

تحلیل حرارتی و طراحی سیستم خنک کننده یک موتور مغناطیس دائم دریایی

مجتبی اسماعیلیان^{*}، فرزاد برومند^۱

۱- پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده

هدف از این تحقیق تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با کاربرد دریایی می باشد. از جمله مزایای موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک ایجاد گشتاور و توان بالا به نسبت وزن و اندازه آنها می باشد. اما این موضوع منجر به افزایش زیاد دمای موتور می گردد. بنابراین طراحی سیستم خنک کننده برای خنک کاری و کاهش دمای این موتور ضروری می باشد. در نتیجه موتور ابتدا در حالت بدون سیستم خنک کننده و سپس همراه با سیستم های خنک کننده مختلف مورد تحلیل حرارتی قرار گرفته است. به منظور تحلیل حرارتی، ابتدا مدل سازی استاتور و پوسته انجام گرفته و سپس شبیه سازی انجام شده است. به منظور بررسی میزان اثر سیستم خنک کننده و انتخاب یک سیستم خنک کننده بهینه و مناسب در این موتور، دمای بیشینه در سیستم های خنک کننده مختلف با تعداد سوراخ های ۴، ۸ و ۱۲ عدد، قطر سوراخ های گوناگون ۳، ۴ و ۵ میلی متر و سطح مقطع های دایروی و بیضی گون با یکدیگر و با حالت بدون سیستم خنک کننده، مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که دمای این موتور در حالت بدون سیستم خنک کننده به حدود ۴۱۶ درجه سانتی گراد می رسد. همچنین سیستم خنک کننده دارای ۸ سوراخ ۴ میلی متری دایروی به عنوان مناسب ترین سیستم خنک کننده برای این موتور معرفی گردیده است.

کلمات کلیدی

موتور مغناطیس دائم، سیستم خنک کننده، تحلیل حرارتی، آب دریا.

Thermal analysis and cooling system design for marine brushless DC motor

Esmailian, Mojtaba^{*}, Boroumand, Farzad¹

1- Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

The purpose of this research is thermal analysis of a brushless permanent magnet motor with marine application. The advantages of brushless permanent magnet motors are creating high torque and power in proportion to their weight and size. But this issue leads to a large increase in engine temperature. Therefore, the design of the cooling system is essential for cooling and reducing the temperature of this engine. The engine has been thermal analyzed first without cooling system and then with different cooling systems. For the purpose of thermal analysis, the stator and the shell were first modeled and then simulated. The engine has been thermally analyzed first without cooling system and then with different cooling systems. In order to check the effect of the cooling system and choose an optimal and suitable cooling system for this engine, the maximum temperature in different cooling systems with the number of 4, 8 and 12 holes, the diameter of the holes various 3, 4 and 5 mm diameters and circular and oval cross-sections have been compared with each other and with the state without cooling system. The results showed that the temperature of this engine reaches about 416 c without cooling system. Also, the cooling system with 8 circular 4 mm holes has been introduced as the most suitable cooling system for this engine.

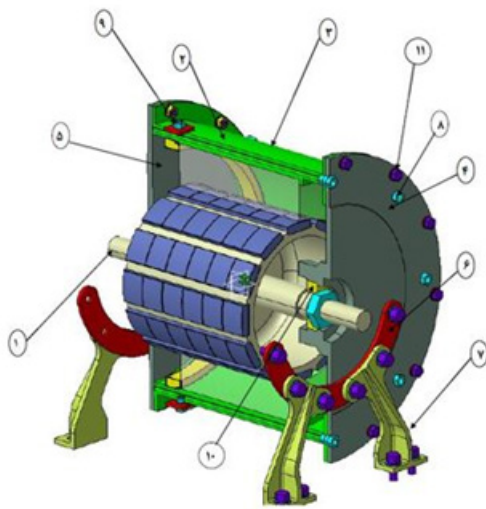
Keywords

Brushless DC motor, Cooling system, Thermal analysis, Sea water.

۱- مقدمه

موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک^۱ دارای مشخصات ظاهری مشابه با موتورهای سنکرون مغناطیس دائم هستند و همان طور که از اسم آن‌ها پیداست، در این موتورها از جاروبک استفاده نمی‌شود و عمل جابجا شدن قطب‌ها^۲ به صورت الکترونیکی صورت می‌گیرد. در نتیجه به دلیل نبودن جاروبک که یک بخش مکانیکی است، نیاز به تعمیر و نگهداری نمی‌باشد و اصطکاک موتور نیز کاهش می‌یابد [۱]. موتورهای بدون جاروبک مزایای زیادی از جمله بازدهی بالا، عمر زیاد و محدوده سرعت بالاتر نسبت به موتورهای جریان مستقیم و القایی دارند. به همین دلیل استفاده از این موتورها به سرعت افزایش یافته و در صنایع مختلفی از جمله لوازم خانگی، خودروسازی، فضایی، کالاهای مصرفی، پزشکی و تجهیزات اتوماسیون صنعتی و ابزار دقیق به کار گرفته می‌شوند. یکی از مزایای اصلی این موتورها، ایجاد گشتاورهای بالا حتی برای موتورهای با اندازه کوچک می‌باشد و همین امر منجر به کارایی آن‌ها در جایی که محدودیت فضا و وزن وجود دارد، شده است. بنابراین در چند سال اخیر، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مورد توجه محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. شکل ۱ نمای برش خورده و اجزای موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک را نشان می‌دهد.

موتورهای DC بدون جاروبک مغناطیسی دائم، عموماً دارای ویژگی‌های متعددی مانند وزن سبک، اندازه کوچک و راندمان بالا هستند. این بدان معنی است که طراحی حرارتی آن موتورها بسیار جدی است [۳]. موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک همانند سایر موتورهای دارای اتلاف انرژی می‌باشند و درصدی از انرژی در آن‌ها به گرما تبدیل می‌گردد. افزایش دمای بیش از اندازه در این موتورها می‌تواند عمر مفید موتور را کاهش داده و منجر به آسیب به آن گردد.



- ۱- روتور
- ۲- استاتور
- ۳- پوسته نگه‌دارنده استاتور
- ۴- درپوش لبه‌ای شکل با پیچ‌های دوردیفنه
- ۵- درپوش لبه‌ای شکل با پیچ‌های یک ردیفه
- ۶- واسطه
- ۷- پایه
- ۸- رابط آب
- ۹- رابط آب
- ۱۰- بلبرینگ
- ۱۱- محل اتصال پیچی بین پوسته نگه‌دارنده استاتور و درپوش

شکل ۱: نمای برش خورده سه بعدی موتور به همراه اجزاء تشکیل‌دهنده آن [۲]

این موضوع نیاز به تحلیل حرارتی موتور را توجیه می‌نماید. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقاتی در زمینه تحلیل و آنالیز حرارتی این موتورها انجام گرفته است. چاکاراپانی و همکاران [۴] به تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک به روش المان محدود پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از تحلیل حرارتی موتور در شرایط مختلف را که با دو روش مختلف بررسی نموده بودند با یکدیگر مقایسه و روش مناسبی برای تحلیل حرارتی موتور بدون جاروبک ارائه نمودند. ونجوان و همکاران [۵] نیز تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک را به روش المان محدود دو بعدی انجام داده و نتایج عددی را با نتایج تجربی اعتبارسنجی نموده و در

^۱ Brushless Direct Current Motor

^۲ Commutation

ارائه نموده و بررسی کامل تلفات حرارتی در موتور را انجام دادند. برای این منظور، مدل شبکه حرارتی با در نظر گرفتن تلفات به عنوان منبع گرما ساخته شد. آن‌ها بر اساس این مدل، یک موتور بدون جاروبک ۱۲ کیلوواتی را تحت شرایط بار و سیکل‌های کاری مختلف با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، شبیه‌سازی نمودند. در انتها نیز برای تایید مدل، نتایج شبیه‌سازی را با نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته در نرم‌افزار Motor-CAD، مقایسه نمودند. ژانگ و همکاران [۱۱] به بررسی توزیع دما در خنک‌کن یک موتور القایی پرداختند. آن‌ها افزایش دما در موتور را به وسیله آنالیز اجزای محدود توسط مدل حرارتی-مکانیکی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. در نتیجه تطابق نتایج تجربی و محاسبات عددی حاصل از مدل‌سازی، کارایی مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها را تایید نمود.

هدف این تحقیق، تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با توان ۹ کیلووات با کاربرد دریایی می‌باشد. از جمله مزایای موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک ایجاد گشتاور و توان بالا به نسبت وزن و اندازه آن‌ها می‌باشد. اما این موضوع منجر به افزایش زیاد دمای موتور می‌گردد. در نتیجه با توجه به بازه زمانی طولانی استفاده از این موتور، طراحی و استفاده از یک سیستم خنک‌کننده برای خنک‌کاری و کاهش دمای این موتور ضروری می‌باشد. در این تحقیق، موتور ابتدا در حالت بدون سیستم خنک‌کننده و سپس همراه با سیستم‌های خنک‌کننده مختلف مورد تحلیل حرارتی قرار گرفته است. با تحلیل حرارتی موتور توسط نرم‌افزار ANSYS-GAMBIT، بیشینه دمای استاتور و پوسته به دست آمده است. در ادامه به ارائه یک سیستم خنک‌کننده برای موتوری با توان ۹ کیلووات پرداخته شده است.

برای خنک نمودن موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک، بسته به کارایی آن‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از رایج‌ترین روش‌های خنک‌کاری این موتورهای

نتیجه اثربخشی محاسبات را تایید کردند. نظری مرعشی و همکاران [۶] در تحقیق خود ساختار جدیدی برای بهینه‌سازی تلفات جریان در موتور مغناطیسی دائم بدون جاروبک ارائه نمودند. آن‌ها از مدار حرارتی گذرا برای آنالیز حرارتی موتور استفاده نمودند. با پیاده‌سازی مدار حرارتی در نرم‌افزار PSPICE، محاسبه دما در قسمت‌های مختلف موتور را انجام دادند. مین میاوا و همکاران [۷] به آنالیز حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با تمرکز بر استاتور آن، پرداختند. در تحقیق آن‌ها روش‌هایی برای ساخت یک مدل حرارتی استاتیک المان محدود و یک مدل حرارتی تحلیلی که مبتنی بر روش شبکه حرارتی معادل است، ارائه شده است. در انتهای تحقیق آن‌ها، نتایج تحلیل‌های حاصل از مدل‌های ارائه شده با نتایج تجربی اعتبارسنجی و تایید شد. آن‌ها اعلام نمودند که روش‌های تحلیل حرارتی ارائه شده توسط آن‌ها برای سایر موتورهای الکتریکی نیز مناسب می‌باشد. لیو و همکاران [۸] به بررسی و تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک پرداختند. شوکلا و همکاران [۹] به تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیس بدون جاروبک مورد استفاده در پمپ‌های شناور پرداختند. آن‌ها افزایش دما در نقاط مختلف موتور را مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها، مدل‌سازی شبکه حرارتی موتور برای انجام آنالیز حرارتی حالت پایدار و گذرا که در نرم‌افزار Motor-CAD انجام می‌شود، پیشنهاد شده است. آن‌ها اعلام نمودند که شرایط فرار حرارتی در تحلیل حالت پایدار با افزایش شدید دمای سیم‌پیچ‌ها و آهن‌رباها مشاهده شد. از آنجایی که پمپ‌های شناور تحت عملیات حالت پایدار قرار می‌گیرند، یک آرایش خنک‌کننده نیز پیشنهاد شده است تا افزایش دما را در محدوده قابل قبول نگه دارد. لی و همکاران [۱۰] در تحقیق خود، یک مدل شبکه حرارتی را برای موتورهای مغناطیسی دائم بدون جاروبک غوطه‌ور در سیال برای کاربردهای هوافضا

الکتریکی استفاده از انتقال حرارت جابجایی اجباری بوسیله طراحی سیستم‌های خنک کننده و تحلیل حرارتی سیستم یک فن می باشد. اما اگر که موقعیت عملکردی موتور های مختلف پرداخته شده و بهترین طرحی که بتواند این در یک فضای بسته باشد، امکان استفاده از هوا به عنوان سیستم را در حالت پایدار در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی سیال خنک کننده وجود ندارد. یکی از آسان ترین روش‌ها گراد نگه دارد، انتخاب شده است.

برای خنک کاری موتور مغناطیس دائم دریایی، استفاده از ۲- مدل سازی و شبیه سازی

آب دریا است، اما با توجه به ایجاد رسوب در پوسته موتور ۲-۱- مدل سازی

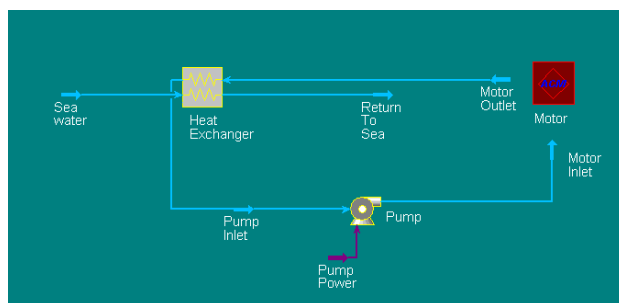
چنین روشی نیز پیشنهاد نمی شود. لکن استفاده از آب معادلات حاکم بر این مسئله در این تحقیق شامل سختی زدایی شده و یا روغن به دلیل عدم ایجاد رسوب در معادله پیوستگی، معادلات ناپراستوکس و معادله انرژی مجاری حرکت سیال خنک کننده و کاهش امکان خوردگی می باشد که به ترتیب در معادلات شماره ۱ تا ۵ آورده شده پوسته موتور و تجهیزات جانبی، می تواند مناسب ترین روش است.

برای یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با کاربرد دریایی باشد. در معادله ۱، بردار سرعت، ρ چگالی سیال و t زمان است. معادلات ۲ تا ۴ ناظر بر تنش و ناشی از اندازه حرکت

با توجه به نتایج قابل قبول حاصل از استفاده آب سیال هستند. در این معادلات w, v, u سرعت در سه جهت سختی زدایی شده و همچنین سهولت دسترسی به آن، پایه اصلی طراحی در این تحقیق بر اساس بکارگیری این سیال قرار گرفت. برای این منظور چرخه‌ای که شماتیک آن در شکل ۲ آورده شده است، در نظر گرفته شده است.

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \quad (2)$$

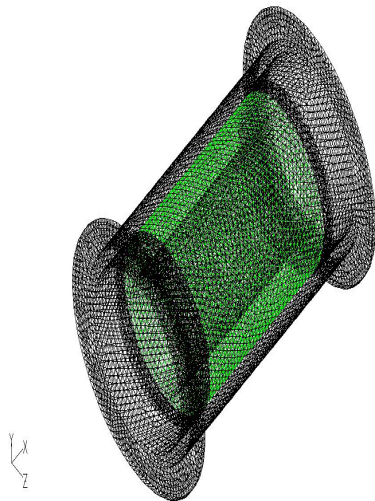


شکل ۲: شماتیک سیکل خنک کاری موتور الکتریکی

برای مسیر حرکت سیال از درون پوسته موتور دو حالت قابل استفاده می باشد. حالت اول استفاده از سوراخهایی در طول پوسته و حالت دوم ایجاد لوله های مارپیچ درون پوسته می باشد. از آنجا که فرآیند ساخت لوله های مارپیچ بسیار سخت می باشد، روش استفاده از سوراخهایی در طول پوسته، مبنای اصلی طراحی و مدل سازی ها در این تحقیق قرار گرفته است. در نتیجه در این تحقیق به

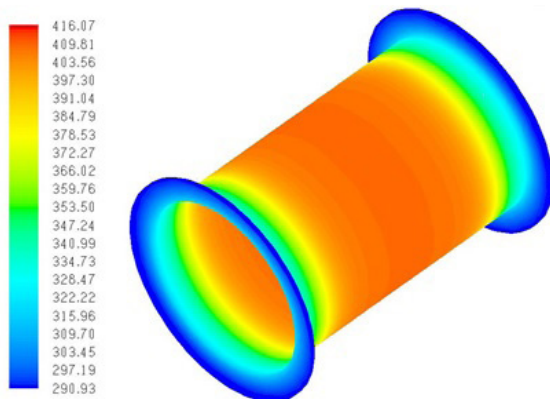
$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) \quad (4)$$



شکل ۴: شمایی از شبکه بندی مدل اصلی استاتور و پوسته

مطابق شکل ۵ اگر موتور مدت زمان نامحدودی کار کند، دما در قسمت مرکزی استاتور تا بیش از ۴۱۶ درجه سانتی گراد بالا خواهد رفت.



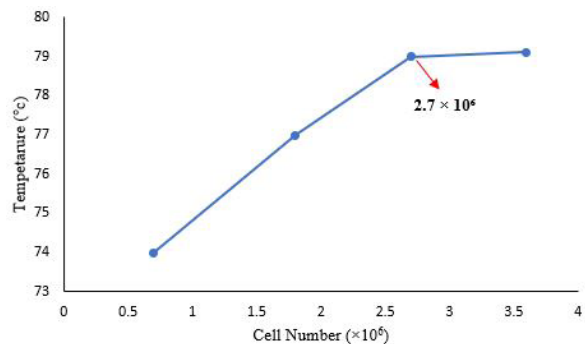
شکل ۵: توزیع دما روی پوسته بعد از رسیدن به حالت پایدار (بدون سیستم خنک کننده)

تنها عامل خنک کننده در سیستم فوق الذکر هوای محیط (۳۲ درجه سانتیگراد) می باشد. جهت نمایش بهتر تغییرات دمایی در حالتی که از سیستم خنک کننده استفاده نشده است، افزایش دمای استاتور و پوسته تنها پس از ۱۵ و ۳۰ دقیقه از کارکرد موتور با حل مساله به صورت غیر دایم، بررسی شده است. شکل ۶ توزیع دما در استاتور و پوسته را پس از ۱۵ و ۳۰ دقیقه از کارکرد موتور بدون سیستم خنک کننده نشان می دهد. مطابق با شکل

$$\rho_v \frac{DT}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V + k \nabla^2 T - \nabla \cdot q_{radiation} + \Phi + q_{generated} \quad (5)$$

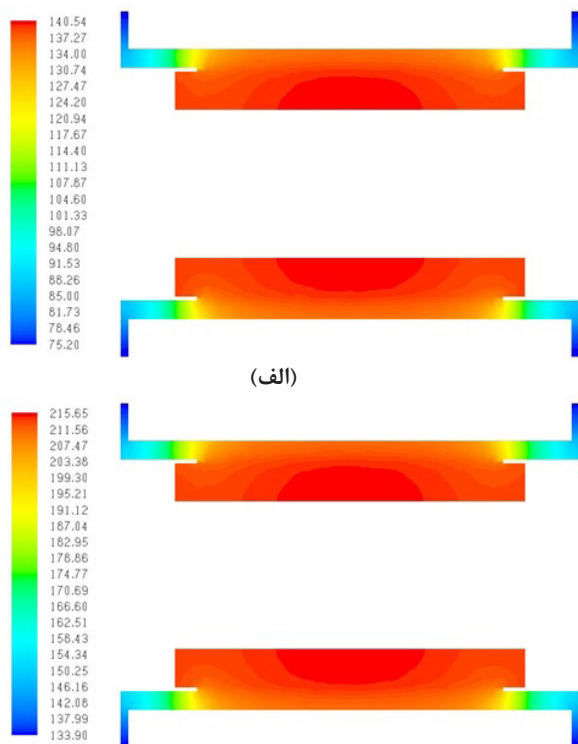
۲-۲- تحلیل حرارتی مدل اولیه موتور بدون سیستم خنک کننده

با توجه به ساختار موتور و تولید حرارت متوسط ۹۰۰ واتی در استاتور واضح است که در اثر گذر زمان دمای استاتور و پوسته فولادی آن بالا می رود. برای بررسی دما در موتور، مدل سازی اولیه و تحلیل حرارتی بدون سیستم خنک کننده انجام گرفت. برای مش بندی مدل از ۲,۷ میلیون مش به صورت شبکه بی سازمان استفاده شده است. زیرا مطابق با نمودار استقلال مش که در شکل ۳ نمایش داده شده است، ریزتر نمودن مش ها تاثیری در افزایش دقت نتایج نداشته است. همچنین برای ورودی جریان سیال خنک کاری از شرط مرزی فشار ورودی استفاده شده است. شار حرارتی ایجاد شده توسط موتور نیز به عنوان شرط مرزی حرارتی لحاظ شده است.



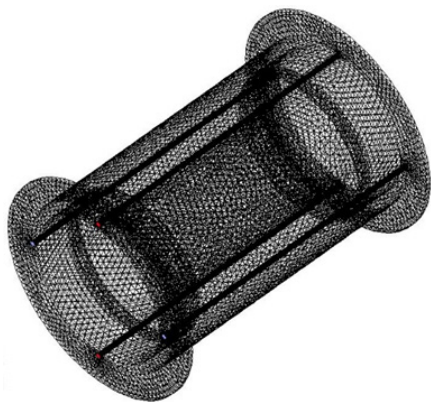
شکل ۳: نمودار استقلال از مش

شکل ۴ مدل اولیه استاتور و پوسته موتور بدون سیستم خنک کننده به همراه شبکه بندی مدل را نشان می دهد. شکل ۵ تحلیل حرارتی مدل بدون سیستم خنک کننده را نمایش می دهد.



شکل ۶: توزیع دما در مقطع طولی استاتور و پوسته بعد از گذشت ۱۵ دقیقه از شروع به کار موتور (بدون سیستم خنک کننده) (ب) بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از شروع به کار موتور (بدون سیستم خنک کننده)

برای انتخاب سیستم خنک کننده مناسب برای این موتور و بررسی میزان اثر سیستم خنک کننده بر این موتور دریایی، مدل های مختلفی از سیستم خنک کننده با تعداد سوراخ متفاوت شامل ۴، ۸ و ۱۲، دو نوع سوراخ متفاوت دایروی و بیضوی و قطر سوراخ های متفاوت شامل ۳، ۴ و ۵ میلی متر ایجاد شده و تحلیل حرارتی بر روی تمامی آن ها انجام گرفته است. شکل ۷ مدل های ایجاد شده با تعداد سوراخ های مختلف را نشان می دهد.



(الف)

۶، دمای موتور پس از ۱۵ دقیقه کار بعد از شروع به ۱۴۰ و پس از ۳۰ دقیقه به ۲۱۵ درجه سانتی گراد می رسد. پس ملاحظه می شود که با شروع به کار موتور دمای موتور بالا خواهد رفت و استفاده از یک سیستم خنک کاری برای کنترل دمای موتور جهت کارکرد بهینه مورد نیاز می باشد.

۳-۲- تحلیل حرارتی با استفاده از سیستم خنک کننده

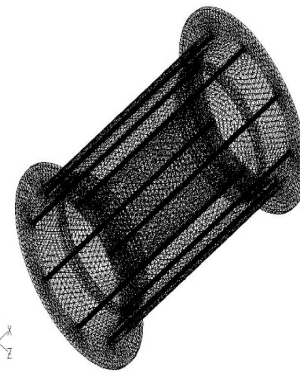
جهت خنک کاری این موتور با توجه به محدودیت های ساختی و جهت سادگی ساخت چند مدل مختلف برای سیستم خنک کاری در نظر گرفته شده است، که مبنای آن بر سوراخهایی طولی در طول پوسته با قطرهای مختلف ۳، ۴ و ۵ میلی متر در مرکز آن می باشد. در این روش سیال خنک کن با عبور از این سوراخ ها حرارت پوسته را گرفته و با دمای بالاتری نسبت به دمای ورودی به سوراخ ها از آن ها خارج می گردد. آب گرم خروجی از سیستم در یک مبدل حرارتی توسط آب دریا حرارت خود را از دست داده و با رسیدن به دمای مطلوب وارد سیستم خنک کاری می شود. بدیهی است به منظور جلوگیری از ایجاد رسوبات در سیستم خنک کاری که موجب کاهش ضریب انتقال حرارت سطوح و همچنین مشکلات دیگری نظیر خوردگی می شود باید از آب سختی زدایی شده در این سیکل بسته استفاده کنیم. با توجه به آنکه دمای آب دریا ۰۳ درجه سانتی گراد فرض شده است، دمای آب سرد خروجی از مبدل حرارتی (ورودی به پوسته) را ۳۵ درجه سانتی گراد، مبنای محاسبات قرار داده شده است. در این مدل ها کماکان سطح خارجی پوسته توسط هوای اطراف موتور (که دمای آن ۳۲ درجه سانتی گراد فرض شده است) به صورت انتقال حرارت جابجایی خنک کاری می شود.

بایستی دقت کافی صورت گیرد. سرعت حرکت آب دریا را در حالت عادی، حدود ۲ نات (تقریباً ۱ متر بر ثانیه) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این مسئله، با سرعت حرکت آب دریا برابر ۱ متر بر ثانیه حل گردیده است.

۳- بررسی نتایج شبیه‌سازی

برای دستیابی به توزیع دما و بیشینه دمای استاتور و پوسته به منظور بررسی سیستم‌های خنک‌کننده مختلف در این تحقیق، تحلیل حرارتی برای تمامی این سیستم‌ها انجام شده است. شکل ۸، تحلیل حرارتی انجام گرفته برای سیستم خنک‌کننده با ۴ سوراخ به قطر ۴ میلی‌متر در طول پوسته با دبی ۰/۲۹ کیلوگرم بر دقیقه و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که جهت جریان سیال خنک کن درون لوله‌ها به صورت یک در میان در جهت و خلاف جهت محور x ها در نظر گرفته شده است تا خنک کاری پوسته بازده بالاتری داشته و بیشینه دمای پایین‌تری در کل دامنه حل مسئله ایجاد شود و انتقال حرارت به صورت یکسان بر روی پوسته توزیع گردد. با دقت در نحوه توزیع دما و مقادیر آن مشاهده می‌شود که دما در استاتور بالاتر از سایر نقاط بوده و ماکزیمم دما در ناحیه میانی دو لوله (دورترین فاصله نسبت به لوله‌های خنک کن) و در قسمت انتهایی استاتور که تماس کمتری با خنک‌کننده‌ها دارد اتفاق می‌افتد. بیشینه دما در حالت خنک‌کاری با ۴ لوله طولی و دبی سیال (آب) خنک کن ۰/۲۹ کیلوگرم بر دقیقه (طبق شکل ۸) ۱۲۸ درجه سانتی‌گراد است.



(ب)

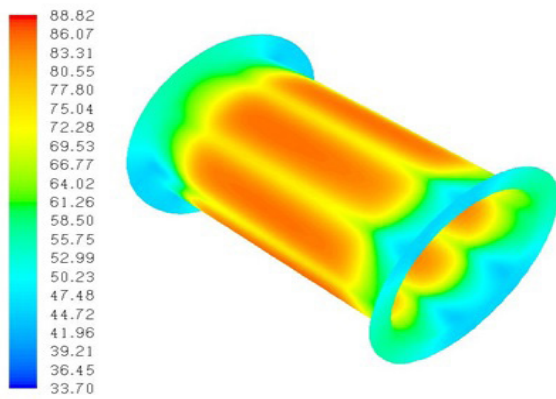


(ج)

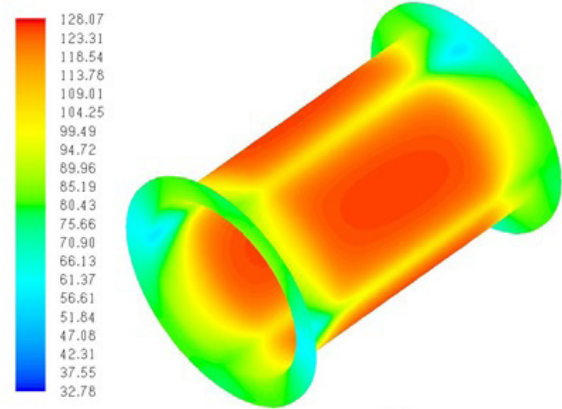
شکل ۷: شبکه بندی مدل با
(الف) ۴ سوراخ طولی (ب) ۸ سوراخ طولی (ج) ۱۲ سوراخ طولی

۲-۴- لوله خنک کن گذرنده از داخل آب دریا

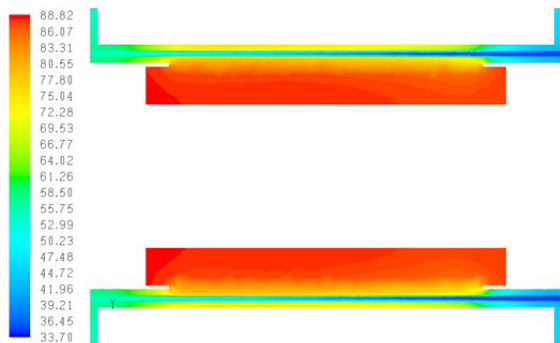
با توجه به هزینه‌بر بودن استفاده از مبدل، بکارگیری آن مقرون به صرفه نبوده و بر اساس محاسبات کامپیوتری، سیستم خنک کاری ساده مثل عبور لوله حاوی آب خنک کاری موتور (آب گذرنده از داخل پوسته) از داخل آب دریا با دمای پیش فرض ۳۰ درجه سانتی‌گراد، کفایت می‌کند. بدین منظور با مدل‌سازی رایانه‌ای طول لوله مورد نیاز که آب گرم پس از عبور از آن به دمای مطلوب زیر ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، مورد محاسبه قرار گرفت. این دما، دمایی است که مبنای محاسبات برای انتخاب طرح خنک کاری در این تحقیق قرار گرفته است. لوله‌ای که آب خروجی از پوسته را جمع‌آوری کرده و آن را از درون آب خنک دریا عبور می‌دهد یک لوله استاندارد ۱ اینچی با جنس فولاد در نظر گرفته شده است. لازم به تذکر است برای انتخاب جنس لوله به مسئله خوردگی آب دریا نیز



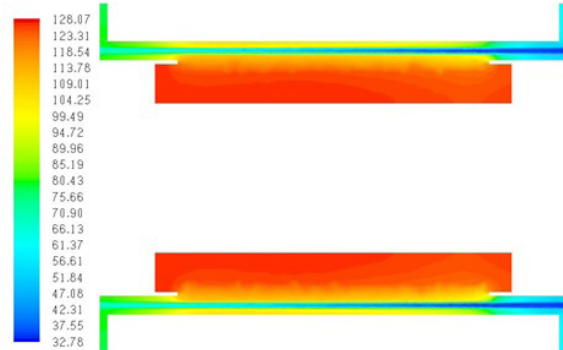
(الف)



(الف)



(ب)



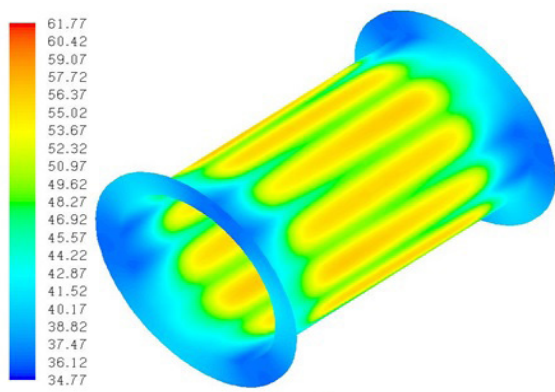
(ب)

شکل ۹: توزیع دمای موتور با سیستم خنک کننده دارای ۸ سوراخ (الف) روی پوسته در حالت پایدار (ب) در مقطع طولی استاتور و پوسته و در طول یکی از کانالها

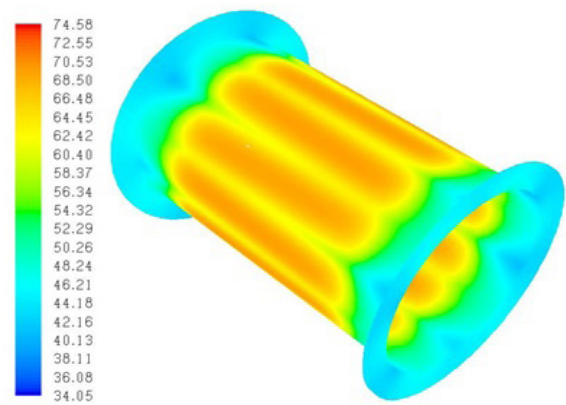
شکل ۸: توزیع دمای موتور با سیستم خنک کننده دارای ۴ سوراخ (الف) روی پوسته در حالت پایدار (ب) در مقطع طولی استاتور و پوسته و در طول یکی از کانالها

بیشینه دما در حالت خنک کاری با ۱۲ لوله طولی و دبی سیال (آب) خنک کن ۰/۸۷ کیلوگرم بر دقیقه (طبق شکل ۱۰) ۷۵ درجه سانتی‌گراد است. جهت دستیابی به دماهای پایین‌تر کاری استاتور و تاثیر شکل سوراخی که سیال خنک کننده از آن می‌گذرد (افزایش سطح انتقال حرارت) در حالت پایدار مدلی با ۱۲ سوراخ بیضی‌گون در طول پوسته جهت گذر سیال خنک کننده طراحی و تحلیل گردید. شکل ۱۱، تحلیل حرارتی انجام گرفته برای سیستم خنک‌کننده با ۱۲ سوراخ بیضی‌گون در طول پوسته و دبی ۲/۵۲ کیلوگرم بر دقیقه را نشان می‌دهد.

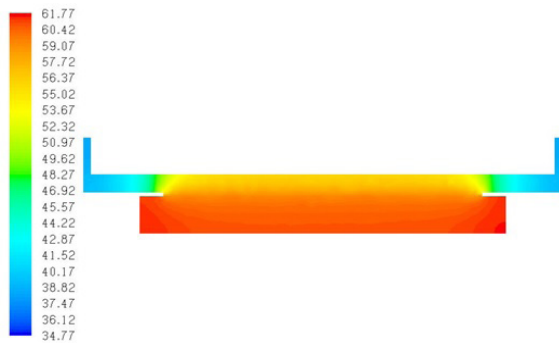
با توجه به حصول دمای بالا در حالت استفاده از ۴ سوراخ طولی گذر سیال خنک‌کننده، مدل ۸ سوراخ با قطر ۴ میلیمتر، تحلیل شده‌است. شکل ۹، تحلیل حرارتی انجام گرفته برای سیستم خنک‌کننده با ۸ سوراخ به قطر ۴ میلیمتر در طول پوسته و دبی ۰/۵۸ کیلوگرم بر دقیقه را نشان می‌دهد. جهت دستیابی به دماهای پایین‌تر کاری استاتور در حالت پایدار مدلی با ۱۲ سوراخ طولی جهت گذر سیال خنک‌کننده طراحی و تحلیل گردید. شکل ۱۰، تحلیل حرارتی انجام گرفته برای سیستم خنک‌کننده با ۱۲ سوراخ به قطر ۴ میلیمتر در طول پوسته و دبی ۰/۸۷ کیلوگرم بر دقیقه را نشان می‌دهد.



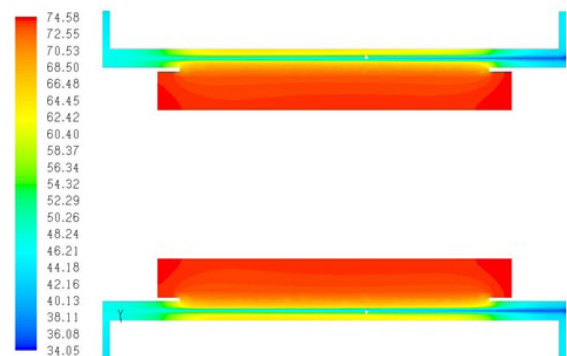
(الف)



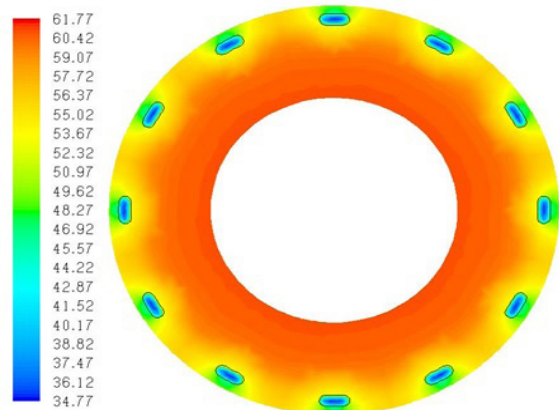
(الف)



(ب)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱: توزیع دمای موتور با سیستم خنک کننده دارای ۱۲ سوراخ بیضی گون ۴ میلیمتری (الف) روی پوسته در حالت پایدار (ب) در مقطع طولی استاتور و پوسته و در طول یکی از کانالها (ج) در مقطع استاتور و پوسته

شکل ۱۰: توزیع دمای موتور با سیستم خنک کننده دارای ۱۲ سوراخ (الف) روی پوسته در حالت پایدار (ب) در مقطع طولی استاتور و پوسته و در طول یکی از کانالها

بیشینه دما در حالت خنک کاری با ۱۲ لوله بیضی گون طولی و دبی سیال (آب) خنک کن ۲/۵۲ کیلوگرم بر دقیقه (طبق شکل ۱۱) ۶۲ درجه سانتی گراد است.. نتایج شبیه سازی های فوق الذکر به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۱ بیشینه دمای استاتور و پوسته حاصل از تحلیل حرارتی سیستم های خنک کننده در این تحقیق را گزارش می نماید. این دما نشان دهنده میزان تاثیر سیستم های خنک کننده مختلف با تعداد سوراخ، قطر سوراخ، نوع سوراخ و دبی های متفاوت بر کاهش دمای موتور است.

مطابق با جدول ۱ بیشترین کاهش دما مربوط به سیستم خنک کننده با ۱۲ سوراخ بیضی گون با مقدار حدود ۳۶۰ درجه سانتی گراد کاهش در دما و رسیدن به دمای ۵۶ درجه سانتی گراد می باشد. اما نکته قابل توجه این است که ایجاد سوراخ های بیضی گون سخت و پیچیده می باشد زیرا مانند سوراخ های دایروی شکل، به وسیله

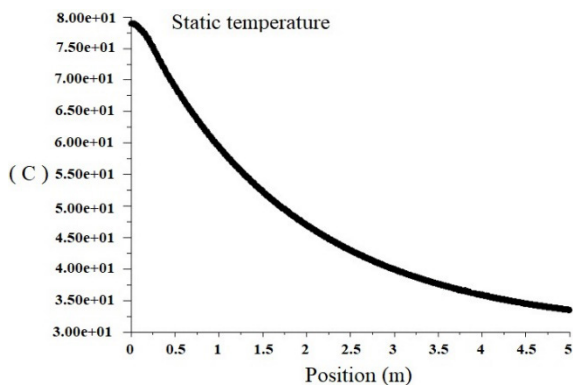
مته قابل ایجاد نمی‌باشند و برای ایجاد آن‌ها، روش‌های پیچیده تری مورد نیاز است.

جدول ۱: نتایج شبیه سازی های صورت گرفته برای سیستم‌های خنک کننده مختلف

ردیف	مقطع عبور جریان	تعداد و اندازه سوراخهای گذر جریان	دبی سیال خنک کننده (کیلوگرم بر دقیقه)	سرعت سیال خنک کننده در ورود به هر سوراخ (متر بر ثانیه)	بیشینه دمای استاتور و پوسته (سانتیگراد)
۱		بدون سیستم خنک کننده			۴۱۶
۲	دایره‌ای	۴ سوراخ ۴ میلیمتر	۰/۲۹	۰/۱	۱۲۸
۳	دایره‌ای	۴ سوراخ ۴ میلیمتر	۰/۸۷	۰/۳	۱۱۲
۴	دایره‌ای	۴ سوراخ ۴ میلیمتر	۱/۴۵	۰/۵	۱۰۸
۵	دایره‌ای	۸ سوراخ ۴ میلیمتر	۰/۵۸	۰/۱	۸۸
۶	دایره‌ای	۸ سوراخ ۳ میلیمتر	۰/۵۳	۰/۵۳	۸۲/۵
۷	دایره‌ای	۸ سوراخ ۴ میلیمتر	۱/۷۴	۰/۳	۷۹
۸	دایره‌ای	۸ سوراخ ۵ میلیمتر	۰/۱۹	۰/۱۹	۷۹/۴
۹	دایره‌ای	۸ سوراخ ۴ میلیمتر	۲/۹	۰/۵	۷۷/۵
۱۰	دایره‌ای	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۰/۸۷	۰/۱	۷۵
۱۱	دایره‌ای	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۲/۶۱	۰/۳	۶۸
۱۲	دایره‌ای	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۴/۳۵	۰/۵	۶۷
۱۳	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۲/۵۲	۰/۱	۶۲
۱۴	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۷/۵۸	۰/۳	۵۷
۱۵	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۴ میلیمتر	۱۲/۶۴	۰/۵	۵۶
۱۶	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۳ میلیمتر	۱/۷۲	۰/۱	۶۳
۱۷	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۳ میلیمتر	۵/۱۶	۰/۳	۵۸
۱۸	بیضی گون	۱۲ سوراخ ۳ میلیمتر	۸/۶	۰/۵	۵۶

سوراخ‌های بیضی گون نیاز به صرف هزینه و وقت خیلی بیشتری نسبت به سوراخ‌های دایروی می‌باشد، هرچند که مطابق با جدول ۱، استفاده از این سیستم خنک کننده صرف نظر از هزینه و زمان می‌تواند منجر به بیشترین کاهش دما در مقایسه با سیستم‌های خنک کننده با سوراخ‌های دایروی باشد. لذا برای انتخاب یک سیستم خنک کننده مناسب با در نظر گرفتن بحث هزینه و زمان، مدل دایره‌ای با ۸ سوراخ ۴ میلیمتری در طول پوسته، پیشنهاد می‌گردد. مطابق با جدول ۱، بیشینه دمای استاتور و پوسته در این مدل برابر با ۸۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در حدود ۳۲۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به مدل اولیه موتور بدون سیستم خنک کننده که تا دمای ۴۱۶ درجه می‌رسد، کاهش دما دارد.

در ادامه نتایج حاصل از مدل سازی برای محاسبه طول لوله برای عبور آب گرم از میان آب دریا، به طور مختصر در نمودار شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن ضریب ایمنی ۲ برای کاهش دمای سیال به زیر ۳۵ درجه سانتی‌گراد نیاز به عبور آب در مسافت حداقل ۸ متر درون لوله می‌باشد. شکل ۱۳ نیز کاهش دما در لوله انتقال آب گرم توسط آب دریای اطراف لوله را نشان می‌دهد. در حالت پیش فرض حرکت آب دریا با سرعت ۱ متر بر ثانیه می‌باشد.



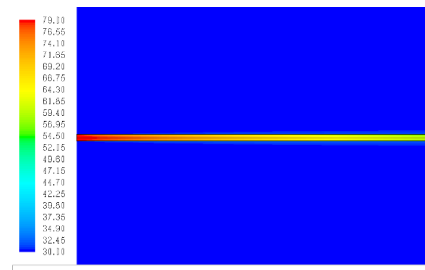
شکل ۱۲: تغییرات دما در مرکز لوله حاوی آب گرم مورد استفاده در خنک کاری موتور در حالت پیش فرض حرکت آب دریا با سرعت ۱ متر بر ثانیه

بنابراین برای ایجاد سیستم‌های خنک کننده با

و کنترل دمای موتور، زمینه برای طراحی موتورهای مغناطیسی دائم بدون جاروبک با توان بالا که در حین کار دچار افزایش دمای زیادی می‌گردند، مهیا شده است.

۵- مراجع

- [1] Kolahdruz A, Shakeri M, Jabari A, Gol S. Design and thermal analysis of a brushless direct current motor with a power of 300 watts. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 2009 (pp. 37-45). (in persian)
- [2] Esmailian M, Boroumand F. Design of mechanical components for Brushless DC Motor. *Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal*. 2023 (pp. 347-364). (in persian)
- [3] Minghui Z, Weiguo L. Transient coupled electro-magnetic thermal analysis of a permanent magnet brushless DC motor. In 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 2010 Aug 24 (Vol. 4, pp. 221-224). IEEE.
- [4] Chakkarapani K, Thangavelu T, Dharmalingam K. Thermal analysis of brushless DC motor using multiobjective optimization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020 Oct;30(10): e12546.
- [5] Wenjuan Q, Jiming Z, Guiqing H, Jibin Z, Yongxiang X. Thermal analysis of underwater oil-filled BLDC motor. In 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems 2011 Aug 20 (pp. 1-4). IEEE.
- [6] Marashi AN, Kanzi K. Thermal analysis of BLDC motor with propose new arrangement for permanent magnets to magnet eddy current loss reduction. In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2016 May 10 (pp. 1769-1774). IEEE.
- [7] Miao DM, Perriard Y, Markovic M, Germano P, Shen JX. Thermal modeling of a BLDC motor for a kick scooter. In 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2012 May 28 (pp. 764-769). IEEE.
- [8] Liu ZJ, Howe D, Mellor PH, Jenkins MK. Thermal analysis of permanent magnet machines. In 1993 Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 376) 1993 Sep 8 (pp. 359-364). IET.
- [9] Shukla A, Payami S. Design and thermal network modeling of BLDC motor for submersible pump application. In 2020 IEEE International Conference on Power



شکل ۱۳: کاهش دما در لوله انتقال آب گرم توسط آب دریا

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تحلیل حرارتی یک موتور مغناطیسی دائم بدون جاروبک با کاربرد دریایی انجام گرفته شد و دمای بیشینه موتور در استاتور و پوسته بدون سیستم خنک‌کننده محاسبه گردید. نتایج نشان داد که دمای این موتور در حالت بدون سیستم خنک‌کننده تا حدود ۴۱۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. به منظور کاهش دما سیستم خنک‌کننده‌ای شامل س.سختی زدایی شده و یا روغن از آن‌ها طراحی شد و سیستم‌های مختلف با پارامترهای متفاوت شامل تعداد سوراخ، قطر سوراخ و سطح مقطع‌های متفاوت سوراخ‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که در بهترین حالت در صورت استفاده از سیستم خنک‌کننده با ۱۲ سوراخ بیضی‌گون به قطر ۴ میلی‌متر به مقدار ۵۶ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. اما با توجه به پارامترهای هزینه و زمان به دلیل دشواری در ایجاد سوراخ‌های بیضی‌گون، سیستم خنک‌کننده با سطح مقطع دایروی انتخاب گردید. همچنین سیستم دارای ۸ سوراخ ۴ میلی‌متری به دلیل نزدیکی دمای بیشینه در آن (۸۸ درجه سانتی‌گراد) به دمای بیشینه در حالت ۱۲ سوراخ (۷۵ درجه سانتی‌گراد) و این‌که تعداد سوراخ کمتر، از نظر هزینه و زمان به صرفه‌تر می‌باشد، به عنوان حالت بهینه معرفی گردیده است.

در نهایت دستاورد اصلی این تحقیق، طراحی یک سیستم خنک‌کننده مناسب و مقرون به صرفه برای خنک‌کاری یک موتور مغناطیسی دائم بدون جاروبک توسط آب دریا بوده است. در نتیجه با طراحی این سیستم

Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2020 Dec 16 (pp. 1-5). IEEE.

[10] Li Y, Huang X, Fang Y. Thermal analysis of a brushless DC motor for aerospace application using thermal network models. In 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2013 Oct 26 (pp. 855-859). IEEE.

[11] Zhang Y, Ruan J, Huang T, Yang X, Zhu H, Yang G. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis. IEEE Transactions on Magnetics. 2012 Jan 23;48(2):1047-50.