

ISSN: 2821-157X		https://www.jasd.khadu.ir	
	Journal of Aerospace Defense Volume 4 Issue 2 Summer 2025 Pages 87–106		
Research Paper 			
Numerical Analysis of the Waterjacket Parameters' Effect on the Cooling of a Canned Motor Pump Jalil Fereydouni¹, Mahmoud Adami², Abbas Mohammadian³ 1.Assistant Professor 2.Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran 3.Mechanical Complex, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran			
Article Information		Abstract	
Accepted: 2025/12/14 Received: 2025/10/15	This study focuses on the thermal analysis of the cooling system for a specific type of enclosed motor pump. According to the IEC standard, the winding insulation has a specific temperature tolerance; exceeding this limit can damage the insulation and impair motor function. A crucial component of the motor's cooling system is the waterjacket, which serves two purposes: cooling the motor housing and cooling the flow passing through the motor interior. Reducing the motor housing temperature ultimately lowers the winding temperature. To simplify calculations, a thermal analysis of the enclosed motor housing was performed, considering temperature and thermal boundary conditions. The effect of the waterjacket at various flow rates 0.1, 0.3, and 0.5 kg/s and the coil flow at flow rates of 0.05, 0.1, and 0.15 kg/s, along with different diameters, were investigated to determine temperature and pressure drop. The heat generated in different motor components was applied as a heat flux on the inner surface of the motor housing. The results show that increasing the waterjacket flow rate consistently reduces the housing temperature and the coil outlet fluid temperature. Conversely, increasing the coil flow rate increases the coil outlet temperature. Using a water-antifreeze mixture compared to pure water slightly increases the minimum housing temperature. The minimum housing temperature consistently occurs at a coil flow rate of 0.05 kg/s and a waterjacket flow rate of 0.5 kg/s. The pressure drop always increases with increasing waterjacket flow rate.		
Keywords: Canned motor pump, Waterjacket, Thermal analysis, CFD			
Corresponding author: Jalil Fereydouni :Email			
HOW TO CITE: Jalil Fereydouni ¹ , Mahmoud Adami ² , Abbas Mohammadian ³ .(2025).Numerical Analysis of the Waterjacket Parameters' Effect on the Cooling of a Canned Motor Pump. <i>Journal of Aerospace Defense</i> , Vol4(Issue2), Page 87-106.			



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۴ شماره ۲

تابستان ۱۴۰۴

صفحات ۱۰۶ - ۸۷

مقاله پژوهشی؛ 

تحلیل عددی تاثیر پارامترهای واترجکت در خنک کاری یک پمپ موتور محصور

جلیل فریدونی^۱، محمود عدمی^۲، عباس محمدیان^۳

۱. استادیار

۲. دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۳. مجتمع مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
این پژوهش به تحلیل و بررسی عملکرد حرارتی سیستم خنک کننده یک پمپ موتور محصور می پردازد. با توجه به محدودیت های دمایی تعیین شده در استاندارد IEC برای عایق سیم پیچ، که تجاوز از آن موجب تخریب عایق و اختلال در عملکرد موتور می شود، نقش حیاتی سیستم خنک کننده بیش از پیش آشکار می گردد. در این میان، واترجکت به عنوان جزء اصلی سیستم خنک کننده، دو عملکرد اساسی بر عهده دارد: خنک کاری پوسته موتور و خنک سازی جریان سیال عبوری از داخل موتور. به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات، پوسته موتور با در نظر گرفتن شرایط مرزی حرارتی مناسب مدل سازی شده و اثر واترجکت در دبی های ۰/۵ kg/s و ۰/۳ و ۰/۱ و جریان کویل در دبی های ۰/۱۵ kg/s و ۰/۱ و ۰/۰۵ با قطرهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. حرارت تولید شده در اجزای مختلف موتور به صورت شار حرارتی بر سطح داخلی پوسته اعمال گردیده است. نتایج تحقیق نشان می دهد که با افزایش دبی واترجکت، مقادیر دمای پوسته و دمای سیال خروجی کویل روند کاهشی مشخصی دارند. در مقابل، افزایش دبی کویل موجب افزایش دمای خروجی کویل می شود. همچنین استفاده از مخلوط آب و ضدیخ در مقایسه با آب خالص، منجر به افزایش دمای پوسته می گردد. کمترین دمای پوسته در شرایط دبی کویل ۰/۵ kg/s و دبی واترجکت ۰/۵ kg/s حاصل شده است. از جنبه هیدرودینامیکی، مقادیر افت فشار با افزایش دبی واترجکت، روند صعودی نشان می دهد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳ کلیدواژه ها: پمپ موتور محصور، واترجکت، تحلیل حرارتی، حل عددی بروش CFD
	نویسنده مسئول: جلیل فریدونی ایمیل:

استناد: جلیل فریدونی، محمود عدمی، عباس محمدیان (۱۴۰۴). تحلیل عددی تاثیر پارامترهای واترجکت در خنک کاری یک پمپ موتور محصور. دفاع هوافضایی، دوره ۴ (شماره ۲)، صفحه ۸۷-۱۰۶.

۱-مقدمه

موضوع مدیریت حرارتی در پمپ‌های موتور محصور^۱ همواره یک چالش اساسی در طراحی و بهره‌برداری آن‌ها بوده است در این پمپ‌ها که موتور و پمپ آن‌ها در یک محفظه قرار دارند دفع مؤثر گرمای تولیدی ناشی از تلفات الکتریکی، تلفات مکانیکی و تلفات مغناطیسی اجتناب ناپذیر است. انباشت گرما می‌تواند منجر به کاهش عمر مفید عایق‌بندی موتور، آسیب به یاتاقان‌ها، و حتی از دست دادن راندمان کلی پمپ شود. در مورد تاب آوری عایق سیم پیچ در برابر حرارت نیز مطابق استاندارد IEC محدودیت‌ها مشخص شده است. واتر جکت^۲ که یک خنک کننده پیرامون پوسته موتور است و سیال آن آب یا مخلوط آب-ضدیخ است، به عنوان یک راهکار مؤثر و متداول برای دفع این گرمای اضافی و حفظ دمای عملیاتی ایمن برای پمپ‌های موتور محصور مطرح شده است. بررسی پارامترهای عملیاتی مناسب سیال خنک‌کننده، و درک دقیق مکانیسم‌های پیچیده انتقال حرارت در داخل واتر جکت و بین واتر جکت و پمپ، موضوعات تحقیقاتی فعلی هستند. این بخش به مرور یافته‌های مطالعات مرتبط و جنبه‌های مختلف تحلیل حرارتی و اثربخشی خنک‌کاری با واتر جکت یا سیستم‌های مشابه آن پرداخته‌است.

مگار و همکاران [۱]، تأثیر تغییرات نسبت انحنا^۳ و هندسه کوئل^۴ بر عملکرد مبدل‌های حرارتی از طریق تحلیل تجربی انتقال حرارت بر روی پنج کوئل متمایز شامل کوئل مارپیچی مستقیم ($\Theta = 90^\circ$) (مخروطی (70° و 50° و 30°) Θ) و مارپیچ صفحه‌ای را مطالعه کرده‌اند. بازه عدد رینولدز برای تحلیل از ۳۷۰۰ تا ۲۰۰۰۰ می‌باشد که رژیم‌های جریان آرام و آشفته آب گرم در کوئل را دربر می‌گیرد. آنها به این نتیجه رسیدند که مبدل‌های حرارتی با کوئل مخروطی مارپیچی هنگام هم‌جهت بودن جریان کوئل و مخزن با افزایش نسبت انحنا، خواص حرارتی و هیدرودینامیکی بهتری از خود نشان می‌دهند. در جریان‌های آرام و آشفته بیشترین اختلاف دمای آب گرم، کارایی و نرخ انتقال حرارت برای مبدل حرارتی مخروطی شکل با زاویه $\Theta = 30^\circ$ مشاهده شده، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به مبدل با $\Theta = 90^\circ$ است. بیشترین مقدار افت فشار جریان کوئل برای مبدل صفحه‌ای است، در حالی که بیشترین افت فشار جریان مخزن برای $\Theta = 90^\circ$ رخ می‌دهد. در پژوهش [۲]، یک راهبرد تحقیقاتی-اقتصادی برای افزایش کارایی حرارتی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله^۵ مارپیچ اجرا شده است. تغییر شکل هندسی یکی از روش‌هایی است که برای بهبود تبادل انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال به کار می‌رود. آنالیز تجربی و عددی روی یک مبدل حرارتی پوسته با مارپیچ تک‌گانه/دوگانه در دماهای ثابت 36°C برای آب سرد و برای آب گرم 65°C مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های عددی نشان دادند که تغییر گام مارپیچ در مبدل دوگانه، نرخ انتقال حرارت را تا ۱۰٪ نسبت به حالت

¹ Canned pump

² Water jacket

³ Curvature ratio

⁴ Coil

⁵ Shell and tube

پایه بهبود می‌بخشد. کارایی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در تحقیق آیانگ و اوما [۳] بررسی شده است. نویسندگان به‌صورت مختصر کوپل را در اشکال و شرایط مختلف مورد بحث قرار داده و آن را با مبدل‌های حرارتی لوله مستقیم مقایسه کرده است؛ همچنین عوامل مؤثر بر عملکرد و کارایی کوپل مانند نسبت انحنا و دیگر پارامترهای مبدل‌های حرارتی بررسی شده‌اند. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که به دلیل توسعه جریان ثانویه داخل لوله مارپیچ، عملکرد و کارایی انتقال حرارت به مراتب بهتری نسبت به لوله‌های مستقیم و سایر مبدل‌ها ارائه می‌دهد، و ضریب انتقال حرارت با افزایش نسبت انحنا کوپل مارپیچ برای نرخ‌های جریان یکسان افزایش می‌یابد.

مطالعه تجربی مغربی و همکاران [۴] به ارزیابی تأثیر زاویه شیب در مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچی با استفاده از سیالات مختلف اختصاص داشته است، این سیالات شامل آب، نانوسیال آلومینا-آب و سیلیکا-آب بوده است. این پژوهش، عملکرد حرارتی سیستم را با سه سیال مختلف شامل: آب گرم و همچنین نانوسیال‌ها با غلظت حجمی مختلف از داخل لوله مارپیچی با عدد رینولدز در بازه ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ عبور می‌کنند. زاویه شیب از محور افقی به ترتیب 0° ، 30° ، 60° و 90° اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه شیب، عدد ناسلت لوله مارپیچ و کارایی مبدل را افزایش می‌دهد؛ در حالی که افت فشار کوپل را کاهش می‌دهد. کومار و پاندی [۵] تأثیر نانوسیال‌های سیلیکا و آلومینا را به عنوان سیالات جاری لوله در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله بررسی کرده‌اند. در این مقاله تلاش شده است تا نشان داده شود نانوسیال چگونه کاهش تنش در سیال گرم و سرد را فراهم می‌کند و همچنین با بررسی نتایج پژوهش‌های مختلف چه تغییری در عدد رینولدز حاصل می‌شود. در مطالعه [۶]، تأثیر عدد رینولدز و دمای عملکرد بر ضرایب انتقال حرارت و افت فشار در شرایط جریان آرام بررسی شد. آزمایش‌ها در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با لوله مارپیچی مسی (قطر داخلی ۴ mm، طول ۱/۷ m و گام مارپیچ ۷/۵ mm) در بازه دمایی K ۲۴۳ تا K ۲۷۳ انجام شد.

مخلوط بخار هوا-پروپانول و سیال خنک‌کننده (روغن متیل‌سیلیکون) به‌ترتیب درون و اطراف کوپل جریان دارد. سرعت جریان سیال در سمت پوسته ثابت نگه داشته شده، در حالی که در داخل کوپل از ۶/۶ تا ۲۶/۶ m/s تغییر داده شد. نتایج نشان داد که لوله مارپیچی عملکرد انتقال حرارت بالاتری نسبت به لوله مستقیم با همان ابعاد ارائه می‌دهد. مقادیر برای لوله مارپیچی در بازه $3-40 \text{ w/m}^2$ بدست آمد که این ضرایب با افزایش نرخ جریان گاز و کاهش دمای سیال خنک‌کننده افزایش یافت. افضل و همکاران [۷] یک تحلیل حرارتی مقایسه‌ای بین آب و روغن خنک‌کننده موتور در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ انجام داده‌اند. مطالعه تجربی در شرایطی که رژیم جریان سیال درون لوله و مخزن آرام و جهت جریان در یک حالت به صورت موازی و در حالت دیگر خلاف جهت یکدیگر می‌باشد انجام شده است. همچنین محدوده دبی سیال در هرطرف از مبدل 0.25 lit/min ، 0.5 lit/min و 0.75 lit/min بوده و پارامترهای ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک، افت فشار و توان پمپاژ برای هر یک از مقادیر دبی سیال بررسی شده است. برای روغن خنک‌کننده در شرایط جریان خلاف جهت، میانگین انتقال حرارت به میزان 63.3% ، ضریب انتقال حرارت جابه جایی به

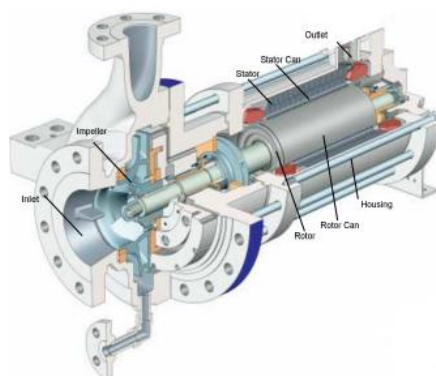
میزان $42/7\%$ و ضریب کلی انتقال حرارت به میزان $98/9\%$ نسبت به جریان موازی آب افزایش یافت همچنین مشاهده شد که جریان خلاف جهت آب به میزان $18/7\%$ افزایش انتقال حرارت بیشتری نسبت به جریان موازی روغن خنک کننده دارد. علیمردادی و ویسی [۸]، انتقال حرارت مبدل های پوسته و لوله های مارپیچی را بررسی کردند. برای مطالعه تأثیر خواص فیزیکی سیال مانند ویسکوزیته، رسانایی حرارتی، گرمای ویژه و چگالی، پارامترهای سرعت و دمای سیال همچنین پارامترهای هندسی مختلف مانند گام مارپیچ، قطر لوله، قطر ورودی پوسته و ... بر ضرایب ناسلت هر دو طرف، از روش های عددی و تجربی استفاده گردید. اندازه گیری ها و تحلیل ها پس از رسیدن به حالت پایا انجام شد. سیال کاری در هر دو سمت آب است که در تحلیل عددی ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی آن وابسته به دما در نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهد که اگر اندازه گام دو برابر شود، عدد ناسلت سمت پوسته حدود 10% افزایش می یابد، در حالی که عدد ناسلت سمت مارپیچ تنها $0/8\%$ افزایش می یابد. همچنین مشخص شد افزایش 50% در ارتفاع و قطر پوسته به ترتیب موجب کاهش $34/1\%$ و $28/3\%$ در عدد ناسلت سمت پوسته می گردد. ذاکرالحسینی و همکاران [۹] در یک تحقیق دریافتند که در مقایسه با کوئل های مستقیم، کوئل های حلزونی می توانند نرخ انتقال حرارت را تا 60% الی 120% افزایش دهند. ژی و همکاران [۱۰] به بررسی عوامل تأثیر گذار بر عملکرد کلی انتقال حرارت در مبدل مارپیچ پرداختند و یکی از عوامل را تغییر فاز معرفی کردند. تونجر و همکاران [۱۱] به صورت عددی و تجربی، ساختار اصلاح شده ی جدیدی را برای افزایش انتقال حرارت از مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ بررسی کردند. هدف اصلی پژوهش آن ها، کنترل جریان سیال بر روی کوئل مارپیچ و در نتیجه افزایش انرژی حرارتی بود. نتایج نشان داد که بازده مبدل حرارتی اصلاح شده بیشتر از مبدل های حرارتی پوسته و لوله مارپیچ معمولی است. یاماموتو و همکاران [۱۲] با استفاده از یک روش طیفی، اثرات خم کردن یک لوله مستقیم به یک لوله مارپیچ با مقطع دایره ای بر جریان را بررسی کردند و مشاهده نمودند که خمیدگی تأثیر قابل توجهی بر جریان دارد. کارمنکار [۱۳] در تحقیق خود دریافت که افت دمای بیشتر در مبدل حرارتی لوله مارپیچ نسبت به مبدل حرارتی لوله مستقیم به دلیل اثر انحنای مارپیچ است. نافون و همکاران [۱۴]، پدیده انتقال حرارت و ویژگی های جریان تک فاز و دوفازی را در لوله های خمیده، از جمله لوله های مارپیچ حلزونی و لوله های مارپیچ، خلاصه کرده اند. تعدادی از محققان [۱۵-۱۸] به بررسی انتقال حرارت همرفت به صورت طبیعی و در حالت دیگر ترکیبی، در مبدل های حرارتی لوله ای مارپیچ مستقیم پرداخته اند. لو و همکاران [۱۹] به بررسی پمپ موتور محصور با یک موتور قفس سنجاب عمودی و سرعت چرخش 1500 r/min و توان 6600 kW پرداخته اند. خنک کاری در این موتور به صورت داخلی با جریان سیال عامل پمپاژی و خنک کاری خارجی با واتر جکت است. در این تحقیق روی مدلسازی و شبیه سازی میدان های دمایی موتورهای محصور القایی بزرگ با نظر گرفتن حرارت ناشی از اتلاف اصطکاکی آب تمرکز شده است و نتایج آن در طراحی سازه خنک کننده موتور بسیار مهم است.

با در نظر گرفتن پیچیدگی های موجود در پدیده های انتقال حرارت در سیستم های خنک کاری پمپ های موتور محصور، این حوزه همچنان نیازمند پژوهش های عمیق و نوآورانه است تحقیق حاضر

با تمرکز بر تحلیل سامانه‌ی خنک‌کننده‌ی یک پمپ موتور محصور، با به‌کارگیری روش حل عددی توسط نرم‌افزار STAR-CCM+ انجام شده است. شایان ذکر است که واکاوی و بررسی جداگانه‌ی سامانه‌ی خنک‌کننده‌ی این گونه پمپ‌ها در ابعاد و شرایط کاری مشابه، تاکنون در مطالعات پیشین گزارش نشده است. در این پژوهش، عملکرد سامانه‌ی خنک‌کننده موتور با ایجاد تغییرات در پارامترهای اثرگذار واترجکت، از جمله ابعاد کویل، نرخ جریان در واترجکت و کویل، و نیز نوع سیالات به‌کاررفته و با در نظرگیری شرایط مرزی و حرارتی موتور به دقت بررسی شده است.

۲- مدل فیزیکی

شکل ۱ نشان دهنده یک نوع پمپ موتور محصور است و اجزای اصلی شامل شفت، روتور، میله هادی روتور، محصور کننده روتور، محصور کننده استاتور، سیم پیچ، استاتور و پوسته می‌باشد، پمپ موتور محصور تنها یک قسمت متحرک دارد، یک مجموعه روتور- پروانه ترکیبی که توسط یک موتور القایی به حرکت در می‌آید. اتلافات ایجاد شده در موتور ناشی از اتلافات الکتریکی و مغناطیسی و ناشی از ویسکوزیته سیال می‌باشد که سبب تولید حرارت در موتور می‌شود چنانچه این حرارت دفع نشود باعث آسیب به موتور خواهد شد و حساس ترین قسمت موتور نسبت دما عایق سیم پیچ است لذا می‌بایست از افزایش دمای سیم‌پیچ از حد مشخصی جلوگیری شود.



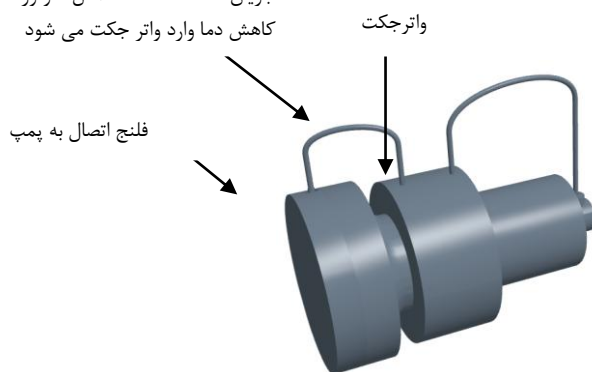
شکل ۱: یک نوع پمپ موتور محصور و اجزای آن [۲۰]

بخشی از سیال پمپ شده اجازه داده می‌شود تا بین روتور و استاتور گردش کند و موتور را خنک کند با کمک این سیال یاتاقان‌ها نیز روانکاری می‌شوند. برای عدم تماس سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور با سیال در گردش از فلز ضد خوردگی که به شکل استوانه توخالی و نازک است استفاده می‌شود و سرتاسر روتور و استاتور را پوشانده است و برای هر یک محافظ به صورت جداگانه است. سیال پس از ورود به موتور و روانکاری بلبرینگ بین روتور و استاتور گردش می‌کند و حرارت ایجاد شده را دفع می‌کند. واترجکت دو نقش دارد ۱-خنک‌کنندگی پوسته موتور ۲-خنک‌کردن جریان سیال کویل عبوری از داخل موتور. با کاهش دمای پوسته به دلیل تماس آن با اجزای دیگر موتور در نهایت دمای

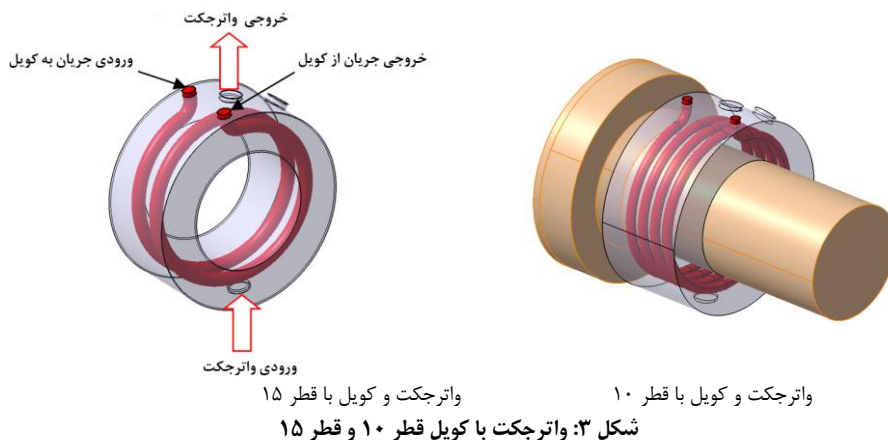
سیم پیچ کاهش می‌یابد با کاهش دمای سیال خروجی از کویل، خنک‌کاری داخل موتور بهتر انجام می‌شود.

این مطالعه به تحلیل عددی تأثیر پارامترهای عملیاتی واترجکت و کویل خنک‌کننده بر عملکرد حرارتی پوسته موتور می‌پردازد. با توجه به پیچیدگی و حجم محاسباتی بالا در شبیه‌سازی کامل مجموعه موتور، این پژوهش با اعمال یک رویکرد ساده‌سازی، تحلیل را بر روی سه جزء کلیدی متمرکز نموده است: پوسته موتور، واترجکت و کویل حرارتی که در درون واترجکت تعبیه شده است. برای پوسته موتور، شرایط مرزی دمایی و حرارتی مشخص اعمال گردیده است. پارامترهای عملکردی واترجکت، شامل دبی جرمی و طیفی از سیالات مختلف، به صورت سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به طور همزمان، تأثیر متغیرهای هندسی کویل، از جمله قطرهای مختلف و دبی جرمی جریان سیال داخل آن، بر دو شاخص اصلی یعنی دمای سطح پوسته و دمای خروجی سیال از کویل تحلیل شده است. شکل‌های ۳ و ۲ نشان دهنده پوسته موتور و کویل و واترجکت است که به عنوان فضای تحلیلی مورد نظر می‌باشد. مشخصات و ابعاد پوسته موتور و واترجکت و سیال عامل به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جریان خنک کننده داخل موتور که برای کاهش دما وارد واترجکت می‌شود



شکل ۲: موتور محصور با واترجکت و جریان خنک کننده داخل موتور



جدول ۱: مشخصات و ابعاد پوسته موتور و واترجکت

مقدار	پارامتر
Al	جنس پوسته موتور
۴۶۵(mm)	طول پوسته موتور
۱۵۰(mm)	قطر پوسته در محل نصب واترجکت
۱۱۳(mm)	طول واترجکت
Al	جنس واترجکت
۲۵۱(mm)	قطر خارجی واترجکت
آب- مخلوط آب و ضد یخ ۵۰٪	سیال جاری در واترجکت
۴	تعداد دور در کویل با قطر ۱۰
۲	تعداد دور در کویل با قطر ۱۵
Al	جنس کویل
$200 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	ضریب هدایت حرارتی آلومینیوم
آب	سیال جاری در کویل

۲-۱ معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر جریان سیال در دامنه محاسباتی، معادلات میانگین رینولدز ناویر - استوکس در حالت آشفته شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در جریان تراکم ناپذیر، پایا و سه بعدی می باشد و در روابط ۱-۳ ارائه شده است همچنین از مدل ϵ -K جهت مدلسازی آشفته‌گی جریان استفاده شده است [۲۱]. سیال کویل، آب در دمای 30°C و فشار 160 bar می باشد، سیال واترجکت نیز در

یک حالت آب خالص و در حالت دیگر مخلوط آب و ضدیخ با نسبت ۵۰٪ است که در دمای °C ۶۰ و فشار ۴ bar بررسی شده اند. خواص ترموفیزیکی سیالات مذکور مطابق جدول ۲ می باشد:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha + \alpha_i) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

جدول ۲: خواص ترمودینامیکی آب و مخلوط آب و ضدیخ در دماهای متفاوت [۲۲]

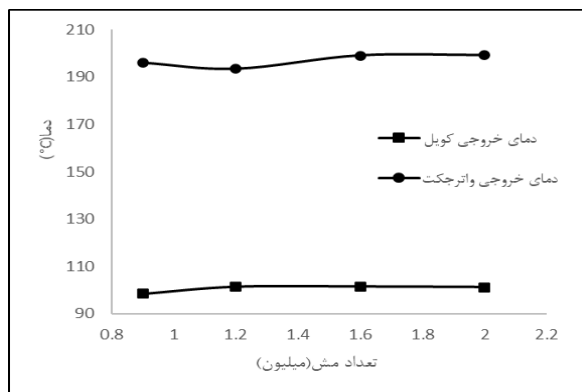
نوع سیال	چگالی (kg/m ³)	ویسکوزیته دینامیکی (Pa-s)	ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/m-K)	ضریب حرارت ویژه (J/kg-K)
آب کویل	۷۲۷	۳E-۰/۰۸۸۶	۰.۵۶۴۸	۵۴۴۱
آب واترجکت	۹۵۸	۳E-۰/۲۸۳	۰.۶۸	۴۲۲۰
آب و ضد یخ با نسبت ۵۰٪	۱۰۱۲	۳E-۰/۰۶۹	۰.۴۳	۳۶۴۶

شرایط مرزی در تحلیل حاضر به گونه ای تعیین شده است که نمایانگر ویژگی های واقعی سیستم مورد بررسی باشد. انتقال حرارت میان موتور و فضای اطراف از نوع جابه جایی طبیعی رخ می دهد. سیال خنک کننده نیز با دمای °C ۶۰ درجه سانتی گراد به داخل واترجکت وارد می شود. سیال در دمای °C ۳۰۰ و با نرخ جریان ۰/۱۵ kg/s و ۰/۱ و ۰/۰۵ در کویل جریان می یابد، اتلافات حرارتی تولید شده در موتور نیز به صورت شار حرارتی به مقدار ۴۳۰۰ W/m² بر سطح داخلی پوسته موتور اعمال می گردد، در شکل ۲ فلنج اتصال به پمپ مشاهده می شود دما در این سطح مقدار °C ۳۰۰ دارد و این یکی دیگر از شرایط مرزی پوسته است. تحلیل جریان نیز به صورت پایا می باشد. سیال ورودی به واترجکت و نیز سیال ورودی به کویل، با دبی های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند، که این امر می تواند بر توزیع حرارت و عملکرد کلی سیستم اثرگذار باشد.

۲-۲ شبکه بندی و اعتبار سنجی

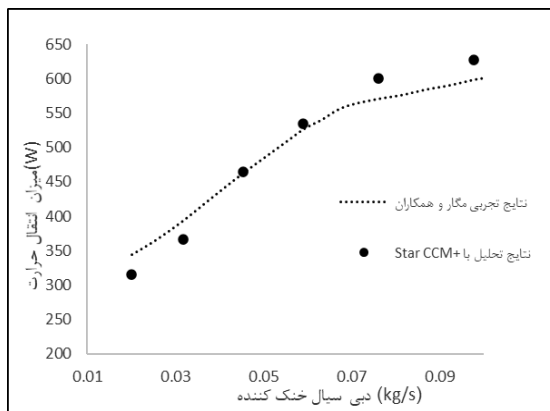
با بهره گیری از بخش بندی مناسب، شبکه بندی دامنه محاسباتی در تمامی حالات مختلف فرآیند به طور دقیق و با استفاده از المان های مختلف انجام گردیده است. این نوع شبکه بندی، به دلیل ویژگی های هندسی و توپوگرافی آن، منجر به بهبود کیفیت شبکه و کاهش تعداد سلول ها می شود. نتیجه این امر، افزایش دقت نتایج محاسباتی و بهبود کارایی تحلیل های حرارتی و جریان سیال خواهد

بود. به منظور بهبود مدل سازی جریان سیال و در نظر گرفتن رفتار سیال در نزدیکی دیواره ها به دلیل تأثیرات لایه مرزی، شبکه بندی در نواحی نزدیک به دیواره به گونه ای طراحی شده است که شرط $Y^+ > 5$ مطلوب را برآورده کند و برای رسیدن به آن باید Y^+ داخل زیر لایه لزج باشد بنابراین مقدار آن با توجه نوع مدل آشفتگی باید $Y^+ < 5$ باشد. این امر موجب می شود که تغییرات سرعت و فشار در لایه مرزی به طور دقیق تری شبیه سازی شود و به تبع آن، رفتار دینامیکی سیال در نزدیکی دیواره به درستی نمایان گردد. جهت بررسی استقلال حل از شبکه، چهار شبکه با اندازه های مختلف ایجاد گردیده و پارامترهای کلیدی، از جمله دمای سیال خروجی از واترجکت و دمای سیال در کویل حاوی سیال خنک کننده، استخراج شده است. این پارامترها برای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد نتایج محاسباتی اهمیت ویژه ای دارند. بر اساس داده های ارائه شده در شکل ۴ مشخص گردیده است که نتایج به دست آمده برای شبکه ای که شامل ۱۶ میلیون سلول و بیش از آن است، به طور قابل توجهی یکسان و همسو با یکدیگر بوده و نشان دهنده استقلال مناسب حل از اندازه شبکه می باشد.



شکل ۴: استقلال از شبکه برای دمای خروجی از کویل و دمای خروجی از واترجکت در چهار اندازه مش

برای اعتبار سنجی مجموعه واترجکت و کویل حامل آب داغ، پژوهش مگار و همکاران [۸] بررسی شده است در این مقاله، تأثیر تغییر هندسه کویل بر عملکرد مبدل های حرارتی از طریق تحلیل انتقال حرارت تجربی بر روی پنج کویل متفاوت شامل کویل های پیچشی مستقیم، مخروطی و حلزونی انجام شده است. دامنه عدد رینولدز برای تحلیل از ۳۷۰۰ تا ۲۰۰۰۰ متغیر است که شامل رژیم های جریان آرام و آشسته جریان آب داغ کویل می شود. جریان سیال گرم در این کویل وارد شده و توسط مخزن خنک می شود، جریان آب خنک نیز برای کاهش دمای کویل در مخزن جریان دارد. برای اعتبار سنجی، کویل پیچشی مستقیم بررسی شده است مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی های نرم افزاری با داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط مگار و همکاران در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

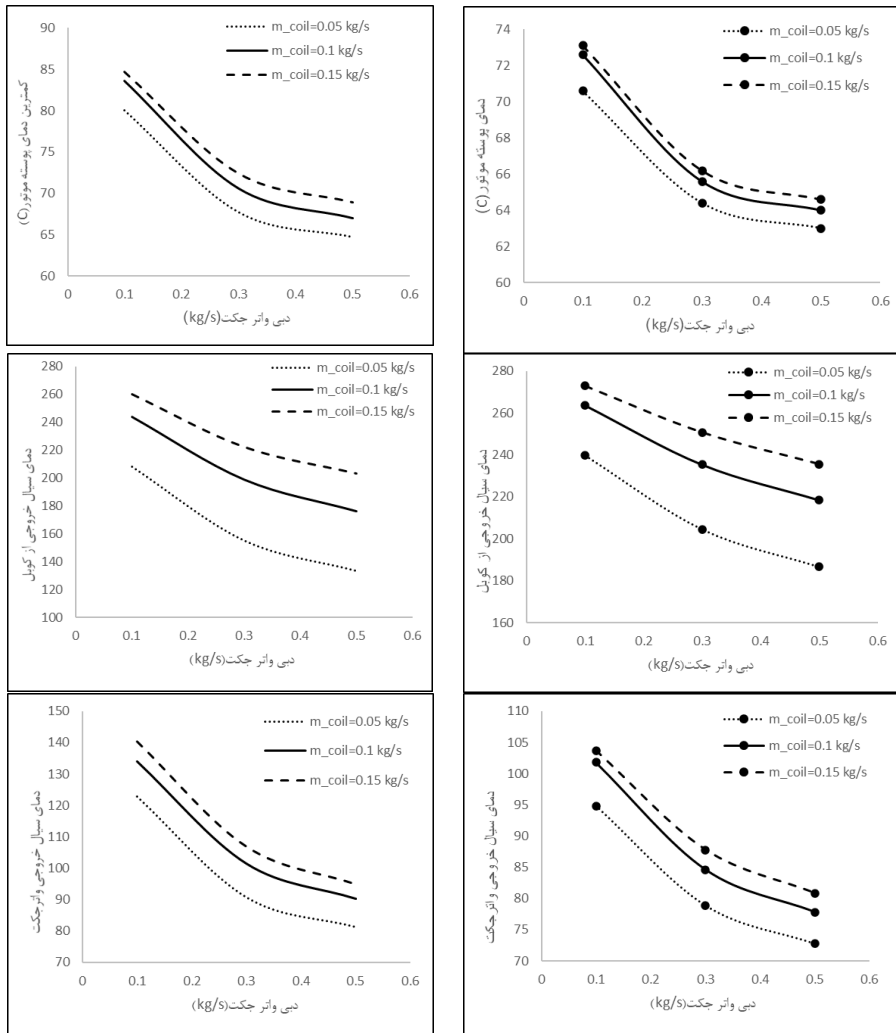


شکل ۵: اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاهی مگار و همکاران

۳- نتایج و بحث

اثر تغییر دبی واترجکت بر پارامترهای مختلف مجموعه خنک کننده، با استفاده از دو نوع سیال خنک کننده شامل آب خالص و مخلوط آب و ضد یخ، به ترتیب در شکل ۷ و ۶ مورد تحلیل قرار گرفته است. پارامترهای مهم شامل کمترین دمای پوسته موتور، دمای خروجی کویل و دمای خروجی واترجکت می باشند. در شکل ۶- الف، داده ها برای قطر کویل ۱۰ mm و در شکل ۶- ب برای قطر ۱۵ mm ارائه شده اند. بررسی های انجام شده نشان می دهند که با افزایش دبی واترجکت، دمای پوسته موتور به طور معناداری کاهش می یابد. این پدیده به دلیل افزایش کارایی خنک کنندگی و بهبود انتقال حرارت از پوسته به سیال واترجکت است. از سوی دیگر، با افزایش دبی کویل، مقدار دمای پوسته افزایش می یابد، حداقل مقدار دمای پوسته موتور در شکل ۶- الف تحت شرایط دبی واترجکت ۰/۵ kg/s و دبی کویل ۰/۰۵ kg/s به مقدار ۶۴/۷ °C ثبت شده است. همچنین، در شکل ۶- ب مشاهده می شود که حداقل دمای پوسته در شرایط مشابه، به ۶۳ °C کاهش یافته است. این تغییرات نشان دهنده تأثیر بارز دبی واترجکت بر دماهای مختلف سیستم خنک کننده است. شکل ۶ همچنین دمای خروجی از کویل را در حالات مختلف دبی های واترجکت نمایش می دهد. نتایج نشان می دهند که با افزایش دبی واترجکت، دمای سیال خروجی از کویل به شکل معناداری کاهش می یابد، این پدیده طبیعی است و به دلیل افزایش عملکرد خنک کنندگی و تسهیل انتقال حرارت از کویل به سیال در واترجکت می باشد، اما در عین حال، نکته ای که جالب توجه است این است که با افزایش دبی کویل، دمای خروجی آن افزایش می یابد، که برخلاف پیش بینی های اولیه انتظار می رفت که با افزایش جریان سیال در کویل دمای خروجی آن کاهش یابد، اما واقعیت این است که افزایش دبی کویل باعث می شود زمان کافی برای انتقال حرارت بین سیال کویل و واترجکت ایجاد نشود در نتیجه، دمای خروجی کویل افزایش می یابد. یافته ها نشان می دهد که حداقل دمای کویل تحت شرایطی با دبی واترجکت ۰/۵ kg/s و دبی کویل ۰/۰۵ kg/s، به مقادیر ۱۳۳/۴ °C و ۱۸۶/۷ °C

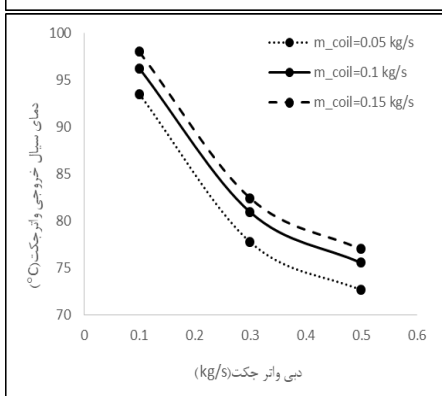
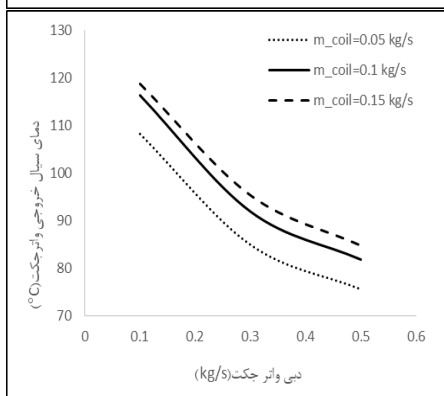
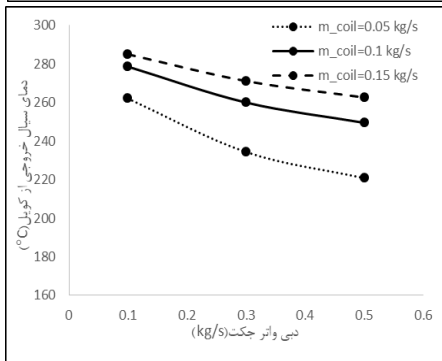
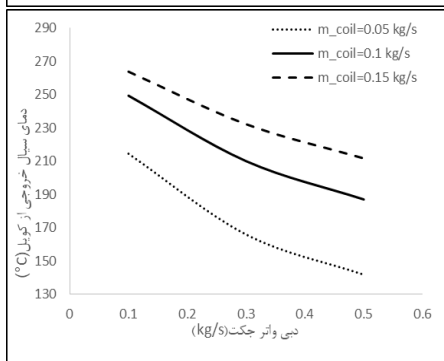
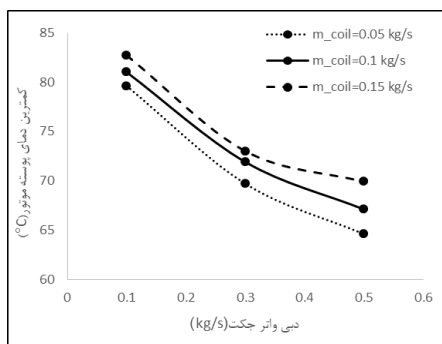
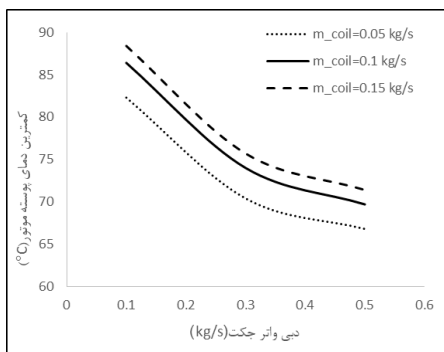
به ترتیب برای کویل‌های با قطر ۱۰ mm و ۱۵ mm می‌رسد. همچنین، بیشترین دما در دبی واترجکت 0.1 kg/s و دبی کویل 0.15 kg/s مشاهده شده که نتایج آن برای قطرهای ۱۰ mm و ۱۵ mm به ترتیب 260°C و 273°C می‌باشد. شکل ۷ نتایج مشابهی را به نمایش می‌گذارد که در آن از مخلوط آب و اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰٪ به عنوان سیال واترجکت استفاده شده است. روند تغییرات پارامترهای حرارتی در این حالت شامل حداقل دمای پوسته، دمای خروجی کویل و دمای خروجی واترجکت، مشابه با شرایطی است که آب خالص به عنوان سیال واترجکت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. بر اساس مشاهدات، حداقل دمای پوسته نیز در دبی واترجکت 0.5 kg/s و دبی کویل 0.5 kg/s به وقوع می‌پیوندد، اما این مقدار نسبت به حالت استفاده از آب خالص، به میزان ۲ تا 3°C افزایش یافته است. علاوه بر این، شکل ۸ برای مقادیر دبی واترجکت 0.5 kg/s و کویل نیز 0.5 kg/s ارائه شده است. خنک کاری این سیستم به مقایسه پارامترهای مختلف در حالتی می‌پردازد که سیال عامل واترجکت آب و یا مخلوط آب و ضد یخ باشد. مشاهده می‌شود دمای پوسته موتور با به کارگیری آب در واترجکت کمتر از حالتی است که مخلوط آب و ضد یخ استفاده شده است. این وضعیت برای هر دو قطر مورد بررسی کویل صدق می‌کند و این نشان دهنده توان خنک کنندگی بیشتر با سیال آب است، عامل دیگری که این سخن را تایید می‌کند دمای خروجی واترجکت است که با سیال عامل آب در مقایسه با مخلوط آب و ضد یخ بیشتر است و به معنای انتقال حرارت موثرتر است و اینکه حرارت بیشتری با آب منتقل شده است همچنین دمای خروجی از کویل نیز کمتر است که خود به معنای انتقال حرارت بیشتر میان کویل و واترجکت در مقایسه با زمانی است که مخلوط آب و ضد یخ در واترجکت استفاده می‌شود. با بررسی شکل ۸ استنباط می‌گردد که بین این دو سیال در واترجکت، رفتار حرارتی مجموعه واترجکت به منظور خنک کاری موتور با سیال آب بهتر و مناسب تر نسبت به مخلوط آب و ضد یخ است.



الف- کویل با قطر ۱۰ mm

ب- کویل با قطر ۱۵ mm

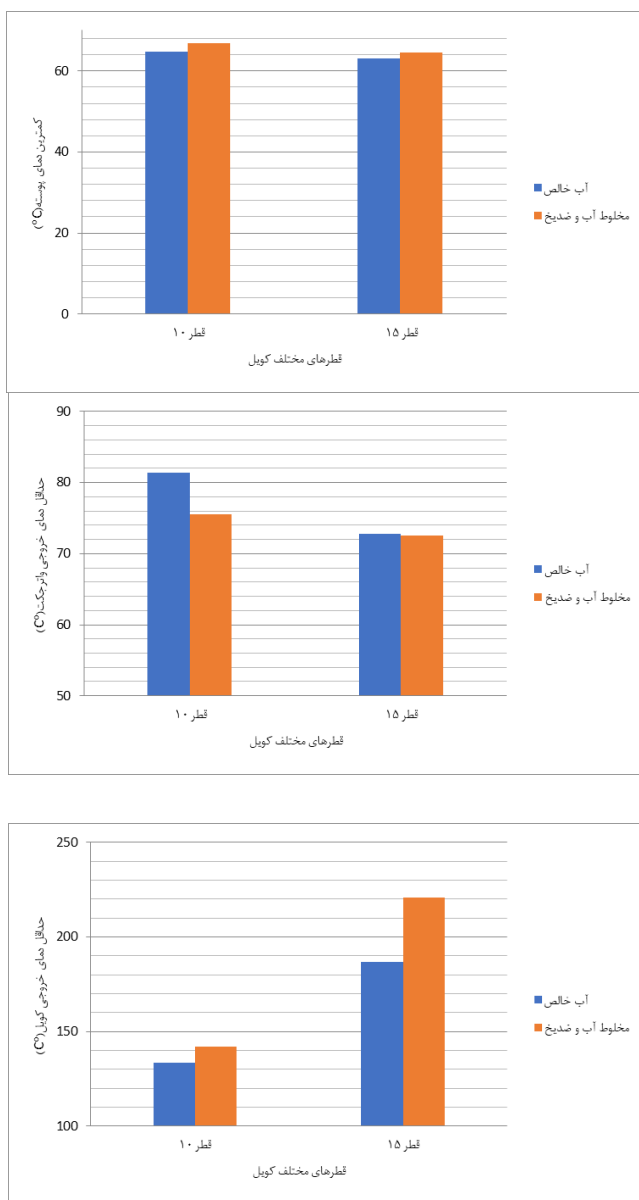
شکل ۶: استفاده از آب خالص در واترجکت و تاثیر تغییرات دبی واترجکت و دبی کویل بر کمترین دمای پوسته موتور، دمای سیال خروجی از کویل و دمای سیال خروجی از واترجکت در قطرهای مختلف کویل (الف وب)



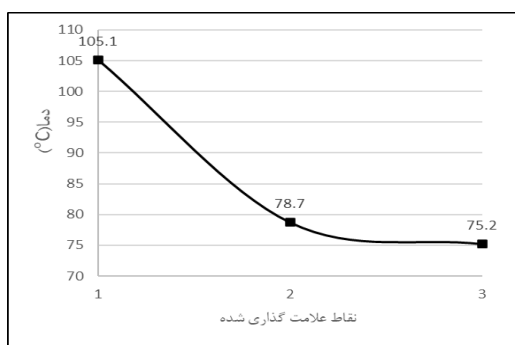
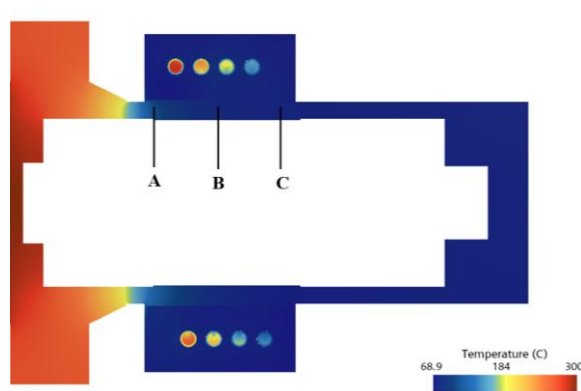
الف- کویل با قطر 10 mm

ب- کویل با قطر 15 mm

شکل ۷: استفاده از مخلوط آب و ضدیخ با نسبت ۵۰٪ در واترجکت و تاثیر تغییرات دبی واترجکت و دبی کویل بر کمترین دمای پوسته موتور، دمای سیال خروجی از کویل و دمای سیال خروجی از واترجکت در قطرهای مختلف کویل (الف و ب)



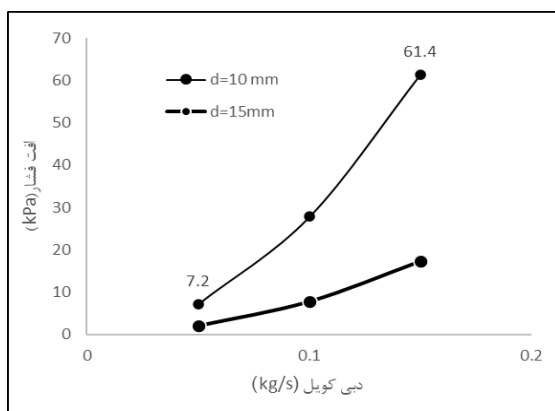
شکل ۸: مقایسه پارامترهای عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کاری با استفاده از دو سیال عامل آب و مخلوط آب و ضدیخ با نسبت ۵۰٪ در دبی ۰/۵ kg/s برای واترجکت و ۰/۰۵ kg/s برای کویل



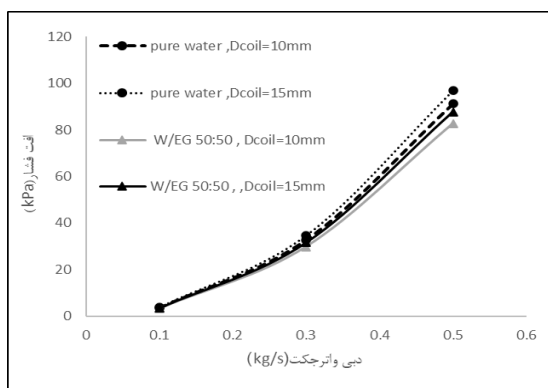
شکل ۹: بررسی دمای پوسته موتور در سه نقطه زیر واترجکت

با توجه به اینکه واترجکت در موقعیت سیم پیچ داخل موتور نصب شده تا خنک کاری از طریق پوسته به صورت موضعی در این محل اثر بیشتری داشته باشد لذا عطف به موضوع ذکر شده و اهمیت آن، مطابق شکل ۹ دمای سه نقطه از پوسته در زیر واترجکت برای حالتی که قطر کویل 10 mm می باشد بررسی شده است و گراف آن نیز ترسیم شده است، نقطه A نزدیک دیواره با شرط مرزی 300°C درجه است، همچنین شار حرارتی ناشی از اتلافات درون موتور نیز به قسمت داخلی پوسته اعمال می شود و چون این نقطه از یکطرف تحت تاثیر دمای 300°C و از طرف دیگر در معرض خنک کنندگی واترجکت قرار دارد لذا دما در این نقطه کاهش می یابد و به 105.1°C می رسد و این اثر خنک کنندگی با واترجکت را نشان می دهد. این نقطه در عین حال دمای بالاتری نسبت به دو نقطه مشخص شده دیگر دارد. در نقطه B دما به 78.7°C می رسد و کاهش 25% نسبت به نقطه A دیده می شود و علت این است که نقطه B به دلیل قرارگیری در موقعیت واترجکت خنک کاری بهتری نسبت به دو نقطه دیگر دارد. در نقطه C تفاوت دمایی زیادی با نقطه B دیده نمی شود و دلیل این است که نقطه C تحت تاثیر شار حرارتی درون موتور ناشی از اتلافات قرار گرفته است و همین باعث می شود دما در نقطه C نسبت به B کاهش چشمگیری نداشته باشد. شکل ۱۰ تغییرات افت فشار در کویل را بر حسب دبی جریان برای قطرهای مختلف نمایش می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش دبی جریان، افت فشار در تمامی قطرهای مورد بررسی، روند افزایشی نشان می دهد. این رفتار که از

ویژگی‌های جریان آشفته و افزایش تلفات اصطکاکی ناشی می‌شود، در تمامی حالت‌های مورد مطالعه مشهود است همچنین افت فشار در کویل با قطر ۱۰ mm بیشتر از کویل با قطر ۱۵ mm است. در ادامه، شکل ۱۱ به تحلیل افت فشار در واترجکت تحت تأثیر قطرهای مختلف کویل و سیالات خنک‌کننده گوناگون می‌پردازد. مطابق با داده‌های به‌دست‌آمده، در شرایطی که قطر کویل ثابت نگه داشته شده است، استفاده از سیال عامل متشکل از مخلوط آب و ضدیخ ۵۰٪، در مقایسه با آب خالص، منجر به کاهش در افت فشار می‌شود. بر این اساس، کمینه میزان افت فشار در واترجکت مربوط به کویل با قطر ۱۵ mm و در هنگام استفاده از سیال آب و ضدیخ ثبت شده است.



شکل ۱۰: مقایسه افت فشار در کویل



شکل ۱۱: مقایسه افت فشار در واترجکت با سیالات مختلف و کویل با قطرهای ۱۵ mm و ۱۰ mm

۴-تشریح و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از تمامی افرادی که در پیشبرد این پژوهش نقش داشته‌اند، صمیمانه قدردانی می‌نمایند. همچنین از همکاران گرامی و دانشجویانی که در جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل نتایج و نگارش مقاله یاری‌رسان بوده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

۵-تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۶-دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۷-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل جامعی از سیستم خنک‌کننده خارجی یک پمپ موتور محصور انجام شد. مطالعه حاضر با تمرکز بر عملکرد سیستم خنک‌کننده واترجکت، در گستره‌ای از دبی‌های مختلف واترجکت و کویل، مقادیر متغیر قطر کویل و تحت رژیم جریان آشفته مورد ارزیابی قرار گرفت. صحت‌سنجی نتایج نیز از طریق انجام فرآیندهای استقلال از شبکه و اعتبارسنجی انجام شد. بر پایه یافته‌های حاصل از تحلیل‌های عددی، الگوی جریان و توزیع دمایی در اجزای مختلف سیستم خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- همواره کمترین مقدار دمای پوسته موتور در شرایط کارکرد با دبی واترجکت 0.5 kg/s و دبی کویل 0.5 kg/s رخ می‌دهد.
- ۲- بررسی روند تغییرات دمایی نشان داد که افزایش دبی واترجکت موجب کاهش هم‌زمان دمای پوسته و دمای خروجی کویل می‌گردد. این در حالی است که افزایش دبی کویل اثر معکوس داشته و منجر به رشد دمای خروجی کویل می‌شود.
- ۳- در ارزیابی سیالات خنک‌کننده، مقایسه دقیق بین عملکرد آب خالص و مخلوط آب-ضدیخ با نسبت ۵۰٪ انجام شد. نتایج، گویای برتری معنادار کاربرد سیال آب در واترجکت از نظر توان خنک‌کنندگی بود. تایید کننده این ادعا، دمای بالاتر سیال خروجی واترجکت در حالت استفاده از آب خالص است که حکایت از جذب انرژی گرمایی بیشتر و در نتیجه خنک‌کاری کارآمدتر موتور دارد.
- ۴- در محدوده نصب واترجکت روی پوسته موتور دمای نقطه B که در موقعیت میانی واترجکت قرار دارد نسبت به نقطه A مقدار ۲۵٪ کاهش دما داشته است که این خود اهمیت طراحی موتور برای

قرارگیری نقاط داغ در محدوده نقطه B پوسته را نشان می‌دهد.

۵- بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی سیستم نشان داد که با افزایش دبی سیال، مقادیر افت فشار در واتر جکت به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهدات حاکی از آن است که مخلوط آب-ضد یخ در مقایسه با آب خالص، با ایجاد افت فشار کمتری در سیستم، مزیت هیدرولیکی نسبی را به همراه دارد.

۸- منابع

- [1] Magar SM, Gugliani GK, Navthar RR. Experimental Heat Transfer Analysis of Helical Coiled Tubes on the Basis of Variation in Curvature Ratio and Geometry. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*. 2024 Jun 1;11(1):89-108.
- [2] NAJM A, AZZAWI ID, KARIM AM. Experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement in double coil heat exchanger. *Journal of Thermal Engineering*. 2024 Jan 1;10(1):62-77.
- [3] Inyang UE, Uwa IJ. Heat transfer in helical coil heat exchanger. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2021 Dec 9;12(1):26-39.
- [4] Maghrabie HM, Attalla M, Mohsen AA. Performance assessment of a shell and helically coiled tube heat exchanger with variable orientations utilizing different nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2021 Jan 5;182:116013.
- [5] Kumar A, Pandey V. CFD analysis of shell and coil heat exchanger by using different mass flow rates for hot and cold fluid. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*. 2022;10(11):1592-608.
- [6] Kowalski K, Downarowicz D. Heat transfer in helical coil heat exchanger: An experimental parametric study. *Chemical and Process Engineering*. 2019:101-14.
- [7] Afzal A, AD MS, RK AR. Experimental investigation of thermal performance of engine coolant oil and water in helical coil heat exchanger. *Journal of Engineering Research*. 2019 Jun 2;7(2).
- [8] Alimoradi A, Veysi F. Prediction of heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers using numerical method and experimental validation. *International journal of thermal sciences*. 2016 Sep 1;107:196-208.
- [9] Zakeralhoseini S, Sajadi B, Behabadi MA, Azarhazini S, Fazelnia H. Experimental investigation of the heat transfer coefficient and pressure drop of R1234yf during flow condensation in helically coiled tubes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020 Nov 1;157:106516.
- [10] Xie L, Xie Y, Yu J. Phase distributions of boiling flow in helical coils in high gravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015 Jan 1;80:7-15.
- [11] Tuncer AD, Sözen A, Khanlari A, Gürbüz EY, Variyenli Hİ. Analysis of thermal performance of an improved shell and helically coiled heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2021 Feb 5;184:116272.
- [12] Yamamoto K, Yanase S, Yoshida T. Torsion effect on the flow in a helical pipe. *Fluid Dynamics Research*. 1994 Nov 1;14(5):259.[12]
- [13] Karmankar RG. Enhancement of heat transfer coefficient through helical coil. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2015;2(09):2125-9.
- [14] Naphon P, Wongwises S. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2006 Oct 1;10(5):463-90.

- [15] Ali ME. Experimental investigation of natural convection from vertical helical coiled tubes. *International journal of heat and mass transfer*. 1994 Mar 1;37(4):665-71.
- [16] Ghorbani N, Taherian H, Gorji M, Mirgolbabaei H. An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010 Aug 1;37(7):775-81.
- [17] Ghorbani N, Taherian H, Gorji M, Mirgolbabaei H. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010 Oct 1;34(7):900-5.
- [18] Shokouhmand H, Salimpour MR, Akhavan-Behabadi MA. Experimental investigation of shell and coiled tube heat exchangers using Wilson plots. *International communications in heat and mass transfer*. 2008 Jan 1;35(1):84-92.
- [19] Lu Y, Mustafa A, Abdullah Rehan M, Razzaq S, Ali S, Shahid M, Waleed Adnan A. The effects of water friction loss calculation on the thermal field of the canned motor. *Processes*. 2019 May 3;7(5):256.
- [20] Li J, Song JT, Cho YH. Thermal analysis of canned induction motor for coolant pump considering the eddy current loss in cans. In *Materials Science Forum* 2011 Feb 16 (Vol. 670, pp. 466-476). Trans Tech Publications Ltd.
- [21] Amirzdeh, M., Hosseini Moradi, S. A., ghobadi, N. Real Time Detection of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Using YOLOv5 Optimized Algorithm. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 2023; 14(1): 11-22..
- [22] Chen Q, Shao H, Huang J, Sun H, Xie J. Analysis of temperature field and water cooling of outer rotor in-wheel motor for electric vehicle. *IEEE Access*. 2019 Sep 25;7:140142-51.