کاری قسمت‌های مختلف موتور (بلوکه، سرسیلندر، خنک کن روغن[2]، خنک کن میانی هوا[3]، منیفولد دود) از آن خارج شده و به سمت مسیر دود شناور هدایت می‌شود. بیشتر موتورهای برون نصب مانند موتورهای شرکت یاماها از این نوع مدار استفاده می‌کنند. در این حالت با توجه به اینکه موتور توسط آب شور دریا خنک کاری می‌شود بحث خوردگی وجود دارد. از این رو این موتورها باید پس از پایان سفر کاری، قبل از خاموش کردن موتور برای مدتی با آب شیرین کار کنند تا راهگاه‌های آب بلوکه و سایر قسمت‌ها شستشو و تمیز شوند.

[1] Keel Cooling
[2] Oil Cooler
[3] Intercooler



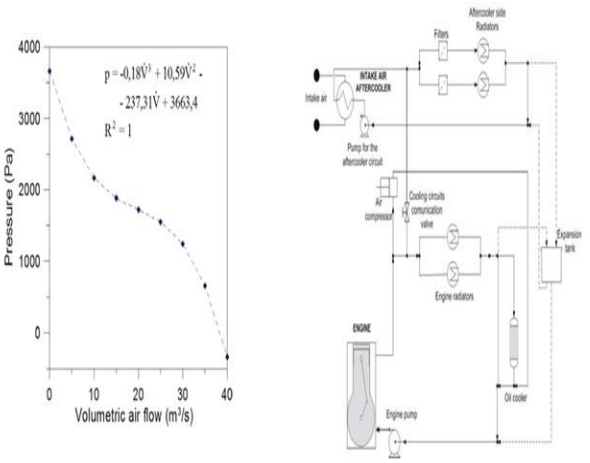
شکل ۲: مدار خنک کاری باز با آب دریا[۵]

شکل۳، شماتیکی از مدار باز و بسته خنک‌کاری را نشان می‌دهد. در حقیقت در این سیستم، موتور همزمان دو مدار خنک کاری دارد. در مدار بسته برای جلوگیری از خوردگی و آسیب قطعات، خنک‌کاری بلوکه و سرسیلندر موتور توسط آب شیرین صورت می‌گیرد. در مدار باز به مانند حالت اول آب دریا در جریان است. وظیفه اصلی این مدار، خنک کردن آب شیرین مدار بسته در داخل مبدل حرارتی است. بسته به موتور، خنک‌کن روغن، خنک‌کن میانی هوا، پوسته توربوشارژر (در صورت وجود) و منیفولد دود می‌تواند در مدار باز و یا بسته موتور قرار داشته باشند[۵].



شکل ۳: مدار خنک کاری بسته (آب شیرین) و باز (آب دریا)[۵]

آنتونی تورگروسا محقق گروه موتور احتراق داخلی دانشگاه پلی تکنیک والنسیا اسپانیا به کمک همکارانش در راستای طراحی سامانه خنک کاری برای موتورهای چهار سیلندر بنزینی به مطالعه مدل های موجود برای محاسبه برحرارتی موتور پرداخته و با بررسی های صورت گرفته و نتایج تجربی شرکت CMT-Motores نتایج شکل ۴ سمت چپ را به دست آورده و به کمک آن سیکل بسته سمت راست را برای خنک کاری این نوع از موتورها پیشنهاد دادند.

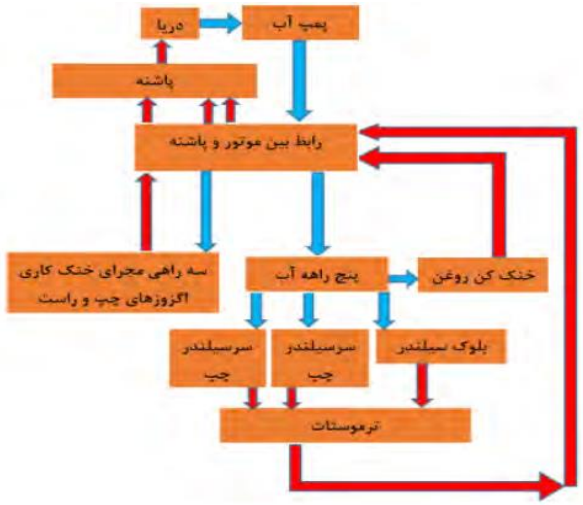


شکل ۴: سمت چپ منحنی عملکردی فن و سمت راست سیستم خنک‌کاری پیشنهادی آنتونی تروگروسا و همکاران[۶]

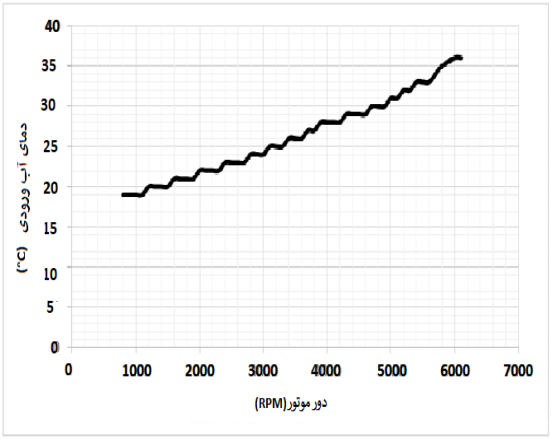
باری و همکاران با الگوبرداری از موتورهای برون نصب دریایی مدار خنک کاری یک موتور خودرویی را دریایی سازی کردند(شکل ۵). آنها ابتدا با بررسی مدار خنک کاری موتورهای دریایی ۳۰۰ اسب بخار مرکوری و ۲۵۰ اسب بخار یاماها و مقایسه آن با یک موتور خودرویی ۲۲۷ اسب بخار،در دوحالت نصب عمودی و افقی، سیستم خنک کاری موردنظر را طراحی کرده و آنرا برروی یک شناور نصب نموده و توانستند اطلاعاتی راجع به افزایش دمای آب ورودی و خروجی به موتور، روند تغییر دمای آب دور دو جداره موتور برحسب دور موتور و میانگین افزایش دمای دود اگزوز متناسب با دور موتور را استخراج کنند که جزئیات این نتایج در شکل۶ نشان داده شده است[۷]. مشخصات موتور پایه در این پژوهش در جدول ۱ موجود است.

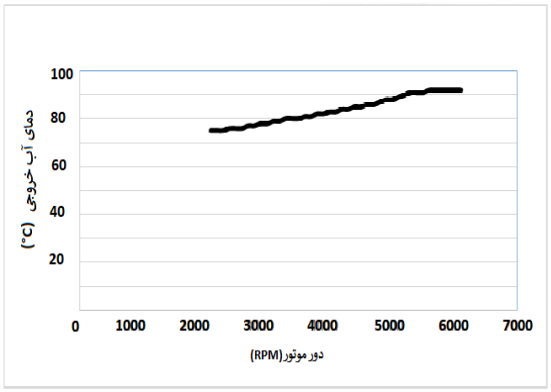
جدول ۱: مشخصات موتور پایه جهت ارتقاء توان عملکرد در پژوهش باری و همکاران[۷]

پارامتر های موتور هدف	مقدار و مشخصات
نوع موتور و تعداد سیلندر	شش سیلندر خورجینی(V6)
حجم موتور(cc)	۲۹۸۸
قطر سیلندر و کورس پیستون(mm)	۷۷/۳*۹۳
نوع و ترتیب سوپاپ‌ها	دو میل سوپاپ روی سر سیلندر (DOHC)



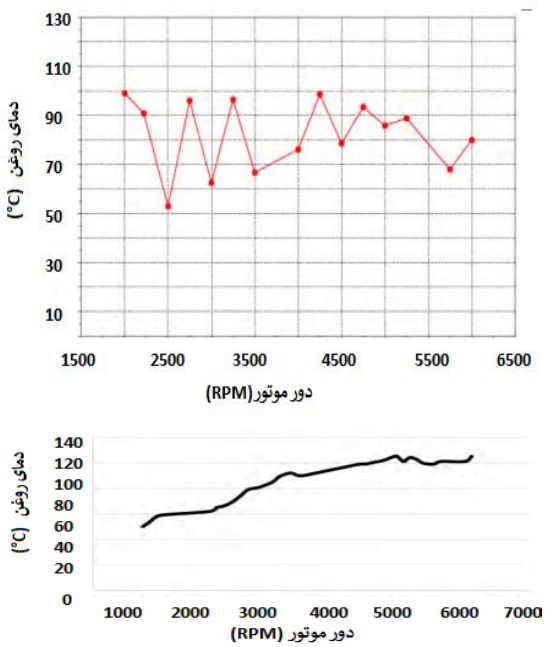
شکل ۵: مدارخنک کاری بازطراحی موتور ارتقاءیافته در پژوهش باری و همکاران[۷]





شکل ۶: نتایج پژوهش باری و همکاران[۷]

نصری و همکاران،الزامات دریایی سازی یک موتور خودرویی را ارائه نمودند. در پروژه‌ی آن‌ها ابتدا یک موتور عمودی دریایی مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های عملکردی و وظایف بخش های مختلف آن استخراج شده است سپس یک موتور خودرویی مورد ارزیابی قرار گرفته و زیر سامانه های مهم آن دسته بندی و ضمن شناسایی تفاوت‌های آن با موتور عمودی دریایی، توانستند با ایجاد تغییرات مورد نیاز و باز طراحی قطعات و زیر سامانه‌های موتور خودرویی، آن را به یک موتور دریایی عمودی تبدیل نمایند[۸]. مقایسه نحوه تغییرات دمای روغن در دوحالت دریایی و موتور پایه به عنوان نتیجه کار آنان در شکل۷ به تصویر کشیده شده است.

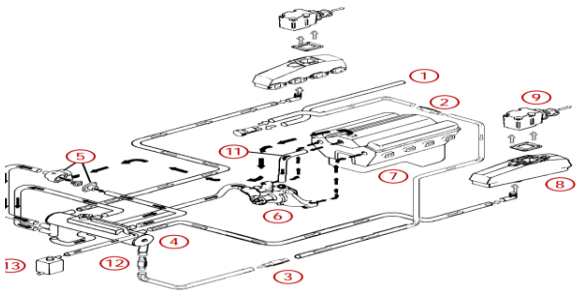


شکل ۷: نمودار دمای روغن و دور موتور در پژوهش نصری و همکاران [۸]

یکی از فرایندهایی که در طراحی موتور مد نظر قرار می‌گیرد، کنترل دمای اجزاء و طراحی سامانه خنک‌کاری بهینه و مناسب براساس ابعاد، نوع اجزا، سامانه‌های موجود، ظرفیت حرارتی موتور و ... می‌باشد. هدف اصلی که در طراحی سامانه خنک‌کاری دنبال می‌شود، کنترل دمای اجزا در شرایط عملکردی تعریف شده برای موتور در سامانه‌ای با صرف کمترین انرژی و توزیع یکسان پارامترهای قابل کنترل می‌باشد.

سامانه خنک کاری در موتور دریایی بر خلاف کاربری خودرویی دارای دو مدار است: مدار بسته آب شیرین، مدار باز آب شور.

وظیفه اصلی مدار بسته، خنک کاری بلوکه و سرسیلندر موتور است. برای جلوگیری از خوردگی در پوسته موتور، در این مدار آب شیرین به عنوان خنک کننده در گردش است. در مدار باز (دریا به دریا)، آب شور از دریا گرفته و در نهایت به دریا بازگردانده می‌شود. وظیفه مدار باز، خنک کاری آب شیرین مدار بسته در مبدل گرمایی اصلی موتور است. در برخی از موتورهای دریایی آب دریا علاوه بر مبدل اصلی، از تجهیزاتی مانند خنک‌کن میانی، خنک‌کن روغن، پوسته توربوشارژر و منیفولد دود ممکن است که عبور کند. این امکان هست که برخی از این قطعات توسط مدار آب شیرین خنک‌کاری شود مانند توربوشارژر و منیفولد دود. آب شور سبب خوردگی در قطعات می‌شود. برای کاهش خوردگی، در سیستم آب دریا، از لوله‌های فولادی با قطر بزرگ استفاده می‌شود. در شکل۸، مدار خنک کاری موتور دریایی شرکت مرکوری به عنوان نمونه مشاهده می‌شود.



۱- ورودی آب دریا
۲- واحد خنک کننده
۳- خنک کننده سوخت
۴- مبدل حرارتی
۵- محفظه‌ی ترموستات
۶- پمپ آب موتور
۷- بلوکه‌ی موتور
۸- منیفولد دود
۹- اگزوز
۱۰- جریان آب دریا
۱۱- شلنگ انشعاب
۱۲- خنک کننده روغن موتور
۱۳- مخزن خنک کننده

شکل ۸: مدار خنک کاری موتور دریایی مرکروزر مدل MIE 7.4L MPI [۹]

معرفی موتور و مدار خنک‌کاری

با توجه به افزایش توان در موتور هدف، قطعا باید سامانه خنک کاری موتور ارزیابی و بازبینی شود. با توجه به کاربری خودرویی موتور پایه و استفاده از سیستم رادیاتور، این قطعات دیگر قابل استفاده نخواهد بود. موتور هدف باید مجهز به دو مدار خنک کاری بسته (آب شیرین) و باز (آب دریا) باشد. قطعاتی مانند مبدل اصلی (آب شیرین- آب دریا)، پمپ آب موتور، پمپ آب دریا، خنک کن میانی هوا، خنک کن روغن باید مطابق با محاسبات بار حرارتی موتور هدف سفارش گذاری شود. همچنین در صورت نیاز و بالا بودن دمای کارکردی، باید منیفولد دود و توربین توربوشارژر در مدار خنک کاری قرار بگیرد و پوسته آنها خنک شود.

در این مقاله، موتور Vortec L29 ساخته شرکت شورلت به عنوان موتور پایه جهت دریایی سازی انتخاب شده است که مشخصات فنی آن در جدول۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی موتورهای Vorec L29

مدل موتور	454 HO
نوع موتور	Chevy Big-Block V-8
توان(HP)	438 @ 5300 rpm
بیشینه دور(rpm)	5500
حجم جا به جایی(cu in)	454
قطر سیلندر(in)	4.25
طول جابه جایی(in)	4
نسبت تراکم	8.75
حجم موتور(cc)	118

جدول ۳: مقایسه قطعات موتور پایه و موتور ارتقاءیافته

قطعات موتور پایه	قطعات موتور ارتقاء یافته
---	توربوشارژر مدل GTX3582R
انژکتور مدل Vortec	انژکتور مدل Vortec
رادیاتور	مبدل حرارتی آب موتور
	مبدل حرارتی روغن
	خنک کن میانی هوا
پمپ آب موتور	پمپ آب شیرین
	پمپ آب شور
پمپ روغن (متوسط	پمپ روغن (ظرفیت بالا)
کارتر روغن	کارتر روغن (با عمق بیشتر)
	کارتر دریایی(سمت مدار آب شور)

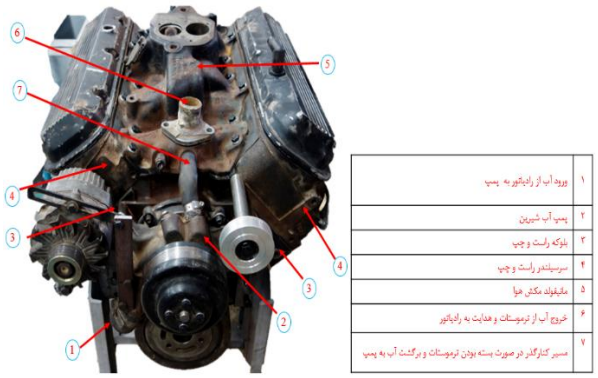
همانگونه که از جدول ۳ برمی‌آید، مهم‌ترین تفاوت بین موتور زمینی و موتور دریایی ارتقاء یافته در نحوه خنک کاری بلوکه و قطعات دوار موتور است. در موتورهای زمینی از رادیاتور به این منظور استفاده می‌شود که در آن آب خنک کننده در حال چرخش در موتور،نهایت توسط جریان هوای گذرنده از رادیاتور خنک می‌شود.اما در موتور ارتقاء یافته باتوجه به شدید بودن بارحرارتی ناشی از افزایش توان،وجود مبدل‌های حرارتی جداگانه برای خنک‌کاری قسمت‌های مختلف را ایجاب می‌کند. از جمله مبدل‌های حرارتی اصلی به کار رفته در موتورهای دریایی عبارتند از: مبدل حرارتی آب موتور، خنک کن میانی هوا و خنک کن روغن.

مبدل حرارتی آب موتور، نقش خنک کردن آب خنک کننده در حال چرخش در بلوکه موتور را بوسیله آب دریا برعهده دارد.

خنک کن میانی نوعی مبدل حرارتی است که برای خنک کردن هوایی که به وسیله توربوشارژر یا سوپرشارژر فشرده شده است، استفاده می‌شود. خنک‌کن میانی در مسیری که هوا از میان توربوشارژر یا سوپرشارژر به سمت موتور جریان می‌یابد قرار می‌گیرد. طبیعت هوا به عنوان گاز کامل به گونه‌ای است که وقتی فشار آن به کمک توربوشارژر یا سوپرشارژر افزایش می‌یابد، دمای آن نیز افزایش می‌یابد.

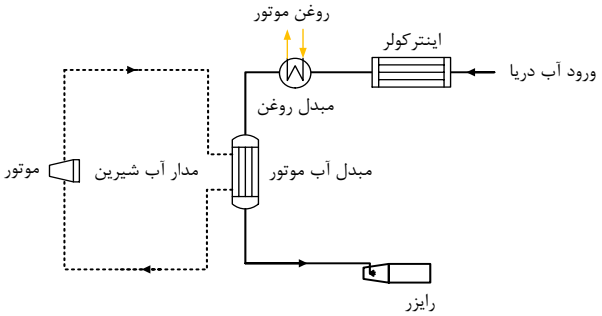
مبدل حرارتی روغن نیز وظیفه خنک کردن روغن داغ شده موتور ناشی از خنک کاری و حرکت قطعات دوار موتور را برعهده دارد لزجت مایعات به ویژه روغن با افزایش دما به شدت کاهش می‌یابد. حال اگر عمل خنک‌کاری روغن انجام نشود، باعث خوردگی شدید قطعات مکانیکی در موتور به ویژه پیستون و سیلندرها خواهد شد. ازاین رو مبدل حرارتی روغن نیز نقش مهمی در سامانه خنک کاری برعهده دارد. سامانه روان‌کاری، روغن را به همه‌ی قطعات متحرک موتور می‌رساند.

نمای کلی موتور پایه شورلت Vortec L29 به همراه مسیر خنک کاری آب در شکل۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمای کلی مسیر گردش آب در موتور شورولت پایه

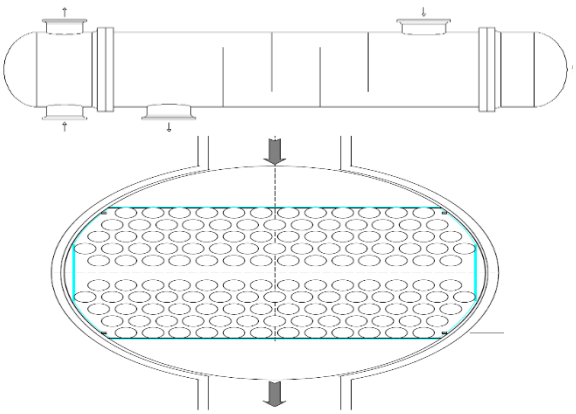
با توجه به لزوم جای‌گیری سه نوع مبدل حرارتی آب موتور،خنک کننده‌ی هوا و خنک کننده‌ی روغن،مدار خنک‌کاری موتورارتقاء یافته طراحی شده و در نهایت به صورت شکل ۱۰ ارائه می‌گردد.



شکل ۱۰: آرایش پیشنهادی مبدل‌ها در سیستم خنک کاری موتور ارتقاء یافته

در آرایش شکل۱۰، طبیعتا مبدل حرارتی آب موتور نقطه ارتباط مدار آب شیرین و آب شور سیستم خنک‌کاری می‌باشد. باتوجه به داده های تجربی . فرضیات حاکم برای تحلیل مبدل‌های حرارتی و اینکه هدف خنک کن میانی، کاهش دمای هوا به کمتر از ۵۰ درجه سانتی گراد می‌باشد، این اتفاق در سیکل بسته آب شیرین موتور امکان به وقوع پیوستن نخواهد داشت. چراکه دمای کاری سیکل بسته آب شیرین موتور به منظور عملکرد مناسب موتور بین ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد بوده و با توجه به دمای بالای سیال خنک کننده در مدار آب شیرین امکان کاهش دمای هوا تا دمای زیر ۵۰ درجه سانتی گراد میسر نمی‌باشد. ازاین‌رو به منظور کاهش دمای هوا باید از سیکل آب شور مدار خنک‌کاری استفاده نمود. امکان قرارگیری مبدل روغن در هر دو مدار آب شور و آب شیرین موتور وجود دارد. دراین پروژه هدف افزایش توان موتور می‌باشد. لذا حرارت دفع شده از سیستم نیز به همان نسبت افزیش می‌یابد. لذا به منظور دفع مناسب حرارت در موتور ارتقا یافته بایستی تا حد امکان دبی مدار آب شیرین افزایش یابد. باتوجه به اینکه هرگونه افت فشاری در مدار آب شیرین موجب تضعیف عملکرد خنک کاری موتور خواهد شد، لذا تا حد امکان از اضافه کردن المان هایی که موجب افت فشار در این مسیر می‌شوند بایستی پرهیز گردد. ازاین‌رو خنک‌کن روغن نیز به سمت مدارآب شور سیستم خنک‌کاری منتقل می‌گردد. درنهایت آرایش نشان داده شده درشکل ۱۰ برای موتور توسعه یافته طراحی شده است. دراینجا دمای ورودی آب دریا به سیستم خنک کاری، ۲۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

در ادامه هندسه نهایی مبدل‌های حرارتی آب موتور،خنک کننده روغن و خنک کن میانی هوا، به عنوان خروجی نهایی طراحی مبدل‌های حرارتی آورده می شود:



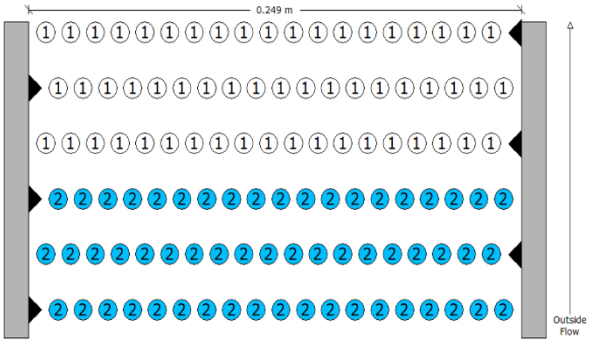
شکل ۱۱: شماتیک ظاهری و هندسی مبدل حرارتی پوسته و لوله به عنوان مبدل های خنک کننده آب موتور و روغن

جدول ۴: مشخصات مبدل حرارتی آب موتور

جنس لوله ها: آلومنیوم		جنس پوسته:آلومنیوم	
قطر خارجی پوسته (mm)	۲۱۹	طول موثرمبدل (cm)	۶۳
قطر داخلی پوسته (mm)	۲۰۳	گام لوله‌ها (mm)	۱۲/۸۶
تعداد لوله ها	۱۳۶	وزن لوله ها (kg)	۱۱
تعداد پاس لوله	۲	آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
قطر لوله‌ها (mm)	۱۰/۲۹	وزن پوسته (kg)	۱۵
ضخامت دیواره لوله ها (mm)	۱/۷۳	وزن کل (kg)	۲۶
طول کل مبدل (cm)	۸۰	افت فشار سمت لوله (kPa)	۱۶
		افت فشار سمت پوسته (kPa)	۱۵

جدول ۵: مشخصات مبدل حرارتی خنک کن روغن

جنس لوله ها:کاپرنیکل		جنس پوسته: آلومنیوم	
قطر خارجی پوسته (mm)	۱۱۴	طول موثر مبدل (cm)	۴۹
قطر داخلی پوسته (mm)	۱۰۲	گام لوله‌ها (mm)	۷/۹۴
تعداد لوله ها	۱۲۱	وزن لوله ها (kg)	۷
تعداد پاس لوله	۱	آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
قطر لوله‌ها (mm)	۶/۳۵	وزن پوسته (kg)	۴
ضخامت دیواره لوله ها (mm)	۰/۷۱۱	وزن کل (kg)	۱۱
طول کل مبدل (cm)	۵۷	افت فشار سمت لوله (kPa)	۱۲
		افت فشار سمت پوسته (kPa)	۱۹



شکل ۱۲: شماتیک هندسی خنک کن میانی هوا

جدول۶: مشخصات مبدل خنک کن میانی

جنس لوله‌ها:کاپرنیکل		جنس پره‌ها:آلومنیوم	
طول مبدل (mm)	۴۵۰	ضخامت پره‌ها (mm)	۰/۱۷
عرض مبدل (mm)	۲۵۰	فاصله طولی لوله‌ها (mm)	۲۵
عمق مبدل (mm)	۱۴۰	فاصله عرضی لوله‌ها (mm)	۱۲/۵
تعداد لوله ها	۱۱۴	وزن لوله ها (kg)	۱۰
تعداد پاس لوله	۲	وزن پره‌ها (kg)	۵
قطر لوله‌ها (mm)	۹/۵۲	وزن کل (kg)	۱۵
ضخامت دیواره لوله ها (mm)	۰/۸	افت فشار سمت لوله (kPa)	۱۰
تراکم پره‌ها (تعداد در اینچ)	۱۶	افت فشار سمت هوا (kPa)	۵

همانگونه که از شکل‌های۱۱ و۱۲ و جداول۴ تا ۶ مشخص است،مبدل‌های حرارتی آب موتور و خنک کن روغن از نوع پوسته و لوله[1] بوده و مبدل حرارتی خنک کن میانی هوا از نوع لوله و پره[2] می‌باشد.

آزمون تجربی

در این بخش موتور هشت سیلندر Chevy vortec L29 در فضای آزمایشگاه پس از نصب تجهیزات خارجی نظیر مبدل های حرارتی سه-گانه،مخزن روغن،مخزن سوخت و... بر روی دینامومتر سوار شده و آماده آزمون می‌شود. آزمون آزمایشگاهی در نه دور مختلف(از ۱۵۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه و با گام ۵۰۰ دور بر دقیقه) و به ازای ۴ حالت مختلف از میزان گشودگی دریچه گاز(از ٪۲۵ تا ٪۱۰۰) انجام شده است.

برخی از مهمترین نکات راجع به شرایط و امکانات اتاق آزمون ذیلا لیست شده اند:

۱) در آزمون بارگذاری موتور (آزمون دینامومتری)، از یک دینامومتر ادی کارنت استفاده شده است (شکل ۱۳). به منظور انتقال قدرت تولید شده از موتور به دینامومتر از یک شفت متناسب با حداکثر گشتاور و توان تولیدی موتور استفاده شده است.

۲) به منظور تنظیم دمای هوای اتاق آزمون، از یک دستگاه پکیج یونیت سقفی استفاده شده است. کانال‌های مکش و دهش هوا به ترتیب در شکل ۱۴نشان داده شده است.

۳) به منظور پردازش اطلاعات و پارامترهای عملکردی موتور و دینامومتر اتاق آزمون، در ابتدا اطلاعات توسط سنسورهای هر سامانه خوانش و سپس در یک سامانهٔ داده بردار جمع آوری شده است. درمرحله پایانی این اطلاعات جهت پردازش به سامانهٔ اتوماسیون منتقل می‌گردد (شکل۱۵)

۴) سوخت توسط یک پمپ از مخزن تعبیه شده در خارج از اتاق آزمون، وارد فیلتر نشان داده شده در شکل ۱۶ می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان (و در نهایت اندازه‌گیری دبی سوخت) از یک فلومتر در مسیر سوخت‌رسانی استفاده می‌شود. همچنین سوخت توسط پمپ نشان داده شده در شکل۱۶ به کاربراتور موتور فرستاده می‌شود؛ و در این بین از یک رگلاتور فشار سوخت جهت تنظیم فشار سوخت استفاده شده است.

۵) برای اندازه گیری سایر پارامترها نظیر دور موتور،فشار روغن موتور،دمای اگزوز موتور، زاویه در حال گردش میل‌لنگ،فشار گاز داخل سیلندر،زاویه دریچه گاز، دمای آب خروجی موتور و دمای آب ورودی و خروجی دینامومتر از سنسور های مخصوص به خود که هرکدام در محل ویژه‌ای نصب شده اند، استفاده می-شود.

۶) به دلیل عدم امکان آزمون در گشودگی دریچهٔ ٪۲۵ در دورهای پایین ،این آزمون فقط برای دورهای ۴۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۵۵۰۰ دور بر دقیقه صورت گرفته است. همچنین آزمون موتور در گشودگی ٪۷۵ دریچه، دردورهای بالا، به دلیل افزایش بیش از حد دمای روغن موتور، صورت نگرفته است. و نیز برای رسیدن به حالت بار کامل[3]باید دور موتور تا بیش از ۴۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یافت بنابراین گشودگی ٪۱۰۰ در دور های ۴۵۰۰ و بالاتر صورت پذیرفته است.

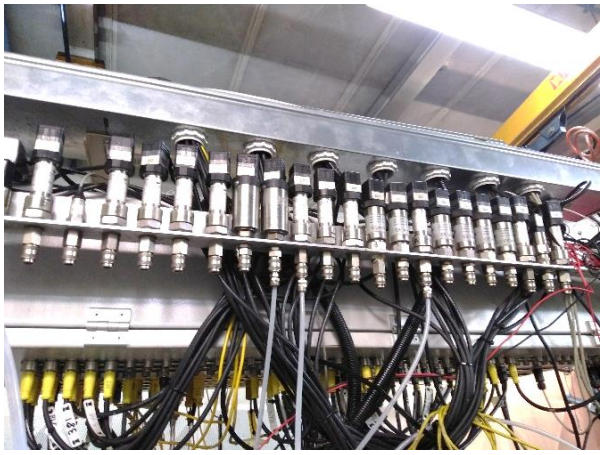
جدول۷: شرایط مختلف بارگذاری بر روی موتور

Engine Speed(RPM)	Wide open throttle		
	Test 1	Test 2	Test 3
1500	50	75	-
2000	50	75	-
2500	50	75	-
3000	50	75	-
3500	50	75	-
4000	50	75	-
4500	50	25	100
5000	50	25	-
5500	50	25	100

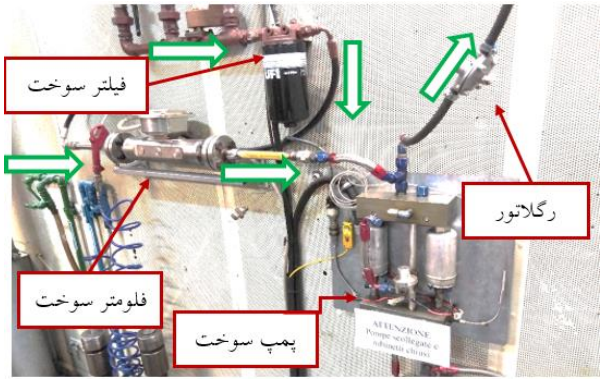
[1] Shell and Tube
[2] Tube- Fin
[3] Full Load

شکل ۱۳: دینامومتر اتاق آزمون

شکل ۱۴: تهویه مطبوع فضای اتاق آزمون

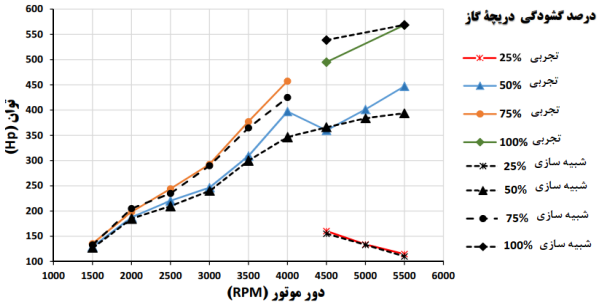


شکل ۱۵: سامانه داده بردار اطلاعات موتور



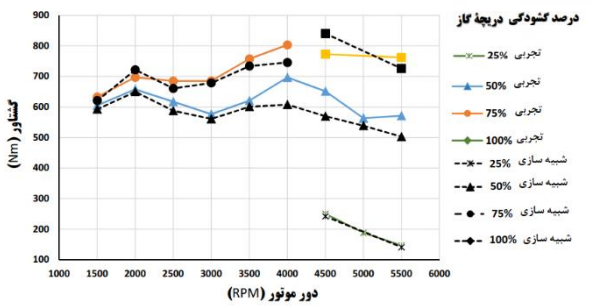
شکل ۱۶: مجموعه سامانهٔ سوخت رسانی

به عنوان صحه گذاری و اعتبار سنجی نتایج، مقادیر به‌دست آمده توان و گشتاور موتور در حالت های کاری متفاوت موتور در مدل شبیه سازی و آزمون آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و درصورت قرابت بین نتایج و اطمینان از مدل توصیف شده،سایر نتایج آزمون عملکرد به عنوان شرایط واقعی کارکرد موتور معرفی و بحث خواهد شد. یکی از موارد آزمون روی موتور، اندازه گیری توان خروجی خالص موتور در دور های مختلف و براساس درصد گشودگی مختلف دریچه گاز بود. نتیجه این آزمون در شکل ۱۷ نشان داده شده است.در حالت کلی، با افزایش گشودگی دریچه گاز، به دلیل ورود حجم بیشتری از مخلوط هوا و سوخت به درون محفظه، انتظار می‌رود که توان موتور به میزان بالاتری دست یابد. همچنین در دورهای بالاتر نیز به دلیل قوت گرفتن، امواج انبساطی درون محفظه ناشی از حرکت سریع تر پیستون، انتظار میرود که مخلوط هوا و سوخت بیشتری به درون محفظه ورود پیدا کند؛ که در نتیجه توان بیشتری حاصل خواهد شد .در گشودگی دریچهٔ گاز ٪۲۵ و ٪۷۵ تطابق مطلوبی بین نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی) وجود دارد در دور ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و در زاویه گشودگی ٪۱۰۰ اختلاف اندکی بین نتایج مشاهده می‌شود. در گشودگی ٪۵۰ نیز در دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاف توان مشهود است که با توجه به تطابق داده های آزمون و شبیه سازی می توان این مورد را در نحوه اجرا آزمون، عدم تکرار پذیری آن یا شرایط موتور دانست.



شکل ۱۷: توان موتور در چهار حالت دریچه گاز دردورهای مختلف و مقایسه با نتایج شبیه سازی

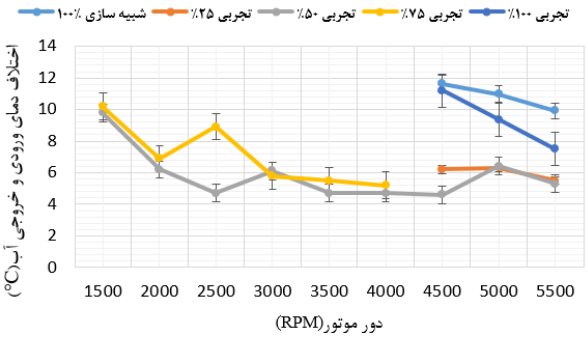
مطابق شکل۱۸، نتایج مربوط به گشتاور در دورهای مختلف تحت زاویهٔ دریچه گازهای ذکر شده، گزارش شده است. در مقایسهٔ داده‌های آزمون با نتایج شبیه سازی، در گشودگی دریچه‌ی ٪۵۰، اختلاف‌های نسبتا زیادی به ویژه در دور۴۰۰۰ دور بر دقیقه مشاهده می‌شود. این اختلاف با توجه به تفاوت‌های مشاهده شده در توان موتور در این دور، قابل پیش‌بینی بوده و همانطور که قبلا بدان اشاره شد، علت آن‌را می‌توان در شرایط موتور یا نحوه اجرا آزمون بررسی گردد .در واقع در آزمون دینامومتری، با افزایش گشودگی دریچهٔ گاز، مخلوط سوخت و هوای بیشتری وارد محفظهٔ احتراق موتور خواهد شد. لذا انتظار می‌رود، در حالت بدون بار، دور موتور روند افزایشی یابد. اما در آزمون دینامومتر، جهت ثابت نگهداشتن دور، بار بر روی موتور اعمال می‌شود. مقادیر گشتاور در شکل۱۸،در واقع گشتاور اعمالی بر روی موتور در هر دور با توجه به گشودگی دریچه می‌باشد. بنابراین طبیعی است که با افزایش زاویهٔ گشودگی دریچه، برای آنکه دور ثابت بماند، باید گشتاور بیشتری از طریق دینامومتر به موتور وارد شود.



شکل ۱۸: گشتاور موتور در چهار حالت دریچه گاز در دورهای مختلف و مقایسه با نتایج شبیه سازی

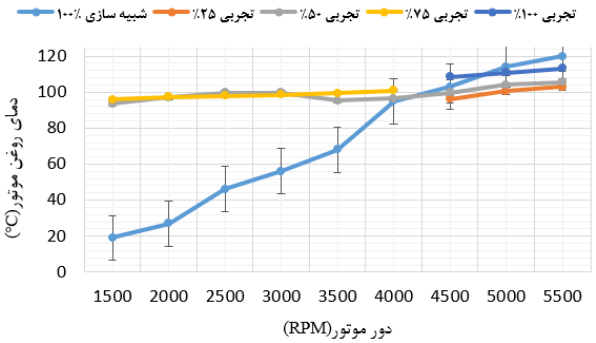
طبق اشکال ۱۷و۱۸، همپوشانی قابل قبولی بین نتایج مدل شبیه‌سازی و آزمون آزمایشگاهی مشاهده می‌شود و همانطور که گفته شد در۴۰۰۰ دور بر دقیقه بین نتایج تطابق کمتری حاکم است که این رفتار در هر دو مورد توان و گشتاور همانند یکدیگر عمل کرده و رفتار مورد نظر را توجیه می‌کنند. از تطابق مورد انتظار می‌توان نتیجه گرفت مدل شبیه‌سازی شده معتبر بوده و می‌توان ضمن استفاده از نتایج آن،می توان به نتایج آزمون آزمایشگاهی نیز استناد نمود.

همان طور که قبلا گفته شده بود خنک کاری بلوکه موتور و تعلقات آن توسط آب شیرین صورت می‌گیرد که خود آب شیرین در مبدل حرارتی موتور توسط آب شور(آب دریا) خنک می‌شود؛ بنابراین اختلاف دما ورودی و خروجی آب شیرین در محفظه موتور، پارامتر مهم است که به کمک آن می‌توان به بار حرارت تولیدی موتور پی‌برد.



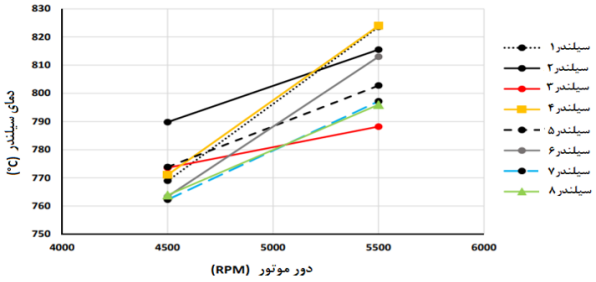
شکل ۱۹: مقایسه اختلاف دمای ورودی و خروجی آب در آزمون تجربی و شبیه-سازی

روغن، علاوه بر روانکاری، وظایفی همچون تمیزکاری، انتقال نیرو، جلوگیری از خوردگی و خنک‌کاری را نیز بر عهده دارد. بنابراین یکی از پارامترهای قابل اندازه گیری در آزمون تجربی، دمای روغن موتور می‌باشد این دما در مجرا موتور، قبل از ورودی خنک کن روغن اندازه‌گیری می‌شود و بیانگر دمای روغن در محفظه موتور می‌باشد. طبیعی است که با افزایش دمای کاری موتور، دمای روغن نیز متناسب با آن افزایش یابد. لذا انتظار می‌رود با افزایش گشودگی دریچه و افزایش میزان سوخت و بالا رفتن دما، دمای روغن نیز افزایش یابد که در شکل ۲۰ این روند نشان داده شده است.



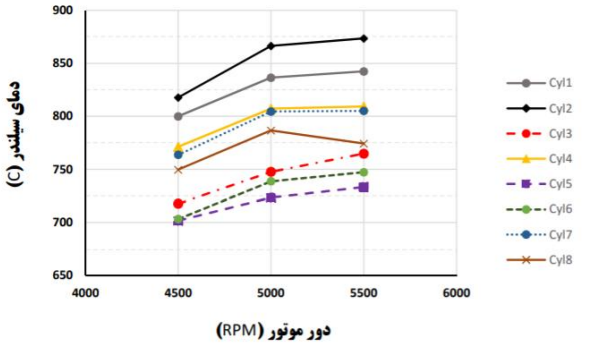
شکل ۲۰: مقایسه دمای روغن موتور در آزمون تجربی و شبیه سازی

اندازه‌گیری دمای سیلندرهای هشت‌گانه موتور ارتقاءیافته یکی دیگر از اقداماتی اندازه‌گیری در آزمون تجربی بوده است. برای مقایسه بهتر نتایج تجربی،بازه آزمون به دورهای ۴۵۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه محدود می شود.

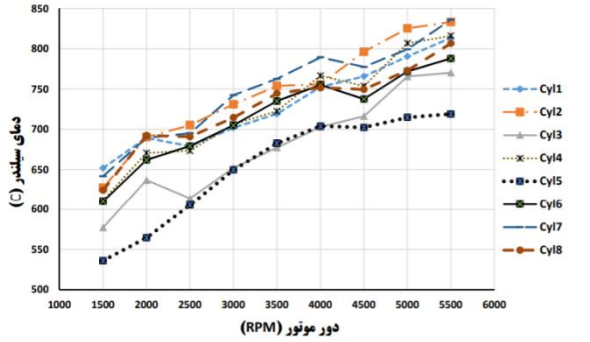


شکل ۲۱: دما سیلندرها در آزمون تجربی

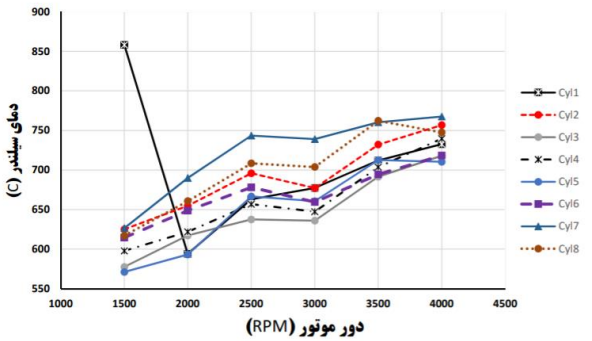
باتوجه به اهمیت سیلندرها به عنوان محل اختلاط سوخت و هوا،جرقه زنی،احتراق و در نهایت تولید توان از یک سو و از سوی دیگر اهمیت پایش وضعیت احتراق در آن‌ها نتایج دمای سیلندرها در سایر گشودگی دریچه گاز در آزمون تجربی ذیلا آورده می‌شوند.



شکل ۲۲: دمای سیلندرها در گشودگی دریچه ۲۵٪



شکل ۲۳: دمای سیلندرها در گشودگی دریچه ۵۰٪



شکل ۲۴: دمای سیلندرها در گشودگی دریچه ۷۵٪

بحث بر روی نتایج

روند شکل۱۹، بسیار نامنظم است اما روند کلی در تمامی گشودگی‌های دریچه نشان می‌دهد، با افزایش دور موتور، اختلاف دمای جریان خنک‌کننده در ورودی و خروجی موتور کاهش می‌یابد؛ زیرا با سریعتر کار کردن موتور، آب موتور نیز به همان سرعت در مسیر گردش می‌کند و عملا فرصت کمتری برای خنک شدن خود پیدا می‌کند لذا دمای خروجی نسبت به دمای ورودی تغییرات کمتری را مشاهده می‌کند. از طرفی در یک دور مشخص هر چه میزان گشودگی دریچه گاز افزایش می یابد مقدار سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق موتور شده و ضمن تولید توان بیشتر نیاز به خنک کاری آن نیز افزایش می‌یابد در نتیجه به ازای دمای ثابت ورودی در هر حالت، افزایش دمای بیشتری در خروجی انتظار می‌رود.

طبق شکل ۲۰، شبیه سازی، روند تغییرات دمای روغن نسبت به افزایش دور موتور را افزایشی پیش بینی می‌کند که در آن دما روغن در حد فاصل دور ۴۵۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، از ۱۰۳ تا ۱۱۴ سانتی‌گراد تغییر می‌کند. این روند در آزمون تجربی نیز به صورت مشابه مشاهده می‌گردد با این تفاوت که در بازه دور مذکور دما روغن از ۱۰۸ تا ۱۱۴ درجه سانتی گراد تغییر می‌کند این تفاوت اندک را می‌توان در تفاوت های طبیعی و مرسوم در محیط آزمایشگاه و نیز نوع دقیق روغن به کار رفته در شبیه سازی و آزمون تجربی جست و جو کرد با این که در هر دو حالت از روغن Oil-0W20-FAST استفاده شده است ولی ممکن است فرایند فرآوری و تولید روغن و درصد ترکیبات جزیی به کار رفته در آن، سبب این اختلاف جزیی گردد.
آنچه شکل ۲۱ نشان دهد، در آزمون تجربی این گستره توزیع دما، در بازه ۷۶۰ تا ۸۳۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته است که باتوجه به افزایش دور موتور و انجام سریعتر فرایند احتراق در هر سیلندر، طبیعی است که نرخ انتقال حرارت و نیز دما محفظه سیلندر نیز افزایش یابد.

یکی از روش‌های پایش وضعیت احتراق درون محفظه، بررسی دمای خروجی سیلندرها می‌باشد؛ در بررسی دمای گاز خروجی سیلندرها و در مقایسهٔ آنان با هم، اختلاف زیاد در داده‌های خروجی می‌تواند دو پیام را در پی داشته باشد. ابتدا اینکه ممکن است احتراق مناسب درون سیلندر مذکور رخ نداده باشد. همچنین این امکان نیز همواره وجود دارد که سنسور داده را با خطا ارسال کرده باشد. داده‌های بدست آمده، در شکل ۲۲ تا ۵۲۴ نتایج خروجی دمای سیلندرها را نشان می‌دهد. در شکل ۲۴ دمای سیلندر ۱ در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه با خطا گزارش شده که ناشی از خطای سنسور بوده است. اختلاف دمای مشاهده شده در شکل ۲۳ تا مقادیر ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده که احتمالا ناشی از اختلال در احتراق در سیلندرهای مذکور بوده است. این اختلال می‌تواند ناشی از جرقه‌زنی شمع باشد که خود ناشی از پارامترهای مختلفی است. رسیدن ولتاژ نامناسب به سر شمع، دوده‌گرفتن الکترودها و عدم تنظیم فاصلهٔ الکترودهای شمع از جمله مواردی است که در این سیلندرها باید بررسی گردد.

نتیجه‌گیری

در این پروژه، موتور بنزینی هشت سیلندر Chevy Vortec L29، به عنوان موتور مطلوب برای اعمال تغییرات در سامانه خنک کاری آن و بازطراحی سیکل خنک کاری آن جهت ارتقاء توان عملکرد و کاربری دریایی انتخاب شد. پس از شناخت ساختار اولیه موتور و مقایسه آن با اجزا و سامانه خنک‌کاری موتورهدف، مبدل‌های حرارتی موردنظر جهت خنک کاری سیال های عامل نظیر آب شیرین،روغن و هوا طراحی شدند در انتها جهت صحت عملکرد، موتور ارتقاءیافته در فضا آزمایشگاهی مورد آزمون تجربی قرار گرفت.
به کمک، آزمون تجربی می‌توان محدودیت‌های لازم برای عملکرد موتور را مشخص نموده و به کمک آن نقطه بهینه کارکرد موتور را تعیین نمود. مهم‌ترین قیدهای موجود در آزمون تجربی موتور نیز ذیلا لیست شده‌اند:

۱) در گشودگی۲۵٪ ،امکان اجرا آزمون در دورهایی پایین وجود نداشت لذا در این حالت باید دور موتور تا ۴۵۰۰ دور بر دقیقه برسد.
۲) در گشودگی ۷۵٪ دریچه گاز، با افزایش دور تا بیش از ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، دما روغن به شدت افزایش می یابد که عملکرد مبدل حرارتی روغن را نیز به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.
۳) گشودگی ۱۰۰٪ دریچه گاز (حالت تمام بار)،که در آن باید تمام توان موتور صرف شود،در دورهای ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و بالاتر قابل انجام است.

با معرفی نقطه بهینه کاری موتور، مشخصات کاری موتور ارتقاء یافته در این نقطه در جدول ۸ خلاصه شده است.

جدول ۸: مشخصات کاری موتور در نقطه کاری بهینه

پارامتر	مقدار
دور موتور(RPM)	۵۰۰۰
توان خالص(HP)	۵۳۰-۵۵۰
دبی آب شیرین(kg/s)	۶
دبی روغن(kg/s)	۱/۲
دبی هوا(kg/s)	۰/۷۸
بار حرارتی مبدل حرارتی موتور(kW)	۲۸۳
بار حرارتی مبدل حرارتی روغن(kW)	۹۸
بار حرارتی خنک کن میانی(kW)	۹۵
میانگین دمای موتور(°C)	۸۳
میانگین دمای روغن(°C)	۹۶
میانگین دمای هوا(°C)	۱۰۳
مصرف ویژه سوخت(g/kW.h)	۴۱۵

بنابر این می‌توان گفت، موتور ارتقاء یافته دریایی به لحاظ باز طراحی سامانه خنک‌کاری آن،در آزمون تجربی به صورت موفق ظاهر گشت. در ادامه روند کاری، می توان عملیات ارتقاء را در سایر بخش ها نظیر احتراق،

دینامیک و تحلیل تنش موتور، جانمایی و قطعات و... تکمیل نموده و عملکرد موتور دریایی شده را بهبود بخشید.

مراجع

1-Arab Majid, H., Mohamadreza Isfahanian,Hassan Habibimoghadam,2017," *Examination of the performance of the cooling system Heavy work with standard engine and upgraded engine"*, in *10th International Motor Conference Internal combustion and oil*. Research Institute of Petroleum Industry,Tehran,Iran.

2- B.Heywood,1988, "*in Internal combustion engine fundamentals"*. Vol. 93., New York: Mcgraw-hill.

3- W.W.Pulkrabek,1997, "*Engineering fundamentals of the internal combustion engine"*. Vol. 478. Prentice Hall Upper Saddle River.

4- Arnold, A.J., *Marine keel cooler*. 1985, Google Patents.

5- *Regenerative Burners for Reheating Furnaces*. 2010; Available from: http://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/regenerative-burners-reheating-furnaces.html.

6- Torregrosa, P.C.O.A.J.2010, "*A Methodology for the Design of Engine Cooling Systems" inStandalone Applications.* **18**.

7- Bari Mahmood, H.S.a.H.K.2017, "*Marine cooling circuit one Automotive engines modeled on offshore engines"*, in *5th National Conference on Fast Crafts*. Tehran,Iran.

8- Nasri Hossein, M.K.a.M.R.2017, "*The Examination of the Maritime Requirements of an Engine Car"*, in *5th National Conference on Fast Crafts*. Tehran, Iran.

9- *PowerReviews. CLOSED COOLING SYSTEM FOR MERCRUISER 7.4L MPI BRAVO L29.* Available from: https://www.jamestowndistributors.com/userportal/show_product.do?pid=83474.