



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۷۹ تا ۸۸
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 79- 88



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

مطالعه تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب - اکسید تیتانیوم

جعفر امانی^۱، علی اکبر عباسیان آرانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

(دریافت ۱۳۹۰/۱۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۱/۹/۱۳)

چکیده

در این مقاله، 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 شده است. 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 بیش تر از آب هستند. درصد افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به آب نشان داد که در همه آزمایش‌ها، افت فشار نانوسیال در عددهای بزرگ رینولدز افزایش کمتری نسبت به عددهای کوچک رینولدز دارد. برای کسر حجمی ۰/۰۰۲ با افزایش عدد رینولدز، از افزایش عدد ناسلت متوسط کاسته می‌شود. عدد ناسلت متوسط دو کسر حجمی ۰/۰۱ و ۰/۰۲ به طور تقریباً افزایش یکسانی در تمامی اعداد رینولدز دارد. بنابراین نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ برای عددهای رینولدز کوچک و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ یا ۰/۰۲ در عددهای بزرگ رینولدز کارایی بهتری خواهند داشت.

کلمات کلیدی

مطالعه تجربی، نانوسیال آب - اکسید تیتانیوم، عدد ناسلت، انتقال حرارت، افت فشار، جریان مغشوش.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات
Email: Abbasian@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از روش‌های بهبود کارایی حرارتی سیالات، معلق نمودن ذرات جامد بسیار کوچک با ابعاد میلی‌متر و یا میکرومتر در آنها است. هر چند در مطالعات اولیه، انتقال حرارت چنین سیالی افزایش می‌یافت، اما کاربرد آن در موارد عملی به دلیل پایداری ضعیف و رسوب ذرات، فرسایش تجهیزات و خطوط لوله و افت فشار بسیار بالا امکان‌پذیر نبود [۱]. کمی بیش از یک دهه گذشته با توسعه سریع نانو فناوری، ذرات جامد در ابعاد نانومتر (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) جایگزین ذرات با ابعاد میکرومتر در سیال شدند. سیال بدست آمده نانو سیال نامیده شد. ضریب رسانندگی حرارتی بالاتر، پایداری بهتر و افت فشار کمتری با استفاده از ذرات جامد در ابعاد نانومتر دیده شد. مطالعات متعددی در مورد انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال انجام شده است. با این حال کمبود پژوهش و نتایج تجربی در زمینه‌های مختلفی وجود دارد.

هی و همکاران [۲] به مطالعه انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۲۰ نانومتر و قطر کلوخه‌های ۹۵ نانومتر، ۰/۱۴۵ و ۰/۲۱ میکرومتر پرداخته‌اند. قسمت آزمایش که شامل یک لوله عمودی بوده است با گرمکن نواری از جنس سیلیکون تحت شار حرارتی ثابتی قرار داشته است. حداکثر عدد رینولدز بررسی شده حدود ۶۰۰۰ و حداکثر غلظت نانو سیال برابر ۱/۱۸ درصد حجمی بوده است. آنها دریافته‌اند که انتقال حرارت نانو سیال با افزایش عدد رینولدز و یا کسر حجمی نانو سیال تا نزدیک ۴۰٪ افزایش می‌یابد. افت فشار نانو سیال برابر با افت فشار آب گزارش شده است. همچنین اندازه کلوخه‌های نانوذرات اثری بر نرخ انتقال حرارت نانو سیال نداشته است.

مرشد و همکاران [۳] به بررسی انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۱۵ نانومتر در جریان لایه‌ای داخل کانال با شار حرارتی ثابت پرداخته‌اند. حداکثر عدد رینولدز برابر با ۱۷۰۰ و کسر حجمی نانو سیال بین ۰/۲٪ و ۰/۸٪ بوده است. برای تهیه محلول یکنواخت از امواج مافوق صوت^۱، همزن مغناطیسی و ستیل تری متیل آمونیوم برماید^۲ استفاده نموده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت متوسط نانو سیال نسبت به آب افزایش یافته است.

دوسانسوک و ونگویسز [۴] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۲۱ نانومتر و کسر حجمی ۰/۲٪ تا ۲٪ در یک مبدل دو لوله‌ای با جریان مخالف پرداخته‌اند. عدد رینولدز جریان مغشوش مقادیر حدودی ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ بوده است. از امواج مافوق صوت به مدت ۲ ساعت برای در هم شکستن کلوخه‌های نانوذرات و تهیه محلول یکنواخت استفاده نموده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که با

افزایش کسر حجمی نانو سیال تا ۱٪، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. عدد ناسلت متوسط برای کسر حجمی ۱/۵٪ نسبت به کسر حجمی ۱٪ کاهش یافته اما همچنان بزرگ‌تر از عدد ناسلت متوسط آب است. اما عدد ناسلت متوسط نانو سیال با کسر حجمی ۲٪ از عدد ناسلت متوسط آب نیز کمتر شده است.

زی و همکاران [۵] به بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان آرام چهار نانو سیال شامل ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید منیزیم در سیال پایه آب-اتیلن گلیکول پرداخته‌اند. قطر متوسط تمامی نانوذرات بکار رفته ۳۰ نانومتر و کسر حجمی همه نمونه‌ها ۰/۱ بوده است. قسمت آزمایش شامل یک لوله مسی با دمای ثابت روی سطح آن بوده است. نتایج آنها نشان داده است که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال حاوی نانوذرات اکسید منیزیم تا ۲۵۲٪ در عدد رینولدز ۱۰۰۰ افزایش می‌یابد. دیگر نانو سیالات نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی بیش‌تری نسبت به سیال پایه داشته‌اند.

فتوکیان و نصرافهانی [۶] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر متوسط ۲۰ نانومتر و کسر حجمی حداکثر ۰/۲٪ در یک لوله دما ثابت پرداخته‌اند و دریافته‌اند که افت فشار و نرخ انتقال حرارت نانو سیال بسیار بیش‌تر از سیال پایه است. عدد رینولدز در همه آزمایش‌ها کوچک‌تر از ۳۵۰۰۰ بوده است. آنها از یک مانومتر جیوه‌ای با عدم قطعیت $\pm 0/05$ سانتی‌متر جیوه برای اندازه‌گیری افت فشار استفاده نموده‌اند. دبی نانو سیال را نیز با ثبت زمان لازم برای شدن حجم مشخصی از مخزن، اندازه‌گیری نموده‌اند.

فرج الهی و همکاران [۷] 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 پوسته-لوله و جریان مغشوش پرداخته‌اند. بیش‌ترین کسر حجمی نانو سیال برای نانوذرات اکسید آلومینیوم، ۲٪ و برای نانوذرات اکسید تیتانیوم برابر با ۰/۷۵٪ بوده است. عدد پکلت جریان نیز بین مقادیر تقریبی ۲۰۰۰۰ و ۶۰۰۰۰ قرار داشته است. افزایش ۲۴٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی کل نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم با کسر حجمی ۰/۳٪ در عدد پکلت ۴۴۰۰۰ گزارش شده است. این افزایش در کسر حجمی ۰/۷۵٪ حدود ۱۳٪ است.

سجادی و کاظمی [۸] به مطالعه انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۳۰ نانومتر در یک لوله دما ثابت و جریان مغشوش پرداخته‌اند. عدد رینولدز بین مقادیر تقریبی ۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ و کسر حجمی نانو سیال کمتر از ۰/۲۵٪ بوده‌اند. برای تولید محلول یکنواخت، از امواج مافوق صوت به مدت ۳۰ دقیقه استفاده نموده‌اند. نتایج نشان داده است که

انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال بیش‌تر از سیال پایه است. ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با کسر حجمی 0.2% در عدد رینولدز حدود 10000 نزدیک به 20% و در عدد رینولدز حدود 30000 کمی بیش‌تر از 6% افزایش یافته است.

نصیری و همکاران [۹] به بررسی انتقال حرارت جریان مغشوش دو نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر متوسط 25 نانومتر و آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط 10 نانومتر پرداخته‌اند. قسمت آزمایش کانال دما ثابت بوده که در آن نانوسیال با کسر حجمی کمتر از 1.15% جریان داشته است. عدد پکلت جریان بین مقادیر تقریبی 20000 و 65000 بوده است. برای آماده‌سازی نانوسیال، از همزن مکانیکی و امواج مافوق صوت استفاده نموده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که انتقال حرارت هر دو نانوسیال نزدیک به یکدیگر بوده و نسبت به انتقال حرارت آب بیش‌تر است. به نظر آنها رسوب و ته نشینی در جریان‌های مغشوش بسیار کم اهمیت است زیرا تنش‌های بالایی بر نانوسیال و نانوذرات اعمال می‌شود که مانع کلوخه شدن نانوذرات شده و از رسوب آنها جلوگیری می‌نماید.

جریان‌های مغشوش به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت کاربرد بیش‌تری نسبت به جریان‌های آرام در تجهیزات مختلفی مانند انواع مبدل‌های حرارتی دارند. بسیاری از بررسی‌های انجام شده در مورد انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در جریان‌هایی با اعداد رینولدز کمتر از 18000 بوده و به ندرت مطالعاتی برای اعداد رینولدز بالاتر انجام شده است. برای مثال عدد رینولدز در آزمایش‌های هی و همکاران [۲] حدود 6000 ، دوسانسوک و ونگویسز [۴] بین 3000 و 18000 و سجادی و کاظمی [۸] بین 5000 و 30000 بوده است. در بسیاری موارد نیز فقط به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پرداخته شده است و افت فشار نانوسیال مبهم مانده است. همچنین کسر حجمی نانوسیال در بیش‌تر مطالعات محدود به مقادیر کوچک (نزدیک به 1%) است. برای مثال، حداکثر کسر حجمی نانوسیال در آزمایش‌های هی و همکاران [۲]، مرشد و همکاران [۳]، دوسانسوک و ونگویسز [۴] و فرج الهی و همکاران [۷] به ترتیب برابر با 1.18% ، 0.18% ، 0.2% و 0.75% بوده است.

در نتیجه ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در عددهای رینولدز بزرگ‌تر از 18000 و کسرهای حجمی بزرگ‌تر از 1% نامشخص هستند. بنابراین در این تحقیق به صورت تجربی به بررسی عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر متوسط نانوذرات برابر با 10 نانومتر، کسر حجمی 0.2% تا 2% و عدد رینولدز تقریبی 8000 تا 49000 پرداخته شده است و نتایج بدست آمده به همراه عدم قطعیت ارائه شده است. قسمت آزمایش یک مبدل دو لوله‌ای با جریان مخالف

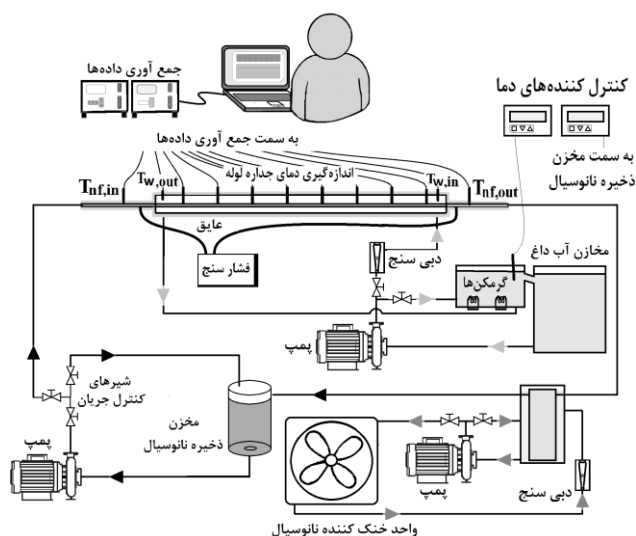
است.

۲- شرح دستگاه آزمایش

اجزای مختلف دستگاه آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه مورد استفاده از سه چرخه شامل چرخه نانوسیال، چرخه آب داغ (برای گرم نمودن نانوسیال) و چرخه آب سرد (برای خنک نمودن نانوسیال) تشکیل شده است. جدا از این سه چرخه، قسمتی برای اندازه‌گیری افت فشار نانوسیال طراحی و ساخته شد. هر قسمت از دستگاه در ادامه توضیح داده می‌شود.

۱-۲- چرخه نانوسیال

قسمت آزمایش که یک مبدل جریان مخالف است از دو لوله هم مرکز افقی تشکیل شده است. لوله داخلی از جنس مس به قطر داخلی $8/16$ میلی‌متر و قطر خارجی $9/48$ میلی‌متر و لوله بیرونی از جنس فولاد ضد زنگ با قطر داخلی $26/02$ میلی‌متر هستند.



شکل (۱): طرح کلی دستگاه آزمایش

نانوسیال از داخل لوله مسی عبور نموده و آب داغ در جهت مخالف نانوسیال از فضای بین دو لوله می‌گذرد. نانوسیال پس از حرکت در مبدل دو لوله‌ای گرم می‌شود و پس از آنکه گرمای خود را در یک مبدل حرارتی دیگر به آب داد، به مخزن ذخیره نانوسیال باز می‌گردد. طول قسمتی از لوله که در مجاورت آب داغ می‌تواند گرم شود برابر با $98/8$ سانتیمتر بوده در حالیکه طول لوله از ورود تا خروج نانوسیال $128/8$ سانتیمتر است.

عایق پشم شیشه به ضخامت 10 سانتیمتر برای کاهش اتلاف حرارتی آب داغ به دور لوله فولادی پیچیده شده است. استفاده از لوله‌های پلاستیکی در قسمت‌های ورودی و خروجی جریان باعث کاهش انتقال حرارت محوری از ابتدا و انتهای قسمت آزمایش

اندازه‌گیری شود. فاصله ترموکوپل‌ها از یکدیگر نزدیک به ۱۲ سانتیمتر بوده و اولین ترموکوپل تا خروجی آب داغ ۷/۸ سانتیمتر فاصله دارد. دو عدد ترموکوپل مشابه برای اندازه‌گیری دمای متوسط نانوسیال در ورودی و خروجی لوله نصب شده‌اند. همچنین از دو عدد ترموکوپل مشابه دیگر برای اندازه‌گیری دمای آب داغ در ورودی و خروجی قسمت آزمایش استفاده شده است. از دو عدد دماسنج نوع PT۱۰۰ با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس برای کنترل دمای نانوسیال خروجی از سیستم خنک کننده نانوسیال و ورودی به قسمت آزمایش و کنترل دمای مخزن آب داغ استفاده شده است. از یک دماسنج با دقت ۱ درجه سلسیوس برای اندازه‌گیری دمای محیط استفاده شده است. تمامی ترموکوپل‌ها و دماسنج‌ها قبل از نصب بر روی دستگاه کالیبره شده‌اند.

۲-۵- اندازه‌گیری افت فشار

افت فشار نانوسیال به کمک یک مانومتر U شکل جیوه‌ای که در زاویه ۴۸/۵ درجه با افق نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شود. مانومتر قابلیت اندازه‌گیری تغییر ارتفاع ۵/۰ میلی‌متر در شاخه‌های مانومتر را دارد.

۲-۳- آماده سازی نانوسیال

برای تهیه نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم، مانند دیگر محققین [۳][۴][۸] از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. نانوذرات در مرحله اول این روش تهیه می‌شوند و سپس در مرحله دوم به سیال پایه اضافه شده تا نانوسیال ایجاد شود. برای تهیه نانوسیال در ابتدا نانوذرات درون آب مقطر ریخته شدند. از امواج فراصوتی به مدت حدود ۳ ساعت برای پخش نانوذرات در آب، در هم شکستن کلوخه‌ها و تهیه نانوسیال یکنواخت همزمان با همزن مغناطیسی استفاده شد. از ستیل تری متیل آمونیوم برامید برای جلوگیری از کلوخه شدن و ته نشینی نانوذرات استفاده شد. برای آنکه خواص نانوسیال با اضافه نمودن فعال کننده سطحی تغییر ننماید، غلظت کم آن انتخاب شده است [۱۰]. اضافه نمودن فعال کننده‌های سطحی معیایی نیز دارد که در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سلسیوس آشکار می‌شوند. در این حالت پیوند مفید بین ملکول‌های پایدارکننده و ذرات جامد گسسته شده و ته نشینی آغاز می‌شود [۱۱]. اما در کلیه‌ی آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر دمای نانوسیال خروجی از قسمت آزمایش از مقدار ۵۳ درجه سلسیوس بیش‌تر نمی‌شد. برای بررسی اندازه و شکل نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری^۳ استفاده شد. شکل (۲) نشان می‌دهد که اندازه نانوذرات در حدود ۱۰ نانومتر بوده و نانوذرات به طور تقریبی کروی شکل هستند. برای مطالعه

می‌شود. دبی نانوسیال با اندازه‌گیری زمان لازم برای پر شدن حجم مشخصی از یک مخزن اندازه‌گیری می‌شود. دقت زمان‌سنج ۰/۰۱ ثانیه است. بیش‌تر محققین از این روش برای اندازه‌گیری دبی نانوسیال استفاده نموده‌اند [۶][۸]. فرج الهی و همکاران [۷] با همین روش دبی سنج نانوسیال را کالیبره و از آن برای بدست آوردن دبی استفاده نمودند.

۲-۲- چرخه آب داغ

این چرخه از یک مخزن دو قسمتی با حجم کل ۲۷/۸۸ لیتر تشکیل شده است. دو گرمکن با توان‌های اسمی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ وات در مخزن اول نصب شده‌اند. با استفاده از این دو گرمکن می‌توان توان‌های حرارتی کمتر از یک کیلو وات تا نزدیک ۳ کیلو وات را تولید نمود. امکان انتخاب بین توان‌های حرارتی در کاهش دفعات روشن و خاموش شدن گرمکن(ها) و کاهش نوسانات دمای آب داغ خروجی از مخزن بسیار مؤثر است. از یک کنترل کننده برای کنترل دمای آب داغ خروجی از مخزن دوم استفاده شده است. تمام مسیر لوله‌ها برای کاهش اتلاف حرارتی عایق شده‌اند. برای اندازه‌گیری دبی، از یک رتامتر با بازه کارکرد ۵ تا ۳۵ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. رتامتر برای دماهای مختلف آب داغ و دبی‌های مختلف کالیبره شد تا از اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر دبی آب داغ در دماهای مختلف اطمینان حاصل شود. همچنین از یک خط کنارگذر برای کنترل بهتر دبی آب داغ استفاده شده است.

۲-۳- چرخه آب سرد

نانوسیال پس از آنکه در قسمت آزمایش گرم شد، باید خنک شود تا بتواند در یک چرخه حرکت کند. برای کاهش حجم نانوسیال و در نتیجه هزینه تهیه آن، خنک کاری به صورت مستقیم با هوا صورت نمی‌گیرد. نانوسیال پس از آنکه در قسمت آزمایش گرم شد وارد یک مبدل حرارتی کوچک شده و با آب خنک می‌شود. آب گرم شده در یک مبدل بسته دیگر با جریان اجباری هوا خنک می‌شود. دمای نانوسیال خروجی از این مبدل به وسیله دبی آب و یک کنترل کننده دما کنترل می‌شود. دبی آب به وسیله یک رتامتر و یک مسیر کنارگذر تنظیم می‌شود. حجم آب داخل این چرخه حدود ۱۷/۵ لیتر است. رتامتر پس از نصب بر روی دستگاه کالیبره شده است.

۲-۴- واحد سنجش دما

این قسمت شامل نمایشگر، کنترل کننده‌ها و حسگرها است. بر روی لوله آزمایش ۸ عدد ترموکوپل از نوع K با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس طوری نصب شده‌اند تا دمای سطح داخلی لوله

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 \text{ Re}_B^{0.4} \text{ Pr}_f^{0.66} \left(\frac{T}{T_f}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03} \phi^{0.66} \quad (4)$$

$$\text{Re}_B = \frac{\rho_f u_B d_p}{\mu_f} = \frac{2\rho_f k_B T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (5)$$

k_B ثابت بولتزمن و برابر با $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است. از آنجا که دمای نانوسیال در تمام آزمایش‌ها تغییر می‌نماید، خواص حرارتی آب و اکسید تیتانیوم بر حسب دما متغیر هستند. برای محاسبه‌ی کلیه خواص آب داغ و یا نانوسیال از میانگین دماهای ورود و خروج سیال مربوطه استفاده شد.

۲-۴- خواص آب مقطر

دو رابطه (۶) و (۷) به ترتیب برای لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی آب با برازش منحنی بر نتایج تجربی گزارش شده به وسیله وایت [۱۵] ارائه می‌شوند. حداکثر خطای مطلق رابطه لزجت دینامیکی برابر ۱.۱۲۷٪ و کیفیت برازش برای رابطه هدایت حرارتی $R^2 = 0.99/99$ هستند:

$$\ln\left(\frac{\mu_f}{0.001792}\right) = -1.24 - 6.44\left(\frac{273.15}{T}\right) + 7.68\left(\frac{273.15}{T}\right)^2 \quad (6)$$

$$k_f = -1.549404 + 0.01553952 \times T - 3.65967 \times 10^{-5} T^2 + 2.9401 \times 10^{-8} T^3 \quad (7)$$

دو رابطه (۸) و (۹) با کیفیت برازش بیش از ۹۹/۹۵٪ بر مقادیر ارائه شده به وسیله بیژن [۱۶] برای محاسبه چگالی و ظرفیت حرارتی ویژه آب استفاده شدند:

$$\rho_f = -764.475639 + 19.251515 T - 0.07714568 T^2 + 1.364893 \times 10^{-4} T^3 - 9.339158 \times 10^{-8} T^4 \quad (8)$$

$$c_{p,f} = 198531.690492 - 2894.853934 T + 17.2363068 T^2 - 0.05126994 T^3 + 7.616133 \times 10^{-5} T^4 - 4.517821 \times 10^{-8} T^5 \quad (9)$$

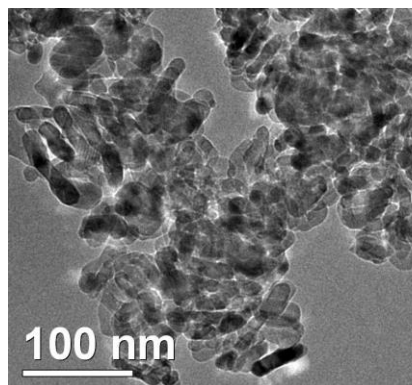
بازه دما در روابط (۶) تا (۹) برابر با $273 \leq T \text{ (K)} \leq 373$ است. مقادیر موجود، برای برازش منحنی‌های بالا در فشار اتمسفر هستند، زیرا همان‌طور که کرایت و گوسوامی [۱۷] نشان داده‌اند، خواص آب تغییرات اندکی با تغییرات کوچک فشار دارد.

۳-۴- خواص اکسید تیتانیوم

از رابطه (۱۰) برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی در بازه دمایی $273 \leq T \text{ (K)} \leq 373$ استفاده شد. این رابطه با برازش منحنی بر نتایج پاول و همکاران [۱۸] با $R^2 = 0.100$ بدست آمده است:

$$k_p = 100 \times (0.1813 - 4.768 \times 10^{-4} T + 5.089 \times 10^{-7} T^2) \quad (10)$$

ساختار و مواد تشکیل‌دهنده نانوذرات از پراش اشعه ایکس^۴ استفاده و خلوص بالای نانوذرات تأیید شد.



شکل (۲): عکس برداری TEM از نانوذرات

۴- روابط مورد نیاز

در این قسمت به معرفی روابط بکار رفته برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال، سیال پایه، نانوذرات و همچنین روابط بکار رفته برای محاسبه عدد ناسلت متوسط و افت فشار پرداخته می‌شود. در تحقیق حاضر همانند بسیاری از تحقیقات دیگر [۳][۶][۷][۸] از روابط موجود برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال استفاده شد.

۱-۴- خواص نانوسیال

از رابطه پاک و چو [۱۲] طبق رابطه (۱) برای محاسبه چگالی نانوسیال استفاده شده است:

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

برای محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال از رابطه ژوان و روتزل [۱۳] به صورت رابطه (۲) استفاده شده است:

$$c_{p,nf} = \frac{\rho_f c_{p,f}(1 - \phi) + \rho_p c_{p,p} \phi}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

برای محاسبه لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از روابط ارائه شده به وسیله کورچیونه [۱۴] به ترتیب طبق روابط (۳) و (۴) استفاده شد.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (3)$$

قطر متوسط نانوذرات (d_p) برابر با ۱۰ نانومتر و قطر هم ارز یک ملکول آب (d_f) برابر با ۰/۳۸۵ نانومتر است [۱۴]. عدد رینولدز استفاده شده در رابطه (۴) از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. T_{ff} دمای نقطه انجماد آب در محل انجام آزمایش‌ها (نزدیک به ۲۷۳/۱۶ K) است:

$$Re = \frac{\rho_{nf} u_{avg} D}{\mu_{nf}} = \frac{4 \rho_{nf} Q}{\pi \mu_{nf} D} \quad (18)$$

افت فشار با کمک رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. ρ_0 و h به ترتیب اختلاف ارتفاع دو ستون جیوه مانومتر و چگالی آب (شاخه‌های مانومتر) در دمای محیط هستند:

$$\Delta p = (\rho_{Hg} - \rho_0) g h \sin(48.5^\circ) \quad (19)$$

۵- تحلیل خطا

مکانیک سیالات و انتقال حرارت وابسته به نتایج تجربی هستند. خطاهای مهم که می‌توانند بر دقت نتایج تجربی اثر بگذارند به دو دسته خطاهای تصادفی و غیرتصادفی تقسیم می‌شوند. خطاهای غیرتصادفی را می‌توان با انجام آزمایش‌های دقیق، خواندن با دقت اعداد و کالیبراسیون تجهیزات، کمینه کرد اما خطای تصادفی به طور معمول مقدار ثابتی دارد. هر آزمایش حداقل یکبار دیگر تکرار می‌شود و مقادیر دما (پس از پایداری آزمایش)، ارتفاع ستون جیوه، دبی و حجم اندازه‌گیری شده‌ی آب یا نانوسیال دو بار خوانده می‌شوند. بنابراین سعی شده است تا خطای غیرتصادفی حداقل شود. خطای وسایل اندازه‌گیری و خطای محاسبات در یک آزمایش وجود دارند. برای در نظر گرفتن خطاها از عدم قطعیت استفاده شده است.

۶- عدم قطعیت

مهندسی نیاز به شناخت عدم قطعیت نتایج خود دارند تا بتوانند داده‌های خود را در طراحی‌ها بکار گیرند. عدم قطعیت نشان می‌دهد که محقق از چه درصدی از نتایج خود مطمئن است. فرض می‌شود متغیر P تابعی از n متغیر دیگر x_1 تا x_n که عدم قطعیت آنها شناخته شده است، باشد. در این حالت می‌توان از رابطه (۲۰) برای محاسبه عدم قطعیت δ استفاده نمود [۲۶]:

$$p = p(x_1, x_2, \dots) \rightarrow \delta_p^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots \quad (20)$$

از آنجا که ضریب هدایت حرارتی و دیگر خواص نانوسیال و یا آب به کمک روابط مشخص شده محاسبه می‌شوند، از عدم قطعیت آنها صرف‌نظر می‌شود [۳]. مطالعه کاملی بر روی عدم قطعیت متغیرها انجام شده است [۲۷]. خلاصه‌ای از نتایج در ادامه آمده است.

برای کسر حجمی 0.02 ، حداکثر عدم قطعیت افت فشار نانوسیال در کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین عدد رینولدز به ترتیب برابر با $0.5/6\%$ و $0.123/6\%$ است. حداکثر عدم قطعیت فشارسنج در عددهای رینولدز کوچک برابر 0.038 سانتیمتر جیوه (نزدیک به 51 پاسکال) است. فتوکیان و نصرافهانی [۶] از یک مانومتر جیوه‌ای با عدم قطعیت 0.05 سانتیمتر جیوه (در حدود 67

از رابطه (۱۱) در بازه دمایی $269/35 \leq T \text{ (K)} \leq 339/82$ برای محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه اکسید تیتانیوم استفاده شد. این رابطه با برازش منحنی بر نتایج اسمیس و همکاران [۱۹] با $R^2 = 0.99/98$ بدست آمده است:

$$c_{p,p} = 58.4528 + 3.02195 T - 3.02923 \times 10^{-3} T^2 \quad (11)$$

چگالی اکسید تیتانیوم برابر با 4250 kg/m^3 و مستقل از دما در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

۴-۴- عدد ناسلت متوسط

نرخ انتقال حرارت داده شده به نانوسیال و نرخ انتقال حرارت گرفته شده از آب داغ به ترتیب به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) هستند:

$$\dot{Q}_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{in} - T_{out})_w \quad (13)$$

نرخ متوسط انتقال حرارت نانوسیال و آب داغ به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{\dot{Q}_w + \dot{Q}_{nf}}{2} \quad (14)$$

اختلاف بین انرژی که نانوسیال می‌گیرد و انرژی که آب داغ از دست می‌دهد با رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. این اختلاف برای آزمایش‌های انجام شده کمتر از 10% است. دوسانسوک و ونگویسز [۴] اختلاف 3% ، زمزمیان و همکاران [۲۱] اختلاف بین 20% تا 25% و یانگ و همکاران [۲۲] اختلافی در حدود 25% را گزارش نموده‌اند.

$$E = \frac{|\dot{Q}_w - \dot{Q}_{nf}|}{\dot{Q}_{avg}} \quad (15)$$

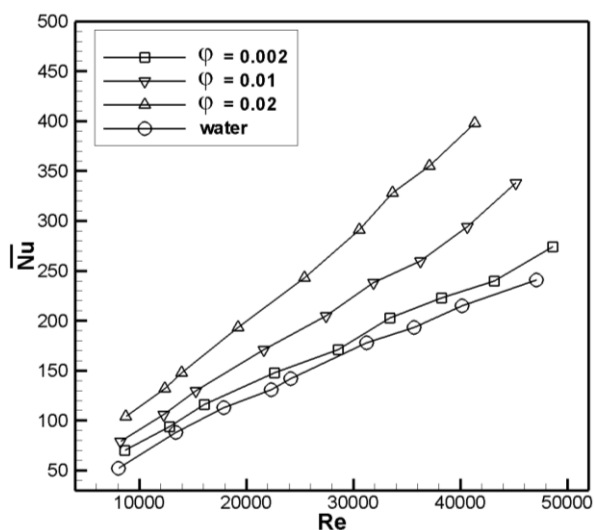
ضریب انتقال حرارت جابجایی کل نانوسیال و عدد ناسلت متوسط به ترتیب با روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند:

$$\bar{h}_{nf} = \frac{\dot{Q}_{avg}}{A(T_{wall} - T_{in,nf})} \quad (16)$$

$$\bar{Nu}_{nf} = \frac{\bar{h}_{nf} D}{k_{nf}} \quad (17)$$

A سطح مقطع انتقال حرارت و D قطر داخلی لوله مسی هستند. T_{wall} میانگین دمای سطح بوده و $T_{in,nf}$ اشاره به دمای توده نانوسیال در ورودی لوله دارد. دوسانسوک و ونگویسز [۴]، ناسان و همکاران [۲۳]، وجها و همکاران [۲۴]، کلکاری و همکاران [۲۵] از اختلاف دمای مشابهی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال استفاده نموده‌اند. با داشتن دبی حجمی نانوسیال (Q) می‌توان عدد رینولدز نانوسیال را با رابطه (۱۸) محاسبه نمود:

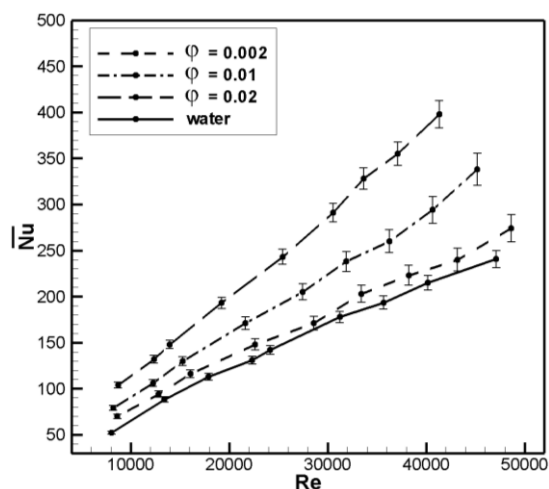
در کوچکترین عدد رینولدز در ادامه آمده است.



شکل (۳): عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف نانوسیال

عدد ناسلت متوسط تا ۲۲/۴۵٪ برای کسر حجمی ۰/۰۰۲ نسبت به آب افزایش می‌یابد. عدد ناسلت متوسط نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ نسبت به آب ۴۴/۹۶٪ افزایش داشته است. با استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲، عدد ناسلت متوسط به مقدار ۸۰/۴۶٪ نسبت به آب افزایش می‌یابد. برای محاسبه عدد ناسلت متوسط آب مقطر در هر عدد رینولدز از منحنی درجه ۳ بدست آمده از نتایج تجربی استفاده شد. عدد ناسلت متوسط برای بزرگترین عدد رینولدز به مقدار ۱۰/۸۵٪، ۴۴/۷۰٪ و ۸۲/۴۴٪ برای سه کسر حجمی مذکور افزایش می‌یابد.

در شکل (۴) نتایج مربوط به عدد ناسلت متوسط به همراه عدم قطعیت، برای کلیه آزمایش‌ها ترسیم شده است. از این شکل بر می‌آید که نتایج ذکر شده درست هستند.



شکل (۴): عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف نانوسیال به همراه عدم قطعیت

پاسکال) برای اندازه‌گیری افت فشار استفاده نمودند. دوسانسوک و ونگویسز [۴] عدم قطعیت ۳۰ پاسکال را برای اندازه‌گیری افت فشار گزارش دادند. بیشترین مقدار عدم قطعیت عدد رینولدز برابر ۰/۶ درصد است. از آنجا که مقدار عدم قطعیت عدد رینولدز بسیار کوچکتر از خود عدد رینولدز است، در نمودارها نشان داده نمی‌شود. برای کسر حجمی ۰/۰۰۲ حداکثر عدم قطعیت عدد ناسلت متوسط در بزرگترین عدد رینولدز ۵/۵٪ بدست آمد. حداکثر عدم قطعیت عدد ناسلت متوسط نانوسیال مذکور در عددهای کوچک رینولدز ۳/۳٪ است.

۷- نتایج

آزمایش‌ها برای آب مقطر (کسر حجمی صفر) و برای نانوسیال با کسرهای حجمی ۰/۰۰۲، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ انجام شد. نتایج بدست آمده شامل عدد ناسلت متوسط و افت فشار در دبی‌های مختلف نانوسیال است. در ادامه به بیان نحوه تغییر عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال پرداخته خواهد شد. دقت شود که مقادیر گفته شده در متن برای عدد ناسلت متوسط، افت فشار و عدد رینولدز به صورت تقریبی می‌باشند.

۷-۱- عدد ناسلت متوسط

عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای آب و نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. عدد ناسلت متوسط نانوسیال مانند آب با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. این رفتار برای تمامی کسرهای حجمی نانوسیال دیده می‌شود. عدد ناسلت متوسط آب از مقدار ۵۲ در عدد رینولدز نزدیک به ۸۰۰۰ شروع شده و تا حدود ۲۴۰ در عدد رینولدز تقریبی ۴۷۰۰۰ می‌رسد. عدد ناسلت متوسط نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ از مقدار ۷۰ در عدد رینولدز ۹۰۰۰ به مقدار ۲۷۴ در عدد رینولدز ۴۹۰۰۰ می‌رسد. برای کسر حجمی ۰/۰۱، عدد ناسلت متوسط از مقدار ۷۹ در عدد رینولدز ۸۰۰۰ شروع شده و تا مقدار ۳۳۸ در عدد رینولدز ۴۵۰۰۰ افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲، افزایش عدد رینولدز از مقدار ۹۰۰۰ تا ۴۱۰۰۰ باعث افزایش عدد ناسلت متوسط از ۱۰۴ به ۳۹۸ می‌شود.

نمودار عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز به طور تقریبی خطی بوده و با افزایش کسر حجمی نانوسیال بر مقدار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال با تغییر عدد رینولدز (شیب منحنی) افزوده می‌شود. عدد ناسلت متوسط نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ بزرگتر از مقادیر آب است. عدد ناسلت متوسط نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوسیال برای همه عددهای رینولدز، افزایش می‌یابد. تغییرات عدد ناسلت متوسط

۷-۲- افت فشار

حدود ۱۳٪ در کسر حجمی ۷۵٪ را نشان داده است. نتایج مطالعه سجادی و کاظمی [۸] افزایش ۲۲٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با کسر حجمی ۲۵٪ و عدد رینولدز تقریبی ۵۰۰۰ را نشان داده است. مقدار افزایش در افت فشار نانوسیال در کسر حجمی مذکور نزدیک به ۲۵٪ گزارش شده است.

درصد افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال نسبت به آب در کمترین و بیشترین عدد رینولدز در جدول (۱) آورده شده‌اند. برای تمامی نانوسیالات، درصد افزایش افت فشار برای رینولدزهای بزرگ مقدار کمتری نسبت به رینولدزهای کوچک دارد. برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ درصد، افزایش عدد ناسلت متوسط در رینولدزهای بزرگ نسبت به رینولدزهای کوچک کاهش می‌یابد. در نتیجه برای کسر حجمی ۰/۰۰۲ که افت فشار نانوسیال نزدیک به افت فشار آب است، با افزایش عدد رینولدز از مزیت نانوسیال که همان افزایش نرخ انتقال حرارت است، کم می‌شود.

با افزایش کسر حجمی نانوسیال به ۰/۰۱ و سپس به ۰/۰۲، از تغییرات درصد افزایش عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز کم می‌شود. طوری که درصد افزایش عدد ناسلت متوسط برای کسر حجمی ۰/۰۲ به طور تقریبی مستقل از عدد رینولدز است. با توجه به درصد افزایش افت فشار برای عددهای بزرگ و کوچک رینولدز بهتر است که این نانوسیالات در عددهای بزرگ رینولدز استفاده شوند.

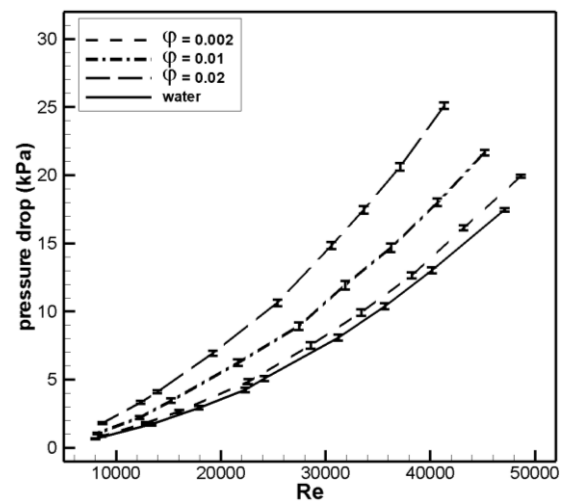
جدول (۱): درصد افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال نسبت به آب در کمترین و بیشترین عدد رینولدز

کسر حجمی نانوسیال	عدد رینولدز	درصد افزایش عدد ناسلت متوسط	درصد افزایش افت فشار
	۸۶۵۴	۲۲/۴۵	۱۰/۷۹
۰/۰۰۲	۳۳۴۲۲	۱۲/۵۳	۷/۹۲
	۴۸۶۶۵	۱۰/۸۵	۷/۲۹
	۸۲۳۳	۴۴/۹۶	۴۷/۹۱
۰/۰۱	۳۱۸۹۶	۳۳/۲۲	۴۱/۶۰
	۴۵۲۱۰	۴۴/۷۰	۳۳/۸۸
	۸۷۲۷	۸۰/۴۶	۱۲۹/۴۱
۰/۰۲	۳۳۶۵۶	۷۶/۰۷	۸۷/۴۴
	۴۱۳۲۶	۸۲/۴۴	۸۳/۳۴

۸- نتیجه و جمع بندی

در مطالعه حاضر به بررسی عدد ناسلت متوسط و افت فشار نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم با کسر حجمی بین ۰/۲ تا ۰/۲٪ درون یک مبدل دو لوله‌ای جریان مخالف و جریان مغشوش با عدد رینولدز تقریبی ۸۰۰۰ تا ۴۹۰۰۰ پرداخته شد.

افت فشار نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف بر حسب عدد رینولدز به همراه عدم قطعیت در شکل (۵) رسم شده است. افت فشار نانوسیال با افزایش عدد رینولدز به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. طوری که جریان با عددهای رینولدز بالاتر سبب افت فشار بیشتر می‌شوند. افت فشار آب از مقدار ۰/۶۷ کیلوپاسکال در عدد رینولدز ۸۰۰۰ به مقدار ۱۷/۵ کیلوپاسکال در عدد رینولدز ۴۷۰۰۰ می‌رسد. افت فشار نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ از مقدار تقریبی ۱ کیلوپاسکال در عدد رینولدز ۹۰۰۰ تا مقدار ۲۰ کیلوپاسکال در عدد رینولدز ۴۹۰۰۰ افزایش می‌یابد.



شکل (۵): افت فشار نانوسیال و آب مقطر بر حسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف نانوسیال

افت فشار نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ با تغییر عدد رینولدز از مقدار ۸۰۰۰ به ۴۵۰۰۰ از مقدار تقریبی ۱ کیلوپاسکال به مقدار تقریبی ۲۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد. برای کسر حجمی ۰/۰۲ تغییر عدد رینولدز از مقدار ۹۰۰۰ به ۴۱۰۰۰ باعث افزایش افت فشار نانوسیال از مقدار ۱/۸ کیلوپاسکال به ۲۵ کیلوپاسکال می‌شود. نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲، افت فشار بسیار نزدیکی با افت فشار آب دارد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال، افزایش افت فشار نانوسیال دیده می‌شود. نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲، افت فشار بیش‌تری نسبت به نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ و آن هم مقدار بیش‌تری نسبت به نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ و آب دارد.

مرشد و همکاران [۳] نشان داده‌اند که هم ضریب انتقال حرارت جابجایی و هم عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه فرج الهی و همکاران [۷]، افزایش ۲۴٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم با کسر حجمی ۰/۳٪ در عدد پکلت ۴۴۰۰۰ و افزایش

aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, No. 50, pp. 2272– 2281, 2007.

S.M.S. Murshed; K. Choong Leong; Ch. Yang; N.T. Nguyen, “Convective heat transfer characteristics of aqueous TiO₂ nanofluid under laminar flow conditions”, *Int. J. Nanoscience*, Vol. 7, pp. 325– 331, 2008.

W. Duangthongsuk; S. Wongwises, “An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, No. 53, pp. 334– 344, 2010.

H. Xie; Y. Li; W. Yu, “Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows”, *Physics Letters A*, No. 374, pp. 2566– 2568, 2010.

S.M. Fotukian; M. Nasr Esfahany, “Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute γ -Al₂O₃/water nanofluid inside a circular tube”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, No. 31, pp. 606– 612, 2010.

B. Farajollahi; S.Gh. Etemad; M. Hojjat, “Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, No. 53, pp. 12– 17, 2010.

A.R. Sajadi; M.H. Kazemi, “Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1474- 1478, 2011.

M. Nasiri; S.Gh. Etemad; R. Bagheri, “Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct”, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 958- 963, 2011.

S.M.S. Murshed; K.C. Leong; C. Yang, “Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids”, *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 44, pp. 367- 373, 2005.

D. Wu; H. Zhu; L. Wang; L. Liua, “Critical issues in nanofluids preparation, characterization and thermal conductivity”, *Curr. Nanosci.*, Vol. 5, pp. 103– 112, 2009.

عدد ناسلت متوسط نانوسیال با افزایش عدد رینولدز به صورت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال، بر مقدار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال با تغییر عدد رینولدز افزوده می‌شود. افت فشار نانوسیال با افزایش عدد رینولدز به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۲ افت فشار بسیار نزدیکی به افت فشار آب مقطر دارد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال، افت فشار افزایش می‌یابد. برای کسر حجمی ۰/۰۰۲ که افت فشار نانوسیال نزدیک به افت فشار آب است، با افزایش عدد رینولدز از مزیت نانوسیال که همان افزایش نرخ انتقال حرارت است، کم می‌شود. افت فشار نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲ در عددهای بزرگ رینولدز نسبت به عددهای کوچک رینولدز افزایش کمتری داشته است. در نتیجه بهتر است که نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲ در عددهای بزرگ رینولدز استفاده شود.

۹- فهرست علائم

g	m/s ²	شتاب گرانش زمین،
\bar{h}	W/m ² K	ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط،
\dot{m}	kg/s	دبی جرمی،
$\frac{\dot{m}}{Nu}$		عدد ناسلت متوسط
Pr		عدد پرانتل
Re		عدد رینولدز
u	m/s	سرعت،
φ		علائم یونانی کسر حجمی نانوسیال
f		زیرنویس
nf		سیال نانوسیال
p		ذرات جامد
avg		میانگین
w		آب داغ
in		ورود
out		خروج

۱۰- مراجع

- S.K. Das; N. Putra; P. Thiesen; W. Roetzel, [۱]
“Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids”, *J. Heat Transfer*, No. 125, pp. 567– 574, 2003.
- Y. He; Y. Jin; H. Chen; Y. Ding; D. Cang, H. Lu, [۲]
“Heat transfer and flow behaviour of

- turbulent flow”, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 35, pp. 495– 502, 2011.
- Y. Yang; Z.G. Zhang; E.A. Grulke; W.B. Anderson; G. Wu, “Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-Fluid Dispersions (Nanofluids) in Laminar Flow”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp.1107– 1116, 2005. [۲۲]
- T.H. Nassan; S. Zeinali Heris; S.H. Noie, “A comparison of experimental heat transfer characteristics for Al_2O_3 /water and CuO/water nanofluids in square cross-section duct”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 924– 928, 2010. [۲۳]
- R.S. Vajjha; D.K. Das; D.P. Kulkarni, “Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4607– 4618, 2010. [۲۴]
- D.P. Kulkarni; D. K. Das; R.S. Vajjha, “Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution”, *Applied Energy*, Vol. 86, 2566– 2573, 2009. [۲۵]
- H.W. Coleman; W.G. Steele, “Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers”, Third edition, John Wiley & Sons, INC., 2009. [۲۶]
- امانی، جعفر، ”مطالعه تجربی تأثیر قطر نانوذرات بر انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم“، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، بهمن ماه ۱۳۹۰. [۲۷]
- B.C. Pak; Y.I. Cho, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”, *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 151– 170, 1998. [۱۲]
- Y. Xuan; W. Roetzel, “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701–3707, 2000. [۱۳]
- M. Corcione, “Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp.789– 793, 2011. [۱۴]
- F.M. White, “Viscous Fluid Flow”, Third edition, McGraw Hill, New York, 2006. [۱۵]
- A. Bejan, “Convection Heat Transfer”, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2004. [۱۶]
- F. Kreith; D.Y. Goswami; *The Mechanical Engineering Handbook Series*, second edition, CRC PRESS, 2005. [۱۷]
- R.W. Powell; C.Y. Ho; P.E. Liley, “Thermal conductivity of selected materials”, United States Department of Commerce, National Bureau of standards, 1962. [۱۸]
- S.J. Smith; R. Stevens; Sh. Liu; G. Li; A. Navrotsky; J.B. Goates; B.F. Woodfield, “Heat capacities and thermodynamic functions of TiO_2 anatase and rutile: Analysis of phase stability”, *American Mineralogist*, Vol. 94, pp. 236– 243, 2009. [۱۹]
- ED Palik; *Handbook Optical Constants*, V1, ISBN 0-12- 544423-6. [۲۰]
- A. Zamzamian; S. Nasser Oskouie; A. Doosthoseini; A. Joneidi; M. Pazouki, “Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al_2O_3 /EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under

۱۱- زیر نویس ها

^۱Ultrasonic^۲ CTAB^۳ TEM^۴ XRD