مجموعه مقالات نهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱۹ تا ۲۱ بهمن ۱۴۰۰، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز
FCCI-2022-0041

بازطراحی 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، به عنوان نخستین و متداولترین محرک‌های تولید توان در صنایع، تاکنون پیشرفت‌های اساسی داشته‌اند و به دلیل بحران انرژی، توجه بسیاری برای ارتقاء توان و بهینه سازی این موتورها وجود دارد. هدف از ارتقاء موتورهای درون سوز، افزایش توان خروجی به ازای ابعاد ثابت موتور می باشد. در ابتدا برای شناخت وجوه تمایز و تشابه مدارهای خنک کاری موتورهای ارتقاء یافته ومعمولی(مبنا)، به بررسی مدار خنک کاری سیستم‌های مشابه موجود پرداخته می‌شود و سپس با مقایسه کارهای مشابه انجام شده، اجزا و چینش اولیه سامانه خنک کاری بدست می‌آید. شبیه سازی فرایندهای خنک‌کاری موتور هشت سیلندر ارتقاء یافته، به کمک نرم افزار GT-Suit، در قسمت GT-Cool صورت می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد با اعمال تغییرات دریایی سازی، موتور پایه با توان ۳۰۰ اسب بخار به راحتی تا توان ۵۵۰ اسب بخار قابل ارتقاء می‌باشد و در این نقطه کاری باید به میزان ۲۸۳ کیلووات حرارت از موتور ارتقاءیافته دفع شود و به صورت همزمان روغن موتور و هوای داغ توربوشارژر نیز به ترتیب تا دمای ۷۹ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد خنک شوند.
کلمات کلیدی: موتور درون سوز،موتور ارتقاء یافته،سیستم خنک‌کاری،نرم افزار GT-Suit

مقدمه
فن‌آوری موتورهای بنزینی و به خصوص نوع دریایی آن بسیار پیچیده است و کشورهایی که در جهان به دانش ساخت و ارتقاء این موتورها دسترسی دارند اندک می‌باشد. به همین جهت داشتن دانش ساخت و ارتقاء موتورهای بنزینی دریایی از لحاظ اقتصادی و تجاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به گستره‌ی استفاده از موتورهای درون سوز در صنایع دریایی نظیر شناورهای سبک و تندرو،قایق‌های تفریحی و ماهیگیری تا کشتی‌های غول پیکر تجاری، لزوم مطالعه و توسعه دانش فنی موتورهای دریایی را ایجاب می‌نماید.در این میان مسئله‌ای که با آن مواجه هستیم میزان توان و کیفیت موتورهایی است که این وسایل نقلیه از آن استفاده می‌کنند. چون موتورهای درون‌سوز زمینی ارزان‌تر و فروان هستند و موتورهای دریایی کم و گران، لذا می‌توان گفت یکی از راه‌های طراحی موتورهای دریایی، توسعه موتورهای زمینی موجود در بازار می‌باشد. روش‌های توسعه و ارتقاء شامل افزایش بازده تنفسی، استفاده از سامانه های پرخورانی، ارتقاء سامانه خنک‌کاری، افزایش حجم موتور، بهبود فرایند اشتعال و احتراق، ارتقاء سامانه سوخت‌رسانی و همچنین کاهش افت‌ها می‌باشد. بنابراین ارتقاء توان انواع موتورهای خودرویی نیازمند بازطراحی بسیاری از سامانه‌های موتور مبنا، نظیر سامانه روانکاری، خنک‌کاری، قدرت و... می‌باشد. در فرایند توسعه موتور، عواملی از قبیل دور، توان، گشتاور و کاربری آن به تنهایی یا همه آنها به طور همزمان باید تغییر کنند. افزایش هر یک از عوامل به تنهایی یا هر دو آن‌ها، موجب افزایش توان بیشینه موتورشده که در پی آن توان حرارتی موتور را نیز افزایش خواهد داد. این وظیفه‌ی سامانه خنک‌کاری موتور است تا بتواند حرارت اضافی تولیدی را دفع نماید. با توجه به این مباحث، درمی‌یابیم که خنک‌کاری از جمله مولفه‌هایی در موتور است که تغییر، بهبود و بهینه سازی آن از عوامل تعیین کننده توسعه یک موتور است. سیستم خنک‌کاری موتور خودرویی براساس کاربری، روی یک نمونه خودرو طراحی شده است. در طراحی این سیستم از مبدل‌های حرارتی هوا خنک استفاده می‌شود؛ اما در یک موتور ارتقاء یافته دریایی، به جهت اینکه موتور در معرض پاشیده شدن آب دریا قرار نگیرد، موتورها در داخل کاورهای بسته قرار می‌گیرند که عملا استفاده از مبدل هوا خنک را غیرممکن می‌نماید. در این موتورها می توان از آب دریا برای خنک کاری مجموعه استفاده کرد. لذا می‌توان گفت سامانه خنک کاری یک موتور دریایی یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های موتور است. خرابی پمپ آب، بسته شدن راهگاه های آب، پارگی شیلنگ‌ها و غیره می‌تواند سبب گرم شدن بیش از حد[1] موتور شود که یکی از بحرانی‌ترین شرایط عملکردی است که یک موتور می‌تواند با آن روبرو شود. گرم شدن بیش از حد موتور سبب ایجاد تنش حرارتی در پیستون‌ها و رینگ‌ها در داخل سیلندر، ترک برداشتن سرسیلندر، ترکیدن واشر سرسیلندر، کاهش خواص روانکاری روغن و غیره می‌شود.

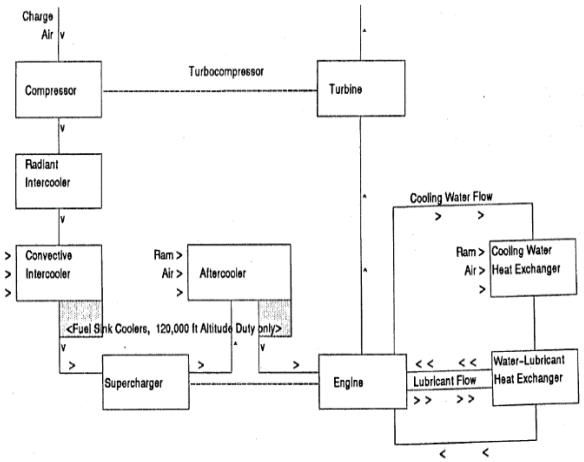
برای درک بهتر نقاط ضعف یک موتور معمولی و پرهیز از انجام آزمایش‌های پرهزینه که در آن‌ها احتمال آسیب دیدن موتور وجود دارد از نرم افزار رایانه‌ای GT-suit برای انجام این پروژه استفاده می‌شود. این نرم افزار فرایندهای موتور را به صورت یک بعدی مدل کرده و دربعضی موارد می‌تواند اثرات سه بعدی را نیز در نظر بگیرد؛ در این نرم افزار فرض می شود که خواص ترموفیزیکی از جمله دما،فشار،سرعت و... در هر مقطع از راهگاه های موتور یکسان است و تغییرات این خواص در طول مسیر جریان و نیز باگذشت زمان اتفاق می‌افتد.

ریچارد جانسون به کمک همکارانش، مقاله‌ای تحقیقاتی در مورد سیستم خنک کاری پیشرفته موتورهای دیزلی با کاربری متغیر منتشر کردند آنها ضمن بیان مقدمه و اهمیت کار و لزوم بهینه سازی پارامتر های موثر برعملکرد سیستم خنک کاری،اجزای مهم یک سامانه خنک کاری اعم از مبدل حرارتی، فن و... را تشریح کرده و در انتها سامانه پیشنهادی خود را به صورت شکل۱ گزارش می کنند.

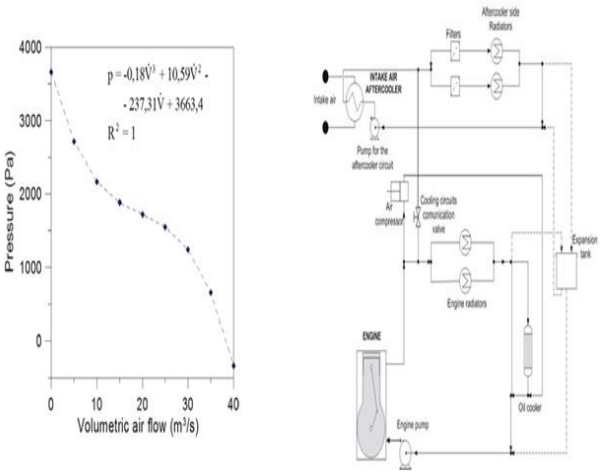
آنتونی تورگروسا محقق گروه موتور احتراق داخلی دانشگاه پلی تکنیک والنسیا اسپانیا به کمک همکارانش در راستای طراحی سامانه خنک کاری برای موتورهای چهار سیلندر بنزینی به مطالعه مدل های موجود برای محاسبه برحرارتی موتور پرداخته و با بررسی های صورت گرفته و نتایج تجربی شرکت CMT-Motores نتایج شکل ۲ سمت چپ را به دست آورده و به کمک آن سیکل بسته سمت راست را برای خنک کاری این نوع از موتورها پیشنهاد دادند.

هاشمی و همکاران با انجام آزمایش روی موتور تنفس طبیعی M355G پایه گاز سوز، به مقایسه آن با حالت ارتقاء یافته پرداختند. نتایج آنها نشان داد موتور ارتقاء یافته(توربوشارژ) نسبت به حالت تنفس طبیعی، حداکثر ۳۳ درصد افزایش توان رخ می دهد[۱].

[1] Overheat Condition

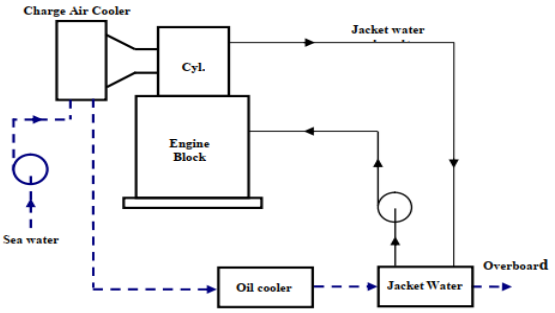


شکل ۱: شماتیک سامانه خنک کاری پیشنهادی توسط جانسون و همکاران[۲]



شکل ۲: سمت چپ منحنی عملکردی فن و سمت راست سیستم خنک‌کاری پیشنهادی آنتونی تروگروسا و همکاران[۳]

نازک تبار و محبی به کمک تجربه و داده های الگو برداری و نیز انجام آزمون، سامانه خنک کاری یک موتور ارتقاء یافته دیزلی را مورد بررسی قرار دادند. آنها با درنظر گرفتن دبی و دمای آب ورودی برای موتورهای دو و چهار زمانه در دورهای مختلف یک موتور توانستند برای هر المان سیستم خنک‌کاری روابط تجربی استخراج کنند و به کمک آنها نشان دادند با ارتقاء توان یک موتور زمینی به دریایی، میزان بار حرارتی مجموعه افزایش می یابد. همچنین موتور دریایی همیشه نزدیک توان بیشینه خود کار می‌کند در حالی که موتور های زمینی در بار میانی کار می کنند. لذا، توسعه موتور دریایی بدون توسعه سامانه خنک کاری ناقص می ماند[۴]. شکل ۳ مدارخنک کاری مورد نظر در این آزمون را نشان می‌دهد همچنین در جدول۱ سهم خنک کاری،دبی آب و دمای آب ورودی در کلاس های گوناگون موتور در این پژوهش آورده شده است.



شکل ۳: سامانه خنک کاری به کار رفته در پژوهش نازک تبار و محبی[۴]

جدول ۱: نتایج سهم خنک کاری،دبی آب و دمای آب ورودی در کلاس های گوناگون موتور در پژوهش نازک تبار و محبی[۴]

	درصد سهم انتقال حرارت نسبت به توان موتور			
	TC			NA
	200-800rpm	300-1000rpm	1000-2500rpm	
	دوزمانه	چهار زمانه	چهار زمانه	چهار زمانه
راهگاه‌های آب	15--30	25-40	20--40	50--70
پیستون	8--9	_	_	_
روغن	2--8	10--15	10--15	8
هوای خنک‌کن میانی	25--35	22--30	15--30	_
BMEP(bar)	13--15	16--19	14--21	6--7
دبی خنک‌کننده Lit/h				
دبی آب به راهگاه	10--20	30--35	50--100	
دبی آب به پیستون	4--6	_	_	
روغن	10--30	15--25	15--30	
دما (سانتی گراد)				
آب راهگاه موتور	65--70	65--75	80--90	
ورودی آب به پیستون	45--55	_	_	
روغن موتور	40--45	60--75	90--115	

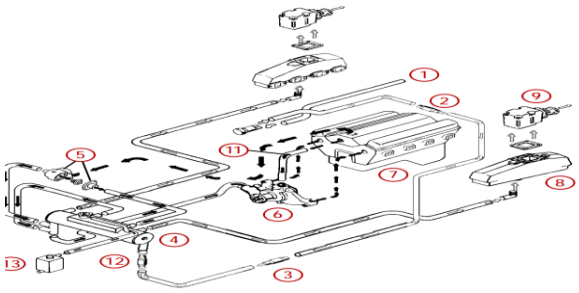
سامانه خنک کاری

احتراق در موتورهای احتراق داخلی گرمای زیادی تولید می‌کند که حتی می‌تواند فلزات مجموعه سیلندر و پیستون را ذوب کند. سامانه خنک کاری برای پیشگیری از بالا رفتن دمای موتور بکار می‌رود. هدف سامانه خنک‌کاری مراقبت در برابر دمای عملکرد موثر در تمام سرعت‌های موتور در شرایط مختلف است. دما در طی احتراق مخلوط سوخت و هوا در محفظه احتراق موتور بسیار بالا می‌رود. میزان قابل توجهی از این حرارت تولید شده بوسیله دیواره‌های سیلندر و پیستون‌ها جذب می‌شود، پس باید خنک کاری به اندازه‌ای صورت پذیرد که دمای آنها از حد مجاز بالاتر نرود. دماهای بالاتر از حد مجاز، باعث کاهش ضخامت فیلم روغن می‌شود و خواص روغن به شدت افت می‌کند همچنین اصطکاک‌ها بالا رفته و باعث افزایش استهلاک قطعات و افزایش دمای آنها خواهد شد.

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 موتور های 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 شکل۴ 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 ۴: مدار خنک کاری موتور دریایی مرکروزر مدل MIE 7.4L MPI [۵]

فرایند انتخاب موتور و آرایش اجزای مدار خنک‌کاری

با بررسی‌های صورت گرفته و الگوبرداری[1] از پروژه‌های صورت گرفته در زمینه‌ی انتخاب موتور و آرایش اجزا در سیکل خنک کاری، اهم نتایج به قرار زیر می‌باشد:

۱) مهمترین خروجی موتور، توان آن است و توان موتور هدف در این پروژه ۶۰۰ اسب بخار است؛ توان موتور انتخاب شده یا باید در این محدوده باشد و یا قابلیت ارتقا به این مقدار را داشته باشد.

۲) موتور هدف باید کاربری دریایی داشته باشد اما تامین این موتورها دشوار است. از این رو باید موتوری زمینی به عنوان موتور پایه انتخاب شود و سپس فرایند دریایی سازی بر روی موتور انجام شود. با توجه به توان هدف و الگوبرداری از موتورهای هم رده، بلوکه موتور هدف باید قابلیت تحمل بارهای زیاد را داشته باشد. بنابراین باید بلوکه موتور پایه از جنس چدن باشد.

۳) موتور پایه انتخابی باید دارای حجم بالای ۳/۵ لیتر باشد تا قابلیت ارتقاء توان و نصب اجزای بیرونی را داشته باشد تا پس از ارتقاءسازی بتواند مثل یک موتور دریایی با حجم ۸-۵ لیتر عمل کند تا خصوصا در بحث خنک سازی دچار مشکل نشود.

۴) با توجه به حجم موتور و قابلیت های ذکر شده وزن موتورهای منتخب حدود ۳۰۰ کیلوگرم می باشد که در تقسیم بندی جزء موتورهای متوسط به سنگین محسوب می‌شوند.

۵) سیستم خنک کاری لازم برای موتور هدف به علت کارکرد در دریا و هوای گرم باید آب خنک با آب شیرین باشد. آب شیرین توسط آب دریا متعاقبا خنک می‌شود.

با توجه به نکات فوق و بررسی‌های صورت گرفته در زمینه در دسترس بودن و تامین موتور،تعمیر و نگه داری و... موتور Vortec L29 ساخته شرکت شورلت به عنوان موتور پایه جهت دریایی سازی انتخاب شد 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[2] 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.

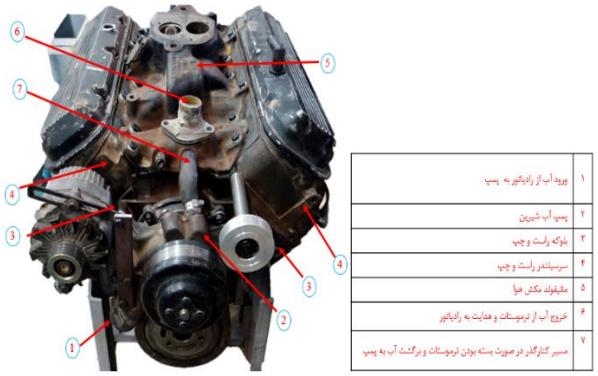
خنک کن میانی نوعی مبدل حرارتی است که برای خنک کردن هوایی که به وسیله توربوشارژر یا سوپرشارژر فشرده شده است، استفاده می‌شود. خنک‌کن میانی در مسیری که هوا از میان توربوشارژر یا سوپرشارژر به سمت موتور جریان می‌یابد قرار می‌گیرد. طبیعت هوا به عنوان گاز کامل به گونه‌ای است که وقتی فشار آن به کمک توربوشارژر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

[1] Benchmark

[2] Intercooler

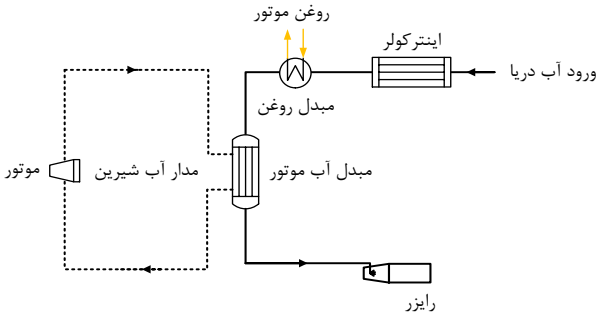
مبدل حرارتی روغن نیز وظیفه خنک کردن روغن داغ شده موتور ناشی از خنک کاری و حرکت قطعات دوار موتور را برعهده دارد لزجت مایعات به ویژه روغن با افزایش دما به شدت کاهش می‌یابد. حال اگر عمل خنک‌کاری روغن انجام نشود، باعث خوردگی شدید قطعات مکانیکی در موتور به ویژه پیستون و سیلندرها خواهد شد. ازاین رو مبدل حرارتی 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 شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای کلی مسیر گردش آب در موتور شورولت پایه

با در نظر گرفتن سیکل خنک‌کاری موتورپایه و بررسی‌های صورت گرفته در مورد سامانه‌های خنک‌کاری موتورهای مختلف،به روش الگو برداری، و 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 ۶ ارائه می‌گردد. در این آرایش طبیعتا مبدل حرارتی آب موتور نقطه ارتباط مدار آب شیرین و آب شور سیستم خنک‌کاری می‌باشد. باتوجه به اینکه هدف خنک کن میانی، کاهش دمای هوا به کمتر از ۵۰ درجه سانتی گراد می‌باشد(این درجه حرارت جزء قیدهای اصلی مسئله و داده‌ی از پیش تعیین شده 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.



شکل ۶: آرایش پیشنهادی مبدل‌ها در سیستم خنک کاری موتور ارتقاء یافته

طراحی مبدل‌های حرارتی

روش‌های مختلفی برای طراحی مبدل‌های حرارتی وجود دارد که روش های LMTD و $\epsilon - NTU$ به صورت متداول کاربرد بیشتری دارند. در این مقاله برای طراحی مبدل‌های حرارتی موتور ارتقاء یافته از روش اختلاف دمای میانگین لگاریتمی[1] استفاده شده است (بیان جزئیات این روش در حوصله این موضوع نمی‌گنجد).

در جدول ۴ ورودی‌های ازپیش تعیین شده برای طراحی مبدل‌های حرارتی سیستم خنک‌کاری موتور ارتقاء یافته و همچنین مدل یک‌بعدی ترمودینامیکی آن نیز در شکل ۷ آورده شده است.

جدول ۴: ورودی‌های درنظر گرفته شده برای طراحی مبدل‌های حرارتی موتور ارتقاء یافته

دمای آب شور ورودی(°C)	۲۵	دبی آب شیرین(kg/s)	۶
دمای هوای ورودی به خنک کن میانی(°C)	۱۷۵	دبی آب شور(kg/s)	۴/۶
دمای هوای خروجی از خنک کن میانی(°C)	۴۲	دبی روغن(kg/s)	۱/۲
دمای بیشینه روغن(°C)	۱۲۰	بار حرارتی مبدل آب موتور (kW)	۳۰۰
دمای بیشینه آب شیرین(°C)	۹۵	بار حرارتی خنک کن روغن (kW)	۱۰۱
دبی هوا(kg/s)	۰/۷۸	بار حرارتی خنک‌کن میانی (kW)	۱۱۸

لازم به ذکر است بار حرارتی مبدل آب موتور،به کمک پارامترهای عملکردی و هندسی موتور از طریق رابطه تجربی لهویک[2] به دست می‌آید:

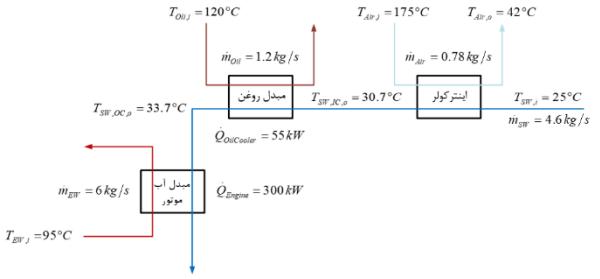
$$Q_{cool} = (8.66V_d n + 108.93M_t + 1119.74N_e - 1010V_d + 2890)/3412.2 \quad (۱)$$

در این رابطهQ_{cool}(Kw)، V_d(lit)، n(rpm)، M_t(Nm) و N_e(Kw)

[1] LMTD (**L**ogarithmic **M**ean **T**emperature **D**ifference)

[2] Lahvic's empirical correlation

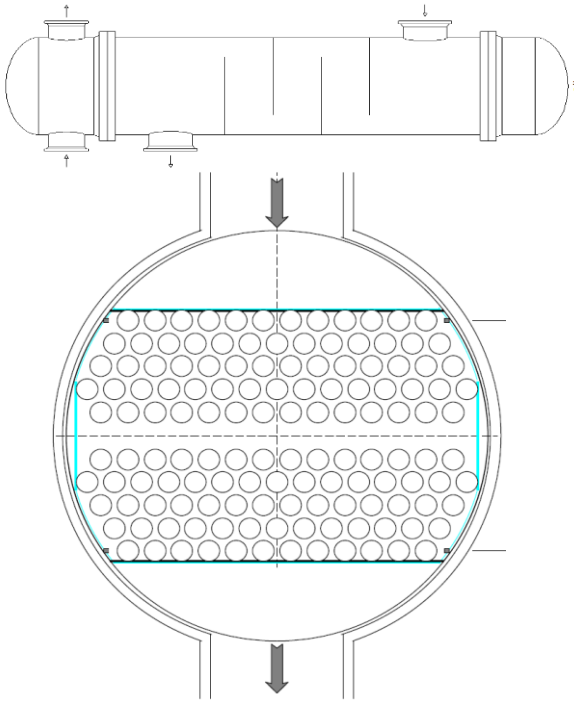
به ترتیب بیانگر بار حرارتی مبدل آب موتور، حجم جابه‌جایی، دور، گشتاور و توان موتور است.



شکل ۷: مدل ترمودینامیکی مدار خنک‌کاری و مقادیر دما در بخش‌های مختلف آن

طبق مدل ترمودینامیکی شکل ۷، دمای سیال سرد ورودی به مبدل‌ها باتوجه به دفع حرارت درنظر گرفته شده برای مبدل‌های حرارتی، دماهای ورودی سمت سیال گرم مبدل‌ها و همچنین دبی سمت سیال گرم و سرد مبدل‌ها، با استفاده از مدل ترمودینامیکی مدار خنک کاری قابل استخراج است. دراینجا دمای ورودی آب دریا به سیستم خنک کاری، ۲۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

به منظور طراحی مبدل‌های حرارتی سیستم خنک‌کاری، از نرم افزار Aspen- EDR ورژن ۱۰ استفاده شده است که از معتبرترین نرم افزارهای شناخته شده در زمینه طراحی و شبیه‌سازی مبدل‌های حرارتی می‌باشد.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:



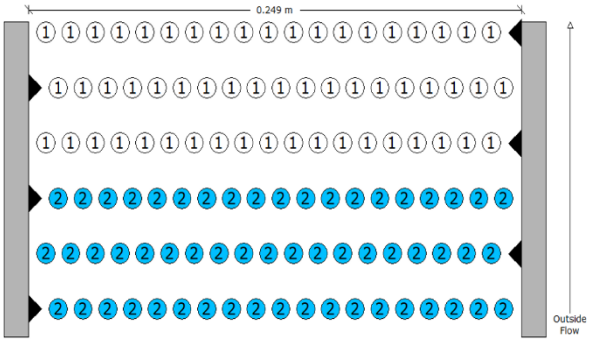
شکل ۸: شماتیک ظاهری و هندسی مبدل حرارتی پوسته و لوله به عنوان مبدل های خنک کننده آب موتور و روغن

جدول۵: 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 ۶: 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 ۹:شماتیک هندسی خنک کن میانی هوا

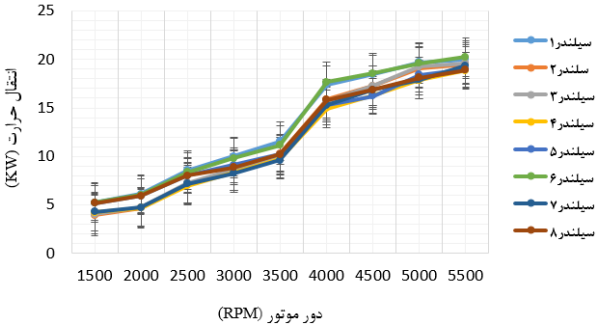
جدول۷: مشخصات مبدل خنک کن میانی

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 شکل‌های ۸ و ۹ و جداول۵تا ۷ 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.

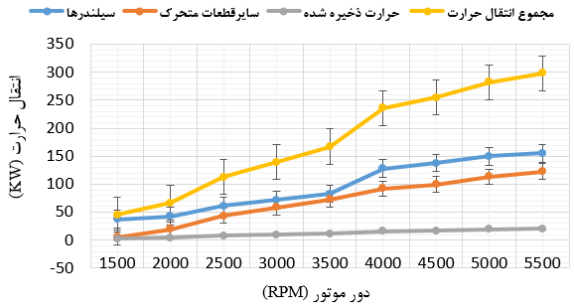
شبیه‌سازی مدار خنک کاری

در این بخش به کمک مباحث ذکرشده قبلی، سامانه خنک‌کاری موتور ارتقاء یافته (شکل۶)،به کمک نرم افزار GT-Suit شبیه سازی شده و نتایج آن ارائه می‌شود.در این شبیه‌سازی موتور به صورت ماکروسکوپیک و یک المان تولید حرارت درنظرگرفته می‌شود که مقدار این حرارت از شبیه سازی عملکرد موتور که قبلا انجام شده و نتایج آن اعتبار سنجی شده،به دست می آید و با مقدار آن از رابطه(۱)مقایسه می شود و سعی می‌شود به کمک کنترل شرایط مرزی،رعایت محدودیت‌ها، صحت مقادیر ورودی و نیز به کمک پایش مستمر، نتایج را صحه گذاری کنیم.



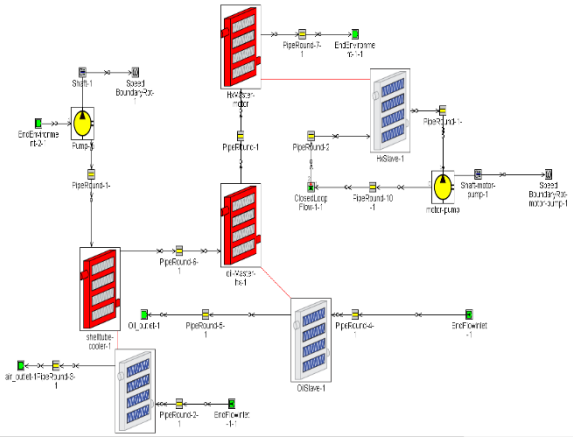
شکل ۱۰: سهم انتقال حرارت در سیلندرها برحسب دور موتور در بار کامل (۶۰۰ اسب بخار)

شکل۱۰، سهم سیلندرهای هشت‌گانه را در تولید حرارت نشان می‌دهد که باتوجه به آن تقریبا سهم هر هشت سیلندر در تولید حرارت باهمدیگر برابر است و در تمامی آنها با افزایش دور موتور، مقدار حرارت تولیدی افزایش می‌یابد؛ لذا می‌توان ادعا نمود که تولید توان در هر هشت سیلندر به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. شکل۱۱، نیز سهم اجزا موتور اعم از سیلندرها،قطعات متحرک(مانند میل لنگ‌ها،توربوشارژر) و میزان حرارت ذخیره شده در اجزا موتور مانند سرسیلندر یا بلوکه فلزی موتور را نشان می‌دهد که در زمان کارکرد موتور به دلیل انتقال حرارت طبیعی گرم می‌شوند.در این میان سهم سیلندرها به دلیل مجاورت با گرمای حاصل از گاز-های احتراقی و همچنین داشتن قطعات دوار یا متحرک، بیشتر از بقیه می‌باشد.



شکل ۱۱: سهم انتقال حرارت در قسمت های مختلف موتور در بار کامل (۶۰۰ اسب بخار)

در شکل۱۱، طبق انتظار مقادیر بحرانی در بیشینه دور کاری موتور(۵۵۰۰ دور بر دقیقه) رخ می‌دهد. مقدار این حرارت برابر ۲۹۸/۵ کیلووات می‌باشد که به مقدار به‌دست آمده از رابطه(۱) و جدول ۴ یعنی ۳۰۰ کیلووات بسیار نزدیک است.



شکل ۱۲: نقشه شبیه سازی سیکل خنک‌کاری موتور ارتقاء یافته در نرم‌افزار GT-Suit

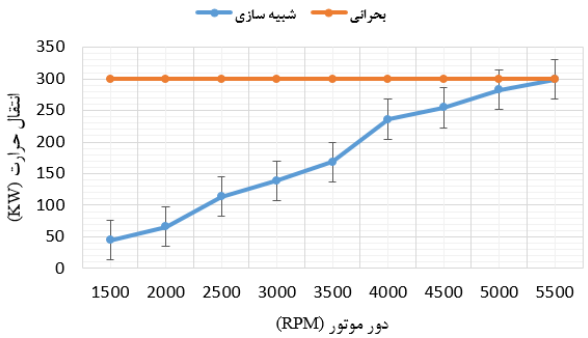
شبیه‌سازی شکل ۱۲ در ۹ دور مختلف از ۱۵۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه انجام می‌شود و در آن مشخصات ترمودینامیکی سیکل و نرخ انتقال حرارت مبدل های حراتی برای تشخیص صحت طراحی و کارکرد صحیح آنها مشخص می‌گردد.از آن جا که طراحی سیکل خنک کاری براساس مقادیر پارامترها در حالت کارکرد بحرانی یا همان دور ۵۵۰۰ دور بر دقیقه صورت گرفته بود به همین دلیل در جدول ۸، مقادیر پارامترهای مهم سیکل خنک‌کاری بین مقادیر بحرانی در طراحی و خروجی مدل شبیه سازی در دور بیشینه(بحرانی) مقایسه شده اند. در ادامه نیز نتایج شبیه سازی انتقال حرارت مبدل های حرارتی آورده خواهندشد.

[1] Shell and Tube

[2] Tube- Fin

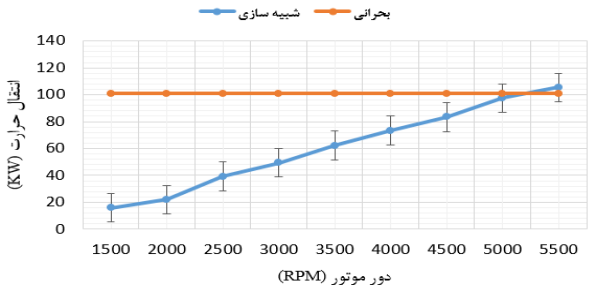
جدول ۸: مقایسه مقادیر پارامترهای طراحی و نتایج شبیه‌سازی

پارامتر	بحرانی (طراحی)	شبیه سازی	خطا(٪)
حرارت موتور(kW)	۳۰۰	۲۹۸/۸۴	۰/۳۹
ظرفیت مبدل حرارتی روغن(kW)	۱۰۱	۱۰۵/۴۳	۴/۳۹
ظرفیت خنک کن میانی(kW)	۱۱۸	۱۲۰/۹۸	۲/۵۳
دما ورودی آب شیرین(°C)	۹۵	۹۵	۰
دما خروجی آب شیرین(°C)	۸۳	۸۳/۳۵	۰/۴۲
دما ورودی روغن(°C)	۱۲۰	۱۲۰	۰
دما خروجی روغن(°C)	۸۳	۸۰/۲۶	۳/۳۰
دما ورودی هوا(°C)	۱۷۵	۱۷۵	۰
دما خروجی هوا(°C)	۴۲	۲۷	۳۵/۷۱
دبی آب شیرین(kg/s)	۶	۶/۰۲	۰/۳۳
دبی روغن(kg/s)	۱/۲	۱/۲	۰
دبی هوا(kg/s)	۰/۷۸	۰/۷۸	۰
دبی آب شور(kg/s)	۴/۶	۳/۴	۲۶/۰۹

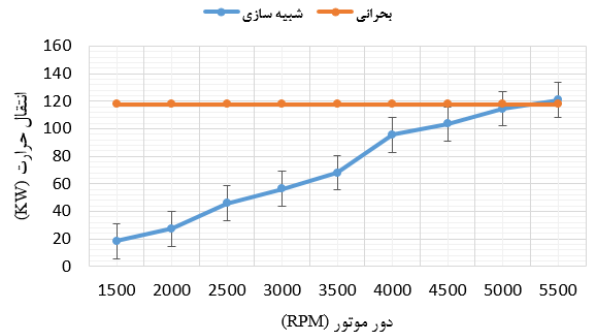


شکل ۱۳: شبیه سازی انتقال حرارت موتور در دورهای مختلف

طبق داده‌های جدول ۸، قرابت خوبی بین مقادیر طراحی و شبیه سازی دیده می‌شود.اختلاف جزیی در برخی موارد را می توان به سرعت همگرایی نرم-افزاردر شبیه‌سازی نتایج، تقریب مهندسی پارامترها در طراحی و دقت اعشاری ارقام به کاررفته در محاسبات نظیر گرما ویژه روغن، هوا، آب و سایر خواص مربوط به آب شور(آب دریا) دانست.



شکل ۱۴:شبیه‌سازی انتقال حرارت روغن در دورهای مختلف



شکل ۱۵: شبیه سازی انتقال حرارت خنک کن میانی در دورهای مختلف

بحث بر روی نتایج

طبق شکل ۱۳، نرخ انتقال حرارت در موتور مطابق انتظار با افزایش دور افزایش می یابد ودر ماکزیمم حالت خود که در دور بیشینه رخ می‌دهد به مقدار ۲۹۹ کیلووات می‌رسد لذا در شرایط کاری خود مقدار آن از مقدار بحرانی طراحی(۳۰۰ کیلووات) کمتر می باشد. پس می توان از کارکرد صحیح مبدل حرارتی موتور در کل بازه کاری آن اطمینان یافت.

در شکل ۱۴، طبق انتظار، انتقال حرارت روغن با افزایش دور موتور افزایش می یابد ودر ماکزیمم دور کاری، مقدار آن به ۱۰۵ کیلووات می رسد که از مقدار بحرانی طراحی (۱۰۱ کیلووات) بیشتر است لذا می توان گفت مبدل روغن تا دور کاری حدود ۵۲۰۰ دور بر دقیقه در حاشیه امنیت حرارتی قرار دارد و تنها در دور بحرانی از مقدار طراحی تجاوز می‌کند که مقدار آن مطابق رابطه ۴-۲ برابر۴ درصد است.

$$\text{اختلاف درصد} = \left(\frac{۱۰۵ - ۱۰۱}{۱۰۱}\right) \times ۱۰۰ \approx ۴٪ \qquad (۲)$$

باتوجه به اختلاف درصد اندک و نیز یادآوری این نکته که نقطه کاری موتور،بسته به شرایط، در یک نقطه متعلق به بازه ۱۵۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه خواهد بود و خیلی به ندرت در دور بحرانی ماکزیمم قرارخواهد گرفت و از نقطه بحرانی فقط برای اطمینان در طراحی استفاده می‌شود، از باز طراحی مجدد مبدل خنک کن روغن خودداری کرده و قضاوت عملکرد موفق آن به آزمون تجربی موکول می‌شود.

براساس شکل ۱۵، مطابق انتظار نرخ انتقال حرارت از مبدل خنک کن میانی هوا با افزایش دور موتور به صورت مستقیم افزایش می‌یابد و در دور بحرانی ۵۵۰۰ دور بر دقیقه به مقدار ۱۲۰ کیلووات می رسد در حالیکه مقدار بحرانی

طراحی آن ۱۱۸ کیلووات در نظرگرفته شده بود که حدودا در دور ۵۱۰۰ دور بر دقیقه به این مقدار خواهدرسید لذا همانند مبدل روغن به جز در محدوده بحرانی ماکزیمم، مبدل خنک کن میانی نیز درکل بازه کاری در شرایط امن حرارتی قرار دارد. اختلاف انتقال حرارت بین حالت طراحی و حالت ماکزیمم شبیه سازی برابر۲/۵ درصد است بنابراین با تقریب مهندسی و به همان دلایل ذکر شده در مورد مبدل روغن، از بازطراحی خنک کن میانی خودداری کرده و صحت عملکرد آن به نتایج آزمون تجربی موتور موکول می‌شود.

باتوجه به نتایج شبیه سازی سامانه خنک کاری و مباحث صورت گرفته،تا حدود زیادی می توان از صحت عملکرد اجزای سیکل سخن به میان آورد ولی همان طور که قبلا بیان شده بود به‌منظور تحلیل کامل‌تر، لازم است نتایج شبیه سازی در آزمون تجربی نیز به کارگرفته شوند. لازم به ذکر است در تست آزمایشگاهی این مورد با موفقیت طی شد و مشکلی پیش نیامد،بیان جزئیات تست آزمایشگاهی در این مقاله نمی‌گنجد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، 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. ابتدا پس از شناخت ساختار اولیه موتور به کمک روش الگوبرداری، مبدل‌های حرارتی موردنظر جهت خنک کاری سیال های عامل نظیر آب شیرین،روغن و هوا طراحی شدند و پس از نهایی شدن آنها، سامانه خنک-کاری در نرم افزار GT-Suit شبیه‌سازی شد. با درنظرگرفتن محدودیت-های احتمالی در نتایج آزمون شبیه سازی، می‌توان قیدهای لازم برای عملکرد موتور را مشخص نموده و به کمک آن نقطه بهینه کارکرد موتور را تعیین نمود.

مهم‌ترین قیدهایی که در نتایج شبیه‌سازی عملکرد موتور را تحت تاثیر ثرار می‌دادند عبارتند از:

۱- در دور ۵۲۰۰ دور بر دقیقه، میزان حرارت دفع شده از مبدل حرارتی روغن از مقدار طراحی آن تجاوز می‌کند؛ هرچند این اختلاف در مقایسه با بار حرارتی مبدل ناچیز است و در آزمون تجربی مشکلی را ایجاد ننمود ولی توصیه می‌شود کارکرد موتور در دورهایی بالاتر از آن با احتیاط همراه شود.

۲- در دور ۵۱۰۰ دور بر دقیقه،نرخ انتقال حرارت خنک کن میانی از مقدار بیششنه طراحی آن عبور می‌نماید، هر چند این مورد نیز همانند مبدل حرارتی روغن مشکلی را در آزمون تجربی ایجاد نکرد ولی به عنوان یک شرط محدود کننده در شرایط کاری موتور درنظر گرفته می‌شود.

باتوجه به دوقید فوق،می‌توان نقطه بهینه عملکرد موتور را تحت عنوان"نقطه امن عملکرد کاری" تعیین نمود . این نقطه باید کمی پایین تر از دورهای بحرانی ۵۱۰۰rpm و۵۲۰۰rpm باشد لذا دور ۵۰۰۰rpm به عنوان نقطه عملکرد بهینه موتور معرفی می شود که در این حالت مشخصات کاری موتور ارتقاء یافته به شرح جدول ۹ می باشد. با درنظرگرفتن نتایج جدول ۹می‌توان نتیجه گرفت سامانه خنک کاری پیشنهادی (شکل ۶)و نیز مبدل های حرارتی طراحی شده (جداول۵،۶ و۷) به درستی انتخاب شده‌اند؛در نتیجه باز طراحی سامانه خنک‌کاری به منظور ارتقاء توان عملکرد و دریایی سازی این موتور را می‌توان موفق دانست؛ زیرا در آن یک موتور بنزینی با کاربری خودرویی توانست به توانی بیش از ۱/۸ برابر دست‌یابد و قادر خواهد بود توان ۵۵۰ اسب بخار را تحویل دهد.

جدول ۹: مشخصات کاری موتور در ناحیه امن

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

فهرست علائم

گشتاور، Nm	M
توان موتور،kW	N
دور موتور، rpm	n
حرارت،kW	Q
حجم،m^3	V

زیرنویس‌ها

خنک‌کاری	cool
جابه‌جایی	d
خالص خروجی	e

مراجع

1- Seyed Hossein Hashemi, A.H.b.2008, "AliAsghar Mozafari, *Modeling and experimental study breathing and turbochargering Natural gas engine".* Engine Research, **12.**

2- R. P. Johnston,1992, "*A Preliminary Design and Analysis of anAdvanced HeatRejection System for anExtreme Altitude Advanced Variable CycleDiesel Engine Installed in a High-AltitudeAdvanced Research Platform".* National Aeronautics and Space Administration, 59.

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

4- Mohsen Nazoktabar, M2011, "*Design anoptimization of cooling system in development Land-to-sea diesel engines".* Engineering of fast vessels, p(11)-40.

5- *PowerReviews. CLOSED COOLING SYSTEM FOR MERCRUISER 7.4L MPI BRAVO L29.*

.Available from: https://www.jamestowndistributors.com/userportal/show_product.do?pid=83474.