

بررسی تجربی معیارهای مختلف قضاوت گرمایی نانوسیالات در رژیم جریان لایه‌ای در مبادله‌کن گرمایی پره‌دار

رامین ساجدی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محرّم جعفری*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

این تحقیق به پیدا کردن یک معیار مناسب برای قضاوت گرمایی در مورد نانوسیالات اختصاص داده شده است. اهمیت این مسئله از گمراه کننده بودن، ادعای وجود انتقال گرمای بیشتر برای نانو سیال در مقایسه با سیال پایه، در صورت غفلت از اثرات هیدرولیک مانند افزایش افت فشار، ناشی می‌شود. برای روشن شدن موضوع، دستگاه تجربی با توانایی ایجاد معیارهای عدد رینولدز ثابت و توان پمپاژ ثابت ساخته شده و رفتار گرمایی نانوسیال اکسید سیلیسیم / آب و آب مقطر در رژیم جریان لایه‌ای و در ناحیه‌ی در حال توسعه هیدرولیکی و گرمایی بررسی شده است. در این راستا، ضریب انتقال گرما در داخل مبادله‌کن گرمایی لوله پره دار ارزیابی شده است، نتایج برای دماهای مختلف ورودی و غلظت های مختلف نانو سیال برای هر دو معیار عدد رینولدز ثابت و توان پمپاژ ثابت ارائه گردیده است. مطابق نتایج ارائه شده، میزان غلظت نانوذرات در سیال پایه تاثیر بسیار زیادی بر مقدار انحراف این دو معیار خواهد داشت به نحوی که هر قدر غلظت نانوسیال مورد استفاده بیشتر باشد، میزان اختلاف بین این دو معیار نیز بیشتر خواهد شد و لذا در این کار به دلیل غلظت پائین نانوسیال، استفاده از هریک از معیار ها تفاوت قابل توجهی در نتایج بدست آمده ایجاد نکرده است.

واژه‌های کلیدی: مطالعه تجربی، نانوسیال، عدد رینولدز، توان پمپاژ ثابت، مبادله کن گرما.

An Experimental Study of Different Criteria for Laminar Thermal Judgment of Nanofluids in a Finned Heat Exchanger

R. Sajedi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. Jafari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

This work is devoted to find an appropriate criterion for thermal judging of nanofluids. The importance of this issue arises from the possible misleading which asserts an existence of extra heat transfer for nanofluid compared to the base fluid, neglecting the hydraulic effects such as increasing the pressure drop. To clarify the issue, an experimental apparatus with ability of making fixed Reynolds number and constant pumping power was constructed and thermal behavior of silicon oxide/ water nanofluid and distilled water are investigated in the laminar and developing regions. In this regard, heat transfer coefficient inside the finned air cooled heat exchanger is evaluated. Results are provided for different inlet temperatures and different nanofluid concentrations for two criteria of fixed Reynolds number and constant pumping. According to the results, the concentration of the nanoparticles in the base fluid will have a huge impact on the amount of deflection of these two measures, so that by increasing the concentration of nanofluids, the difference between these two measures becomes greater, hence in this work due to the low concentration of nanofluids, the use of any of the criteria did not make a significant difference in the results.

Keywords: Experimental study, nanofluid, Reynolds number, Pumping power, Heat exchanger.

۱-مقدمه

نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از نانو ذرات بطور قابل ملاحظه‌ای عملکرد انتقال گرمای سیالات رایج را بهبود می‌بخشد و این در حالی است که ضریب اصطکاک این نانوسیالات تغییر زیادی نسبت به سیال پایه پیدا نکرده‌است. نهایتاً رابطه جدیدی برای پیش‌بینی ضریب انتقال گرمای نانوسیال برای دو حالت رژیم جریان لایه‌ای و متلاطم ارائه شده است. عملکرد انتقال گرمای جابجایی نانوسیالات گرافیتی تحت شرایط رژیم جریان لایه‌ای جاری در لوله مدور نیز بطور آزمایشگاهی توسط یانگ [۳] مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نانو ذرات، ضریب انتقال گرمای سیال را در رژیم جریان لایه‌ای افزایش می‌دهند. اما این افزایش بسیار کمتر از پیش‌بینی روابطی بود که بر اساس اندازه‌گیری های استاتیکی رسانش گرمایی بدست آمده بودند. زینالی هریس و همکاران [۴] در یک مطالعه تجربی، ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال پایه (آب) و نانوسیال آلومینا/آب را تحت شرایط

نیاز به خنک کاری در صنعت همیشه بعنوان یکی از بزرگترین دغدغه های مهندسان بوده است. با پیشرفت صنعت و استفاده از تجهیزات در صنایع مختلف میزان تولید گرما در واحد سطح به طور مداوم افزایش یافته‌است و محققین در تلاش هستند تا با استفاده از روش های مختلف بیشینه خنک کاری را در کمترین فضای ممکن برقرار نمایند. که در این راستا استفاده از نانو سیالات بعنوان یکی از قابل دسترس ترین روش ها اهمیت ویژه‌ای در میان محققین پیدا کرده است و تحقیقات زیادی در سالهای اخیر بر روی این موضوع انجام گرفته است. لی و خوان [۱-۲] در یک مطالعه آزمایشگاهی به تحقیق در مورد انتقال گرمای جابجایی و خواص نانو سیال آب-مس جاری در یک لوله با شرط مرزی شارگرمایی ثابت و تحت شرایط رژیم لایه‌ای و متلاطم پرداختند.

دما ثابت در لوله مورد مطالعه قرار داده‌اند. شش غلظت حجمی در بازه‌ی (۰/۲-۰/۵) و عدد رینولدز (۲۰۵۰-۷۰۰) برای نانوسیال آلومینا مورد آزمایش قرار گرفته است. طبق نتیجه گیری انجام شده در این کار، روابط معمول مورد استفاده برای محاسبه ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال در لوله با شرط مرزی دما ثابت، در پیش بینی مقدار محاسبه ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال ناموفق عمل می‌کند. همچنین لازم بذکر است که تمامی نتایج در این مقاله به ازای عدد پکلت یکسان برای سیال پایه و نانوسیال ارائه شده‌اند.

انوپ و همکارانش [۵] به بررسی تجربی تاثیر اندازه نانوذرات بر مقدار ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال آلومینا/آب در جریان لایه‌ای و در ناحیه ی در حال توسعه پرداخته‌اند. در این کار نانوذرات آلومینا در دو اندازه ی ۴۵ و ۱۵۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر پایه نتایج بدست آمده، استفاده از نانوذرات با اندازه کوچکتر افزایش بیشتری در ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال نسبت به سیال پایه ایجاد می‌کند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات به سیال پایه در ناحیه در حال توسعه، تاثیر بیشتری بر افزایش ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال پایه، نسبت به ناحیه‌ی توسعه یافته‌دارد. دیگر نتیجه قابل تامل در این مطالعه تصدیق توانایی، روابط تئوری محاسبه ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال تک فاز، در پیش بینی این ضریب برای نانوسیال می‌باشد. ضمناً در این مقاله تمام نتایج به ازای رینولدز ثابت ارائه گردیده‌است.

هوانگ و همکاران [۶] افت فشار و ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم جاری در یک لوله‌ی گرمایی مدور یکنواخت را تحت شرایط رژیم جریان لایه‌ای کاملاً توسعه یافته اندازه‌گیری کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، که ضریب اصطکاک نانوسیال بطور تحلیلی می‌تواند با معادله‌ی داری که برای جریان‌های تک فاز استفاده می‌شود پیش‌بینی شود. از طرف دیگر ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی نانوسیالات در تراکم حجمی ذرات ۰/۳/۰/۳ افزایشی ۰/۸ نسبت به سیال پایه خالص نشان داد. و این میزان افزایش با معادله شاه قابل پیش بینی است.

اخیرا اسماعیل زاده و همکاران [۷] خواص انتقال گرمای نانو ذرات اکسید آلومینیم را در آب بصورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها با اعمال شار ثابت در طول یک لوله یک متری میزان ضریب انتقال گرمای جابجایی این سیال را در اعداد رینولدز مختلف در رژیم لایه‌ای بررسی نمودند. آنها همچنین میزان افت فشار در حضور نانو ذرات مختلف را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که با افزایش درصد نانو ذرات ضریب انتقال گرمای جابجایی افزایش یافته و نیز این افزایش انتقال گرما در ورودی بسیار محسوس تر می‌باشد. نتایج نشان داد که افت اصطکاک در منطقه مورد مطالعه در حضور و بدون حضور نانو ذرات تفاوت چندانی پیدا نکرده است. از نتایج آنها رابطه تجربی برای درصد های مختلف نانو ذرات اکسید آلومینیم در شار های گرمایی متفاوت ارائه گردید. در ادامه اسماعیل زاده و همکاران [۸] با استفاده از نوار ماریپیچ بکار گرفته در داخل لوله افقی مورد مطالعه، تاثیرات ضخامت نوار، زاویه ماریپیچ نوار و افت های اصطکاک را در این حالت مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافته‌اند که افزایش انتقال گرما در حالت استفاده از نوار ماریپیچ بسیار بالاتر از حالت بدون نوار بوده ولی در مقابل به دلیل استفاده از نوار

ماریپیچ افت اصطکاک محسوسی در سیستم مشاهده گردید. نهایتاً رابطه تجربی نیز برای این حالت ارائه گردید.

با توجه به اینکه در کار حاضر به بحث و بررسی خواص انتقال گرمایی اکسید سیلیسیم (سیلیکا) پرداخته شده‌است. در ادامه مروری بر کارهای انجام شده به صورت اختصاصی در حوزه نانو سیلیکا ارائه شده است. فروبیلت و همکاران در سال [۹] به تاثیر فاکتور شکل در نانو ذرات اکسید سیلیسیم و اکسید روی با سیال پایه آب پرداختند. آنها در دو دمای کاری ۲۰°C و ۵۰°C و در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۵۰۰۰ به بررسی تاثیرات افت اصطکاک و خواص انتقال گرمایی در حالت گرمایش و سرمایش پرداختند. نتایج حاکی از افزایش جزئی در عدد ناسلت نانو سیال نسبت به سیال پایه آب می‌باشد. یک معیار ارزیابی عملکرد انرژی بر مبنای مقایسه آهنگ انتقال گرما در مقابل افزایش قدرت پمپ تعریف شد. دیده شد که تنها نانو ذرات اکسید روی با ضریب شکل بزرگتر از ۳ به مقدار بالایی از معیار ارزیابی عملکرد انرژی همانند آب دست پیدا کردند.

ازمی و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی انتقال گرمای اجباری و نیز ضریب افت اصطکاک در رژیم جریان مغشوش در حضور نانو ذرات اکسید سیلیسیم پرداختند. آنها نتایج خود را در اعداد رینولدز بین (۲۷۰۰-۵۰۰۰) در دمای بالک ۳۰°C گزارش کردند. با توجه به نتایج بدست آمده دیده شد که در حضور نانو ذرات با درصد حجمی ۳٪ میزان افزایش انتقال گرما و ضریب افت اصطکاک به ترتیب ۳۲٪ و ۱۷٪ درصد افزایش یافت. آنها دریافته‌اند که ضریب افت اصطکاک تا ۱۷٪ درصد حجمی ۳٪ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی درصد های ذرات با افزایش عدد رینولدز این ضریب کاهش پیدا میکند.

درزی و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی انتقال گرما و خواص نانو سیال سیلیکا در رژیم جریان مغشوش در لوله های ماریپیچ دار پرداختند. آنها در کار خود از ذرات نانو سیلیکای ۳۰ نانو متری استفاده کردند. آنها آزمایشات خود را برای لوله ساده و ۵ لوله با گام های پیچ و ارتفاع های متفاوت انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از لوله با زاویه ماریپیچ پایین و ارتفاع بالا افزایش انتقال گرمای قابل ملاحظه ای را نسبت به افت اصطکاک ناچیز داشته است و این مقوله در مورد عدد ناسلت نسبی و کارایی مبادله‌کن های گرمایی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

جوادی و همکاران [۱۲] به بررسی خواص نانو سیالات در مشخصات ترموفیزیکی و انتقال گرمایی در مبادله‌کن های گرمایی صفحه ای پرداختند. آنها خواص ترموفیزیکی و انتقال گرمایی نانو سیالات حاوی نانو ذرات اکسید سیلیسیم و اکسید تیتانیم و اکسید آلومینیم را در داخل مبادله کن گرمایی صفحه ای با سیال پایه آب مقایسه نمودند. از آنجایی که هدف به حداقل رساندن میزان افت فشار بود بنابراین تاثیرات افت فشار و افزایش انتالیپی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده میزان افزایش انتقال گرمای اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیم افزایش انتقال گرما بهتری را نسبت به اکسید سیلیسیم نشان دادند. ضریب انتقال گرمایی در حدود ۳۰۸ وات بر متر کلون در ۰/۲٪ حجمی اکسید آلومینیم به عنوان بالاترین ضریب انتقال گرما دیده شد. این افزایش انتقال گرما در حدود ۳۰٪ بیشتر از افزایش انتقال گرمای

اکسید سیلیسیم بوده ولی ضریب افت اصطکاکی اکسید سیلیسیم ۵۰٪ کمتر از ضریب افت در نانو ذرات دیگر بدست آمد.

ابراهیمی و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی انتقال گرمای اجباری در رادیاتور خودرو در حضور نانو ذرات اکسید سیلیسیم پرداختند. آنها تاثیرات دمای ورودی، نرخ جریان سیال و نیز درصد های حجمی متفاوت نانو ذرات را در انتقال گرما رادیاتور مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای ورودی، افزایش عدد رینولدز و نیز افزایش درصد های حجمی نانو ذرات عدد ناسلت افزایش می یابد.

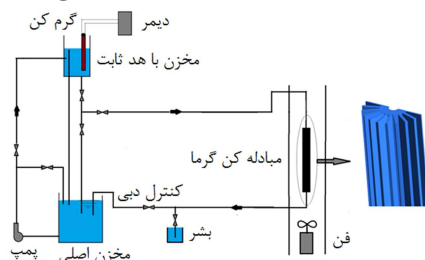
محققین آزمایشگاه ملی آرگون در مقاله ای [۱۴] موضوع معیار صحیح مقایسه بین نانوسیال و سیال پایه را به طور خاص مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله سه معیار برای سنجش میزان تاثیرگذاری استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه در امر افزایش انتقال گرمای جابه جایی سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق نتیجه گیری ارائه شده در این مقاله، استفاده از معیار عدد رینولدز یکسان بین سیال پایه و نانوسیال برای سنجش انتقال گرمای جابه جایی یک معیار نادرست می باشد. ولی استفاده از معیار سرعت ثابت می تواند تا حدود قابل قبول باشد. در این تحقیق استفاده از معیار توان پمپاژ یکسان برای نانوسیال و سیال پایه به عنوان تنها معیار کاملاً صحیح برای مقایسه معرفی شده است.

حقیقی و همکاران [۱۵] نیز در یک مطالعه تجربی با استفاده از چهار معیار، عدد رینولدز یکسان، سرعت یکسان، دبی جرمی یکسان و نهایتاً توان پمپاژ یکسان، تاثیرگذاری استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه برای افزایش انتقال گرما را ارزیابی کرده اند. در این مطالعه سه نوع نانوسیال، آلومینا/آب، تیتانیوم اکسید/آب و سلنیوم اکسید/آب در غلظت جرمی ۹٪ مورد آزمایش قرار گرفته اند. طبق نتایج ارائه شده، رابطه ی شاه که برای پیش بینی عدد ناسلت و ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال معمولی در رژیم جریان لایه ای و تحت شرایط شار گرمایی ثابت در لوله مورد استفاده قرار می گیرد در پیش بینی ضریب انتقال گرما جابه جایی هر سه نوع نانوسیال مورد آزمایش در این مطالعه نیز موفق عمل می کند، همین موضوع در مورد رابطه داری برای پیش بینی ضریب اصطکاک این نانوسیالات صادق است. در این مقاله نیز معیار عدد رینولدز یکسان برای سنجش ضریب انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه مردود دانسته شده است و معیار توان پمپاژ یکسان به عنوان بهترین معیارهای مقایسه معرفی شده اند. همین گروه در مقاله ی دیگری [۱۶] به مطالعه ی تاثیر استفاده از نانوذرات سیلیسیم کاربرد آلفا در سیال پایه ی آب و نیز سیال پایه ی (آب+اتیلن گلیکول) برای افزایش ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیالات پایه ی مذکور، در رژیم جریان لایه ای پرداخته اند. سه غلظت ۳٪، ۶٪ و ۹٪، در این کار مورد آزمایش قرار گرفته اند و مطابق نتایج ارائه شده میزان افزایش ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال سیلیسیم کاربرد آلفا در غلظت ۹٪ و در سیال پایه (آب+ اتیلن گلیکول) نسبت به همین سیال پایه، به ازای عدد رینولدز یکسان ۱۳٪، به ازای دبی حجمی یکسان ۸/۵٪ و به ازای توان پمپاژ یکسان نانوسیال و سیال پایه ۵/۵٪ برآورد شده است. نتیجه گیری نهائی این کار، استفاده از معیار توان پمپاژ یکسان برای مقایسه میزان انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه است. در مقاله حاضر و به منظور بدست آوردن معیار صحیح مقایسه ای، نتایج حاصل از ثابت در نظر گرفتن توان پمپاژ نانوسیال و سیال پایه، با نتایج حاصل از یکسان منظور کردن عدد

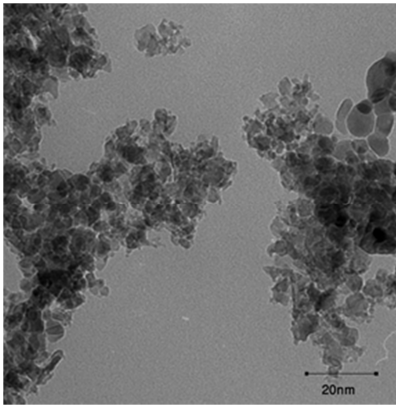
رینولدز آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نانوذرات اکسید سیلیسیم در سیال پایه آب و در رژیم جریان لایه ای و در ناحیه در حال توسعه هیدرولیکی و گرمایی، مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج تجربی برای نانوسیال اکسیدسیلیسیم/آب در دو غلظت مختلف با نتایج سیال پایه آب مقطر در چهار دمای کاری متفاوت مورد مقایسه قرار گرفته اند.

۲- چیدمان آزمایشگاهی

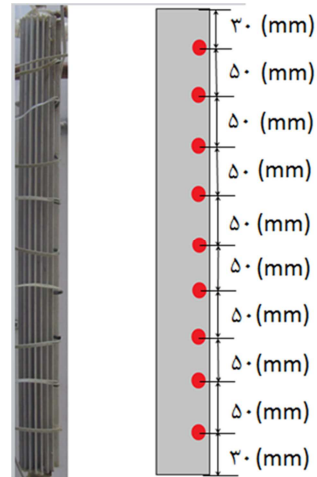
سیستم تجهیزات آزمایش برای اندازه گیری انتقال گرمای جابه جایی بصورت آزمایشگاهی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. تجهیزات استفاده شده در این آزمایش شامل پمپ، قسمت آرام سازی جریان، قسمت سرمایش عمودی مبادله کن لوله پره دار طولی، قسمت رایزر، یک مخزن جمع آوری، هیتر، دیمپر و یک مخزن اصلی می باشد. یک مخزن ۲/۵ لیتری از جنس پلاستیکی به عنوان مخزن اصلی سیال استفاده شده است. سیال مورد نظر از مخزن اصلی به درون سیستم پمپاژ می شود. پمپی که در این قسمت استفاده شده است، یک پمپ پلاستیکی می باشد که حداکثر دبی جریان و هد آن به ترتیب برابر با ۵۲۰۰ لیتر بر ساعت و ۳/۵ متر، می باشد. به منظور کنترل دبی جریان، یک مسیر برگشت با یک شیر در خروجی پمپ نصب شده است. جهت رفع تاثیرات ورودی، قسمت آرام سازی در ارتفاع ۱۷۳۰ میلی متر بالاتر از مخزن اصلی تعبیه شده و برای ایجاد گرمایش در سیستم، از یک هیتر ۲۰۰۰ وات در مخزن آرامش استفاده شده است و تنظیم توان گرمایش هیتر با استفاده از دیمپر انجام میگیرد. مخزن بالا بوسیله لوله ی مسی عایق بندی شده با استفاده از پشم شیشه، به مبادله کن لوله پره دار عمودی متصل گردیده است. ۹ عدد حسگر دمایی از نوع، SMT - 160، در فاصله مکانی مشخص در راستای طولی روی دیواره ی مبادله کن لوله پره دار عمودی مطابق شکل (۲) نصب شده است که توسط آنها توزیع دمای دیواره بدست می آید، ضمن اینکه مشخصات دقیق هندسی مبادله کن مذکور در شکل (۳)، ارائه گردیده است. دمای ورودی و خروجی سیال نیز با استفاده از ترموکوپل هایی که در ابتدا و انتهای مبادله کن قرار گرفته اند اندازه گیری می شود. تمامی اطلاعات سنسورها با استفاده از سیستم کامپیوتری ثبت داده ها هر ۲۰ ثانیه یکبار ذخیره می گردد. همچنین یک فن خنک کننده با دبی هوادهی ۵۰۰ (مترمکعب بر ساعت) به همراه یک مجرا از جنس پلکسی گلس با سطح مقطع ۱۳/۵ × ۱۳/۵ (سانتی متر) بر روی آن تعبیه شده که جریان هوا را در راستای طولی مبادله کن، بر روی آن می دمد. سیال پس از عبور از قسمت آزمایش وارد قسمت رایزر شده و در انتهای آن، دبی حجمی جریان با استفاده از ثبت زمان لازم برای پر شدن بشر محاسبه می گردد و با عبور از این ناحیه نهایتاً سیال به قسمت مخزن اصلی وارد می شود.



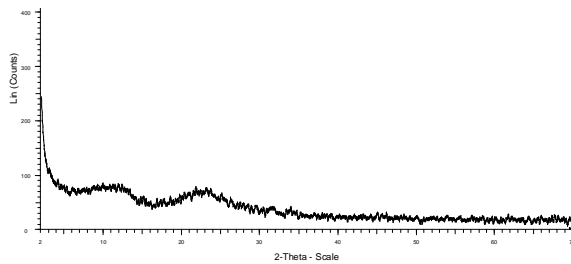
شکل ۱- طرحواره چیدمان آزمایشگاهی



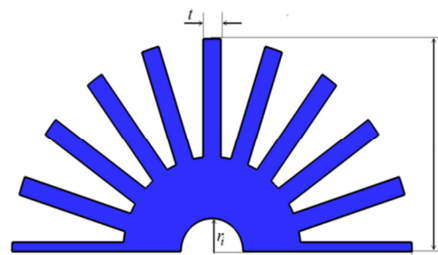
شکل ۴- تصویر TEM نانو ذرات اکسید سیلیسیم



شکل ۲- موقعیت نصب ترموکوپل ها



شکل ۵- نمودار XRD نانو ذرات اکسید سیلیسیم



شکل ۳- مشخصات هندسی مبادله‌کن گرمایی لوله پره‌دار

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال با استفاده از روابط زیر بدست

آمده است :

$$(\rho)_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (۱)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_{bf} + \phi(\rho c_p)_p \quad (۲)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_{bf} \quad (۳)$$

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi_p(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi_p(k_p - k_{bf})} k_{bf} \quad (۴)$$

رابطه ۱ و ۲ با استفاده از روابط کلاسیک موجود برای مخلوط مایع-جامد بدست آمده است و به عنوان روابط اصلی برای محاسبه چگالی و گرمای ویژه در بسیاری از ادبیات فن نانوسیال مورد استفاده قرار می‌گیرد به نحوی که تقریباً در تمام مراجع ذکر شده در این مقاله این دو رابطه استفاده شده‌اند.

مشخصات هندسی مبادله‌کن گرمایی لوله پره‌دار

ضخامت پره	t	۲(mm)
شعاع داخلی	r_i	۳/۵(mm)
شعاع خارجی	r_c	۲۲/۵ (mm)
طول پره	l	۱۲(mm)

اما در مورد روابط مورد استفاده برای محاسبه ی ضریب رسانایی گرمایی موثر نانوسیال و لزجت موثر نانوسیال اتفاق نظر بین محققین کمتر است و با وجود اینکه رابطه ماکسول (۴) و انیشتن- بچلر (۳)، بیش از یک قرن پیش ارائه شده‌اند ولی در بیشتر مقالات دهه اخیر استفاده از نتایج حاصل از اندازه گیری های تجربی جایگزین استفاده از این روابط شده است. در عین حال تحقیقات اخیر دانشمندان که با همکاری نزدیک

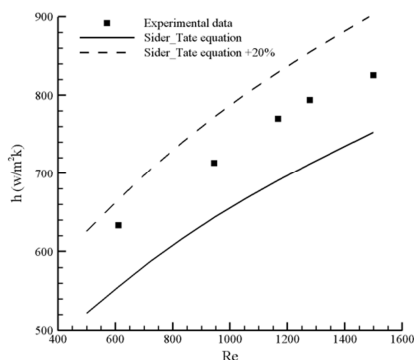
آماده سازی مناسب نانوسیال نقش برجسته ای در صحت نتایج بدست آمده در مطالعات آزمایشگاهی نانوسیالات دارد و از طرفی پایداری سوسپانسون و خواص ترموفیزیکی آن شدیداً به اندازه ذرات، شکل ذرات، نوع ذرات و خواص فیزیکی نانو ذرات وابسته است. در این تحقیق آزمایشگاهی از نانوذرات اکسید سیلیسیم با اندازه‌ی متوسط ذرات ۲۵ نانومتر، و مشخصات فیزیکی ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردیده است. در شکل (۴) تصویر TEM نانوذرات اکسید سیلیسیم ارائه شده و چنانچه در تصویر نیز مشخص است اندازه نانوذرات بین ۲۰ تا ۳۰ نانومتر گزارش شده است. و نیز با توجه به نمودار XRD گرفته شده که در شکل (۵) نشان داده شده است، مشخص است که نانوذرات از نوع آمورفوس می-باشند. جهت پایداری نانوسیال از پراکنده‌ساز FUNGILAB با توان ۲۴۰ (w) و فرکانس ۵۰ (Hz) و همزن مغناطیسی استفاده شده به نحوی که نانوسیال ابتدا به مدت نیم ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط شده و سپس به مدت ۳ ساعت در معرض امواج فراصوتی قرار داده شده است، ضمناً در تهیه نانوسیال از هیچ گونه ماده فعال کننده سطحی استفاده نشده است و در PH سوسپانسیون نیز تغییری ایجاد نگردیده است.

جدول ۱- خواص نانوسیال اکسید سیلیسیم

نوع نانو ذرات	ضریب رسانش $(\frac{w}{mk})$	چگالی $(\frac{Kg}{m^3})$	گرمای ویژه $(\frac{J}{Kg k})$
اکسیدسیلیسیم	۱/۴	۲۲۲۰	۷۴۵

که T_b دمای متوسط توده سیال، T_w متوسط دمای سنسور های روی دیواره لوله ها و \dot{m} دبی جرمی سیال عبوری از مبادله کن است. در ضمن تمام خواص ترموفیزیکی مورد استفاده در روابط فوق در دمای متوسط حجمی سیال بدست آمده اند.

به منظور معتبرسازی نتایج تجربی حاصل از سیستم آزمایشگاهی، پارامتر ضریب انتقال گرمای جابه جایی حاصل از معادله ی سایدِر-تیت با مقادیر بدست آمده این پارامتر از آزمایش مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده است. دیده می شود که تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی با نتایج معادله (سایدِر-تیت) برای ضریب انتقال گرمای جابه جایی وجود دارد به نحوی که تقریباً تمام داده های تجربی در محدوده ی خطا کمتر ۱۵٪ نسبت به معادله ی مورد مقایسه، قرار دارند.



شکل ۶- نتایج تجربی و معادله ی سایدِر-تیت در دمای کاری ۶۰°C

۳-۳- آنالیز عدم اطمینان

آنالیز عدم اطمینان پارامترهای اندازه گیری شده در انجام مطالعه تجربی را می توان به دو دسته ی، پارامترهای مستقل و پارامترهای وابسته تقسیم بندی کرد. "عدم اطمینان" در پارامترهای وابسته، تابعیت از مقدار عدم اطمینان در پارامترهای مستقل. لذا برای محاسبه عدم اطمینان پارامتر وابسته ای مثل R که تابعیت از چندین پارامتر مثل (X_i) از رابطه ی ۱۳ استفاده شده است [۲۱]:

$$u_R = \sqrt{\left[\left(\frac{X_1}{R} \frac{\partial R}{\partial X_1} u_{X_1} \right)^2 + \left(\frac{X_2}{R} \frac{\partial R}{\partial X_2} u_{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{X_n}{R} \frac{\partial R}{\partial X_n} u_{X_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

ضمناً لازم بذکر است که عدم اطمینان مربوط به خواص فیزیکی با استفاده از روش ارائه شده توسط بکویث [۲۲] تخمین زده شده است. در جدول ۲ مقادیر عدم اطمینان پارامترهای محاسبه شده با استفاده از رابطه ی ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر عدم اطمینان

نام متغیر	مقدار عدم اطمینان برحسب درصد
گرما	۱/۲۲
سرعت	۰/۳۱۲
عدد رینولدز	۰/۴۳۲
ضریب انتقال گرمای جابه جایی متوسط	۴/۷۷
عدد ناسلت متوسط	۴/۷۷۳

به ۳۰ آزمایشگاه از اقصی نقاط جهان، توسط INPBE^۱ بمورد اجرا گذاشته شد، نشان داد که رابطه کلاسیک ماکسول تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. لازم بذکر است که نتایج ارائه شده توسط INPBE فقط برای دمای ۲۵°C ارائه شده است [۱۷]. تیموفووا و همکاران [۱۸] و نیز حقیقی و همکاران [۱۵] با انجام تست تجربی و تغییر دمای نانوسیال نشان داده اند که رابطه ماکسول با تغییر دما نیز کماکان ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند. در مورد رابطه انیشتین-بچلر نیز میتوان اشاره کرد که برای نانوسیالات رقیق (کمتر از ۱/۵٪) این رابطه با دقت قابل لزجت نانوسیال را پیش بینی میکند ولی در غلظت های بالاتر انحراف قابل توجهی نسبت به مقادیر تجربی پیدا می کند.

در مطالعه حاضر با توجه به استفاده از نانوسیالات رقیق ($\phi \leq 1$) از رابطه انیشتین-بچلر برای محاسبه ی لزجت نانوسیالات استفاده گردیده است.

۳-۲- صحت سنجی نتایج تجربی

معادله سایدِر-تیت [۱۹] برای پیش بینی ضریب انتقال گرمای جابه جایی متوسط در جریان لایه ای در یک مجرای دایروی و در ناحیه ی در حال توسعه همزمان هیدرولیکی و گرمایی، با شرط دمای ثابت دیواره، بصورت زیر ارائه گردیده است:

$$\overline{Nu} = 1.86 \left(Re Pr \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{bf}}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu_{bf}} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu_{bf} C_{pf}}{K_{bf}} \quad (7)$$

که در آن μ_w و μ_{bf} به ترتیب لزجت در دمای توده سیال و دمای دیواره، ρ چگالی سیال، V سرعت در داخل مجرا، C_{pf} گرمای ویژه سیال در فشار، k ضریب رسانایی گرمایی سیال و D_h و L نیز به ترتیب قطر هیدرولیکی و طول لوله هستند.

کیز و کرافورد در مرجع [۲۰] اشاره کرده اند که در مبادله کن های گرمایی در شرایطی که در آن یکی از سیالات دارای شدت ظرفیت گرمایی ($\dot{m}c$) بیشتر از دیگری باشد حالتی مشابه با شرط دیواره ی دما ثابت ایجاد می شود لذا در این مطالعه نیز با توجه به اختلاف نسبتا زیادی که بین شدت ظرفیت گرمایی هوای خنک کننده و آب گرم وجود دارد این رابطه با تقریب مناسبی قابل استفاده می باشد.

به منظور بدست آوردن مقدار ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال و همچنین عدد ناسلت متناظر آن، در قسمت داخلی لوله ی مبادله کن گرمایی و مقایسه ی آن با نتایج حاصل از رابطه ی سایدِر-تیت از روابط زیر استفاده شده است:

$$Q = hA\Delta T = hA(T_{bf} - T_w) \quad (8)$$

$$T_w = \frac{\sum_{i=1}^{10} T_i}{10} \quad (9)$$

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (10)$$

$$Q = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out}) \quad (11)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{K_{bf}} \quad (12)$$

¹International Nano particle bench mark

۳-۴- مقایسه انتقال گرمای جابه جایی نانوسیالات با سیال پایه در عدد رینولدز یکسان

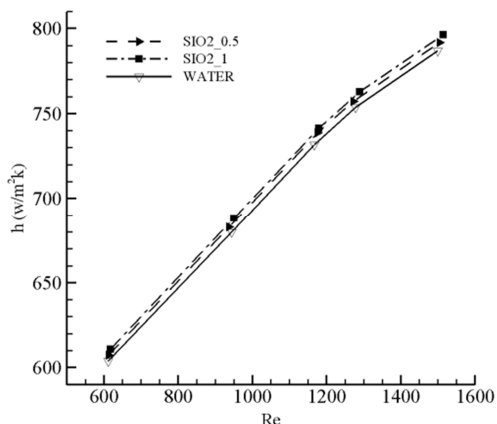
به طور کلی در ادبیات فن نانوسیالات چهار معیار، عدد رینولدز یکسان، سرعت یکسان، دبی جرمی یکسان و توان پمپاژ یکسان برای سیال پایه و نانوسیال به عنوان مبنای مقایسه ی این دو نوع سیال مورد استفاده قرار گرفته است. که در بین این چهار معیار، ارائه نتایج بر مبنای عدد رینولدز یکسان سهم بسیار بیشتری نسبت به سایر معیارها داشته است. بنابراین در این قسمت نتایج مقایسه ی ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیالات اکسیدسیلیسیم/آب نسبت به سیال پایه ارائه گردیده است. مقایسه انجام شده بین آب و نانوسیال اکسید سیلیسیم/آب در دو غلظت (۱/۵ و ۰/۵) در چهار دمای کاری ۷۰°C، ۶۰°C، ۵۰°C، ۴۰°C در شکل ۷ نشان داده شده است.

چنانچه در شکل (۷) دیده می شود افزایش محسوس یا قابل توجهی در مقدار ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال پایه در صورت افزودن نانوذرات اکسید سیلیسیم با غلظت کمتر از ۱٪، ایجاد نمی شود. همچنین مطابق نتایج ارائه شده نکته قابل توجه دیگری که بوضوح دیده می شود تطابق قابل قبول بین نتایج تجربی نانوسیال و نتایج پیش بینی شده ی رابطه سایدر- تیت برای نانوسیال است. برای استفاده از این رابطه، خواص موثر نانوسیال برای محاسبه ی مقادیر Pr ، Re و ویسکوزیته طبق معادلات ۱۳ و ۱۴ استفاده شده است.

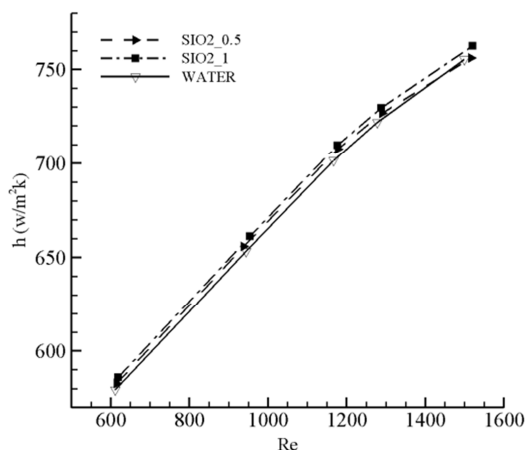
$$Re = \frac{\rho_{nf} V D_h}{\mu_{nf}} \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\mu_{nf} C_{nf}}{K_{nf}} \quad (14)$$

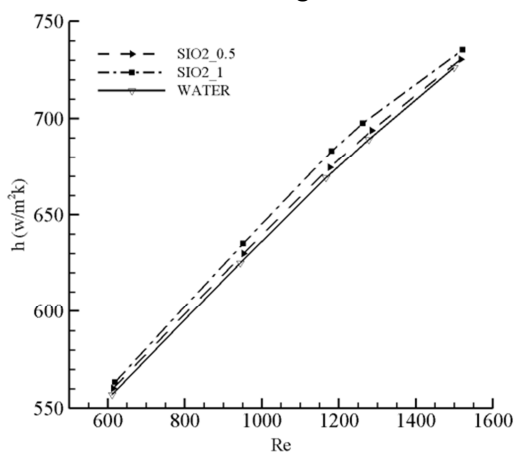
بنابراین در توافق با نتیجه گیری انجام شده توسط بونجیورنو و همکاران [۲۳] و همینطور حقیقی و همکاران [۱۵]، در کار حاضر نیز می توان نتیجه گرفت که استفاده از روابط معمول برای پیش بینی مقدار ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیالات عادی، در صورت اصلاح خواص، برای نانوسیالات نیز با دقت بالایی قابل استفاده می باشد. البته لازم به توضیح است که این نتیجه گیری تا زمانی که نانوسیال رفتار نیوتنی دارد قابل استناد است و در غیر این صورت نیاز به بررسی های بیشتری خواهد داشت.



(ب)



(ج)

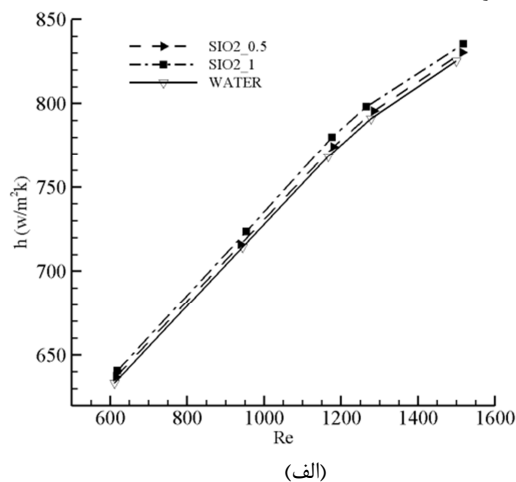


(د)

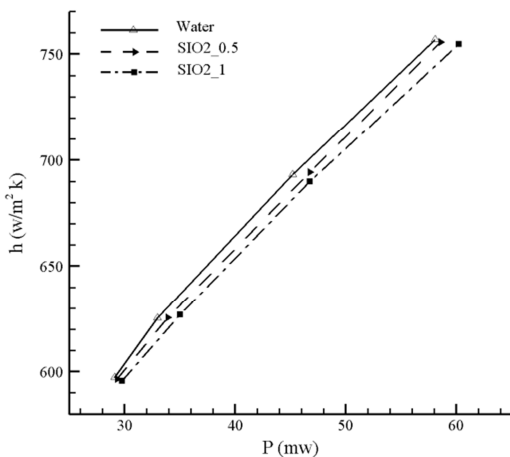
شکل ۷- ضریب انتقال گرمای جابه جایی اکسید سیلیسیم/آب با آب مقطر به ازای عدد رینولدز ثابت، الف) ۴۰°C، ب) ۵۰°C، ج) ۶۰°C، د) ۷۰°C

۳-۵- مقایسه انتقال گرمای جابه جایی نانوسیالات با سیال پایه در توان پمپاژ یکسان

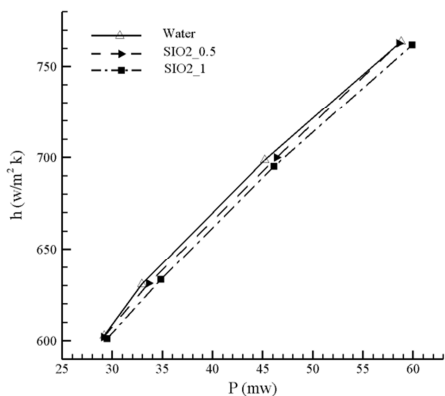
در شکل ۸ مقادیر ضریب انتقال گرمای جا به جایی اکسیدسیلیسیم/آب با غلظت ها و دماهای کاری، اشاره شده در بالا، نمایش داده شده اند، اما این بار توان پمپاژ نانوسیالات و سیال پایه (آب) یکسان در نظر گرفته



(ه)



(ج)



(د)

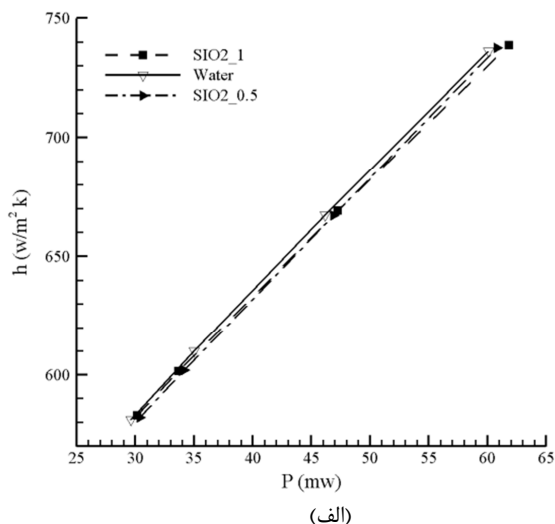
شکل ۸- ضریب انتقال گرمای جابه جایی اکسید سیلیسیم / آب با آب مقطر به ازای توان پمپاژ ثابت ثابت، الف) 40°C ، ب) 50°C ، ج) 60°C ، د) 70°C

با دقت در نمودارهای ارائه شده در دو قسمت قبلی بوضوح قابل تشخیص است که تفاوت قابل توجهی بین نتایج استفاده از معیار عدد رینولدز یکسان و توان پمپاژ یکسان وجود ندارد، به منظور روشن تر شدن اختلاف ناچیز بین دو معیار جدول ۳ مقدار اختلاف بین ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیالات و سیال پایه را که بصورت حاصل تقسیم اختلاف بین ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال و سیال پایه بر مقدار این ضریب در سیال پایه بدست آمده است، در دمای کاری 50°C به صورت کمی نمایش می دهد. و لذا اینگونه به نظر می رسد که شدت اختلاف ارائه شده بین این دو معیار در کار حاضر بسیار کمتر از دو مطالعه انجام شده توسط حقیقی و همکاران و نیز یو و همکاران می باشد. حقیقی و همکاران [۱۵]، انواع مختلفی از نانوسیالات را در کار خود مورد استفاده قرار داده اند که ویژگی مشترک بین تمام آنها غلظت بالای نانوذرات داخل سیال پایه می باشد به نحوی که آنها اغلب

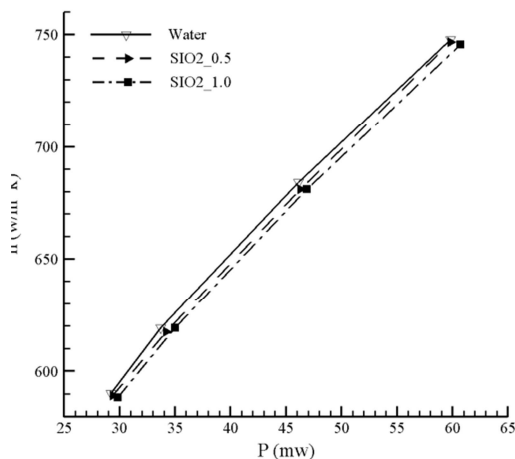
شده است. به منظور محاسبه ی محاسبه توان پمپاژ سیال، از رابطه ۱۵، بصورت زیر استفاده شده است:

$$P = \dot{V} \Delta P \quad (15)$$

که در این رابطه \dot{V} دبی حجمی سیال است توان پمپاژ بر حسب میلی وات می باشد. در معیار توان پمپاژ ثابت نیز، غلظت نانوسیال و همینطور دمای کاری سیستم پارامترهای موثر بر نتایج هستند. مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۸) ملاحظه می گردد که در صورت استفاده از معیار توان پمپاژ ثابت تفاوت قابل توجهی در مقدار ضریب انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه مشاهده نمی شود. اما کاهش اندکی در مقادیر ضریب انتقال گرمای آب در صورت استفاده از نانوذرات قابل تشخیص است. همچنین می توان اشاره کرد که غلظت بیشتر نانوذرات در سیال پایه ضریب انتقال گرما را بیشتر کاهش می دهد به نحوی که پائین ترین مقدار ضریب انتقال گرمای نانوسیالات مربوط به اکسیدسیلیسیم با غلظت ۱٪ می باشد.



(الف)



(ب)

جدول ۳- میزان افزایش یا کاهش ضریب انتقال گرمای جابه

جائی		
$T = 50^{\circ}\text{C}$		
معیار مقایسه	اکسیدسیلیسیم (۱٪)	عدد رینولدز ثابت
	(۰/۵٪)	
۵۰۰	٪۱/۲۱	٪۳/۲۴
۷۲۲/۲	٪۱/۳۷	٪۳/۶۱
۱۰۵۶	٪۱/۴۳	٪۳/۴۳
۱۳۸۹	٪۱/۴۲	٪۳/۷۵
۱۵۰۰	٪۱/۳۹	٪۳/۹۵
$T = 50^{\circ}\text{C}$		
توان پمپاژ [mw]	اکسیدسیلیسیم (۱٪)	توان پمپاژ
	(۰/۵٪)	
۲۹/۶۵	-٪۰/۲۲	-٪۰/۴۱
۳۵/۰۲	-٪۰/۲۹	-٪۰/۴۴
۴۶/۱۶	-٪۰/۲۱	-٪۰/۳۸
۶۰/۱۱	-٪۰/۲۷	-٪۰/۴۴

عدد رینولدز یکسان را گمراه کننده معرفی می‌کنند، حال اینکه در این کار به دلیل غلظت پائین نانوسیال، استفاده از هریک از معیارها تفاوت قابل توجهی در نتایج بدست آمده ایجاد نکرده است. ضمناً لازم به توضیح است که در بیشتر مقالات ارائه شده که به بررسی انتقال گرمای جابه جائی پرداخته‌اند، با وجود استفاده از غلظت‌های پایین نانوسیال (کمتر از ۱٪)، نتایج حیرت‌انگیزی از افزایش بسیار زیاد در مقدار ضریب انتقال گرمای نانوسیال نسبت به سیال پایه گزارش شده است، که علت اصلی آن را می‌توان استفاده از روابط نادرست برای بدست آوردن مقدار لزجت و ضریب رسانایی گرمایی موثر نانوسیال دانست. چنانکه تیموفوا [۱۸] علت آنرا استفاده از نانوسیال با ذرات چسبیده بهم، هنگام انجام آزمایش برای بدست آوردن ضریب رسانایی گرمایی و نیز لزجت نانوسیال می‌داند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یافتن یک معیار مناسب برای قضاوت گرمایی در مورد نانوسیالات مد نظر قرار گرفته است. اهمیت این مسئله از گمراه کننده بودن، ادعای وجود انتقال گرمای بیشتر برای نانو سیال در مقایسه با سیال پایه، در صورت غفلت از اثرات هیدرولیک مانند افزایش افت فشار، نشئت می‌گیرد. برای روشن شدن موضوع، رفتار گرمایی نانوسیال اکسید سیلیسیم / آب و آب مقطر در رژیم جریان لایه‌ای و در ناحیه‌ی در حال توسعه هیدرولیکی و گرمایی بررسی شده است. در این راستا، ضریب انتقال گرما در داخل مبادله‌کن گرمایی لوله پره دار ارزیابی شده است و مطابق نتایج ارائه شده، میزان غلظت نانوذرات در سیال پایه تاثیر بسیار زیادی بر مقدار انحراف این دو معیار خواهد داشت به نحوی که هر قدر غلظت نانوسیال مورد استفاده بیشتر باشد، میزان اختلاف بین این دو معیار نیز بیشتر خواهد شد و لذا در این کار به دلیل غلظت پائین نانوسیال، استفاده از هریک از معیارها تفاوت قابل توجهی در نتایج بدست آمده ایجاد نکرده است، ولی درعین حال معیار عدد رینولدز ثابت، ضریب انتقال گرمای جابه جائی نانوسیال را اندکی بیشتر از آب مقطر ارائه می‌کند و حال آنکه استفاده از معیار توان پمپاژ ثابت، موجب می‌شود مقدار ضریب انتقال گرمای جابه جائی آب مقطر اندکی بیشتر از نانوسیال باشد.

۵- مراجع

- [1] Li Q., Xuan Y., Convective heat transfer and Flow characteristics of Cu- water nanofluid, Sci. China E 45, 408, 2002.
- [2] Xuan Y., Li Q., Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, ASME J. Heat Transfer 125, 151, 2003.
- [3] Yang Y., Zhang Z.G., Grulke E.A., Anderson W.B., Wu G., Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 1107-1116, 2005.
- [4] Zeinali Heris S., Nasr Esfahany M., Etemad S. Gh., Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube, International Journal of Heat and Fluid Flow 28, 203-210, 2007.
- [5] Anoop K.B., Sundararajan T., Sarit K. Das, Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2189-2195, 2009.
- [6] Hwang K.S., Jang S.P., Choi S.U.S., Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in

از غلظت ۹٪ برای نانوسیالات خود استفاده کرده‌اند. لذا طبق نتیجه گیری آنها استفاده از معیار توان پمپاژ یا عدد رینولدز یکسان برای سیال پایه و نانوسیال، تفاوت بسیار زیادی در مقدار افزایش یا حتی کاهش، نسبت ضریب انتقال گرمای جابه جائی نانوسیال به سیال پایه، ایجاد خواهد نمود. لذا به درستی آنها در نتیجه گیری نهائی ارائه شده در این مقالات، استفاده از معیار توان پمپاژ یکسان را به عنوان معیار صحیح برای مقایسه قابلیت انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه معرفی نموده‌اند و استفاده از معیار عدد رینولدز یکسان را کاملاً مردود معرفی کرده‌اند. همچنین یو وهمکاران [۱۴] در آزمایشگاه ملی آرگون نیز با ارزیابی تحلیلی، معیارهای مختلف مقایسه ضریب انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه، استفاده از معیار عدد رینولدز یکسان را گمراه کننده دانسته‌اند و استفاده از توان پمپاژ یکسان را توصیه نموده‌اند.

همچنین نویسندگان کار حاضر در مقاله دیگری [۲۴] تاثیر استفاده از معیارهای مقایسه‌ای مختلف را بر تغییر میزان انتقال گرمای نانوسیال اکسید سیلیسیم/آب نسبت به سیال پایه آب در رژیم جریان آشفته، مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این کار نشان داده شده است که در صورت استفاده از نانوسیال اکسید سیلیسیم ۲/۵٪ حجمی، اختلاف ۱۵٪ بین استفاده از معیار مقایسه‌ای توان پمپاژ ثابت و معیار عدد رینولدز ثابت ایجاد میشود. طبق نتیجه گیری ارائه شده در این تحقیق نیز، استفاده از معیار توان پمپاژ ثابت به عنوان معیار مقایسه‌ای مناسب معرفی شده است.

به نظر نویسندگان هیچ تناقضی بین نتایج کار حاضر و نتایج ارائه شده در مراجع فوق، وجود ندارد و این مطالعه نیز کاملاً رهیافت ارائه شده در کار آنها را تصدیق می‌کند و استفاده از معیار توان پمپاژ یکسان را معیار صحیح مقایسه قابلیت انتقال گرمای نانوسیال و سیال پایه می‌داند، ولی در عین حال نتیجه‌ی مهمی که می‌توان از مقایسه نتایج این تحقیق و دو مطالعه قبلی بدان دست یافت، عبارت از این است که میزان غلظت نانوذرات در سیال پایه تاثیر بسیار زیادی بر مقدار انحراف این دو معیار خواهد داشت به نحوی که هر قدر غلظت نانوسیال مورد استفاده بیشتر باشد، میزان اختلاف بین این دو معیار نیز بیشتر خواهد شد و لذا به همین دلیل است که هر سه مطالعه پیشین استفاده از معیار

- [24] Sajedi R., Jafari M., Taghilou M., An experimental study on the effect of conflict measurement criteria for heat transfer enhancement in nanofluidics , Powder Technology 297, 448–456, 2016.
- fully developed laminarflow regime, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 193–199, 2009.
- [7] Esmaeilzadeh E., Almohammadi H., Nasiri Vatan Sh., Omrani A.N., Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics of g-Al₂O₃/water under laminar flow inside a horizontal tube, International Journal of Thermal Sciences 63, 31-37, 2013.
- [8] Esmaeilzadeh E., Almohammadi H., Nokhosteen A., Motezaker A., Omrani A.N., Study on heat transfer and friction factor characteristics of g-Al₂O₃/water through circular tube with twisted tapeinserts with different thicknesses, International Journal of Thermal Sciences 82, 72-83. 2014.
- [9] Sébastien Ferrouillat, André Bontemps, Olivier Poncelet , Olivier Soriano, Jean-Antoine Gruss, Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO₂ and ZnO nanofluids, Applied Thermal Engineering 51, 839-851, 2013.
- [11] Azmi W.H., Sharma K.V., Sarma P.K., Rizalman Mamat, Shahrani Anuar, V. Dharma Rao, Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO₂ nanofluid "Experimental Thermal and Fluid Science 51, 103–111, 2013.
- [11] Rabienataj Darzi A.A., Mousa Farhadi, Kurosh Sedighi, Rouzbeh Shafaghat, Kaveh Zabih Experimental investigation of turbulent heat transfer and flow characteristics of SiO₂/water nanofluid within helically corrugated tubes, International Communications in Heat and Mass Transfer 39, 1425–1434, 2012.
- [12] Javadi F.S., Sadeghipour S., Saidur R., BoroumandJazi G., Rahmati B., Elias M.M., Sohel M.R., The effects of nanofluid on thermophysical properties and heat transfer characteristics of a plate heat exchanger, International Communications in Heat and Mass Transfer 44, 58–63, 2013.
- [13] Ebrahimi M., Farhadi M., Sedighi K., Akbarzade S., Experimental Investigation of Force Convection Heat Transfer in a Car Radiator Filled with SiO₂-water Nanofluid, IJE TRANSACTIONS B: Applications Vol. 27, No. 2, (February) 333-340, 2014.
- [14] Yu W., France D.M., Timofeeva E. V., Singh D., and Routbort J. L. Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow, APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 213109, 2010.
- [15] Ehsan B., Haghghi, Mohsin Saleemi, Nader Nikkam, Zahid Anwar, Itziar Lumbreras ,Mohammadreza Behi, Seyed A. Mirmohammadi , Heiko Poth , Rahmatollah Khodabandeh Muhammet S. Toprak , Mamoun Muhammed, Björn Palm, "Cooling performance of nanofluids in a small diameter tube, Experimental Thermal and Fluid Science 49, 114–122, 2013.
- [16] Nader Nikkama, Ehsan B., Haghghi, Mohsin Saleemi, Mohammadreza Behi, Rahmatollah Khodabandeh, Mamoun Muhammed, Björn Palm, Muhammet Toprak S., Experimental study on preparation and base liquid effect on thermo-physical and heat transport characteristics of α -SiC nanofluids " International Communications in Heat and Mass Transfer Volume 55, July 2014, Pages 38–44.
- [17] INPBE, A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 106, 094312 2009.
- [18] E. V., Gavrilov A. N., McCloskey J. M. and Tolmachev Y. V., Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory, PHYSICAL REVIEW E 76, 061203, 2007.
- [19] Sider E.N. and Tate,G.E.,Heat transfer and pressure drop in liquids in tubes.Ind.Eng.chem., Vol.28,1429-1453, 1936.
- [20] Kays W.M. , Crawford M.E. .Convective Heat and Mass Transfer. McGrawHill, New York , 1980.
- [21] Holman J.P., Experimental Methods for Engineers, fifth ed. McGraw-Hill, New York, 1989.
- [22] Beckwith T.G., Marangoni R.D., Lienhard J.H., Mechanical Measurements, fifthed., AddisonWesley Publishing Company, New York, 1990.
- [23] Rea U., McKrell T., Hu L., J.Buongiorno, Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2042–2048, 2009.