

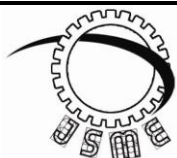
پژوهش تجربی بهبود انتقال انرژی گرمایی در اثر تعلیق نانو ذرات داخل سیال عامل انتقال گرما

امیدعلی اکبری^۱، آرش کریمی پور^{۲*}، داود طغرای^۳، مجید زرین قلم^۴، غلامرضا احمدی شیخ شبانی^۵

* نویسنده مسئول: arash.karimipour@pmc.iaun.ac.ir

واژه‌های کلیدی	چکیده
بهبود انتقال انرژی گرمایی، مبدل حرارتی، نانوسیال.	در کاربردهای مهندسی انتقال حرارت سیالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بنابراین مهندسان و پژوهشگران، روش‌های متعددی را به منظور افزایش انتقال حرارت پیشنهاد کردند. در سال‌های اخیر روش‌های نوینی به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از نانوسیالات است. نانوسیالات دارای خواص گرمایی مطلوبی نسبت به سیال پایه می‌باشند. در این تحقیق تاثیر تعلیق نانوذرات اکسید مس داخل سیال عامل آب با کسر حجمی ۰/۰۵ (۰/۵٪)، تحت رژیم جریان مغشوش در داخل مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان مخالف مورد بررسی قرار می‌گیرد و مشاهده می‌شود که تعلیق این میزان از نانو ذرات اکسید مس در داخل سیال پایه آب، منجر به بهبود قابلیت انتقال انرژی گرمایی این سیال عامل از سیستم می‌گردد. همچنین از سوی دیگر؛ تعلیق نانو ذرات منجر به افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک سیال پایه نیز می‌گردند، اما محاسبات انجام شده نشان می‌دهند که تاثیرات مثبت استفاده از این میزان نانو ذرات معلق در آب بر بهبود انتقال گرما از سیستم؛ نسبت به تاثیرات منفی آنها بر افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک غلبه می‌کند که این نتایج، محققان را به سوی استفاده از این نانو سیال به عنوان سیال عامل در کاربردهای عملی رهنمون می‌سازد.
تاریخ ارسال: ۹۴/۰۸/۱۴	
تاریخ بازنگری: ۹۴/۰۹/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۰۵	

- ۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.
- ۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۵- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ایران.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Experimental investigation of the effect of suspended nanoparticles into conventional fluid on the heat transfer improvement

Omid Ali Akbari¹, Arash Karimipour^{2,*}, Davood Toghraie Semiromi³, Majid zarringhalam⁴, Gholamreza Ahmadi Sheikh Shabani⁵

* Corresponding Author: arash.karimipour@pmc.iaun.ac.ir

Abstract:

Heat Transfer has special importance in engineering applications. So, researchers have suggested different new idea to increase heat transfer and using nanofluid is one of these methods, because nanofluids have higher heat transfer potential than base conventional fluids. In this investigation effect of suspended CuO nanoparticles with volume fraction of 0.005 into base water fluid is considered under turbulent flow regime inside double tube counter heat exchanger. It was observed that suspending pre-mentioned amount of nanoparticle augmentate heat transfer capability of conventional water fluid. On the other side, it leads to increase pressure drop and friction factor of water base fluid. Finally they conclude that positive effect of heat transfer augmentation is so stronger than negative effect of increasing pressure drop and friction factor that motivate to utilize this nanofluid in practical applications.

Key words:

Increase heat transfer.
Heat exchanger.
Nanofluid.
Friction factor.

1- Young Researchers and Elite Club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

4- PhD student, Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

5- Young Researchers and Elite Club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

۱- مقدمه

ذرات، جنس ذرات، اندازه ذرات، شکل ذرات، دمای سیال پایه و افزودنی‌ها وابسته است. پس از آن بود که محققان بسیاری جنبه‌های جالب و مختلف نانوسیالات از جمله ضریب هدایت گرمایی آن را که به طرز غیرعادی حتی در غلظت‌های کم نانوذرات بسیار بالاست، مورد بررسی قرار دادند. پک و چو^۴ [۳] طی یک مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌های آب-اکسید آلومینیوم (AL₂O₃-Water) و آب-اکسید تیتانیوم (TiO₂-Water) را در رژیم جریان آرام و مغشوش مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال‌ها با کسر حجمی ۳٪ نانو ذرات و اعداد رینولدز مشخص تا میزان ۱۲٪ نسبت به سیال پایه آب پایین تر است. لی و زون^۵ [۴] خصوصیات جریان و انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب-مس (Cu-Water) را در لوله‌های مستقیم و با شار گرمایی ثابت و تحت رژیم‌های جریان آرام و مغشوش بطور تجربی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند نانو ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر موجود در سیال پایه منجر به افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه آب می‌شود در حالیکه افزایش ضریب اصطکاک در این آزمایش چندان چشمگیر نبود.

ون و دینگ^۶ [۵] در طی یک تحقیق آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم (AL₂O₃-Water) با قطر نانو ذرات ۲۷ تا ۵۶ نانومتر را تحت رژیم جریان آرام، در لوله‌های مسی و با شار گرمایی ثابت مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش رینولدز جریان و کسر حجمی نانو ذرات منجر به افزایش قابل توجه انتقال حرارت جابجایی می‌گردد. همچنین این افزایش در ناحیه ورودی جریان بیشتر بوده و با افزایش فاصله محوری از ورودی، اثر آن کمتر می‌باشد.

نانوسیال را می‌توان سیالی تعریف کرد که از معلق ساختن نانوذرات در یک مایع خالص بوجود می‌آید. این ذرات اغلب از جنس فلزی و یا اکسید فلزی هستند و به اشکال مختلف به ویژه کروی یا استوانه‌ای موجود هستند. از آنجا که نانوذرات فوق‌العاده ریز هستند و سطح ویژه بزرگی دارند، زمانی که در مایعات پراکنده می‌شوند خواص یکتا و منحصر به فردی از قبیل ضریب هدایت گرمایی بالا، مدت زمان پایداری بیشتر و فرسایش کمتر در آن‌ها وجود دارد که از توجه ویژه‌ای برخوردارند. ایده نانوسیال اولین بار با پراکنده‌سازی ذرات جامد میکرو و میلی‌متری در سیال توسط چوی عملی شد، ولی همواره مشکلات عدم پایداری، ته‌نشینی، سائیدگی، فرسایش مجاری و مسدود کردن لوله‌ها در مورد این سیالات مانع از دستیابی به یک محصول تجاری می‌شد. اولین مشاهدات در خصوص افزایش ضریب هدایتی سیال در اثر استفاده از نانوذرات در مایعات در سال ۱۹۹۳ توسط ماسودا^۱ و همکاران [۱] گزارش شد. چوی^۲ [۲] در سال ۱۹۹۵ در موسسه تحقیقاتی آرگونه^۳ در آمریکا، اولین کسی بود که از لفظ نانوسیال برای سوسپانسیون‌های نانوذره در مایع استفاده کرد. او ادعا نمود چنین سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از نظر خواص پایداری و انتقالی به دلیل برهم‌کنش‌های بین ذرات و حرکت براونی و سطح بالا، در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد-مایع و ماکروسیالات تفاوت‌های زیادی دارند. ضریب هدایت گرمایی سیالات را به وسیله افزودن مقدار بسیار کمی از نانوذرات فلزی یا نانوذرات اکسیدهای فلزی نظیر مس، اکسید مس، آلومینا یا لوله‌های کربنی به سیال افزایش می‌دهند. ضریب جابجایی عامل اصلی در کاربردهای گرمایش-سرمایشی جابه‌جایی اجباری است و تقویت آن در نانوسیال به پارامترهایی نظیر غلظت حجمی

⁴ Pak and Cho⁵ Li and Xuan⁶ Wen and Ding¹ Masuda² Choi³ Argonne

امراللهی و همکاران [۱۰] طی یک تحقیق تجربی، ضریب انتقال حرارت جابجایی آب/نانو لوله‌های کربنی چند دیواره (FMWNT/ Water) در درصدهای حجمی ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۲ و ۰/۲۵ را داخل لوله‌های افقی، تحت شار گرمایی ثابت و تحت رژیم‌های جریان آرام و مغشوش تحت دماهای ۲۰، ۲۷ و ۳۳ درجه سانتیگراد را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج بدست آمده از این محققان، با افزایش کسر حجمی نانو ذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد اما این افزایش در دماهای پایین بیشتر از دماهای بالا در آزمایش می‌باشد و با افزایش دمای نانو سیال از ۲۰ به ۲۷ و ۳۳ درجه سانتیگراد، نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال نسبت به سیال پایه (h_{nf}/h_{bf})، با افزایش رینولدز جریان کاهش می‌یابد. اما این نتایج در مورد دمای ۲۰ درجه سانتیگراد کاملاً بر عکس بود و با افزایش رینولدز جریان نسبت (h_{nf}/h_{bf}) در پی افزایش رینولدز جریان، افزایش چشمگیری داشت.

هاشمی و همکاران [۱۱] در طی یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال روغن-اکسید مس CuO/ Base oil با درصدهای مختلف نانوذرات در داخل لوله‌های مارپیچی افقی و تحت شار گرمایی ثابت پرداختند. نتایج تحقیقات این محققان نشان داد که ضریب انتقال حرارت بالاتری از جریان سیال در ناحیه ورودی لوله بدست می‌آید و تاخیر در شکل‌گیری لایه مرزی گرمایی که از وجود نانو ذرات ناشی می‌شود منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، اثرات اغتشاش و ضریب هدایت گرمایی نانوسیال افزایش می‌یابد که این عوامل منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. همچنین نتایج نشان دادند که در رینولدزهای جریان مشخص، در صورتیکه نانوسیال‌ها در داخل لوله‌های مارپیچ مورد آزمایش قرار گیرند نسبت به لوله‌های مستقیم، دارای ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتری می‌باشند. مطابق مقادیر بدست آمده در رینولدزهای جریان ۱۰ تا ۱۰۰ در لوله‌های مستقیم، مقدار حداکثر افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال

هریس و همکاران [۶ و ۷] ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیالات آب-اکسید مس (CuO-Water) و آب-اکسید آلومنیوم (AL₂O₃-Water) را تحت رژیم جریان آرام و دمای مرزی ثابت دیواره، داخل لوله‌های مدور و در معرض بخار اشباع برای تامین دمای ثابت دیواره مورد آزمایش قرار دادند و دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی هر دو نانو سیال با افزایش عدد پکلت و کسر حجمی نانو ذرات افزایش پیدا می‌کند؛ اما این افزایش در نانو سیال آب/اکسید آلومنیوم نسبت به نانو سیال آب-اکسید مس بیشتر بود.

سونگ و وان ویز^۱ [۸] نانو سیال آب/اکسید تیتانیوم (TiO₂-Water) را با کسر حجمی ۰/۲٪ نانو ذرات را در مبدل گرمایی دو لوله‌ای جریان مخالف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محدوده ۶٪-۱۱٪ بالاتر از سیال پایه بوده و افزایش افت فشار نیز قابل چشم پوشی می‌باشد.

فتوکیان و نصر اصفهانی [۹] طی یک مطالعه آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانو سیال‌های آب/اکسید مس را تحت رژیم جریان مغشوش، در داخل لوله‌های مدور مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال بالاتر از سیال پایه آب می‌باشد؛ اما اثر افزایش کسر حجمی بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی ضعیف می‌باشد. همچنین نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال به سیال پایه با افزایش عدد رینولدز، کاهش پیدا می‌کرد. بنابراین توانستند نتیجه بگیرند که اثر کسر حجمی نانو ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی، در اعداد رینولدز پایین‌تر قویتر از اعداد رینولدز بالاتر است و اثر افزایش کسر حجمی نیز در جریان با اغتشاش بالا ضعیف‌تر می‌شود. همچنین با مقایسه دمای دیواره لوله‌های انتقال دهنده جریان دریافتند که افزودن نانو ذرات، ظرفیت جذب انرژی گرمایی نانو سیال را که باعث کاهش دمای دیواره لوله می‌گردد افزایش می‌دهد.

¹ Duangthongsuk and Wongwises

این محققان در انتها، رابطه‌ای برای پیش بینی عدد ناسلت در این شرایط ارائه دادند.

کیهانی و همکاران [۱۳] در طی یک تحقیق آزمایشگاهی، ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم (TiO₂-Water) را در داخل لوله‌های مدور افقی و تحت جریان مغشوش و با قطر ۱۵ نانومتر مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال نسبت به سیال پایه افزایش چشمگیری دارد و با افزایش رینولدز جریان ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز افزایش می‌یابد. نسبت انتقال حرارت نانو سیال به سیال پایه (h_{nf}/h_{bf}) تغییر چندانی با تغییر رینولدز جریان نداشت. نسبت ناسلت نانو سیال به سیال پایه نیز در کسر حجمی ۲٪ نانو ذرات و رینولدز جریان ۱۱۷۸۰ به میزان ۱/۰۸ می‌رسید و با افزایش رینولدز جریان تغییر چندانی در آن مشاهده نمی‌شد.

سوندار و همکاران [۱۴] طی یک بررسی تجربی، ضریب انتقال حرارت و اصطکاک نانو سیال آب/اکسید آهن (Fe₃O₄/H₂O) را در لوله‌های مدور افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده در آزمایش‌های با نوارهای پیچیده و بدون آن‌ها نشان می‌داد که نرخ انتقال حرارت در زمانی که نوار پیچیده داخل لوله وجود دارد نسبت به حالتی که لوله صاف و بدون نوار است بیشتر می‌باشد و دلیل آن ایجاد اغتشاش و اثرات اختلاط بیشتر توسط نوار پیچیده است. در بررسی ضریب اصطکاک، ابتدا داده‌های حاصل از آزمایش سیال پایه آب در حالت بدون نوار پیچیده با رابطه بلازیوس [۱۵] تصدیق شد و نتایج آزمایش نانو سیال‌ها نشان دادند که وجود نانو ذرات باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شوند. همچنین در حالت آزمایش با نوار مشاهده شد که ضریب اصطکاک نسبت به حالتی که لوله صاف و بدون نوار است به میزان قابل توجهی بالاتر است.

فکور و همکاران [۱۶] در طی یک تحقیق تجربی، خصوصیات ترمودینامیکی و عملکرد کلی انتقال حرارت جریان نانو سیال روغن/ نانو لوله‌های کربنی چند دیواره

پایه ۱۸/۷٪ محاسبه شد؛ اما در لوله‌های ماریپیچ مقدار بیشینه این پارامتر به ۳۰/۴٪ می‌رسید.

مطابق تحلیل این محققان، مکانیزمی که قادر است ضریب انتقال حرارت جابجایی این نانوسیال را در لوله‌های ماریپیچ تا مقدار ۷۸/۴٪ (در رینولدز جریان ۸۲/۲) افزایش دهد، نیروی گریز از مرکز می‌باشد که منجر به تغییر سرعت و دما در طول مقطع لوله می‌گردد و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی را بدنبال دارد. همچنین این محققان دریافته‌اند که افت فشار نانوسیال در لوله‌های ماریپیچ نسبت به لوله‌های مستقیم بیشتر می‌باشد، بطوریکه حداکثر میزان افت فشار داخل لوله‌های مستقیم ۱۳/۲٪ و داخل لوله‌های ماریپیچ ۲۰/۳٪ می‌باشد. بنابراین با توجه به افزایش میزان افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی نتیجه گرفتند که برای انتخاب مبدل‌های مذکور، بایستی هر دو اثر به طور همزمان مورد بررسی قرار گیرد.

حجت و همکاران [۱۲] طی یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌های غیر نیوتنی AL₂O₃-CuO-TiO₂-DI Water با کسر حجمی های نانو ذرات ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲٪ در داخل لوله‌های مدور و تحت رژیم جریان مغشوش پرداختند و دریافته‌اند که ضریب انتقال حرارت جابجایی هر سه نانو سیال نسبت به سیال پایه بالاتر می‌باشد و با افزایش کسر حجمی نانو ذرات نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد پکلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت نانو سیال‌ها افزایش می‌یابد. مطابق نتایج این محققان، با افزایش فاصله محوری از ناحیه ورودی، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد. همچنین بر خلاف تصور قبلی که با افزایش نانو ذرات به سیال پایه و بهبود خصوصیات ترموفیزیکی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، اندازه بزرگی افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی بسیار فراتر از اندازه بزرگی افزایش خصوصیات هدایتی می‌باشد. بنابراین مطابق تحلیل محققان قبلی درباره پدیده‌های لایه مرزی و حرکات تصادفی نانو ذرات و اغتشاشات بوجود آمده در این ناحیه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌گردد. همچنین

۱۲۰۰۰ منجز به تغییر افت فشار نیز می‌گردد. همچنین نتایج این محققان حاکی از آن بود که بهترین خصوصیات انتقال گرمایی با قطر نانو ذرات ۲۰ نانومتر بدست می‌آید.

۲- مهیا سازی نانو سیال

مهیا کردن نانو سیال اولین مرحله کلیدی در تحقیقات تجربی محسوب می‌شود. در این تحقیق آزمایشگاهی نانو سیال آب - اکسید مس به روش دو مرحله ای تهیه شد. به منظور توزیع نانو ذرات در سیال پایه و تولید نانو سیال روش ویژه برای توزیع یکنواخت نانو ذرات و تهیه مخلوط ویژه مورد نیاز است. در این تحقیق سه روش موثر برای معلق نگه داشتن نانو ذرات و جلوگیری از ته‌نشینی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت که این روش‌ها عبارتند از:

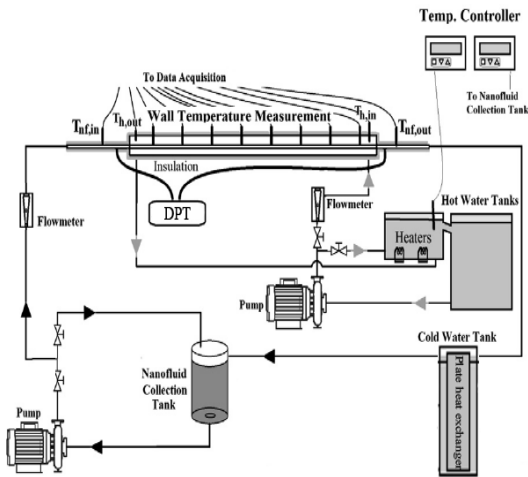
(۱) استفاده از فرآیند التراسونیک

(۲) اضافه کردن سورفکتانت‌ها یا فعال کننده‌های سطحی

(۳) تغییر میزان PH نانو سیال

مقدار حجمی مطلوب و مورد نظر نانو ذرات توزیع شده در سیال پایه ۰/۰۰۵ می‌باشد. مطابق شکل (۱) در این تحقیق یک میکروسکوپ اشعه الکترونی (TEM) برای اندازه‌گیری و تخمین اندازه و شکل نانو ذرات اکسید مس مورد استفاده قرار گرفت. پودر نانو ذرات اکسید مس با قطر متوسط ۴۰ نانومتر توسط شرکت US Research Nanomaterial تهیه شد و مورد استفاده قرار گرفت. نانو سیال با کسر حجمی های ذکر شده، برای توزیع ذرات در سیال پایه از طریق امواج التراسونیک توسط ویراتور التراسونیک (Helischer Company Germany) برای مدت ۴ ساعت در دستگاه ویراتور قرار گرفت تا کلوخه‌های آن شکسته شده و شرایط تعلیقی مناسبی پیدا کند. توزیع مناسب نانو ذرات نیازمند تکرار فرایند اختلاط مکانیکی و ارتعاش التراسونیک است. در این تحقیق پس از سپری شدن ۱۶ ساعت، هیچگونه رسوب و ته‌نشینی در نانو سیال مشاهده نشد. همچنین لازم است این نکته ذکر شود که پدیده رسوب و ته‌نشینی نانو ذرات در نانو سیال در شرایط رژیم جریان مغشوش اهمیت کمتری دارد زیرا مواجه شدن با تنش برشی بالاتر موجبات کاهش رخداد پدیده کلوخگی نانو ذرات را بدنبال دارد.

(MWCNT-Oil) را در داخل لوله‌های عمودی کویل شده ماریچی مورد بررسی قرار دادند. آزمایشها تحت رژیم جریان آرام، دمای مرزی ثابت دیواره لوله و با درصدهای وزنی نانو ذرات ۰/۱، ۰/۲، و ۰/۴ انجام شدند. این محققان در بررسی لزجت دینامیکی نانو سیال دریافتند که با افزایش دما در کلیه درصدهای وزنی، شاهد کاهش لزجت می‌باشیم اما با افزایش دما شاهد کاهش نرخ کاهش لزجت نیز هستیم. در بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی این نانو سیال، مشاهده شد که با افزایش رینولدز جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه و نانو سیال‌ها افزایش می‌یابد بطوریکه با تغییر عدد رینولدز از ۲۵ به ۱۱۵، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال با درصد وزنی ۲٪ نسبت به سیال پایه روغن از ۵٪ به ۱۲/۷٪ افزایش یافت. بعلاوه با افزایش درصد وزنی نانو ذرات نیز شاهد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی هستیم. زیرا در رینولدز جریان ۱۱۰، با تغییر درصد نانو ذرات از ۰/۲۵ به ۲٪، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال نسبت به سیال پایه از ۶٪ به ۱۲/۷٪ افزایش داشت. بنابراین سرعت جریان و خصوصیات ترموفیزیکی نقش موثری در افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال داشتند. عباسیان آرانی و امانی [۱۷] طی یک تحقیق آزمایشگاهی، اثرات قطر نانو ذرات نانو سیال آب/اکسید تیتانیوم (TiO₂-Water) را بر روی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار را در داخل مبدل دو لوله‌ای جریان مخالف مورد بررسی قرار دادند. نانو ذرات با قطر های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ نانومتر و کسر حجمی های ۱ و ۲٪ در داخل سیال پایه آب توزیع شدند و رینولدز جریان در محدوده ۸۰۰۰ - ۵۵۰۰۰ متغیر بود. نتایج حاصله از این محققان نشان داد که با کاهش قطر نانو ذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد ولی این قانون افزایشی بطور مطلق برقرار نمی‌باشد زیرا در قطر ۱۰ نانومتر نانو ذرات مقادیر ناسلت نسبت به قطر ۲۰ نانومتر مشاهده می‌شد. ولی تغییر قطر نانو ذرات می‌تواند منجر به تغییر ناسلت گردد که این تغییر وابسته به رینولدز جریان و کسر حجمی نانو ذرات دارد. همچنین تغییر قطر نانو ذرات در در اعداد رینولدز بالاتر از

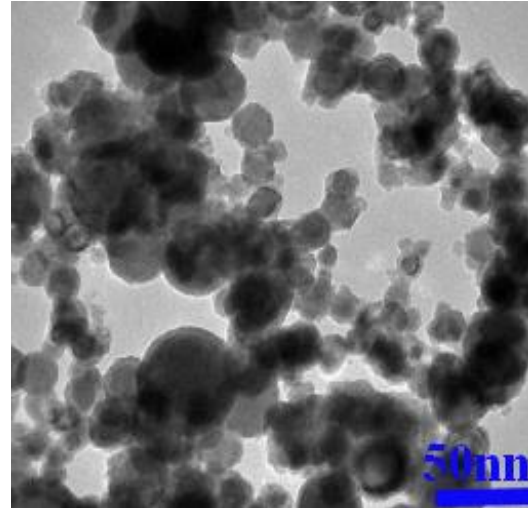


شکل (۲) تصویر شماتیک از دستگاه انجام آزمایش

دو حسگر دمایی کالیبره شده از نوع RTD-PT 100 با نشانگر دیجیتالی که دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد دارند، دمای ورود و خروج منطقه آزمایش را اندازه‌گیری می‌کنند. همچنین هشت ترموکوبل قابل انعطاف نوع K که در محدوده دمایی از ۱۵ تا ۳۷۵ درجه سانتیگراد دارای دقت ± 0.5 هستند بر روی دیواره لوله جریان با فاصله ۱۳ سانتیمتر از یکدیگر قرار داده شده‌اند تا توزیع دمای دیواره لوله را اندازه‌گیری کنند. گرمای ناحیه آزمایش با جریان آب داغ که بر روی دیواره لوله مسی جریان دارد تامین می‌شود.

سیکل دوم کاری دستگاه شامل تجهیزات برای تولید و کنترل نرخ جریان آب داغ است. دبی جریان آب داغ بر روی لوله مسی باید طوری تنظیم شود که دمای دلخواه ناحیه آزمایش را فراهم آورد. برای کنترل دمای آب داغ از یک کنترلر دما با حسگر نوع PT100 استفاده می‌شود. دو عدد ترموکوبل نوع K برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی آب داغ استفاده می‌شود. یک فلومتر برای اندازه‌گیری و تنظیم نرخ جریان آب داغ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیکل سوم کاری دستگاه، شامل پمپ، مبدل گرمایی نانو سیال، مسیر برگشت، واحد چگالنده و کنترلرهای دما با حسگر نوع PT100 است. این واحد، دمای نانو سیال در ورودی منطقه آزمایش را از طریق تغییر قدرت واحد چگالنده کنترل می‌نماید. در این حلقه جریان، کنترل جریان از طریق دو دریچه انجام می‌گردد که یکی از آن‌ها در مسیر برگشت و دیگری در ورودی منطقه آزمایش قرار دارد.

بنابراین رژیم جریان مغشوش در این تحقیق به ایجاد شرایط پایدار تعلیق نانو ذرات در طول آزمایش کمک شایانی می‌کند.



شکل (۱) تصویر تهیه شده از نانوذرات اکسید مس با میکروسکوپ الکترونی

۳- شرایط و تجهیزات آزمایشگاهی

شکل شماتیک (۲) نحوه آزمایش و نصب تجهیزات آزمایشگاهی را در این تحقیق نشان می‌دهد. نصب تجهیزات آزمایش بدین صورت است که سه سیکل بسته مجزا وجود دارند. سیکل بسته نانو سیال شامل یک پمپ، تانک ذخیره، ناحیه آزمایش و مبدل گرمایی صفحه‌ای برای سرد کردن نانو سیال است. ناحیه آزمایش انتقال حرارت از دو لوله هم مرکز تشکیل شده است و طول لوله ۱۵ سانتی متر است که از رابطه $L_e/D=4.4 \times Re^{1/6}$ برای جریان مغشوش توسعه یافته در عدد رینولدز ۲۹۰۰۰ محاسبه شده است. طول گرمایی ناحیه آزمایش ۱۱۱ سانتیمتر است. بنابراین جریان برای کل مطالعات مغشوش محسوب می‌شود.

$$Nu = \frac{\bar{h} \cdot d}{k_{nf}} \quad (6)$$

$$Re = \frac{4m}{\pi \cdot d^2} \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (8)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)(1 + \beta)^3}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)(1 + \beta)^3} \quad (9)$$

در رابطه فوق \bar{V} سرعت متوسط و d قطر داخلی لوله و m دبی جرمی است. μ_{nf} و k_{nf} به ترتیب لزجت و ضریب هدایت گرمایی نانو سیال هستند و از روابط زیر محاسبه می-شوند. قابل ذکر است که سرعت متوسط از تقسیم دبی جریان به سطح مقطع بدست می آید.

۵- ارائه نتایج

۵-۱ ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت

سیال پایه آب

شکل (۳) ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال (h) پایه آب را بر حسب رینولدز جریان ارائه می دهد. با افزایش رینولدز جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه آب افزایش می یابد. زیرا با افزایش رینولدز سرعت جریان بالاتر رفته و اغتشاش افزایش می یابد و در نتیجه حرکات نامنظم ملکول-های سیال و تاثیر آن در پخش انرژی افزایش یافته که افزایش انتقال گرما را بدنبال دارد. مقدار حداقل ضریب انتقال حرارت $3300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ بود که در رینولدز جریان 3000 حاصل شد. مقدار حداکثر ضریب انتقال حرارت جابجایی، $16500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ بود که در رینولدز جریان 18000 محاسبه شد.

برای اندازه گیری افت فشار استاتیک (ترمودینامیکی) جریان سیال در طول ناحیه آزمایش از یک ترنسدمتر افت فشار نوع 3051cd با دقت $\pm 0.1\%$ استفاده شد. این تجهیزات افت فشار بین ناحیه ورودی و خروجی منطقه آزمایش را در هر آزمایش اندازه گیری می کنند. پارامترهای ضروری که در زمان آزمایش اندازه گیری می-شوند عبارتند از دبی جریان نانو سیال و آب داغ، دماها و افت فشار. همچنین حسگرهای دمایی و ترموکوپل ها، قبل از کار گذاشته شدن بروی دستگاه کالیبره شدند.

۴- روابط مورد استفاده

ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت بوسیله قانون اول ترمودینامیک برای لوله داخلی مطابق معادله زیر است:

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{P}{mC_p} h(T_s - T_b) \quad (1)$$

که در رابطه فوق T_b دمای بالک، P محیط مقطع دایره ای لوله، دبی جرمی m ، همان C_p همان C_{nf} گرمای ویژه نانو سیال و T_s دمای سطح دیواره لوله است. که مقدار C_{nf} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$C_{nf} = \frac{\rho_f C_f (1 - \phi) + \rho_p C_p \phi}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

که در معادله فوق ρ_f چگالی سیال پایه، ρ_{nf} چگالی نانو سیال و ρ_p چگالی نانو ذرات و ϕ کسر حجمی نانو ذرات که برابر با 0.02 می باشد است. ρ_{nf} نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\rho_{nf} = \rho_f (1 - \phi) + \rho_p \phi \quad (3)$$

برای تخمین ارزش و هزینه نانو سیال در سیستم، بسیار ضروری است که افت فشار ΔP و ضریب اصطکاک f را تعیین کنیم روابط زیر برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده می شوند:

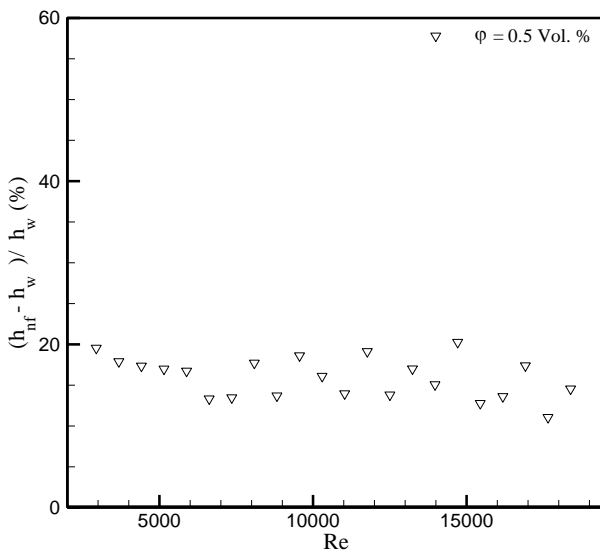
$$f = \frac{2 \cdot d \cdot \Delta P}{L \cdot \bar{V} \cdot \rho_{nf}} \quad (4)$$

رینولدز و ناسلت جریان نیز از روابط زیر محاسبه می شوند:

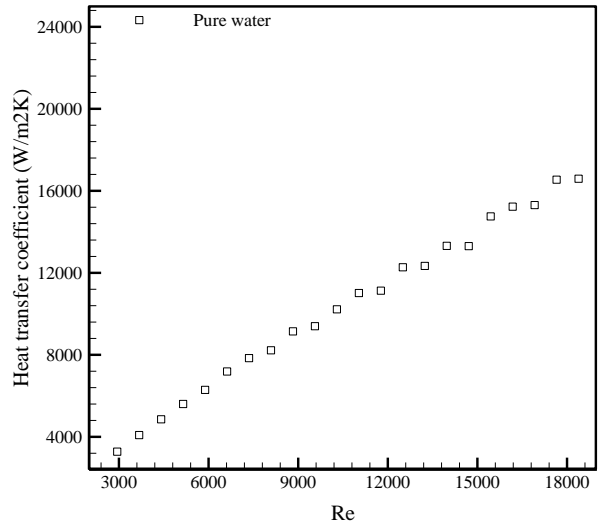
$$Re = \frac{\rho_{nf} \cdot d \cdot \bar{V}}{\mu_{nf}} \quad (5)$$

۲-۵ مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نانو سیال نسبت به سیال پایه آب

اشکال (۵) و (۶) درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف را برای نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵٪ نشان می‌دهد. در بررسی این اشکال مشاهده می‌شود که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نانو سیال ها نسبت به سیال پایه بطور بسیار چشمگیر افزایش دارد. زیرا تعلیق این میزان از نانو ذرات اکسید مس در داخل سیال پایه آب علاوه بر دارا بودن خصوصیات هدایتی بسیار بالاتر اکسید مس نسبت به سیال پایه آب، به دلیل برهم کنش‌های بین ذرات و حرکت برآونی و سطح بالای نانو ذرات نسبت به حجم آنها، به طور قابل توجهی منجر به بهبود قابلیت انتقال انرژی گرمایی این سیال عامل از سیستم می‌شود. مقادیر حداکثر و حداقل درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی این نانو سیال به ترتیب ۲۷/۲۰٪ و ۱۱/۰۶٪ می‌باشند که در رینولدزهای ۱۴۷۰۰ و ۱۷۶۵۰ محاسبه می‌شوند. همچنین مقادیر حداکثر و حداقل درصد ناسلت این نانو سیال نیز ۱۷/۱۰٪ و ۱/۷۳٪ می‌باشند که در رینولدزهای جریان ۱۴۷۰۰ و ۱۷۶۵۰ محاسبه می‌شوند.

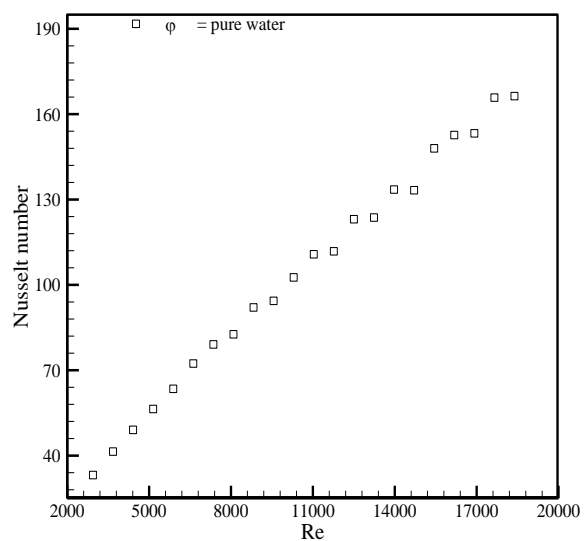


شکل (۵) درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در رینولدزهای مختلف در نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵ درصد



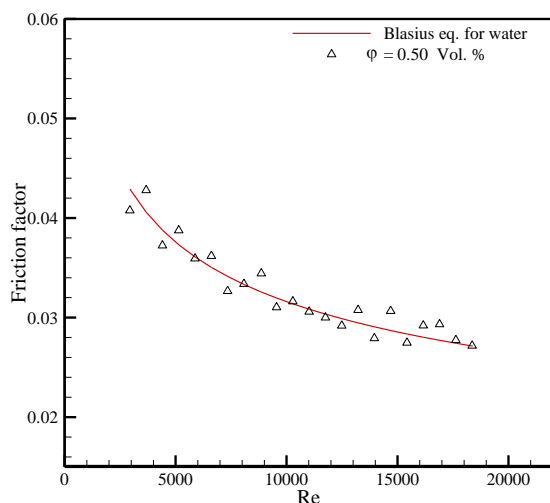
شکل (۳) ضریب انتقال حرارت جابجایی در رینولدزهای مختلف در سیال پایه

شکل (۴) عدد ناسلت سیال (Nu) پایه آب را بر حسب رینولدز جریان ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که بطور کلی، با افزایش رینولدز جریان، عدد ناسلت سیال پایه نیز افزایش می‌یابد و طبیعتاً عامل موثر در این افزایش، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی همزمان با افزایش Re جریان است زیرا با افزایش اغتشاش جریان تنش برشی و ضرائب پخش گردابه ای سیال افزایش می‌یابد. بطوریکه کمترین مقدار ناسلت سیال پایه ۳۵ بود که در رینولدز ۳۰۰۰ مشاهده شد و بیشترین مقدار ناسلت ۱۶۸ بود که در رینولدز ۱۸۰۰۰ بدست آمد. بنابراین نتایج بدست آمده از عدد ناسلت این سیال، با نتایج ضریب ضریب انتقال حرارت جابجایی تطابق دارند.



شکل (۴) عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در سیال پایه

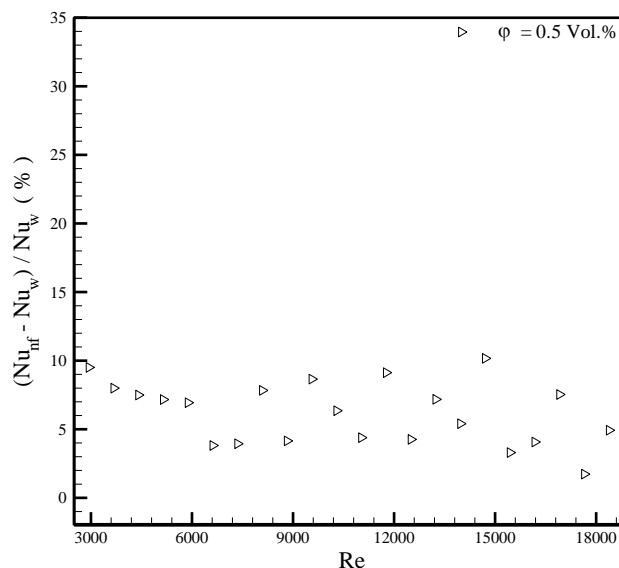
رینولدزهای جریان ۳۰۰۰ و ۸۸۰۰ محاسبه می‌شوند. شکل (۸) ضریب اصطکاک محاسبه شده از آزمایش‌های این نانو سیال در رینولدزهای مختلف جریان را ارائه می‌دهد. مطابق با شکل مذکور، با افزایش رینولدز جریان روند کاهش ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود. بطوریکه با افزایش رینولدز جریان به حداکثر مقدار آزمایش شده، شاهد حداقل ضریب اصطکاک می‌باشیم. مقادیر بالای ضریب اصطکاک در رینولدزهای پایین جریان حاصل می‌شوند. همچنین حداقل و حداکثر ضریب اصطکاک ۰/۰۲۷ و ۰/۰۴۳ می‌باشند که به ترتیب در رینولدزهای جریان ۱۸۴۰۰ و ۳۷۰۰ محاسبه می‌شوند.



شکل (۸) مقایسه ضریب اصطکاک بلازیوس و نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵ درصد

۵-۴ محاسبه کارایی گرمایی نانو سیال

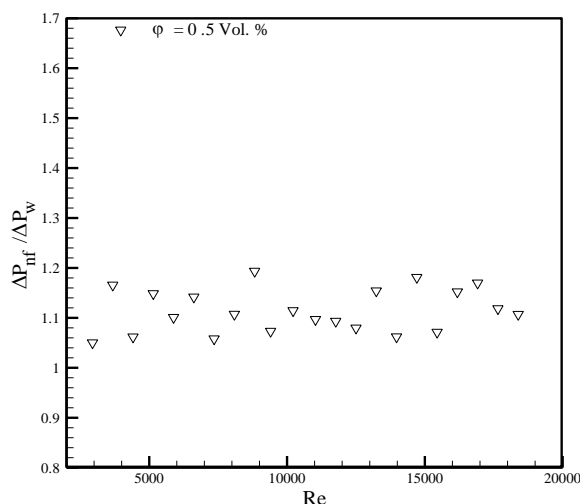
با استفاده از جریان نانو سیال در داخل مبدل گرمایی، بجای استفاده از سیال پایه آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش و از طرفی دیگر نیز افت فشار افزایش پیدا می‌کند. اگرچه افزایش انتقال حرارت به عنوان یک پارامتر مثبت ما را به استفاده از نانو سیال ترغیب می‌نماید ولی افزایش افت فشار نانو سیال نسبت به سیال پایه و نیاز به جبران با نیروی لازم برای پمپ کردن، به عنوان پارامتری منفی ما را به تحقیق بیشتر ترغیب می‌نماید تا اثر این دو پارامتر را بطور همزمان برای یافتن شرایط بهینه جهت استفاده از این نانو سیال در کاربردهای عملی مورد بررسی قرار دهیم. بنابراین پارامتر ضریب کارایی گرمایی برای



شکل (۶) درصد افزایش عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵ درصد

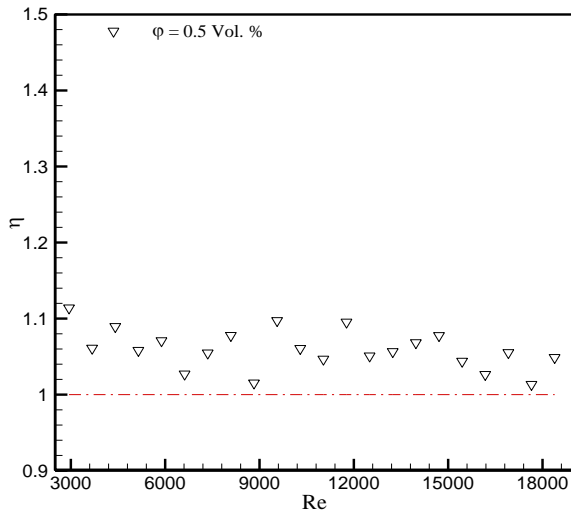
۵-۳ محاسبه افت فشار و مقایسه ضریب اصطکاک نانو سیال‌ها نسبت به تخمین بلازیوس از سیال پایه آب

شکل (۷) نسبت افت فشار نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵٪ به سیال پایه آب را بر حسب رینولدزهای مختلف جریان نشان می‌دهد. بطور کلی در این در این کسر حجمی از نانو سیال، نسبت افت فشار نانو سیال به سیال پایه فاقد روند مشخص و قابل پیش بینی می‌باشد و با افزایش رینولدز جریان شاهد نوسان زیادی در افزایش و کاهش افت فشار این نانو سیال می‌باشیم.



شکل (۷) نسبت افت فشار نانو سیال به سیال پایه در رینولدزهای مختلف در کسر حجمی ۰/۵ درصد

مقادیر کمینه و بیشینه نسبت افت فشار این نانو سیال نسبت به سیال پایه، ۱/۰۵ و ۱/۱۹ می‌باشند که به ترتیب در



شکل (۹) کارایی گرمایی نانو سیال با کسر حجمی ۰/۵ درصد

۶- جمع بندی نتایج

در این تحقیق تاثیر تعلیق نانوذرات اکسید مس داخل سیال عامل آب با کسر حجمی ۰/۰۰۵ (۰/۵٪) و تحت رژیم جریان مغشوش در داخل مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان مخالف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که تعلیق این میزان از نانو ذرات اکسید مس در داخل سیال پایه آب، منجر به بهبود قابلیت انتقال انرژی گرمایی این سیال عامل از سیستم می‌گردد. همچنین از سوی دیگر تعلیق نانو ذرات منجر به افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک سیال پایه نیز می‌گردند، اما تاثیرات مثبت استفاده از این میزان نانو ذرات معلق در آب بر بهبود انتقال گرما از سیستم، نسبت به تاثیرات منفی آنها بر افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک غلبه می‌کند بطوریکه مقدار بیشینه کارایی محاسبه شده از این نانوسیال ۱/۱۱۴ و در Re کمینه جریان محاسبه گردید.

۷- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه (J/kg.K)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
L	طول (m)
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
V	سرعت (m/s)
m°	نرخ جرمی جریان (kg/s)
D	قطر لوله مبدل (m)

بررسی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال معرفی می‌شود. که از طریق رابطه زیر معرفی می‌شود.

$$\eta = \frac{Nu_{nf}}{Nu_f} = \frac{(f_{nf})^{1/3}}{f_f} \quad (10)$$

به عبارتی دیگر دلیل اصلی پیشنهاد ضریب کارایی گرمایی، این واقعیت است که توزیع نانو ذرات در داخل سیال پایه آب، خصوصیات هدایت گرمایی و لزجت سیال پایه را بطور همزمان افزایش می‌دهد. و با افزایش کسر حجمی نانو ذرات در داخل سیال پایه این دو خصوصیت نیز افزایش می‌یابد. افزایش خصوصیات هدایتی منجر به افزایش انتقال حرارت و افزایش لزجت منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. بنابراین برای یافتن شرایط بهینه از حاصل تقسیم نسبت ناسلت نانو سیال به سیال پایه بر نسبت ضریب اصطکاک نانو سیال به سیال پایه استفاده می‌شود. در صورتی که ضریب کارایی عددی بزرگتر از ۱ باشد اثر مطلوب افزایش انتقال حرارت نسبت به اثر نامطلوب افزایش افت فشار در محاسبه کارایی بالاتر بوده و کاربرد عملی نانوسیال منطقی به نظر می‌رسد که نشان دهنده این نکته است که انتخاب نانوسیال برای کاربردهای عملی مناسب بوده و صرفه اقتصادی دارد.

شکل (۹) کارایی گرمایی نانو سیال در رینولدزهای مختلف در کسر حجمی ۰/۵ درصد را ارائه می‌نماید. در بررسی پارامتر کارایی این نانو سیال مشخص می‌باشد در کلیه نقاط کارایی بالاتر از یک می‌باشد که نشان دهنده مرقوم به صرفه بودن استفاده از این نانوسیال می‌باشد. مقادیر حداکثر و حداقل ۱/۱۱۴ و ۱/۰۱۳ بودند که به ترتیب در رینولدزهای جریان ۳۰۰۰ و ۱۷۹۰۰ محاسبه می‌شوند.

- [8] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S., *Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-Water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 (2008) pp 2059–2067.
- [9] Fotukian, S.M., and Nasr Esfahany M., *Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/Water nanofluid inside a circular tube*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37 (2010) pp 214–219.
- [10] Amrollahi, A., Rashidi, A.M., Lotfi, R., EmamiMeibodi, M., Kashefi, K., *Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37 (2010) 717–723.
- [11] Hashemi, S.M., and Akhavan-Behabadi, M.A., *An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (2012) pp 144–151.
- [12] Hojjat, M., Etemad, S.Gh., Bagheri, R., Thibault, *Convective heat transfer of non Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube*, International Journal of Thermal Sciences, 50 (2011) pp 525–531.
- [13] Kayhani, M.H., Soltanzadeh, H., Heyhat, M.M., Nazari, M., Kowsary, F. *Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/Water nanofluid*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (2012) pp 456–462.
- [14] SyamSundar, L., Ravi Kumar, N.T., Naik, M.T., Sharma, K.V., *Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe₃O₄ magnetic nanofluid inside a plain tube: An experimental study*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55 (2012) pp 2761–2768.
- [15] Blasius, H., *Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung (German)*, Z. Math. Phys, 56 (1908) pp 1–37.
- [16] Fakoor Pakdaman, M., Akhavan-Behabadi, M.A., Razi, P., *An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes*, Experimental Thermal and Fluid Science, 40 (2012) pp 103–111.
- [17] Abbasian Arani, and A.A., Amani, J., *Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-Water nanofluid*, Experimental Thermal and Fluid Science, 44 (2013) pp 520–533.

h	ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی	(W/m ² .K)
f	ضریب اصطکاک	
P	محیط مقطع لوله (m)	
ρ	چگالی (kg/m ³)	۱-۷- علائم یونانی
μ	لزجت (Pa.s)	
η	ضریب کارایی گرمایی	
φ	کسر حجمی	
Δp	افت فشار pa	۲-۷- زیر نویس
bf	سیال پایه	
p	نانو ذرات	
nf	نانو سیال	

مراجع

- [1] Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., *Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of g-Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ ultra-fine particles)*, Netsu Bussei, Vol 7, 1993, pp 227–233
- [2] Choi, S.U.S., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, The Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED, 231/MD, Vol 66, 1995, pp99–105
- [3] Pak, B.C., and Cho, Y., *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle*, Experimental Heat Transfer, 11 (1998) 151–170.
- [4] Xuan, Y., and Li, Q., *Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids*, Journal of Heat Transfer, 125 (2003) pp 151–155.
- [5] Wen, D., and Ding, Y., *Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluid at the entrance region under laminar flow conditions*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) pp 5181–5188.
- [6] Heris, S.Z., Etemad, S.G., Esfahany, M.N., *Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer*, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 33 (2006) 529.
- [7] Heris, S.Z., Esfahany, M.N., Etemad, S.G., *Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/Water nanofluid in circular tube*, Int. J. Heat Fluids Flow, 28 (2) (2007) 203.