

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در لوله انحنادار

نگارنده : شیوا ملکی

استاد راهنما

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۵

مقدس ترین واژه ها در لغت نامه دلم

آن دو فرشته ای که هر لحظه وجودم را، از چشمه سار پر از عشق چشمانشان سیراب می کنند و در سختی ها و دشواری های زندگی،

همواره یآوری دلسوز و ذکا کار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند

مادرم، که زندگیم را دیون مهر و محبتش می باشم

و

پدرم، کوهی استوار و حامی من در طول تمام زندگی.

تعهد نامه

اینجانب شیوا ملکی دلار ستاکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در لوله انحنادار

تحت راهنمایی دکتر محسن نظری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی

توجه به افزایش راندمان فرایندهای انتقال حرارت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این توجه ویژه سبب شده تا سمت‌وسوی این تحقیقات به استفاده از روش‌ها و محیط‌های جدید سوق داده شود. استفاده از نانوسیال و تغییر شکل هندسی لوله‌ها روش‌هایی است که در این تحقیق برای بهبود انتقال حرارت بکار گرفته شده است. نانوسیال از معلق سازی نانوذرات در سیال پایه تولید می‌شوند. در لوله خمیده، نیروی گریز از مرکز که عامل به وجود آورنده جریان ثانویه است، سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه، بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال داخل لوله خمیده به‌طور کامل بررسی نشده است و این کار از اولین تحقیقات انجام شده در این حوزه است. در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در لوله خمیده با شرط مرزی دما ثابت به‌صورت تجربی در محدوده رینولدز ۴۰۰ تا ۲۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش از نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ (تولید شده از نانوذرات با اندازه متوسط ۱۵ نانومتر) که با روش دومرحله‌ای ساخته شده، به‌عنوان سیال عامل استفاده شده است. دمای سیال در ورودی لوله خمیده در طول آزمایش ثابت است. لازم به ذکر است جنس و مساحت سطح خارجی در هر سه لوله خمیده یکسان است اما نسبت انحنای آن‌ها متفاوت و برابر ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ در نظر گرفته می‌شود. سیال عامل در سیکل طراحی شده، جریان یافته و اندازه‌گیری‌های دما با توجه به پارامترهای مورد نیاز در شرط مرزی دما ثابت انجام می‌شود. همچنین افت فشار ایجاد شده در طول لوله آزمایش توسط یک دستگاه اندازه‌گیری افت فشار ثبت و گزارش می‌شود. آزمایش‌ها در رینولدزهای مختلف و در هر رینولدز چند مرتبه تکرار شده و نتایج آن به‌وسیله روش آماری بازه اطمینان با دقت ۹۵ درصد محاسبه می‌شوند. همچنین از روابط موجود برای لوله‌های خمیده، جهت صحت‌سنجی نتایج تجربی افت فشار استفاده شده است. نتایج این مقایسه حاکی از خطای قابل قبول نسبت به نتایج پیش‌بینی شده است.

نتایج به دست آمده نمایانگر افزایش بیشینه ۱۵٪، ۱۳٪ و ۱۲٪ انتقال حرارت جابجایی به ترتیب در لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲، ۰/۰۷۴ و ۰/۱۱۶ با استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل در لوله نسبت به سیال پایه است. همچنین نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نسبت به لوله با انحنای بیشتر ۰/۱۱۶ است. افزایش حداکثر ۲۲ درصدی برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ و افزایش حداکثر ۴۵ درصدی برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ در محدود رینولدز ۱۳۰۰ در این حالت مشاهده شده است. علاوه بر آن بیشینه حرارت جذب شده نانوسیال، در لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ به ترتیب ۴/۷ و ۱/۱۵ برابر حرارت جذب شده نانوسیال در لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶ است.

کلمات کلیدی

نانوسیال، لوله خمیده، بررسی تجربی، انتقال حرارت جابجایی اجباری، افت فشار

لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه:

- شیوا ملکی دلارستاقی، محسن نظری، امین شاکری؛ بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در لوله انحنادار؛ امیرکبیر (تحت داوری)
- شیوا ملکی دلارستاقی، محسن نظری، امین شاکری؛ مطالعه تجربی اثرانحنا بر نرخ انتقال حرارت لوله‌های خمیده؛ دومین کنفرانس سراسری دستاوردهای نوین در مهندسی مواد، مکانیک و هوافضا (پذیرش مقاله)

فصل ۱ معرفی و پیشینه تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه‌ای از نانوسیال.....	۲
۱-۱-۱- مفهوم و کاربرد نانوسیال.....	۲
۱-۱-۲- نحوه آماده‌سازی نانوسیال.....	۲
۱-۱-۳- رسانش گرمایی در نانوسیال.....	۳
۱-۱-۴- بررسی انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال.....	۶
۲-۱- مقدمه‌ای از لوله خمیده.....	۱۰
۱-۲-۱- انتقال حرارت نانوسیال در انواع لوله‌های خمیده.....	۱۰
۳-۱- جمع‌بندی و طرح پیشنهادی.....	۱۶
۴-۱- رئوس مطالب.....	۱۷
۵-۱- اهداف.....	۱۷
۶-۱- نوآوری.....	۱۸
فصل ۲ لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی.....	۱۹
۱-۲- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش.....	۲۰
۱-۱-۲- لوله آزمایش.....	۲۰
۲-۱-۲- مخزن آب.....	۲۲
۳-۱-۲- عایق.....	۲۳
۴-۱-۲- سنسور دما.....	۲۴
۵-۱-۲- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار.....	۲۴
۶-۱-۲- دستگاه ثبت دما.....	۲۵
۷-۱-۲- پمپ.....	۲۶
۸-۱-۲- المنت حرارتی.....	۲۷
۹-۱-۲- دستگاه همگن‌ساز.....	۲۷
۱۰-۱-۲- نانوسیال.....	۲۸
۲-۲- کالیبراسیون.....	۳۱
۳-۲- سیستم آزمایشگاهی.....	۳۲
۱-۳-۲- روش آزمایش.....	۳۲
فصل ۳ نتایج.....	۳۷
۱-۳- تحلیل داده‌ها.....	۳۸
۱-۱-۳- عدد ناسلت.....	۳۸
۲-۳- نتایج شرط مرزی دما ثابت در دیواره لوله.....	۴۰
۱-۲-۳- افت فشار.....	۴۶
۲-۲-۳- صحت‌سنجی ضریب اصطکاک داریسی.....	۴۹

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۵۳
۱-۴- نتیجه‌گیری	۵۴
۲-۴- پیشنهادها	۵۶
فصل ۵ پیوست الف: نانوسیالات	۵۷
۱-۵- تهیه نانوسیال	۵۸
۱-۱-۵- روش تهیه یک مرحله‌ای	۵۸
۲-۱-۵- روش تهیه دو مرحله‌ای	۶۱
۲-۵- پایداری نانوذرات در نانوسیالات	۶۴
۱-۲-۵- تغییر PH سوسپانسیون	۶۵
۲-۲-۵- استفاده از فعال‌کننده‌های سطح و پخش‌کننده‌ها	۶۵
۳-۲-۵- استفاده از نوسانات ماورای صوت	۶۶
۳-۵- خصوصیات نانوسیال بر مبنای درصد حجمی و جرمی	۶۷
۱-۳-۵- چگالی و ظرفیت حرارتی	۶۸
۲-۳-۵- گرانروی	۶۸
۳-۳-۵- بررسی تجربی انتقال حرارت هدایت نانوسیالات	۷۰
فصل ۶ پیوست ب: روش فاصله اطمینان	۷۱
۱-۶- تعاریف	۷۲
۲-۶- انواع خطاهای تجربی و منابع آن‌ها	۷۲
۱-۲-۶- خطای تصادفی	۷۲
۲-۲-۶- خطای سیستماتیکی	۷۳
۳-۶- سنجش خطا برای انواع ابزارهای اندازه‌گیری	۷۳
۴-۶- عدم قطعیت	۷۴
۱-۴-۶- اندازه‌گیری عدم قطعیت	۷۴
۲-۴-۶- آنالیز عدم قطعیت	۷۵
۵-۶- فاصله اطمینان	۷۶
مراجع	۷۸

فهرست اشکال

- شکل ۲-۱ نمایی از لوله خمیده با نسبت انحنا الف) ۰/۱۱۶، ب) ۰/۰۷۴، ج) ۰/۰۴۲ ۲۱
- شکل ۲-۲ نمایی از سه لوله آزمایش ۲۲
- شکل ۲-۳ نمایی از مخزن سیال ۲۳
- شکل ۲-۴ نمایی از عایق لوله‌ای ۲۳
- شکل ۲-۵ سنسور اندازه‌گیری دمای سیال ۲۴
- شکل ۲-۶ دستگاه سنجش افت فشار ۲۵
- شکل ۲-۷ دستگاه ثبت دما ۲۶
- شکل ۲-۸ نمایی از پمپ دنده‌ای ۲۶
- شکل ۲-۹ نمایی از المنت میله‌ای و المنت مارپیچ ۲۷
- شکل ۲-۱۰ نمایی از دستگاه همگن‌ساز ۲۸
- شکل ۲-۱۱ تصویر TEM از نانوپودر مورد استفاده ۲۹
- شکل ۲-۱۲ الف) نانوپودر آلومینا، ب) نانوسیال آلومینا ۳۰
- شکل ۲-۱۳ الف) دستگاه آزمایش ب) شماتیک سیستم آزمایشگاهی ج) نمای بالا مخزن سیال ۳۴
- شکل ۳-۱ عدد نا سلت آب و نانو سیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ ۴۲
- شکل ۳-۲ بهبود انتقال حرارت لوله‌های خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ و ۰/۰۷۴ نسبت به لوله با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ ۴۲
- شکل ۳-۳ انتقال حرارت آب و نانو سیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۴۳
- شکل ۳-۴ انتقال حرارت آب و نانو سیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۴۴
- شکل ۳-۵ مقایسه دمای خروجی سیال برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۴۵
- شکل ۳-۶ درصد افزایش عدد ناسلت نانوسیال آلومینا تابعی از عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۴۶
- شکل ۳-۷ افت فشار در رینولدزهای مختلف برای الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ ۴۸
- شکل ۳-۸ میزان افزایش عدد نا سلت بر میزان افزایش افت فشار برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۴۹
- شکل ۳-۹ مقایسه ضریب اصطکاک تجربی با رابطه ایتو برحسب رینولدز برای الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ ۵۱
- شکل ۳-۱۰ مقایسه خطای ضریب اصطکاک روابط تئوری و تجربی در لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت ۵۱

۵۲.....	
۵۹.....	شکل ۱-۵ روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۷۱].....
۶۰.....	شکل ۲-۵ تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است [۷۲].....
۶۲.....	شکل ۳-۵ نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله‌ای [۷۲].....
۶۳.....	شکل ۴-۵ تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات [۷۸].....
۷۳.....	شکل ۱-۶ خطای اندازه‌گیری وسایل درجه‌بندی شده.....
۷۳.....	شکل ۲-۶ خطای اندازه‌گیری وسایل رقمی.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ روابط پیش‌بینی‌شده انتقال حرارت در نانوسیال ۷
- جدول ۱-۲ مشخصات نانوپودر آلومینا ۲۹
- جدول ۱-۵ مدل‌های موجود برای گرانشیالات در نانوسیالات ۶۹
- جدول ۱-۶ عدم قطعیت چند تابع پرکاربرد ۷۵
- جدول ۲-۶ جدول تعیین ضریب تعمیم ۷۷

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

A	سطح انتقال حرارت (m^2)
C_p	ظرفیت ویژه حرارتی ($J/Kg.k$)
r	شعاع لوله (m)
\dot{m}	نرخ جرمی جریان (Kg/s)
q	شار حرارتی (W)
Q	نرخ دبی حجمی (m^3/s)
T	دما (K)
R	شعاع انحنای (m)
U	سرعت (m/s)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($w/m k$)
K	ضریب رسانش حرارتی ($w/m k$)
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
De	عدد دین
$\delta = r/R$	نسبت انحنا

• علائم یونانی

μ	گرانروی دینامیکی ($N-s/m^2$)
ρ	چگالی (Kg/m^3)
f	ضریب اصطکاک داریسی
φ	درصد حجمی

• زیرنویس‌ها

eff	مؤثر
in	ورودی
out	خروجی
np	نانوذره
nf	نانوسیال

bf

W

b

w

سیال پایه

دیواره

دمای بالک

آب

۱ معرفی و پیشینه تحقیق

۱-۱ مقدمه‌ای از نانوسیال

۱-۱-۱ مفهوم و کاربرد نانوسیال

به‌منظور مدیریت تقاضای رو به رشد صنایع مختلف از قبیل صنایع الکترونیک، خودروسازی و هوافضا، دستگاه مبدل حرارتی باید در اندازه و وزن کم و با کارایی بالا طراحی شود. هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات متداول در انتقال حرارت در صنایع مانند: آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول محدودیتی جدی در بهبود عملکرد و فشردگی این تجهیزات مهندسی است.

بیش از یک قرن قبل دانشمندان و مهندسين تلاش بسیاری برای شکستن این محدودیت با انتشار ذرات میلی‌متر یا میکرومتری در مایعات انجام دادند اما در هر حال بزرگ‌ترین مشکل استفاده از این سیالات، ته‌نشینی سریع ذرات و عدم پایداری بود. به مخلوطی از ذرات نانو فلزی یا غیرفلزی که در یک سیال پایه معلق شده باشند، نانوسیال اطلاق می‌شود. نانو ذرات معمولاً دارای قطری بین ۱ تا ۲۵۰ نانومتر می‌باشند. مواد مختلف در این مقیاس از خود خواص متفاوت و جالبی را بروز می‌دهند. عوامل مهمی همچون ساختار سطح، شکل و حرکت نانوذرات نقش مهمی در انتقال حرارت نانوسیال بازی می‌کنند. افزودن نانوذرات به یک سیال نظیر آب علاوه بر هدایت حرارتی سایر خواص فیزیکی نظیر ظرفیت حرارتی، چگالی و ویسکوزیته سیال را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. مجموعه تغییرات ایجاد شده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش هدایت حرارتی، در انتقال حرارت جابجایی نیز شاهد افزایش ضریب انتقال حرارت باشیم.

۱-۱-۲ نحوه آماده‌سازی نانوسیال

خصوصیات سوسپانسیون بستگی به نوع سیال پایه، اندازه ذرات جامد معلق، شکل آن‌ها و کیفیت پراکنده‌سازی ذرات در داخل مایع دارد. تهیه و ساخت نانوسیالات به‌سادگی ساخت مخلوط‌های مایع-جامد معمولی نیست و موارد خاصی را برای تهیه نانوسیال باید رعایت کرد تا سوسپانسیونی پایدار، بدون

توده شدن ذرات^۱ و تغییر شیمیایی در سیال پایه به دست آید. شیوه‌های تهیه نانوسیال کلاً به دو روش تقسیم می‌شود: روش یک مرحله‌ای و روش دومرحله‌ای. توضیحات کامل در زمینه روش‌های تولید، پایدارسازی، نحوه محاسبات خواص و کاربردهای نانوسیالات در پیوست الف بیان شده است.

۱-۱-۳ رسانش گرمایی در نانوسیال

ضریب رسانش گرمایی مهم‌ترین پارامتر برای نشان دادن پتانسیل سوسپانسیون ذرات (نانوذرات- مایع) برای افزایش انتقال گرما است. مطالعات تجربی در زمینه ضریب رسانش گرمایی نانوسیال در چند سال اخیر رشد زیادی نموده است. مدل ماکسول [۱] یک مدل قدیمی برای هدایت حرارتی مخلوط‌های جامد-مایع با ذرات نسبتاً بزرگ است که فقط برای ذرات کروی جواب درستی می‌دهد.

$$K_{eff, Maxwell} = \frac{K_p + 2K_1 + 2(K_p - K_1)\phi}{K_p + 2K_1 - (K_p - K_1)\phi} K_1 \quad (1-1)$$

K_p : رسانش گرمایی ذره (W/m . °K)

K_1 : رسانش گرمایی سیال پایه (W/m . °K)

ϕ : جزء حجمی ذره در سیال پایه

مدل ماکسول نشان می‌دهد که هدایت حرارتی مؤثر سوسپانسیون‌ها به هدایت حرارتی سیال پایه و ذره کروی و جزء حجمی نانو ذرات وابسته است.

پس از مدل ماکسول، مدل همیلتون-کراسر [۲] برای هدایت حرارتی مؤثر مخلوط دوجزئی توسعه یافت که علاوه بر جزء حجمی و هدایت حرارتی سیال پایه و ذره، شکل ذرات معلق را نیز در

^۱ agglomeration

هدایت حرارتی سوسپانسیون مؤثر دانست:

$$K_{eff, Hamilton} = \frac{K_p + (n-1)K_1 - (n-1)(K_1 - K_p)\phi}{K_p + (n-1)K_1 + (K_1 - K_p)\phi} \quad (2-1)$$

n ضریب شکل و به صورت $n = \frac{3}{\psi}$ تعریف می شود و ψ عبارت است از نسبت مساحت کره (با

حجمی برابر حجم ذره) به مساحت سطح ذره، که نشان دهنده افزایش رسانش مؤثر ذرات غیر کروی است.

ژوان و لی [۳] از مدل همیلتون-کراسر برای رسیدن به یک برآورد تقریبی هدایت حرارتی نانوسیالات برای مقادیر مختلف ψ از ۰/۵ تا ۱ استفاده کردند. داده‌ها نشان دادند که نتایج مدل برای $\psi = ۰/۷$ نزدیک به داده‌های تجربی آن‌ها بود. لی و همکاران [۴] نشان دادند که نسبت‌های هدایت حرارتی برای $\psi = ۱$ (ذرات کروی) که از این مدل حساب شد در تطابق خوبی با نتایج تجربی آن‌ها از نانو سیال Al_2O_3 بود. هرچند این مدل برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانو سیال اکسید مس مناسب نبود.

ونگ و همکاران [۵] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد کردند:

$$k_{eff, Wang} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr} k_1 \quad (3-1)$$

$K_{cl}(r)$: هدایت حرارتی خوشه‌های ذره

$n(r)$: تابع توزیع شعاعی

با در نظر گرفتن اثر اندازه و جذب سطحی نانوذره، مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی برای

ذرات ۵۰ نانومتر CuO معلق در آب یونیزه شده با غلظت‌های کمتر از ۰/۲۵ درصد حجمی مطابقت داشت. ژيو [۶] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه کرد. مدل پیشنهادی بر مبنای نظریه ماکسول و نظریه قطبیت متوسط و با فرض وجود یک پوسته‌ی سطحی میان نانوذرات و سیال استوار بود. نتایج این مدل با داده‌های تجربی چوی و همکاران [۷] برای نانوسیال روغن- نانولوله کربنی و با داده‌های ژو و همکاران [۸] برای نانوسیال آب- نانوذره Al_2O_3 مقایسه شد.

عبارتی تحلیلی برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر مخلوط‌های جامد-سیال توسط یو و چوی [۹] معرفی شد. آن‌ها پیشنهاد کردند که یک مدل ساختاری از نانوسیالات ممکن است شامل یک توده سیال، نانوذرات جامد و نانولایه‌های شبه جامد شود. نانو لایه شبه جامد مثل یک پل حرارتی میان یک نانوذره جامد و یک توده سیال عمل می‌کند [۹]. این رابطه به صورت () است:

$$k_{eff,yu} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi} k_1 \quad (۴-۱)$$

β : نسبت ضخامت نانو لایه به شعاع ذره اصلی

k_p : هدایت حرارتی معادل ذره معادل

از دیگر تئوری‌ها در رابطه با ضریب رسانش گرمایی مؤثر سیالات، تئوری‌های جفری [۱۰] و

دیویس [۱۱] می‌باشند:

$$\frac{K_{eff(Jeffrey)}}{K_1} = 1 + 3\beta v + \left[3\beta^2 + \frac{3\beta^2}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \dots \right] v^2 \quad (۵-۱)$$

$$\frac{K_{eff(Davis)}}{K_1} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)v} \left[v + f(\alpha)v^2 + o(v^3) \right] \quad (۶-۱)$$

در این معادلات K_{eff} ضریب رسانش گرمایی مؤثر نانوسیال $\alpha = \frac{K_p}{K_1}$ و $\beta = \frac{\alpha-1}{\alpha+2}$ می‌باشند. در این دو معادله، ترم‌های با درجه بالا برهم‌کنش تصادفی هر جفت از ذرات کروی پراکنده را ارائه می‌دهند. همچنین در () برای آلفای برابر ۱۰، $f(\alpha)=2/5$ و برای آلفا بینهایت، $f(\alpha)=0/5$ است.

۱-۱-۴ بررسی انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال

اگر بخواهیم عملکرد حرارتی نانوسیالات را در صنایع مختلف مورد بررسی قرار دهیم، ضریب انتقال حرارت جابجایی به مراتب پارامتر مناسب‌تری نسبت به هدایت حرارتی خواهد بود. به همین دلیل، مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت (h) مورد توجه محققان قرار گرفته است. درحالی‌که افزایش در هدایت حرارتی مؤثر همانند تغییر در چگالی، گرمای مخصوص و لزجت علائم مهم بهبود رفتار انتقال حرارت نانوسیالات هستند، فایده اصلی نانوسیالات به‌عنوان سیالات انتقال حرارت از طریق ضریب انتقال حرارت جابجایی تعیین می‌شود. اگر نانوسیالات بتوانند ضریب انتقال حرارت تجهیزات و دیگر سیستم‌های حرارتی را بهبود ببخشند، می‌توانند کاهش اندازه چنین سیستم‌هایی را تسهیل کنند و منجر به افزایش راندمان انرژی و سوخت، کاهش آلودگی و بهبود ضریب اطمینان شوند. به این منظور اندازه‌گیری مستقیم عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات تحت شرایط جریان نمونه و کاربردهای خاص ضروری است. تاکنون تحقیق گزارش‌شده کمی در این زمینه وجود دارد. با این حال، مدل‌های ارائه‌شده تا به امروز دارای محدودیت‌های زیادی بوده و این تحقیقات به‌نوعی در مراحل ابتدایی خود به سر می‌برند. مدل‌های معرفی شده برای ضریب انتقال حرارت نانوسیالات، بسیار کمتر از مدل‌های موجود برای هدایت حرارتی بوده و در این زمینه کارهای بسیار کمتری انجام گرفته است. تمام معادلات معرفی شده برای h به‌نوعی از روابط رایج مثل رابطه دیتوس-بولتر [۱۲] و یا رابطه نیلینسکی [۱۳] مشتق شده که پارامترهای تجربی را به آن‌ها می‌افزایند. بنابراین، این معادلات تنها برای نانوسیالات خاص در یک محدوده مشخص پارامترها، صدق می‌کنند. در نتیجه به کارهای تجربی بیشتری در این قسمت نیاز بوده تا بتوان مدل‌های کلی کاربردی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در نانوسیالات ارائه داد.

جدول ۱-۱ روابط پیش‌بینی‌شده انتقال حرارت در نانوسیال

رابطه پیشنهادی	نانوسیال	محقق
$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5}$	Al ₂ O ₃ -water, turbulent, TiO ₂ -water	[۱۴]
$Nu = cRe_b^m Pr^{0.4}$ m, c پارامترهای وابسته به غلظت حجمی هستند.	Al ₂ O ₃ -water, pool boiling	[۱۵]
$Nu = 0.0059(1.0 + 7.6286\phi_p^{0.6886} pe_p^{0.001})Re^{0.9238}pr^{0.4}$	Cuo-water, turbulent	[۱۶]
$Nu = \frac{4\sqrt{5}}{3\Delta_{nf}} \left[\frac{\beta_r k_r^4}{378v_f^2(9\Delta_{nf} - 5)} Gr_b \right]_{\frac{1}{4}} (UWT)$ $Nu = \frac{6}{5} \left[\frac{2\beta_r k_r^4}{27v_f^2(9\Delta_{nf} - 5)} Gr_b \right]_{\frac{1}{5}} (UWT)$ $\Delta = \frac{\delta_T}{\delta} = \frac{\text{Thermal boundary layer thickness}}{\text{dynamical boundary layer thickness}}$	Al ₂ O ₃ , Newtonian laminar, natural convection	[۱۷]
$Nu = cRe^m pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{1}{3}} (\mu_F/\mu_\infty)^{0.14}$ m, c پارامترهای تجربی وابسته به دمای نانوسیال هستند.	Graphite-intransmission fluid, graphite-synthetic oil mixture, laminar	[۱۸]

چون و همکاران [۱۹] انتقال حرارت نانوذرات آلومینا با خواص مختلف را در روغن ترانسفورماتور

درون یک مبدل دولوله‌ای در رژیم جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. زینالی و همکاران [۲۰] انتقال

حرارت نانوسیال جریان آرام را در لوله دایروی افقی با دمای دیواره ثابت مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند با افزایش غلظت نانو سیال و افزایش عدد پکلت، انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. ژوان و همکاران [۱۶] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مس-آب را در جریان آرام و آشفته در یک لوله دایروی بررسی کردند و نشان دادند در یک رینولدز خاص انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال بیشتر از سیال پایه است و این افزایش با افزایش غلظت نانوسیال بیشتر می شود.

پژوهش تجربی نظری و همکاران [۲۱] بر روی مبدل خنک کار سی پی یو^۱ توسط نانوسیال آلومینا-آب و نانوسیال کربنی، افزایش حدود ۱۴ درصدی را بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی نشان داده است. مطالعه نظری و همکاران [۲۲] بر روی انتقال حرارت نانوسیال آلومینا-آب در لوله خالی با دمای دیواره ثابت نیز حاکی از افزایش حدود ۳۰ درصدی برای درصد حجمی ۱/۵ است. کیهانی و همکاران [۲۳] به بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیوم در محدوده گسترده ای از غلظت های ۰/۱ تا ۲ درصد در سیال پایه آب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداخته اند. نتایج آن ها نشان دهنده افزایش ۲۶ درصدی برای نانوسیال آب-آلومینا و افزایش ۸ درصدی برای نانوسیال آب-تیتانیوم با غلظت ۲ درصد است. نتایج آزمایشگاهی ون و همکاران [۲۴] نمایانگر افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه و افزایش انتقال حرارت با افزایش حجم نانو ذرات است، نتایج آن ها نشان داد که این افزایش در طول ناحیه ورودی بیشتر است. هو و همکاران [۲۵] به بررسی جابه جایی آزاد نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در سه نوع محفظه مربع شکل با ابعاد مختلف به همراه اندازه گیری تجربی کلیه خواص ترموفیزیکی نانوسیال پرداختند و اظهار داشتند که افزایش یا کاهش غیرعادی انتقال گرما را تنها با خواص ترموفیزیکی نانوسیال به طور ساده نمی توان توضیح داد. آن ها دلایل ممکن برای این رفتار غیرعادی را مورد بررسی قرار دادند و توضیح دادند که اثر کسر حجمی متغیر که بر اثر انتقال نانو ذرات به وجود می آید در جابه جایی

¹ CPU

طبیعی نانوسیال می‌تواند مهم باشد.

فتوکیان و همکاران [۲۶] نیز در لوله خالی با سطح مقطع دایروی افزایش ۲۵ درصدی انتقال حرارت جابجایی و ۲۰ درصدی افت فشار نانوسیال آب-اکسید مس را مشاهده نمودند. بن منصور و همکاران [۲۷] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در داخل لوله افقی و عمودی مسی تحت شار یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند نتایج آن‌ها نمایانگر کاهش اندک ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی ذرات از ۰ تا ۴ درصد است. همچنین آن‌ها توانستند دو رابطه جدید برای محاسبه عدد ناسلت برای لوله افقی و عمودی با محدوده مشخص عدد ریلی و عدد رینولدز و غلظت ذرات بالاتر از ۴ درصد حجمی ارائه دهند. از می^۱ و همکاران [۲۸] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری در جریان آشفته و ضریب اصطکاک نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم با غلظت ۰ تا ۴ درصد حجمی پرداختند. ردی^۲ و همکاران [۲۹] ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانوسیال تیتانیوم را در مبدل حرارتی دو لوله‌ای با و بدون وجود کوئل مارپیچ داخل آن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد وجود کوئل مارپیچ داخل مبدل از طرفی موجب افزایش انتقال حرارت و از طرف دیگر موجب افت فشار می‌شود.

برای حل عددی، مدل‌های متعددی برای بررسی گرمای جابجایی نانوسیال ارائه شده است که در قالب مدل همگن، مدل ناهمگن و مدل پراکندگی قابل تقسیم است. در مدل همگن فرض می‌شود که نانوسیالات مانند یک سیال معمولی رفتار می‌کنند و تمام معادلات معمول حاکم بر جریان سیال شامل بقای جرم، مومنتم و انرژی با در نظر گرفتن خواص معادل برای نانوسیال استفاده می‌شود. اکثر محققان از مدل همگن برای مطالعه جریان نانوسیال استفاده کرده‌اند. خانافر و همکاران [۳۰] به بررسی نانوسیال آب-اکسید مس در یک محفظه مربعی پرداخته‌اند. آن‌ها گزارش کردند که انتقال گرما با افزایش درصد

¹ Azmi

² Chandra Sekhara Reddy

حجمی نانوذرات در هر عدد گرافش افزایش می‌یابد. جو و تزدنگ^۱ [۳۱] و ازتپ و ابوندا^۲ [۳۲] نیز نتایج مشابه خانافر و همکاران را به دست آوردند. ابوندا و همکاران [۳۳] نانوسیال با خواص متغیر در یک محفظه را مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها دریافتند که برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با افزایش درصد حجمی نانوذرات، عدد ناسلت در رایلی‌های بالا کاهش و در رایلی‌های پایین افزایش می‌یابد. شیخزاده و همکاران [۳۴] جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید مس را در محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌های عمودی به صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند که انتقال گرما با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد.

اگرچه آزمایش‌های صورت گرفته رفتار حرارتی غیرعادی و پیچیده نانوسیالات را به خوبی نشان می‌دهد ولی استفاده از نانوسیالات برای کاربردهای حرارتی را نباید تنها به رسانش حرارتی آن‌ها مرتبط کرد. پارامترهای فراوان دیگری مثل اندازه ذره، شکل و توزیع، میکرو - جابجایی میزان pH و برهمکنش ذره - سیال نیز هستند که اثر مهم و زیادی روی عملکرد حرارتی نانوسیالات داشته و در آینده باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۱ مقدمه‌ای از لوله خمیده

۱-۲-۱ انتقال حرارت نانوسیال در انواع لوله‌های خمیده

عملکرد تجهیزات حرارتی با به کارگیری تکنیک‌های خاصی بهبود می‌یابد. به طور کلی این تکنیک‌ها را می‌توان به دو دسته تکنیک‌های فعال و تکنیک‌های غیر فعال تقسیم نمود. تکنیک‌های فعال به نیروهای خارجی نظیر میدان الکتریکی و مغناطیسی احتیاج دارند، در حالی که تکنیک‌های غیرفعال شامل اضافه کردن افزودنی‌ها به سیالات و یا تغییر شکل هندسی سیستم حرارتی است. استفاده

¹ Jou and Tzeng

² Oztop and Abu-Nada

از لوله‌های خمیده تکنیک‌های غیر فعال بهبود انتقال حرارت است. لوله‌های خمیده از اجزای ضروری تقریباً تمام تجهیزات فرایندهای صنعتی، اعم از صنایع تولید برق، مواد شیمیایی و مواد غذایی، مبدل‌های حرارتی، راکتورهای هسته‌ای و ... هستند. به‌طور کلی لوله‌های خمیده بر اساس شکل انحنای لوله به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- لوله‌های مارپیچ اسپیرال

- لوله‌های مارپیچ هلیکال

- سایر لوله‌های خمیده

عملاً با خم کردن یک لوله می‌توان انتقال گرما را تحت تأثیر قرار داد بدن اینکه تلاطمی ایجاد شود یا مساحت سطح انتقال گرما افزایش یابد. جریان داخل لوله را در مختصات استوانه‌ای در نظر بگیرید که دارای سه مؤلفه در محور مختصات است. هنگامی که لوله مستقیم است (در حالت کاملاً توسعه‌یافته)، سرعت در دو راستا صفر بوده و فقط در راستای z (در جهت حرکت سیال) سرعت داریم و هنگامی که لوله را خمیده می‌کنیم، به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز و شتاب حاصل از آن (و سایر مؤلفه‌های شتاب ایجاد شده) سرعت مؤلفه‌های دیگری می‌یابد که تابع شعاع انحنا لوله نیز هست. این مؤلفه جدید سرعت، میل دارد به سیال حرکت چرخشی بدهد، یعنی سیال هم‌زمان که در طول لوله به جلو می‌رود، حول خط مرکزی لوله دوران هم می‌کند. در لوله خمیده یک حرکت ثانویه خاص در مقطع عرضی لوله توسعه می‌یابد که ناشی از عدم تعادل بین نیروهای فشاری و نیروهای اینرسی است به‌عبارتی دیگر در لوله خمیده، جریان ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز باعث اختلاط جریان و بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین افت فشار اصطکاکی ایجاد شده در لوله خمیده به دلیل تأثیر نیروی گریز از مرکز بر ساختار جریان و به دنبال آن ایجاد جریان‌های ثانویه که سبب تنش‌های برشی قوی‌تر در لوله خمیده می‌شود، بیشتر از حالت لوله مستقیم است [۳۵]. قرارگیری لوله خمیده به‌صورت قائم یا افقی نیز بر روی

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مؤثر است انتقال حرارت باعث تغییر چگالی سیال و ایجاد یک حرکت انتقالی در اثر نیروی جابه‌جایی طبیعی می‌شود. راجر و میهو [۳۶] به‌صورت تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و افت فشار کوئل مارپیچ که با بخار گرم می‌شد را مطالعه کردند. آن‌ها روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز، نسبت انحنای کوئل و عدد پرناتل برای جریان درهم داخل کوئل ارائه دادند. جایاکومار و همکاران [۳۷] پژوهشی عددی برای تعیین شاخص‌های حرارتی جریان درهم آب درون کوئل‌های حرارتی مارپیچ انجام دادند. آن‌ها با تغییر مشخصه‌های هندسی کوئل و لوله، مانند قطر لوله، قطر و گام کوئل، تغییرات ناسلت محلی را در طول و محیط دیواره لوله نشان دادند. میشر و گوپتا [۳۸] با مطالعه روی یک کوئل مارپیچ توانستند رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک در جریان درهم ارائه دهند. ضمن اینکه علی [۳۹] روابط کاملی به‌منظور پیش‌بینی افت فشار درون لوله‌های مارپیچ برحسب عدد اویلر، عدد رینولدز و گروه‌های هندسی ارائه کرده است. میرگل‌بابایی و همکاران [۴۰] مطالعه‌ای عددی روی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی یک کوئل مارپیچ با پوسته استوانه‌ای در اعداد رینولدز و رایلی مختلف، همچنین نسبت قطر لوله به قطر کوئل و گام بی‌بعد مختلف انجام دادند. تفاوت کار آن‌ها با کارهای مشابه در نظر گرفتن شرایط مرزی برای یک مبدل با انتقال حرارت سیال به سیال به‌جای در نظر گرفتن شرایط دما و شار حرارتی ثابت روی دیواره بود. نشاط و همکاران [۴۱] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی ناپایا را در مخزن حاوی لوله مارپیچ به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که عدد ناسلت در سطح بیرونی لوله مارپیچ تابعی از دبی جرمی در لوله مارپیچ و پارامترهای هندسی شامل طول، قطر و زمان است.

هاترون [۴۲] نخستین محقق بود که یک روش عددی برای جریان کاملاً توسعه‌یافته در لوله‌های خمیده ارائه کرد. مولین و همکاران [۴۳] با انجام یک مطالعه تجربی و عددی بر روی جریان در لوله‌های خمیده بیان داشتند که جریان ثانویه تأثیر قابل‌توجهی در اعداد رینولدز کمتر از ۲۰ ندارد. افزایش افت فشار جریان داخل لوله‌های خمیده در مقایسه با افت فشار لوله‌های معمولی برای اولین بار توسط گریندلی و گیسون [۴۴] مطرح گردید.

فناوری نانو از پیشرفته‌ترین فناوری‌های بشر است که کاربرد آن در انتقال حرارت موجب افزایش عملکرد حرارتی شده است. در این میان جریان در داخل لوله‌های خمیده یکی از مسائلی است که اهمیت زیادی دارد. علی [۴۵] انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال‌ها درون مبدل حرارتی با لوله‌های حلقوی مارپیچ با جریان درهم را مورد بررسی قرار داده است. محاسبات برای سه کویل با در نظر گرفتن نانوسیال آلومینا-آب با درصد حجمی ۰/۵-۲ درصد انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش نسبت انحنا ضریب انتقال حرارت و افت فشار افزایش و با افزایش درصد حجمی ذرات نانو ضریب انتقال حرارت و به همراه آن افت فشار افزایش می‌یابد. رخشا و همکاران [۴۶] با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال اکسید مس-آب در لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند و شاخص‌های عملکرد حرارتی را برای حالت‌های مختلف محاسبه کردند. اکبری دوست و همکاران [۴۷] بررسی تجربی و عددی بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان آرام و پایدار نانوسیال اکسید مس-آب درون لوله‌های مارپیچ با شرایط مرزی دما ثابت انجام داده‌اند. نتایج ارائه شده توسط آن‌ها نشان‌گر افزایش نرخ انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوسیال و عدد رینولدز است. همچنین آن‌ها بیان کرده‌اند که عدد ناسلت و افت فشار با کاهش نسبت انحنا در لوله‌های مارپیچ افزایش می‌یابد. ضمن اینکه آن‌ها در آزمایش‌های خود بازه‌ی محدودی از عدد رینولدز را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین آن‌ها با معرفی شاخص عملکرد^۱ بیان نموده‌اند که استفاده از نانوسیال، روش به مراتب بهتری به منظور بهبود عملکرد حرارتی تجهیزات دارد. کاهانی و همکاران [۴۸] مقایسه‌ای تجربی بین جریان آرام نانوسیال‌های آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم در لوله‌های مارپیچی انجام داده‌اند. نافون^۲ [۴۹] اثر غلظت نانوسیال و نسبت انحنا بر انتقال حرارت را تحت شرایط دمایی دیواره ثابت در لوله‌های مارپیچی افقی مورد مطالعه

^۱ Performance index

^۲ Naphon

^۲ Naphon

قرار داد. محاسبات برای سه کوپل با نسبت انحنای ۰/۰۳۵-۰/۰۴۳-۰/۰۰۶ و با در نظر گرفتن نانوسیال تیتانیوم-آب با درصد حجمی ۰/۰۵-۰/۰۱-۰/۰۲۵ انجام شد. نتایج نشان داد انتقال حرارت با کاهش نسبت انحنای و افزایش غلظت نانو سیال افزایش می‌یابد و در ادامه دو رابطه برای محاسبه عدد ناسلت و اصطکاک در لوله افقی مارپیچی ارائه شده است. کالب^۱ و همکاران [۵۰] انتقال حرارت جریان ویسکوز پایدار توسعه یافته در لوله خمیده با مقطع دایره‌ای با شرط مرزی شار ثابت دیواره را به روش عددی مورد مطالعه قراردادند. کالب و همکاران [۵۱] با انجام مطالعه عددی انتقال حرارت جریان ویسکوز توسعه یافته سیال نیوتنی با ویژگی‌های ثابت را در لوله خمیده با مقطع دایره‌ای با شرط مرزی دمای دیواره ثابت بررسی کردند و رابطه‌ای برای محاسبه عدد ناسلت متوسط در محدوده مشخص عدد دین و پراتنل یافتند.

اکبری‌نیا و همکاران [۵۲] به صورت عددی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات آب-آلومینا در یک لوله خمیده افقی را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که غلظت نانو ذرات تأثیر مستقیمی بر ضریب اصطکاک ندارد. اکبری‌نیا [۵۳] به صورت عددی اثر نیروی شناوری و گریز از مرکز، غلظت و انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا تحت جریان جرمی ثابت را در لوله خمیده مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد در جریان جرمی مشخص غلظت نانو ذرات اثر مثبت بر سرعت محوری و نیروی شناوری اثر منفی بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارند. اکبری‌نیا و همکاران [۵۴] تأثیر قطر ذرات جامد را بر انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات آب-آلومینا در لوله خمیده و جریان آرام مورد مطالعه عددی قراردادند. نتایج ارائه شده توسط آن‌ها بیانگر کاهش عدد ناسلت و جریان ثانویه و افزایش سرعت محوری با افزایش قطر ذرات جامد است اما افزایش قطر ذرات در اندازه نانو (نانوذرات) اثر قابل ملاحظه‌ای بر الگو و رفتار جریان ندارد. ابراهیمی‌نیا^۲ و همکاران [۵۵] بررسی عددی روی عملکرد انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا که خواص ترموفیزیکی آن تابعی از دما و غلظت ذرات در نظر گرفته شده، برای دو

^۲ Kalbl

^۱ Ebrahimnia

لوله صاف و منحنی با طول و قطر برابر و در جریان آرام انجام دادند. نتایج حاکی از آن است که برای شار حرارتی مشخص با افزایش غلظت نانوذرات اختلاف دمای ورودی و خروجی کمتر می‌شود به عبارتی دیگر انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد وجود نانوذرات و انحنا سبب افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌شود. بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آلومینا-آب در لوله خمیده توسط چوی و همکاران [۵۶] انجام شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز و پرانتل عدد ناسلت افزایش می‌یابد و افزایش ظرفیت گرمایی ویژه و افزایش غلظت نانو ذرات موجب بهبود انتقال حرارت و افزایش افت فشار در لوله می‌شود. در دبی حجمی مشخص انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال بیشتر از آب خالص است. همچنین نشان داده شد میزان انتقال حرارت در قسمت خم نسبت به ورودی و خروجی لوله به دلیل وجود جریان ثانویه بیشتر است. چن و ژانگ [۵۷] تأثیرات ترکیبی چرخش و انحنا را بر روی الگوی جریان، افت فشار، توزیع دما و عدد ناسلت لوله‌های خمیده مورد بررسی قرار دادند. ابراهیمی نیا و همکاران [۵۸] انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال مخلوط آب و نانو لوله کربنی را در لوله خمیده با خم ۹۰ درجه به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اثر انحنا و نانوذرات را بررسی کردند و دریافتند با توجه به حرکت جریان ثانویه ناشی از اثرات انحنا نرخ انتقال حرارت به طور قابل توجهی بهبود یافته است، این افزایش انتقال حرارت با افزایش قابل توجهی در تنش برشی دیواره که منجر به افزایش افت فشار می‌شود همراه است. همچنین نتایج نشان داد افزایش میزان غلظت نانولوله‌های کربنی منجر به نرخ انتقال حرارت بزرگ‌تر و توزیع دمای مقطعی یکنواخت می‌شود. بررسی عددی اثرات اعمال میدان مغناطیسی در فروسیال آب و اکسید آهن در لوله خمیده و مستقیم افقی توسط امین فر و همکاران [۵۹] انجام شد. نتایج آن‌ها بیانگر آن است نیروی شناوری به دلیل گرادیان دما، نیروی گریز از مرکز به دلیل انحنای لوله و نیروی کلونین به دلیل میدان مغناطیسی غیریکنواخت خارجی سه نیرو هستند که عمود بر جریان اصلی عمل می‌کنند و دلیل ایجاد جریان ثانویه در لوله خمیده می‌باشند. همچنین استفاده از میدان مغناطیسی خارجی باعث افزایش ضریب انتقال

حرارت در لوله مستقیم می‌شود اما در انتهای لوله خمیده به دلیل تقابل بین نیروی گریز از مرکز قوی‌تر و نیروی کلونین، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. لیبرتو^۱ و همکاران [۶۰] با شبیه‌سازی عددی، جریان توربولنت توسعه‌یافته و انتقال حرارت را در لوله خمیده مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در جریان آشفته در لوله خمیده نوسانات سرعت و دما در ناحیه بیرونی بیشتر از درونی است. سیوفالو^۲ و همکاران [۶۱] اثرات شناوری گرانشی و گریز از مرکز در جریان آرام و انتقال حرارت در لوله‌های منحنی و مارپیچ با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند.

۳-۱ جمع‌بندی و طرح پیشنهادی

مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد تعداد تحقیقات محدودی انتقال حرارت نانوسیال داخل لوله‌های خمیده را مورد بررسی قرار دادند و نیاز است مطالعات عمیق‌تر و دقیق‌تری در این مورد انجام شود و اثرات نسبت انحنای وجود و عدم وجود نانوذرات در سیال پایه بر انتقال حرارت و افت فشار مورد بحث قرار گیرد. در این تحقیق، استفاده از تکنیک‌های جدیدی همچون استفاده از نانوسیال و تغییر شکل هندسی لوله‌ها، در راستای بهبود کارایی سیستم‌های حرارتی بررسی شده است. پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت انواع جدید و کارآمدتر نانوسیالات و تغییر پارامتر و شکل هندسی لوله‌ها باعث شده است تا محققان توجه ویژه‌ای به این حیطه داشته باشند. برای مثال ساخت نانوسیالات با ذرات ریزتر و پایداری بیشتر، و گسترده شدن روش‌های ساخت انواع لوله‌ها مانند لوله‌های خمیده با اشکال و اندازه‌های مختلف از جمله این پیشرفت‌ها است. البته مطالعاتی که در زمینه انتقال حرارت نانوسیال در لوله‌های خمیده انجام‌شده، بسیار محدود و بیشتر به کارهای عددی پرداخته شده است و می‌توان گفت این پروژه جزء اولین تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه است. هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد حرارتی سه لوله خمیده گذرنده از مخزن حاوی سیال گرم (آب) با نسبت انحنای متفاوت و شرط مرزی دما ثابت است. همچنین از نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ به‌عنوان سیال عامل در لوله

^۱ Liberto

^۲ Ciofalo

آزمایش استفاده شده است. وجه مشترک هر سه لوله خمیده شامل یکسان بودن جنس و مساحت سطح خارجی، و وجه تمایز آن‌ها نسبت انحنای متفاوت است. با بررسی و مقایسه نتایج، امکان بهتری برای انتخاب لوله با نسبت انحنای کمتر وجود دارد زیرا هر افزایش در انتقال حرارت جابجایی مستقیماً در مصرف انرژی تأثیر دارد. همچنین افت فشار نیز به عنوان یکی از پارامترهای مهم در صنعت در هریک از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ رئوس مطالب

ابتدا در این فصل (فصل اول) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات، لوله‌های خمیده هر کدام به صورت جدا و تلفیق این دو حیطة با هم بحث شده است در ادامه اهداف پایان‌نامه و رئوس مطالب بیان گردیده. شیوه طراحی، معرفی دستگاه و تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش در فصل دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بحث و بررسی سه لوله خمیده با شرط مرزی دما ثابت در فصل سوم انجام شده است. در نهایت در فصل چهارم نتیجه‌گیری از نتایج به دست آمده و پیشنهادهای کارهای آتی بیان شده است. همچنین در انتها ویژگی‌ها و روش‌های ساخت نانوسیالات و توضیح درباره روش آماری بازه اطمینان در دو پیوست پایانی مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱ اهداف

اهداف مورد نظر در این تحقیق را می‌توان به این صورت خلاصه نمود:

- ✓ بررسی و محاسبه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آلومینا در لوله خمیده با سه نسبت انحنای متفاوت با شرط مرزی دما ثابت و مقایسه با انتقال حرارت سیال پایه
- ✓ اندازه‌گیری افت فشار نانوسیال داخل لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ و مقایسه آن با سیال پایه
- ✓ اندازه‌گیری افت فشار نانوسیال داخل لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ و مقایسه آن با سیال پایه

پایه

✓ اندازه‌گیری افت فشار نانوسیال داخل لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ و مقایسه آن با سیال

پایه

حال با توجه به روشن شدن ابعاد و اهداف تحقیق در فصول آینده به بررسی تفصیلی تحقیقات و

فرآیند آزمایشگاهی انجام‌شده در راستای نیل به اهداف مشخص‌شده می‌پردازیم.

۱-۶ نوآوری

در این تحقیق، ظرفیت بالقوه استفاده از تکنیک‌های جدیدی همچون نانو سیال و تغییر شکل هندسی در راستای بهبود سیستم‌های انتقال حرارت بررسی شده است. تحقیقات نشان می‌دهد، مطالعات انجام‌شده محدودی در زمینه بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال داخل لوله خمیده و تأثیر پارامترهای هندسی بر بهبود عملکرد آنها وجود دارد. بنابراین این تحقیق جزء اولین تحقیقات آزمایشگاهی در این حوزه است. در بیشتر تحقیقات انجام‌شده، مقایسه انتقال حرارت بین لوله خمیده و لوله مستقیم مورد بررسی قرار گرفته اما در این پژوهش با توجه به کاربرد لوله‌های خمیده در دستگاه‌های مختلف مهندسی از قبیل سیستم‌های لوله‌کشی، کارخانه‌های صنعتی، توربو ماشین و... این مقایسه، هم‌زمان بین سه لوله خمیده با جنس و مساحت سطح خارجی برابر و نسبت انحنای متفاوت با در نظر گرفتن افت فشار صورت گرفته و اثر نسبت انحنا و وجود نانوذرات در سیال پایه بر انتقال حرارت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲ لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی

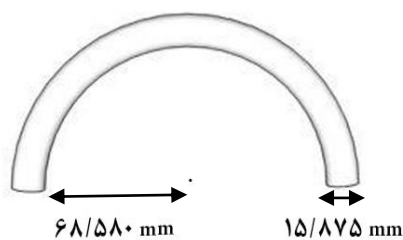
در این بخش تجهیزات آزمایشگاهی بکار گرفته شده در آزمایش معرفی و نحوه طراحی سیستم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۲ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

۱-۱-۲ لوله آزمایش

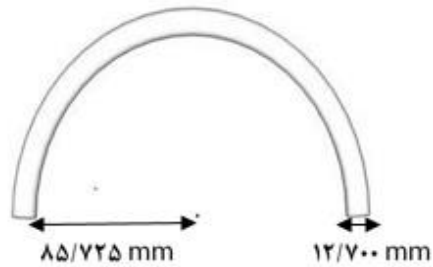
در این پژوهش انتقال حرارت جابجایی اجباری سیال درون لوله خمیده گذرانده شده از مخزن مکعب مستطیل شکل افقی از جنس تفلون مورد مطالعه قرار می گیرد. در این آزمایش از سه نوع لوله خمیده مختلف برای شرط مرزی دما ثابت استفاده شده است. وجه مشترک این سه لوله آزمایش یکسان بودن مساحت سطح خارجی و جنس لوله است.

لوله اول از جنس مس با قطر خارجی ۱۵/۸۷۵ میلی متر، ضخامت ۱ میلی متر و شعاع انحنا ۶۸/۵۸۰ میلی متر است. شکل ۱-۲ الف، نمایی از لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ را نشان می دهد.



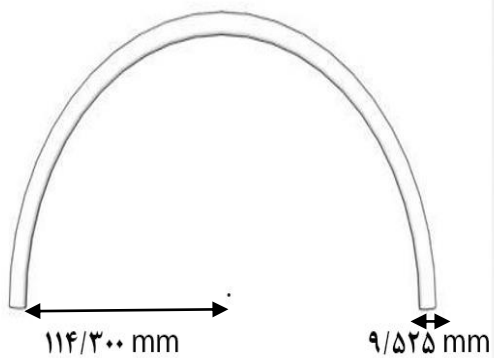
(الف)

لوله دوم از جنس مس با قطر خارجی ۱۲/۷۰۰ میلی متر، ضخامت ۱ میلی متر و شعاع انحنا ۸۵/۷۲۵ میلی متر است. شکل ۱-۲ ب، نمایی از لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ را نشان می دهد.



(ب)

لوله سوم از جنس مس با قطر خارجی ۹/۵۲۵ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر، شعاع انحنا ۱۱۴/۳۰۰ میلی‌متر است. شکل ۱-۲، نمایی از لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ را نشان می‌دهد.



(ج)

شکل ۱-۲ نمایی از لوله خمیده با نسبت انحنا الف (۰/۱۱۶، ب) ۰/۰۷۴، ج) ۰/۰۴۲

برای ساخت لوله خمیده مسی، ابتدا به لوله مستقیم مسی با شعله حرارت می‌دهند سپس با استفاده از دستگاه خم‌کن اهرمی متناسب با هر لوله، به آهستگی، با فشار یکسان و بدون تغییر اندازه

سطح مقطع، لوله را خم می‌کنند. شکل ۲-۲ نمای واضح از سه لوله آزمایش را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد.

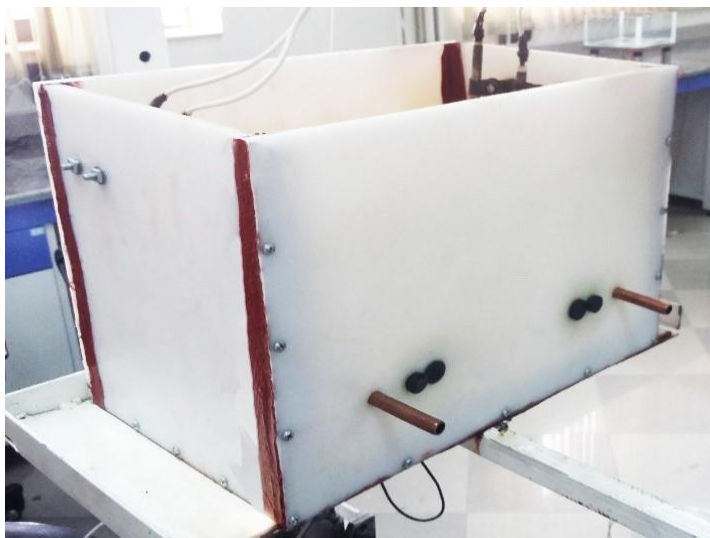


شکل ۲-۲ نمایی از سه لوله آزمایش

۲-۱-۲ مخزن آب

در این آزمایش لوله مسی در یک مخزن از جنس تفلون^۱ با طول ۳۵ سانتی‌متر، عرض ۲۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر قرار می‌گیرد. دمای آب پر شده در مخزن (توسط سه المنت حرارتی) حدود ۹۲ درجه سانتی‌گراد و دمای سیال ورودی به لوله خمیده گذرانده شده از مخزن (توسط مخلوط آب و یخ) حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۲-۳ نمایی از مخزن سیال را نشان می‌دهد.

^۱ Polytetrafluoroethylene



شکل ۲-۳ نمایی از مخزن سیال

۲-۱-۳ عایق

در این آزمایش از عایق نسوز فوم الاستومری^۱ لوله‌ای به رنگ مشکی به ضخامت ۱ سانتی‌متر که امروزه جایگزین سایر عایق‌های سنتی و قدیمی نظیر: پشم‌شیشه، پشم سنگ، مل و ماستیک، فوم سفیدرنگ و ... شده، برای عایق‌بندی لوله مستقیم ورودی به مخزن استفاده شده است.

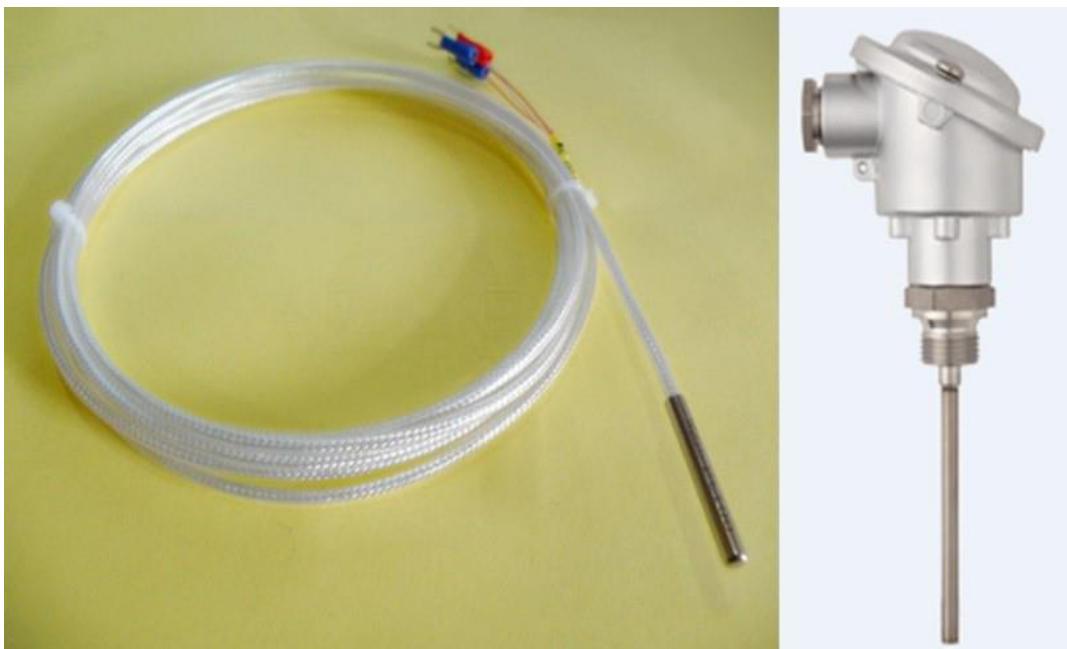


شکل ۲-۴ نمایی از عایق لوله‌ای

^۱ STIFLEX

۴-۱-۲ سنسور دما

برای ثبت دما از سنسورهای مقاومتی^۱ از نوع پی تی ۱۰۰^۲، تولیدشده توسط شرکت جمو^۳ آلمان استفاده شده است. این سنسور دارای دقت ± 0.1 درجه سانتی گراد است. در این دستگاه آزمایش یک سنسور برای مخزن سیال، دو سنسور به ترتیب برای ورودی و خروجی لوله مرکزی تعبیه شده است. در شکل ۲-۵ نمونه‌ای از این دو نوع سنسور مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۵ سنسور اندازه‌گیری دمای سیال

۵-۱-۲ دستگاه اندازه‌گیری افت فشار

افت فشار جریان سیال توسط دستگاه Rosemount3051 که به ابتدا و انتهای لوله‌ی تست متصل شده است، اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه به صورت دیجیتال، افت فشار دو سر لوله را که توسط دو خط فرعی به دستگاه وصل می‌شوند، اندازه‌گیری می‌نماید. تغذیه این دستگاه توسط یک مبدل ۲۴ ولت

^۱ RTD

^۲ PT100

^۳ Jumo

است. شکل ۶-۲ دستگاه سنجش افت فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲ دستگاه سنجش افت فشار

۶-۱-۲ دستگاه ثبت دما

برای ثبت دماهای سیستم تمامی سنسورها به دستگاه دیجیتالی ثبت دما متصل شده‌اند این دستگاه از نوع ADAM4015 است که قابلیت اتصال ۶ سنسور را به‌طور هم‌زمان داراست. دستگاه ADAM4561 نیز برای تبدیل داده‌ها، به اطلاعات قابل‌دسترس به رایانه استفاده شده است. نرم‌افزار شرکت ADAM با عنوان AdamApax.NET Utility برای ثبت اطلاعات در رایانه با دقت ۰/۰۱ سانتی‌گراد استفاده شده است. شکل ۷-۲ دستگاه ثبت دما را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲ دستگاه ثبت دما

۷-۱-۲ پمپ

پمپ مورد استفاده در این آزمایش از نوع پمپ‌های دنده‌ای^۱ با بیشینه دبی حجمی ۱۷۱۴/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه، توان ۱۵۰ وات و سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه است.



شکل ۸-۲ نمایی از پمپ دنده‌ای

^۱ Micro gear pump

۸-۱-۲ المنت حرارتی

در دستگاه آزمایش و داخل مخزن از دو المنت میله‌ای با توان ۱۰۰۰ وات و یک المنت مارپیچ با توان ۱۵۰۰ وات استفاده شده تا آب درون مخزن گرم و در دمای ۹۲ درجه سانتی‌گراد ثابت شود (دما ثابت). شکل ۹-۲ نمایی از این دو نوع المنت را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲ نمایی از المنت میله‌ای و المنت مارپیچ

۹-۱-۲ دستگاه همگن‌ساز

هموژنایزر التراسونیک^۱ یا همگن‌ساز فراصوتی، دستگاهی به منظور تبدیل یک جریان الکتریکی به یک ارتعاش مکانیکی است که سبب همگن شدن محلول می‌شود. این دستگاه با ایجاد امواج شدید فشاری در یک محیط مایع کار می‌کند. امواج فشاری باعث جریان در مایع شده و تحت شرایط مناسب موجب پدیده کاویتاسیون می‌شود. انفجار حباب‌ها تولید موج ضربه‌ای با انرژی کافی برای شکستن پیوند کووالانسی می‌کند. نیروی برشی حاصل از انفجار حباب و همچنین جریان‌های اغتشاشی ناشی از ارتعاش صوتی برای همگن‌سازی و تخریب سلول استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای متنوع این دستگاه می‌توان

^۱ Ultrasonic Homogenizer

به دیسپرس کردن نانوذرات در مایعات، تولید امولسیون و سوسپانسیون پایدار، شکاندن مولکول‌های پلیمری سنگین و فرآوری پروتئین‌ها اشاره نمود. دستگاه همگن‌ساز مورد استفاده PNC Q700 با حداکثر توان ۷۰۰ وات، فرکانس ۲۰ هرتز و ولتاژ ۱۱۰ ولت است. شکل ۲-۱۰ نمایی از دستگاه همگن‌ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰ نمایی از دستگاه همگن‌ساز

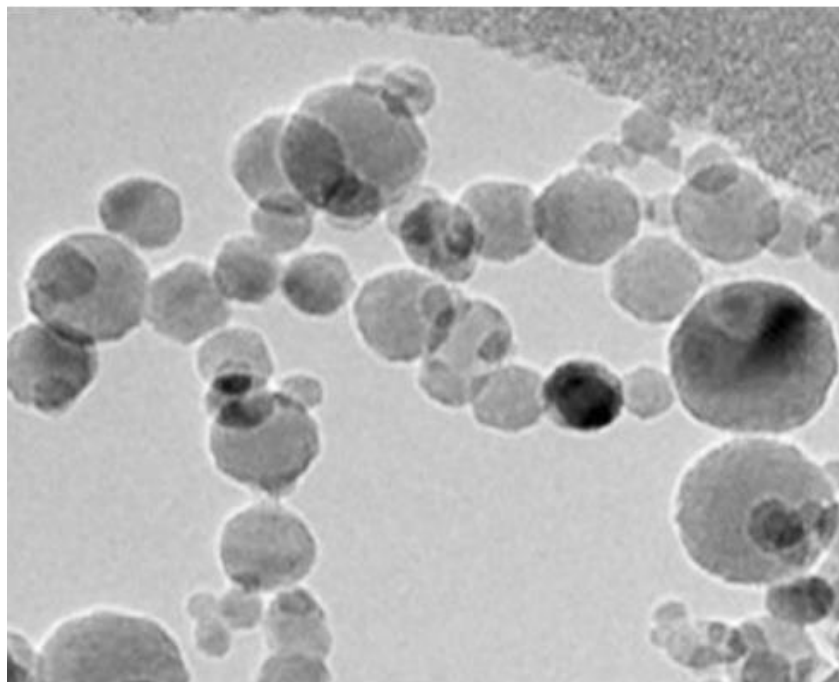
۲-۱-۱۰ نانوسیال

سیال عامل مورد استفاده در این آزمایش آب و نانوسیال آلومینا است. آماده‌سازی نانوسیال، جهت افزایش انتقال حرارت است. نانوپودر آلومینا مدل گاما با اندازه متوسط ۱۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹۹۵ درصد که توسط شرکت تحقیقاتی تکنان اسپانیا آماده شده، توسط دستگاه آلتراسونیک با قدرت ۳۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در سیال پایه (آب مقطر) برای مدت حداقل ۴۸ ساعت پایدار می‌ماند. نانوسیال آماده شده با این روش، بدون هیچ ته‌نشینی، کلوخه شدن، تغییر رنگ و به صورت کاملاً یک‌رنگ پایدار است. باید توجه داشت که برای جلوگیری از تغییر خواص حرارتی نانوسیال هیچ‌گونه ماده اضافی

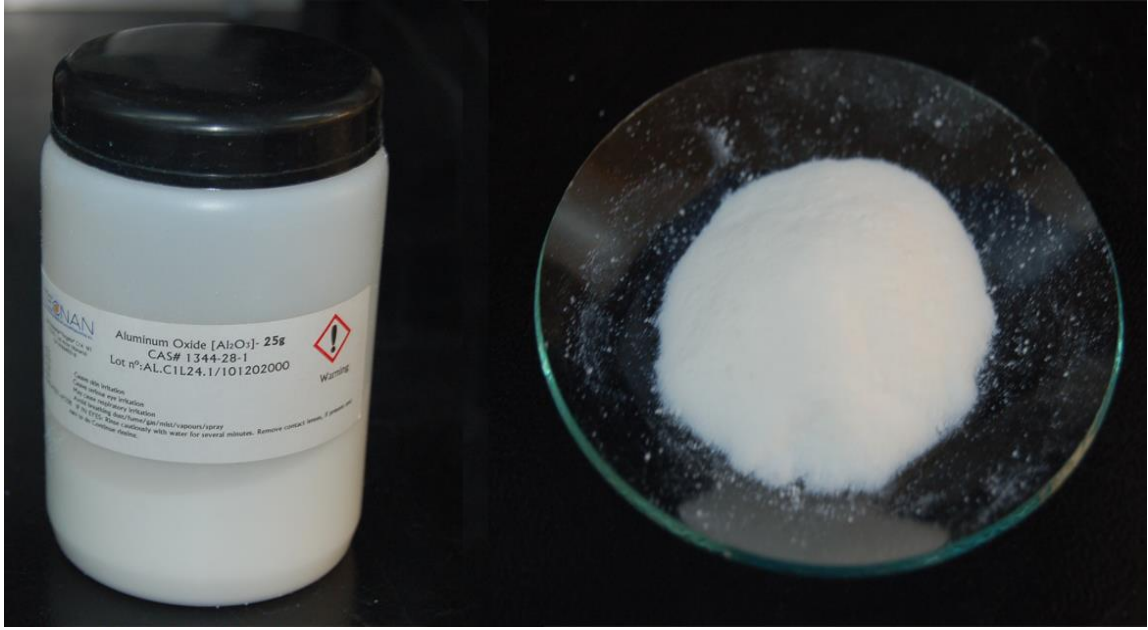
یا پایدارکننده به سیال اضافه نشده است. نانوسیال در درصد حجمی ۰/۱ آماده و مورد استفاده قرار گرفته است. جهت پایدارسازی نانوسیال از روش دومرحله‌ای استفاده شده است. شکل ۱۱-۲ تصویر TEM از نانوپودر آلومینا و شکل ۱۲-۲ نانوپودر و نانوسیال آلومینا و جدول ۱-۲ مشخصات نانوپودر را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ مشخصات نانوپودر آلومینا

مدل	رنگ	شکل	اندازه ذرات	چگالی
گاما	سفید	کروی	۱۰-۲۰ نانومتر	۳/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب



شکل ۱۱-۲ تصویر TEM از نانوپودر مورد استفاده



(الف)



(ب)

شكل ١٢-٢ (الف) نانوپودر ألومينا، (ب) نانوسیال ألومينا

سه پارامتر اصلی در محاسبه انتقال حرارت نانوسیالات، شامل: گرانی، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی، ممکن است با پارامترهای مربوط به سیال پایه متفاوت باشند. انیشتین [۶۲] برای محاسبه گرانی نانوسیال با غلظت کمتر از ۵ درصد رابطه (۱-۲۲) را ارائه داده است.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\varphi) \quad (1-22)$$

همچنین چگالی و گرمای ویژه نانوسیال در (۲-۲۲) و (۳-۲۲) نشان داده شده است که این روابط به ترتیب توسط پک و چو [۱۴] و ژوان و روتزل [۶۳] با داده‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (2-2)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi\rho_{np}C_{p,np} + (1 - \varphi)\rho_{bf}C_{p,bf}}{\rho_{nf}} \quad (3-2)$$

از اولین مدل‌های ریاضی برای رسانش گرمایی سوسپانسیون‌های ماکرو، مدل ماکسول [۶۴] است. در این مدل که در (۴-۲۲) نشان داده شده است. سوسپانسیون تنها تابعی از جزء حجمی ذره و رسانش گرمایی سیال و ذره است.

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_{np} + 2K_{bf} + 2\varphi(K_{np} - K_{bf})}{K_{np} + 2K_{bf} - \varphi(K_{np} - K_{bf})} \quad (4-2)$$

در این معادله φ کسر حجمی، K_{np} و K_{bf} به ترتیب ضریب رسانش حرارتی نانوذره و آب است.

۲-۲ کالیبراسیون

کالیبراسیون و دقت سنسورها توسط دو محفظه آب یخ و آب جوش انجام شده است. همچنین اندازه‌گیری‌های اولیه نمایانگر ایجاد نویز توسط دستگاه مبدل DC بر روی سنسورها بود. رفع این نویزها توسط اتصال یک سر سیم به بدنه شاسی آهنی و سر دیگر آن به قسمت اتصال به زمین پریز برق انجام شده است.

۲-۳ سیستم آزمایشگاهی

۲-۳-۱ روش آزمایش

دستگاه آزمایش در شکل ۲-۱۳-الف، شماتیک سیستم آزمایشگاهی در شکل ۲-۱۳-ب و نمای بالا از مخزن سیال در شکل ۲-۱۳-ج نمایش داده شده است. برای شروع آزمایش در هر مرحله می‌بایست ابتدا نرخ جریان سیال را تعیین کنیم تا سرعت جریان و به دنبال آن عدد رینولدز مشخص شود. در گام اول و قبل از شروع به آزمایش می‌بایست المنت حرارتی را روشن کرد تا زمانی که دمای محفظه آب (شماره ۲) که لوله آزمایش بطور کامل داخل آن قرار گرفته، روی ۹۲ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 0.5 در حالت جوشش^۱ قرار گرفته و ثابت شود. برای اطمینان از تثبیت دمای مخزن، از چند سنسور دما در نقاط مختلف محفظه آب استفاده شد (برای حالت دما ثابت). گام دوم ریختن سیال عامل در تانک سیال (شماره ۴) و روشن کردن پمپ است تا جریان ثانویه سیال در خط لوله برقرار گردد، سپس این سیال عامل به سمت مبدل حرارتی هدایت می‌شود. مبدل حرارتی از نوع پوسته لوله‌ای است که توسط آب شهر و یخ (مخلوط آب و یخ) فرآیند تثبیت دمای ورودی را بر روی ۱۸ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 0.5 انجام می‌دهد. در هر شدت جریانی می‌بایست ۱۰ الی ۲۰ دقیقه به سیستم اجازه کار دهیم تا سیستم به حالت پایا برسد، بطوریکه دمای سیال ورودی به بخش آزمایش دچار تغییر نشود و همواره سیال با یک دما وارد بخش آزمایش گردد. با رسیدن سیستم به حالت پایا در هر لحظه دمای سنسور مخزن، دمای سنسور ورودی و خروجی لوله آزمایش توسط دستگاه ثبت اطلاعات در کامپیوتر (شماره ۷ و ۸) ثبت و از مقادیر آن متوسط گرفته می‌شود. دستگاه سنجش افت فشار (شماره ۱۰) نیز در هر دبی تغییرات فشار را روی نمایشگر (شماره ۹) نشان می‌دهد. حال با در دست داشتن اطلاعات فوق می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت این جریان سیال را مشخص کرد. می‌یابد در این مدت دستگاه ثبت دما (شماره ۷ و ۸) در هر لحظه دمای سنسور مخزن، دمای ورودی و خروجی لوله تست را

¹ Boiling

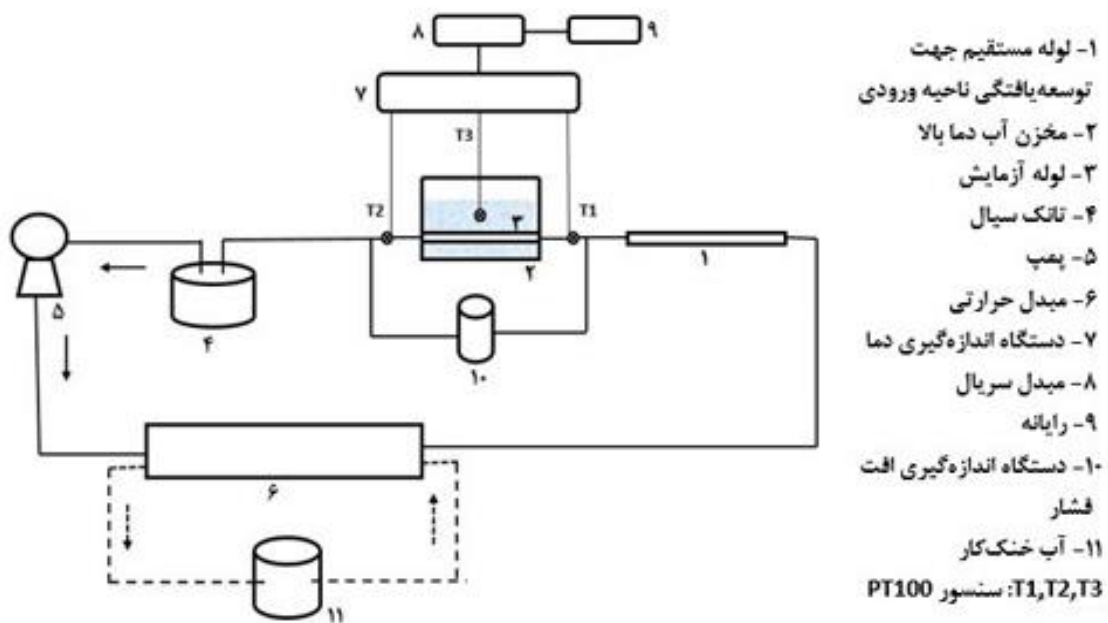
گزارش می‌کند. دستگاه سنجش افت فشار (شماره ۶) نیز در هر دبی تغییرات فشار را روی نمایشگر (شماره ۹) نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲ دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه‌گیری

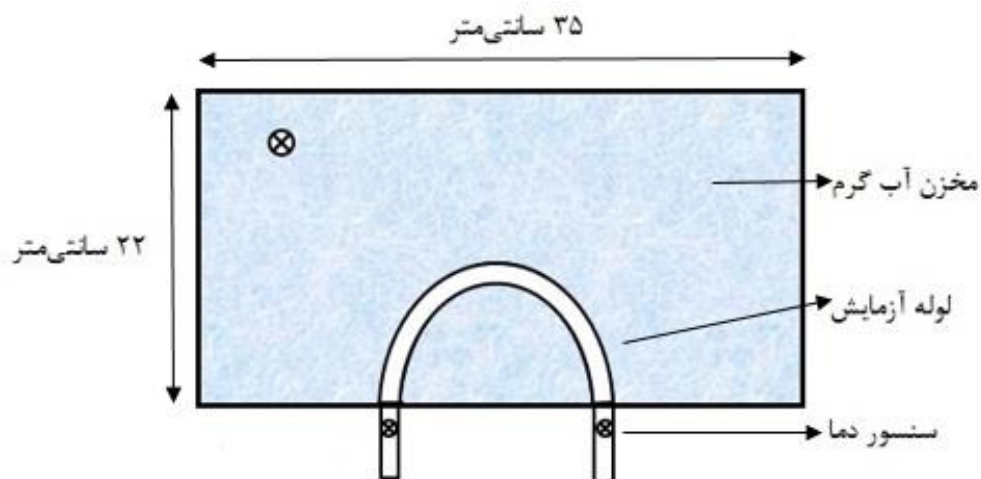
وسایل اندازه‌گیری	بازه تغییرات	دقت
سنسور دما	-۱۰۰ تا +۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	± 0.1 درجه سانتی‌گراد
پمپ	۱۷۱/۴ تا ۱۷۱۴/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه	± 0.1 میلی‌لیتر بر دقیقه
دستگاه اندازه‌گیری افت فشار	۰ تا ۶۲۰ میلی‌بار	± 0.001 میلی‌بار



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲-۱۳ الف) دستگاه آزمایش (ب) شماتیک سیستم آزمایشگاهی (ج) نمای بالا مخزن سیال

در این پژوهش جهت برقراری شرط توسعه یافتگی حرارتی و هیدرودینامیکی در قسمت ورودی مخزن از لوله مسی مستقیم با طول مشخص با توجه به مشخصات لوله و جریان و مقایسه آن با روابط طول ورودی و جریان توسعه یافته در کتاب اینکروپرا [۶۵] و کتاب وایت [۶۶] استفاده شده است و بر این اساس حداقل طول لوله مستقیم برای رعایت دو شرط توسعه یافتگی حرارتی و هیدرودینامیکی در

ورودی، برای لوله با قطر خارجی ۱۵/۸۷۵، ۱۲/۷ و ۹/۵۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۳/۲۵، ۲/۸۸ و ۱/۵ متر می‌باشد. دمای ورودی سیال در لوله‌ی آزمایش در طول آزمایش بر روی ۱۸ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌شود. دبی جریان طوری تنظیم می‌شود که رینولدز جریان در محدوده ۴۰۰ تا ۲۲۰۰ قرار گیرد. به منظور افزایش دقت، هر آزمایش سه مرتبه انجام و نتایج حاصل از آزمایشات بصورت بازه اطمینان ۹۵ درصد گزارش شده است. حداکثر عدم قطعیت برای دما، افت فشار، دبی، حرارت جذب شده توسط سیال و عدد ناسلت به ترتیب ۰/۵، ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۶۵، ۶/۵۶ و ۵/۷ درصد اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i در n بار تکرار آزمایش در پیوست ب بیان شده است. در این تحقیق، سه دسته آزمایش مختلف ارائه شده است که تفاوت آن‌ها در مشخصات هندسی لوله تست است. هدف از انجام این تحقیق بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری سیال درون لوله خمیده با نسبت انحناهای مختلف است.

۳ نتایج

۳-۱ تحلیل داده‌ها

۳-۱-۱ عدد ناسلت

عدد ناسلت یک عدد بی بعد است که در انتقال حرارت مبین نسبت گرمای انتقال یافته از طریق جابجایی به گرمای انتقال یافته از طریق رسانش در مرز سیستم است. یکی از راه‌های مفید برای بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم بررسی ضریب انتقال جابجایی و عدد ناسلت جریان است. ضریب جابجایی را می‌توان به صورت رابطه (۳-۱) تعریف نمود:

$$h = \frac{q}{A\Delta T_b} \quad (۳-۱)$$

که در آن q حرارت جذب شده سیال در طول لوله تست و ΔT_b اختلاف میانگین بین دمای دیواره و مرکز لوله بین ورودی و خروجی است. انرژی جذب شده سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۳-۲) تعریف کرد:

$$q = \dot{m}C_{p,eff}(T_o - T_i) \quad (۳-۲)$$

که در آن T_o دمای متوسط خروجی لوله، T_i دمای متوسط ورودی لوله و $C_{p,eff}$ ضریب هدایت مؤثر نانوسیال است [۶۷]:

$$C_{p,eff} = \frac{\varphi\rho_{np}C_{p,np} + (1-\varphi)\rho_{bf}C_{p,bf}}{(1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}} \quad (۳-۳)$$

برای تخمین دمای بالک سیال از دو روش استفاده می‌شود:

- **دمای میانگین:** اولین روش تعیین دمای بالک بر اساس میانگین دمای ورودی و خروجی است:

$$\Delta T_b = T_w - \left(\frac{T_i + T_o}{2} \right) \quad (4-3)$$

• روش **LMTD**: روش دیگری که توسط رفعتی و همکاران [۶۶] ارائه شده، از آن برای محاسبه دمای بالک استفاده شده است:

$$\Delta T_b = \ln \frac{T_w - T_i}{T_w - T_o} \quad (5-3)$$

در این آزمایش از هر دو روش برای محاسبه دمای بالک استفاده شده است. نتایج به دست آمده نمایانگر اختلاف ناچیز بین این دو روش است. بنابراین روش LMTD در ارائه نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به دمای بالک سیستم ضریب جابجایی به صورت رابطه (۶-۳) تعریف می شود:

$$h = \frac{\dot{m} C_{p,eff} (T_o - T_i)}{A \ln \frac{T_w - T_i}{T_w - T_o}} \quad (6-3)$$

برای محاسبه ضریب رسانش حرارتی مؤثر نانوسیال از معادله ۷-۳ استفاده می شود [۶۴]:

$$\frac{K_{eff}}{K_{bf}} = \frac{K_{np} + 2K_{bf} + 2\varphi(K_{np} - K_{bf})}{K_{np} + 2K_{bf} - \varphi(K_{np} - K_{bf})} \quad (7-3)$$

در نهایت می توان عدد ناسلت جریان را به صورت معادله ۸-۳ محاسبه نمود:

$$Nu = \frac{hD}{K_{eff}} \quad (8-3)$$

عدد رینولدز را به صورت رابطه (۹-۳) محاسبه می کنیم:

$$Re = \left(\frac{\rho}{\mu} \right)_{eff} UD \quad (9-3)$$

که در آن U سرعت متوسط سیال و D قطر لوله است.

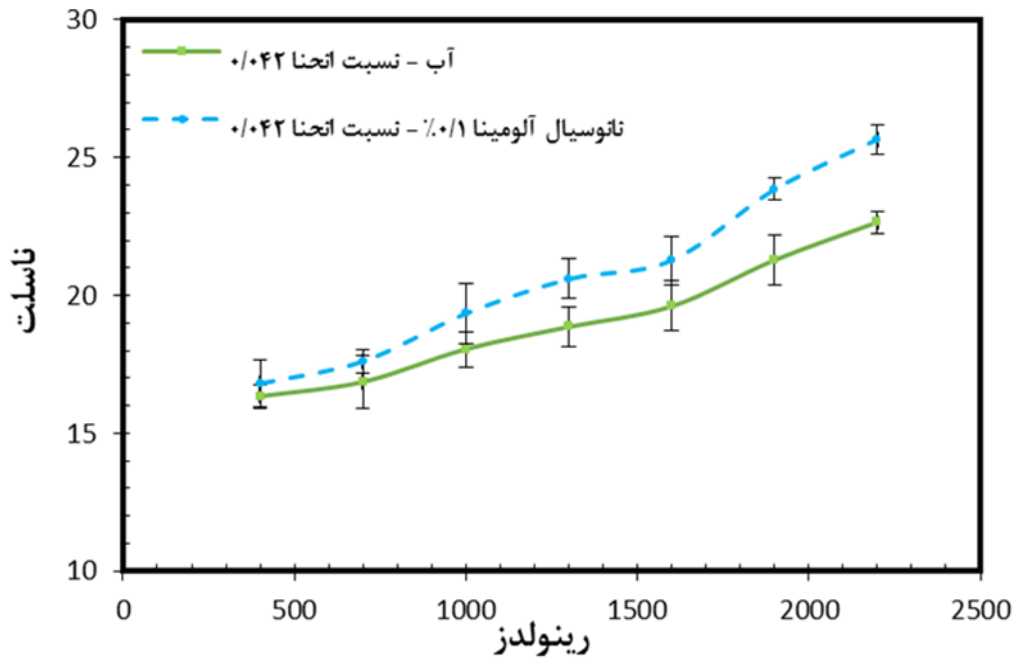
در این پروژه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیال درون لوله خمیده گذرنده از مخزن مکعب مستطیل شکل افقی و افت فشار آن به‌صورت آزمایشگاهی در محدوده رینولدز ۴۰۰ تا ۲۲۰۰ بررسی شده است. استفاده از نانوسیال‌ها نیازمند پایداری مناسب آن‌ها است که در مورد آن در فصل ۲ و پیوست الف به‌صورت کامل توضیح داده شده است. در این آزمایش‌ها آب و نانوسیال آلومینا در درصد حجمی ۰/۱ به‌عنوان سیال عامل در لوله آزمایش استفاده شده است. هدف اصلی از انجام این پروژه مقایسه تجربی بین سه لوله خمیده با شرایط یکسان (ثابت بودن مساحت سطح خارجی و جنس) و نسبت انحنای متفاوت است. آزمایش‌ها در شرط مرزی دما ثابت انجام و نتایج آن گزارش شده است. همچنین شماتیک سیستم آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش به‌طور کامل در فصل دوم بررسی شده است.

۳-۲ نتایج شرط مرزی دما ثابت در دیواره لوله

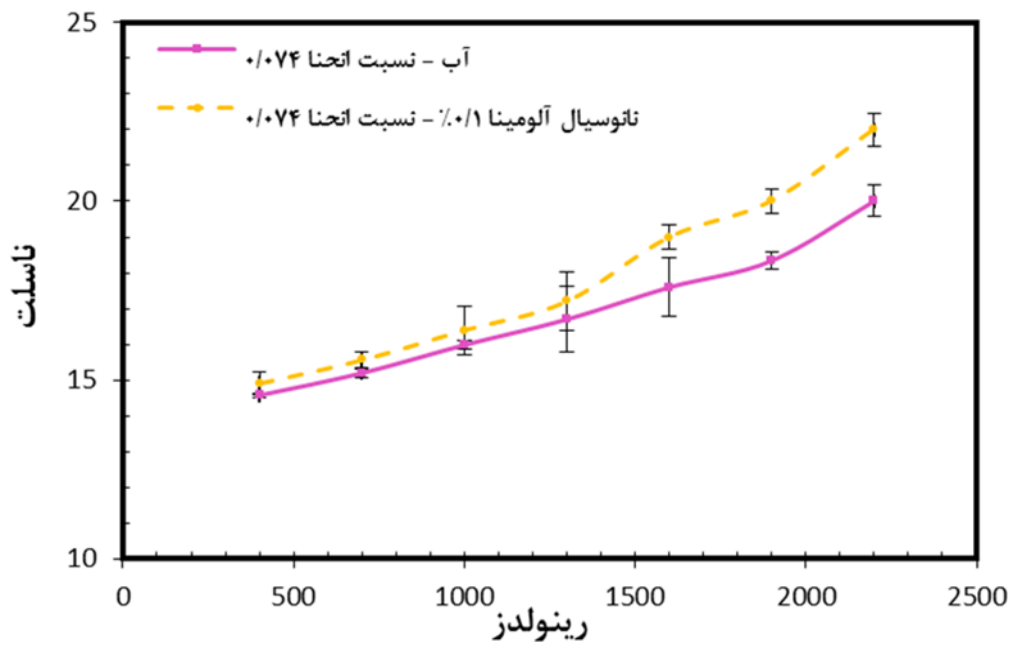
شماتیک سیستم آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش در ۲-۳-۱- به‌صورت کامل توضیح داده شده است. برای محاسبه عدد ناسلت جریان در هر دبی حجمی و محاسبه عدد رینولدز از معادله ۳-۱ تا معادله ۳-۸ استفاده شده است.

یکی از پارامترهای مهم درانتقال حرارت، عدد ناسلت است. عدد ناسلت جریان در لوله خمیده تابعی از عدد رینولدز است که برای نسبت انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و این افزایش در لوله خمیده با نسبت انحنای کمتر، بیشتر است. برای نشان دادن میزان این افزایش با توجه به شکل ۳-۲ لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶ به‌عنوان مرجع انتخاب شده و عدد ناسلت دو لوله دیگر، نسبت به این لوله سنجیده می‌شود. نتایج حاکی از آن است حداکثر افزایش عدد ناسلت لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ نسبت به لوله مرجع، ۲۲ درصد و برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ برابر ۴۵ درصد است. همچنین استفاده از نانوسیال در لوله با انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ به ترتیب موجب حداکثر افزایش

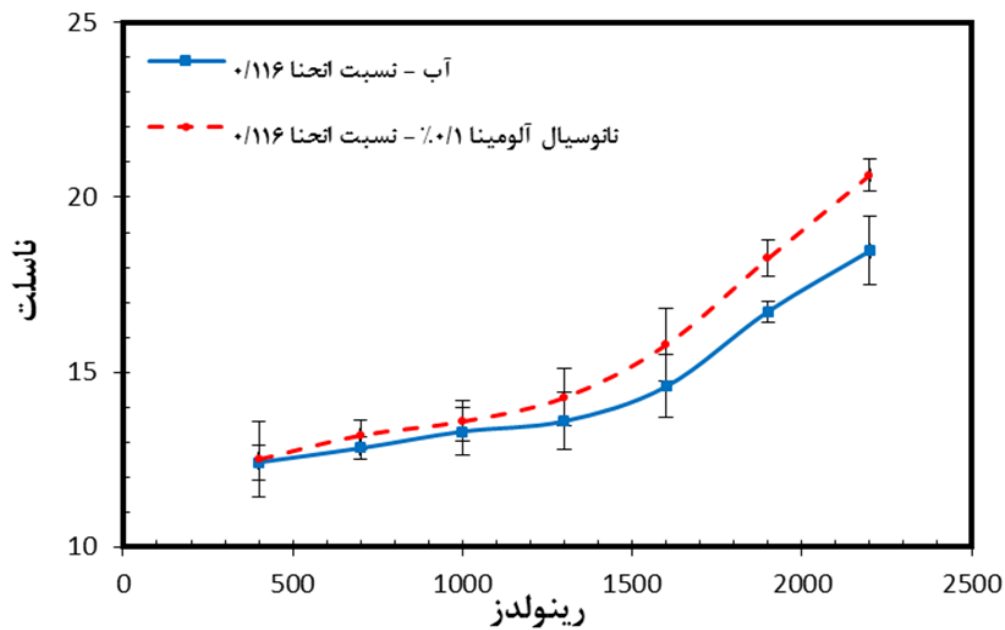
۱۲درصد، ۱۳درصد و ۱۵ درصد انتقال حرارت نسبت به سیال پایه (آب) شده است.



(الف)

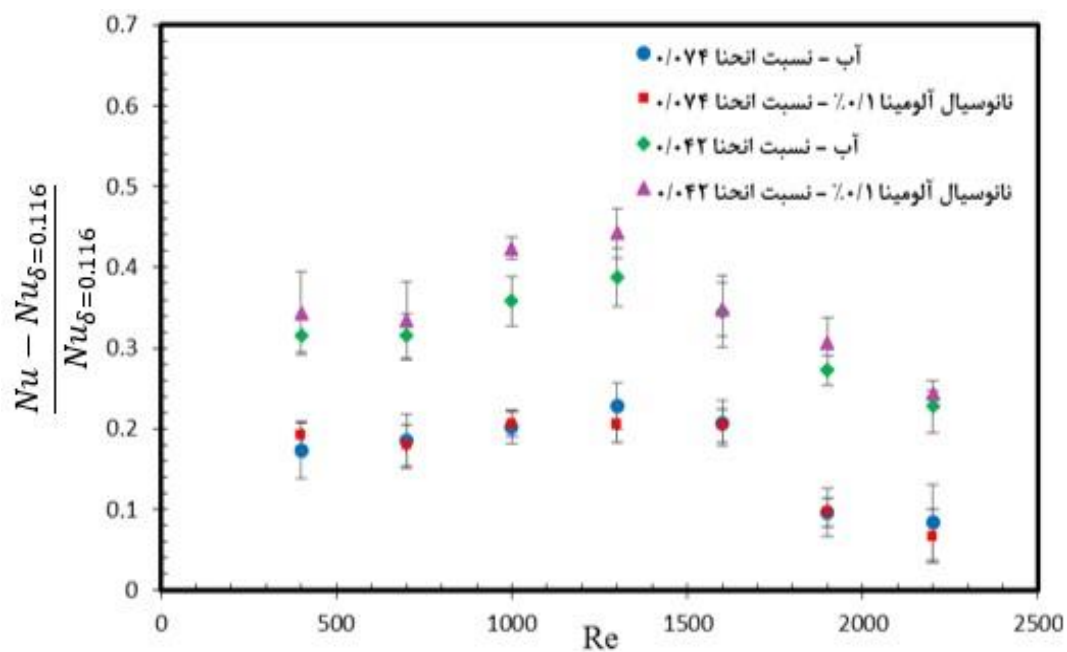


(ب)



(ج)

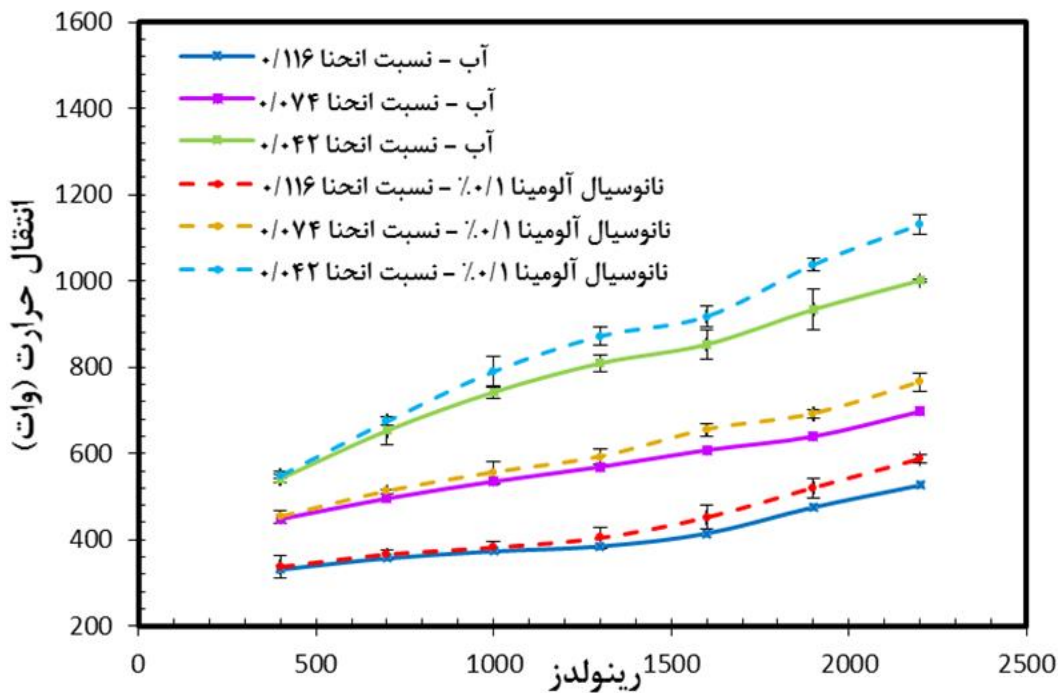
شکل ۳-۱ عدد ناسلت آب و نانوسیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای الف) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۴۲ ب) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۷۴ ج) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۱۱۶



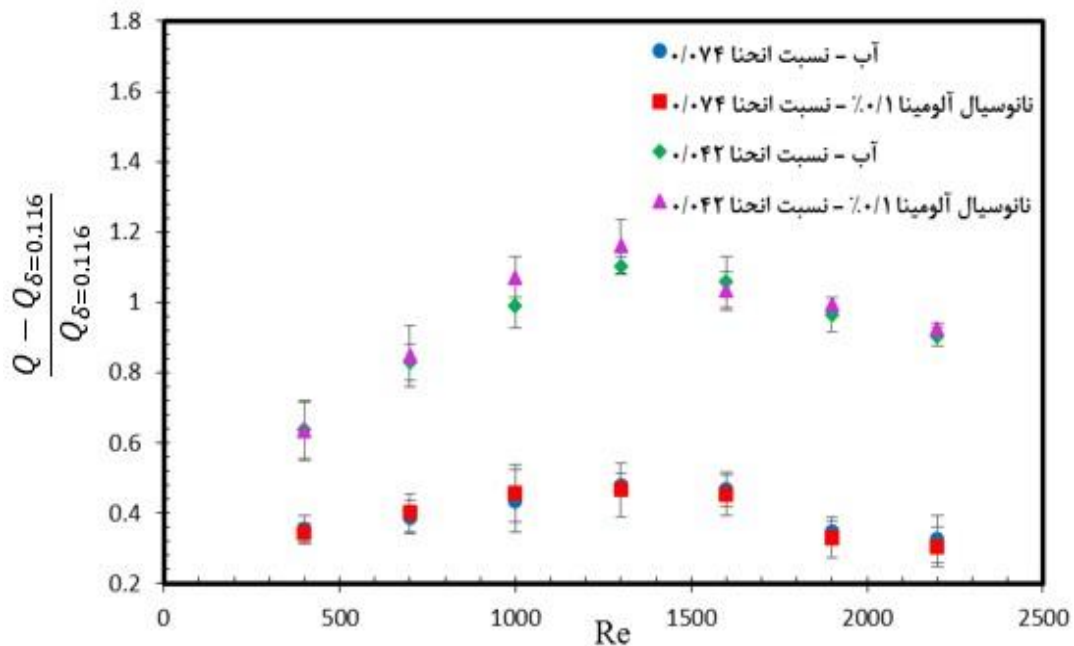
شکل ۳-۲ بهبود انتقال حرارت لوله‌های خمیده با نسبت انحنای ۰/۴۲ و ۰/۷۴ نسبت به لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶

در شکل ۳-۳ میزان انتقال حرارت منتقل شده از دیواره لوله خمیده به سیال عامل داخل آن، که از معادله ۲-۳ محاسبه می شود برحسب عدد رینولدز نمایش داده شده.

نتایج نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز و با کاهش نسبت انحنا میزان انتقال حرارت افزایش می یابد. در شکل ۳-۴ میزان کمی افزایش انتقال حرارت نسبت به انتقال حرارت لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶ نشان داده شده، و بیان می کند برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ حداکثر میزان این افزایش ۴۷ درصد و برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ برابر ۱۱۵ درصد در رینولدز ۱۳۰۰ است. با بررسی شتاب مرکزگرا $(\frac{V^2}{R})$ برای هر سه لوله خمیده، می توان گفت با کاهش نسبت انحنا، شتاب مرکزگرا ذرات سیال افزایش یافته و همین مورد موجب افزایش انتقال حرارت می شود.



شکل ۳-۳ انتقال حرارت آب و نانوسیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

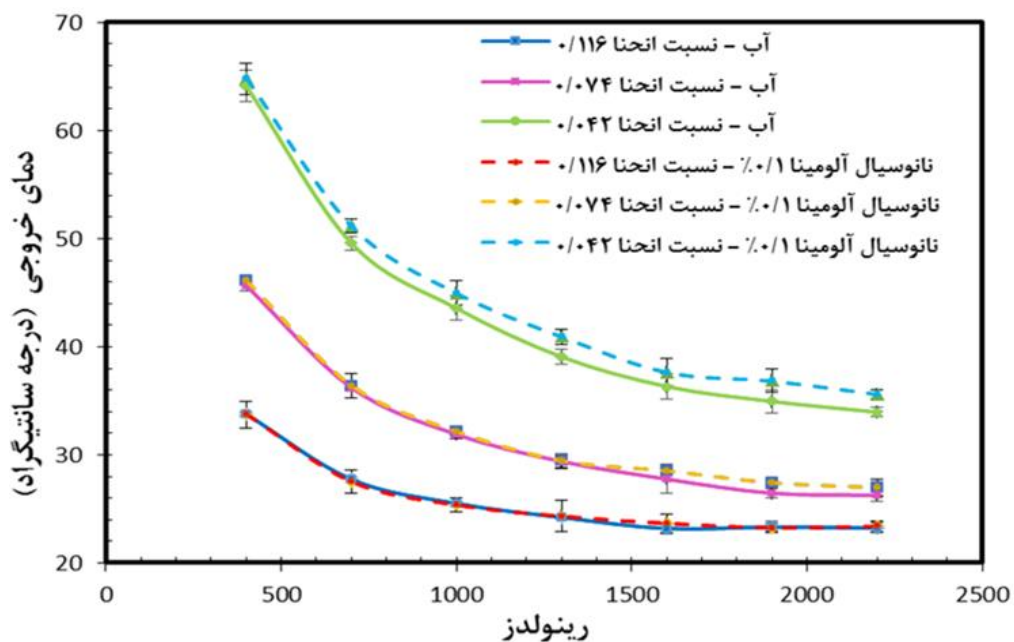


شکل ۳-۴ انتقال حرارت آب و نانوسیال آلومینا برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

برای بالا بردن دقت نتایج در هر دبی، آزمایش‌ها سه مرتبه انجام و بر اساس روابط آماری و از روش بازه اطمینان محاسبه شده است. تمامی نتایج در بازه اطمینان اندازه‌گیری شده، نمایش داده شده‌اند. خطای قابل قبول این آزمایش‌ها در این بازه در نمودارها نشان داده شده است.

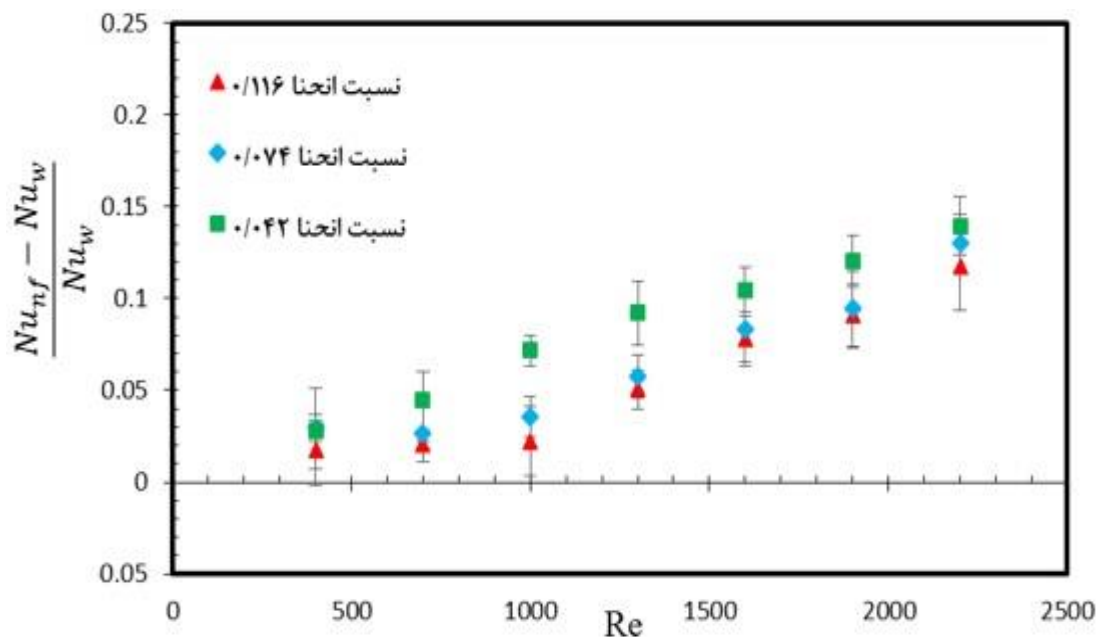
با توجه به نمودارهای نمایش داده شده در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش عدد رینولدز و همچنین اضافه شدن نانوسیال به سیستم، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش بیشتر دمای خروجی سیال و به تبع آن افزایش انتقال حرارت سیال درون لوله است. سوسپانسیون نانوذرات می‌تواند ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تغییر دهد. از طرفی حرکت نانوذرات منجر به شتاب یافتن فرآیند انتقال انرژی می‌شود. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو بخصوص ذرات نانوسیالات فلزی در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. محققان عواملی همچون وجود حرکت براونی نانوذرات، خواص ترموفیزیکی و مکانیزم انتشار نانوذرات را به عنوان یکی از فاکتورهای افزایش انتقال حرارت در سوسپانسیون نانوسیال معرفی می‌کنند [۶۸، ۶۹]. از طرفی با افزایش عدد رینولدز

از آنجایی که سیال فرصت کمتری برای انتقال حرارت دارد، دمای خروجی لوله کاهش می‌یابد این در حالی است که در یک رینولدز مشخص، استفاده از نانوسیال سبب افزایش میزان انتقال حرارت (انرژی حرارتی جذب شده سیال) و در نتیجه افزایش دمای خروجی می‌شود. نتایج حاصل از دمای خروجی سیال در اعداد رینولدز مختلف برای حالتی که لوله گذرنده از مخزن نسبت انحنای متفاوتی دارد در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که توضیح داده شد نتایج حاکی از کاهش دمای خروجی سیال با افزایش عدد رینولدز و نسبت انحنای لوله است.



شکل ۳-۵ مقایسه دمای خروجی سیال بر حسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

شکل ۳-۶ نمایانگر میزان افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه (آب) در لوله خمیده با نسبت انحنای مختلف بر حسب عدد رینولدز است. همان‌طور که اشاره شد افزودن نانوپودر به سیال پایه موجب تغییر خواص حرارتی سیال می‌شود. می‌توان گفت افزایش عدد ناسلت تابعی از نسبت انحنای بوده و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش عدد ناسلت برای لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ در رینولدز ۲۲۰۰ به میزان ۱۵ درصد گزارش شده است.

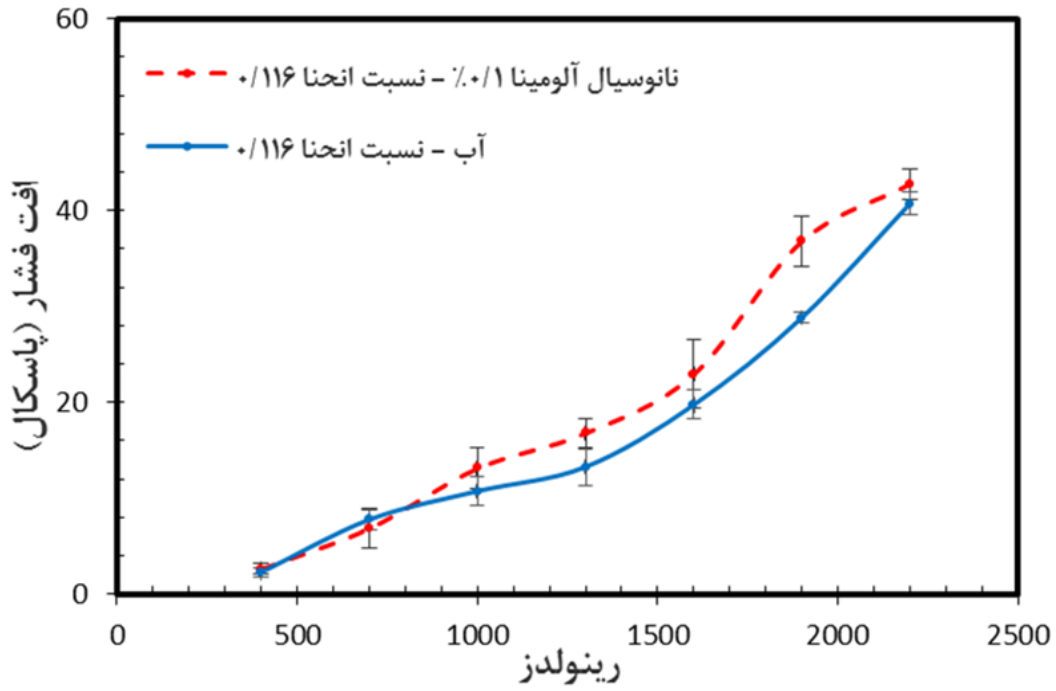


شکل ۳-۶ درصد افزایش عدد ناسلت نانوسیال آلومینا تابعی از عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

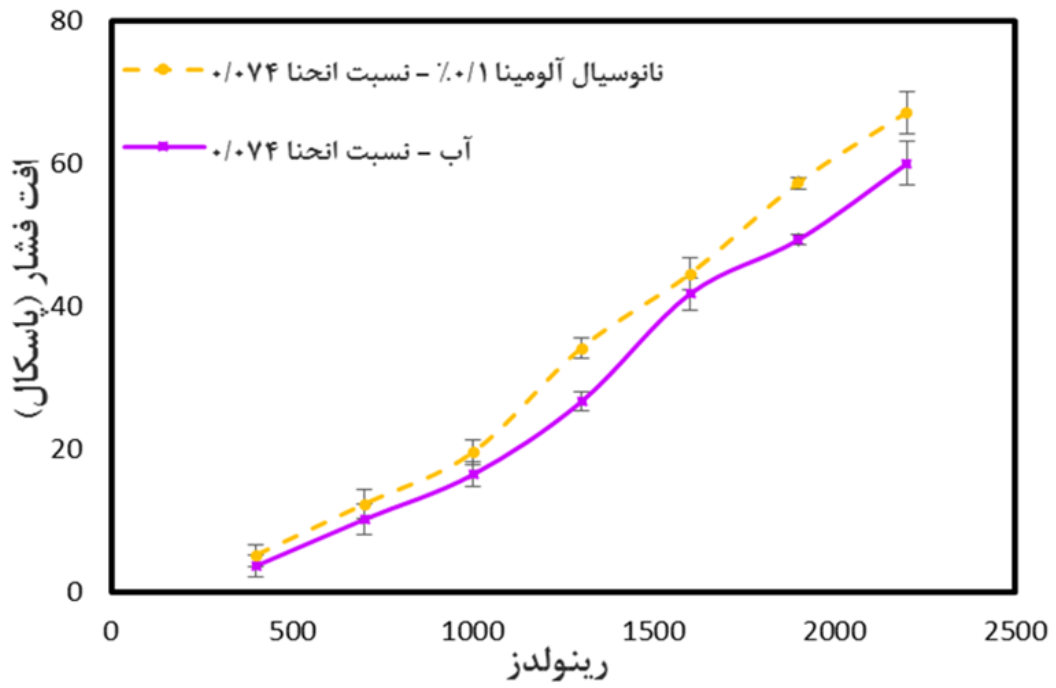
۱-۲-۳ افت فشار

بررسی افت فشار به دلیل تأثیر آن در مصرف انرژی یکی از پارامترهایی است که در صنعت به آن توجه ویژه‌ای می‌شود. شکل ۳-۷ افت فشار ایجاد شده در لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ را بر حسب تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد.

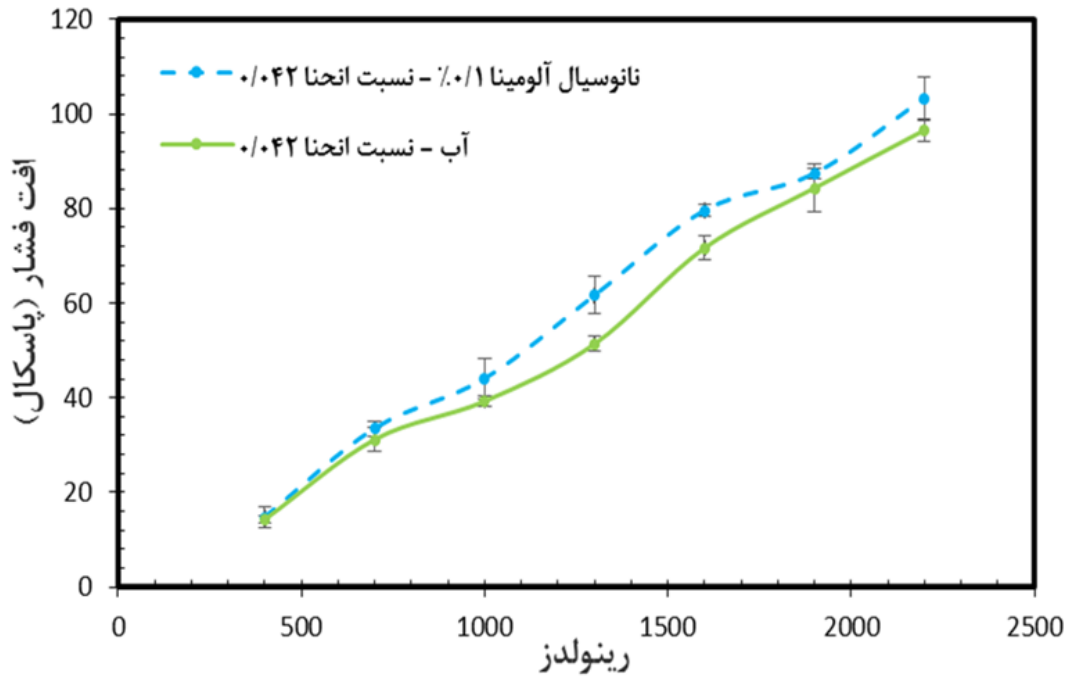
مشاهدات تجربی نشان می‌دهد وجود نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش افت فشار سیستم می‌شود. افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به آب یکی از عواملی است که منجر به افزایش افت فشار در نانوسیال نسبت به آب می‌شود. نشان داده شده افت فشار در لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ بیشتر از دو لوله دیگر است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۷ افت فشار در رینولدزهای مختلف برای الف) لوله خمیده با نسبت انیون ۰/۱۱۶ ب) لوله خمیده با نسبت انیون ۰/۰۷۴ ج) لوله خمیده با نسبت انیون ۰/۰۴۲

شکل ۳-۸ نشان دهنده هر دو اثر انتقال حرارت و افت فشار در لوله خمیده است. به وضوح

مشاهده می شود که یک نقطه بهینه (با بیشترین مقدار $\frac{Nu_{nf}/Nu_w}{\Delta P_{nf}/\Delta P_w}$) را می توان برای هر لوله

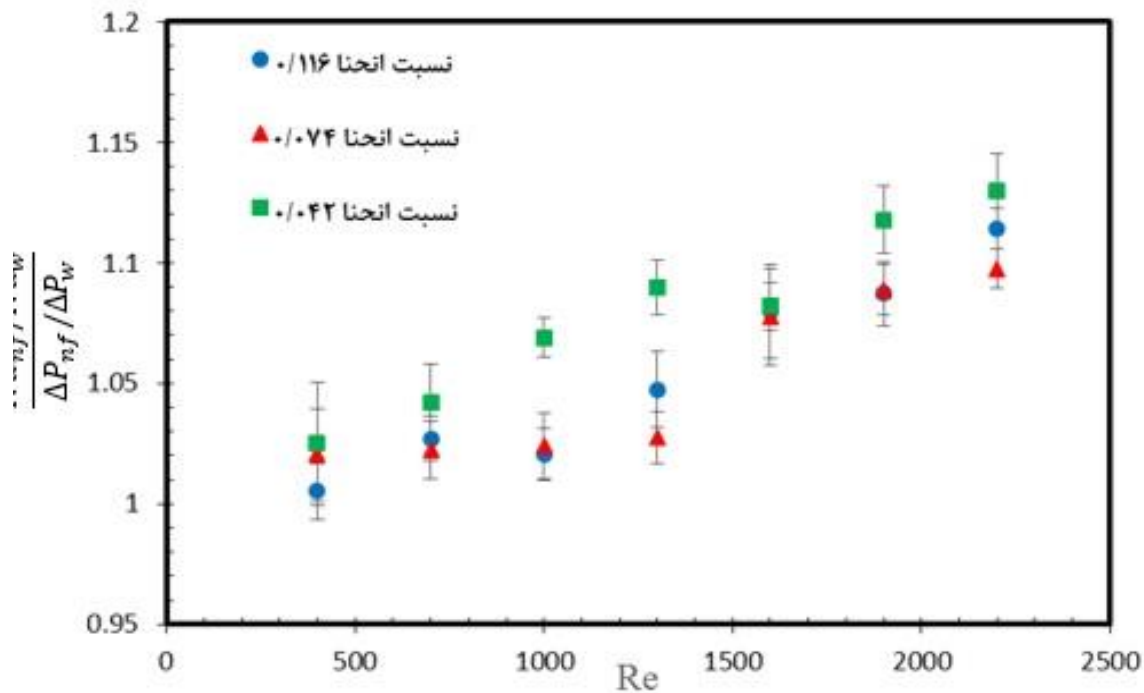
خمیده با نسبت انیونهای مختلف استخراج کرد. مقادیر بزرگتر از یک، بیانگر آن است که میزان

افزایش انتقال حرارت بر افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به آب غالب است و این موضوع بیانگر

بازدهی بیشتر است. برای نمونه لوله با نسبت انیون ۰/۰۴۲ در محدوده عدد رینولدز ۲۲۰۰ بهترین

کارایی را در نمودار نشان می دهد. منظور از کارایی، اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار است که

در محور عمودی به شکل بی بعد نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ میزان افزایش عدد ناسلت بر میزان افزایش افت فشار برحسب عدد رینولدز برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

۲-۲-۳ صحت سنجی ضریب اصطکاک داریسی

با استفاده از رابطه بلازیوس و افت فشار تجربی به دست آمده از آزمایش، ضریب اصطکاک تجربی لوله خمیده محاسبه می‌گردد. برای صحت سنجی ضریب اصطکاک به دست آمده از افت فشار دو سر لوله خمیده برای آب و نانوسیال آلومینا ۰/۱ درصد حجمی، از رابطه تئوری ایتو^[۷۰] که برای لوله‌های خمیده تعریف شده برای مقایسه استفاده شده است. (۳-۱۰) رابطه بلازیوس و ضریب اصطکاک متناظر با آن را نشان می‌دهد)

$$\Delta P = f_r \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \rightarrow f_r = \frac{2d\Delta P}{L\rho v^2} \quad (۳-۱۰)$$

ایتو معادله ۳-۱۱ را برای محاسبه ضریب اصطکاک در محدوده گسترده‌ای از نسبت انحنای لوله‌های

¹ Ito

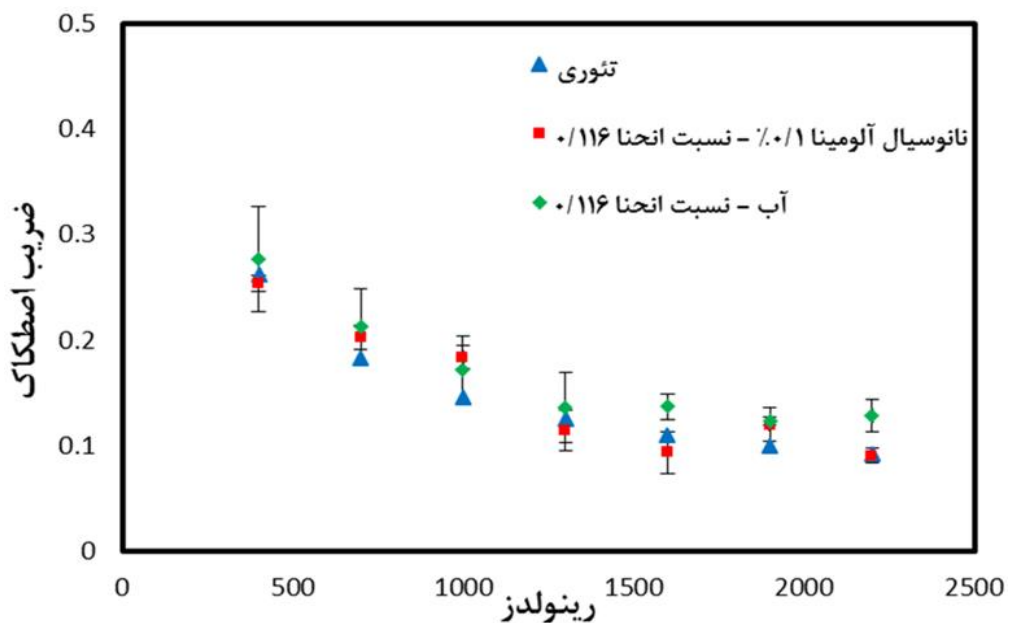
خمیده ارائه کرد: [۷۰]

$$f_r = \frac{64}{Re} \left(\frac{21.5De}{(1.56 + \log_{10} De)^{5.73}} \right) \quad 5 \times 10^{-4} \leq \delta \leq 0.2 \quad (11-3)$$

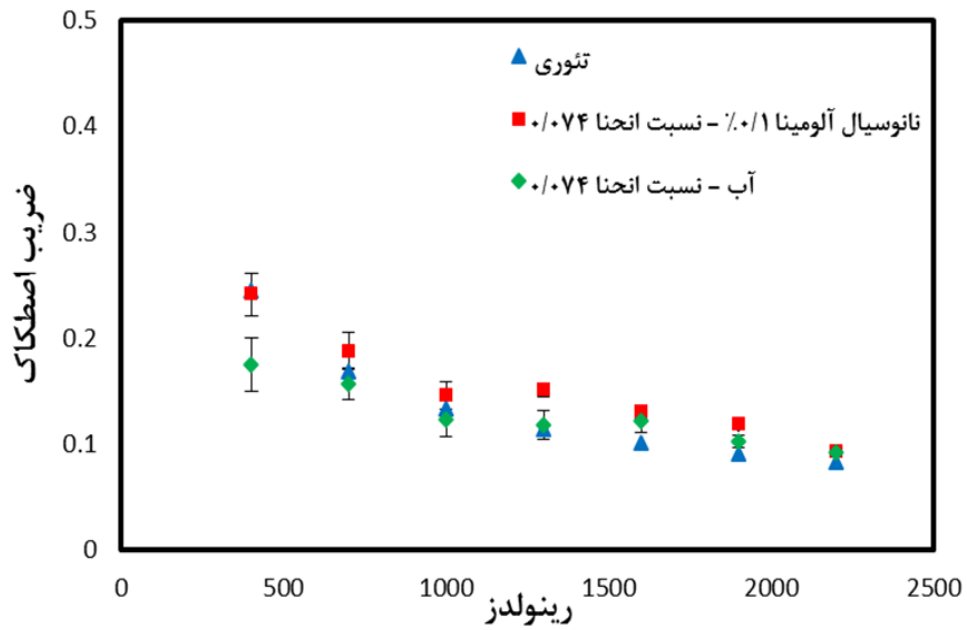
$$De = Re\sqrt{\delta}$$

$$\delta = \frac{r}{R}$$

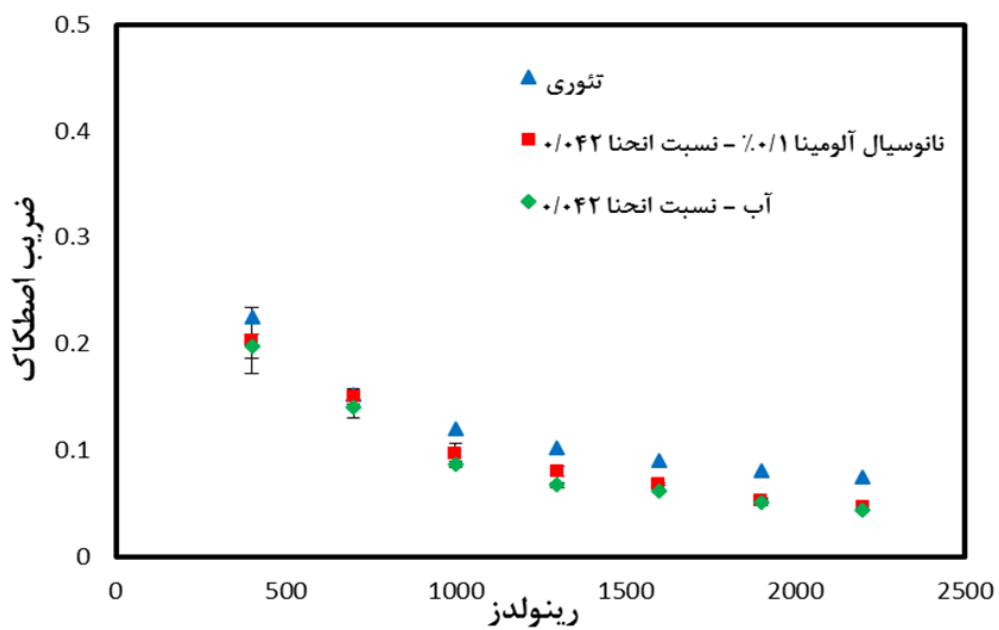
شکل ۳-۹ مقایسه نتایج تجربی ضریب اصطکاک آب و نانوسیال آلومینا در هر یک از سه لوله خمیده با نتایج تئوری رابطه ایتو را ارائه می‌کند. نتایج به دست آمده خطای زیادی را از رابطه تئوری نشان نمی‌دهد. برای روشن شدن این موضوع شکل ۳-۱۰ نتایج تجربی ضریب اصطکاک نانوسیال و آب را در برابر نتایج تئوری نشان می‌دهد. خط میانی، خط انطباق کامل نتایج تئوری و تجربی است و انحراف از این خط به عنوان خطای آزمایش منظور شده است. خطای حداکثری ۳۲ درصد و حداقل ۹ درصد نسبت به نتایج تئوری توسط این نمودار گزارش شده است.



(الف)

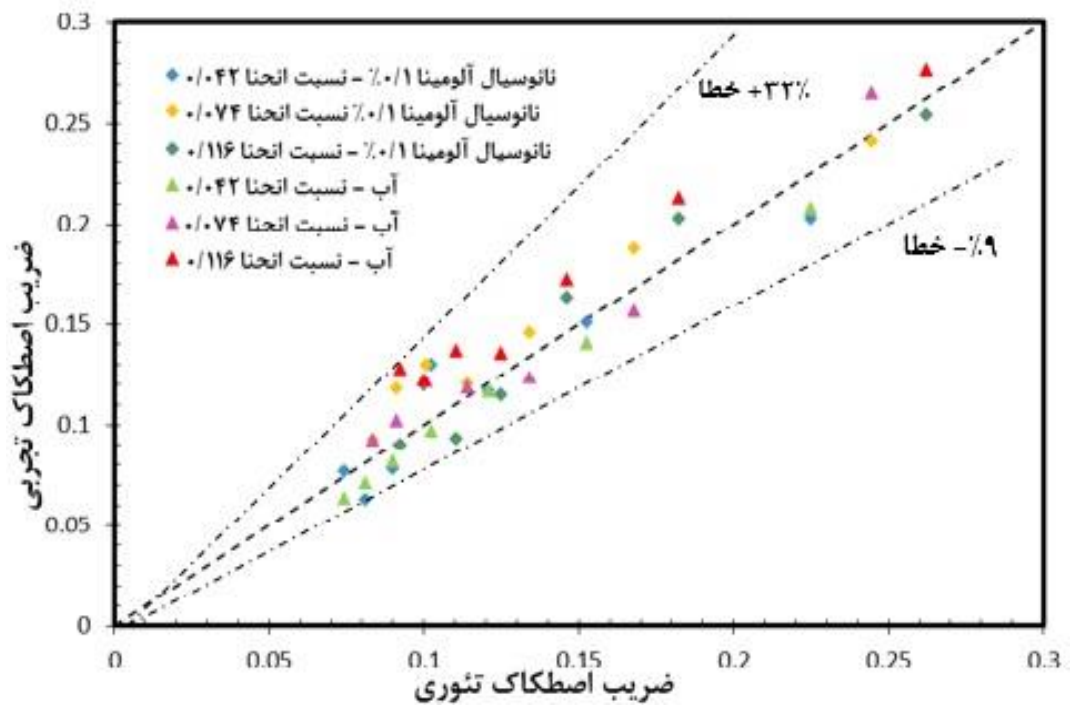


(ب)



(ج)

شکل ۹-۳ مقایسه ضریب اصطکاک تجربی با رابطه ایتو برحسب رینولدز برای الف) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۱۱۶ (ب) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ (ج) لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲



شکل ۳-۱۰ مقایسه خطای ضریب اصطکاک روابط تئوری و تجربی در لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی اجباری سیال درون لوله خمیده گذرانده شده از مخزن مکعب مستطیل شکل افقی از جنس تفلون، در محدوده رینولدز ۴۰۰ تا ۲۲۰۰ به شیوه آزمایشگاهی و با شرط مرزی دما ثابت بررسی شده است. سه دسته آزمایش با شرایط یکسان و تنها تفاوت در نسبت انحنای لوله گذرانده شده از مخزن با اندازه‌های ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ مقایسه می‌شود. همچنین جنس و مساحت سطح خارجی لوله‌ها در هر سه دسته آزمایش، ثابت در نظر گرفته شده است. از نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ و سیال پایه (آب) به‌عنوان سیال عامل در لوله خمیده استفاده می‌شود. سیال داخل مخزن، آب با دمای ۹۲ درجه سانتی‌گراد است و دمای سیال عامل در ورودی به لوله خمیده، ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. پس از اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی لوله و دمای مخزن در هر ثانیه، افت فشار در لوله آزمایش نیز محاسبه می‌شود. با تکرار آزمایش، نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله روابط آماری در بازه اطمینان نمایش داده می‌شود. جهت صحت‌سنجی نتایج تجربی افت فشار، از نتایج و روابط دیگر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه استفاده شده است.

به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌ها به شرح زیر است:

الف) افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در لوله خمیده با نسبت انحنای مختلف (حداکثر افزایش ۰/۱۵، ۰/۱۳ و ۰/۱۲ به ترتیب در لوله‌ها با نسبت انحنای ۰/۰۴۲، ۰/۰۷۴ و ۰/۱۱۶)

ب) افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه در تمامی لوله‌های خمیده

پ) افزایش شدید انتقال حرارت نسبت به لوله با نسبت انحنای بیشتر ۰/۱۱۶ (حداکثر افزایش ۲۲ درصدی در لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ و حداکثر افزایش ۴۵ درصدی در لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ در رینولدز ۱۳۰۰)

ت) افزایش افت فشار نانوسیال و سیال پایه با کاهش نسبت انحنای لوله خمیده

ث) حرارت جذب شده نانوسیال و سیال پایه (آب) از دیواره لوله خمیده، در لوله با نسبت انحنای $0.074/0.042$ و به ترتیب $4/7$ و $1/15$ برابر حرارت جذب شده از دیواره لوله خمیده با نسبت انحنای بزرگتر 0.116 است.

ج) افزایش بازدهی و بهبود عملکرد لوله خمیده با نسبت انحنای کمتر در اعداد رینولدز بالاتر در مقایسه با دولوله دیگر

افزایش انتقال حرارت مشاهده شده را باید در عواملی همچون نانوسیالات و تغییر شکل هندسی لوله آزمایش جست. در مورد نانوسیالات باید به این نکته توجه داشت که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال، تنها به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال مبنا نبوده، بلکه عوامل دیگری همچون مهاجرت ذرات، حرکات براونی و بی‌نظم نانوذرات، برخورد ذرات با یکدیگر و طبیعت انتقال حرارت در نانوذرات در این مورد تأثیرگذار هستند که باید مدنظر قرار گیرند. هرچند محققان عواملی را برای این افزایش پیشنهاد داده‌اند که در ادامه اشاره می‌شود، اما تحقیقات تجربی بیشتری برای فهم مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیالات متفاوت ضروری است.

به‌طور کلی عواملی که سبب بهبود انتقال حرارت در نانوسیالات می‌شود به‌طور خلاصه عبارت‌اند از: سوسپانسیون نانوذرات ضریب هدایت حرارتی سیالات پایه را افزایش می‌دهند، حرکات تصادفی و نامنظم نانوذرات سبب ایجاد اغتشاش و نوسان در سیالات شده که منجر به شتاب یافتن فرایند انتقال انرژی می‌شود. به نظر می‌رسد حرکات تصادفی، جابجایی و برخورد ذرات نانو مخصوصاً در اعداد رینولدز بالا، ساختار جریان را تغییر داده و منجر به تغییر پروفیل دمایی می‌شود. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو در کنار دیواره، منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال می‌شود. همچنین با خم کردن یک لوله می‌توان نرخ انتقال گرما را تغییر داد البته بسته به میزان انحنای شتاب گریز از

مرکز تغییر می‌یابد که از اثرات آن، ایجاد جریان ثانویه است.

عوامل اشاره‌شده در مورد پارامترهای مؤثر در هر دو ایده، از عواملی هستند که می‌توان به آن‌ها به‌عنوان عوامل افزایش انتقال حرارت نام برد.

۲-۴ پیشنهادها

با توجه به مطالب ارائه‌شده در این پایان‌نامه، مواردی که برای بهبود و ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود به شرح ذیل است:

- ❖ مطالعه آزمایشات با نانوسیالات دیگر
- ❖ مطالعه آزمایشات با تغییرات بر روی شرایط مرزی
- ❖ مطالعه تأثیر پارامترهای مؤثر بر نانوسیالات از جمله اندازه، شکل، و... بر انتقال حرارت
- ❖ مطالعه آزمایشات با لوله متخلخل با تخلخل‌ها و سایز حفره‌های متفاوت
- ❖ مطالعه آزمایشات با لوله‌های متخلخل با جنس‌های متفاوت

در خاتمه پیشنهاد می‌شود جهت بررسی نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده، مطالعه عددی نیز با همین ابعاد ذرات و سیستم آزمایش و شرط مرزی دما ثابت دیواره برای نانوسیالات مختلف انجام شود و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه و در مورد عوامل اختلاف آن بحث شود.

۵ پیوست الف: نانوسیالات

۵-۱ تهیه نانوسیال

طرز تهیه نانوسیال اولین اقدام کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت است. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط عبارت‌اند از یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایدار بودن^۱ سوسپانسیون، توده‌ای شدن^۲ کم ذرات، ته‌نشین^۳ نشدن و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راهکارهای مختلف استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان از تغییر pH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد و یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد.

با در نظر گرفتن ملاحظات ذکر شده، شیوه‌های تهیه نانوسیال کلاً به دو روش تقسیم می‌گردد.

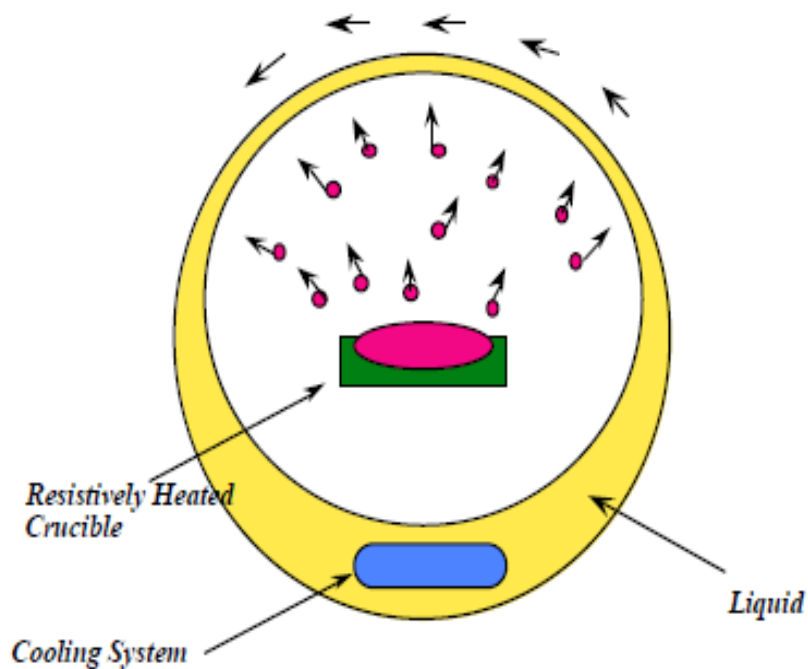
۵-۱-۱ روش تهیه یک مرحله‌ای

در روش یک مرحله‌ای، ذرات موردنظر به‌طور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می‌شود. به‌عنوان مثال برای تهیه نانوذرات فلزی درون یک سیال، ماده فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر می‌شود و بخار فلز، مستقیماً به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانوذرات کندانس گردد. این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا نیز معروف است. این روش که در شکل ۵-۱ فرآیند آن نشان داده شده است، روش مناسبی برای تولید نانوسیالات فلزی است.

^۱ Stability

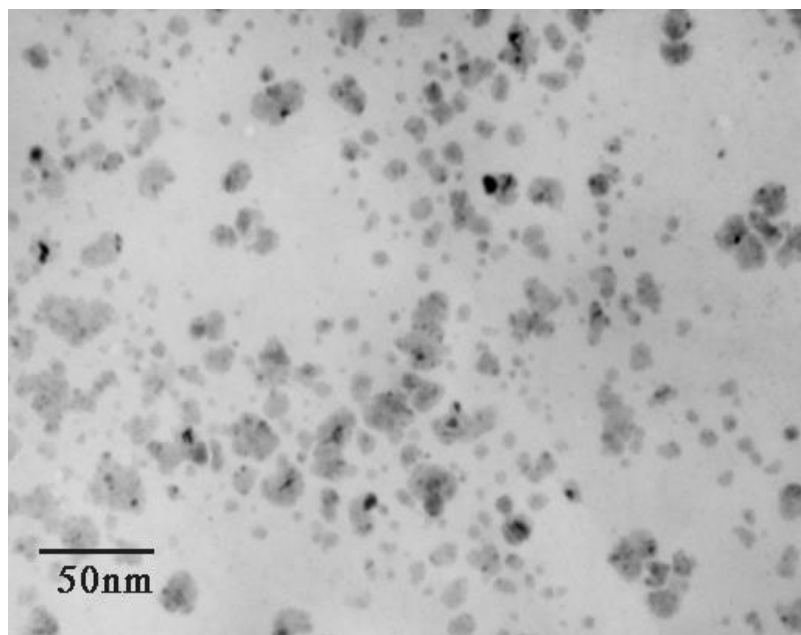
^۲ Agglomeration

^۳ Settling



شکل ۵-۱ روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۷۱]

در این روش تهیه نانوسیال، سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آن‌ها تشکیل نمی‌گردد. به همین دلیل نانوذرات تهیه‌شده از این طریق بسیار تمیز است. این مسئله مزیت روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با مقداری متراکم شدن و تجمع ذرات در درون سیال است. اما، مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع ذرات است. شکل ۵-۲ نشان‌دهنده نانوسیال حاوی نانوذرات مس است که به طریق یک مرحله‌ای تهیه گردیده است.



شکل ۵-۲ تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است [۷۲]

واگنر^۱ و همکاران [۷۳] شکل اصلاح‌شده‌ای از تکنیک VEROS را معرفی کردند. آن‌ها از شلیک پرفشار مگنترون برای تهیه سوسپانسیون با نانوذرات فلزی مثل نقره و آهن استفاده کردند. ایستمن^۲ و همکاران [۷۴] شکل اصلاح‌شده‌ی دیگری از VEROS را ابداع کردند که در آن بخار مس در تماس مستقیم با جریان یک سیال با فشار بخار پایین (اتیلن گلیکول) مستقیماً به شکل نانوذره میعان می‌شود. ژو^۳ و همکاران [۷۵] یک روش جدید تک‌مرحله‌ای ابداع کردند که در آن با احیای $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ در اتیلن گلیکول و تحت امواج مایکرو، می‌توان نانوسیالات مس تولید کرد. نتایج نشان داد که اضافه کردن $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ و تابش امواج مایکرو دو پارامتر مهم بوده که سرعت واکنش و خصوصیات نانوسیال مس را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند.

^۱ Wagener

^۲ Eastman

^۳ Zhou

لو^۱ و همکاران [۷۶] برای تهیه نانوسیال‌های مس، روش جدید خلا^۲ SANSS را معرفی کردند که نانوسیال را با سیال‌های مختلف شامل آب و اتیلن گلیکول تولید می‌کرد. آن‌ها دریافتند که ساختارها و شکل‌های^۳ مختلفی که در این روش به دست می‌آید تحت تأثیر هدایت حرارتی سیال‌های دی‌الکتریک هستند. با این روش می‌توان نانوسیال اکسید مس، را با بازده بالا تولید کرد. اخیراً یک سیال نیکل – نانومغناطیس و نانوسیال نقره نیز توسط لو و همکاران [۷۷] با روش تک‌مرحله‌ای SANSS ساخته شده است. این محققان ذرات کروی نقره با اندازه متوسط ۱۲/۵ نانومتر را در اتیلن گلیکول تولید کردند.

روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دومرحله‌ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده‌اند. علت این مسئله نیز آسان‌تر بودن تولید نانوسیال با نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

۵-۱-۲ روش تهیه دومرحله‌ای

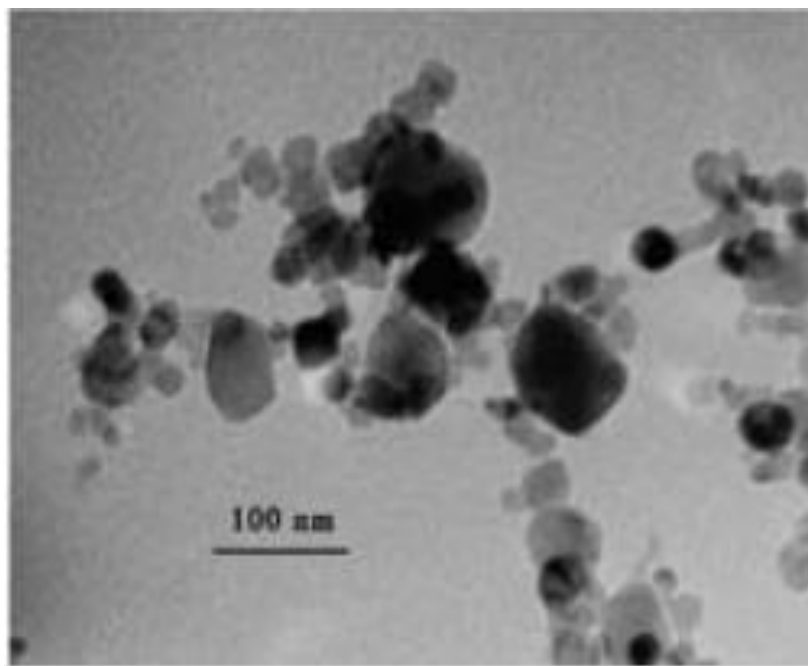
متداول‌ترین روش تهیه نانو سیالات، روش دومرحله‌ای است. در روش دومرحله‌ای برای تهیه نانوسیال، می‌توان از انواع پودرها با اندازه‌های مختلف به راحتی استفاده کرد، مسئله‌ای که در روش یک مرحله‌ای با مشکلات بیشتری همراه است. در این روش ابتدا نانوذرات معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی در فضای گاز بی‌اثر به صورت پودر خشک تهیه می‌شود، در مرحله بعد نانو ذره یا نانو لوله در داخل سیال پراکنده می‌شود. به عبارت دیگر، ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله مورد نظر تهیه گردیده و سپس به سیال پایه افزوده می‌گردد. برای پایداری نانوسیال در این حالت، از روش‌هایی مانند لرزاننده آلتراسونیک و یا سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا توده نانو ذره‌ای به حداقل برسد و باعث بهبود رفتار

^۱ Lo

^۲ vacuum – submerged arc nanoparticle synthesis system

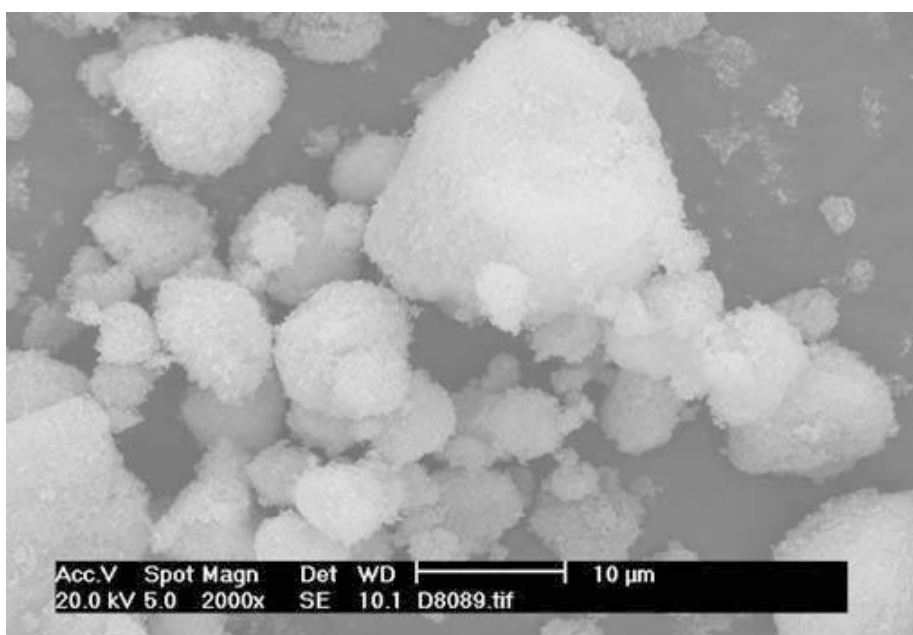
^۳ morphology

پراکندگی شود. به نظر می‌رسد که این روش با توجه به اینکه می‌توان نانوذرات و نانولوله‌ها را بیشتر و اغلب آسان‌تر از روش تک‌مرحله‌ای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. شکل ۳-۵ نشان‌دهنده نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دومرحله‌ای است.

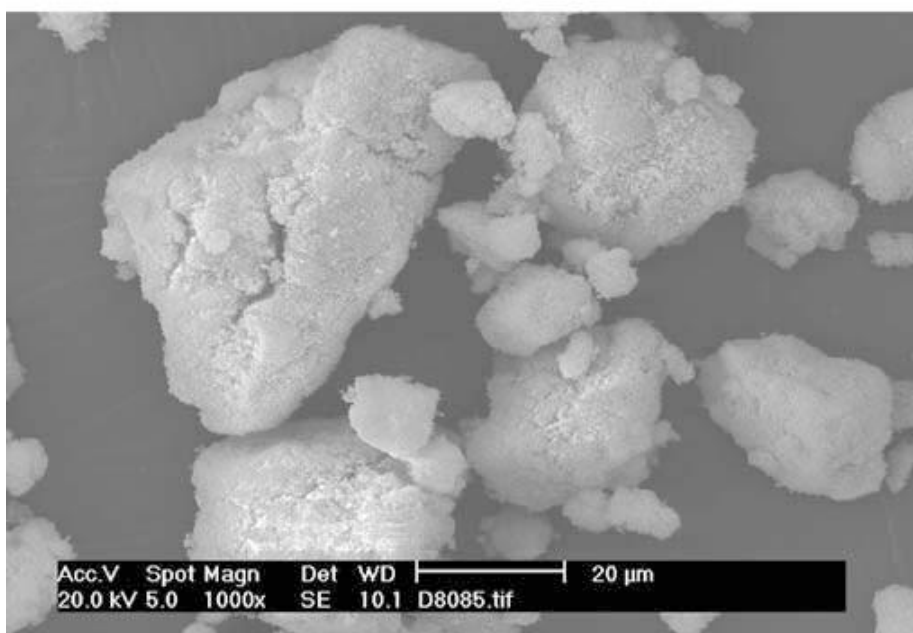


شکل ۳-۵ نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دومرحله‌ای [۷۲]

روش دومرحله‌ای نیز باید مسئله کلوخه و توده‌ای شدن و نیز چسبندگی نانوذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده‌ای ذرات و برگرداندن آن‌ها به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی است که در تهیه نانوسیال باید صورت بگیرد. چراکه اندازه و توزیع ذرات در داخل سیال مهم‌ترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی بر عهده دارد. شکل ۴-۵ نشان‌دهنده ایجاد وضعیت کلوخه‌ای در نانوذرات اکسیدمس و اکسیدآلومینیوم است. روش دومرحله‌ای شیوه‌ای مناسب برای تهیه نانوسیالات اکسیدی است. روش دومرحله‌ای برای بعضی مواد مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده نیز بسیار مناسب است و برای نانو سیالات شامل ذرات فلزی سنگین کمتر موفق بوده است. این روش دارای مزایای بالقوه‌ای است. زیرا شرکت‌های زیادی توانایی تهیه نانو پودرها را در مقیاس صنعتی دارند.



(a) Al₂O₃



(b) CuO

شکل ۴-۵ تصویر TEM از توده‌های شدن نانوذرات [۷۸]

تجهیزات مختلفی را برای پراکنده‌سازی نانوذرات در درون سیال می‌توان بکار برد. از جمله این تجهیزات دستگاه ماورای صوت، همزن مغناطیسی، همزن با توان برشی بالا و هموژنایزر است. زمان فرآوری نانوسیال و شدت همزن تأثیر مهمی بر پراکندگی نانوذرات در درون سیال پایه دارند. پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده‌ای شده با اعمال نیرو شکسته می‌شود. با این حال نانوذرات به شدت متمایل به توده‌ای شدن مجدد هستند. یکی از دلایل این مسئله نیروی واندروالس است.

ایستمن و همکاران [۷۴]، لی^۱ و همکاران [۷۹] و وانگ^۲ و همکاران [۸۰] از جمله کسانی بودند که از این روش برای تولید نانوسیال آلومینا استفاده کردند. همچنین مرشد^۳ و همکاران [۸۱] سوسپانسیون TiO_2 در آب را با استفاده از همین روش تهیه کردند. نانوذرات دیگری که در بررسی‌های انجام شده با این روش توزیع شده‌اند شامل طلا، نقره، نانولوله‌های کربنی و سیلیکا هستند. لی^۴ و همکاران [۸۲] نانوسیال آب-مس را با ذرات ۱ تا ۱۰۰ نانومتری به روش دومرحله‌ای ساختند. تصاویر ته‌نشینی و توزیع اندازه ذرات نشان داد که با افزودن توزیع کننده مناسب، نانوذرات به شکل بهتری در سیال پخش می‌شوند.

نانوذراتی که به روش یک مرحله‌ای و یا به روش دومرحله‌ای تهیه می‌گردند، باید تا حد امکان پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و ته‌نشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایداری تعلیق نانوذرات در سیال مورد توجه قرار بگیرد.

۵-۲ پایداری نانوذرات در نانوسیالات

در اندازه و مقیاس نانو، اتم‌های سطحی نانوذرات به شدت افزایش پیدا کرده و اهمیت می‌یابند.

^۱ Lee

^۲ Wang

^۳ Murshed

^۴ Lee

به عبارت دیگر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سطح، اهمیت بسیار بیشتری نسبت به ساختار ماده پیدا می کنند. وقتی که مواد نانو تحت تأثیر دمای محیط قرار می گیرند، اتم های سطح ذرات نانو نسبت به اتم های داخلی از پایداری کمتری برخوردار می شوند و این ناپایداری سطحی ذره علت اصلی توده ای شدن ذرات است. به نوعی می توان گفت که ذرات معلق در یک محلول به خاطر وجود نیروهای واندروالس بین ذرات، تمایل به توده ای شدن و بزرگ شدن دارند.

برای پایدار کردن نانوذرات و جلوگیری از کلوخه و توده ای شدن ذرات که سبب سنگینی و تسریع ته نشینی می گردد، از روش های مختلف از جمله پایدار کننده ها، تغییر pH و ایجاد نوسان ماورای صوت می توان استفاده کرد.

۵-۲-۱ تغییر PH سوسپانسیون

وقتی نانوذرات در آب پخش می شوند، رفتار کلی برهم کنش آب- ذره به خواص سطح ذره بستگی دارد. در مورد هر ذره یک pH معین تحت عنوان pH نقطه ایزوالکتریک وجود دارد. در این مقدار pH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می پیوندند. بنابراین وقتی pH مساوی یا نزدیک pH نقطه ایزوالکتریک باشد، سوسپانسیون ناپایدار است. با افزایش اختلاف pH نسبت به این نقطه نیروهای آب پوشی بین ذرات افزایش می یابد. در نتیجه تحریک نانوذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوسیال می گردد.

۵-۲-۲ استفاده از فعال کننده های سطح و پخش کننده ها

یکی از روش های پایدارسازی سوسپانسیون های حاوی نانوذرات استفاده از پایدار کننده های شیمیایی است. هر چند برخی از محققین استفاده از این روش را مناسب نمی دانند. علت این مسئله این است که افزودن پخش کننده می تواند ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تحت تأثیر گذاشته در نتیجه بهبود واقعی هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات تحت الشعاع قرار گیرد. جزء پایدار کننده سوسپانسیون

که به نانوسیال افزوده می‌شود، باید دارای ویژگی‌هایی باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به سازگاری شیمیایی با سیال پایه، سازگاری شیمیایی با نانوذرات و عدم ایجاد واکنش‌های شیمیایی با سیال پایه و نانوذرات و عدم تغییر pH و عدم ایجاد محیط خورنده اشاره کرد.

متداول‌ترین پایدارکننده‌هایی که تاکنون در مقالات به آن‌ها اشاره شده است، مواد فعال سطحی مختلف می‌باشند. از جمله این پایدارکننده‌ها می‌توان به تی‌أل‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد. انتخاب پایدارکننده مناسب نیز اغلب بستگی به خواص ذرات و سیال موردنظر دارد.

۵-۲-۳ استفاده از نوسانات ماورای صوت

نوسانات ماورای صوت می‌تواند موجب شکسته شدن کلوخه‌های ذرات شده و در نتیجه پایداری سوسپانسیون‌ها را افزایش دهد. در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی خواص نانوسیالات برای پراکنده کردن بهتر نانوذرات و پایداری بیشتر سوسپانسیون از نوسانات ماورای صوت استفاده شده است.

هرچند استفاده از نوسانات ماورای صوت یکی از روش‌های متداول پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه است، لیکن زمان هم‌زدن و نوسانات نیز باید مورد توجه قرار بگیرد. در مواردی مشاهده شده است که افزایش زمان نوسان از یک حد معین به بعد به تسریع کلوخه شدن ثانویه ذرات سرعت می‌بخشد.

در نتیجه متغیرهای زیادی هستند که برای کار با آزمایشات نانوسیالات باید به‌شمار آیند. توسعه‌های تئوری و مفهومی محلول‌ها منجر به درک بهتری از خواص و رفتار نانوسیالات می‌شود. افزودن مواد سطحی، کنترل pH و استفاده از نوسانات مافوق صوت روش‌های استاندارد برای شکستن توده‌های بزرگ ذرات و همگن نمودن سیال است.

۵-۳ خصوصیات نانوسیال بر مبنای درصد حجمی و جرمی

گام بعدی در مطالعه‌ی نانوسیالات شناخت خصوصیات و ویژگی‌های آن‌ها است. برای اینکه این تحقیق بخواهد توجه خود را به انجام درست آزمایشات معطوف بدارد باید مراحل سنتز نانوسیال را به درستی انجام دهد. از طرفی فهم رفتار نانوسیالات از نقطه نظر مبنای به منظور تشخیص درست پدیده‌های آن نیز بسیار مهم است.

در بیشتر تحقیقات انجام شده راجع به هدایت حرارتی نانوسیال و انتقال حرارت، غلظت ذرات درون سیال بر مبنای درصد حجمی داده می‌شود. درصد حجمی به منظور استفاده از مدل‌های موجود برای هدایت حرارتی محیط‌های مخلوط مانند مدل‌های همیلتون-کراسر^۱ [۲] و ماکسول^۲ [۱] به کار می‌رود. هرچند که از دیدگاه آزمایشگاهی تعیین درصد حجمی دقیق کاری بسیار مشکل است. زیرا وجود تعداد زیاد مولکول‌های سطح در ذرات، چگالی ماده در حالت تغییر است و محاسبه‌ی درصد حجمی مناسب نیست. ضمناً زمانی که ذرات درون محلول قرار گرفتند، تشکیل اکسید یا دیگر گروه‌های سطحی حجم اشغال شده توسط ذرات را تغییر می‌دهد.

برخی محققان در حال استفاده از غلظت جرمی و چگالی ماده‌ی مربوطه به منظور تعیین غلظت حجمی برای شبیه‌سازی هستند. این کار در ادامه‌ی همان کارهای قبلی است که توجه به درصد حجمی می‌تواند همراه‌کننده باشد و اگر تغییر غیرعادی در خواص دیده شود قابلیت توجیه با این روش را خواهد داشت. از طرفی اگر محقق بخواهد صحت نتایج آزمایشگاهی خود را که از طریق غلظت جرمی انجام گرفته باشد بررسی کند، هیچ‌گونه تفسیری نمی‌تواند بیابد. زیرا تحلیل‌های معتبر تنها بر مبنای غلظت حجمی انجام شده‌اند.

^۱ Hamilton & Crosser

^۲ Maxwell

پدیده جالب دیگر تغییر درصد حجمی نانوسیال با تغییر دماست. حجم و چگالی ذرات جامد وابستگی بسیار کمی به دما دارد. به همین دلیل باید این حقیقت را در نظر گرفت که درصد حجمی یک نانوسیال می‌تواند با گرم شدن سیستم کاهش یابد. این اثر دمایی باید برای محققانی که می‌خواهند از مدل‌های حجمی متوسط برای پیش‌بینی هدایت حرارتی استفاده کنند به حساب آورده شود.

۱-۳-۵ چگالی و ظرفیت حرارتی

محاسبه چگالی و ظرفیت حرارتی نانوسیال به‌سادگی امکان‌پذیر است. این کمیت‌ها بر اساس اصول فیزیکی قانون اختلاط به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho_{\text{eff}} = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p \quad (1-5)$$

$$c_{\text{eff}} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho c)_f + \phi_p (\rho c)_p}{(1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p} \quad (2-5)$$

۲-۳-۵ گرانروی

اینشتن^۱ نخستین کسی بود که گرانروی مؤثر سوسپانسیون‌های حاوی ذرات جامد کروی را با استفاده از روابط اساسی هیدرودینامیکی محاسبه کرد. او با این فرض که آشفتگی ایجاد شده در الگوی جریان سیال پایه که توسط یک ذره ایجاد شده با آشفتگی ناشی از یک ذره دیگر دچار تداخل نمی‌شود رابطه زیر را پیشنهاد داد [۸۳]:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 + 2.5\phi_p) \mu_f \quad (3-5)$$

داده‌های تجربی برای گرانروی مؤثر نانوسیالات به برخی نانوسیالات خاص محدود می‌شوند.

^۱ Enistain

محدوده پارامترها (غلظت حجمی نانوذره، دما و ...) نیز محدود هستند. داده‌های تجربی نانوسیالات نشان می‌دهد که این مقادیر کماکان بیشتر از پیشگویی‌های روابط موجود است. برای اصلاح این مشکل، محققان روابطی را برای نانوسیالات خاص مثل آب/آلومینا، اتیلن گلیکول/آلومینا [۸۴]، تیتانیا/آب [۸۵] و اکسید مس/آب [۸۶] با تغییرات دما ارائه کرده‌اند. مشکل این روابط این است که در غلظت‌های بسیار پایین به شکل رابطه اینشتن در نمی‌آیند.

جدول ۵-۱ مدل‌های موجود برای گرانیوی در نانوسیالات

مدل پیشنهادی	محقق
$\mu_{\text{eff}} = 13.47 \exp(35.98\phi_p) \mu_b$	[۸۷]
$\mu_{\text{eff}} = (1 + 4.3\phi_p + 123\phi_p^2) \mu_b$	[۸۴]
$\mu_{\text{eff}} = (1 + 0.19\phi_p + 3063\phi_p^2) \mu_b$	
$\mu_{\text{eff}} = (2.8751 + 53.54\phi_p - 107.12\phi_p^2) + (1078.3 + 15857\phi_p + 20587\phi_p^2) \left(\frac{1}{T}\right)$	[۸۶]

در مقایسه با ضریب هدایت حرارتی و انتقال حرارت جابجایی، آزمایش‌های تجربی انجام شده روی گرانیوی نانوسیالات بسیار کمتر بوده است. لی^۱ و همکاران [۸۸] به اندازه‌گیری ویسکوزیته آب و نانوذرات اکسید مس با یک ویسکومتر موئین پرداختند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته ظاهری نانوسیالات با افزایش دما کاهش می‌یابد. باین‌حال، همان‌طور که آن‌ها اشاره کردند، قطر لوله موئین ممکن است در حالتی که غلظت نانوذرات بالا باشد روی گرانیوی ظاهری به‌خصوص در دماهای پایین تأثیر بگذارد. ویسکوزیته نانوسیالات آب/نانولوله‌های کربنی به‌عنوان تابعی از نرخ برشی، توسط دینگ^۲ و همکاران [۸۹] اندازه‌گیری شد. آن‌ها مشاهده کردند که ویسکوزیته نانوسیال با افزایش غلظت

^۱ Li

^۲ Ding

نانولوله‌های کربنی و کاهش دما افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند که با بالا بردن نرخ برش در دیواره و در نتیجه کاهش گرانشی در این ناحیه، می‌توان عملکرد حرارتی نانوسیال را تقویت کرد.

۳-۳-۵ بررسی تجربی انتقال حرارت هدایت نانوسیالات

قابلیت انتقال حرارت یک سیال جاری اغلب با عدد ناسلت بیان می‌شود که هدایت حرارتی سیال را مستقیماً و معمولاً به‌طور غیرمستقیم هم از طریق عدد پرانتل^۱ به حساب می‌آورد. بنابراین اولین ارزیابی از قابلیت انتقال حرارت یک نانوسیال در نظر گرفتن هدایت حرارتی آن است. تاکنون بیشتر تحقیقات برای انتقال حرارت نسبت به دیگر مسائل مربوط به نانوسیالات، در این زمینه منتشر شده است. ضریب بهبود هدایت حرارتی یا افزایش به‌صورت نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به هدایت حرارتی سیال پایه تعریف می‌شود.

هشت پارامتر در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات مؤثر است که عبارت‌اند از: (۱) درصد حجمی یا غلظت ذره، (۲) نوع ماده ذره، (۳) اندازه ذره، (۴) شکل ذره، (۵) نوع ماده سیال پایه، (۶) دما، (۷) مواد افزودنی و (۸) قدرت اسیدی. هر یک از این پارامترها جداگانه از منظر رفتار داده‌ها، بزرگی و تثبیت با آزمایشات متعدد بررسی در مقاله یو و همکاران [۹۰] به تفصیل بررسی شده است.

^۱ Prandtl Number

۶ پیوست ب: روش‌های آماری

۱-۶ تعاریف

- ✓ خطا^۱ ← تفاضل بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی یک کمیت
- ✓ عدم قطعیت^۲ ← عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم خطا را با عدم قطعیت گزارش می‌دهیم)
- ✓ دقت^۳ ← درجه نزدیکی مقدار محاسبه شده از کمیت، به مقدار واقعی
- ✓ صحت^۴ ← درجه نزدیکی داده‌ها در تکرارهای متوالی با شرایط یکسان

۲-۶ انواع خطاهای تجربی و منابع آن‌ها

۱-۲-۶ خطای تصادفی^۵

از جمله عواملی که سبب بروز خطای تصادفی می‌شوند عبارتند از:

✓ نوسانات غیر قابل تشخیص در شرایط محیطی (مانند دما)

✓ عدم تنظیم اتصالات، سایش در اجزا

✓ خطای خواندن

✓ تغییرات کوچک در موقعیت دستگاه اندازه‌گیری

¹ Error

² Uncertainty

³ Accuracy

⁴ Precision

⁵ Random Error

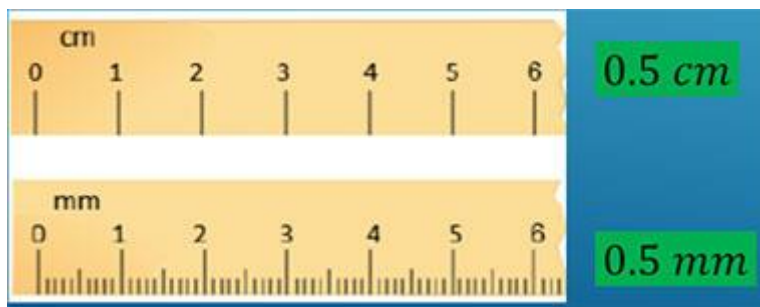
۲-۲-۶ خطای سیستماتیک^۱

اندازه‌گیری که فاقد خطای سیستماتیک باشد، اندازه‌گیری معتبر نامیده می‌شود. از جمله عواملی که سبب بروز خطای سیستماتیک می‌شوند عبارتند از:

✓ کالیبره نبودن دستگاه اندازه‌گیری

۳-۶ سنجش خطا برای انواع ابزارهای اندازه‌گیری

الف) خطای اندازه‌گیری توسط وسیله‌های درجه‌بندی شده، نصف کمینه تقسیم‌بندی مقیاس آن وسیله است.



شکل ۱-۶ خطای اندازه‌گیری وسایل درجه‌بندی شده

ب) خطای اندازه‌گیری توسط وسیله‌های رقمی (دیجیتال)، یک واحد از آخرین رقمی است که می‌خوانند.



شکل ۲-۶ خطای اندازه‌گیری وسایل رقمی (دیجیتالی)

⁶ Systematic error

۴-۶ عدم قطعیت

عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم خطا را با عدم قطعیت گزارش می‌دهیم). عدم قطعیت نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه‌گیری است. یعنی تا چه حد اندازه‌گیری، نشان دهنده مقدار واقعی مورد اندازه‌گیری شده است.

۱-۴-۶ اندازه‌گیری عدم قطعیت

میانگین حسابی یا متوسط^۱، نوعی سنجش گرایش به مرکز است و عبارت است از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آن‌ها. برای محاسبه میانگین حسابی از رابطه (۱-۶) استفاده می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-6)$$

که در آن x_i مقدار داده‌ها و n تعداد تکرار یک آزمایش است.

در آمار، انحراف معیار^۲ یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ درحالی‌که انحراف معیار بزرگ، بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار از رابطه (۲-۶) انجام می‌گردد:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-6)$$

در نهایت اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i است، در n بار تکرار آزمایش از معادله (۳-۶) محاسبه

¹ Arithmetic mean

¹ Standard deviation

می‌شود [۹۱]:

$$\sigma_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (۳-۶)$$

۲-۴-۶ آنالیز عدم قطعیت

عدم قطعیت متغیر x از رابطه (۴-۶) محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_x = \frac{a}{l} \quad (۴-۶)$$

که در آن a دقت و l طول بازه تغییرات وسیله اندازه‌گیری x متغیر است.

اگر x, y, z, \dots متغیرها و $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ عدم قطعیت هر متغیر باشد عدم قطعیت تابع از

$f = f(x, y, z, \dots)$ رابطه (۵-۶) محاسبه می‌گردد [۹۲, ۹۳]:

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (۵-۶)$$

جدول ۱-۶ عدم قطعیت چندتابع پر کاربرد

تابع	مشتقات	واریانس	انحراف معیار
$f = kx; k \in R$	$\frac{\partial f}{\partial x} = k$	$\sigma_f^2 = k^2 \sigma_x^2$	$\sigma_f = k \sigma_x$
$f = x + y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = 1, \frac{\partial f}{\partial y} = 1$	$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\sigma_f = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
$f = x - y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = 1, \frac{\partial f}{\partial y} = -1$	$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\sigma_f = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
$f = xy$	$\frac{\partial f}{\partial x} = y, \frac{\partial f}{\partial y} = x$	$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$	$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$
$f = x/y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{y}, \frac{\partial f}{\partial y} = -\frac{x}{y^2}$	$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$	$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$

روش آماری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، روشی است که در آن بتوان حدود اطمینان را در اطراف یک داده مشخص، نمایش داد. در هر آزمایش این فاصله اطمینان محدودی است که به احتمال زیاد واقعیت در آن وجود دارد. هر چقدر تعداد داده‌هایی که به دست می‌آوریم کمتر باشد این بازه وسیع‌تر بوده و به همان میزان نیز احتمال رسیدن به واقعیت کمتر است. در واقع وقتی تعداد داده‌ها (حجم نمونه) زیاد باشد با اطمینان بیشتری بیان خواهیم کرد عددی که به دست آورده‌ایم به واقعیت نزدیک است و فاصله اطمینان نیز کوچک‌تر خواهد بود. به منظور دست یافتن به فاصله اطمینان در مرحله اول باید مشخص کرد منظور از فاصله اطمینان چیست؟ یعنی در واقع چه حدی از فاصله اطمینان قابل قبول است؟ برای این منظور فاصله اطمینان در نظر گرفته شده در اکثر مطالعات، برابر با ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ است که به این معنی است؛ در صورتی که مطالعه مورد نظر ۱۰۰ بار تکرار شود در ۹۰، ۹۵ و ۹۹ بار آن همین محدوده به دست خواهد آمد. هر چه عدد مربوط به فاصله اطمینان از ۱۰۰ فاصله می‌گیرد میزان دقت آن کاهش می‌یابد. به این معنی، احتمال اینکه شاخصی که با بازه اطمینان ۹۹٪ بیان شده به واقعیت نزدیک باشد، بیشتر از شاخصی است که با بازه اطمینان ۹۵٪ بیان می‌شود.

۶-۵ روش فاصله اطمینان

با توجه به معرفی پارامترهای آماری در بخش ۶-۴، فاصله اطمینان و حد بالا و پایین این فاصله، به صورت رابطه (۶-۶) نمایش داده می‌شود:

$$\mu = \bar{x} \pm \left(B \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (6-6)$$

که در آن B ضریب تعمیم است. این پارامتر از جدول^۲ (۶-۲) با ستون عمودی (تعداد تکرار

^۱ Confidence Interval

^۲ T table

آزمایش - ۱) و ستون افقی (میزان دقت محاسبات) انتخاب می‌شود.

جدول ۶-۲ جدول تعیین ضریب تعمیم

t Table											
cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
Z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	Confidence Level										

مراجع

- [١] J. M. Garnett, "Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions. II," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, pp. 237-288, 1906.
- [٢] R. Hamilton and O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems," *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, pp. 187-191, 1962.
- [٣] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *International Journal of heat and fluid flow*, vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [٤] S. Lee, S.-S. Choi, S. Li, and, and J. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *Journal of Heat transfer*, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [٥] B.-X. Wang, L.-P. Zhou, and X.-F. Peng, "A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 2665-2672, 2003.
- [٦] Q.-Z. Xue, "Model for effective thermal conductivity of nanofluids," *Physics letters A*, vol. 307, pp. 313-317, 2003.
- [٧] J. A. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles ", *Applied physics letters*, vol. 78, pp. 718-720, 2001.
- [٨] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 4568-4572, 2002.
- [٩] W. Yu and S. Choi, "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 5, pp. 167-171, 2003.
- [١٠] D. J. Jeffrey, "Conduction through a random suspension of spheres," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1973, pp. 355-367.
- [١١] R. Davis, "The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions," *International Journal of Thermophysics*, vol. 7, pp. 609-620, 1986.
- [١٢] F. Dittus and M. Boelter, "Heat transfer in automobile radiator of the tube type, vol. 2," *Berkley: University of California*, p. 250, 1930.
- [١٣] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels," *NASA STI/recon technical report A*, vol. 75, p. 22028, 1975.
- [١٤] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol. 11, pp. 151-170, 1998.
- [١٥] S. K. Das, N. Putra, and W. Roetzel, "Pool boiling characteristics of nano-fluids," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 46, pp. 851-862, 2003.

- [١٦] Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids," *Journal of Heat transfer*, vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [١٧] G. Polidori, S. Fohanno, and C. Nguyen, "A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 739-744, 2007.
- [١٨] Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W. B. Anderson, and G. Wu, "Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1107-1116, 2005.
- [١٩] B.-H. Chun, H. U. Kang, and S. H. Kim, "Effect of alumina nanoparticles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 25, pp. 966-971, 2008.
- [٢٠] S. Z. Heris, M. N. Esfahany, and S. G. Etemad, "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 203-210, 2007.
- [٢١] M. Nazari, M. Ashouri, M. H. Kayhani, and A. Tamayol, "Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 88, pp. 33-39, 2015.
- [٢٢] M. Nazari, M. Ashouri, and m.H. Kayhani, "Experimental Investigation of Forced Convection of Nanofluids in a Horizontal Tube Filled with Porous medium," *Modares Mechanical Engineering* vol. 14, pp. 109-116, 2014.
- [٢٣] M. Kayhani, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, M. Nazari, and F. Kowsary, "Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 456-462, 2012.
- [٢٤] D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.
- [٢٥] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, and C. Lin, "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1345-1353, 2010.
- [٢٦] S. Fotukian and M. N. Esfahany, "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*, vol. 37, pp. 214-219, 2010.
- [٢٧] R. B. Mansour, N. Galanis, and C. Nguyen, "Experimental study of mixed convection with water–Al₂O₃ nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 403-410, 2011.
- [٢٨] W. Azmi, K. Sharma, P. Sarma, R. Mamat, S. Anuar, and V. D. Rao, "Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO₂ nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 51, pp. 103-111, 2013.
- [٢٩] M. C. S. Reddy and V. V. Rao, "Experimental investigation of heat transfer

- coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO₂ nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 68-76, 2014.
- [۳۰] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone, "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.
- [۳۱] R.-Y. Jou and S.-C. Tzeng, "Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, pp. 727-736, 2006.
- [۳۲] H. F. Oztop and E. Abu-Nada, "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, pp. 1326-1336, 2008.
- [۳۳] E. Abu-Nada, Z. Masoud, H. F. Oztop, and A. Campo, "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 479-491, 2010.
- [۳۴] G. Sheikhzadeh, A. Arefmanesh, M. Kheirkhah, and R. Abdollahi, "Natural convection of Cu–water nanofluid in a cavity with partially active side walls," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 30, pp. 166-176, 2011.
- [۳۵] P. Naphon and S. Wongwises, "A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 10, pp. 463-490, 2006.
- [۳۶] G. Rogers and Y. Mayhew, "Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 7, pp. 1207-1216, 1964.
- [۳۷] J. Jayakumar, S. Mahajani, J. Mandal, K. N. Iyer, and P. Vijayan, "CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes," *Computers & chemical engineering*, vol. 34, pp. 430-446, 2010.
- [۳۸] P. Mishra and S. Gupta, "Momentum transfer in curved pipes. 1. Newtonian fluids," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 18, pp. 130-137, 1979.
- [۳۹] S. Ali, "Pressure drop correlations for flow through regular helical coil tubes," *Fluid Dynamics Research*, vol. 28, pp. 295-310, 2001.
- [۴۰] H. Mirgolbabaee, H. Taherian, G. Domairry, and N. Ghorbani, "Numerical estimation of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 66, pp. 805-819, 2011.
- [۴۱] E. Neshat, S. Hossainpour, and F. Bahiraei, "Experimental and numerical study on unsteady natural convection heat transfer in helically coiled tube heat exchangers," *Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 877-885, 2014.
- [۴۲] W. R. Hawthorne, "Secondary circulation in fluid flow," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1951, pp. 3.۳۸۷-۳۹۴
- [۴۳] P. Moulin, P. Manno, J. Rouch, C. Serra, M. Clifton, and P. Aptel, "Flux improvement by Dean vortices: ultrafiltration of colloidal suspensions and

- macromolecular solutions," *Journal of Membrane Science*, vol. 156, pp. 109-130, 1999.
- [۴۴] J. H. Grindley and A. Gibson, "On the frictional resistances to the flow of air through a pipe," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 80, pp. 114-139, 1908.
- [۴۵] W. I. Aly, "Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 304-316, 2014.
- [۴۶] M. Rakhsha, F. Akbaridoust, A. Abbassi, and S.-A. Majid, "Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 178-189, 2015.
- [۴۷] F. Akbaridoust, M. Rakhsha, A. Abbassi, and M. Saffar-Avval, "Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall temperature using dispersion model," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 58, pp. 480-491, 2013.
- [۴۸] M. Kahani, S. Z. Heris, and S. Mousavi, "Comparative study between metal oxide nanopowders on thermal characteristics of nanofluid flow through helical coils," *Powder technology*, vol. 246, pp. 82-92, 2013.
- [۴۹] P. Naphon, "Experimental investigation the nanofluids heat transfer characteristics in horizontal spirally coiled tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 293-300, 2016.
- [۵۰] C. Kalb and J. Seader, "Heat and mass transfer phenomena for viscous flow in curved circular tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 801-817, 1972.
- [۵۱] C. E. Kalb and J. Seader, "Fully developed viscous—flow heat transfer in curved circular tubes with uniform wall temperature," *AIChE Journal*, vol. 20, pp. 340-346, 1974.
- [۵۲] A. Akbarinia and A. Behzadmehr, "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 1327-1337, 2007.
- [۵۳] A. Akbarinia, "Impacts of nanofluid flow on skin friction factor and Nusselt number in curved tubes with constant mass flow," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, pp. 229-241, 2008.
- [۵۴] A. Akbarinia and R. Laur, "Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, pp. 706-714, 2009.
- [۵۵] E. E. Bajestan, H. Niazmand, and M. Renksizbulut, "Flow and heat transfer of nanofluids with temperature dependent properties," in *ASME 2010 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels collocated with 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting*, 2010, pp. 733-739.
- [۵۶] J. Choi and Y. Zhang, "Numerical simulation of laminar forced convection heat

- transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a pipe with return bend," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 55, pp. 90-102, 2012.
- [٥٧] H. Chen and B. Zhang, "Fluid flow and mixed convection heat transfer in a rotating curved pipe," *International journal of thermal sciences*, vol. 42, pp. 1047-1059, 2003.
- [٥٨] E. Ebrahimnia-Bajestan and H. Niazmand, "Convective heat transfer of nanofluids flows through an isothermally heated curved pipe," *Iranian journal of chemical engineering*, vol. 8, pp. 81-97, 2011.
- [٥٩] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, and Y. N. Kahnamouei, "Numerical study of magnetic field effects on the mixed convection of a magnetic nanofluid in a curved tube," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 78, pp. 81-90, 2014.
- [٦٠] M. Di Liberto and M. Ciofalo, "A study of turbulent heat transfer in curved pipes by numerical simulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 59, pp. 112-125, 2013.
- [٦١] M. Ciofalo, A. Arini, and M. Di Liberto, "On the influence of gravitational and centrifugal buoyancy on laminar flow and heat transfer in curved pipes and coils," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 82, pp. 123-134, 2015.
- [٦٢] A. Einstein, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*: Courier Corporation, 1956.
- [٦٣] Y. Xuan and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *International Journal of heat and Mass transfer*, vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [٦٤] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism* vol. 1: Clarendon, 1892.
- [٦٥] T. L. Bergman and F. P. Incropera, *Introduction to heat transfer*: John Wiley & Sons, 2011.
- [٦٦] F. M. White, "Fluid mechanics. 5th," *Boston: McGraw-Hill Book Company*, 2003.
- [٦٧] M. Rafati, A. Hamidi, and M. S. Niaser, "Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 45, pp. 9-14, 2012.
- [٦٨] M. Chandrasekar and S. Suresh, "Experiments to explore the mechanisms of heat transfer in nanocrystalline alumina/water nanofluid under laminar and turbulent flow conditions," *Experimental Heat Transfer*, vol. 24, pp. 234-256, 2011.
- [٦٩] S. Kakac and A. Pramuanjaroenkij, "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp.3187-3196 ,2009.
- [٧٠] H. Ito, "Friction factors for turbulent flow in curved pipes," *J. Basic Eng*, vol. 81, pp. 123-134, 1959.
- [٧١] S. U. Choi, "Two are better than one in nanofluids," ed, 2001.
- [٧٢] J. A. Eastman, S. Phillpot, S. Choi, and P. Keblinski" ,Thermal transport in nanofluids 1," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 34, pp. 219-246, 2004.
- [٧٣] M. Wagener, B. Murty, and B. Günther, "Preparation of metal nanosuspensions by high-pressure DC-sputtering on running liquids," in *MRS Proceedings*, 1996.
- [٧٤] J .Eastman, U. Choi, S. Li, L. Thompson, and S. Lee, "Enhanced thermal

- conductivity through the development of nanofluids," in *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1997, pp. 3-12.
- [[∇]₅] D. Zhou, "Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 3109-3117, 2004.
- [[∇]₆] C.-H. Lo, T.-T. Tsung, and L.-C. Chen, "Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS) ", *Journal of Crystal Growth*, vol. 277, pp. 636-642, 2005.
- [[∇]_∇] C.-H. Lo, T.-T. Tsung, and L.-C. Chen, "Ni nano-magnetic fluid prepared by submerged arc nano synthesis system (SANSS)," *JSME International Journal Series B*, vol. 48, pp. 750-755, 2005.
- [[∇]_∧] N .Putra, W. Roetzel, and S. K. Das, "Natural convection of nano-fluids," *Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 775-784, 2003.
- [[∇]₉] S. Lee, S. U. Choi, S. Li, and, and J. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, 1999.
- [[∧]_•] S. U. Choi, X. Xu, and X. Wang, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 13, 2012.
- [[∧]₁] S. Murshed, K. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO₂—water based nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, pp. 367-373, 2005.
- [[∧]₂] J. Lee and I. Mudawar, "Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 452-463, 2007.
- [[∧]₃] M. Karami, "CPU Cooling," M.Sc. thesis, Department of Mechanical Engineering, Kuala Lumpur, MALAYSIA, 2013.
- [[∧]₄] S. E. B. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube," *Superlattices and Microstructures*, vol. 35, pp. 543-557, 3// 2004.
- [[∧]₅] W. J. Tseng and K.-C. Lin, "Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 355, pp. 186-192, 2003.
- [[∧]₆] D. P. Kulkarni, D. K. Das, and G. A. Chukwu, "Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid)," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 6, pp. 1150-1154, 2006.
- [[∧]_∇] W. J. Tseng and C.-L. Lin, "Effect of dispersants on rheological behavior of BaTiO₃ powders in ethanol–isopropanol mixtures," *Materials chemistry and physics*, vol. 80, pp. 232-238, 2003.
- [[∧]_∧] J. Li ,Z. Li, and B. Wang, "Experimental viscosity measurements for copper oxide nanoparticle suspensions," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 7, pp. 198-201, 2002.
- [[∧]₉] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R. A. Williams, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," *International Journal of*

Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 240-250, 2006.

- [٩٠] W. Yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S. U. Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, pp. 432-460, 2008.
- [٩١] S. J. Kline and F. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *Mechanical engineering*, vol. 75, pp. 3-8, 1953.
- [٩٢] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 1, pp. 3-17, 1988.
- [٩٣] B. Stephanie, "A beginner's guide to uncertainty of measurement," *Crown copyright, UK, National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, TW11 0LW*, 2001.

Abstract

Performance of heat transfer systems has been considered in past recent years. This attention guided investigations to using of new methods. For this purpose, various techniques have been proposed as the use of nanofluid and curved tubes. New studies were started at applications of nanofluids and curved tubes. Experimental investigation of force convective heat transfer of nanofluids in curved tubes has not been considered in the literature and challenge is considered to be an open research topic that may require more study. This thesis is one of the first works which focuses on nanofluids flow and heat transfer in curved tubes experimentally. Forced convective heat transfers of nanofluid were done in curved tubes with constant wall temperature boundary condition in Reynolds numbers, i.e. $400 < Re < 2200$. Alumina nanofluid in volume fraction of 0.1% for uniform wall temperature that made by two step method and basic fluid (water) and three tubes with the curvatures of 0.116, 0.074 and 0.042 with equal outer surface area of same material are used for this experiment. Tube inlet temperature is constant in during the test is considered. Measurement of temperature and pressure drop of nanofluid along with test section is done at each test. Results along with statical method, the confidence intervals, with 95% accuracy were reported. Also for validate the pressure test data; formula for curved tubes was used. The result of this comparison was shown an expectable error from correlations.

Maximum increase of nusselt number for curved tubes with 0.042, 0.074 and 0.116 curvature are 15%, 13% and 12% respectively for the nanofluids compared to the basic fluid. Also result shows maximum a significant increase of nusselt number versus curve tube with 0.116 curvature (maximum increase of 22% and 45% for curve tubes with 0.074 and 0.042 curvetures respectively) at $Re=1300$. The results shows maximum absorbed heat nanofluid for curved tubes with 0.074 and 0.042 curvetures are 4.7 and 1.15 respectively versus curve tube with 0.116 curveture .

Key words: Nanofluid, curved tubes, Experimental Investigation, forced convective heat transfer, perssure drop



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

MSc thesis in Energy Conversion

**Experimental investigation of forced convection heat transfer of
nanofluids in curved tubes**

By: Shiva Maleki Delarestaghi

Supervisor:

Dr Mohsen Nazari

February 2017