



ارزیابی عملکرد مبدل حرارتی لوله مارپیچ و لوله مستقیم با استفاده از نانو سیال هیبریدی

احمدرضا رحمتی^{۱*}، فرزاد چیت‌سازی^۲ و مهدی رئیس‌زاده^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، شهرضا، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

در این پژوهش مقایسه انتقال حرارت مبدل حرارتی لوله مارپیچ و لوله مستقیم با استفاده از نانو سیال هیبریدی در جریان مغشوش به صورت تجربی پرداخته شده است. نانو سیال مورد استفاده در این پژوهش متشکل از مخلوط نانو ذره اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم با قطر متوسط (۲۰-۳۰ نانومتر) در سیال پایه آب در محدوده دمایی بین ۶۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نانو ذرات در محدوده کسرهای حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داد که عدد ناسلت، با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم به طور متوسط ۶/۶٪ درصد افزایش پیدا کرد؛ همچنین نتایج که به صورت اختلاف دما گزارش شده است، استفاده از نانو ذرات مذکور در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم در کسر حجمی ۰/۲۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد ۳۷/۶٪ افزایش دارد. درصد افزایش اختلاف دمای بهینه نانوسیال هیبریدی در لوله مارپیچ در کسر حجمی ۰/۲۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد است که نسبت به سیال پایه افزایش ۱۰ درصدی و در لوله مستقیم در کسر حجمی ۰/۷۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه، باعث افزایش ۶ درصدی اختلاف دما می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوسیال هیبریدی؛ مبدل حرارتی؛ لوله مارپیچ؛ لوله مستقیم؛ انتقال حرارت.

Evaluation of Performance of both Spiral and Direct Tube Heat Exchanger Using the Hybrid Nano fluid

A. R. Rahmati^{1,*}, F. Chitsazi², M. Reiszadeh³

¹ Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

² M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

³ Assist. Prof., Faculty of Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

Abstract

In this study, the comparison of the heat transfer of heat exchanger of the spiral tube and the direct pipe using the hybrid nanofluid in the turbulent flow has been empirically investigated. The nano fluid used in this study consists of a mixture of titanium oxide, silicon oxide and magnesium oxide with a medium diameter (20-30 nm) in a base water fluid at a temperature range of 60 to 30 ° C. Nanoparticles have been used in the volume fractions range of 0.25, 0.5, 0.75 and 1%. The results showed that the Nusselt number increased by increasing the Reynolds number and the concentration in the spiral tube compared to the direct tube by 6.6% on average. Also, the results are reported as temperature difference, the use of nanoparticles in the spiral tube is higher than the direct tube in the volume fraction of 0.25% and the temperature of 60 ° C, 37.6%. The percentage increase in the optimal temperature difference of the hybrid nano fluid in the spiral tube in the volume fraction is 0.25% and 60 ° C, which is 10% higher than the base fluid and in the direct tube in the volume fraction of 0.75% and 60 ° C Compared to the base fluid, the temperature difference is increased by 6%.

Keywords: Hybrid Nano Fluid; Heat Exchanger; Spiral Tube; Direct Tube; Heat Transfer.

۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی وسایلی هستند که جریانی از انرژی حرارتی را بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف برقرار می‌کنند و وظیفه تبادل حرارت را به عهده دارند. این تجهیزات در صنایع تولید برق، صنایع فرایندی، صنایع شیمیایی و غذایی، تجهیزات الکترونیکی، صنایع تولیدی، تهویه مطبوع، سرمایش و کاربردهای فضایی استفاده می‌شوند [۱]. بهینه سازی تجهیزات انتقال حرارت جهت رسیدن به راندمان بالاتر انرژی نیازمند تمرکز بر کوچک سازی تجهیزات از یک سو و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح از سوی دیگر است. سیالاتی نظیر آب، روغن های معدنی و اتیلن گلیکول کاربرد زیادی در انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی مانند، فرآیندهای تولید نیرو، فرآیندهای شیمیایی، فرآیندهای سرمایش و گرمایش و میکرو الکترونیک بر عهده دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر، سیالات مذکور اولین مانع جدی در فشرده سازی و کارآمد کردن مبدل‌های حرارتی است؛ لیکن با مطرح شدن استفاده از نانو سیالات در انتقال انرژی، بحث تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی در این نوع سیالات به وجود آمده است. به سیالات متداول حامل انرژی که حاوی ذرات جامد در اندازه های نانو متری باشند، نانو سیال اطلاق می‌شود. افزودن مقداری نانو ذره علاوه بر تاثیری که روی ضریب هدایت حرارتی سیال پایه دارد فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. استفاده از نانو سیال به عنوان سیال جدیدی در بحث انتقال حرارت توسط چوی [۲] در سال ۱۹۹۵ در آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا مطرح گردید و او این سوسپانسیون را نانو سیال نامید.

کرونل و سندپ [۳] در سال ۲۰۰۸، به بررسی ضریب انتقال حرارت در دو مبدل حرارتی لوله ماریچ و مستقیم تحت شرایط جریان آشفته پرداختند. آزمایشات آن‌ها در مبدل‌های حرارتی لوله ماریچ با دو نسبت انحنای مختلف و در مبدل حرارتی لوله مستقیم در نرخ جریان مختلف و برای دماهای مختلف انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار انتقال حرارت کلی در مبدل حرارتی ماریچ بسیار بیشتر از لوله مستقیم است. جایا کومار و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۰، پژوهشی عددی برای تعیین شاخص‌های حرارتی جریان درهم آب درون کوئل‌های حرارتی ماریچ انجام دادند. آن‌ها

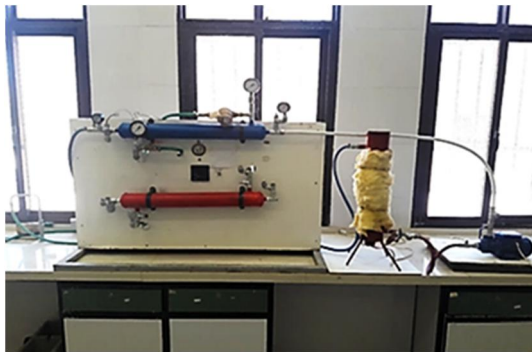
با تغییر مشخصه‌های هندسی کوئل و لوله، مانند قطر لوله، قطر و گام کوئل، تغییرات عدد ناسلت را در طول و محیط دیواره لوله نشان دادند. زی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰، به بررسی ضریب انتقال حرارت، جابجایی جریان آرام چهار نانوسیال شامل نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید منیزیم در سیال پایه آب - اتیلن گلیکول پرداخته‌اند. کسر حجمی همه نمونه‌ها ۰/۱ بوده است. آزمایش شامل یک لوله مسی با دمای ثابت روی سطح آن بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید منیزیم تا ۲۵۲٪ در عدد رینولدز ۱۰۰۰ افزایش می‌یابد. دیگر نانوسیالات نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتری نسبت به سیال پایه داشته‌اند. فرج الهی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰، به بررسی انتقال حرارت دو نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم با قطر متوسط ۲۵ نانومتر و آب - اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۱۰ نانومتر در یک مبدل حرارتی پوسته - لوله و جریان مغشوش پرداختند. نتایج افزایش ۲۴٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی کل نانو سیال آب - اکسید تیتانیوم با کسر حجمی ۰/۳٪ را نشان داد. نارین و محمد [۷] در سال ۲۰۱۳، مطالعات عددی اثرات پارامترهای هندسی مختلف و مواد، قطر و حجم غلظت نانو ذرات روی ویژگی‌های هیدرولیکی و حرارتی را در مبدل‌های حرارتی لوله ماریچ تحت شرایط فیزیکی آرام انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نانوسیال‌ها می‌توانند خواص حرارتی و عملکرد مبدل حرارتی کوئل لوله ماریچ را افزایش دهند؛ اما با افزایش جزئی افت فشار همراه است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عدد ناسلت با استفاده از نانو سیال آب - اکسید مس بوده است. عباسیان و امانی [۸] در سال ۲۰۱۳، انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب - اکسید تیتانیوم با کسر حجمی بین ۰/۰۰۲ و ۰/۰۲ در اعداد رینولدز تقریبی ۸۰۰۰ تا ۴۹۰۰۰ درون مبدل دو لوله‌ای هم مرکز به صورت تجربی بررسی کردند. برای این منظور یک مبدل دو لوله‌ای جریان مخالف طراحی و ساخته شد. نتایج نشان داد که عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال با افزایش کسر حجمی و یا عدد رینولدز افزایش می‌یابند و عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال بیشتر از آب هستند. ربیع ناتاج درزی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳، انتقال حرارت و جریان

پژوهش، بررسی اثرات فیزیکی و هندسی در تقویت انتقال حرارت و افت فشار در لوله‌های مارپیچی بود. نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیال به جای آب مقطر باعث افزایش ۳۰ درصدی عدد ناسلت می‌شود. با مروری بر تحقیقات علمی صورت گرفته در این زمینه به روشنی مشخص می‌شود مطالعات صورت گرفته روی مقایسه انتقال حرارت در مبدل حرارتی لوله مارپیچ و مستقیم با استفاده از مخلوط سه نانو سیال (اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم) تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است.

۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایشگاهی (شکل ۱) از دو مبدل حرارتی جداگانه ساخته شده است که در یکی از مبدل‌ها، لوله داخلی از جنس مس به صورت مارپیچ (مبدل آبی رنگ) و در مبدل دیگری به صورت مستقیم (مبدل قرمز رنگ) به کار برده شده است که لوله‌های داخلی در مرکز لوله خارجی به وسیله دو کفه در سر و ته لوله جوش خورده‌اند که آب گرم (نانوسیال) در آن جریان دارد. همچنین لوله خارجی (پوسته) از جنس فولاد است که در آن آب سرد (آب شهری) جریان دارد و به طور کلی آب سرد روی لوله داخلی مسی را فرا می‌گیرد. در ادامه مشخصات کامل لوله‌ها آورده شده است؛ همچنین لوله خارجی دارای دو ورودی و دو خروجی جهت جریان آب گرم و سرد به وسیله بوش ۱/۲ به لوله خارجی جوش شده‌اند. جهت کنترل جریان خروجی آب گرم و سرد در خروجی‌های لوله خارجی شیر کنترل قرار داده شد که با کم و زیاد کردن شیر آزمایشگر می‌تواند در هر فشار دلخواهی تنظیم نمود. برای اندازه‌گیری دبی در ورودی آب سرد یک عدد کنتور آب نصب گردید که مقدار دبی آب ورودی به پوسته را نشان دهد. مخزن ساخته شده جهت آب گرم (نانوسیال)، از جنس فولاد به قطر خارجی ۵ اینچ و حجم تقریبی ۶ لیتر است که با عایق پشم شیشه جهت کاهش اتلاف حرارتی آب گرم به دور مخزن پیچیده شده است. مخزن مجهز به یک المنت با توان اسمی ۱۰۰۰ وات جهت تأمین آب گرم مورد نیاز آزمایش است که در پایین مخزن تعبیه شده است و آب گرم از درون آن توسط یک پمپ وارد سیستم می‌شود؛ همچنین مخزن مجهز به ترموستات است که آزمایشگر می‌تواند با چرخاندن عقربه ترموستات و قرار دادن آن روی دمای دلخواه آب مخزن

نانوسیال را در یک مبدل دولوله‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که برای محدوده عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ و کسر حجمی صفر تا یک درصد افزودن نانوذرات کارایی حرارتی مبدل را افزایش می‌دهد، بدون آن که افزایش قابل ملاحظه‌ای در افت فشار جریان به وجود بیاید. کاهانی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳، تأثیر استفاده از نانوسیال آلومینیوم-آب و لوله‌های مارپیچی را در بهبود نرخ انتقال حرارت مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی آن‌ها حاکی از افزایش ۳۲۰ درصدی عدد ناسلت در صورت استفاده هم زمان از دو تکنیک مورد اشاره نسبت به جریان آب خالص در لوله‌ی مستقیم است؛ هم چنین آن در پژوهشی دیگر مقایسه‌ای تجربی بین جریان آرام نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم (۳۵ نانومتر)-آب و اکسید تیتانیوم (۵۰ نانومتر)-آب درون لوله‌های مارپیچی انجام داده‌اند [۱۱]. آلی [۱۲] در سال ۲۰۱۴، محاسباتی عددی روی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال‌ها درون مبدل حرارتی با لوله مارپیچ با جریان آشفته انجام داد. با در نظر گرفتن نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم محاسبات برای سه‌گویی انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش نسبت انحنای ضریب انتقال حرارت و افت فشار افزایش و با افزایش درصد حجمی ذرات نانو ضریب انتقال حرارت و به همراه آن افت فشار افزایش می‌یابد. رخشا و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۵، با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال آب-اکسید مس در لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند و شاخص‌های عملکرد حرارتی را برای حالت‌های مختلف محاسبه کردند. دشمن‌زبیری و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶، مطالعه تجربی برای بررسی انتقال حرارت و جریان نانو سیال اکسید آلومینیوم - آب درون یک لوله کویل مارپیچی انجام دادند. برای انجام آزمایش، یک مخزن آب داغ تهیه شد و لوله کویل مارپیچ به صورت افقی در داخل مخزن غوطه‌ور شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت کلی با استفاده از نانوسیال به جریان سیال پایه تا ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. محمودی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷، بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت اجباری و کاهش فشار در لوله‌های مارپیچ با استفاده از نانو سیال اکسید تیتانیوم - آب پرداختند. هدف آنها از این



شکل ۱- تصویر دستگاه آزمایش

جدول ۱- مشخصات هندسی دستگاه ساخته شده

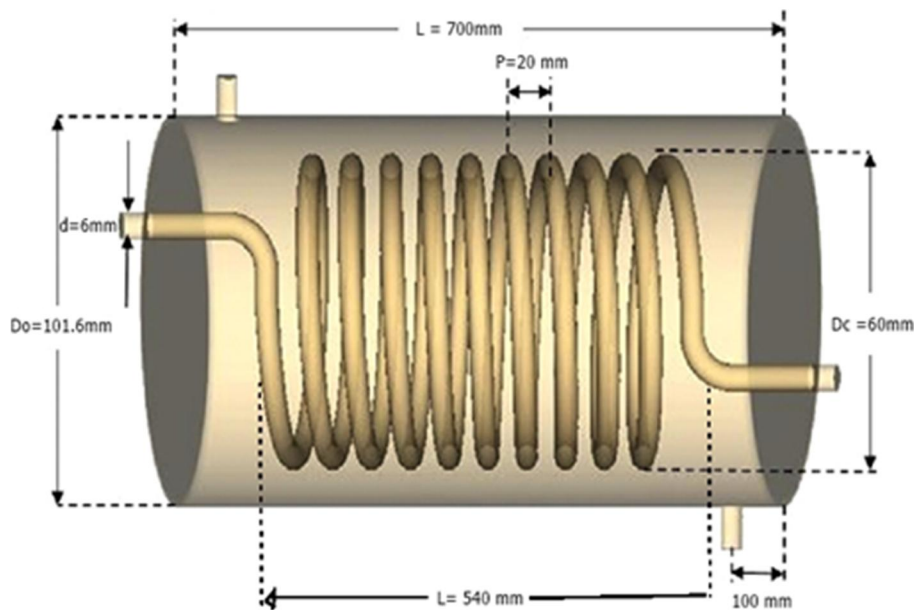
ردیف	پارامترهای ابعادی	ابعاد (میلی متر)
۱	قطر خارجی پوسته	۱۰۱/۶
۲	قطر داخلی پوسته	۹۶
۳	ضخامت لوله (پوسته)	۵/۶
۴	طول پوسته	۷۰۰
۵	قطر خارجی لوله مسی (کویل)	۶
۶	قطر داخلی لوله مسی (کویل)	۵
۷	ضخامت لوله مسی	۱
۸	طول لوله مسی ماریچ شده	۵۴۰
۹	قطر خارجی لوله مسی ماریچ شده	۶۰
۱۰	گام لوله مسی ماریچ	۲۰
۱۱	طول لوله مسی مستقیم	۱۰۰۰
۱۲	تعداد حلقه لوله مسی ماریچ شده	۲۷ عدد

گرم مورد نیاز پس از فرآیند در خروجی مبدل دو مرتبه به مخزن برگشت داده می شود و به طور کلی سیستم گردش آب گرم به صورت سیکل بسته است. آب سرد مورد نیاز فرآیند توسط جریان آب لوله کشی شده ساختمان آزمایشگاه تأمین می شود و در انتهای فرآیند از سیستم خارج و به فاضلاب هدایت می شود. دبی آب گرم و سرد در یک دبی ثابت اندازه گیری شد؛ یعنی شیر آب گرم و سرد همزمان به

را در دمای مطلوب مورد نیاز آزمایش کنترل کند. جهت تخلیه سیال درون مخزن یک شیر تخلیه در پایین مخزن نصب شده است. جهت پمپ کردن سیال درون مخزن از یک الکترو پمپ از نوع SQB60 با توان ۰/۳۷ کیلو وات و با بازه کارکرد ۵ تا ۳۶ لیتر بر دقیقه به درون لوله مسی ماریچ و مستقیم استفاده شد. به علت فشار و دمای بالای خروجی پمپ از لوله های پکیج که فشار و دمای بالایی را تحمل می کنند از خروجی پمپ تا ورودی لوله داخلی نصب گردید.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، برای کنترل دماهای ورودی و خروجی از یک دماسنج دیجیتالی نوع TX ۲۱ استفاده شده است که دماسنج دارای ۴ عدد ترموکوپل از نوع K (سنسور حسگر دما) با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس در دو ورودی آب گرم و آب سرد و همچنین در دو خروجی نصب شده است که با استفاده از یک سوئیچ الکتریکی به طور همزمان دماهای ورودی و خروجی آب گرم و سرد را روی نمایشگر دماسنج نمایش داده می شود. ترموکوپل ورودی آب گرم تا خروجی آب گرم، ۱۵ سانتی متر فاصله دارد. جهت کنترل فشارهای ورودی و خروجی آب گرم و سرد به طور جداگانه در هر کدام از ورودی و خروجی ها یک عدد فشارسنج عقربه ای از نوع FISHER قرار داده شد. تمامی ترموکوپل ها و فشارسنج ها قبل از نصب روی دستگاه کالیبره شده اند. مشخصات هندسی دستگاه ساخته شده در جدول ۱ و در شکل ۲ آورده شده است.

روش انجام آزمایش با دستگاه بدین صورت است که آب گرم (نانو سیال) پس از پایداری در کسر حجمی های مختلف به داخل مخزن ساخته شده ریخته شده و المنت مخزن را روشن کرده و توسط ترموستات مخزن در دماهای مختلف تنظیم نموده و حدود ۱۵ دقیقه صبر می کنیم تا نانو سیال به دمای مطلوب رسیده سپس الکترو پمپ را روشن نموده تا آب گرم درون مخزن را به داخل لوله ماریچ پمپ کند. فشار آب گرم با یک شیر بر سر راه خروجی لوله ماریچ روی ۲ بار تنظیم گردید؛ همچنین آب سرد شهری را هم باز نموده تا آب سرد وارد پوسته مبدل گردد. فشار آب سرد با یک شیر بر سر راه خروجی پوسته روی ۱ بار تنظیم گردید. فشار در کل انجام آزمایش به صورت ثابت فرض شد. بعد از ۵ دقیقه کار دستگاه دماهای ورودی و خروجی را یادداشت می کنیم. آب



شکل ۲- شماتیک مبدل حرارتی کوئل ماریچ

مدل FX-300GD با دقت 0.001 gr اندازه گیری شد. محاسبه کسر حجمی توسط رابطه (۱) انجام شده است [۱۶] که در این رابطه φ کسر حجمی نانو ذرات برحسب درصد، w وزن و ρ چگالی است.

$$\varphi(\%) = \left(\frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{TiO_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{SiO_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{Mgo}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{TiO_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{SiO_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{Mgo} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{Water}} \right) \times 100 \quad (1)$$

در ابتدا نانو ذرات در سیال پایه ۶ لیتر آب ریخته شدند. زمانی که نانو ذرات به آب اضافه می‌شوند، تشکیل یک حالت غیرهمگن ناپایدار می‌دهند و مخلوط جامد- مایع با تجمع نانوذرات مشاهده می‌شود و کلوخه‌ای شدن و ته نشینی بعد از چند دقیقه آغاز می‌شود. به منظور بهبود پایداری نانوسیالات از دو روش امواج مافوق صوت (دستگاه آلتراسونیک) و ماده فعال ساز سطحی استفاده می‌شود. از مواد فعال ساز سطحی برای جلوگیری از ته نشین شدن و رسوب کردن نانو ذرات در سیال پایه استفاده می‌شود که در این آزمایش از سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونات که یک ماده فعال ساز آنیونی است، جهت پایداری نانو سیال اکسید سیلیسیم و از سورفکتانت ستیل تری متیل آمونیوم بروماید که یک ماده فعال ساز کاتیونی است، جهت پایداری نانو سیال اکسید تیتانیوم و اکسید منیزیم مورد استفاده قرار

طور کامل باز بودند. برای اندازه گیری دبی آب سرد از یک کنتور آب استفاده شد و توسط کرنومتر زمان آن ثبت گردید. برای اندازه‌گیری دبی آب گرم از یک بشر مدرج استفاده شد و روش اندازه گیری آن بدین شکل است که ظرف مورد نیاز در زیر خروجی آب گرم قرار گرفته و توسط کرنومتر زمان پر شدن آن ثبت می‌شود و در نهایت وزن آب پر شده در ظرف بر حسب گرم بر زمان ثبت شده توسط کرنومتر تقسیم شده و مقدار دبی جرمی به دست می‌آید.

۳- تهیه و آماده سازی نانو سیال

در این پژوهش از نانو ذرات اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است، از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان مشهد تهیه شد؛ همچنین از آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است. اولین قدم در آماده سازی نانو سیال پایداری نانو ذرات در سیال پایه است. برای تهیه نانوسیال هیبریدی از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. نانوذرات در مرحله اول به صورت پودر تهیه می‌شوند و سپس در مرحله دوم به سیال پایه اضافه شده تا نانوسیال ایجاد شود.

نانوذرات در کسر حجمی‌های متفاوت 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1 درصد با استفاده از ترازوی دیجیتالی آزمایشگاهی AND

برای محاسبه لزجت نانو سیال رابطه گسترش یافته انیشتن برای غلظت ذرات متوسط که توسط برینکمن [۱۹] ارائه شد استفاده شده است:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (۴)$$

برای ترکیب سیال و ذره، تحقیقات بی شماری از روی مدل کلاسیک ماکسول الهام گرفته شده است. مدل ماکسول برای هدایت حرارتی ترکیب جامد مایع و ترجیحاً ذرات با سایز میکرو و میلی متر و در غلظت‌های پایین ذرات جامد نتایج خوبی می‌دهد، اما در مقایسه با داده‌های تجربی نتایج رضایت بخش نیستند.

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانو سیال از رابطه واسپ و همکاران [۲۰] استفاده شده است:

$$K_{nf} = K_{bf} \left(\frac{k_p + 2k_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_p)}{k_p + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)} \right) \quad (۵)$$

به منظور تجزیه و تحلیل مبدل حرارتی کوپل ماریچ و بررسی انتقال حرارت روابط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱ و ۲۲]:

طول مورد نیاز کوپل ماریچ:

$$L = \pi \times D_c \times N \quad (۶)$$

قطر هیدرولیکی پوسته:

$$D_h = \frac{D_o^2 - \pi \times D_c \times d_o^2 \times \gamma^{-1}}{D_o + \pi \times D_c \times d_o \times \gamma^{-1}} \quad (۷)$$

نسبت انحنای:

$$\delta = \frac{d_i}{D_c} \quad (۸)$$

نسبت گام:

$$\gamma = \frac{b}{\pi \times D_c} \quad (۹)$$

حرارت انجام شده توسط آب گرم (نانو سیال):

$$Q_h = \dot{m}_h \times C_{ph} \times \Delta T_h \quad (۱۰)$$

حرارت انجام شده توسط آب سرد:

$$Q_c = \dot{m}_c \times C_{pc} \times \Delta T_c \quad (۱۱)$$

حرارت میانگین و ماکسیمم توسط آب گرم و سرد:

$$Q_{avg} = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (۱۲)$$

$$Q_{max} = \dot{m}_{min} \times C_{pmin} \times (T_{hi} - T_{ci}) \quad (۱۳)$$

کارایی مبدل حرارتی:

$$\varepsilon = \frac{Q_{avg}}{Q_{max}} \quad (۱۴)$$

گرفت. سپس ماده فعال ساز مربوط به هر نانو ذره را با نسبت بهینه وزنی حدود یک به بیست اضافه کرده و ظرف محتوی نانو سیال هیبریدی را به مدت ۳ ساعت توسط هم زن مغناطیسی با دور کم هم زده می‌شود. سپس مخلوط حاصل توسط دستگاه آلتراسونیک hielscher- UIP1000 hd به مدت ۳ ساعت تحت امواج مافوق صوت قرار داده می‌شود تا نانو سیال به صورت پایدار به دست آید.

جدول ۲- مشخصات نانو ذرات مورد استفاده

مشخصات	نوع نانو ذره		
	اکسید منیزیم	اکسید سیلیسیم	اکسید تیتانیوم
درجه خلوص (%)	۹۹	۹۹	۹۸
اندازه (nm)	۲۱	۲۰-۳۰	۲۰
سطح ویژه (m ² /gr)	۸۰-۱۲۰	۱۸۰-۶۰۰	>۶۰
دانسیته واقعی (gr/cm ³)	۴/۲	۲/۴	۳/۵۸
رنگ	پودر سفید	پودر سفید	پودر سفید

۴- آنالیز اطلاعات

برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیالات همچون چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، لزجت و ضریب هدایت گرمایی به صورت تئوری و همچنین جهت مقایسه مقادیر تئوری با عملی طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

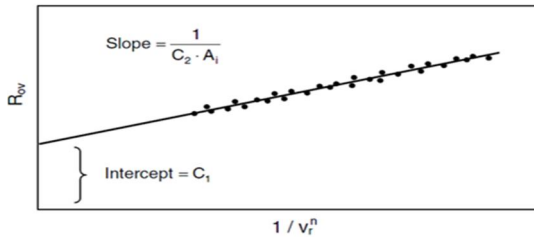
برای محاسبه چگالی نانو سیال از رابطه پاک و چو [۱۷] استفاده شده است:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (۲)$$

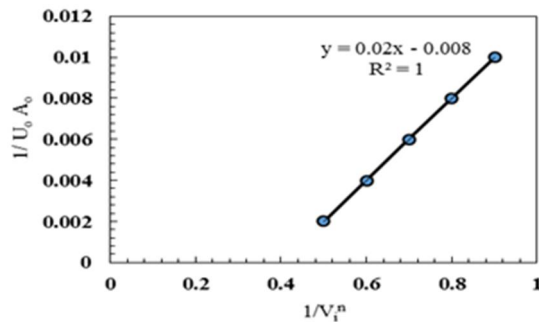
برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال از رابطه ژوان و روتزل [۱۸] استفاده شده است:

$$C_{Pnf} = \frac{(1 - \phi)C_{Pbf}\rho_{bf} + \phi C_{Pp}\rho_p}{\rho_{nf}} \quad (۳)$$

ماریپیج استفاده شده در این کار استخراج نمود. این نمودار در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- طرح ویلسون [۲۱]



شکل ۴- طرح ویلسون مربوط به مبدل ماریپیج کار حاضر

۴-۱- روش‌های اندازه‌گیری خطا

به منظور تعیین عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۴]:

$$E_{Mi} = \frac{X}{M} \frac{\partial M}{\partial X} E_{xi} \quad (29)$$

در این رابطه:

X: کمیت قابل اندازه‌گیری

M: کمیتی است که با استفاده از پارامترهای قابل اندازه‌گیری محاسبه شده است.

E_{xi} : همان خطای اندازه‌گیری است و برابر است با:

حداقل کمیت اندازه‌گیری شده / دقت اندازه‌گیری

E_{Mi} : حداکثر خطای ممکن در اندازه‌گیری یک کمیت

در این صورت تأثیر تمام کمیت‌های اندازه‌گیری در محاسبه خطای موجود در کمیت نهایی E_M به صورت معادله (۳۰) بیان می‌شود [۲۵]:

اختلاف دمای متوسط لگاریتمی:

$$LMTD = \frac{(Th_i - Tc_o) - (Th_o - Tc_i)}{\ln\left(\frac{Th_i - Tc_o}{Th_o - Tc_i}\right)} \quad (15)$$

ضریب انتقال حرارت کلی:

$$A_o = \pi \times d_o \times L \quad (16)$$

$$U_o = \frac{Q_{avg}}{A_o \times LMTD} \quad (17)$$

سرعت ورودی:

$$A_c = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times d_i^2 \quad (18)$$

$$\dot{m}_h = \rho_h \times A_c \times V_i \quad (19)$$

$$V_i = \frac{\dot{m}_h}{A_c \times \rho_h} \quad (20)$$

انتقال حرارت جابجایی داخلی (کویل ماریپیج):

$$A_i = \pi \times d_i \times L \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{1}{m \times A_i} \quad (22)$$

$$h_i = C_2 \times V_i^n \quad n=0.8 \quad (23)$$

انتقال حرارت جابجایی خارجی (پوسته):

$$\frac{1}{U_o} = \frac{A_o}{A_i \times h_i} + \frac{A_o \times \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \times \pi \times K \times L} + \frac{1}{h_o} \quad (24)$$

عدد رینولدز داخلی:

$$Re_i = \frac{\rho_h \times V_i \times d_i}{\mu_h} \quad (25)$$

عدد رینولدز خارجی:

$$Re_o = \frac{\rho_c \times V_o \times D_h}{\mu_c} \quad (26)$$

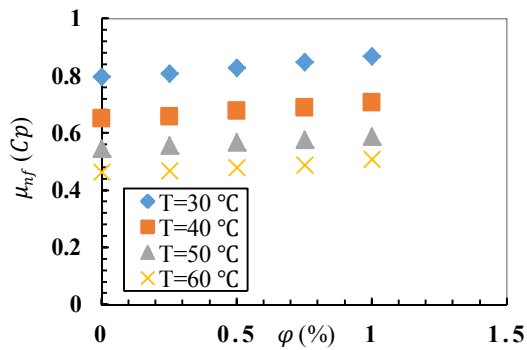
عدد ناسلت داخلی:

$$Nu_i = \frac{h_i \times d_i}{K_h} \quad (27)$$

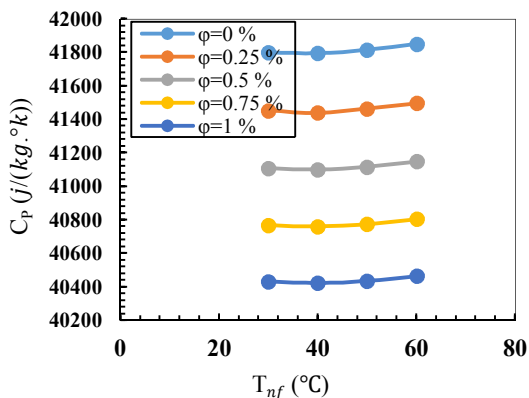
عدد ناسلت خارجی:

$$Nu_o = \frac{h_o \times D_h}{K_c} \quad (28)$$

با توجه به نمودار ویلسون با استفاده از ضریب انتقال حرارت کلی و نرخ دبی جریان، بدون نیاز به دمای دیواره می‌توان ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود. با توجه به نمودار ویلسون که در شکل ۳ ارائه شده است، عرض از مبدا مقدار ثابت C_1 را نشان می‌دهد و به کمک شیب خط می‌توان مقدار ثابت C_2 را بدست آورد. با استفاده به داده‌های تجربی بدست آمده در این تحقیق می‌توان، نمودار ویلسون را برای مبدل



شکل ۵- تغییرات لزجت دینامیکی نانو سیال هیبریدی برحسب درصد کسر حجمی در دماهای مختلف



شکل ۶- تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال هیبریدی برحسب دما در درصد کسر حجمی های مختلف

شکل ۸ تغییرات ضریب هدایت گرمایی نانو سیال هیبریدی برحسب درصد کسر حجمی در دماهای مختلف را نشان می‌دهد که متناسب با افزایش درصد کسر حجمی، ضریب انتقال حرارت افزایش دارد که در این نمودار بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و کمترین مقدار در سیال پایه است؛ بنابراین استفاده از نانو ذرات موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود.

شکل ۹ تغییرات ضریب هدایت گرمایی نانو سیال هیبریدی برحسب دما در درصد کسر حجمی های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، متناسب با افزایش دما، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که در این نمودار بیشترین مقدار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. دما

$$Max E_M = \left[\frac{X_1}{M} \frac{\partial M}{\partial X_1} EX_1 \right]^2 + \left[\frac{X_2}{M} \frac{\partial M}{\partial X_2} EX_2 \right]^2 + \dots + \left[\frac{X_n}{M} \frac{\partial M}{\partial X_n} EX_n \right]^2 \quad (30)$$

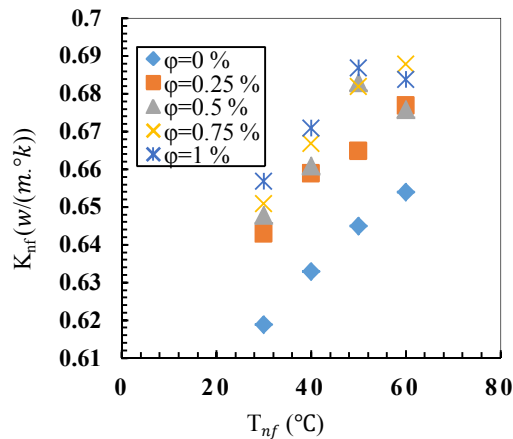
در رابطه فوق نشان دهنده حداکثر خطای حاصل در محاسبه کمیت مورد نظر است. در این تحقیق بیشترین خطای موجود تقریباً ۵٪ بدست می‌آید.

۵- بررسی نتایج تجربی

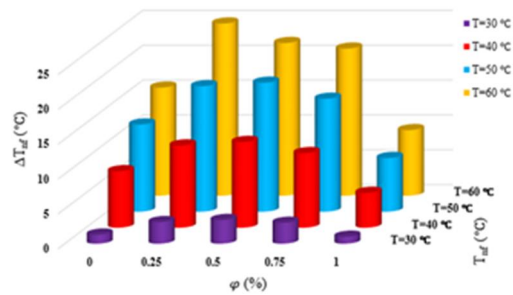
در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از خواص ترمو فیزیکی نانو سیال هیبریدی و همچنین اختلاف دما، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت تجربی آورده شده است.

شکل ۵ تغییرات لزجت دینامیکی نانو سیال هیبریدی برحسب درصد کسر حجمی در دمای مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، متناسب با افزایش درصد کسر حجمی، لزجت دینامیکی افزایش دارد که در این نمودار بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار در سیال پایه و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۶ تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال هیبریدی برحسب دما در درصد کسر حجمی های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که متناسب با افزایش دما، ظرفیت گرمایی ویژه افزایش می‌یابد که این افزایش با شیب صعودی همراه است. با توجه به محاسبات انجام شده بیشترین مقدار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. با مشاهده نمودار می‌توان گفت، ظرفیت گرمایی ویژه با دما رابطه مستقیم دارد. شکل ۷ تغییرات چگالی نانو سیال هیبریدی برحسب دما در درصد کسر حجمی مختلف را نشان می‌دهد که متناسب با افزایش دما، چگالی کاهش می‌یابد که در این نمودار بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار در سیال پایه و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد؛ همچنین می‌توان گفت، یکی از عوامل مؤثر بر چگالی، دما نیز است.



شکل ۹- تغییرات ضریب هدایت گرمایی نانو سیال هیبریدی برحسب درصدهای مختلف



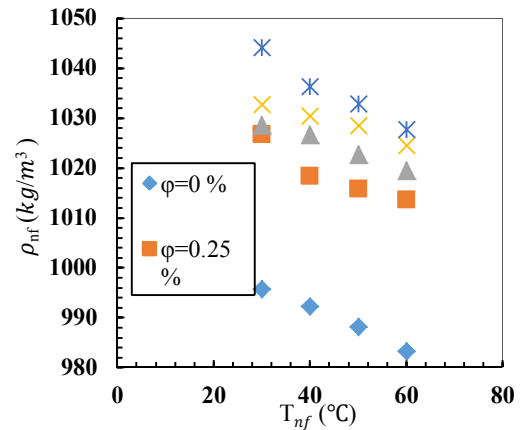
شکل ۱۰- تغییرات اختلاف دما نانو سیال هیبریدی برحسب درصدهای مختلف در لوله ماریچ

بیشترین درصد افزایش اختلاف دمای نانو سیال در کسر حجمی ۰/۲۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۴۱/۱۶٪ است.

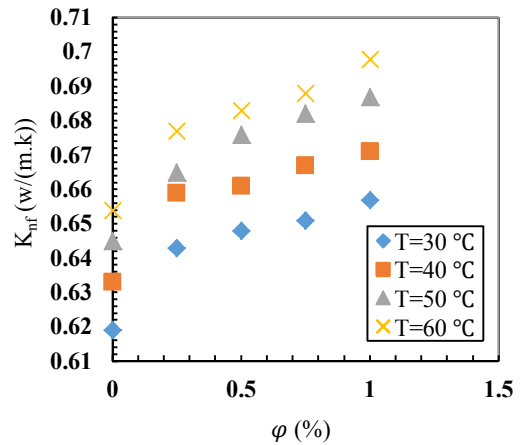
شکل ۱۱ تغییرات اختلاف دما نانو سیال هیبریدی برحسب درصدهای مختلف در لوله مستقیم را نشان می‌دهد که با افزایش دما، اختلاف دما افزایش می‌یابد و با افزایش درصد کسر حجمی اختلاف دما نوسان دارد که بیشترین اختلاف دما در کسر حجمی ۰/۷۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به محاسبات انجام شده، بیشترین درصد افزایش اختلاف دمای نانو سیال در کسر حجمی ۰/۷۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۳۴/۱۶٪ است.

نیز همانند غلظت نانو ذره روی ضریب انتقال حرارت مؤثر است.

شکل ۱۰ تغییرات اختلاف دما نانو سیال هیبریدی برحسب درصد کسر حجمی در دماهای مختلف در لوله ماریچ را نشان می‌دهد که با افزایش دما، اختلاف دما افزایش می‌یابد و با افزایش درصد کسر حجمی اختلاف دما نوسان دارد که بیشترین اختلاف دما در کسر حجمی ۰/۲۵٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به محاسبات انجام شده،



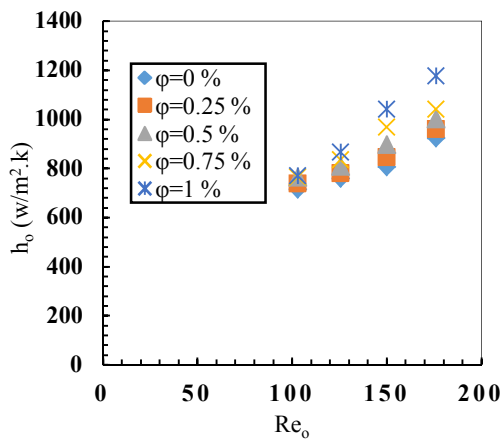
شکل ۷- تغییرات چگالی نانو سیال هیبریدی برحسب درصدهای مختلف



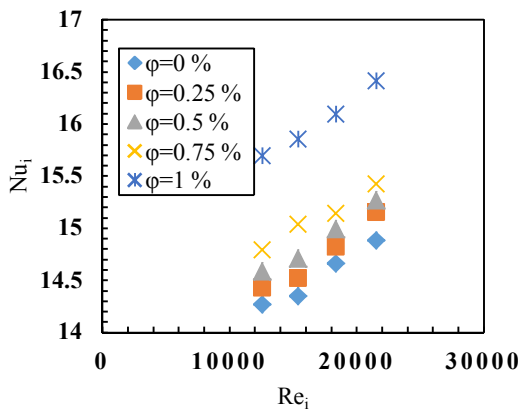
شکل ۸- تغییرات ضریب هدایت گرمایی نانو سیال هیبریدی برحسب درصدهای مختلف

شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت داخلی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_i=21567.6$ و کمترین مقدار در سیال پایه $Re_i=12598.8$ است.

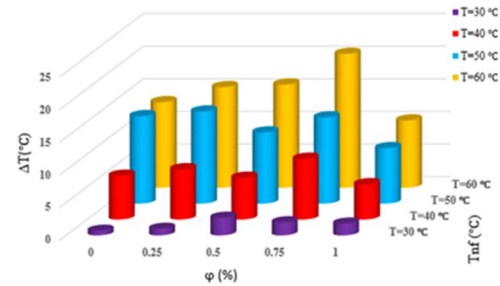
شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت



شکل ۱۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ



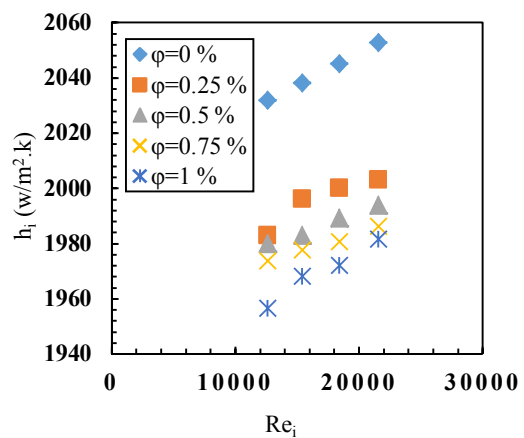
شکل ۱۴- تغییرات عدد ناسلت داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ



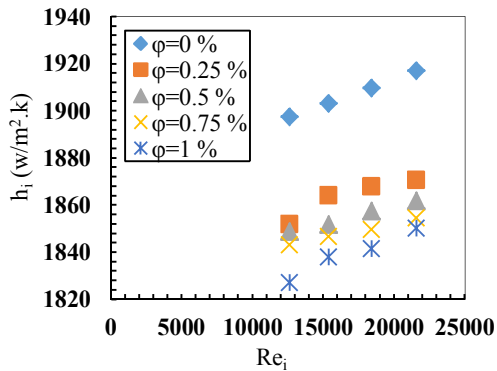
شکل ۱۱- تغییرات اختلاف دما نانو سیال هیبریدی برحسب درصد کسر حجمی در دماهای مختلف در لوله مستقیم

شکل ۱۲ تغییرات انتقال حرارت جابجایی داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ را نشان می‌دهد که انتقال حرارت جابجایی داخلی با افزایش درصد کسر حجمی، کاهش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در سیال پایه $Re_i=21567.6$ ($\phi=0\%$) و کمترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_i=12598.8$ است.

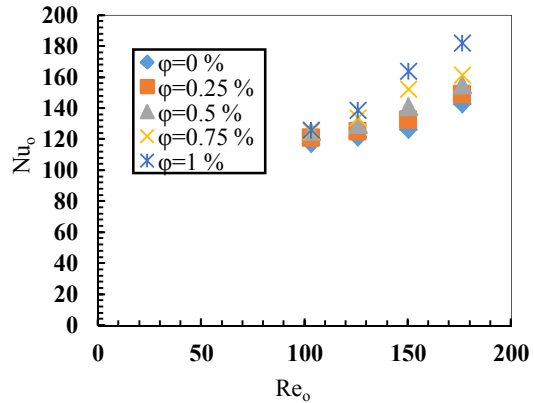
شکل ۱۳ تغییرات انتقال حرارت جابجایی خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ را نشان می‌دهد که انتقال حرارت جابجایی خارجی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_o=176.2$ و کمترین مقدار در سیال پایه و $Re_o=102.9$ است.



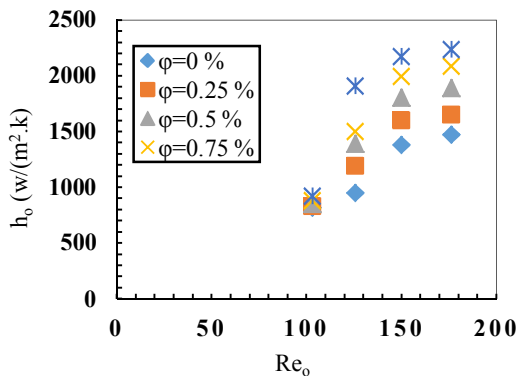
شکل ۱۲- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله ماریچ



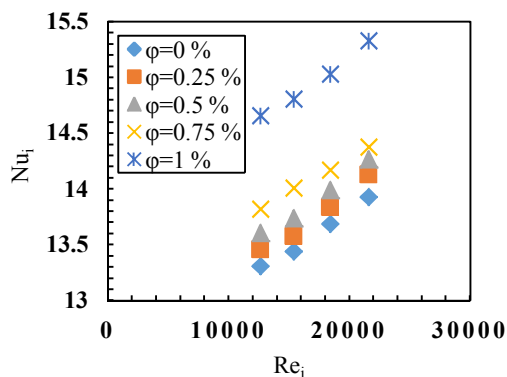
شکل ۱۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم



شکل ۱۵- تغییرات عدد ناسلت خارجی بر حسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مارپیچ



شکل ۱۷- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم



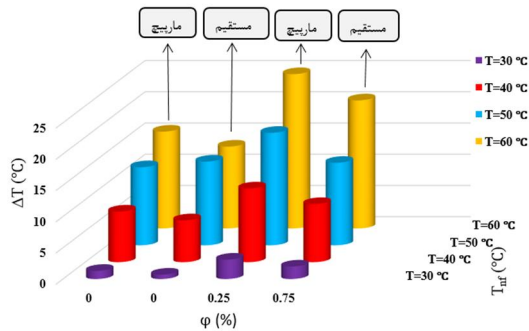
شکل ۱۸- تغییرات عدد ناسلت داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم

خارجی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_o=176.2$ و کمترین مقدار در سیال پایه و $Re_o=102.9$ است.

شکل ۱۶ تغییرات انتقال حرارت جابجایی داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم را نشان می‌دهد که انتقال حرارت جابجایی داخلی با افزایش درصد کسر حجمی، کاهش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در سیال پایه و $Re_i=21567.6$ و کمترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_i=12598.8$ می‌باشد. تفاوت آن با لوله مارپیچ در مقدار محاسبه انتقال حرارت جابجایی است.

شکل ۱۷ تغییرات انتقال حرارت جابجایی خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم را نشان می‌دهد که انتقال حرارت جابجایی خارجی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_o=176.2$ و کمترین مقدار در سیال پایه و $Re_o=102.9$ است. تفاوت آن با لوله مارپیچ در مقدار محاسبه انتقال حرارت جابجایی است که در لوله مستقیم نسبت به لوله مارپیچ کمتر است.

شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت داخلی برحسب عدد رینولدز داخلی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود،



شکل ۲۰- مقایسه تغییرات اختلاف دمای بهینه نانوسیال هیبریدی در لوله مارپیچ و مستقیم

۶- نتیجه گیری

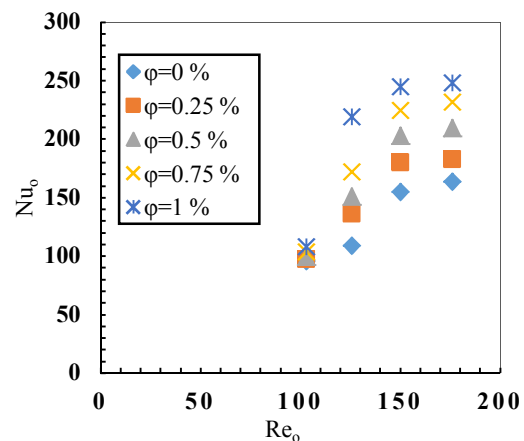
تحلیل نتایج تجربی به دست آمده نکات زیر را بیان می‌کند:

- (۱) ضریب لزجت و چگالی در نانو سیال مذکور با افزایش دما کاهش و با افزایش غلظت نانو ذرات افزایش می‌یابد. به عبارتی می‌توان گفت، ضریب لزجت با درصد کسر حجمی رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد.
- (۲) ظرفیت گرمایی ویژه تا دمای ۳۱۰ کلوین با افزایش دما کاهش و از دمای ۳۱۰ کلوین به بعد با افزایش دما افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات کاهش می‌یابد.
- (۳) ضریب هدایت گرمایی نانو سیال مذکور با افزایش دما و با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد که باعث افزایش ۵ درصدی نسبت به سیال پایه آب می‌شود. بیشترین مقدار ضریب هدایت گرمایی در کسر حجمی ۱٪ و دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و کمترین مقدار مربوط به سیال پایه آب و دمای ۳۰ درجه سانتی گراد است.
- (۴) ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش غلظت حجمی، کاهش و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد که در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم افزایش ۶/۸ درصدی مشاهده شد.
- (۵) عدد ناسلت با غلظت حجمی نسبت مستقیم دارد و در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم با افزایش غلظت حجمی و عدد رینولدز، ۶/۶ درصد افزایش می‌یابد.

عدد ناسلت داخلی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_i=21567.6$ و کمترین مقدار در سیال پایه و $Re_i=12598.8$ است. تفاوت آن با لوله مارپیچ در مقدار محاسبه عدد ناسلت است.

شکل ۱۹ تغییرات عدد ناسلت خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت خارجی با افزایش درصد کسر حجمی، افزایش و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار در کسر حجمی ۱٪ و $Re_o=176.2$ و کمترین مقدار در سیال پایه و $Re_o=102.9$ است. تفاوت آن با لوله مارپیچ در مقدار محاسبه عدد ناسلت است.

شکل ۲۰ مقایسه اختلاف دمای لوله مارپیچ و مستقیم را با استفاده از سیال پایه و همچنین با استفاده از نانو سیال نشان می‌دهد که اختلاف دما در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم بیشتر است. اختلاف دمای بهینه مطابق محاسبات در لوله مارپیچ در درصد کسر حجمی ۰/۲۵٪ و در لوله مستقیم در درصد کسر حجمی ۰/۷۵٪ است؛ همچنین در لوله مارپیچ و مستقیم کمترین و بیشترین اختلاف دمای نانو سیال به ترتیب در دمای $T=30^{\circ}C$ و $T=60^{\circ}C$ است.



شکل ۱۹- تغییرات عدد ناسلت خارجی برحسب عدد رینولدز خارجی در درصد کسر حجمی‌های مختلف در لوله مستقیم

$Wm^{-1}K^{-1}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی،	h	اختلاف دما در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم در کسر حجمی ۰/۲۵ و دمای ۶۰ درجه سانتی گراد
$Wm^{-1}K^{-1}$	ضریب هدایت گرمایی،	k	۳۷/۶٪ بیشتر است.
m	طول مبدل،	L	متناسب با افزایش دما، اختلاف دما افزایش می‌یابد که در لوله مارپیچ با افزودن نانو ذره نسبت به سیال پایه باعث افزایش ۱۰ درصدی و در لوله مستقیم باعث افزایش ۶ درصدی اختلاف دما می‌شود.
$^{\circ}C$	اختلاف دمای متوسط لگاریتمی،	$LMTD$	
شیب		m	
kg/s	دبی جرمی،	\dot{m}	درصد افزایش اختلاف دمای بهینه نانوسیال هیبریدی در لوله مارپیچ در کسر حجمی ۰/۲۵ و دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و در لوله مستقیم در کسر حجمی ۰/۷۵ و دمای ۶۰ درجه سانتی گراد است.
	نانو ذره اکسید منیزیم	Mgo	
	تعداد حلقه مارپیچ	N	
	عدد ناسلت	Nu	اضافه نمودن نانو ذرات حتی با غلظت های پایین به سیال کاری انتقال حرارت، موجب بهبود عملکرد انتقال حرارت به ویژه در مبدل لوله مارپیچ می‌شود؛ زیرا وجود نانو ذرات در سیال کاری موجب می‌شود تا بخشی از افت انتقال حرارت در لوله مارپیچ با افزایش ضریب هدایت گرمایی سیال جبران شود؛ بنابراین افزایش نسبی عدد ناسلت در حضور نانو ذرات در مبدل لوله مارپیچ نسبت به مبدل لوله مستقیم بیشتر است.
	مقدار انتقال حرارت،	Q	
	عدد رینولدز	Re	
	نانو ذره اکسید سیلیسیم	Sio_2	
$^{\circ}C$	دما،	T	
	نانو ذره اکسید تیتانیوم	Tio_2	
$Wm^{-1}K^{-1}$	ضریب انتقال حرارت کلی،	U	
	سرعت سیال،	V	
			۷- فهرست علائم
			A سطح لوله کویل، m^2
			b گام کویل، m
			C_p ظرفیت گرمایی ویژه، $Jkg^{-1}K^{-1}$
			C_1, C_2 ثابت ها
			d قطر لوله کویل، m
			D قطر پوسته، m
			D_c قطر کویل مارپیچ، m
			D_h قطر هیدرولیکی، m
			ΔT اختلاف دما، $^{\circ}C$
			δ نسبت انحنای
			ε درصد اتلاف حرارتی
			μ لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$
			ρ چگالی، kg/m^3
			φ کسر حجمی نانو سیال، %
			γ گام بدون بعد

علائم یونانی

- [۸] امانی ج، عباسیان آرانی ع ا (۱۳۹۳) مطالعه تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر ۸۸-۷۹: ۴۶(۱).
- [9] Darzi AR, Farhadi M, Sedighi K (2013) Heat transfer and flow characteristics of AL2O3–water nanofluid in a double tube heat exchanger. *Int J Heat Mass Transf* 47: 105-112.
- [10] Kahani M, Heris SZ, Mousavi SM (2013) Effects of curvature ratio and coil pitch spacing on heat transfer performance of Al2O3/water nanofluid laminar flow through helical coils. *J Dispers Sci Technol* 34(12): 1704-1712.
- [11] Kahani M, Heris SZ, Mousavi SM (2013) Comparative study between metal oxide nanopowders on thermal characteristics of nanofluid flow through helical coils. *Powder Technol* 246: 82-92.
- [12] Aly WI (2014) Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers. *Energ Convers Manage* 79: 304-316.
- [13] Rakhsha M, Akbaridoust F, Abbassi A, Majid SA (2015) Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature. *Powder Technol* 283: 178-189.
- [14] Doshmanziari FI, Zohir AE, Kharvani HR, Jalali-Vahid D, Kadivar MR (2016) Characteristics of heat transfer and flow of Al2O3/water nanofluid in a spiral-coil tube for turbulent pulsating flow. *Int J Heat Mass Transf* 52(7): 1305-1320.
- [15] Mahmoudi M, Tavakoli MR, Mirsoleimani MA, Gholami A, Salimpour MR (2017) Experimental and numerical investigation on forced convection heat transfer and pressure drop in helically coiled pipes using TiO2/water nanofluid. *Int J Refrig* 74: 627-643.
- [16] Nield DA, Kuznetsov AV (2009) The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid. *Int J Heat Mass Transf* 52(25-26): 5792-5795.
- [17] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp Heat Transf* 11(2): 151-170.
- [18] Xuan Y, Roetzel W (2000) Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transf* 43(19): 3701-3707.
- [19] Brinkman HC (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 20(4): 571-571.
- [20] Wasp E, Kenny J, Gandhi R (1999) S.I.S.P. Transportation, Bulk Materials Handling. Trans Tech Publications, Germany.
- [21] Shah RK, Sekulic DP (2003) Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons.
- زیر نویس ها
- avg میانگین
- bf سیال پایه
- c سیال سرد
- h سیال گرم
- i داخلی
- max حداکثر
- min حداقل
- nf نانو سیال
- o خارجی
- ov به طور کلی
- p نانو ذره
- ۸- مراجع
- [1] Kakac S, Bergles AE, Mayinger F, Yuncu H (eds) (2013) Heat transfer enhancement of heat exchangers. Springer Science and Business Media 355.
- [2] Choi SUS (1995) Enhancing conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME Fluid Eng, Division* 231: 99-105.
- [3] Coronel P, Sandeep KP (2008) Heat transfer coefficient in helical heat exchangers under turbulent flow conditions. *Int J Food Eng* 4(1).
- [4] Jayakumar JS, Mahajani SM, Mandal JC, Iyer KN, Vijayan PK (2010) CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes. *Comput Chem Eng* 34(4): 430-446.
- [5] Xie H, Li Y, Yu W (2010) Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows. *Phys Lett A* 374(25): 2566-2568.
- [6] Farajollahi B, Etemad SG, Hojjat M (2010) Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *Int J Heat Mass Transf* 53(1-3): 12-17.
- [7] Narrein K, Mohammed HA (2013) Influence of nanofluids and rotation on helically coiled tube heat exchanger performance. *Thermochim Acta* 564: 13-23.

- [24] Young Hugh D (1962) Statistical treatment of experimental data. 126-132.
- [25] Holman JP (1989) Experimental models for engineers. 5th edn. McGraw-Hill, New York.
- [22] Patil RK, Shende BW, Ghosh PK (1982) Designing a helical-coil heat exchanger. Chem Eng 92(24): 85-88.
- [23] Shah RK, Sekulic DP (2003) Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons.