



## مطالعه اثر نانو سیال در تبادلگر حرارتی خنک کاری روغن موتور دیزل دریایی

سجاد براتی بنی<sup>۱</sup>، ایمان پیشکار<sup>۲\*</sup> و محمدرضا سلیم پور<sup>۳</sup><sup>۱</sup> مربی، پژوهشگران جوان و باشگاه نخبان، شعبه شهر کرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر کرد، ایران<sup>۲</sup> مربی، گروه مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران<sup>۳</sup> استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲

## چکیده

در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر بخشی استفاده از نانو سیال در تبادلگرهای حرارتی خنک کن روغن موتور دیزل دریایی، سه سیال متفاوت با درصد حجمی‌های متفاوتی از مواد نانو ( $Al_2O_3$ ) در بازه رینولدزی ۳ تا ۴۸ هزار، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که در تبادلگر-های حرارتی پوسته و لوله شرط مرزی حاکم در سطح تبادل حرارت، متفاوت از شرط‌های مرزی مرسوم و معروف دما ثابت یا شار ثابت در دیواره است، به حل همزمان جریان گرم و سرد درون تبادلگر پرداخته شد. تکفاز بودن نانو سیال، از جمله فرضیات بکار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد، اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه در رینولدزهای پایین، باعث ضریب عملکرد بالاتری در تبادلگر می‌شود. با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، ضریب عملکرد مبدل کاهش پیدا می‌کند و حالت بهینه و ماکزیمم عملکرد مبدل حرارتی در درصدهای حجمی مورد بررسی در رینولدز ۲۰۰۰۰ برای آب و ۱۲۰۰۰ برای اتیلن گلیکول اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، انتخاب سیال پایه با ضریب عملکرد بالاتر بسته به محدوده عدد رینولدز دارد؛ همچنین در این پژوهش، به بررسی آب دریا به عنوان سیال خنک‌کننده در دسترس موتور دیزل دریایی پرداخته شد.

**کلمات کلیدی:** نانو سیال؛ تبادلگر حرارتی؛ درصد حجمی؛ عدد رینولدز.

## Study of the Effect of Nano-Fluid in the Diesel-Cooled Diesel Engine Oil Cooler

S. Baraty Beni<sup>1</sup>, I. Pishkar<sup>2,\*</sup>, M. R. Salimpour<sup>3</sup><sup>1</sup> Young Researchers and Elite Club, Shahre Kord Branch, Islamic Azad University, Shahre Kord, Iran.<sup>2</sup> Department of Mechanics, Payame Noor University, Tehran, Iran.<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

## Abstract

In the present study, three different fluids with different volumes of nano materials ( $Al_2O_3$ ) in the Reynolds range of 3 to 48 thousand were investigated for the purpose of evaluating the effect of using nanofluid in heat exchangers. The converter in the submarine engine come to use of as a motor oil cooler. The results show that the addition of nanoparticles to the base fluid in the lower Reynolds results in a higher performance factor in the exchanger. By increasing the volumetric percentage of nanoparticles, the converter's performance factor decreases. Optimum mode and maximum heat exchanger performance, in all volumetric percentages, occurs in Reynolds 20,000 for water and 12,000 for ethylene glycol. In other words, the choice of base fluid with a higher performance factor depends on the Reynolds number range. Also, this study examined sea water as a cooling fluid available to the marine diesel engine.

**Keywords:** Nano Fluid; Heat Exchanger; Volume Percentage; Reynolds Number.

## ۱- مقدمه

تبادلگرهای گرمایی کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند که یکی از این زمینه‌ها، مربوط به موتورهای احتراق داخلی است که در آن وظیفه تبادلگر گرمایی، دفع گرما از سیال خنک کن موتور است. چرخه عملکردی به این صورت است که سیال خنک کن با چرخش در اطراف موتور، موجب خنک شدن موتور می‌شود. سپس این سیال خنک کن که پس از چرخش در اطراف سیلندر موتور گرم شده، وارد تبادلگر گرمایی شده و گرمای خود را از دست می‌دهد و سپس جهت خنک کاری موتور، مجدداً به داخل محفظه اطراف سیلندر باز می‌گردد. این چرخه در زمان کارکردی موتور، بصورت دائم فعال است.

تحقیقات متعددی در مورد سشیشتم‌های خنک کاری روغن موتور دیزل و بهبود عملکرد حرارتی تبادلگرها در مراکز تحقیقاتی دنیا انجام شده که می‌توان به مواردی اشاره کرد. در سال ۱۳۸۸ سوادکوهی [۱]، تأثیر رفتار سامانه خنک کاری بر عملکرد موتور LA-457 را مورد بررسی قرار داد. مطالعات نظری و آزمون‌های تجربی انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که هرگونه دست کاری در سامانه خنک کاری، به ویژه کاهش دمای آب خنک کننده، موجب افزایش تنش‌های مکانیکی ناشی از تغییر روا داشته‌ای مجاز در شرایط زیر بار موتور گشته و همچنین با افزایش میزان مصرف سوخت و آلایندگی، زمینه حالت‌های پس سوز و تنش‌های حرارتی و خوردگی در سامانه تخلیه را پیش خواهد آورد. در نتایج تجربی این تحقیق، کاهش توان و گشتاور اندازه گیری شده در حالت کاهش دمای آب خنک کننده، به شکل معنی دار مشاهده شده است. در مقابل با افزایش محدود دمای آب در گردش در صورت بهره گیری از سوخت گازوئیلی، استاندارد و بهینه، می‌توان به شاخص برتری از توان، گشتاور، مصرف سوخت و آلایندگی دست یافت.

پینتو در سال ۲۰۰۲ یک روشی برای بهینه سازی و پیکر بندی در تبادلگر حرارتی ارائه نمود که در آن هدف بهینه سازی بهترین پیکربندی بین صفحات و واشرهای آببند با حداقل سطح انتقال حرارت بیرون رفت بود. در این تحقیق محدودیت‌های اعمال شده متوالی را با وجود تعداد صفحات کم و کانال‌ها و واشرها آب بندی و مایع خنک کاری با ۱٪

افت فشار و محاسبات سرعت در کانال، مورد بررسی و محاسبه قرار داده است [۲].

ضریب انتقال حرارت تابعی از خواص حرارتی سیالات مورد استفاده است. در راستای بالا بردن بازده حرارتی سیستم‌ها تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. نرخ انتقال حرارت را می‌توان توسط تغییرات هندسه، بالا بردن دبی سیال در گردش و شرایط ورودی مسئله افزایش داد. از طرفی با تغییر خواص ترموفیزیکی خود سیال در گردش نیز، می‌توان هدایت حرارتی آن را افزایش داد.

چوی در سال ۱۹۹۵ [۳]، اولین بار موضوع نانو سیال را به عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح کرد. نانو سیالات طبقه جدیدی از سیالات انتقال حرارت است که از طریق معلق سازی نانو ذرات درون سیالات معمولی و متداول انتقال حرارت به دست می‌آیند که به عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند. با پیشرفت مطالعات، کم کم ایده استفاده از نانو سیال در مسایل علمی، ذهن محققان را به خود مشغول نمود. تلاش‌های زیادی به منظور سنجش کارایی این سیالات جدید توسط روش‌های آزمایشگاهی و هم مطالعات عددی، انجام گرفت. اولین کار آزمایشگاهی در زمینه مطالعه انتقال حرارت جابجایی نانو سیال درون یک لوله توسط پاک و چو در سال ۱۹۹۸ انجام شد [۴]. در این تحقیق، از نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم برای بالا بردن ضریب انتقال حرارت استفاده شد. تحقیقات نشان داد که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی ذرات نانو سیال، عدد ناسلت هم افزایش پیدا می‌کند.

دومین کار آزمایشگاهی توسط استمان و همکارش [۵] در سال ۱۹۹۹ روی جریان توربولنت انجام شد. تحقیقات آنها نشان داد، وقتی که از نانو سیال اکسید مس به کار می‌رود، باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه ۱۵ درصد افزایش پیدا کند.

هریس و همکارش [۶] در سال ۲۰۰۶، به صورت آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد، نانو سیال اکسید آلومینیوم، عملکرد بهتری نسبت به نانو سیال اکسید مس دارد و با افزایش کسر حجمی ذرات نانو اکسید آلومینیوم، ضریب انتقال حرارت ۲۲ درصد افزایش پیدا می‌کند.

می‌یابند. با مقایسه نتایج به دست آمده دیده می‌شود که نانو سیالات با سیال پایه اتیلن گلیکول تا ۲۰٪ یا بیشتر بهبود در انتقال حرارت داشته‌اند. در این مطالعه به شبیه‌سازی تبادلگر حرارتی مورد استفاده در دیزل دریایی با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت به همراه UDFهای مربوطه پرداخته شده و اثرات نانو سیال با سیال پایه متفاوت از جمله آب و اتیلن گلیکول و آب شور بر عملکرد تبادلگر مورد نظر بررسی می‌شود. با توجه به کاربردی بودن موضوع و حجم سنگین محاسبات انجام شده، بسیار پرکاربرد در صنعت کشتیرانی است.

## ۲- شبیه سازی

در این مدل سازی، تبادلگر خنک کن روغن مورد شبیه سازی قرار گرفته است. که تبادلگر خنک کن روغن، تبادلگر پوسته لوله‌ای است که نمایی از این تبادلگر به همراه ورودی و خروجی‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. این تبادلگر از ۱۷۲ لوله تشکیل شده است که در یک پوسته قرار گرفته‌اند. ابعاد تبادلگر و تعداد لوله‌ها متناسب با کیس واقعی تبادلگر انتخاب شده است که در صنایع دریایی کاربرد دارد. طول بدنه خارجی تبادلگر، حدود ۸۴ سانتیمتر و عرض آن حدود ۲۰ سانتیمتر است. بدنه خارجی تبادلگر شامل، چهار درگاه ورودی و خروجی است که به ترتیب دو معبر برای ورود به تبادلگر و دو معبر دیگر زمینه خروج سیال گرم و سرد را فراهم می‌کنند که در این مطالعه سیال سرد در قسمت لوله تبادلگر ورود پیدا می‌کند که همانطور که ذکر شد، این قسمت دارای ۱۷۲ لوله به قطر ۱ سانتیمتر است و سیال گرم در پوسته تبادلگر جریان می‌یابد، هندسه پوسته طوری طراحی شده که سیال گرم کلیه لوله‌های تبادلگر را احاطه کرده و تبادل حرارت با تمامی لوله‌ها صورت می‌گیرد. ورودی سیال گرم یا همان قسمت پوسته تبادلگر، دارای قطر هیدرولیکی به اندازه ۴ سانتیمتر است و قطر هیدرولیکی ورودی لوله به اندازه ۳ سانتیمتر است. مدل سازی و تحلیل تبادلگر، توسط نرم افزار انسیس به همراه برنامه نویسی‌های مربوطه صورت گرفت. نرم افزار مفروض مانند دیگر نرم افزارهای تجاری مربوط به حل عددی سیالات، مجموعه معادلات بقا جرم، ممنتوم و انرژی را حل می‌کند که این معادلات عبارتند از [۱۲]:

برای بررسی میزان افزایش انتقال حرارت توسط نانو ذرات دیگر می‌توان به مقاله هوشمند و همکاران [۷] اشاره کرد که به بررسی تجربی انتقال حرارت آب و اکسید تیتانیوم در لوله افقی با نوار پیچیده پرداخته‌اند.

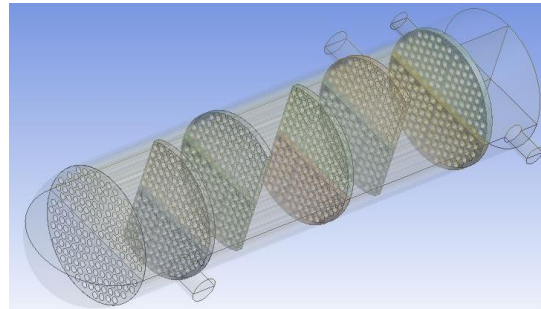
علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، شبیه سازی عددی نیز، در سطح وسیعی استفاده شده است. ژوان و لی [۸] در سال ۲۰۰۰، به بررسی خصوصیات انتقال حرارت نانوسیال آب و روغن به صورت سیال تکفاز پرداخته‌اند. تحقیقات نشان داد که با کاهش اندازه نانو سیال، ضریب انتقال حرارت بهبود داده می‌شود. ویلیام و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۸، رفتار حرارتی زیرکونیوم اکسید را مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی، جریان توربولنت به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته شد. تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از نانو سیال، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. بیاتکو و همکارش [۱۰] در سال ۲۰۱۰، این بار به بررسی انتقال حرارت جابجایی جریان آشفته نانو سیال در یک لوله دایره پرداختند که لوله تحت شرایط مرزی شار ثابت در دیواره قرار داشت. مدل‌های دو فاز و یک فاز به کار گرفته شده و مقایسه ای بین این دو مدل صورت گرفت. نتیجه مقایسه نشان می‌داد که مخصوصاً در اعداد رینولدز بالا، مدل دو فازی و تک فازی چندان تفاوتی با هم نمی‌کنند. همچنین نتایج تحقیقات قبلی درباره افزایش ضریب انتقال حرارت در نانو سیالات نسبت به سیالات معمولی در این رژیم جریانی نیز، مورد تایید قرار گرفت. آنها همچنین نتیجه گرفتند که در جریان آشفته و در کسر حجمی‌های پایین ذرات، فرض تکفازی تطابق بسیاری خوبی با مدل دو فازی مخلوط دارد. البته با زیاد شدن غلظت ذرات، درصد اختلاف نیز افزایش پیدا کرد. ژوان و ژاکوبی [۱۱] در سال ۲۰۱۲، برای بررسی تاثیرات نانو سیال روی مشخصات انتقال حرارت از سوسپانسیون‌های نانو لوله کربنی چند لایه در یک جریان لوله، استفاده کرده‌اند. نانو سیالات با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی ۰، ۵٪، ۱۴٪ و ۲۴٪ تهیه شده و هدایت حرارتی و لزجت این نانو سیالات اندازه گیری شد. نتایج گزارش شده نشان می‌دهند که ضرایب انتقال حرارت نانو سیالات با سیال پایه آب، با افزایش کسر حجمی ذرات، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. ضرایب انتقال حرارت نانو سیالات با سیال پایه اتیلن گلیکول نیز با افزایش کسر حجمی ذرات، کاهش

برای گسسته‌سازی معادلات بکار رفت. همگرایی زمانی حاصل می‌شود که باقیمانده برای معادلات جرم و ممنتوم کمتر از  $10^{-6}$  باشد و در آخر به جهت اینکه هندسه تبادلگر نسبت به صفحه طولی میانی متقارن است، از شرط تقارن در شبیه‌سازی استفاده شد تا هزینه محاسبات به نصف کاهش یابد. مشخصات ترموفیزیکی روغن مورد استفاده در جدول شماره ۱ ارائه شده است. برای این شبیه سازی، از یک شبکه یک میلیون و دویست و هفت سلول مثلثی استفاده شد. این تعداد سلول به کمک مطالعات شبکه که روی شش شبکه، ششصد و ده هزار، هفتصد و پنجاه هزار، نهصد هزار، یک میلیون چهار هزار، یک میلیون دویست و هفت هزار و یک میلیون سیصد و هشتاد هزار انجام شد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از یک میلیون دویست و هفت هزار سلول به بعد حل مستقل از شبکه می‌شود که در این تحقیق با توجه به نتایج بدست آمده به دلیل اقتصادی بودن زمانی، شبکه یک میلیون دویست و هفت هزار مناسبترین گزینه برای انتخاب است. برای صحت گذاری نتایج از مطالعه صورت گرفته توسط فرج الهی و همکاران [۱۳] استفاده شد. در این پژوهش که بصورت آزمایشگاهی صورت گرفته، اثر غلظت نانوسیال روی پارامترهای جریان و انتقال حرارت، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. بخش آزمون یک تبادلگر حرارتی پوسته و لوله است که در آن نانوسیال از طریق ۱۶ لوله با قطر ۶/۱ میلی متر و ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۸۱۵ میلی متر عبور می‌کند و جریان آب داخل پوسته با قطر ۵۵٫۶ میلی‌متر است. گام لوله ۸ میلی متر است. برش بافل‌ها ۲۵ درصد و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۵۰/۸ میلی متر است.

پس از انجام شبیه‌سازی، ضریب انتقال حرارت کلی حاصل شد که در شکل ۳ ضریب انتقال حرارت کلی در دیواره حایل بین دو سیال بر حسب عدد پکلت ( $Pe=Re \cdot Pr$ ) نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد، نرم افزار از دقت بالایی برخوردار است و بیشترین خطا در پکله ۴۱۰۰ به میزان ۷ درصد است.

جدول ۱- مشخصات ترموفیزیکی روغن

$\rho$	$C_p$	$k$	$\mu$
( $kg / m^3$ )	( $J / kg.K$ )	( $W / m.K$ )	( $kg / m.s$ )
۸۶۳	۴۱۷۹	۰٫۱۶۱۳۵	۰٫۰۰۱۲۱۳



شکل ۱- شماتیکی از تبادلگر حرارتی شبیه سازی شده

معادله پیوستگی

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

معادله مومنتوم

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho C_p u'_j T' \right) \quad (3)$$

برای دیواره‌های کانال‌ها فرض عدم لغزش و پیوستگی دمایی به شکل رابطه (۴) اعمال گردید.

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \quad (4)$$

که  $k_f$  و  $k_s$  بیانگر ضریب انتقال حرارت هدایت سیال و جامد هستند.

در شبیه سازی عددی از شرط مرزی ورودی سرعت برای ورودی جریان‌های سرد و گرم استفاده شد. در این شبیه سازی، آب از درون لوله با دمای ۳۰۰ درجه کلوین جریان می‌یابد. از داخل پوسته، روغن خروجی از موتور با دبی ۱/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه در راستای عمود بر لوله‌ها با دمای ۳۴۰ درجه کلوین عبور می‌کند. خروجی تبادلگر نیز، شرط مرزی خروجی فشار را با فشار مرجع شامل می‌شود. در دیواره‌های پوسته و لوله‌های تبادلگر نیز، از شرط عدم لغزش و عدم پرش دمایی استفاده شد. از روش دو معادله‌ای K&E مطابق معادلات ۶ و ۷ استفاده شد [۱۳]. الگوریتم سیمپل برای حل معادلات کوپل سرعت و فشار و روش بالا دست مرتبه دوم

### ۳- بررسی نتایج شبیه سازی

در این بخش به ارائه نتایج استخراج شده و مقایسه آنها با هم پرداخته می‌شود. ابتدا به بررسی تبادلگر حرارتی با نانوسیال آب پرداخته می‌شود. از آنجا که مهمترین هدف این تحقیق، دستیابی به شرایطی بهینه و یا نزدیک به بهینه برای عملکرد تبادلگر حرارتی خنک کاری موتور دیزل زیر دریایی است، راندمان‌های حرارتی و هیدرودینامیکی سیستم بصورت همزمان مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد که این مهم بوسیله مقایسه و بررسی سیال‌های عامل خنک کار متفاوت از جمله نانو سیال بر پایه آب، نانو سیال بر پایه اتیل گلیکول و آب دریا، مورد پژوهش و مقایسه قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- نانو سیال بر پایه آب

برای انتخاب نانو ذره، انتخاب بر اساس مطالعات محققان و مراجع قبلی صورت پذیرفت. پس از بررسی‌های مختلفی که روی نانو سیال‌ها انجام شد، نانو ذره  $Al_2O_3$  به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارتی مناسب، برای انجام مطالعات روی تبادلگر خنک کن روغن موتور دیزل انتخاب شد. جدول شماره ۱، مشخصات ترموفیزیکی روغن را بیان می‌کند. آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه در نانو سیال، در نظر گرفته شد. محاسبات برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۴۸۰۰۰ و برای کسر حجمی‌های متفاوت ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ و ۰/۰۴ و ۰/۰۵ انجام گرفته است که در جدول ۲، مشخصات سیال آب و نانوسیال با کسر حجمی مختلف نشان داده شده است که این مشخصات با توجه به روابط ۱۰ تا ۱۵ استخراج شده اند [۱۵]، [۱۶]؛ همچنین نانو ذرات بصورت کروی و از جنس اکسید آلومینیم و با قطر ۳۸ نانومتر در نظر گرفته شد.

چگالی نانوسیال

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (10)$$

ظرفیت حرارتی ویژه

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (11)$$

ضریب پخش حرارتی

$$\alpha_{nf} = \lambda_{nf}' / (\rho C_p)_{nf} \quad (12)$$

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال [۱۷]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = 1 + 4.4 Re_p^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f}\right)^{0.03} \phi^{0.66} \quad (13)$$

انرژی جنبشی توربولانس

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (5)$$

نرخ اضمحلال انرژی جنبشی

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

ثابت‌های بکار رفته در معادلات [۱۴]

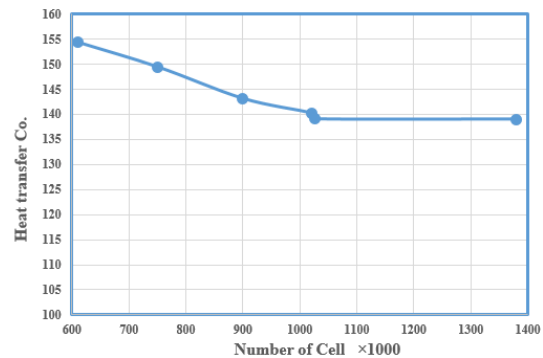
$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (7)$$

ترم‌های نوسانی معادلات [۱۴]

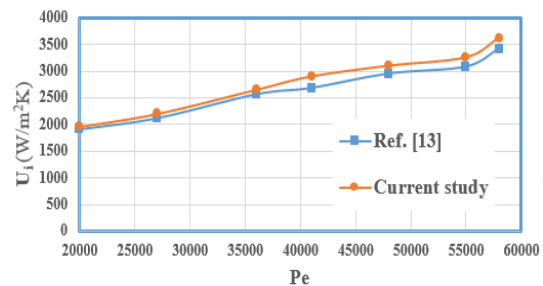
$$-\rho u_i' u_j' = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \tilde{k} \quad (8)$$

شار حرارتی مغشوش [۱۴]

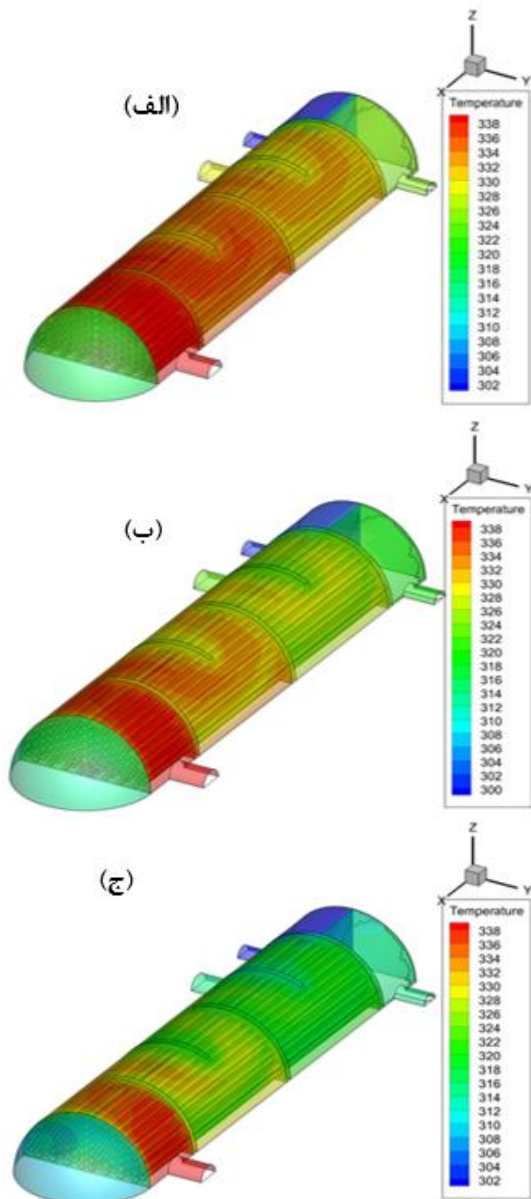
$$-\rho C_p u_j' T' = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j}, Pr_t = 0.85 \quad (9)$$



شکل ۲- ضریب انتقال حرارت برای شبکه بندی‌های مختلف



شکل ۳- صحنه‌گذاری ضریب انتقال حرارت جابجایی با نتایج تجربی ( $\phi = 0.02$ )



شکل ۴- توزیع دما برای روغن همراه با نانو سیال با پایه آب در غلظت ۵ درصد: (الف)  $Re=12000$  و (ب)  $Re=24000$  و (ج)  $Re=48000$

از پارامترهای مهم در مسایل انتقال حرارت، بررسی عدد بی بعد نوسلت است. عدد نوسلت، با ضریب انتقال حرارت (h) رابطه مستقیم و با ضریب هدایت حرارتی (K) سیال، رابطه عکس دارد. در نانو سیالها، هر دو این پارامتر افزایش می‌یابند و باعث افزایش انتقال حرارت می‌شوند. پس برآیند

ویسکوزیته نانو سیال [۱۷]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3} \phi^{1.03})^{-1} \quad (14)$$

عدد رینولدز نانوذرات و قطر مولکول سیال پایه [۱۷]

$$Re_p = \frac{2\rho_f k_b T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad , \quad d_f = 0.1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{1/3} \quad (15)$$

درصد افزایش نسبی نوسلت

Percentage increase of Nu

$$= \frac{|Nu_{nanofluid} - Nu_{pure fluid}|}{Nu_{pure fluid}}$$

$$\times 100$$

(۱۶)

ضریب عملکرد نانو سیال

Performance factor

$$= \frac{|Nu_{nanofluid}/Nu_{pure fluid}|}{\Delta P_{nanofluid}/\Delta P_{pure fluid}}$$

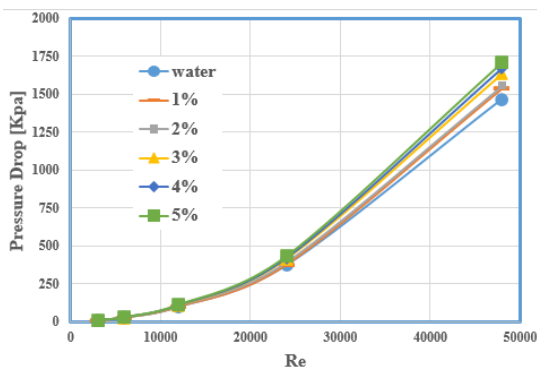
(۱۷)

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی نانو سیال آب در غلظت‌های مختلف در دمای ۲۷ درجه سانتیگراد

$\phi$	$\rho$ ( $kg / m^3$ )	$C_p$ ( $J / kg.K$ )	$k$ ( $W / m.K$ )	$\mu$ ( $kg / m.s$ )
۰/۰	۹۹۲/۳	۴۱۷۹	۰/۶۲۸۶	۰/۰۰۰۶۵۳۱
۰/۰۱	۱۰۲۲	۴۰۴۷	۰/۶۵۲۸	۰/۰۰۰۶۶۹
۰/۰۲	۱۰۵۱	۳۹۲۴	۰/۶۷۷۵	۰/۰۰۰۶۸۵
۰/۰۳	۱۰۸۱	۳۸۰۵	۰/۷۰۳۳	۰/۰۰۰۷۰۲
۰/۰۴	۱۱۱۱	۳۶۹۱	۰/۷۲۹۵	۰/۰۰۰۸۱۷
۰/۰۵	۱۱۴۸	۳۵۸۹	۰/۷۵۸۹	۰/۰۰۰۹۰۲

شکل ۴ بیان کننده کانتورهای دما در روغن خنک شونده و نانو سیال بر پایه آب با غلظت ۵ درصد است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش رینولدز، دمای روغن کاهش پیدا می‌کند. این شکل نحوه توزیع دمای روغن در پوسته را نمایش می‌دهد و دیده می‌شود که با افزایش رینولدز، دمای دیواره حائل به یک مقدار تقریباً ثابت میل خواهد کرد.

افزایش افت فشار بر حسب عدد رینولدز و کسر حجمی‌های مختلف رسم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانو سیال افت فشار نسبت به سیال پایه افزایش پیدا می‌کند. در عدد رینولدز ۳۰۰۰ در غلظت ۵ درصد، ۱/۲ واحد نسبت به سیال پایه افت فشار افزایش می‌یابد که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار افزایش پیدا می‌کند که در عدد رینولدز ۴۸۰۰۰ هزار در غلظت ۵ درصد افت فشار به اندازه ۲۴۰ واحد افزایش یافته است.

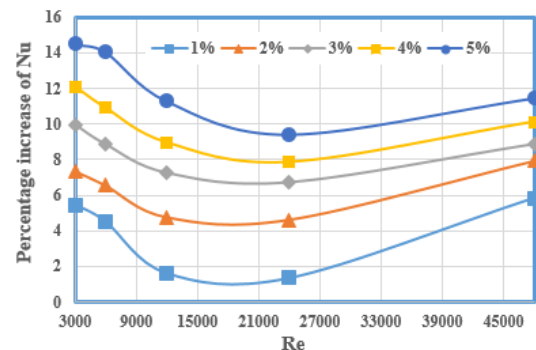


شکل ۶- افت فشار در غلظت‌های مختلف، برای نانوسیال بر پایه آب

اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه از یک طرف، موجب اثر مثبت افزایش انتقال حرارت و از طرف دیگر، موجب اثر منفی افزایش افت اصطکاکی در تبادلگر می‌شود؛ بنابراین باید به دنبال پارامتری برای بررسی همزمان این دو اثر باشیم که طبق رابطه شماره ۱۷ به ضریب عملکرد می‌پردازیم. ضریب عملکرد در واقع نسبت میزان افزایش انتقال حرارت به میزان افزایش افت فشار در نانوسیال است. شکل ۷ بیانگر، ضریب عملکرد نانوسیال بر پایه آب بر حسب عدد رینولدز در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش درصد حجمی نانوذرات، ضریب عملکرد کاهش پیدا می‌کند و در درصدهای حجمی مختلف در رینولدز حدود ۲۰۰۰۰ بالاترین ضریب عملکرد را داریم؛ همچنین در کسر حجمی‌های پایین، تغییرات ضریب عملکرد با رینولدز چشمگیرتر است.

تغییرات این دو عامل، تعیین کننده تغییرات عدد نوسلت خواهد بود. در شکل ۵ درصد افزایش عدد نوسلت نسبی بر حسب رینولدز در کسر حجمی‌های مختلف نانو ذرات نشان داده شده است.

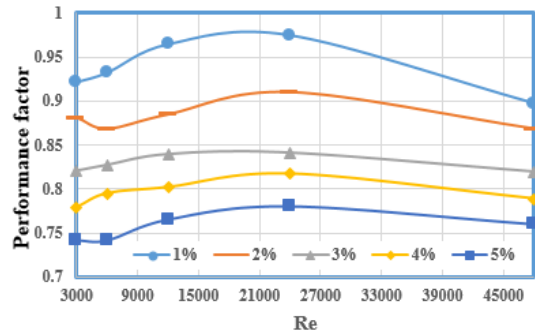
همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانو سیال در راستای افزایش عدد رینولدز، درصد نوسلت نسبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. بطور مثال نانو سیال در رینولدز ۴۸۰۰۰ با غلظت ۵ درصد، حدود ۶ واحد نسبت به سیال پایه افزایش نوسلت نسبی می‌یابد. از آنجا که عدد نوسلت، تابعی از هندسه، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب هدایت حرارتی است. با افزایش کسر حجمی نانو ذرات هر دو پارامتر ضریب هدایت (k) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه باعث چنین روندی در نوسلت نسبی نانوسیال می‌شود. نکته قابل توجه از شکل ۵ این است که میزان افزایش انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی در رینولدزهای پایین چشمگیرتر است.



شکل ۵- درصد تغییرات عدد نوسلت نسبی در کسر حجمی مختلف نانوذرات بر حسب رینولدز برای سیال پایه آب

اما افزایش خواص انتقال حرارتی در نانوسیال، هزینه‌هایی هم در پی دارد. در حقیقت با بالا رفتن لزجت مخلوط به دلیل وجود نانو ذرات فلزی، تنش برشی افزایش یافته و این مهم موجب افزایش تلفات هیدرودینامیکی جریان می‌شود و یا به عبارت دیگر، موجب افزایش افت فشار سیستم می‌شود و بدیهی است که افت فشار بیشتر، به معنای افزایش توان مصرفی پمپ خواهد بود. در شکل ۶ میزان

است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش رینولدز، دمای روغن کاهش پیدا می‌کند. این شکل نحوه توزیع دمای روغن در پوسته را نمایش می‌دهد و دیده می‌شود که با افزایش رینولدز، دمای دیواره حائل به یک مقدار تقریباً ثابت میل خواهد کرد. از این شکل مشاهده می‌شود که عملیات خنک کاری روغن با نانوسیال بر پایه اتیلن گلیکول، بهتر از نانوسیال بر پایه آب است.



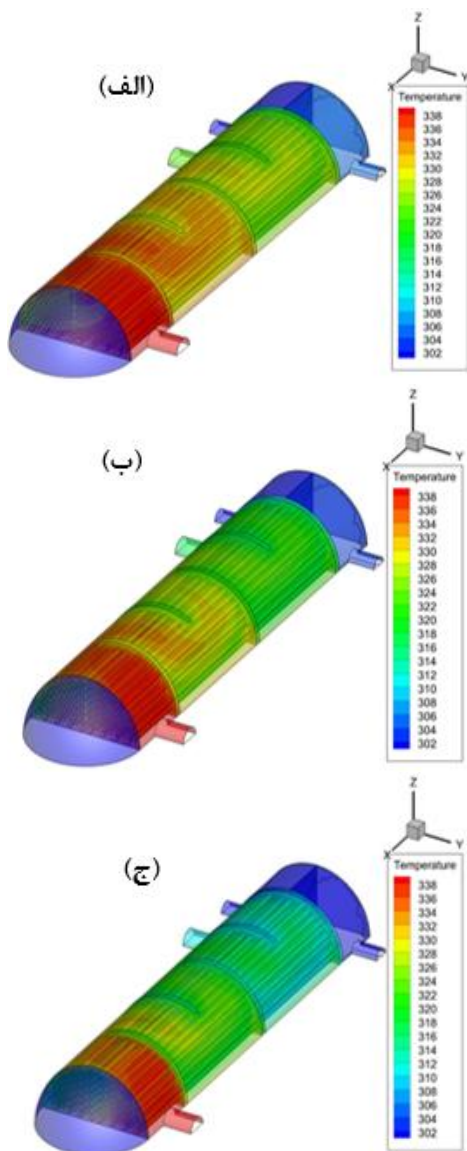
شکل ۷- بررسی ضریب عملکرد نانوسیال با سیال پایه آب

### ۳-۲- استفاده از نانو سیال بر پایه اتیلن گلیکول

در ادامه مطالعه، از اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه در این تحقیق استفاده می‌شود که از نانو ذره  $Al_2O_3$  با کسر حجمی  $0.1$  و  $0.2$  و  $0.3$  و  $0.4$  و  $0.5$  برای اعداد رینولدز  $3000$  تا  $48000$  مورد مطالعه قرار گرفته است که در جدول ۳، مشخصات سیال پایه اتیلن گلیکول و همچنین نانوسیال با کسر حجمی مختلف نشان داده شده است. همانند نانو سیال بر پایه آب که مورد بررسی قرار گرفت، در اینجا هم از نانو ذرات کروی شکل و برای استخراج خواص ترموفیزیکی در کسرهای مختلف از روابط اشاره شده قبلی استفاده شد.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی نانوسیال اتیلن گلیکول در غلظت‌های مختلف در دمای  $27$  درجه سانتیگراد

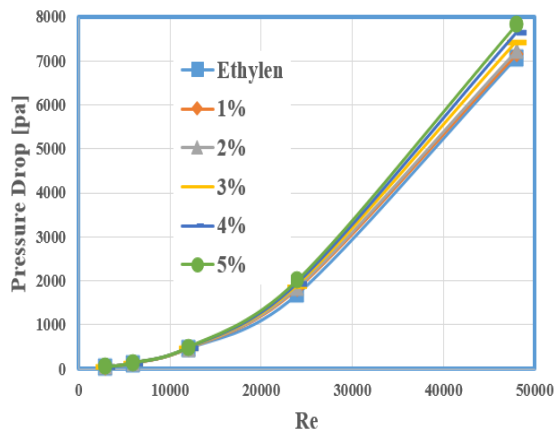
$\phi$	$\rho$ ( $kg / m^3$ )	$C_p$ ( $J / kg .K$ )	$k$ ( $W / m .K$ )	$\mu$ ( $kg / m .s$ )
0.0	1100	2460	0.255	0.107
0.1	1129	2400	0.265	0.109
0.2	1157	2344	0.275	0.1123
0.3	1186	2284	0.286	0.115
0.4	1215	2238	0.297	0.1177
0.5	1240	2198	0.308	0.120



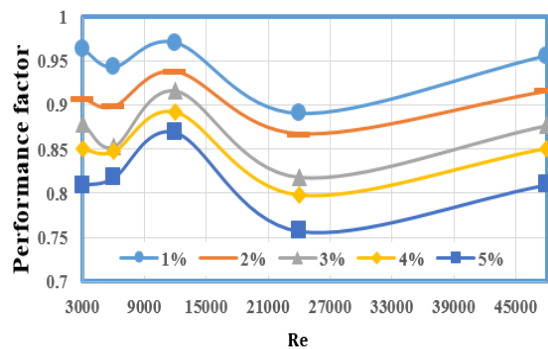
شکل ۸- توزیع دما برای روغن همراه با نانوسیال با پایه اتیلن گلیکول در غلظت ۵ درصد: (الف)  $Re=12000$  و (ب)  $Re=24000$  و (ج)  $Re=48000$

شکل ۸ بیان کننده کانتورهای دما در روغن خنک شونده و نانوسیال بر پایه اتیلن گلیکول با غلظت ۵ درصد





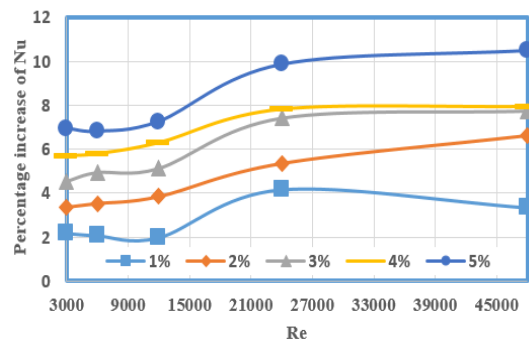
شکل ۱۰- افت فشار در غلظت‌های مختلف، برای نانوسیال بر پایه اتیلن گلیکول



شکل ۱۱ - بررسی ضریب عملکرد نانوسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول

با توجه به اینکه در کاربردهای عملی معمولاً از کسر حجمی  $(\phi = 0.02)$  درصد استفاده می‌شود (برای جلوگیری از رسوب و ته نشینی در داخل لوله‌ها) لذا به مقایسه دو نانوسیال بر پایه آب و بر پایه اتیلن گلیکول با درصد حجمی  $(\phi = 0.02)$  می‌پردازیم. این مقایسه در نمودار شکل ۱۲ که بیانگر میزان افزایش نوسلت نسبی و شکل ۱۳ که بیانگر میزان افت فشار و شکل ۱۴ که بیانگر ضریب عملکرد تبادلگر می‌باشد، انجام شده است. از مقایسه دو نانوسیال با یکدیگر متوجه می‌شویم که بسته به محدوده رینولدز کاری مورد نظر می‌توان آب یا اتیلن گلیکول را به عنوان سیال پایه انتخاب نمود. مثلاً در محدوده رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ آب عملکرد بهتری دارد، ولی نوسلت نسبی پایین‌تری دارد و در محدوده ۰ تا ۱۸۰۰۰ اتیلن گلیکول عملکرد بهتری دارد،

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانو سیال در راستای افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت نسبی افزایش پیدا می‌کند؛ بطور مثال نانو سیال در رینولدز ۴۸۰۰۰ با غلظت ۵ درصد، حدود ۷ واحد افزایش عدد نوسلت نسبی نسبت به سیال پایه دارد، در صورتی که این مقدار برای نانوسیال بر پایه آب برابر ۶ واحد بود.



شکل ۹- درصد افزایش عدد نوسلت نسبی در کسر حجمی مختلف نانوذرات بر حسب رینولدز برای سیال پایه اتیلن گلیکول

با بالا رفتن لزجت سیال، تنش برشی در دیواره افزایش یافته و به دنبال آن افت فشاری بیشتری به سیستم تحمیل می‌شود، این افت فشار بیشتر به معنای افزایش توان مصرفی پمپ خواهد بود. در شکل ۱۰ افت فشار درون لوله حاوی نانوسیال نشان داده شده است. بطور مثال در عدد رینولدز ۳۰۰۰ در غلظت ۵ درصد،  $5/34$  واحد نسبت به سیال پایه افت فشار افزایش می‌یابد که با افزایش عدد رینولدز افت فشار افزایش پیدا می‌کند که در عدد رینولدز ۴۸۰۰۰ هزار در غلظت ۵ درصد افت فشار به اندازه ۷۴۷ واحد افزایش یافته است که در مقایسه با نانوسیال بر پایه آب، افت فشارهای بسیار بزرگتری بوجود آمده است. شکل شماره ۱۱ بیانگر ضریب عملکرد نانوسیال بر پایه اتیلن گلیکول بر حسب عدد رینولدز در کسر حجمی‌های مختلف نانو ذرات است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش درصد حجمی نانوذرات ضریب عملکرد کاهش پیدا می‌کند و در درصدهای حجمی مختلف در رینولدز حدود ۱۲۰۰۰ بالاترین ضریب عملکرد را داریم؛ همچنین در کسر حجمی-های بالا، تغییرات ضریب عملکرد با رینولدز چشمگیرتر است.

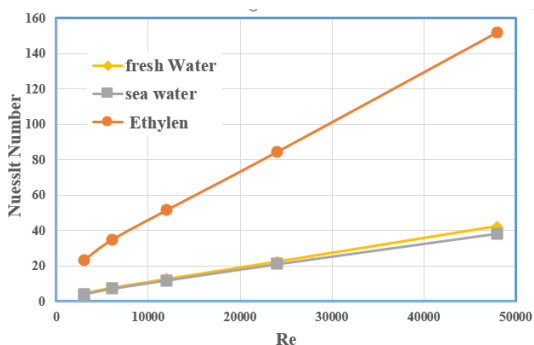
### ۳-۳- مطالعه سیال خنک کار آب دریا، آب شیرین و اتیلن گلیکول

در ادامه مطالعه سه سیال آب شیرین، اتیلن گلیکول و آب دریا، به عنوان سیال خنک کن در تبادلگر خنک کن روغن، مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴ مشخصات ترموفیزیکی سیال آب دریا نشان داده شده است. با توجه به اینکه این تبادلگر حرارتی مربوط به موتور زیر دریایی است لذا حائز اهمیت می‌باشد که به بررسی سیال خنک کننده آب دریا نیز پرداخته شود. اگرچه آب دریا خورنده است، ولی با تمهیداتی که روی پوشش درون لوله‌ها (آبکاری نیکل- کروم) انجام می‌شود، می‌توان از آب دریا به عنوان سیال خنک کننده استفاده کرد.

جدول ۴- خواص ترموفیزیکی آب دریا در دمای ۲۷ درجه سانتی گراد

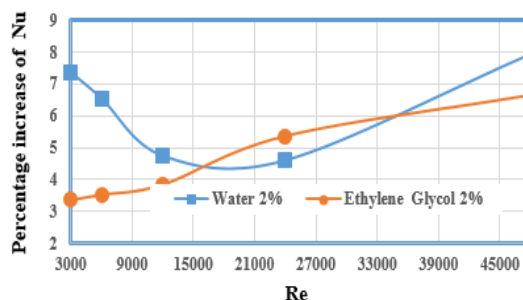
$\phi$	$\rho$ ( $kg / m^3$ )	$C_p$ ( $J / kg.K$ )	$k$ ( $W / m.K$ )	$\mu$ ( $kg / m.s$ )
۰/۰	۹۹۵	۴۱۷۹	۰/۶۱۳۵	۰/۰۰۱۲۱۳

در شکل ۱۵ انتقال حرارت سیال‌های اتیلن گلیکول، آب شیرین و آب دریا مورد مقایسه قرار داده شده است. انتقال حرارت در آب شیرین با آب شور در رینولدزهای پایین با هم اختلاف کمی دارد، ولی با افزایش عدد رینولدز مقدار اختلاف انتقال حرارت آب شیرین با آب دریا افزایش پیدا می‌کند.

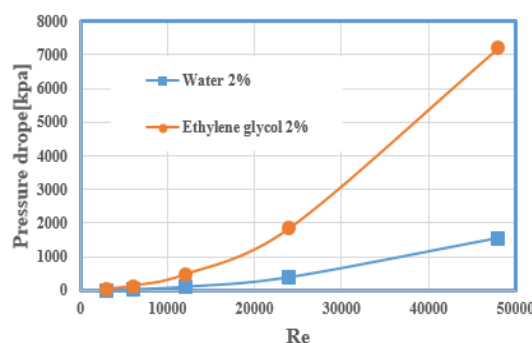


شکل ۱۵- انتقال حرارت با سیال آب شیرین، آب شور و اتیلن گلیکول

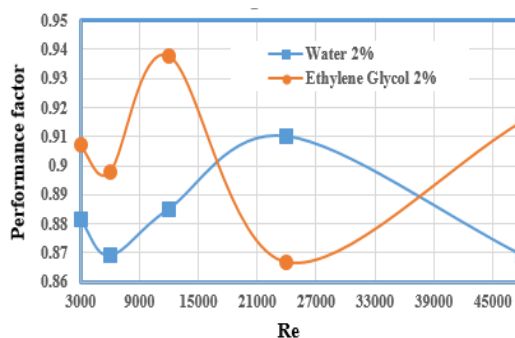
ولی نوسلت نسبی کمتری نسبت به آب دارد؛ بنابراین با توجه به اولویت که عملکرد بهتر یا تبادل حرارت بالاتر است، می‌توان برای سیال پایه تصمیم‌گیری نمود و یکی را انتخاب کرد.



شکل ۱۲- مقایسه میزان افزایش نوسلت نسبی برای نانو سیال آب و نانو سیال اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۲ درصد



شکل ۱۳- مقایسه افت فشار برای نانو سیال آب و نانو سیال اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۲ درصد



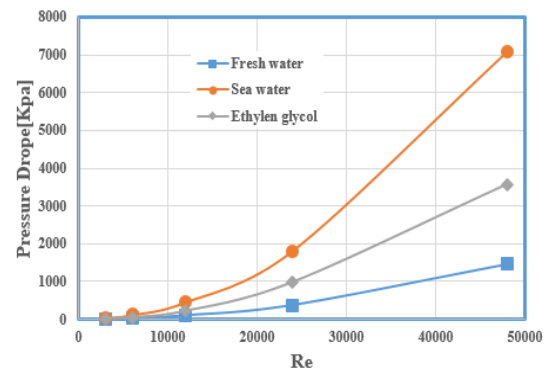
شکل ۱۴- مقایسه ضریب عملکرد برای نانو سیال آب و نانو سیال اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۲ درصد

تکفاز بودن نانو سیال، از جمله فرضیات بکار گرفته شده بود. تبادلگر مورد مطالعه در موتور زیر دریایی، به عنوان خنک کن روغن موتور بکار می‌رود. نتایج حاکی از آن بود که بهبود عملکرد حرارتی تبادلگر به کمک نانو سیال‌ها، موجب افزایش افت فشار سیستم می‌شود؛ همچنین مشاهده شد، با بالا رفتن عدد رینولدز، دمای دیواره حایل بین سیال گرم و سرد به یک میزان کمینه‌ای کاهش می‌یابد. اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه از یک طرف، موجب اثر مثبت افزایش انتقال حرارت و از طرف دیگر، موجب اثر منفی افزایش افت اصطکاکی در تبادلگر می‌شود. بنابراین باید به دنبال پارامتری برای بررسی همزمان این دو اثر باشیم که طبق رابطه شماره ۱۷ به ضریب عملکرد پرداخته شد. ضریب عملکرد در واقع نسبت میزان افزایش انتقال حرارت به میزان افزایش افت فشار در نانوسیال است. به طور کلی با افزایش درصد حجمی نانوذرات، ضریب عملکرد کاهش پیدا می‌کند و در درصدهای حجمی مختلف در رینولدز حدود ۲۰۰۰۰ بالاترین ضریب عملکرد را برای آب داریم. همچنین در کسر حجمی‌های پایین تغییرات ضریب عملکرد با رینولدز چشمگیرتر می‌باشد. همچنین بررسی رفتار نانو سیال بر پایه اتیلن گلیکول صورت گرفت. از مقایسه دو نانوسیال با یکدیگر نتیجه گرفته شد که بسته به محدوده رینولدز کاری مورد نظر می‌توان آب یا اتیلن گلیکول را به عنوان سیال پایه انتخاب نمود. مثلاً در محدوده رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ آب عملکرد بهتری دارد، ولی نوسلت نسبی پایین تری دارد و در محدوده ۰ تا ۱۸۰۰۰ اتیلن گلیکول عملکرد بهتری دارد، ولی نوسلت نسبی کمتری نسبت به آب دارد؛ بنابراین با توجه به اولویت که عملکرد بهتر یا تبادل حرارت بالاتر است، می‌توان برای سیال پایه تصمیم‌گیری نمود و یکی را انتخاب کرد.

با توجه به اینکه این تبادلگر حرارتی مربوط به موتور زیر دریایی است، لذا حائز اهمیت است که به بررسی سیال خنک کننده آب دریا نیز پرداخته شود. انتقال حرارت در آب شیرین با آب شور در رینولدزهای پایین با هم اختلاف کمی دارد، ولی با افزایش عدد رینولدز مقدار اختلاف انتقال حرارت آب شیرین با آب دریا افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین میزان افت فشار آب دریا از آب شیرین بیشتر و از اتیلن گلیکول کمتر است.

نتایج نشان می‌دهد که انتقال حرارت اتیلن گلیکول و آب با هم اختلاف خیلی زیادی دارند. همانطور که قبلاً بیان شد، عدد نوسلت به ضریب هدایتی و ضریب جابجایی و هندسه بستگی دارد. در رینولدز پایین اختلاف بین آب شیرین و اتیلن گلیکول کمتر بوده و با افزایش عدد رینولدز، اختلاف بین آب شیرین و اتیلن گلیکول بیشتر شده است. در عدد رینولدز ۳۰۰۰ عدد نوسلت اتیلن گلیکول ۵/۵ برابر عدد نوسلت آب شیرین افزایش پیدا می‌کند. وقتی که عدد رینولدز افزایش پیدا می‌کند، در عدد رینولدز ۴۸ هزار عدد نوسلت اتیلن گلیکول ۳/۵ برابر عدد نوسلت آب است.

در شکل ۱۶ افت فشار درون لوله حاوی آب شیرین، آب شور و اتیلن گلیکول نشان داده شده است. قابل مشاهده است، موادی که عملکرد حرارتی بهتری دارند، موجب افت فشار بیشتری نیز می‌شوند که این افت فشار بیشتر به معنای توان مصرفی بیشتر پمپ خواهد بود.



شکل ۱۶- افت فشار با سیال آب شیرین، آب شور و اتیلن گلیکول

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی ثمر بخشی استفاده از نانو سیال در تبادلگرهای حرارتی، دو سیال متفاوت با درصد حجمی‌های متفاوتی از مواد نانو در بازه رینولدزی ۳ تا ۴۸ هزار، مورد بررسی قرار گرفت.

از آنجایی که در تبادلگرهای حرارتی پوسته و لوله شرط مرزی حاکم در سطح تبادل حرارت، متفاوت از شرط‌های مرزی مرسوم و معروف دما ثابت یا شار ثابت در دیواره است، به حل همزمان جریان گرم و سرد درون تبادلگر پرداخته شد.

- configurations. Brazilian J Chem Eng 19(4): 433-439.
- [3] Chol SUS (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME-Publications-Fed 231: 99-106.
- [4] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Exp Heat Transf An Int J 11(2): 151-170.
- [5] Eastman JA (1999) Novel thermal properties of nanostructured materials. Argonne National Lab, IL (US).
- [6] Heris SZ, Etemad SG, Esfahany MN (2006) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. Int Commun Heat Mass Transf 33(4): 529-535.
- [۷] هوشمند ا، صداقت ا، سلیم پور م، زرگوشی ع، محسنی ع (۱۳۹۴) بررسی تجربی انتقال حرارت جریان نانو سیال آب/اکسید تیتانیوم در لوله افقی با نوار پیچیده تحت شرایط دمای ثابت دیواره. مجله علمی- پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۶۵-۱۷۲ (۳): ۵.
- [8] Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids. Int J Heat Fluid Flow 21(1): 58-64.
- [9] Williams W, Buongiorno J, Hu LW (2008) Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes. J Heat Transfer 130(4): 42412.
- [10] Bianco V, Manca O, Nardini S (2011) Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube. Int J Therm Sci 50(3): 341-349.
- [11] Ruan B, Jacobi AM (2012) Heat transfer characteristics of multiwall carbon nanotube suspensions (MWCNT nanofluids) in intertube falling-film flow. Int J Heat Mass Transf 55(11): 3186-3195.
- [12] Ghiaasiaan SM (2011) Convective heat and mass transfer. Cambridge University Press.
- [13] Jones WP, Launder B (1972) The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. Int J Heat Mass Transf 15(2): 301-314.
- [14] Launder BE, Sharma BI (1974) Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. Lett Heat Mass Transf 1(2): 131-137.
- [15] Kim J, Kang YT, Choi CK (2004) Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids. Phys Fluids 16(7): 2395-2401.
- ۵- نمادها
- $C_p$  گرمای ویژه ( $J / kgK$ )
- $C_{\mu}, C_e$  ثابت های تجربی در مدل  $k - \varepsilon$
- $g$  شتاب گرانش ( $m / s^2$ )
- $i, j$  اندیس دستگاه مختصات
- $\varepsilon$  اضمحلال ویسکوز ( $m^2 / s^3$ )
- $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W / m^2K$ )
- $k$  انرژی جنبشی توربولانس ( $m^2 / s^2$ )
- $p$  فشار نسبی ( $pa$ )
- $T$  دمای سیال ( $K$ )
- $u$  سرعت ( $m / s$ )
- $x, y$  سیستم مختصات ( $m$ )
- نمادهای یونانی
- $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی ( $W / mK$ )
- $\mu$  ویسکوزیته آرام ( $kg / ms$ )
- $\mu_t$  ویسکوزیته مغشوش ( $kg / ms$ )
- $\rho$  چگالی ( $kg / m^3$ )
- $\sigma_k$  عدد پرانتل برای  $k$
- $\sigma_e$  عدد پرانتل برای  $e$
- ۶- مراجع
- [۱] سوادکوهی ل | (۱۳۸۸) بررسی تأثیر تغییر رفتار سامانه خنک کاری موتور LA ۴۵۷ بر عملکرد آن. فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات موتور ۱۶-۲۱: ۱۶.
- [2] Pinto JM, Gut JAW (2002) A screening method for the optimal selection of plate heat exchanger

[17] Corcione M (2011) Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Convers Manag* 52(1): 789-793.

[16] Raisi A (2017) Heat transfer in an enclosure filled with a nanofluid and containing a heat-generating conductive body. *Appl Therm Eng* 110: 469-480.