

اللَّهُمَّ احْمِزْنِي بِرَبِّم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در لوله با خم یوشکل

تحت اعمال میدان مغناطیسی

نگارنده: میلاد کلیدری

استاد راهنما

دکتر علی جباری مقدم

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۱۲۹ / ۴۷ / م
تاریخ: ۹۷ / ۷ / ۱۰

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای میلاد کلیدری با شماره دانشجویی ۹۴۱۴۸۸۴ رشته: مهندسی مکانیک گرایش: تبدیل انرژی تحت عنوان: بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در لوله یوشکل تحت اعمال میدان مغناطیسی که در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه): <input checked="" type="checkbox"/> عالی <input type="checkbox"/> مردود
نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/> نظری

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر علی جباری مقدم	۱- استاد راهنمای اول
—	—	—	۲- استاد راهنمای دوم
—	—	—	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر پوریا اکبرزاده	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر احمد نظری	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر محمدحسین احمدی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدحسین شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



حال که با یاری خداوند توانستم مرحله‌ای دیگر از زندگی را با موفقیت پشت سر بگذارم و با سپری کردن دوره تحصیلی در این مقطع فارغ‌التحصیل شوم، این پایان‌نامه را که چکیده پژوهش من می‌باشد با کمال افتخار به سه شخصیت عزیز و بی‌نظیر زندگی‌ام تقدیم می‌کنم؛ مادرم که در هر مرحله از پیشرفتم ذوقی آشکار در چشمانش و شادی توصیف‌نشده‌ای در دلش احساس کرده‌ام و پدرم که در تمامی مراحل زندگی مانند کوهی استوار در کنارم بوده و چه دلسوزانه و بی‌ادعا مرا یاری کرده و خواهر نازنینم که در تمام مقاطع تحصیلی راهنمای مهربانی برای من بوده است.

پدر و مادر و خواهر عزیزم جبران زحمات شما امکان‌ناپذیر است، امیدوارم بتوانم همواره دلشادتان کنم.

خداوندا تو را شاکرم که مرا سلامت بخشیدی و یاریم کردی تا به موفقیت برسم

در این مرحله از مقطع تحصیلی ارشد که پروژه این جانب به پایان رسیده است لازم میدانم از تمامی اساتید گرامی که در این دوره تحصیلی به من علمی آموختند تشکر فراوان داشته باشم؛ تشکر ویژه از استاد راهنمای عزیزم دکتر علی جباری مقدم که از ابتدای تعریف این پروژه در کنار من بودند و با راهنمایی‌های کارگشای ایشان پروژه به خوبی به انجام رسید. از استاد محترم دانشکده برق، دکتر امیر حسن نیا کمال تشکر و قدردانی را دارم که همچون استاد مشاور بی نظیر مرا در امور این پروژه یاری فراوانی دادند، امیدوارم خداوند همواره یاور شما باشد که این چنین بی چشم‌داشت برای دانشجویان وقت می‌گذارید و از هیچ کمکی دریغ نمی‌کنید. و در نهایت از دوست عزیزم آقای مهندس رهام نواییان بابت کمکهای فراوان به اینجانب، به عنوان یک همراه دلسوز، کمال تشکر را دارم؛ دوستی جدید اما همیشگی...

تعهد نامه

اینجانب میلاد کلیدری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در لوله با خم یوشکل تحت اعمال میدان مغناطیسی تحت راهنمایی دکتر علی جباری مقدم متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد 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 می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های 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 افزار ها 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

موضوع افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی در سال‌های اخیر مورد توجه خاص برای پژوهشگران قرار گرفته است. برای افزایش کارایی مبدل‌ها یا همان افزایش انتقال حرارت در آن‌ها روش‌هایی مانند افزودن فین‌ها و یا ایجاد مانع در مسیر عبور سیال و تغییر شکل هندسی مبدل در گذشته استفاده داشته است؛ اما امروزه با پیشرفت صنعت نیاز به بهبود بیشتر انتقال حرارت مورد نیاز می‌باشد؛ بنابراین محققین به سمت روش‌های نوین برای افزایش کارایی مبدل‌ها روی آورده‌اند. استفاده از نانوسیالات به جای سیال پایه مورد استفاده در مبدل یکی از پرکاربردترین روش‌ها به شمار می‌رود. در این تحقیق آزمایشگاهی نیز انتقال حرارت در حالت جابه‌جایی اجباری برای نانوسیال اکسید آهن به عنوان یک نانوفروسیال، در داخل یک لوله مسی دارای خم یوشکل که سطح آن توسط هیتر الکتریکی گرم شده و شرط مرزی شار ثابت برقرار است، تحت اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در محدوده عدد رینولدز ۲۶۰ تا ۹۳۰ انجام گرفته و نانوسیال اکسید آهن در دو کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بررسی شده است؛ هم‌چنین تمامی تست‌ها در دو لوله مسی با دو شعاع انحنای ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفته است که امکان مقایسه دو حالت با عدد دین متفاوت در یک عدد رینولدز برابر را فراهم آورده است؛ هم‌چنین افت فشار در هر دو حالت مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل توجه انتقال حرارت در حالت استفاده از نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر و تحت اعمال میدان مغناطیسی متغیر می‌باشد؛ که در این حالت عدد ناسلت حدود ۲۳ درصد نسبت به آب افزایش داشت؛ اما با در نظر گرفتن افت فشار برای هر دو لوله مشخص شد که افت فشارها در عدد رینولدز برابر برای لوله با شعاع انحنای کوچک نسبت به لوله با شعاع انحنای بزرگ، مقادیر بیشتری دارا می‌باشد؛ بنابراین پس از معرفی یک بازدهی کلی برای سیستم، مقایسه دو لوله با در نظر گرفتن هر دو فاکتور افت فشار و انتقال حرارت انجام گرفت و مشاهده شد که برای لوله با شعاع انحنای بزرگ و نانوسیال ۰/۴ درصد تحت اعمال میدان متغیر، بازدهی کلی ۱/۱۲ به دست آمده

است که بیشینه بازده در تمامی حالت‌ها به شمار می‌رود. به‌طورکلی پس از بررسی دو لوله آزمایش در همه حالات مشخص شد که تنها در موارد اندکی بازده کلی سیستم بالاتر از یک قرار می‌گیرد و برای طراحی مبدل‌ها در حالت لوله‌های خمیده، اعمال میدان مغناطیسی سیستم را از لحاظ هیدرودینامیکی دچار مشکل می‌کند و باعث افزایش زیاد در افت فشار می‌شود؛ اما بازدهی حرارتی با افزایش عدد دین، افزایش کسر حجمی نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی بر نانوسیال، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

نانوفروسیال، شار حرارتی ثابت، میدان مغناطیسی، عدد دین، بازدهی کلی

فصل اول مروری بر پیشینه تحقیق..... ۱

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۱-۱ مقدمه‌ای از تکنولوژی مبدل‌های حرارتی..... ۲

۱-۱-۲ انواع مبدل‌های حرارتی..... ۳

۲-۱ مقدمه‌ای از نانوسیال..... ۴

۱-۲-۱ معرفی نانوسیال..... ۴

۲-۲-۱ روش تهیه تک‌مرحله‌ای..... ۵

۳-۲-۱ روش تهیه دو‌مرحله‌ای..... ۶

۴-۲-۱ روش‌های پایدارسازی نانوسیال..... ۷

۳-۱ بررسی خصوصیات نانوسیال..... ۸

۱-۳-۱ چگالی (Density)..... ۸

۲-۳-۱ ظرفیت گرمایی ویژه (C_p)..... ۹

۳-۳-۱ ضریب هدایت حرارتی (K)..... ۹

۱-۳-۳-۱ کسر حجمی نانوذرات..... ۱۰

۲-۳-۳-۱ تأثیر دما بر ضریب K_{nf} ۱۰

۳-۳-۳-۱ اثر اندازه نانوذرات..... ۱۱

۴-۳-۳-۱ تأثیر سیال پایه بر ضریب K_{nf} ۱۲

۴-۳-۱ ویسکوزیته نانوسیال..... ۱۳

۴-۱ معرفی نانوفروسیال..... ۱۶

۵-۱ کاربرد نانوفروسیال در مبدل‌های حرارتی..... ۱۶

۶-۱ روش‌های ایجاد تغییرات فیزیکی در مبدل با به‌کارگیری نانوسیال..... ۱۹

۷-۱ جمع‌بندی و ارائه نوآوری در طرح پیشنهادی..... ۲۱

فصل دوم تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش..... ۲۳

۱-۲ تجهیزات آزمایشگاهی..... ۲۴

۱-۱-۲ لوله مسی..... ۲۴

۲-۱-۲ ترموکوپل تیپ K..... ۲۵

۳-۱-۲ وسیله ثبت دما..... ۲۵

۴-۱-۲ هیتر الکتریکی..... ۲۶

۵-۱-۲ پمپ دنده‌ای..... ۲۷

۶-۱-۲ دستگاه ثبت افت فشار..... ۲۸

۲۸.....	۷-۱-۲ دستگاه التراسونیک.....
۲۹.....	۸-۱-۲ نانوپودر اکسید آهن.....
۳۱.....	۹-۱-۲ هسته فریت.....
۳۲.....	۱۰-۱-۲ منبع تغذیه.....
۳۲.....	۱۱-۱-۲ تسلامتر (اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی).....
۳۳.....	۲-۲ آماده سازی نانوسیال.....
۳۵.....	۳-۲ ایجاد میدان مغناطیسی.....
۳۵.....	۴-۲ سیستم آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش.....
۳۵.....	۱-۴-۲ تصاویر سیستم آزمایشگاهی.....
۳۸.....	۲-۴-۲ روش انجام آزمایش.....
۴۳.....	۵-۲ آنالیز عدم قطعیت.....
۴۳.....	۱-۵-۲ انواع خطاهای احتمالی سیستم.....
۴۴.....	۲-۵-۲ آنالیز آماری خطای تصادفی و ارائه عدم قطعیت.....
۴۹.....	فصل سوم نتایج آزمایش.....
۵۰.....	۱-۳ بررسی میزان جذب حرارت در لوله کوچک.....
۵۶.....	۲-۳ مقایسه ضرایب انتقال حرارت جابه جایی در لوله کوچک.....
۶۵.....	۳-۳ بررسی جذب گرما و ضریب انتقال حرارت جابه جایی در لوله بزرگ.....
۷۱.....	۴-۳ مقایسه دمای بالک سیال و ضریب انتقال حرارت جابه جایی در دو شعاع انحنای متفاوت.....
۷۷.....	۵-۳ مقایسه عدد ناسلت در هر دو شعاع انحنا.....
۸۱.....	۶-۳ بررسی تغییرات افت فشار.....
۸۶.....	۷-۳ اهمیت بازده حرارتی و بازده هیدرودینامیکی.....
۸۶.....	۸-۳ معرفی بازدهی کلی.....
۹۳.....	فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۹۴.....	۱-۴ نتیجه گیری.....
۹۶.....	۲-۴ پیشنهادها.....
۹۷.....	منابع.....

- شکل (۱-۱) تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات..... ۶
- شکل (۱-۲) لوله مسی تعبیه شده به صورت خم یوشکل..... ۲۴
- شکل (۲-۲) ترموکوپل سری K..... ۲۵
- شکل (۳-۲) دیتالاگر دما مدل ۱۲ کاناله لوترون..... ۲۶
- شکل (۴-۲) نمایی از هیتر الکتریکی و نحوه قرار گرفتن آن روی لوله..... ۲۷
- شکل (۵-۲) نمایی از پمپ دنده‌ای..... ۲۷
- شکل (۶-۲) ترانس‌میتزر فشار رزمونت مدل ۳۰۵۱..... ۲۸
- شکل (۷-۲) دستگاه همگن ساز التراسونیک..... ۲۹
- شکل (۸-۲) (الف) نانوپودر قبل از اضافه شدن به سیال و (ب) تصویر TEM تهیه شده از نانوذرات اکسید آهن..... ۳۱
- شکل (۹-۲) هسته فریت تهیه شده بدون سیم پیچی و سیم پیچی شده..... ۲۹
- شکل (۱۰-۲) نمایی از اینورتر مدل LC iC5..... ۳۲
- شکل (۱۱-۲) نمایی از تسلامتر مورد استفاده..... ۳۳
- شکل (۱۲-۲) نمایی از محلول تهیه شده دو روز بعد از ساخت..... ۳۴
- شکل (۱۳-۲) نمایی از سیستم آماده شده تحت بررسی..... ۳۶
- شکل (۱۴-۲) نحوه قرارگیری الکترومگنت ها روی لوله..... ۳۶
- شکل (۱۵-۲) شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی..... ۳۷
- شکل (۱-۳) روند افزایش دمای بالک بی بعد شده در رینولدزهای مختلف..... ۵۰
- شکل (۲-۳) افزایش دقیق دمای بالک در رینولدزهای متفاوت برای آب..... ۵۱
- شکل (۳-۳) افزایش دقیق دمای بالک در رینولدزهای متفاوت برای نانوسیال ۰/۲ درصد..... ۵۲
- شکل (۴-۳) تفاوت دمای سطح لوله برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و آب در رینولدز ۶۶۰..... ۵۳
- شکل (۵-۳) مقایسه افزایش دمای بالک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی، میدان ۲۰۰ گوس ثابت و میدان ۲۰۰ گوس متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز در نانوسیال Fe_3O_4 و کسر حجمی ۰/۴ و رینولدز ۹۳۰..... ۵۴
- شکل (۶-۳) مقایسه افزایش دمای سطح لوله برای سه حالت بدون میدان، میدان ۲۰۰ گوسی ثابت و میدان ۲۰۰ گوسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز در نانوسیال Fe_3O_4 و کسر حجمی ۰/۴ رینولدز ۹۳۰..... ۵۴
- شکل (۷-۳) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی در راستای لوله برای آب در رینولدزهای متفاوت..... ۵۶
- شکل (۸-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی برای نانوسیال ۰/۲ درصد حجمی و رینولدز ۴۰۰، بدون میدان مغناطیسی، میدان ثابت و متغیر و آب..... ۵۸
- شکل (۹-۳) مقایسه $h(x)$ برای نانوسیال ۰/۲ درصد حجمی و آب در رینولدز ۹۳۰..... ۵۸
- شکل (۱۰-۳) مقایسه مقادیر $h(x)$ در رینولدز ۶۶۰ برای آب و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی..... ۶۰
- شکل (۱۱-۳) مقایسه $h(x)$ برای نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد در حالت بدون میدان و میدان ثابت ۲۰۰ گوس و رینولدز ۶۶۰..... ۶۱

- شکل (۱۲-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین برای آب و نانوسیال ۰/۲ درصد در رینولدزهای متفاوت..... ۶۲
- شکل (۱۳-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین برای آب و نانوسیال ۰/۴ درصد در رینولدزهای متفاوت..... ۶۳
- شکل (۱۴-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین برای نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد در رینولدزهای متفاوت..... ۶۴
- شکل (۱۵-۳) مقایسه افزایش دمای سطح با سیال آب در رینولدزهای متفاوت..... ۶۵
- شکل (۱۶-۳) مقایسه افزایش دمای بالک سیال آب در رینولدزهای متفاوت..... ۶۶
- شکل (۱۷-۳) مقایسه دمای بالک سیال برای آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و در حضور میدان ثابت در رینولدز ۴۰۰..... ۶۷
- شکل (۱۸-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای آب در رینولدزهای متفاوت..... ۶۸
- شکل (۱۹-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و در حضور میدان ثابت در رینولدز ۹۳۰..... ۶۹
- شکل (۲۰-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در رینولدزهای متفاوت بین آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد در حالات بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر..... ۷۰
- شکل (۲۱-۳) مقایسه دمای بالک بی‌بعد شده برای آب بین دو عدد دین متفاوت در رینولدز ۶۶۰..... ۷۲
- شکل (۲۲-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در رینولدز ۶۶۰ و دو عدد دین متفاوت برای نانوسیال ۰/۲ درصد در حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت..... ۷۳
- شکل (۲۳-۳) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در رینولدز ۶۶۰ برای دو عدد دین متفاوت و دو نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی..... ۷۴
- شکل (۲۴-۳) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در اعداد رینولدز متفاوت برای نانوسیال ۰/۲ درصد در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان متغیر در دو شعاع انحنای متفاوت..... ۷۵
- شکل (۲۵-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در تمامی رینولدزها و در دو شعاع انحنای متفاوت برای آب، نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی..... ۷۶
- شکل (۲۶-۳) مقایسه تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز برای آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در لوله کوچک..... ۷۸
- شکل (۲۷-۳) مقایسه تغییرات عدد ناسلت با افزایش رینولدز در لوله کوچک برای نانوسیال ۰/۴ درصد در حالات بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر..... ۷۹
- شکل (۲۸-۳) مقایسه روند تغییرات عدد ناسلت با افزایش رینولدز در دو شعاع انحنای متفاوت برای نانوسیال ۰/۴ درصد در حالت اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر..... ۸۰
- شکل (۲۹-۳) مقایسه افت فشار در لوله کوچک برای آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در رینولدزهای متفاوت..... ۸۲
- شکل (۳۰-۳) مقایسه افت فشار در لوله کوچک برای آب و نانوسیال ۰/۴ درصد با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۸۳

- شکل (۳-۳۱) مقایسه افت فشار در لوله بزرگ برای آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در رینولدزهای متفاوت..... ۸۴
- شکل (۳-۳۲) مقایسه افت فشار در دو عدد دین متفاوت برای نانوسیال ۰/۴ درصد تحت تأثیر میدان مغناطیسی ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۸۵
- شکل (۳-۳۳) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۲ درصد در لوله کوچک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۸۸
- شکل (۳-۳۴) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله کوچک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۸۹
- شکل (۳-۳۵) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۲ درصد در لوله بزرگ برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۹۰
- شکل (۳-۳۶) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله بزرگ برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت..... ۹۱

فهرست جداول

شماره صفحه

جدول (۱-۲) مشخصات نانوپودر اکسید آهن.....	۳۰
جدول (۲-۲) آزمایش‌ها انجام‌گرفته جهت تهیه نانوسیال در حالت پایدار با افزودنی استیک اسید ۱ درصد جرمی.....	۳۴
جدول (۳-۲) بازه و دقت وسایل اندازه‌گیری آزمایش.....	۴۳
جدول (۴-۲) عدم قطعیت در دمای ورودی و خروجی برای نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در رینولدز ۴۰۰.....	۴۵
جدول (۵-۲) زمان موردنیاز برای پر شدن بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر برای سه تکرار در آزمایش دبی ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.....	۴۶
جدول (۶-۲) دمای ثبت‌شده برای ورودی و خروجی در لوله آزمایش تحت اعمال شار حرارتی.....	۴۷

علائم اختصاری در متن پایان نامه

T_{in}	دمای ورودی ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	دمای خروجی ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	دمای بالک سیال ($^{\circ}\text{C}$)
I	جریان الکتریکی (A)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
q	توان حرارتی (W)
A	سطح مؤثر انتقال حرارت (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی (J/Kg.K)
\dot{m}	دبی جرمی سیال (Kg/s)
Q	دبی حجمی سیال (m^3/s)
q''	شار حرارتی (W/m^2)
D	قطر انحنای لوله (m)
d	قطر داخلی لوله مسی (m)
K	ضریب رسانندگی حرارتی (W/m.K)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2.K$)
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
np	نانوذره
nf	نانوسیال
bf	سیال پایه
ρ	چگالی (Kg/m^3)
φ	درصد حجمی

فصل اول

مروری بر تحقیقات انجام گرفته

در زمینه نانوسیالات

۱-۱-۱ مقدمه‌ای از تکنولوژی مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی به دلیل استفاده فراوان در صنعت و ایفا کردن نقش مهم در بخش خنک کاری سیستم‌ها، ایجاد گرمایش در محیط و ... به‌طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است. مهم‌ترین موضوع در کارایی مبدل‌ها، افزایش بازدهی حرارتی، در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های کنترل و افزایش انتقال حرارت و بازدهی حرارتی به‌طور کلی به دو دسته کنترل‌های فعال^۱ و غیرفعال^۲ تقسیم می‌شوند. از جمله روش‌های پسیو می‌توان به ایجاد تغییرات بر روی سطح انتقال حرارت مبدل مانند افزودن فین‌ها، شکل دادن به لوله مبدل و طولانی کردن مسیر انتقال سیال و ... اشاره کرد. در کاربردهای صنعتی همواره کمبود فضا برای ایجاد سطح انتقال حرارت بالا مشکلی بزرگ به شمار می‌رود، از این‌رو استفاده از روش‌های کنترل پسیو مانند افزودن فین و یا تغییر هندسه مبدل تنها در موارد اندکی قابلیت اجرایی دارد؛ بنابراین تکنولوژی‌های جدیدتری برای افزایش راندمان حرارتی مبدل‌ها مورد نیاز است. استفاده از نانوسیال به‌عنوان جایگزین سیال پایه آب یا روغن یکی از روش‌های نوین در این میان به شمار می‌رود. در اکثر مبدل‌ها سیال فعال سیالات متداولی مثل آب، اتیلن گلیکول، انواع روغن و ... می‌باشد که این سیالات عموماً دارای رسانندگی گرمایی پایینی هستند و افزودن نانوذرات جامد در سیال پایه به شکل سوسپانسیون پایدار به دلیل بالا بودن ضریب رسانندگی گرمایی فلزات نسبت به مایع باعث افزایش انتقال حرارت سیال می‌شود که همین امر باعث جلب نظر محققان و روی آوردن به سمت این تکنولوژی در بسیاری از مبدل‌های حرارتی شده است. مبدل‌های حرارتی طیف بسیار گسترده‌ای دارند از جمله مبدل‌های صفحه‌ای، مبدل صفحه و لوله، مبدل دو لوله، کویل‌ها و ... که در تمامی این موارد امکان استفاده از نانوسیال به‌منظور افزایش راندمان وجود دارد.

^۱ Active Control

^۲ Passive Control

نانوذرات مورد استفاده در بیشتر موارد اکسید فلزات هستند، مانند اکسید آلومینیم، اکسید مس، اکسید آهن و ... که اکسید آهن به دلیل دارا بودن خاصیت مغناطیسی در گروه نانوذرات فرومغناطیس قرار می‌گیرد. نانوسیال فرومغناطیس علاوه بر اینکه به دلیل وجود نانوذرات آهن و بالا بردن ضریب هدایت حرارتی انتقال حرارت را افزایش می‌دهد، امکان اعمال میدان مغناطیسی به منظور افزایش بیشتر راندمان را نیز فراهم می‌کند، میدان مغناطیس با اعمال نیرو در راستای خطوط میدان به نانوذرات باعث شکل‌گیری آرایش منظم آن‌ها شده و از حرکت‌های کاتوره‌ای جلوگیری می‌کند و با جهت دادن به ذرات باعث افزایش چشم‌گیر انتقال حرارت می‌شود. این امر موجب شده که نانو فروسیال‌ها از جانب محققین مورد توجه خاص قرار بگیرند.

۱-۱-۲ انواع مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی انواع زیادی دارند از جمله مبدل‌های صفحه‌ای، مبدل صفحه لوله، مبدل دولوله و ... در میان انواع مبدل‌ها، مبدل‌های لوله‌ای کاربرد بسیار زیادی دارند. این مبدل‌ها اکثراً از لوله‌های دایروی تشکیل می‌شوند، مزیت لوله دایروی این است که بدون تغییر در هندسه می‌توان با بزرگ و کوچک کردن قطر لوله به ظرفیت‌های متفاوت دست پیدا کرد. این مبدل‌ها اکثراً برای سیالات مایع-مایع استفاده می‌شوند و می‌توان از انواع آن‌ها به دولوله، کویل‌ها و محفظه-لوله^۱ اشاره کرد. مبدل‌های محفظه-لوله عموماً از یک محفظه استوانه‌ای و تعداد زیادی لوله موازی و خم‌دار تشکیل می‌شوند؛ یک سیال در داخل لوله‌ها جریان داشته و سیال دیگر حول لوله و داخل محفظه جریان دارد. لوله‌های خم‌دار داخلی معمولاً دارای خم یوشکل می‌باشند [۱]. همان‌طور که اشاره شد بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی موضوع مورد توجه محققین می‌باشد و در هرکدام از این مبدل‌های لوله‌ای که اشاره شد امکان استفاده از نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت وجود دارد و در نتیجه به بررسی نانوسیالات مختلف در این زمینه پرداخته می‌شود.

^۱ Shell-Tube

۱-۲ مقدمه‌ای از نانوسیال

۱-۲-۱ معرفی نانوسیال

نانوسیال به سیالی گفته می‌شود که حاوی ذرات جامد معلق در سیال پایه به شکل سوسپانسیون پایدار است و اندازه ذرات جامد معمولاً بین (۱۰۰-۱) نانومتر می‌باشد. ذرات جامد معمولاً اکسید فلزات هستند که به شکل همگن در سیال پایه پراکنده شده‌اند. خصوصیات نانوسیال به عوامل بسیاری وابسته است مانند اندازه ذرات جامد معلق، شکل ذرات (کروی یا غیر کروی) و میزان پراکندگی ذرات بستگی دارد. به‌طور کلی بالا بودن ضریب هدایت حرارتی برای فلزات و کارایی آن در افزایش انتقال حرارت اساس شکل‌گیری این تکنولوژی به شمار می‌رود. برای اولین بار چوی و استمن [۲] در سال ۱۹۹۵ ایده استفاده از نانوسیال را به‌عنوان سیال فعال با خصوصیات منحصربه‌فرد ذرات مطرح کردند. آن‌ها بررسی آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت نانوسیال اکسید مس در آب و اکسید آلومینیم در آب انجام دادند که به نتیجه افزایش تقریبی ۲۰ درصدی انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه دست یافتند. نانوسیالات به دلیل خواص منحصربه‌فرد انتقال حرارتی مورد توجه محققان قرار گرفته است. نانوذرات در مقیاس نانومتر دارای خواص بهبودیافته نسبت به مقیاس میلی‌متر و میکرومتر می‌باشند، از جمله آن‌ها می‌توان به پراکنده‌سازی بهتر و ایجاد سیال پایدارتر اشاره کرد که این امر خود موجب کاهش افت فشار و خوردگی در مسیر عبور سیال از مبدل‌ها می‌شود. در نتیجه واضح است که بررسی خصوصیات ترموفیزیکی نانوذرات و شناخت بهتر عوامل تأثیرگذار بر این خصوصیات دارای اهمیت بالایی می‌باشد. از این‌رو تحقیقات زیادی بر روی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات انجام گرفته است. خصوصیات مربوطه و ضروری برای بررسی جریان سیال و انتقال حرارت آن خواصی همچون چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، تنش سطحی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی سیال و ویسکوزیته می‌باشند؛ اندازه‌گیری و محاسبه این خواص خود وابسته به کسر حجمی نانوذرات استفاده شده، دمای کاری نانوسیال، جنس سیال پایه که نانوذرات در آن پراکنده می‌شوند، جنس ماده نانوذرات و اندازه

نانوذرات هستند. تمامی این خصوصیات وابستگی و تأثیرپذیری زیادی نسبت به روش تهیه نانوسیال دارند؛ از این رو ابتدا دو روش تهیه نانوسیال معرفی خواهد شد.

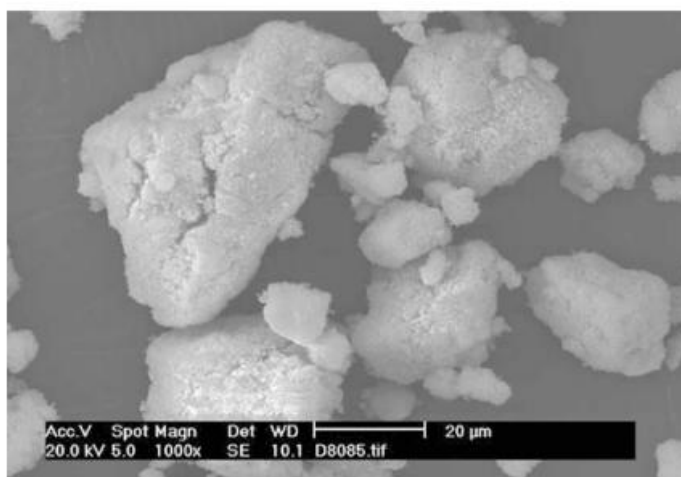
۱-۲-۲ روش تهیه تک مرحله‌ای

در این روش برای تولید نانوسیال به دماهای کاری بالا نیاز می‌باشد؛ چراکه بخار فلز اصلی (فلزی که قرار است نقش نانوذره را دارا باشد) باید تهیه شود. سپس این بخار به داخل سیال پایه هدایت می‌شود، در این قسمت بخار دما بالا پس از وارد شدن به سیال دما پایین دچار میعان شده و به شکل ذرات اکسید فلزی که بخار شده بود درون سیال پراکنده می‌شود. ایستمن و همکاران [۳] با استفاده از همین روش تحقیقی انجام دادند که در آن بخار مس در دمای بالا در تماس با سیال اتیلن گلیکول^۱ (سیال پایه) قرار گرفته و پس از میعان به شکل ذرات اکسید مس در سیال پایه پراکنده شد. در این روش تهیه نانوسیال به دلیل اینکه شامل دخالت دستی و یا اضافه کردن افزودنی و ... نیست قطعاً نانوسیال با کیفیت و خلوص بهتری تولید خواهد شد، هم‌چنین به دلیل اینکه تغییر فاز فلز در این روش به صورت طبیعی رخ داده و بخار فلز پس از میعان شدن به شکل اکسید همان فلز تولید می‌شود، کنترل بسیار خوبی بر روی اندازه ذرات اکسید ساخته شده وجود دارد و در نتیجه اندازه نانوذرات در تمامی سوسپانسیون یکسان خواهد بود؛ و اما از ایراداتی که به این روش وارد است از لحاظ کیفی ممکن است در حین عملیات میعان در جایی از سیال تراکم اکسید ذرات بالا رفته و موجب بالا رفتن غلظت نانوسیال در یک ناحیه و پایین آمدن آن در ناحیه‌ای دیگر شود؛ و اشکال دوم این روش سختی فراهم آوردن شرایط فنی لازم برای تولید نانوسیال در این روش می‌باشد. از این رو روش تک مرحله‌ای کمتر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است.

^۱ Ethylene glycol

۱-۲-۳ روش تهیه دومرحله‌ای

این روش دارای بیشترین کاربرد در تحقیقات و بررسی‌های پژوهشگران می‌باشد؛ در این روش نانوپودر اکسید فلز از پیش ساخته شده است. نانوذرات معمولاً در حالت رسوب بخار شیمیایی در حضور یک گاز بی‌اثر به صورت نانوپودر خشک تهیه می‌شود و سپس پودر چندین مرحله با آب مقطر شستشو داده می‌شود تا به حالت خنثی تبدیل شود. همان‌طور که گفته شد این مراحل از قبل توسط بسیاری از شرکت‌های تولید نانوذره انجام گرفته است و نانوپودر آماده به فروش می‌رسد. در مرحله اول تهیه نانوسیال به روش دومرحله‌ای، ابتدا نانوپودر موردنظر به سیال پایه افزوده می‌شود و سپس برای پراکنده‌سازی و همگن‌سازی محلول از روش‌های همچون به‌کارگیری ارتعاشگر التراسونیک^۱ استفاده می‌شود. با این کار از کلوخه شدن و ته‌نشینی ذرات جلوگیری شده و با شکستن توده‌های بزرگ ذرات محلول به شکل همگن درآمده تا خواص نانوسیال تولیدشده دقیق‌تر بررسی شود. پوترا و همکاران [۴] در بررسی که بر روی جابه‌جایی آزاد نانوسیال در یک سیلندر عمودی انجام دادند، از نانوذرات اکسید مس در سیال پایه آب استفاده کردند. در مراحل آماده‌سازی نانوسیال، تصویر TEM^۲ از توده‌ای شدن نانوذرات CuO تهیه شده که شکل (۱-۱) مشخص است.



شکل (۱-۱) تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات [۴]

^۱ Ultrasonic vibrator

^۲ Transmission electron microscopy

برای جلوگیری از این کلوخه شدن و انباشتگی نانوذرات در یک ناحیه که باعث ته‌نشینی ذرات شده و پایداری نانوسیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد، روش‌هایی استفاده می‌شود که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است. پایدار ماندن نانوسیال به‌عنوان یک امر مهم در استفاده از آن به‌عنوان شیوه‌ای برای بهبود انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد، زیرا در صورتی که نانوسیال پایداری مطلوبی نداشته باشد در تخمین خصوصیات ترموفیزیکی آن مشکلات زیادی به وجود می‌آید.

۴-۲-۱ روش‌های پایدارسازی نانوسیال

• استفاده از سورفکتانت^۱ ها

این مواد معمولاً ترکیبات آلی هستند که در گروه مواد هیدروفوبیک^۲ قرار می‌گیرند از آنجایی که ساختار مولکولی آن‌ها به شکلی است که یک سر مولکول آب‌دوست و انتهای آن آب‌گریز می‌باشد پس از حل شدن در سیالی مثل آب باعث کاهش کشش سطحی می‌شود. افزودن سورفکتانت به نانوسیال یکی از روش‌های ابتدائی برای ایجاد پایداری در سوسپانسیون آماده‌شده به شمار می‌رود، استفاده از این روش خیلی توصیه نمی‌شود؛ به این دلیل که استفاده از سورفکتانت خواص ترموفیزیکی نانوسیال را دچار تغییر می‌کند [۵].

• استفاده از ارتعاشگر التراسونیک

در این روش برخلاف روش قبل که موجب ایجاد تغییر در خصوصیات نانوسیال شد، در نانوسیال هیچ‌گونه تغییر شیمیایی رخ نمی‌دهد و فقط با ایجاد ارتعاشات قوی از توده‌ای شدن نانوذرات جلوگیری شده و هم‌چنین پیوندهای ایجادشده بین ذرات شکسته می‌شود. هنگ و همکاران [۶] در بررسی که روی پایداری نانوسیالات انجام دادند دریافتند در مواردی که از التراسونیک جهت پایدارسازی نانوسیال استفاده شده است نسبت به استفاده از سورفکتانت‌ها، رسانندگی گرمایی نانوسیال بهتر شده است.

^۱ Surfactant

^۲ Hydrophobic

• تغییر pH نانوسیال

با ایجاد تغییر در pH محیط نانوسیال از پیوند خوردن ذرات در محلول جلوگیری می‌شود، چون برهم‌کنش آب و ذرات در نانوسیال به خواص سطحی ذرات وابسته است. هر ذره‌ای در محدوده معینی از pH در نقطه ایزو الکتریک^۱ قرار خواهد گرفت، در این نقطه نیروی دافعه بین ذرات صفر شده و باعث تشکیل پیوند بین آن‌ها خواهد شد؛ از این رو اگر pH نانوسیال در این محدوده قرار داشته باشد سیال ناپایدار خواهد بود؛ اما با افزایش pH نانوسیال آب پوشی بین ذرات بیشتر شده و این امر باعث پایداری سیال خواهد شد [۵]

۳-۱ بررسی خصوصیات نانوسیال

۱-۳-۱ چگالی (Density)

چگالی نانوسیال به‌طور معمول برای مواردی که از نانوذرات فلزی استفاده می‌شود، به دلیل بیشتر بودن چگالی فلزات نسبت به مایع با افزایش روبرو می‌شود. از این رو برای تخمین زدن چگالی نانوسیال، دانستن مواردی مثل چگالی نانوذرات استفاده شده و کسر حجمی نانوذرات در سیال مورد نیاز است. به‌طور مثال هوو و همکاران [۷] طی یک بررسی بر روی نانوسیال $Al_2O_3 / water$ با اندازه نانوذراتی حدود 33nm برای کسر حجمی ۴ درصد یک افزایش ۱۰ درصد در چگالی نانوسیال نسبت به سیال پایه مشاهده کردند. می‌توان با انجام محاسباتی بر اساس اختلاط در محلول و قوانین حاکم بر آن به یک فرمول کاربردی برای تخمین چگالی نانوسیال مانند فرمول (۱-۱) دست یافت.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi_p)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \quad (1-1)$$

^۱ Isoelectric point

خانافر و وفایی [۸] طی یک بررسی که بر روی نانوسیال $Al_2O_3 / Water$ در رنج دمایی $^{\circ}C$ (5-40) و کسر حجمی بین (0-4) درصد با ارائه فرمول (۲-۱) به بررسی چگالی نانوسیال پرداختند.

$$\rho_{nf,T} = 1001.064 + 2738.6191\varphi_p - 0.4095T_{nf} \quad (2-1)$$

۱-۳-۲ ظرفیت گرمایی ویژه (C_p)

برای بررسی و محاسبه ظرفیت گرمایی در نانوسیال طی تحقیقی که توسط ژان و روتزل [۹] انجام گرفته است، فرمولی به شکل (۳-۱) ارائه شده:

$$C_{nf} = \frac{(1-\varphi)\rho_{bf} C_{bf} + \varphi\rho_p C_p}{\rho_{nf}} \quad (3-1)$$

که در آن φ کسر حجمی نانوذرات، ρ_{bf} چگالی سیال پایه، C_{bf} ظرفیت حرارتی سیال پایه، ρ_p چگالی نانوذرات و ρ_{nf} چگالی نانوسیال می باشد. به طور قطعی با افزودن نانوذرات به آب ظرفیت گرمایی این سیال کاهش خواهد یافت، این موضوع به عنوان یک فاکتور مهم در انتقال حرارت مورد توجه محققان قرار گرفته است؛ در یک بررسی اوهانلی و همکاران [۱۰] طی آزمایش هایی بر روی نانوسیال های تهیه شده از نانوذرات اکسید فلزات از جمله $Al_2O_3 / water$ با اندازه ذرات ۵۰ نانومتر، $CuO / water$ با اندازه ۳۰ نانومتر و نانوسیال $SiO_2 / water$ با سایز ذرات ۳۲ نانومتر به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای کاری مقدار ظرفیت گرمایی افزایش و با افزایش کسر حجمی نانوذرات این کمیت کاهش خواهد یافت.

۱-۳-۳ ضریب هدایت حرارتی (K)

این فاکتور به عنوان مهم ترین خصوصیت در نانوسیال برای انتقال حرارت به شمار می آید که توانایی هر ماده ای را در هدایت و انتقال حرارت نشان می دهد. برای مایعات میزان انرژی دریافتی توسط سیال طبق قانون هدایت فوریه به دست می آید. همان طور که مشخص است قانون فوریه تأثیر مستقیم ضریب هدایت

حرارتی بر انتقال حرارت را نشان می‌دهد. در نتیجه برای ثبت دقیق دما توسط سنسورها و محاسبه ضریب هدایت حرارتی، عوامل تأثیرگذار بر این فاکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳-۳-۱ کسر حجمی نانوذرات

علاوه بر خود سیال پایه که در انتقال حرارت نانوسیال بسیار تأثیرگذار است، کسر حجمی نانوذرات مورد استفاده نیز تأثیر چشم‌گیری بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال (K_{nf}) دارد. در یک تحقیق مسودا و همکاران [۱۱] طی بررسی نانوسیال $Al_2O_3 / water$ با اندازه ذرات ۱۳ نانومتر مشاهده کردند که با افزایش کسر حجمی از ۱ درصد به ۴/۳ درصد مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش ۳۲ درصد نسبت به سیال پایه (آب) همراه بود. در سال‌های اخیر میناکو و همکاران [۱۲] نیز یک بررسی آزمایشگاهی بر روی نانوسیال $CuO / water$ با اندازه ذرات ۵۵ نانومتر انجام دادند در این آزمایش یک مبدل حرارتی ساده متشکل از یک لوله مسی با قطر ۴ میلی‌متر و یک هیتر الکتریکی که لوله توسط آن تحت یک شار حرارتی ثابت قرار داشت مورد بررسی قرار گرفت و با ثبت ۶ نقطه دمای سطح در محدوده انتقال حرارت و انجام عملیات محاسباتی، یک افزایش چشم‌گیر در مقدار ضریب K_{nf} به میزان ۴۰ درصد نسبت به آب برای کسر حجمی ۲ درصد گزارش شد.

۱-۳-۳-۲ تأثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

تأثیر فاکتور دما بر ضریب هدایت حرارتی توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است؛ به‌عنوان مثال داس و همکاران [۱۳] نانوسیال $CuO / water$ با اندازه ذرات ۲۸ نانومتر را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که برای کسر حجمی ۱ درصد مقدار ضریب K_{nf} از حدود ۶/۵ درصد نسبت به آب در دمای $21^\circ C$ به مقدار ۳۶ درصد در دمای $51^\circ C$ ارتقا یافت؛ یعنی حدود ۶ برابر افزایش با تغییر دما از

۲۱ °C به ۵۱ °C داده است. آن‌ها بر این باور بودند که این مقدار چشم‌گیر افزایش به دلیل شدت گرفتن حرکت براونی^۱ ذرات نانو سیال تحت تأثیر افزایش دمای سیال می‌باشد.

۱-۳-۳-۳ اثر اندازه نانوذرات

تأثیر اندازه ذرات بر انتقال حرارت توسط وانگ و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل شد که با کاهش قطر ذرات جامد پراکنده در سیال سطح تماس انتقال حرارت این ذرات افزایش یافته و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر خواهد شد (ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد). در بیشتر تحقیقات به خصوص در مواردی که سیال پایه آب و نانوذرات اکسید فلزات باشند همین نتیجه به دست آمده است. بک و همکاران [۱۵] بر روی نانوسیال $Al_2O_3 / water$ و در محدوده اندازه ۲ تا ۲۸۲ نانومتر تحقیق کردند و به این نتیجه رسیدند که نرخ افزایش ضریب K_{nf} در حدود ابعاد ۱۰ تا ۵۰ نانومتر بهترین حالت را داشته و در این محدوده افزایش انتقال حرارت بیشتر است. و بیان داشتند که این امر به دلیل پراکنده شدن بهتر ذرات با ابعاد ریزتر می‌تواند باشد. ولی برخلاف این نتایج برای اندازه ذرات کمتر از ۱۰ نانومتر روند ثبت شده برای تغییرات ضریب K_{nf} به شکل معکوس است. شیما و همکاران [۱۶] به بررسی نانوسیالات مغناطیسی در اندازه ذرات کمتر از ۱۰ نانومتر پرداختند؛ در بررسی آن‌ها مشاهده شد که با تغییر اندازه ذرات از ۲/۸ نانومتر به ۹/۵ نانومتر ضریب K_{nf} برخلاف انتظار افزایش یافت. آن‌ها اشاره داشتند که این افزایش می‌تواند به دلیل شکل‌گیری یک زنجیره از نانوذرات با انباشته شدن ذرات باشد، در واقع با کاهش بیش از حد اندازه ذرات با اینکه سطح تماس برای انتقال حرارت افزایش می‌یابد، اما با رسیدن ابعاد ذره به محدوده فونون‌ها^۲ در نانوسیال که خود وظیفه انتقال گرما را دارند، یک نوع مقاومت داخلی در سیال به وجود می‌آید که سطح آزاد فونون‌ها را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش در ضریب هدایت حرارتی خواهد شد.

^۱ Brownian motion

^۲ phonon

۱-۳-۴ تأثیر سیال پایه بر ضریب K_{nf}

اثر سیال پایه در تهیه نانوسیال به عنوان فاکتوری کاربردی و مهم توسط هاوانگ و همکاران [۱۷] بر روی نانوذرات CuO با اندازه ذرات ۳۵ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت؛ آن‌ها ابتدا با تهیه نانوسیال $CuO/water$ در یک کسر حجمی مشخص به میزان ۳ درصد افزایش در ضریب K_{nf} نسبت به آب ثبت کردند؛ سپس با تغییر سیال پایه به اتیلن گلیکول (EG) و تهیه نانوسیال با همان کسر حجمی به یک افزایش ۹ درصد در ضریب K_{nf} نسبت به سیال پایه دست یافتند. پاتل و همکاران [۱۸] نیز با تهیه نانوسیال $Al_2O_3/water$ با اندازه ذرات ۲۳/۶ نانومتر و کسر حجمی ۱ درصد و همچنین تهیه نانوسیال Al_2O_3/EG با همان کسر حجمی به بررسی این تفاوت انتقال حرارت پرداختند، و مشاهده شد که افزایش ضریب K_{nf} برای نانوسیال با آب ۶ درصد و برای نانوسیال با (EG) به مقدار ۸ درصد به دست آمد. اکثر محققان به همین نتیجه رسیده‌اند که به کار گرفتن (EG) به عنوان سیال پایه برای بهبود انتقال حرارت گزینه بهتری محسوب می‌شود، اما شرایط استفاده از این سیال به جای استفاده‌های فراوان آب باید بررسی شود. حالا با توجه به عوامل تأثیرگذاری که ذکر شد، چند نمونه از مدل‌هایی که برای تخمین مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده می‌شوند معرفی خواهد شد. از جمله آن‌ها مدل ماکسول [۱۹] را می‌توان نام برد؛ مدل ماکسول برای مخلوط مایع-جامد با اندازه ذرات نسبتاً بزرگ که دارای شکل کروی هستند در فرمول (۱-۴) ارائه شده است.

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + 2K_{bf} + 2\phi(K_p - K_{bf})}{K_p + 2K_{bf} - \phi(K_p - K_{bf})} \quad (۴-۱)$$

که در آن K_p رسانندگی گرمایی ذره، K_{bf} رسانندگی گرمایی سیال پایه و ϕ کسر حجمی نانوذرات پراکنده شده در سیال پایه می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد مدل ماکسول برای ذرات که کروی هستند پیش‌بینی شده است، برای اصلاح این روش پس از ماکسول، مدل همیلتون-کروسر [۲۰] برای پیش‌بینی

ضریب هدایت حرارتی سیال دوجزئی ارائه شد که علاوه بر تأثیر کسر حجمی، تأثیر شکل ذرات را هم مورد بررسی قرارداد. فرمول (۵-۱) نشان دهنده این مدل می باشد.

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)(K_{bf} - K_p)\phi}{K_p + (n-1)k_{bf} - (K_{bf} - K_p)\phi} \quad (5-1)$$

در این فرمول نیز که توسط همیلتون-کروسر ارائه شده است ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به شکل مدل ماکسول به دست می آید با این تفاوت که در این مدل $n = \frac{3}{D}$ معرف ضریب شکل می باشد که در آن D عبارت است از میزان کروی بودن ذرات و به صورت نسبت مساحت کره ای با حجم ذره به مساحت همان ذره غیر کروی تعریف می شود.

۱-۳-۴ ویسکوزیته نانوسیال

ویسکوزیته نانوسیال نیز مانند ضریب هدایت حرارتی به عوامل دیگری وابسته است؛ به طور مثال نوین و همکاران [۲۱] اثر اندازه ذرات را برای نانوسیال $Al_2O_3 / water$ با استفاده از ابعاد ۴۷ نانومتر و ۳۶ نانومتر مورد بررسی قراردادند و دریافتند که در کسر حجمی پایین، در ویسکوزیته تفاوتی بین این دو نمونه وجود ندارد اما در غلظت بالاتر با افزایش سایز نانوذرات، ویسکوزیته نانوسیال کاملاً افزایش می یابد. می توان گفت این روند افزایشی برای اکثر نانوسیال ها وجود دارد اما نامبورو و همکاران [۲۲] با بررسی نانوسیال $SiO_2 / water$ ادعا کردند که با افزایش سایز ذرات در این نانوسیال ویسکوزیته کاهش یافته است. ویسکوزیته نانوسیال توسط فاکتور دما نیز مورد بررسی های فراوانی قرار گرفته است؛ انتظار می رود با افزایش دما ویسکوزیته کاهش داشته باشد، که این امر به دلیل کاهش نیروی جاذبه بین مولکولی سیال و هم چنین سیال و ذرات جامد رخ می دهد. تاومن و همکاران [۲۳] در یک بررسی آزمایشگاهی بر روی نانوسیال $SiO_2 / water$ به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما از $22^\circ C$ به $60^\circ C$ در کسر حجمی ۴ درصد نانوذرات مقدار ویسکوزیته یک کاهش ۴۰ درصد

خواهد داشت. همچنین در بررسی دیگری بر روی نانوسیالات مغناطیسی تقریبی و همکاران [۲۴] با بررسی نانوسیال $Fe_3O_4/water$ به همین نتیجه رسیدند که با افزایش دما میزان کاهش ویسکوزیته کاملاً چشم‌گیر بود. در راستای بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات بر ویسکوزیته نانوسیال نیز تحقیقات زیادی وجود دارد، از جمله ویلیام و همکاران [۲۵] که بر روی نانوسیال $Al_2O_3/water$ آزمایش‌هایی انجام دادند و مشخص شد که در کسر حجمی ۳ درصد مقدار ۱۴/۷ درصد افزایش در ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) رخ داده است. همچنین تقریبی و همکاران پارامتر کسر حجمی را در نانوسیال $Fe_3O_4/water$ مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد با افزایش کسر حجمی، ویسکوزیته سیال طبق انتظار بالا می‌رود؛ این افزایش چشمگیر بوده و در بالاترین کسر حجمی (۳ درصد) به مقدار ۱۲۹/۷ درصد ویسکوزیته نانوسیال نسبت به آب افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگر لیجون وانگ و همکارانش [۲۶] با یک بررسی آزمایشگاهی بر روی ویسکوزیته نانوسیال Fe_3O_4 در آب تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی متفاوت با مقادیر (۰-۳۰۰) گوس (که در طول تمام آزمایش‌ها میدان قابل تنظیم بوده) و رنج دمایی ۲۹۳ کلوین تا ۳۳۳ کلوین بیان کردند که ویسکوزیته نانوسیال با افزایش شدت میدان مغناطیسی و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد و با افزایش دمای کاری ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

در بررسی دیگری محمد امانی [۲۷] و همکاران ویسکوزیته نانوسیال منگنز و آب ($MnFe_2O_4/water$) را به صورت آزمایشگاهی در حضور میدان مغناطیسی و در غیاب آن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با اعمال میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ گوس بر نانوسیال با کسر حجمی از ۰/۴۵ تا ۳ درصد حجمی در محدوده دمایی از ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد به این نتایج دست یافتند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد که این افزایش هم در حضور میدان و هم در غیاب آن رخ می‌دهد. همچنین بیان کردند که با افزایش دما یک نرخ کاهشی برای ویسکوزیته مشاهده شده است. به طوری که در این آزمایش خاص در دمای ۲۰ درجه و بدون اعمال میدان و در کسر حجمی ۳ درصد بیشترین

نسبت ویسکوزیته نسبت به سیال پایه ۱/۱۴ گزارش شده است؛ و این نسبت با اعمال میدان ۴۰۰ گوس، به بیشترین مقدار خود ۱/۷۵ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. عبدالله الراشد و همکاران [۲۸] بر روی خواص ترموفیزیکی نانوسیال کربن نانوتیوب-کربوکسلیک اسید بررسی انجام دادند؛ آنها با استفاده از شبیه سازی الگوریتم شبکه عصبی به بررسی میزان دقت پیش بینی خواص نانوسیال نسبت به داده های آزمایشگاهی پرداختند و مشاهده کردند که در اکثر موارد مدل‌های تئوری پیش بینی خوبی از خواص نانوسیال می‌دهند. کریم پور و همکاران [۲۹] در بررسی دیگری بر روی خواص نانوسیال با نانوذرات اکسید مس (با پوشش اکسید سلیس) در سیال پایه آب-اتیلن گلیکول تحقیق انجام دادند؛ بررسی در ۴ دمای کاری سیال (۷۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰) درجه سانتی‌گراد انجام گرفته و خواصی از جمله چگالی و هدایت الکتریکی و ویسکوزیته بررسی شده است؛ آنها مشاهده کردند که در تمامی موارد طبق انتظار با افزایش دما، چگالی سیال کاهش داشته است، در بالاترین دما (۷۵ °C) ماکسیمم مقدار هدایت الکتریکی بدست آمده و در پایین ترین دما (۳۰ °C) بیشترین مقدار ویسکوزیته برای سیال بدست خواهد آمد. خدابنده و صفایی و همکاران [۳۰] بر روی تاثیر کسر حجمی نانوسیال گرافن-آب و شکل هندسی سطح مقطع لوله مبدل حرارتی بر بهبود انتقال حرارت تحقیقی انجام دادند؛ بررسی ها در کسر حجمی ۰/۰۲، ۰/۰۶، ۰/۱ درصد و با استفاده از لوله با سطح مقطع گوشه دار (شکسته و زاویه دار) و منحنی شکل (بیضوی) انجام گرفته است. آنها مشاهده کردند که در دبی های پایین سیال، تغییرات عدد ناسلت به شکل هندسی سطح مقطع لوله وابسته نیست و به طور کلی در لوله با سطح مقطع زاویه دار نسبت به هندسه های منحنی شکل لوله افت فشارها بالاتر است. هم چنین افت فشارها با افزایش کسر حجمی بیشتر شده است.

۱-۴ معرفی نانوفروسیال

نانوفروسیالات نسبت به نانوسیالات غیر فریت از خصوصیات منحصر به فردی برخوردارند که مهم‌ترین آن علاوه بر دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالاتر، تأثیرپذیری از میدان مغناطیسی خارجی می‌باشد. تنها مشکلی که در ساخت نانوسیالات مغناطیسی وجود دارد، پایدار کردن سوسپانسیون است. البته اصل پایداری سوسپانسیون در تمامی نانوسیالات مطرح می‌شود، اما در مواد فرومغناطیس به دلیل وجود نیروی لوندن-واندروالس^۱ بین ذرات و نیروی مغناطیسی یک تجمع و انباشتگی اجباری روی می‌دهد که موجب ناپایداری محلول می‌شود؛ بنابراین علاوه بر تکنیک‌های پایدارسازی در همه نانوسیالات، در این موارد راه‌هایی پیشنهاد می‌شود از جمله پوشش یک سورفکتانت پلیمری روی نانوذرات که موجب خنثی شدن نیروی واندروالسی می‌شود و یا روش شکستن ذرات و جلوگیری از توده شدن (التراسونیک) و ... ؛ که انتخاب هر کدام از این روش‌ها بستگی به جنس سیال پایه در محلول و نحوه به کارگیری نانوسیال دارد [۵]. در صورتی که نانوسیال از یک میدان مغناطیسی خارجی تأثیر نگیرد مانند نانوسیالات دیگر بر انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد و ضریب هدایت حرارتی وابسته به همان فاکتورهای ذکر شده خواهد بود، اما اعمال میدان مغناطیسی خارجی فاکتوری بسیار مهم و تأثیرگذار در ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مغناطیسی به شمار می‌رود که محققین زیادی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند.

۱-۵ کاربرد نانوفروسیال در مبدل‌های حرارتی

ریچلر و همکاران [۳۱] با روشی خاص به بررسی میزان انتقال حرارت نانوسیال مغناطیسی پرداختند، بررسی در دو حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی و در حضور میدان و با نظر گرفتن راستای میدان

^۱ London-van der waals

و گرادیان دما صورت گرفت. آن‌ها به‌جای استفاده از تکنیک سیم داغ از صفحه داغ در آزمایش خود استفاده کردند، با این کار آن‌ها توانستند هم مؤلفه‌های موازی شار حرارتی و میدان مغناطیسی و هم مؤلفه‌های عمود بر هم این دو پارامتر را در راستای بهبود انتقال حرارت بررسی کنند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که نتایج تجربی آزمایشگاهی با داده‌های عددی موجود مورد تأیید است. در بررسی دیگری لی و همکاران [۳۲] تحقیقی برای مشخص کردن تأثیر راستا و قدرت میدان مغناطیسی بر بهبود انتقال حرارت نانوسیال مغناطیسی انجام دادند و مشخص شد که با اعمال میدان مغناطیسی در راستای عمود بر شار حرارتی میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی مقدار بسیار کمی دارد و می‌توان گفت تأثیر ناچیز است؛ اما در صورتی که میدان در راستای موازی با شار حرارتی اعمال شود، میزان افزایش در هدایت حرارتی و در نتیجه انتقال حرارت چشمگیر بوده و این افزایش با قدرت میدان مغناطیسی یک رابطه مستقیم دارد. دلیل این افزایش انتقال حرارت خود به‌عنوان موضوعی مهم توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مکانیزم‌های انتقال حرارت در واقع حرکت براوانی ذرات جامد درون سیال پایه می‌باشد، حرکت براوانی به حرکت‌های ناخواسته و بدون جهت‌گیری خاص ذرات در یک سوسپانسیون گفته می‌شود که در همه نانوسیالات وجود دارد و به‌عنوان ابتدایی‌ترین مکانیزم افزایش انتقال حرارت برای توجیه استفاده از نانوسیال معرفی می‌شود. اما پس از آزمایش‌ها فراوان مشخص شد که برای نانوسیالات مغناطیسی مکانیزم اصلی افزایش انتقال حرارت به‌جای حرکت براوانی ذرات در واقع شکل‌گیری ساختار زنجیروار ذرات می‌باشد که باعث ایجاد یک مسیر انتقال حرارت می‌شود [۳۳]. بیشاب و همکاران [۳۴] عکس‌العمل‌های مختلف نانوذرات مغناطیسی را که به‌صورت یک چینش خودکار ذرات (به خاطر ابعاد ریز آن‌ها) در سیال بود مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها نشان دادند که حتی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی این شکل‌گیری چینش زنجیره‌ای رخ می‌دهد ولی زمانی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود شکل‌گیری آرایش ذرات به‌صورت پراکنده و همگن در سیال رخ می‌دهد که موجب افزایش هدایت حرارتی همگن در نانوسیال می‌شود. هنگ و همکاران

[۳۵] بر روی تأثیر تجمع نانوذرات مغناطیسی در نانوسیال با پایه اتیلن گلیکول و ذرات آهن بررسی انجام دادند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در غیاب میدان مغناطیسی در راستای بررسی پایداری نانوسیال، افزایش هدایت حرارتی می‌تواند به صورت تابعی از زمان استفاده از دستگاه التراسونیک معرفی شود. در این آزمایش گزارش شد که با افزایش زمان ارتعاش التراسونیک هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. در بررسی آن‌ها ته‌نشینی ذرات هم تحت نظر گرفته شد و مشخص شد که طبق انتظار پس از گذشت زمان بر اثر تجمع نانوذرات ته‌نشینی بیشتر شده و این امر تأثیر مستقیم بر هدایت حرارتی نانوسیال دارد؛ به همین دلیل با گذشت زمان هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. گوهرخواه و همکاران [۳۶] بر روی نانوسیال $Fe_3O_4/water$ تحت میدان مغناطیسی ثابت و متغیر بررسی انجام دادند؛ آن‌ها بر روی یک مبدل صفحه-لوله با یک لوله آلومینیم تحقیق کردند که در طول منطقه آزمایش در ۲۰ نقطه روی سطح آن دما ثبت شد و در محدوده رینولدز جریان ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ اثر میدان‌های ثابت و متغیر مورد بررسی قرار گرفت؛ در این تحقیق گزارش شد که در رینولدز ۱۲۰۰ و کسر حجمی ۲ درصد و اعمال میدان مغناطیسی متغیر بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت ۳۱/۴ درصد نسبت به آب بوده است. گوهرخواه و همکاران [۳۷] هم‌چنین در بررسی دیگری اثر اعمال میدان مغناطیسی روی نانوسیال $Fe_3O_4/water$ برای افزایش انتقال حرارت نسبت به آب را بین دو صفحه مسی موازی مورد بررسی قرار دادند؛ در این آزمایش آن‌ها اثر اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر را بر نانوسیال $Fe_3O_4/water$ بین دو صفحه مسی (کانال) تحت محدوده رینولدز ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ بررسی کردند. نحوه اعمال میدان مغناطیسی به همان شکل آزمایش روی لوله مسی بوده است و در این حالت گزارش شد که در بیشترین افزایش انتقال حرارت در کسر حجمی ۲ درصد، در غیاب میدان مقدار ۱۶/۴ درصد افزایش وجود دارد، با اعمال میدان مغناطیسی ثابت این مقدار به ۲۴/۹ درصد خواهد رسید و با به‌کارگیری میدان متغیر با فرکانس ۱۰ هرتز در جریان با رینولدز ۱۲۰۰ میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به آب ۳۷/۳ درصد خواهد شد. بهیرایی و همکاران [۳۸] تأثیر یک میدان مغناطیسی ۴ طرفه بر روی نانوسیال با پایه آب و ذرات

مغناطیسی Mn-Zn را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند؛ در این تحقیق نانوسیال به عنوان سیال خنک کن در یک مبدل دولوله جریان دارد و آب گرم که در لوله خارجی جریان داشت را خنک می کند. بعد از مدل سازی نتایج به این صورت بود که افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش سایز ذرات نانو و افزایش قدرت میدان مغناطیسی باعث افزایش افت فشار و هم چنین افزایش انتقال حرارت می شود؛ که در این حالت باید حالت بهینه افت فشار و بهبود انتقال حرارت را به دست آورد. ونسل و همکاران [۳۹] طی یک بررسی اثر میدان مغناطیسی خارجی روی نانوسیال مغناطیسی اشاره داشتند که بهبود انتقال حرارت در حضور میدان مغناطیسی در بیشترین حالت نسبت به زمانی که میدان مغناطیسی وجود ندارد ۳۵ درصد رشد داشته است. شیما و فیلیپ [۴۰] بر روی انتقال حرارت دو نانوسیال با پایه نانوکربنی تحقیقی انجام دادند آن ها بیان کردند که در غلظت های بالای نانوسیال با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش انتقال حرارت کاملاً مشاهده می شود و برای میدان مغناطیسی ۳۷۸ گوسی و در حالتی که راستای میدان موازی با شار حرارتی می باشد، بیشترین افزایش ۱۲۵ درصد در انتقال حرارت ثبت شده است. در یک بررسی آزمایشگاهی امیر و همکاران [۴۱] بر روی انتقال حرارت نانوسیالات $CoFe_2O_4$ و Fe_3O_4 در آب و با اعمال میدان مغناطیسی خارجی بررسی انجام دادند؛ این آزمایش ها در کسر حجمی ۰ تا ۴ درصد و شدت میدان مغناطیسی ۰ تا ۵۰۰ گوس انجام گرفته است و نتایج به این شکل بود که با افزایش کسر حجمی و شدت میدان میزان افزایش انتقال حرارت بیشتر خواهد شد.

۱-۶ روش های همزمان ایجاد تغییرات فیزیکی در مبدل و به کارگیری نانوسیال

با توجه به این که علاوه بر استفاده از نانوسیال روش های فیزیکی دیگری نیز برای افزایش بیشتر انتقال حرارت وجود دارد، محققین زیادی با به کارگیری روش های کنترل غیر فعال به بررسی افزایش انتقال حرارت

پرداخته‌اند؛ روش‌هایی از جمله ایجاد محیط متخلخل^۱ برای عبور سیال، به وجود آوردن اغتشاش با اضافه کردن موافعی در مسیر عبور سیال، ایجاد تغییر در هندسه سطح تماس و ... از دیگر کارهای انجام‌گرفته می‌توان به بررسی مبدل دو لوله سینوسی توسط ولی‌الله موسوی و همکاران [۴۲] اشاره کرد؛ در بررسی آن‌ها نانوسیال Fe_3O_4 با کسر حجمی ۴ درصد به‌عنوان سیال دمابالا داخل لوله درونی که شکل دیواره آن حالت سینوسی دارد جریان یافته و هوا به‌عنوان سیال خنک‌کن در اطراف این لوله و داخل لوله احاطه‌کننده به‌صورت جریان مخالف در جریان است. نتایج تحقیق آن‌ها به این شکل بود که به‌کارگیری لوله داخلی به شکل سینوسی تأثیر بسیار بالایی در بهبود انتقال حرارت داشته و موجب افزایش چشم‌گیر عدد ناسلت در این بررسی شده است. هم‌چنین در یک تحقیق آزمایشگاهی توسط خوش وقت علی‌آبادی [۴۳] تأثیر اضافه کردن زائده‌هایی به‌عنوان گردابه‌ساز بر روی عملکرد مبدل صفحه‌ای فین دار، مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی بر روی نانوسیال CuO/Water انجام گرفت و نتایج نشان داد در حالتی که از کانال دارای گردابه‌ساز به‌جای کانال صاف استفاده شده افزایش چشم‌گیری در انتقال حرارت رخ داده است. هم‌چنین در مقایسه‌ای که انجام گرفت مشخص شد که تأثیر ایجاد گردابه‌ساز بسیار بالاتر از تأثیرگذاری نانوسیال بوده و استفاده هم‌زمان این دو فاکتور موجب افزایش بیش‌ازپیش در انتقال حرارت خواهد شد. در جدیدترین بررسی‌ها حسینیان و همکاران [۴۴] تغییرات انتقال حرارت مبدل حرارتی را در اثر ارتعاش در سطح لوله برای مبدل حرارتی دولوله مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی آن‌ها نانوسیال MWCNT/Water که دارای نانوذرات پایه کربنی می‌باشد را بررسی کردند. نتایج به این صورت بود که ارتعاش سطح لوله تأثیر بسیار چشم‌گیری در افزایش انتقال حرارت داشته است. هم‌چنین مشخص شده که با افزایش قدرت ارتعاش نرخ افزایش انتقال حرارت بیشتر می‌شود.

^۱ porous media

۷-۱ جمع‌بندی و ارائه نوآوری در طرح پیشنهادی

با توجه به تمامی کارهای انجام‌شده در راستای افزایش انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی، مشخص شد که استفاده از نانوفروسیالات و اعمال میدان مغناطیسی بر روی آن‌ها یکی از بهترین گزینه‌ها به شمار می‌رود. هم‌چنین از کارهای پیشین این موضوع برداشت می‌شود که ایجاد تغییر در هندسه مبدل حرارتی و افزایش سطح انتقال حرارت عامل بسیار مهمی در بهبود عملکرد مبدل حرارتی می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق تصمیم بر این است که انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن در سیال پایه آب در لوله با خم یوشکل مورد بررسی قرار گیرد. این تحقیق به صورت آزمایشگاهی انجام‌گرفته و تأثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی نیز در تغییرات انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته است. هم‌چنین در هندسه شکل دو لوله با شعاع انحنای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته تا تأثیر تغییرات عدد دین نیز بررسی شود.

فصل دوم

تجهيزات آزمایشگاهی

و روش انجام آزمایش

در این فصل ابتدا تمامی تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی شده سپس نحوه انجام آزمایش‌ها و ثبت اطلاعات توسط این تجهیزات توضیح داده شده است.

۱-۲ تجهیزات آزمایشگاهی

۱-۱-۲ لوله مسی

در این آزمایش از لوله مسی با قطر خارجی ۱۶ mm و ضخامت ۰/۵ mm استفاده شده است؛ همان‌طور که در شکل (۱-۲) مشخص است لوله مورد بررسی تحت خم یوشکل قرار گرفته است. در پنج نقطه روی لوله دمای سطح و دمای بالک سیال توسط ترموکوپل اندازه‌گیری خواهد شد. در شکل مشخص است که برای ایجاد امکان وارد کردن ترموکوپل به داخل لوله در پنج نقطه مدنظر بوشن‌هایی تعبیه شده که لوله از لحاظ آب‌بندی دچار مشکل نشود.



شکل (۱-۲) لوله مسی تعبیه شده به صورت خم یوشکل

پنج نقطه مورد بررسی در لوله مسی مشخص شده دارای فواصل برابر می‌باشند و لوله مسی در دو شعاع متفاوت ۱۰ cm و ۲۰ cm خم داده شده است.

۲-۱-۲ ترموکوپل تیپ K

در تمامی این آزمایش‌ها از ترموکوپل سری K با دقت 0.1°C استفاده شده است. تعداد ۱۲ ترموکوپل به کاررفته به طوری که اشاره شد در پنج نقطه از لوله دمای سطح لوله و دمای بالک سیال هم‌زمان توسط ترموکوپل‌ها اندازه‌گیری شده است و دو ترموکوپل هم برای ثبت دمای ورودی و خروجی ناحیه تست به کار گرفته شده است. شکل (۲-۲) نشان‌دهنده نوع ترموکوپل تماسی سری K می‌باشد



شکل (۲-۲) ترموکوپل سری K

ترموکوپل‌ها دارای تبدیل سوکت دار برای اتصال به دیتالاگر می‌باشند.

۲-۱-۳ وسیله ثبت دما

جهت ثبت دماهای اندازه‌گیری شده از دیتالاگر لوترون^۱ که شامل ۱۲ کانال بوده، استفاده شده است؛ این دیتالاگر امکان تنظیم در پالس‌های زمانی برای دیتابرداری را داشته و با تنظیم موردنظر در هر پنج ثانیه دماها ثبت شده است. شکل (۳-۲) نمایی از دیتالاگر را نشان می‌دهد.

^۱ Lotron Temperature Recorder



شکل (۲-۳) دیتالاگر دما مدل ۱۲ کاناله لوترون

لازم به ذکر است ترموکوپل سری K که مورد استفاده قرار گرفت با این دیتالاگر همخوانی داشته و تمامی ترموکوپل‌ها با دقت 0.1°C کالیبره شده‌اند و این دماها با یک دماسنج دیجیتال جداگانه بررسی شده و دقت 0.1°C تأیید شده است.

۴-۱-۲ هیتر الکتریکی

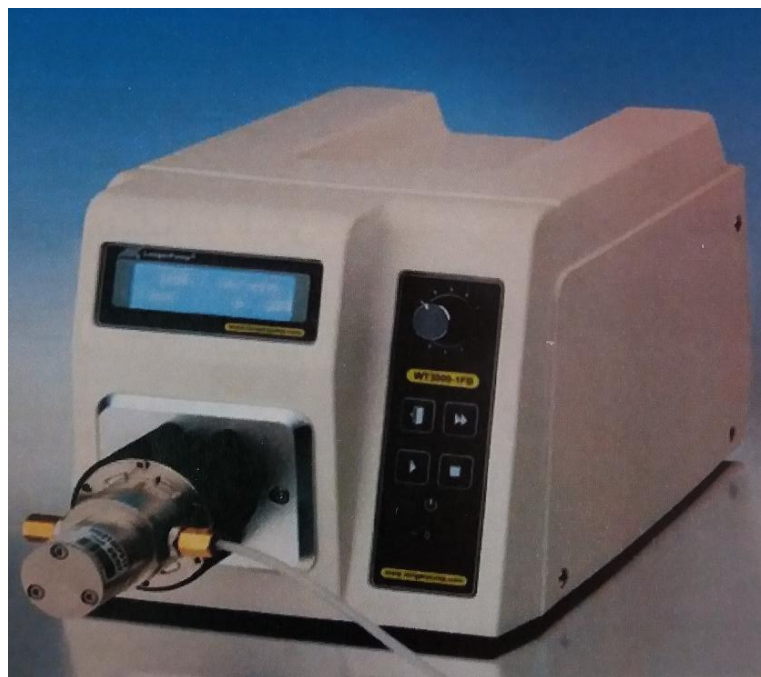
برای اعمال شار حرارتی از هیتر الکتریکی از جنس آلیاژ کروم-نیکل استفاده شده است. روی سیم حامل جریان الکتریکی نوعی دانه‌های سرامیکی جهت ایجاد عایق الکتریکی استفاده می‌شود. شکل (۲-۴) نشان‌دهنده این مدل از هیتر الکتریکی می‌باشد.



شکل (۴-۲) نمایی از هیتر الکتریکی و نحوه قرار گرفتن آن روی لوله

۵-۱-۲ پمپ دنده‌ای

پمپ مورد استفاده در این تحقیق پمپ دنده‌ای بوده است. این پمپ توانایی ایجاد دبی‌هایی متفاوت از 170 (ml/min) تا 1714 (ml/min) را دارد. شکل (۵-۲) نشان‌دهنده پمپ دنده‌ای می‌باشد.



شکل (۵-۲) نمایی از پمپ دنده‌ای

۲-۱-۶ دستگاه ثبت افت فشار

افت فشار در این آزمایش‌ها توسط ترانسمیتر فشار^۱ از نوع Rosemount 3051 اندازه‌گیری شده است؛ شکل (۲-۶) این مدل از دستگاه را نشان می‌دهد. این دستگاه به صورت دیجیتال افت فشار را بین دو نقطه اندازه‌گیری می‌کند. در ابتدا و انتهای خم لوله تحت بررسی دو انشعاب فرعی داشته که به این دستگاه متصل شده و افت فشار طی مسیر خم یوشکل لوله بررسی شده است.



شکل (۲-۶) ترانسمیتر فشار رزمونت مدل ۳۰۵۱

۲-۱-۷ دستگاه التراسونیک

دستگاه هموژنایزر التراسونیک وسیله‌ای برای همگن‌سازی نانوسیال می‌باشد؛ در این دستگاه جریان الکتریکی به ارتعاشات مکانیکی تبدیل شده و با ایجاد ارتعاشات مافوق صوت باعث تشکیل کاپیتاسیون در

^۱ Pressure Transmitter

سیال خواهد شد، حباب‌های ایجاد شده در سیال پس از ترکیدن باعث ایجاد نیروی زیادی می‌شود که برای شکستن پیوندهای مولکولی به کار می‌رود و مانع از تشکیل توده‌های بزرگ‌تر در سیال می‌شود. از این رو برای پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه و ایجاد یک سوسپانسیون پایدار از این دستگاه استفاده می‌شود. شکل (۷-۲) دستگاه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مدل دستگاه از نوع PNC Q700 است که دارای حداکثر توان ۷۰۰ وات، ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت می‌باشد.



شکل (۷-۲) دستگاه همگن‌ساز التراسونیک

۸-۱-۲ نانوپودر اکسید آهن

در آزمایش‌ها سیال پایه مورد استفاده آب بوده و از نانوذرات Fe_3O_4 در دو کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد استفاده شده است. نانوپودر مورد استفاده (اکسید آهن) دارای خلوص ۹۹/۵ درصد می‌باشد. تولید این نانوپودر در هوستون آمریکا بوده و خصوصیات بیشتر نانوذرات در جدول (۲-۲) مشخص شده است.

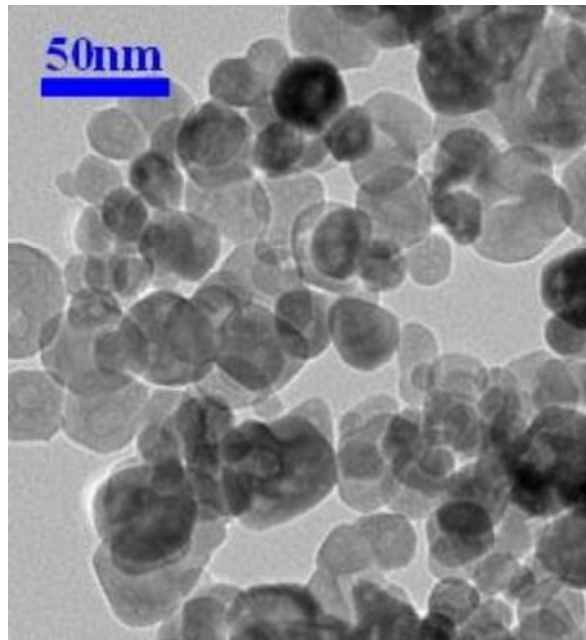
جدول (۱-۲) مشخصات نانوپودر اکسید آهن

چگالی	اندازه ذرات	شکل ذرات	نوع
5.1 (gr/cm ³)	(10-20) nm	کرولی	Fe ₃ O ₄

در این تحقیق در دو کسر حجمی متفاوت نانوسیال تهیه شده است و در هر مرحله بشر حاوی ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر بوده (به دلیل پایدار شدن بهتر نانوسیال حجم پایین تر از آن در طی چند مرحله آمده شده و سپس با هم مخلوط شده اند) و مقادیر پودر مورد نیاز با توجه به چگالی نانوپودر محاسبه شده و به آب اضافه شده اند. در شکل (۸-۲) تصویری از نانوپودر هنگام اضافه کردن به سیال و تصویر TEM ذرات مشاهده می شود.



(الف)

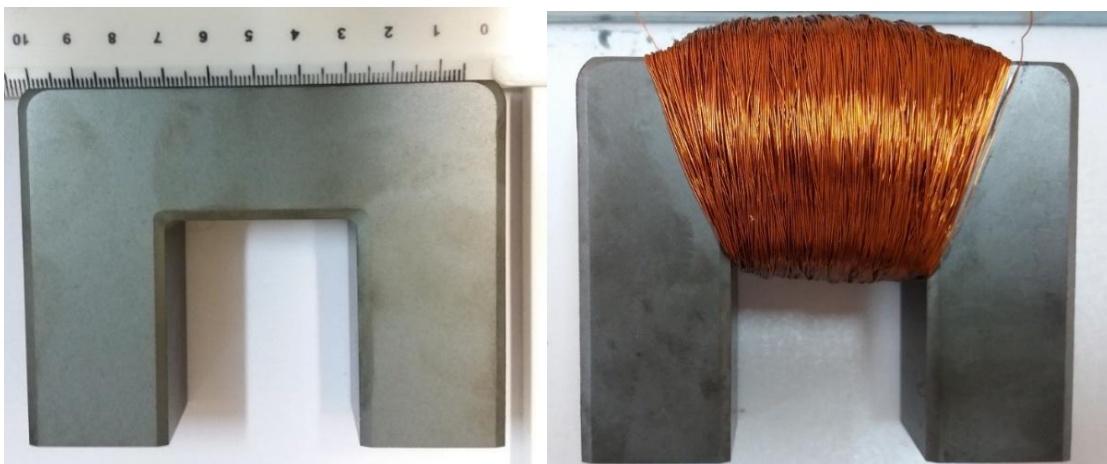


(ب)

شکل (۸-۲) (الف) نانوپودر قبل از اضافه شدن به سیال و (ب) تصویر TEM تهیه شده از نانوذرات اکسید آهن

۹-۱-۲ هسته فریت

تولید میدان مغناطیسی به کمک هسته فریت انجام گرفته است؛ شکل (۹-۲) نشان دهنده هسته فریت بدون سیم‌پیچی و هسته سیم‌پیچی شده و آماده می‌باشد.



شکل (۹-۲) هسته فریت تهیه شده بدون سیم‌پیچی و سیم‌پیچی شده

۱۰-۱-۲ منبع تغذیه

برای اعمال ولتاژ DC و AC به سیستم ایجاد میدان مغناطیسی از اینورتر مدل LC iC5 به عنوان واسطه بین برق شهری و الکترومگنت^۱ ها استفاده شده است، این دستگاه خاصیت تنظیم ولتاژ و فرکانس اعمالی را دارا می باشد به طوری که این امکان برای ایجاد هر مقدار جریان عبوری با فرکانس های ۱ تا ۴۰۰ هرتز از الکترومگنت ها وجود دارد. شکل (۱۰-۲) نشان دهنده اینورتر می باشد.



شکل (۱۰-۲) نمایی از اینورتر مدل LC iC5

۱۱-۱-۲ تسلامتر (اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی)

برای اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی در این بررسی از تسلامتر مشخص شده در شکل (۱۱-۲) استفاده شده است. برای اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی اعمالی بر نانوسیال پراب دستگاه تسلامتر را داخل لوله مسی و در وسط لوله تنظیم کرده و پس از ایجاد عایقی همانند عایق روی لوله آزمایش، الکترومگنتها روی لوله قرار داده می شوند میزان شدت میدان مغناطیسی در وسط لوله سنجیده می شود.

^۱ Electromagnet



شکل (۱۱-۲) نمایی از تسلامتر مورد استفاده

۲-۲ آماده سازی نانوسیال

در این آزمایش با استفاده از روش تهیه دو مرحله ای برای آماده سازی نانوسیال پس از اضافه کردن مقادیر لازم از نانوپودر به سیال پایه آب به نسبت مورد نیاز برای دستیابی به کسر حجمی مطلوب، برای ایجاد محیط اسیدی طبق آنچه در فصل اول توضیح داده شد به میزان ۱ درصد جرمی استیک اسید به محلول اضافه شده و پس از آن محلول به مدت ۳۰ دقیقه زیر دستگاه التراسونیک با قدرت ۲۵۰ وات قرار گرفت و در این حالت سوسپانسیون به حالت پایدار تبدیل شد و پس از گذشت ده روز مقادیر کمی از ته نشینی مشاهده شد؛ البته این مدت زمان و قدرت اعمالی برای دستگاه پس از بارها تکرار به دست آمده است که جدول (۲-۲) بخشی از موارد آزمایش شده برای به دست آوردن حالت پایدار را نشان می دهد.

جدول (۲-۲) آزمایش‌ها انجام‌گرفته جهت تهیه نانوسیال در حالت پایدار با افزودنی استیک اسید ۱ درصد جرمی

درصد کسر حجمی نانوسیال	مدت زمان فرارگیری در التراسونیک	حالت پایداری
۰/۲	۱٫۵ ساعت	ناپایدار
۰/۲	۱ ساعت	پایداری کم (پس از گذشت ۳ ساعت ته‌نشینی با چشم قابل مشاهده)
۰/۲	۳۰ دقیقه	پایدار
۰/۴	۳۵	پایدار

برای تهیه نانوسیال با کسر حجمی ۰/۴ درصد، قدرت دستگاه روی ۳۰۰ وات تنظیم شده است. شکل

(۲-۱۱) نمایی از محلول که در حالت پایدار تهیه‌شده، دو روز بعد از آماده‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۲) نمایی از محلول تهیه‌شده دو روز بعد از ساخت

۳-۲ ایجاد میدان مغناطیسی

برای تولید میدان مغناطیسی روی لوله آزمایش و اعمال بر نانوسیال، همان طور که اشاره شد از نوعی هسته فریت استفاده شده است؛ هسته‌های فریت از هیدروکسید آهن ساخته شده‌اند و به خاطر خاصیت اشباع مغناطیسی بالایی که دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از این هسته‌های فریت و مقادیر مشخص از سیم لاک‌ی شماره ۰/۳۰ دو آهنربای متغیر ساخته شده است، به طوری که به دور هرکدام از هسته‌ها ۲۵۰۰ دور سیم لاک‌ی پیچیده شده است و زمانی که جریان الکتریکی از داخل سیم گذر می‌کند باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف دو پایه هسته خواهد شد و در نوک هسته شدت میدان بسیار بالاتر بوده که با فاصله گرفتن از آن میدان تضعیف می‌شود. حال اگر جریان عبوری از سیم از یک منبع ولتاژ AC تولید شده باشد یک آهنربای متغیر با فرکانس خود منبع ایجاد می‌شود و اگر جریان DC وجود داشته باشد یک آهنربای دائم ایجاد خواهد شد.

۴-۲ معرفی دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایش

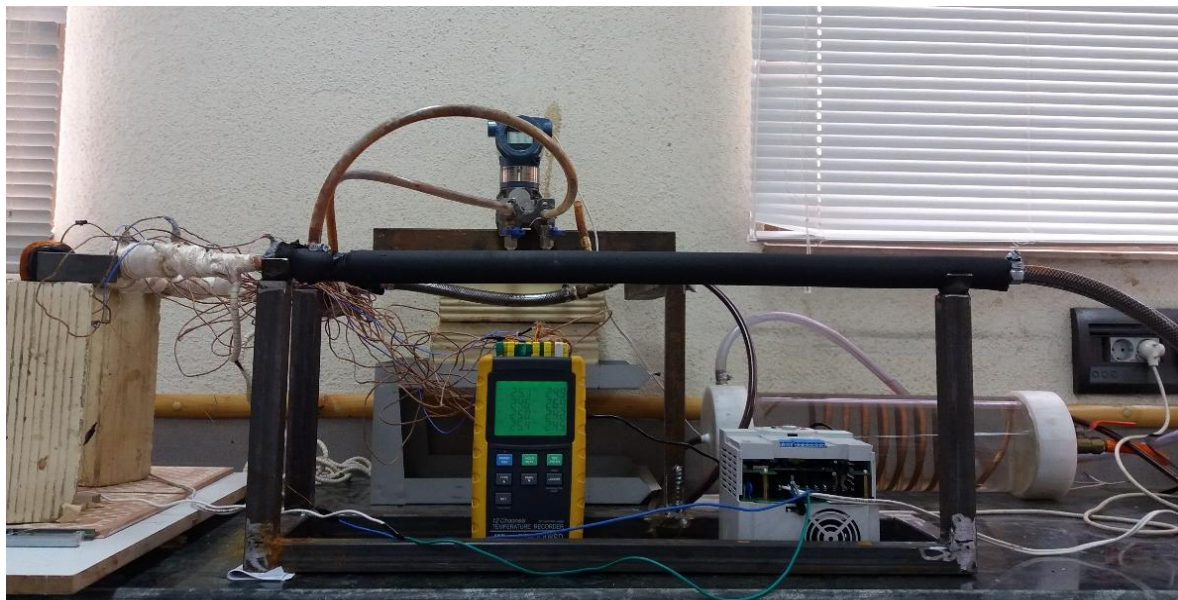
۱-۴-۲ تصاویر سیستم آزمایشگاهی

نمای کلی از سیستم بسته شده جهت انجام آزمایش‌ها در شکل (۲-۱۳) و نحوه اعمال میدان مغناطیسی در شکل (۲-۱۴) نمایش داده شده است. در هر دو لوله‌ای که تحت بررسی قرار گرفته برای ایجاد جریان توسعه یافته حرارتی و هیدرودینامیکی در قسمت قبل از ورودی ناحیه تست با توجه به اطلاعات و محاسبات انجام شده بنا به معادلات حاکم در کتاب انتقال حرارت بیژن [۴۵] طول توسعه یافته طبق فرمول (۲-۱) به دست آمده، به طوری که طول توسعه یافته در بیشترین عدد رینولدز (۹۳۰) حدود ۰/۶ متر محاسبه شد و در انجام آزمایش‌ها برای اطمینان طول ورودی ۰/۸ متر در نظر گرفته شده است.

$$x/d = 0.05Re$$

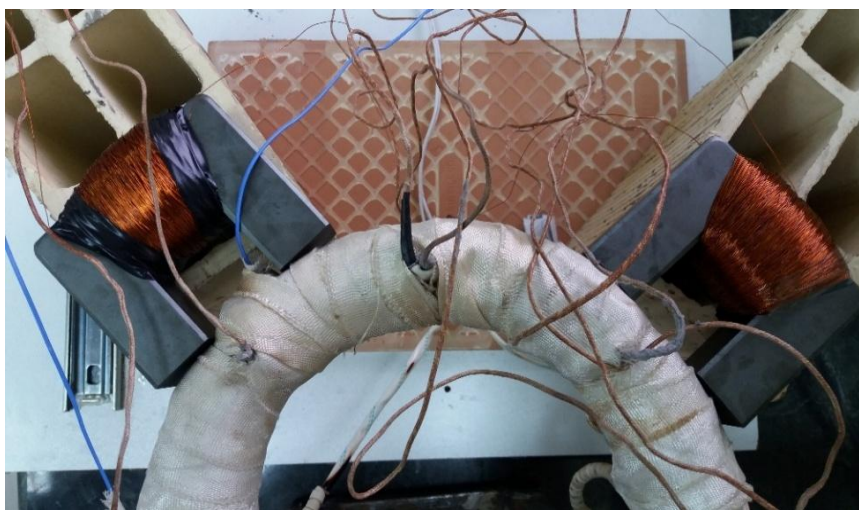
(۲-۱)

که در این فرمول x طول مورد نیاز برای توسعه یافتگی جریان، d قطر داخلی لوله مسی و Re عدد رینولدز مربوط به جریان عبوری سیال میباشد.



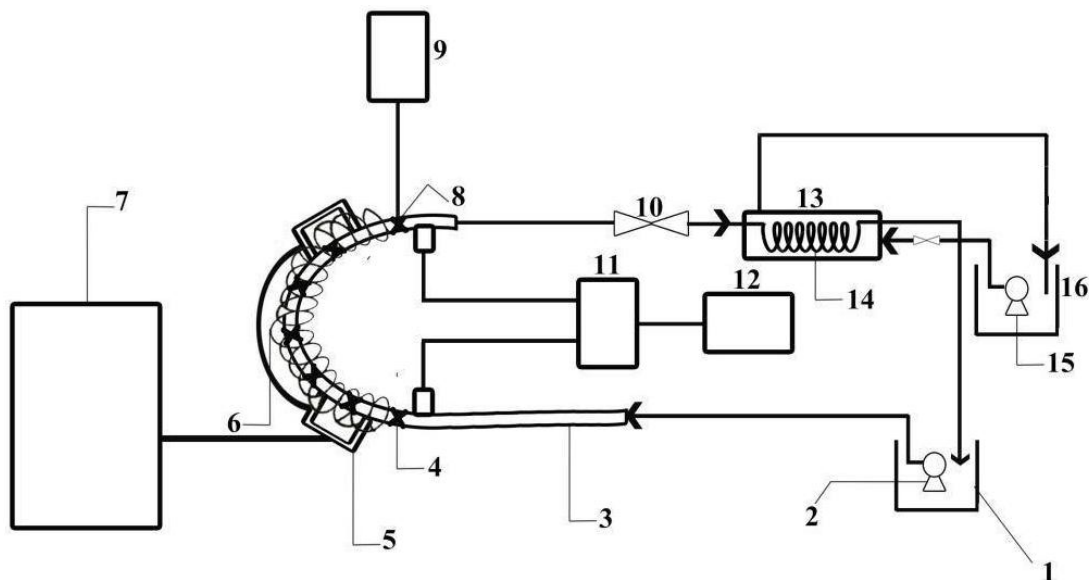
شکل (۲-۱۳) نمایی از سیستم آماده شده تحت بررسی

برای نشان دادن نحوه اعمال میدان مغناطیسی توسط الکترومگنت ها بر روی لوله آزمایش شکل (۲-۱۴) نمای بالایی از قسمت خم لوله تحت بررسی را نمایش می دهد.



شکل (۲-۱۴) نحوه قرارگیری الکترومگنت ها روی لوله

برای بهتر مشخص شدن پارامترهای تشکیل دهنده سیستم آزمایشگاهی و نحوه اتصال و ارتباط اجزا با یکدیگر شماتیکی از سیستم در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۵) شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| ۹- دیتا لاگر دما | ۱- مخزن حاوی سیال فعال |
| ۱۰- شیر هواگیری سیستم | ۲- پمپ دنده‌ای |
| ۱۱- ترانسیمتر فشار | ۳- لوله مسی |
| ۱۲- رایانه | ۴- ترموکوپل برای دمای ورودی سیال |
| ۱۳- محفظه بسته حول کویل خنک‌کن | ۵- الکترومگنت |
| ۱۴- کویل لوله مسی | ۶- هیتر الکتریکی |
| ۱۵- پمپ کولر برای پمپاژ آب یخ | ۷- اینورتر |
| ۱۶- مخزن حاوی آب و یخ | ۸- ترموکوپل برای دمای خروجی سیال |

۲-۴-۲ روش انجام آزمایش

پس از آماده سازی نانوسیال طبق آنچه توضیح داده شد، در هر مرحله از تست برای ایجاد دبی جریان مورد نظر به کمک پمپ دنده ای سیال مکش شده و به داخل لوله مسی پمپ می شود. پس از طی کردن مسیر توسعه یافتگی هیدرودینامیکی دمای ورودی سیال قبل از ورود به ناحیه خم لوله در ابتدای مسیر ثبت می شود که این در تمامی مدت زمان تست ثابت نگه داشته می شود و هم چنین دمای ورودی برای کلیه حالت ها ثابت بوده و دمای $16/5^{\circ}\text{C}$ دمای ورودی می باشد. قسمت خم لوله که ناحیه تحت بررسی در این آزمایش می باشد توسط هیتر الکتریکی به صورت یکنواخت پوشانده شده است و برای جلوگیری از اتلاف حرارتی بر روی این هیتر نوعی پارچه نسوز به عنوان عایق پیچیده شده است؛ در قسمت های صاف لوله آزمایش که تحت اعمال شار حرارتی نبوده اند برای جلوگیری از تأثیرات عوامل محیطی از عایق الاستومری بر روی لوله استفاده شده است. دمای سیال در قسمت خم یوشکل در پنج نقطه از لوله با فواصل برابر به عنوان دمای بالک سیال ثبت شده است، برای جایگذاری ترموکوپل های داخل سیال بسیار دقیق عمل شده و با استفاده از کولیس عمق داخل لوله به شکلی اندازه گیری شده است که نوک سنسور ترموکوپل در مرکز لوله جاگذاری شود تا دمای بالک با حداکثر دقت ممکن ثبت شود؛ هم چنین دمای سطح لوله دقیقاً در همان پنج نقطه توسط ترموکوپل های روی سطح ثبت شده است. پس از ثبت دما در این پنج نقطه از ناحیه تست، در قسمت خروجی خم لوله نیز یک ترموکوپل در داخل لوله برای ثبت دمای خروجی سیال نصب شده است. لازم به ذکر است دمای ورود و خروج سیال در حالتی ثبت می شوند که بر روی ۱۰ سانتی متر ابتدائی و ۱۰ سانتی متر انتهایی قبل و بعد از خم، به دلیل تأثیر نگرفتن از دمای هیتر، تحت اعمال شار حرارتی وجود نداشته و این نواحی فقط توسط عایق الاستومری پوشش داده شده است. هم چنین در قسمت ورود و خروج به خم همان طور که در شکل (۲-۱۴) مشخص است، دو انشعاب فرعی از لوله آزمایش جهت اتصال به ترانس میتر فشار گرفته شده تا اختلاف فشار بین این دو نقطه در آزمایش ها سنجیده شود.

بعد از عبور جریان از ناحیه خم لوله و در حدفاصل ورود سیال به کویل خنک‌کن، یک شیر در مسیر جریان جهت هواگیری سیستم در شروع تست به کاررفته است؛ این شیر هواگیری در شروع تست باز شده و پس از اینکه داخل لوله آزمایش از سیال پر شده و از قسمت خروجی شیر سرریز می‌شود بسته خواهد شد. جریان پس از طی کردن مسیر شیر هواگیری وارد کویل خنک‌کن که مدار ثانویه سیستم محسوب می‌شود خواهد شد؛ مقدار سه متر از لوله مسی به صورت کویل با قطر ده سانتی‌متر پیچیده شده و در داخل یک محفظه بسته قرار می‌گیرد. محفظه این کویل خنک‌کن طوری تعبیه شده که جریان ورودی آب یخ‌زانی که توسط پمپ به محفظه بسته که کویل را احاطه کرده پمپاژ می‌شود، با قرار دادن یک شیر، کنترل شده و جریان آب سرد از یک طرف محفظه و از مرکز ابتدایی آن وارد شده و پس از اعمال شدن تعادل گرمایی، آبی که کمی گرم شده از بالاترین نقطه در قسمت انتهایی محفظه خارج می‌شود و این آب دوباره به منبع مخلوط آب سرد و یخ برگشت داده می‌شود؛ به طوری که این سیکل موجب می‌شود دمای ورودی به ناحیه تست در مدار اصلی ثابت ($5/16^{\circ}\text{C}$) باقی بماند. جریان سیال در مدار اصلی پس از عبور از کویل خنک‌کن و کاهش درجه حرارت به منبع حاوی سیال برگشته و عمل پمپاژ سیال دوباره از این نقطه انجام می‌گیرد. مدار تهیه شده جهت اعمال میدان مغناطیسی طبق آنچه اشاره شد با کویل کردن اینورتر و الکترومگنتها ایجاد شده است؛ میدان مغناطیسی ایجاد شده با کنترل جریان عبوری قابل تنظیم است، این کار با اعمال تغییر در مقاومت سیم‌پیچ امکان‌پذیر است؛ از این رو پس از سری کردن دو الکترومگنت آماده شده که هرکدام دارای مقاومت اهمی حدود ۸۵ اهم می‌باشد و با افزودن مقادیر مشخص از سیم حرارتی به صورت سری شده با آن دو مقدار مقاومت مدنظر به دست خواهد آمد. به طوری که طبق آنچه گفته شد پس از اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی توسط تسلا متر میدان ۲۰۰ گوسی برای لوله با شعاع انحنای کوچک ثبت شده است. برای ایجاد شار حرارتی یکسان و یکنواخت در تمامی تست‌ها پس از پیچیدن هیتر روی لوله دو سر سیم هیتر به رابط منتقل شده و توسط آن به برق شهری اتصال یافته است؛ با توجه به مقدار مقاومتی که از دو سر ابتدا و انتهای مفتول هیتر در قسمت

پیچیده شده روی خم توسط مولتی متر ثبت شده است و هم چنین جریان عبوری از هیتر که در کل مسیر برابر است، توان الکتریکی هیتر با فرمول (۱-۲) محاسبه می شود [۴۵]؛ و سپس با محاسبه مساحت مؤثر لوله، میزان شار حرارتی با استفاده از فرمول (۲-۲) قابل محاسبه است [۴۵].

$$q = RI^2 \quad (1-2)$$

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (2-2)$$

که در این روابط q میزان گرمای داده شده به لوله، R مقاومت سیم هیتر به میزانی که دور لوله آزمایش پیچیده شده، I جریان الکتریکی عبوری از هیتر، q'' شار حرارتی اعمال شده به ناحیه آزمایش و A سطح مؤثر لوله در دریافت شار حرارتی می باشد. از طرف دیگر برای محاسبه شار حرارتی جذب شده که در تست ها صورت گرفته است، می توان از مقدار اختلاف دمای ورود و خروج سیال از ناحیه تست، از فرمول (۳-۲) استفاده کرد [۴۶]:

$$q'' = \dot{m}C_p\Delta T/A \quad (3-2)$$

در تست های انجام گرفته بین این دو فرمول شار حرارتی اعمالی تفاوتی وجود دارد که به دلیل اتلاف حرارتی می باشد. تست ها در شرایطی انجام گرفته است که در حالت استفاده از لوله با شعاع انحنای کوچک، مقدار مقاومت هیتر الکتریکی پیچیده شده در ناحیه تست حدود 34Ω بوده و میزان جریان الکتریکی عبوری از سیم حرارتی هیتر در همه حالت ها $2/5$ آمپر بوده که با استفاده از مولتی متر اندازه گیری شده است؛ طول ناحیه ای از لوله مسی که هیتر روی آن پیچیده شده در لوله کوچک حدود 34 سانتی متر اندازه گیری شده است و برای محاسبه سطح مؤثر در انتقال حرارت با توجه به اینکه قطر لوله مسی استفاده شده در هر دو لوله

بزرگ و کوچک یکسان بوده تنها عامل ایجاد تفاوت در مساحت همان طول ناحیه تحت تست می باشد. این در حالی است که طول ناحیه تحت اعمال حرارت در لوله بزرگ حدود ۴۵ سانتی متر در نظر گرفته شده و میزان مقاومت هیتر نیز در این حالت 45Ω اندازه گیری شده است. حال با توجه به فرمول (۲-۱) می توان برای هر دو لوله مقدار توان الکتریکی را محاسبه کرد؛ مشخص می شود که برای لوله با شعاع انحنای کوچک این توان حدود ۲۱۴ وات محاسبه می شود و برای لوله با شعاع انحنای بزرگ توان الکتریکی حدود ۲۸۰ وات به دست می آید؛ و اگر مقادیر تغییر دمای ورود و خروج سیال به طور مثال برای آب در هر دو لوله با توجه به فرمول (۲-۳) مورد استفاده قرار گیرد مشاهده می شود که در هر حالت حدود ۴ درصد اختلاف بین شار حرارتی الکتریکی و مکانیکی وجود دارد که ناشی از اتلاف حرارت می باشد. حال با توجه به اندازه گرفتن مقدار شار حرارتی اعمالی و اختلاف دمای سطح و دمای بالک در هر نقطه به صورت عملی برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابه جایی در هر نقطه ($h(x)$) از فرمول (۲-۴) استفاده می شود [۴۶].

$$h_x = \frac{q''}{T_s(x) - T_b(x)} \quad (۲-۴)$$

که در آن $T_s(x)$ دمای سطح لوله آزمایش در هر نقطه و $T_b(x)$ دمای بالک سیال در همان نقطه است. در این آزمایش دمای بالک سیال هم به طور مستقیم و با وارد کردن ترموکوپل به داخل سیال در هر نقطه اندازه گیری شده است. اکنون با داشتن فرمول محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی می توان این ضریب را در هر نقطه به دست آورد؛ سپس با داشتن این ضریب در ۵ نقطه از ناحیه تست با بهره گیری از فرمول (۲-۵) ضریب انتقال حرارت جابه جایی میانگین محاسبه خواهد شد [۳۶].

$$h_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx \quad (۲-۵)$$

که همان طور که بیان شد در این آزمایش در پنج نقطه به طور مستقیم دمای سطح و دمای بالک سیال اندازه گیری شده است؛ در غیر این صورت برای تخمین دمای بالک در هر نقطه می توان از فرمول (۶-۲) استفاده کرد [۳۶].

$$T_b(x) = T_b(i) + \frac{QX}{L\dot{m}C_p} \quad (6-2)$$

در این فرمول $T_b(x)$ دمای بالک سیال در نقطه مدنظر است؛ $T_b(i)$ دمای بالک ورودی سیال به ناحیه تست، X فاصله نقطه موردنظر از ورودی، L کل طول ناحیه تست که توسط هیتر پوشش داده شده، Q کل توان حرارتی داده شده به ناحیه تست، \dot{m} دبی جرمی سیال و C_p ظرفیت حرارتی سیال می باشد. در نهایت با داشتن h_{avg} و مشخصات لوله آزمایش و همچنین ضریب هدایت حرارتی سیال برای به دست آوردن عدد ناسلت برای انتقال حرارت از رابطه (۷-۲) استفاده می شود [۴۵].

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (7-2)$$

همان طور که مشخص است برای به دست آوردن عدد ناسلت، ضریب هدایت سیال موردنیاز است، از این رو با توجه به فرمول هایی که برای ضریب هدایت حرارتی در فصل یک بیان شد و همچنین با استفاده از خصوصیات دریافت شده از نانوپودر تهیه شده مقادیر K برای هر حالتی از سیال با هر کسر حجمی قابل محاسبه خواهد بود. همچنین برای ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (آب) با توجه به داده های کتاب اینکوپرا [۴۶] محاسبات انجام گرفته است. آزمایش ها در چهار دبی متفاوت که منجر به چهار عدد رینولدز متفاوت برای جریان سیال خواهد شد انجام گرفته است، همچنین نانوسیال Fe_3O_4 در دو کسر حجمی متفاوت و تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی در دو لوله با خم یوشکل و با شعاع انحنای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۳-۲) دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه گیری آزمایش بیان شده است.

جدول (۲-۳) بازه و دقت وسایل اندازه گیری آزمایش

وسيله اندازه گیری	محدوده کاری	دقت
پمپ دنده ای	۱۷۱ تا ۱۷۱۴ میلی لیتر بر دقیقه	±۰٫۱ میلی لیتر بر دقیقه
ترموکوپل	۱۰۰- تا ۱۰۰۰+ درجه سانتی گراد	±۰٫۱ درجه سانتی گراد
ترانسمیتر فشار	۰ تا ۶۵۰ میلی بار	±۰٫۰۰۱ میلی بار

لازم به ذکر است کلیه آزمایش‌ها در هر حالت با سه بار تکرار آزمایش جهت انجام محاسبات آماری و ارائه آنالیز عدم قطعیت انجام شده است.

۲-۵ آنالیز عدم قطعیت

۲-۵-۱ انواع خطاهای احتمالی در سیستم

به طور کلی خطا در آزمایشات به دو دسته تقسیم میشوند: ۱- خطای کاتوره ای (تصادفی) و ۲- خطای سینماتیک (ذاتی)؛ در خطای کاتوره ای مقادیر به دست آمده از تعدادی آزمایش حول یک مقدار مشخص که همان مقدار واقعی پارامتر مورد اندازه گیری میباشد، در حال نوسان خواهند بود، به طوری که میانگین کل داده های ثبت شده تقریب خوبی از مقدار واقعی خواهد بود. اما در خطای سینماتیک در واقع خود وسیله اندازه گیری دچار خطا میشود به طوری که کل داده های ثبت شده به اندازه خطای دستگاه از مقدار واقعی خود فاصله دارند (مانند ثانیه شماری که کمی کند کار میکند و تمامی زمانهای ثبت شده برای یک آزمایش چار تغییر میشوند). پس از مشخص شدن نوع خطای مد نظر باید به این نکته توجه داشت که خطا از چه روشی محاسبه شود، خطای مطلق و یا خطای نسبی. خطای مطلق معمولاً به صورت اختلاف دورترین داده از مقدار واقعی با خود مقدار واقعی، گزارش میشود و دارای بعد میباشد؛ اما خطای نسبی به صورت نسبت خطای مطلق به مقدار واقعی و به صورت درصد گزارش میشود که فاقد بعد میباشد. در نهایت

لازم به ذکر است بزرگترین مقدار خطای بدست آمده در کل آزمایشات، به عنوان خطای سیستم گزارش میشود؛ یعنی ممکن است خطای تصادفی داده های بدست آمده از خطای سینماتیک کوچکتر باشد، در این صورت خطای سینماتیک همان وسیله اندازه گیری به عنوان خطا ارائه میشود.

۲-۵-۲ آنالیز آماری خطای تصادفی و ارائه عدم قطعیت

از آنجایی که هیچ گاه اعتماد ۱۰۰ درصد به خطای تعیین شده برای سیستم وجود ندارد، همواره مقادیر خطا با عدم قطعیت گزارش میشوند. برای توضیح عدم قطعیت ابتدا به یادآوری برخی محاسبات آماری پرداخته شده است. فرمول (۸-۲) نحوه محاسبه میانگین برای یک پارامتر را در n بار تکرار یک آزمایش نشان می دهد [۴۷].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (۸-۲)$$

که در آن x_i مقدار داده i ام و n تعداد تکرار آزمایش می باشد. برای محاسبه عدم قطعیت یک پارامتر نیاز به اطلاع از میزان انحراف معیار آن داده در آزمایش ها وجود دارد. همان طور که واضح است، انحراف معیار داده ها نشان دهنده میزان پراکندگی یا دور شدن آن ها از مقدار میانگین به دست آمده می باشد؛ انحراف معیار برابر ریشه دوم واریانس داده ها می باشد که مطابق فرمول (۹-۲) محاسبه می شود [۴۷].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (۹-۲)$$

اکنون با معرفی فرمول انحراف معیار، مشخص می شود برای محاسبه عدم قطعیت یک کمیت مثل x_i در تعداد n بار تکرار آزمایش طبق معادله (۱۰-۲) محاسبه می شود [۴۷].

$$\delta_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن σ نشان‌دهنده انحراف معیار آن کمیت در n بار تکرار آزمایش می‌باشد. با توجه به اینکه هر آزمایش سه بار تکرار شده n برابر ۳ خواهد شد؛ همچنین برای کمیت‌هایی که با ابزار اندازه‌گیری با درجه‌بندی مشخص دیتابرداری می‌شوند عدم قطعیت به صورت فرمول (۱۱-۲) تخمین زده می‌شود.

$$\delta_x = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (11-2)$$

که در آن a کوچک‌ترین مقدار قابل اندازه‌گیری توسط وسیله می‌باشد، و برای یافتن مقدار عدم قطعیت دقت وسیله اندازه‌گیری بر ۲ تقسیم می‌شود؛ به عنوان مثال مقادیر دمای ورودی و خروجی برای نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد و در عدد رینولدز ۴۰۰ (دبی (ml/min) ۳۰۰) و در لوله با شعاع انحنای کوچک برای سه بار تکرار آزمایش به همراه عدم قطعیت هر تست در جدول (۳-۲) آورده شده است.

جدول (۴-۲) عدم قطعیت در دمای ورودی و خروجی برای نانوسیال ۰٫۲ و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در

رینولدز ۴۰۰

کسر حجمی	نقطه ثبت دما	تست اول °C	تست دوم °C	تست سوم °C	مقدار میانگین °C	انحراف معیار	عدم قطعیت
۰٫۲ درصد	ورودی	۱۶٫۴	۱۶٫۵	۱۶٫۴	۱۶٫۴۳	۰٫۰۵۸	۰٫۰۳۳
۰٫۲ درصد	خروجی	۲۸٫۱	۲۷٫۹	۲۷٫۸	۲۷٫۹۳	۰٫۲۵۳	۰٫۰۸۸
۰٫۴ درصد	ورودی	۱۶٫۵	۱۶٫۶	۱۶٫۳	۱۶٫۴۷	۰٫۲۵	۰٫۰۸۷
۰٫۴ درصد	خروجی	۳۰٫۵	۳۰٫۳	۳۰٫۳	۳۰٫۳۷	۰٫۲۲	۰٫۰۶۹

پس از مشخص شدن انحراف معیار و عدم قطعیت در متغیرهای ساده که با وسایل اندازه گیری ثبت شده اند، اکنون برای به دست آوردن عدم قطعیت استاندارد یک کمیت مثل f که خود تابعی از چند متغیر باشد، به صورت فرمول (۲-۱۲) محاسبات انجام میگیرد [۴۷].

$$\delta_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta_y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \delta_z\right)^2} \quad (۲-۱۲)$$

طبق فرمول‌های معرفی شده، برای به دست آوردن عدم قطعیت در بازدهی حرارتی آزمایش ابتدا لازم است پارامترهای تأثیرگذار بر بازدهی حرارتی معرفی شوند؛ ضمناً مشخص است که با توجه به شار حرارتی که به لوله آزمایش اعمال شده است، بازدهی حرارتی وابسته به میزان افزایش درجه حرارت سیال از ورود به ناحیه تست تا خروج از آن خواهد بود. در نتیجه بازدهی حرارتی سیستم به شکل تابعی از دمای ورودی، دمای خروجی و دبی حجمی یا جرمی سیال تعریف می‌شود. $\eta_{th} = \eta_{th}(Q, T_{in}, T_o)$ برای جلوگیری از خطای احتمالی در دبی پمپ دنده‌ای هر دبی پس از تنظیم کردن، به صورت دستی و با پر کردن یک بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری با دقت ۲ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شده است. جدول (۲-۳) نشان‌دهنده این اندازه‌گیری و ثبت زمان توسط زمان‌سنج با دقت ۰/۰۱ ثانیه برای آزمایش آب در لوله با شعاع انحنای کوچک و دبی تنظیم‌شده ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد.

جدول (۲-۵) زمان مورد نیاز برای پر شدن بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر برای سه تکرار در آزمایش دبی ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

دبی تنظیم‌شده	تست اول	تست دوم	تست سوم
۵۰۰ (ml/min)	۱۲/۰۷ ثانیه	۱۱/۹۲ ثانیه	۱۱/۸۹ ثانیه

با توجه به اینکه دبی حجمی از رابطه $Q = \frac{V}{t}$ حاصل می‌شود، پس می‌توان گفت که $Q=Q(V,t)$ در نتیجه عدم قطعیت برای دبی به شکل زیر به دست خواهد آمد.

$$\delta_Q = \sqrt{\left(\frac{\delta_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\delta_V}{V}\right)^2} = 0.0056$$

حال برای محاسبه عدم قطعیت در بازده حرارتی در جدول (۲-۴) مقادیر دمای ورودی و خروجی در سه تکرار آزمایش برای دبی ۵۰۰ میلی لیتر بر دقیقه آب در لوله کوچک آمده است.

جدول (۲-۶) دمای ثبت شده برای ورودی و خروجی در لوله آزمایش تحت اعمال شار حرارتی

دمای سیال در لوله آزمایش	تست اول	تست دوم	تست سوم
ورودی	۱۶٫۵°C	۱۶٫۷°C	۱۶٫۴°C
خروجی	۲۲٫۵°C	۲۲٫۳°C	۲۲٫۱°C

همان‌طور که از قبل اشاره شد اندازه‌گیری دما با ترموکوپل سری K با دقت ۰٫۲ درجه انجام گرفته است. با توجه به فرمول $q = \dot{m}C\Delta T$ و با فرض اینکه در این تغییر دمای اندک سیال، ظرفیت حرارتی ثابت باقی خواهد ماند؛ عدم قطعیت بازدهی حرارتی طبق محاسبات زیر به دست خواهد آمد.

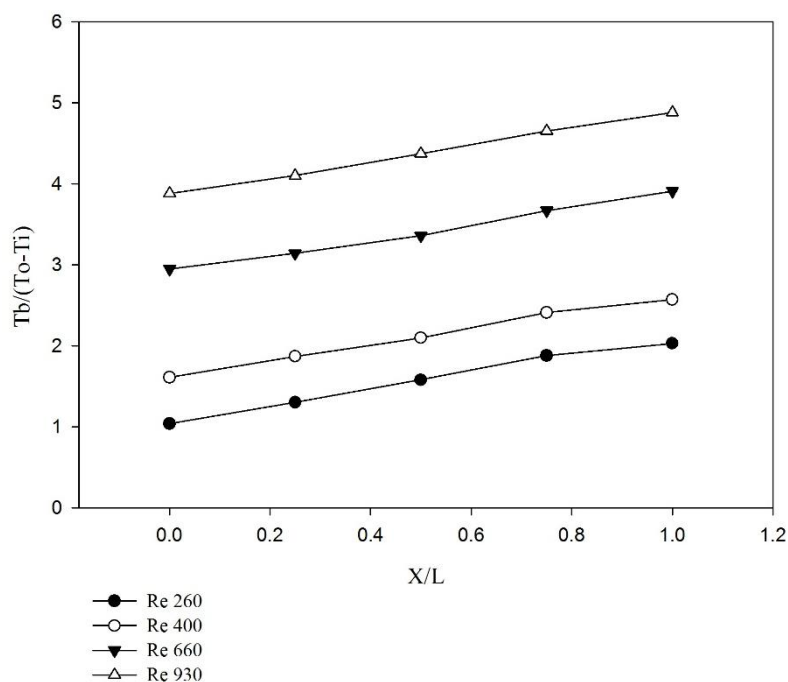
$$\delta_{\eta_{th}} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(-\frac{\delta T_{in}}{T_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out}}{T_{out}}\right)^2} = \pm 0.011$$

فصل سوم

نتایج آزمایش

۱-۳ بررسی میزان جذب حرارت در لوله کوچک

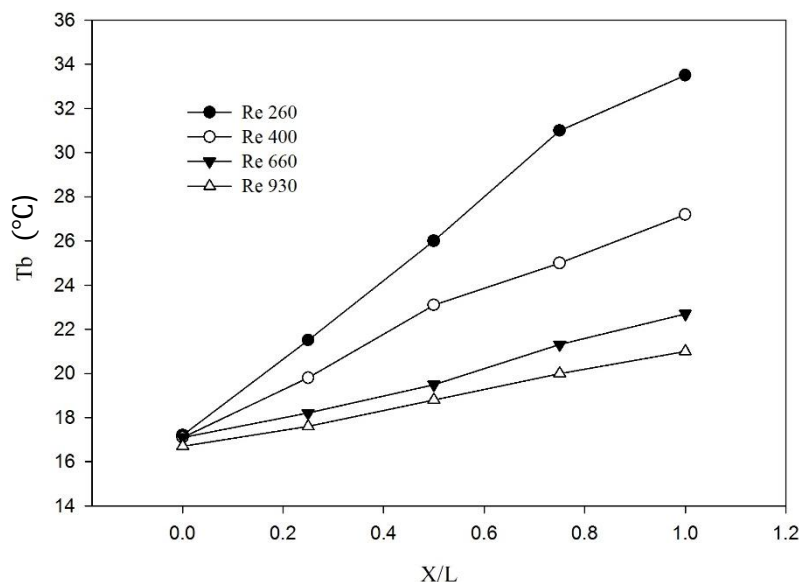
برای مشخص شدن میزان دریافت گرما توسط سیال از شار حرارتی اعمالی بر لوله آزمایش باید اختلاف دماهای به وجود آمده در سیال فعال مورد بررسی قرار گیرد؛ میزان تغییرات ایجاد شده در اختلاف دمای ورود و خروج سیال از ناحیه تست طبق فرمول $q = \dot{m}C\Delta T$ نشان دهنده میزان انرژی و یا حرارت جذب شده در هر تست می باشد. برای لوله کوچک مقادیر افزایشی دمای بالک بی بعد شده در راستای افزایش تدریجی طولی لوله (از ابتدای ناحیه تحت بررسی تا انتهای آن) برای آب در رینولدزهای مختلف نموداری مانند شکل (۱-۳) به دست می آید.



شکل (۱-۳) روند افزایش دمای بالک بی بعد شده در رینولدزهای مختلف

در شکل (۱-۳) مشاهده می شود با اینکه در رینولدز پایین تر به دلیل پایین بودن دبی سیال، جریان عبوری فرصت جذب دمای بیشتری از سطح داغ لوله دارد اما دقیقاً به همین دلیل هم دمای سیال خروجی خیلی بیشتر شده و این امر باعث شده که اختلاف دمای ورود و خروج بیشتر شود؛ به طوری که قابل مشاهده

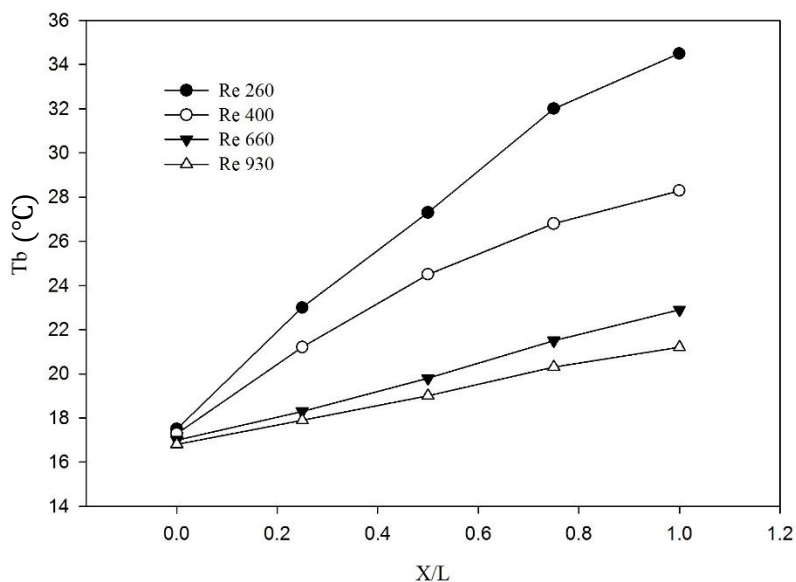
است که با در نظر گرفتن دمای بالک بی بعد شده در رینولدزهای بالاتر با توجه به کاهش اختلاف دمای ورودی و خروجی مقادیر بزرگتری برای دما ثبت شده است. برای بهتر مشخص شدن دماهای بالک نقاط در رینولدزهای متفاوت شکل (۲-۳) ترسیم شده که دماهای بالک دقیق را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دمای ورودی برای سیال در تمامی تست‌ها $16/5^{\circ}\text{C}$ و ثابت در نظر گرفته شده، این مقایسه برای مشخص شدن جذب گرما در حالات متفاوت رینولدز و سیال منطقی خواهد بود. مقادیر افزایشی دماهای بالک به صورت دقیق اندازه‌گیری شده برای آب در رینولدزهای مختلف در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۳) افزایش دقیق دمای بالک در رینولدزهای متفاوت برای آب

با توجه به شکل (۲-۳) مشخص می‌شود که طبق آنچه گفته شد در رینولدزهای پایین‌تر به دلیل کم بودن دبی جریان و پایین بودن توان سیال در ایجاد تعادل دمایی بین دیواره لوله و دمای بالک مقادیر دمای بالک به صورت مشخص بیشتر شده‌اند؛ به طوری که اختلاف دمای نقطه آخر در ناحیه تست بین بیشترین و کمترین رینولدز حدود 13°C ثبت شده است. این روند افزایشی دمای بالک برای نانوسیال با کسر حجمی $0/2$ درصد نیز به دلیل اینکه سیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی نبوده در اعداد رینولدز پایین به دلیل شدت

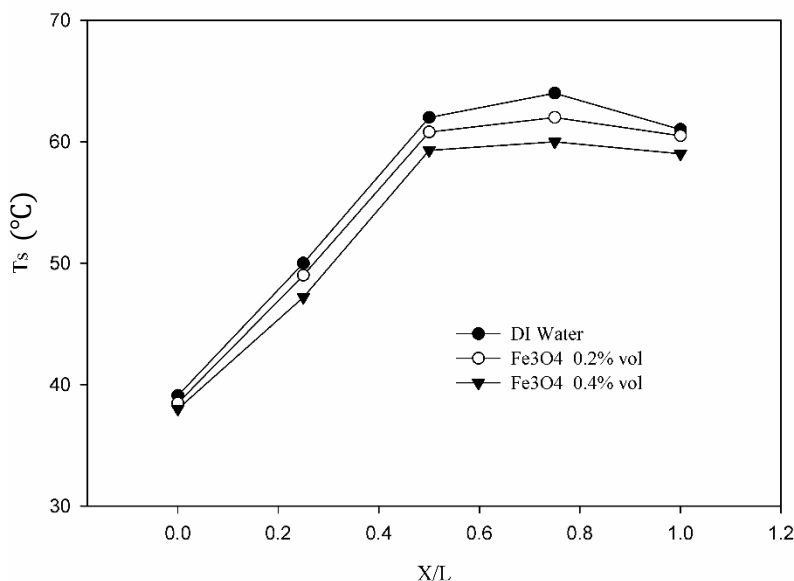
نگرفتن جریان ثانویه، تفاوت چندانی با آب نداشته و نموداری شبیه به نمودار شکل (۲-۳) دارد با تفاوت‌های اندکی در دما، به‌طور مثال در کمترین رینولدز (۲۶۰) دمای بالک برای آب در نقطه آخر ۳۳/۵ شده و برای نانوسیال ۰/۲ درصد در همین شرایط دمای بالک به ۳۴/۵ رسیده است. شکل (۳-۳) نشانگر این افزایش دما می‌باشد.



شکل (۳-۳) افزایش دقیق دمای بالک در رینولدزهای متفاوت برای نانوسیال ۰/۲ درصد

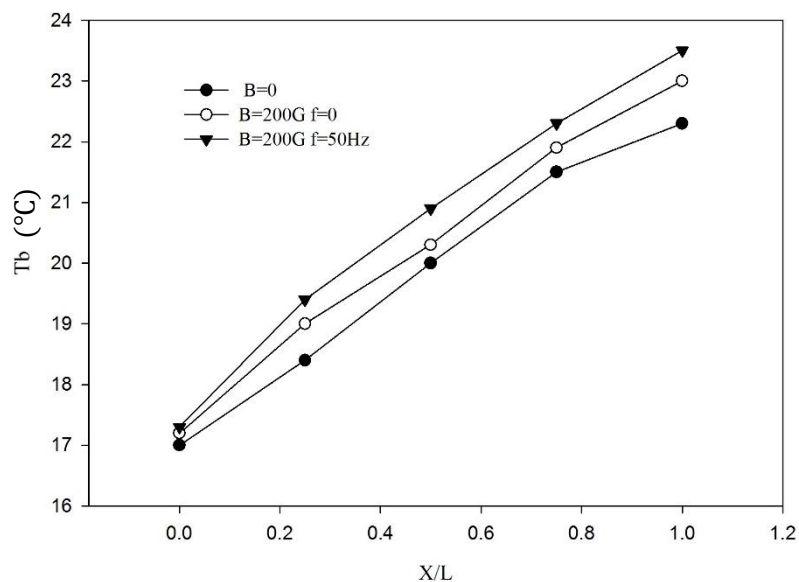
شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) نشان می‌دهد که در یک رینولدز برابر و شار حرارتی ثابت برای نانوسیال انتقال حرارت بهتری از سطح لوله به سیال نسبت به آب صورت گرفته که موجب افزایش اندکی در دمای بالک سیال در تمامی نقاط شده است. زمانی که کاهش در اختلاف دمای سطح و بالک رخ می‌دهد یعنی انتقال حرارت بهبود یافته است. بدیهی است که با اعمال شار حرارتی برابر در حالات مختلف، زمانی که دمای بالک در یک رینولدز برابر بیشتر باشد این بدان معنی است که انتقال حرارت بهتری از سطح لوله رخ داده است که در نتیجه آن دمای سطح هم کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در عدد رینولدز ۶۶۰ در حالت استفاده از آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی روند تغییرات دمای سطح لوله افزایشی

خواهد بود، شکل (۳-۴) نشان دهنده این روند افزایشی میباشد. لازم به ذکر است در تمامی گزارش ها زمانی که یک پارامتر به صورت محلی و در یک عدد رینولدز بررسی شده به دلیل اینکه تاثیر میدان مغناطیسی ثابت و متغیر در حوالی رینولدز ۶۵۰ برابر میباشد، عدد رینولدز ۶۶۰ به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است.

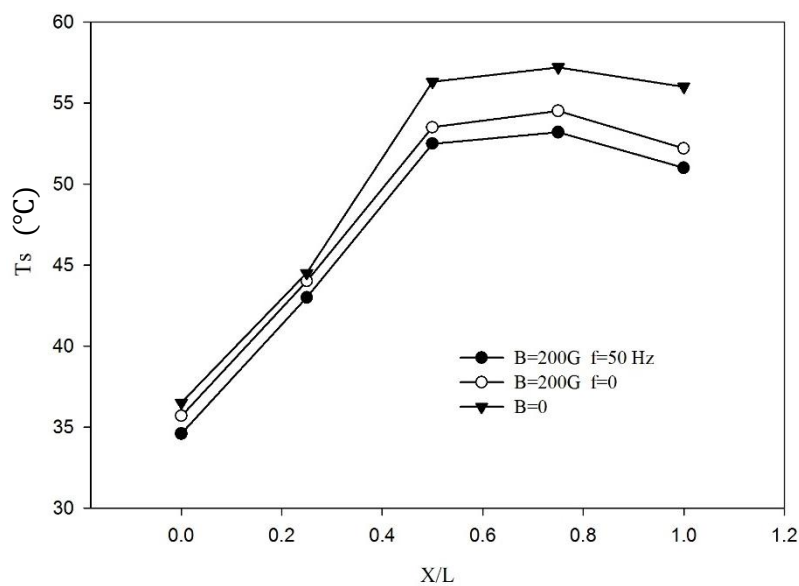


شکل (۳-۴) تفاوت دمای سطح لوله برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و آب در رینولدز ۶۶۰

در شکل (۳-۴) مشخص است که طبق آنچه بیان شد زمانی که از نانوسیال به جای آب در تست‌ها استفاده شده است در یک عدد رینولدز ثابت مقادیر کمتری برای دمای سطح ثبت شده است. همچنین اثر مثبت کسر حجمی در دریافت حرارت نیز مشخص است که با بیشتر شدن کسر حجمی دمای سطح کاهش بیشتری داشته است و این امر موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. در این تحقیق آزمایشگاهی طبق آنچه گفته شد نانوسیال Fe_3O_4 علاوه بر مقایسه شدن با آب، تحت تأثیر میدان مغناطیسی واقع شده و تأثیر این میدان خارجی بر بهبود انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. اما در حالت بیشترین انتقال حرارت و در رینولدز ۹۳۰ برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۴ درصد این روند افزایشی دمای بالک و کاهش دمای سطح لوله، به ترتیب در شکل (۳-۵) و شکل (۳-۶) نمایش داده شده است.



شکل (۵-۳) مقایسه افزایش دمای بالک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی، میدان ۲۰۰ گوس ثابت و میدان ۲۰۰ گوس متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز در نانوسیال Fe_3O_4 و کسر حجمی ۰/۴ و رینولدز ۹۳۰



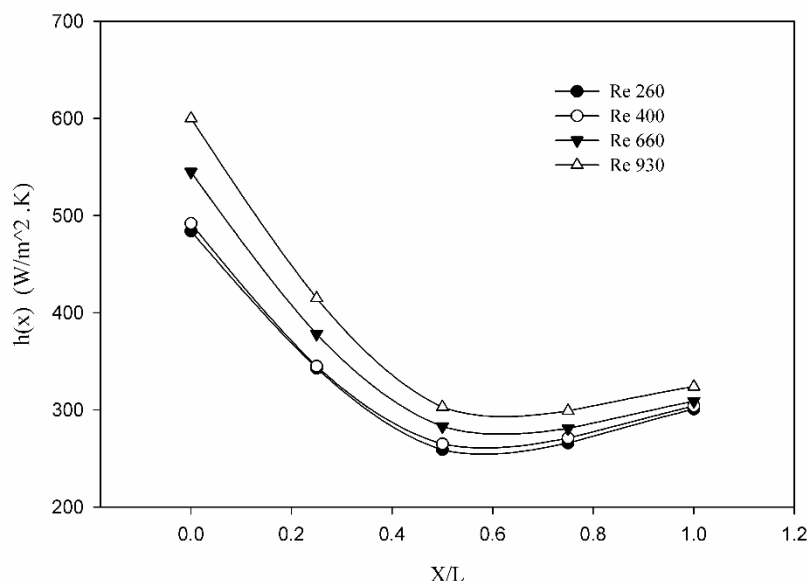
شکل (۶-۳) مقایسه افزایش دمای سطح لوله برای سه حالت بدون میدان، میدان ۲۰۰ گوسی ثابت و میدان ۲۰۰ گوسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز در نانوسیال Fe_3O_4 و کسر حجمی ۰/۴ و رینولدز ۹۳۰

در شکل‌های (۵-۳) و (۶-۳) حالتی از سیال که بیشترین انتقال حرارت را دارد (نانوسیال ۰/۴ درصد) مورد بررسی قرار گرفته است؛ مشخص شده است که تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر افزایش انتقال حرارت

مثبت بوده و زمانی که میدان مغناطیسی بر نانوسیال اعمال شده است، طبق انتظار با جذب شدن نانوذرات به سمت دیواره و تقویت ضریب هدایت حرارتی سیال انتقال حرارت افزایش می‌یابد. هم‌چنین اثر نوع اعمال میدان مغناطیسی هم قابل مشاهده است، مشخص است که اعمال میدان مغناطیسی متغیر در بیشترین رینولدز جریان در بهبود انتقال حرارت بسیار تأثیرگذارتر بوده که آن هم به دلیل ایجاد امکان جذب و دفع ذرات از دیواره لوله با فرکانس اعمالی میدان می‌باشد، این امر موجب می‌شود که دمای بالک سیال در این حالت بیشترین و دمای سطح لوله دارای کمترین مقادیر باشند و در نتیجه آن اختلاف دمای بالک سیال و سطح کاهش یافته و انتقال حرارت ماکسیمم شود. تمامی نمودارهایی که تاکنون گزارش شده نشان‌دهنده میزان گرمای دریافت شده توسط سیال عامل داخل لوله مسی از سطح لوله با دمای بالاتر می‌باشد؛ همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد بر لوله مسی آزمایش در تمام طول ناحیه تست به صورت یکنواخت و ثابت شار حرارتی اعمال می‌شود و آزمایش تحت شرط مرزی شار ثابت انجام گرفته است. شار حرارتی توسط یک هیتر الکتریکی بر سطح اعمال می‌شود؛ همان‌طور که از نمودارها مشخص است، در روند افزایشی دمای بالک سیال به جز تفاوت‌های خیلی جزئی که در شیب خط بین نقاط وجود دارد، نرخ رشد دما در هیچ نقطه‌ای منفی نبوده و تا نقطه پنجم که آخرین نقطه در ناحیه تست به شمار می‌رود افزایش دما رخ داده است؛ اما در شکل (۳-۶) که دماهای سطح لوله در همان پنج نقطه بررسی شده است مشاهده می‌شود که از ابتدای ناحیه تست که هیتر شروع شده و شار حرارتی اعمال می‌شود به دلیل ایجاد یک اختلاف دمای شدید تا نقطه سوم دما با شیب نسبتاً زیادی افزایش یافته است، اما پس از ایجاد تعادل دمایی بین جریان سیال و دیواره داغ لوله مسی دما به محدوده‌ای رسیده که توان هیتر الکتریکی دیگر اجازه افزایش بیشتر نداده است، تقریباً سه نقطه آخر در یک محدوده دمایی هستند؛ و در اکثر تست‌ها نقطه پنجم به دلیل اینکه ناحیه پوشش هیتر در آنجا به پایان می‌رسد اندکی افت دما به وجود می‌آید که در شکل (۳-۶) مشخص است.

۲-۳ مقایسه ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی در لوله کوچک

اینک با استفاده از فرمول‌های حاکم بر مسئله طبق آنچه در فصل دوم در مورد به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بیان شد، می‌توان به محاسبه این ضریب پرداخت، با به دست آوردن ضریب انتقال حرارت در نقاط مختلف و دبی‌ها و سیال‌های متفاوت می‌توان مقایسه بین این موارد انجام داد و بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانو سیال و همچنین اعمال میدان مغناطیسی را مورد بررسی قرار داد. در مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای آب و در رینولدزهای ۲۶۰، ۶۶۰، ۴۰۰ و ۹۳۰ در نقاط مختلف لوله از ورودی ناحیه تست تا انتهای آن نمودار مانند شکل (۷-۳) خواهد بود.

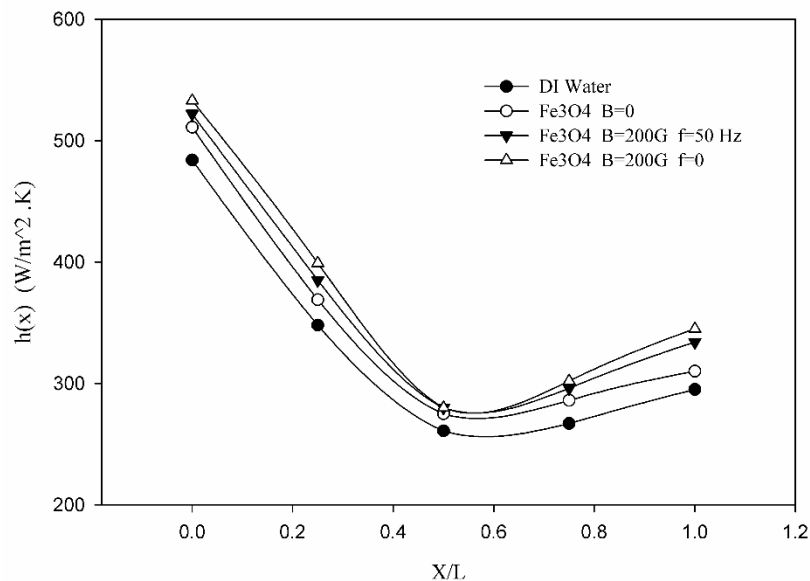


شکل (۷-۳) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در راستای لوله برای آب در رینولدزهای متفاوت

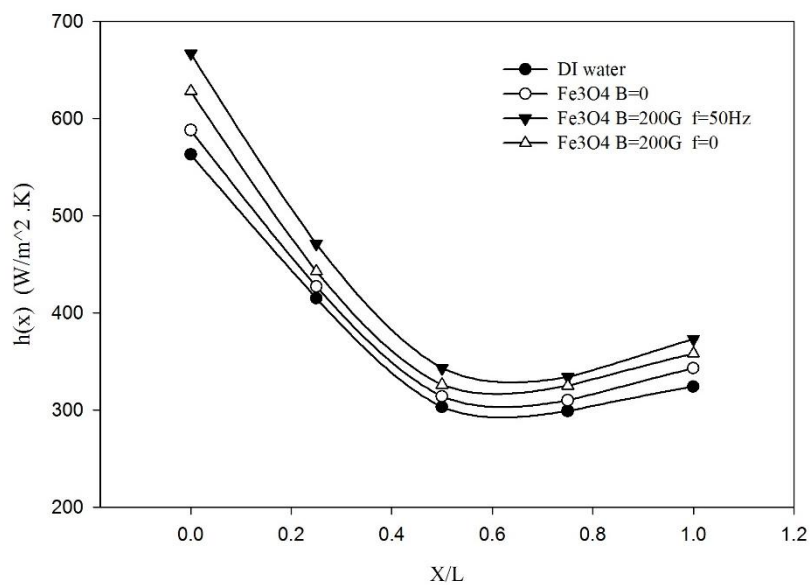
همان‌طور که در شکل (۷-۳) مشخص است در ابتدای ورودی ناحیه تست به دلیل اینکه هیتر از آنجا شروع شده و تا قبل از آن سطح لوله و سیال داخل دارای مقادیر دمای ثابت و پایین‌تری می‌باشند، اختلاف دمای بین سطح لوله و دمای بالک سیال کمتر بوده و در نتیجه مقادیر $h(x)$ از اعداد بالاتر شروع شده و در راستای طول لوله با افزایش نرخ رشد دمای سطح، اختلاف دمای ذکر شده بیشتر شده و باعث کاهش ضریب

انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است در سه نقطه پایانی تقریباً مقادیر ثابت و برابر برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ثبت شده است اما در نقطه پنجم طبق آنچه در بالا گفته شد دوباره به دلیل پایان یافتن هیتر در آن نقطه، کاهش در دمای سطح لوله رخ داده و اختلاف دمای بالک سیال و سطح کمی کاهش یافته که این امر موجب افزایش جزئی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در نقطه پنجم شده است که در شکل (۷-۳) مشخص شده. همچنین در شکل واضح است که با افزایش رینولدز جریان مقادیر $h(x)$ در هر نقطه از عدد بزرگ‌تری برخوردار است؛ با توجه به اینکه افزایش عدد رینولدز خود دلیل افزایش جریانهای ثانویه می‌باشد، اختلاط بیشتر جریان موجب کاهش در اختلاف دمای بالک سیال و سطح خواهد شد و طبق آنچه گفته شد مخرج کسر در محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش یافته و در نتیجه مقادیر بیشتری برای $h(x)$ به دست می‌آید. اما در رینولدزهای پایین دقیقاً به دلیل کمتر بودن تاثیر جریانهای ثانویه و هم‌چنین نزدیک بودن دو عدد رینولدز ۲۶۰ و ۴۰۰، این دو نمودار خیلی نزدیک به هم در شکل مشخص شده‌اند، اما در صورت بررسی دقیق، مشخص می‌شود که در تمامی نقاط ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای رینولدز ۴۰۰ دارای مقادیر بیشتری نسبت به رینولدز ۲۶۰ می‌باشد.

برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد در غیاب میدان و با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر، مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با تغییراتی روبه‌رو خواهد شد؛ این تغییرات نسبت به آب در دو حالت کمترین و بیشترین عدد رینولدز ۲۶۰ و ۹۳۰ بررسی شده که به ترتیب شکل‌های (۸-۳) و (۹-۳) این تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای نانوسیال ۰/۲ درصد حجمی و رینولدز ۲۶۰، بدون میدان مغناطیسی، میدان ثابت و متغیر و آب

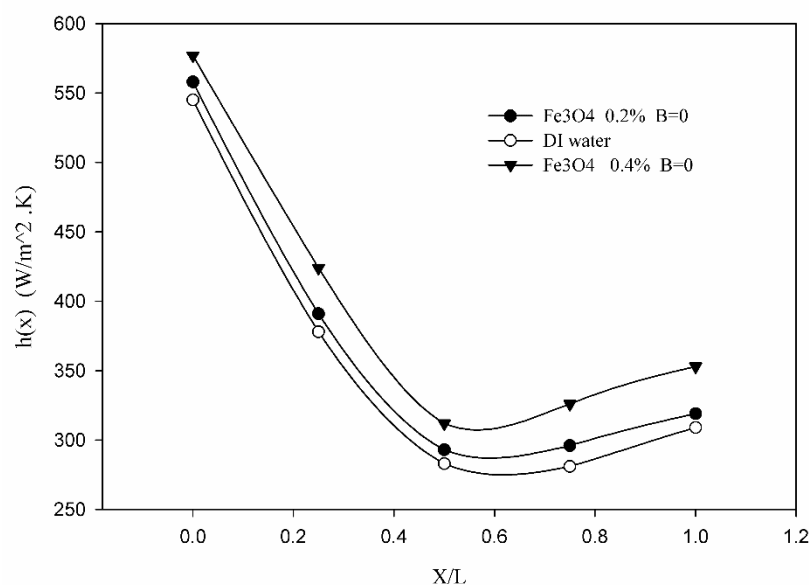


شکل (۹-۳) مقایسه $h(x)$ برای نانوسیال ۰/۲ درصد حجمی و آب در رینولدز ۹۳۰

همان‌طور که از شکل‌های (۸-۳) و (۹-۳) مشخص است در هر دو عدد رینولدز بررسی شده زمانی که از نانوسیال استفاده شده مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی نسبت به زمانی که سیال آب بوده

است افزایش مشخصی دارد که به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال میباشد این مقدار افزایش با اعمال میدان مغناطیسی و تأثیرگذاری آن بر نانوذرات و ایجاد آرایش زنجیره ای و جذب شدن به سمت دیواره بیشتر شده است. در جهت مشخص شدن تاثیر نوع اعمال میدان با توجه به اشکال (۳-۸) و (۳-۹) در اعداد رینولدز پایین (۲۶۰ و ۴۰۰) اعمال میدان مغناطیسی به صورت ثابت (فرکانس صفر) تأثیر بهتری نسبت به میدان مغناطیسی متغیر دارد و برعکس زمانی که تست در اعداد رینولدز بالاتر (۶۶۰ و ۹۳۰) انجام گرفته است میدان مغناطیسی متغیر تأثیر مثبت بیشتری نسبت به میدان ثابت بر انتقال حرارت داشته است. میدان مغناطیسی متغیر با ایجاد یک تابع سینوسی امکان جذب شدن ذرات نانو موجود در نانوسیال به دیواره و آزاد شدن آن‌ها را با فرکانس اعمالی مشخص (۵۰ هرتز در این آزمایش) به وجود می‌آورد؛ حال اگر سیال در اعداد رینولدز پایین جریان داشته باشد این فرکانس نمی‌تواند در جهت افزایش انتقال حرارت باشد زیرا سرعت عبوری کم سیال امکان نفوذ ذرات داغ آزاد شده در جریان سیال و بالا بردن دمای بالک آن را کم میکند. این امر می‌تواند دلیلی برای کاهش انتقال حرارت سیال در حالت اعمال میدان متغیر نسبت به میدان ثابت در رینولدزهای پایین باشد. ولی زمانی که اعداد رینولدز بالا وجود داشته باشد فرکانس اعمالی میدان متغیر می‌تواند در جهت بهبود انتقال حرارت عمل کرده چراکه سرعت بالاتر جریان عبوری مانع از ایجاد اغتشاش بیشتر ذرات شده و با یک نظم مشخص نانوذرات موجود در نانوسیال به طرف سطح لوله جذب و از آن دفع شده و طبیعتاً موجب انتقال حرارت بهتر از سطح داغ لوله به ذرات سیال خواهد شد.

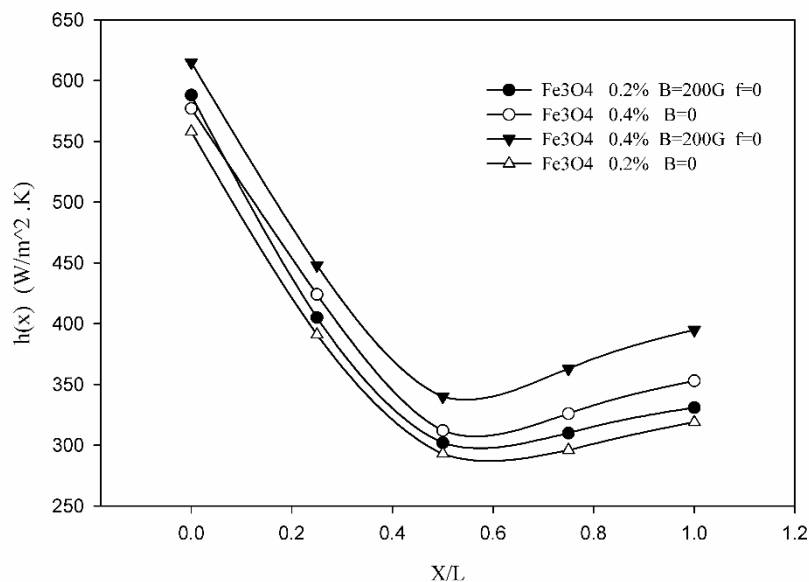
برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۴ درصد نیز مقادیر $h(x)$ متفاوت خواهد شد که این امر نشانگر تأثیر افزایش کسر حجمی نانوسیال بر انتقال حرارت می‌باشد؛ به طور مثال شکل (۳-۱۰) نشانگر مقایسه $h(x)$ در رینولدز ۶۶۰ بین نانوسیال ۰/۴ درصد و نانوسیال ۰/۲ درصد (در حالت بدون میدان مغناطیسی) و هم‌چنین آب می‌باشد.



شکل (۳-۱۰) مقایسه مقادیر $h(x)$ در رینولدز ۶۶۰ برای آب و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی

در شکل (۳-۱۰) مشخص است که با استفاده از نانوسیال به جای آب، به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال مقادیر $h(x)$ افزایش کاملاً قابل تشخیص داشته و این روند افزایشی با افزودن مقدار کسر حجمی نانوسیال نرخ رشد بیشتری نسبت به کسر حجمی ۰/۲ درصد پیدا کرده است؛ همان طور که بیان شد تراکم بیشتر نانوذرات و افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال دلیل این افزایش انتقال حرارت می باشد.

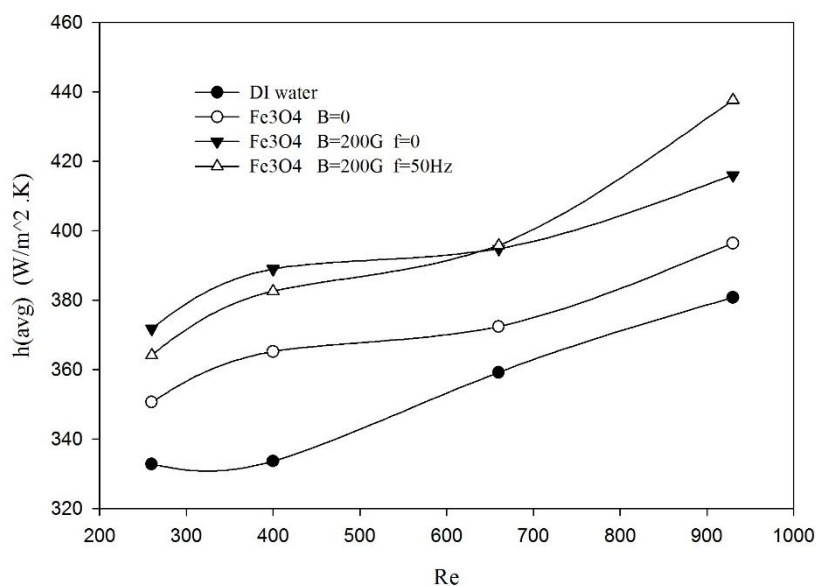
تأثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت خارجی بر بهبود انتقال حرارت (افزایش $h(x)$) برای نانوسیال در هر دو کسر حجمی نسبت به حالت بدون میدان و در رینولدز ۶۶۰ در شکل (۳-۱۱) بررسی شده است.



شکل (۱۱-۳) مقایسه $h(x)$ برای نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد در حالت بدون میدان و میدان ثابت ۲۰۰ گوس و رینولدز ۶۶۰.

همان طور که از شکل (۱۱-۳) مشخص است طبق انتظار با بالا رفتن کسر حجمی نانوسیال نرخ افزایش $h(x)$ نسبت به آب از حالت کسر حجمی پایین بیشتر می شود؛ و این تأثیر در زمانی که میدان مغناطیسی اعمال می شود نیز بیشتر به چشم می آید؛ یعنی زمانی که کسر حجمی از ۰٫۲ درصد به ۰٫۴ درصد تغییر می کند میزان افزایش نسبت به آب بیش از دو برابر می شود و هم چنین زمانی که میدان مغناطیسی خارجی اعمال می شود تأثیرپذیری نانوسیال ۰٫۴ درصد بیشتر است. در جهت مشخص شدن تأثیر کسر حجمی مشاهده می شود که با به کارگیری نانوسیال ۰٫۴ درصد حتی در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی مقادیر $h(x)$ نسبت به حالت اعمال میدان ثابت بر نانوسیال ۰٫۲ درصد بیشتر شده است؛ که این امر نشانگر تأثیرگذاری بیشتر تغییرات کسر حجمی نسبت به اعمال میدان مغناطیسی بر افزایش انتقال حرارت در شرایط ایجاد شده در این آزمایشات می باشد (میدان مغناطیسی ۲۰۰ گوس و کسر حجمی ۰٫۴٪). بدیهی است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی اثر جاذبه الکترومگنتها روی دیواره لوله تقویت شده و تأثیرگذاری میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت را افزایش خواهد داد.

اینک برای مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی در تمامی رینولدزها به جای ارائه $h(x)$ برای هر نقطه، یک مقدار میانگین برای آن بین پنج نقطه به دست می آید سپس می توان این مقدار را در نمونه سیال های مختلف در تمامی رینولدزها مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال برای نانوسیال با کسر حجمی ۰٫۲ درصد مقادیر h_{avg} نسبت به آب در حضور میدان مغناطیسی و در غیاب آن در شکل (۳-۱۲) بررسی شده است.

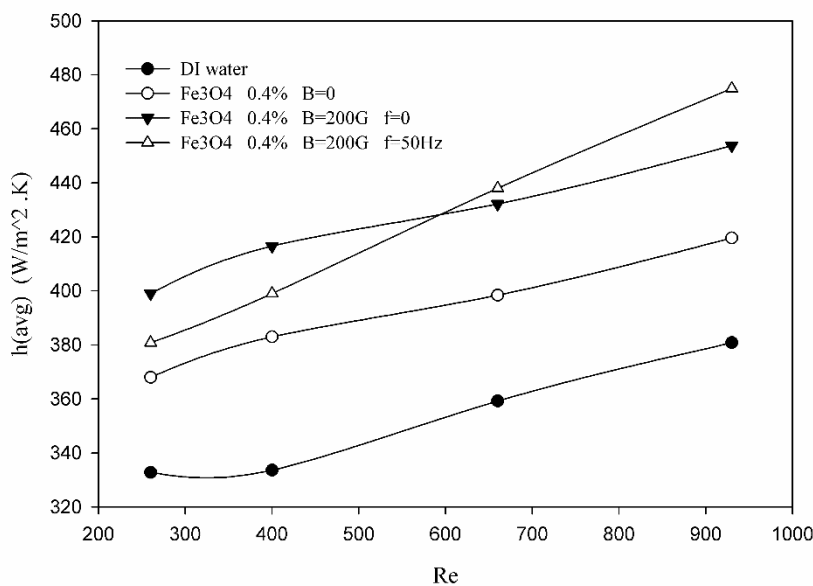


شکل (۳-۱۲) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی میانگین برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۳-۱۲) مشخص است که استفاده از نانوسیال نسبت به آب در افزایش انتقال حرارت تاثیر افزایشی داشته و همین طور با اعمال میدان مغناطیسی بر نانوسیال طبق آنچه گفته شد با هدایت نانوذرات به سمت دیواره داغ لوله تاثیر چشم گیری بر افزایش انتقال حرارت داشته است؛ به طوری که نانوسیال با اعمال میدان مغناطیسی متغیر در رینولدزهای بالا دارای بیشترین مقدار h_{avg} می باشد. نکته مهم تر در شکل (۳-۱۲) میزان اثرگذاری اعمال میدان مغناطیسی با توجه به نحوه اعمال آن میباشد؛ مشخص است که

مطابق آنچه برای دماهای سطح و بالک اتفاق افتاد، میدان ثابت در رینولدزهای پایین و میدان متغیر در رینولدزهای بالا تاثیر بهتری بر افزایش انتقال حرارت داشته اند.

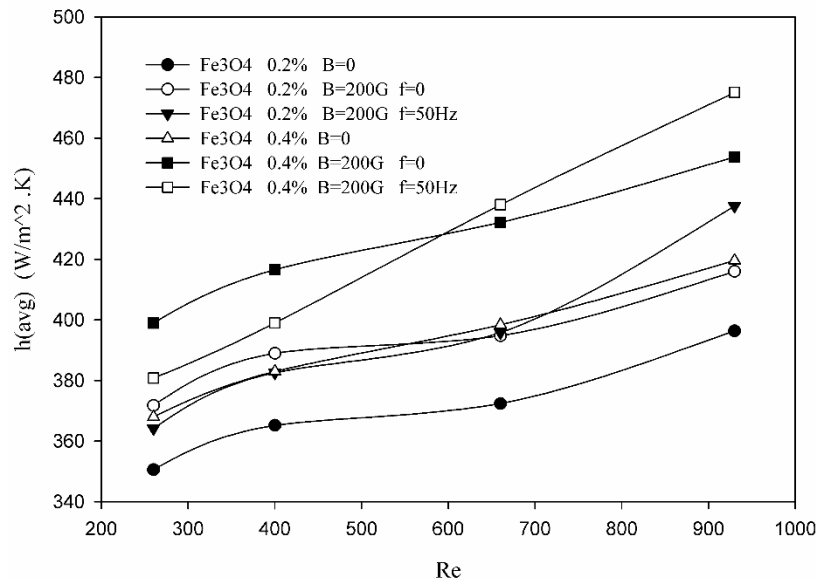
همچنین در حالتی که نانوسیال ۰/۴ درصد استفاده شده نیز ضریب انتقال حرارت جابه جایی مقادیر بیشتری خواهد داشت؛ و روند افزایشی نسبت به نانوسیال ۰/۲ درصد دارای نرخ رشد بیشتری خواهد شد. طبق آنچه گفته شد تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر این مورد بیشتر خواهد بود. شکل (۳-۱۳) نشانگر افزایش h_{avg} در نانوسیال ۰/۴ درصد نسبت به آب در رینولدزهای متفاوت می باشد.



شکل (۳-۱۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی میانگین برای آب و نانوسیال ۰/۴ درصد در رینولدزهای متفاوت

در اشکال (۳-۱۲) و (۳-۱۳) مشخص است که ضریب انتقال حرارت جابه جایی با استفاده از نانوسیال Fe_3O_4 در هر دو کسر حجمی نانوسیال افزایش یافته است و با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و تأثیرگذاری آن بر نانوسیال میزان افزایش h بیشتر نیز شده است. چیزی که نمودارهای بالا مشخص است با افزایش رینولدز جریان میزان h برای تمامی نمونه‌های سیال افزایش یافته است که همان طور که از قبل توضیح داده شد بالا رفتن دبی سیال دلیل این افزایش می باشد. برای بهتر مشخص شدن تأثیر افزایش کسر

حجمی نانوسیال در شکل (۳-۱۴) مقایسه‌ای بین h_{avg} در نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و با اعمال میدان انجام گرفته است.



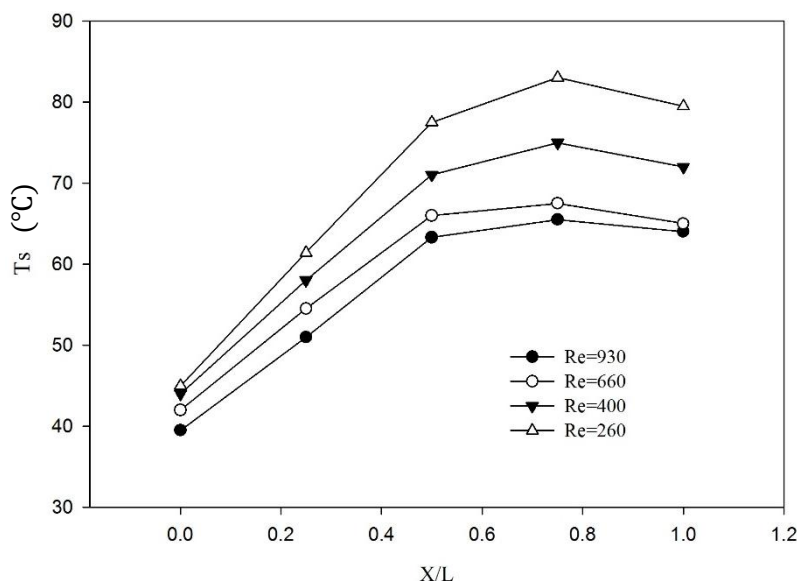
شکل (۳-۱۴) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین برای نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۳-۱۴) مشخص است که تأثیر کسر حجمی نانوسیال بسیار چشم‌گیر بوده و مشاهده می‌شود که نانوسیال ۰٫۴ درصد حتی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی هم از اکثر حالاتی که میدان مغناطیسی بر سیال ۰٫۲ درصد اعمال شده دارای h بیشتری است؛ و هم‌چنین به‌طور کلی مقادیر h در حالت‌های مختلف شرایط تست برای نانوسیال ۰٫۴ درصد تفکیک جزئیات بهتری دارد و تأثیر تفاوت در حالت‌های مختلف میدان بر h نیز در شکل (۳-۱۴) مشخص است که طبق آنچه از قبل توضیح داده شد در رینولدزهای پایین تأثیر اعمال میدان ثابت غالب بوده و در رینولدزهای بالا اثر اعمال میدان متغیر بیشتر شده است. نکته دیگر که در شکل (۳-۱۴) قابل توجه است نقطه تقاطع دو نمودار در حالت‌های اعمال میدان ثابت و میدان متغیر می‌باشد، مشاهده می‌شود در حالتی که نانوسیال با کسر حجمی کمتر (۰٫۲ درصد) استفاده شده، نقطه متناظر با رینولدزی که در آن تأثیرگذاری اعمال میدان مغناطیسی متغیر از اثر اعمال

میدان ثابت پیشی گرفته است (حدود ۶۳۰) کمی بزرگتر از حالتی است که نانوسیال ۰/۴ درصد استفاده شده است (حدود رینولدز ۵۸۰). میزان افزایش اغتشاش و حرکات کاتوره‌ای ذرات با توجه به افزایش کسر حجمی طبق آنچه در قبل بیان شد می‌تواند دلیل این امر باشد.

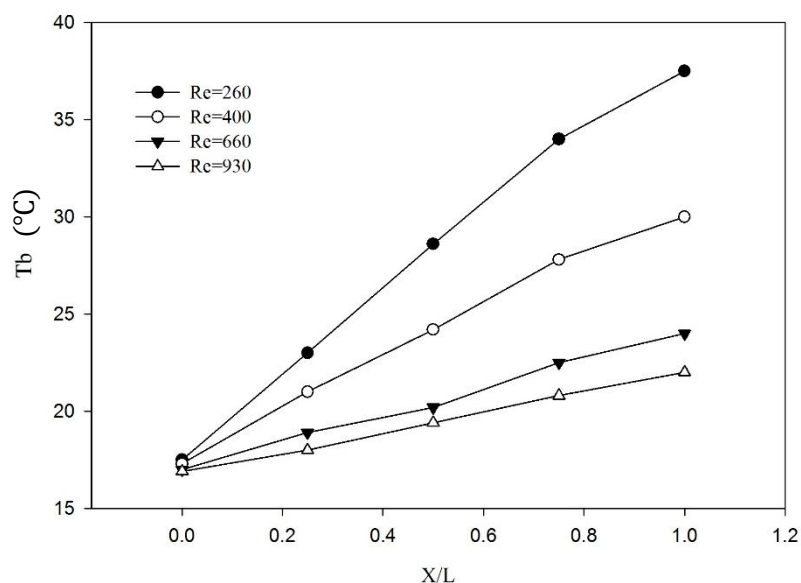
۳-۳ بررسی جذب گرما و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در لوله بزرگ

در این قسمت از پایان‌نامه به تحلیل تست‌ها در بخش لوله با شعاع انحنای بیشتر پرداخته شده است. در این لوله مسی هم در پنج نقطه برای ثبت دمای سطح ترموکوپل روی لوله و در همان نقاط هم پنج ترموکوپل داخل لوله دمای بالک سیال را اندازه‌گیری کردند. در نتیجه میزان دریافت گرما و درجه حرارت سطح در دو حالت خم لوله بررسی شده و مقایسه خواهد شد. همان‌طور که گفته شد آزمایش‌ها تحت شرط مرزی شار حرارتی ثابت انجام گرفته است پس شار حرارتی وارد بر سطح در این حالت با حالت خم کوچک لوله برابر بوده و فقط میزان توان حرارتی دریافتی بیشتر است که به همان نسبت هم سطح مؤثر لوله بیشتر شده است. در این قسمت ابتدا بررسی تغییرات دمای سطح، دمای بالک، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی و میانگین انجام شده است. شکل (۳-۱۵) نشانگر افزایش دمای سطح لوله در رینولدزهای متفاوت می‌باشد.



شکل (۳-۱۵) مقایسه افزایش دمای سطح با سیال آب در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۳-۱۵) مشخص است که روند افزایش دمای سطح لوله از همان ابتدای ناحیه ورودی با اعمال شار حرارتی بالا می‌رود و پس از رسیدن به ماکسیمم دمای ممکن شیب نمودارها کاهش قابل ملاحظه داشته است و در انتهای مسیر هم طبق توضیحات گذشته به دلیل پایان یافتن ناحیه تحت تأثیر هیترو و ایجاد تعادل دمایی بین سیال و سطح داغ لوله، کاهش اندکی در دمای سطح مشاهده می‌شود به طوری که ماکسیمم دمای سطح معمولاً در نقطه چهارم رخ داده است. هم‌چنین با افزایش رینولدز در جریان سیال دمای سطح کاهش چشم‌گیر داشته (تأثیر افزایش دبی سیال عبوری که منجر به توانایی بالاتر سیال برای جذب گرما خواهد شد.) که در شکل (۳-۱۵) مشخص است. هم‌چنین در شکل (۳-۱۶) روند افزایشی دمای بالک سیال در همان پنج نقطه برای آب در رینولدزهای متفاوت مشخص شده است.

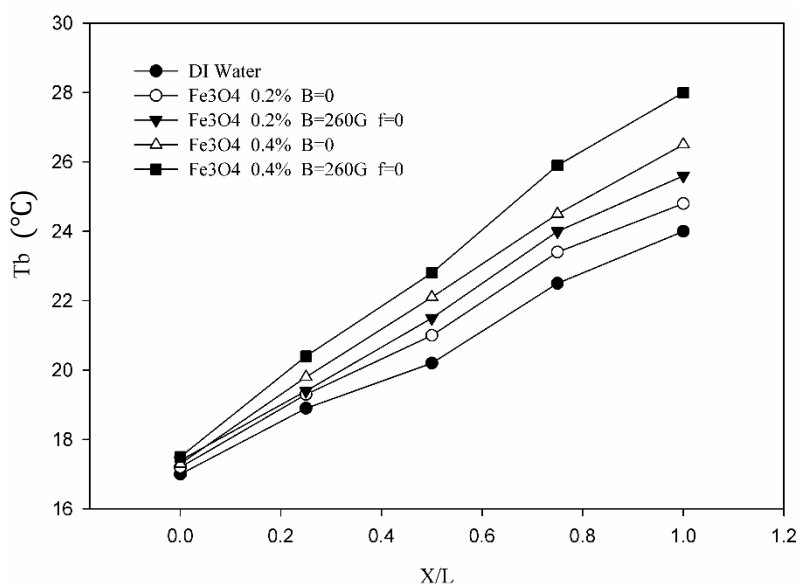


شکل (۳-۱۶) مقایسه افزایش دمای بالک سیال آب در رینولدزهای متفاوت

تفاوت‌های در دمای بالک سیال برای رینولدزهای متفاوت در شکل (۳-۱۶) مشخص است؛ در شکل دیده می‌شود که در رینولدزهای پایین‌تر دمای بالک سیال طبق انتظار افزایش بیشتری داشته است. دمای ورودی در تمامی تست‌ها همان‌طور که قبلاً بیان شد ۱۶/۵ درجه ثابت نگه داشته شده است و به همین دلیل

در تمامی رینولدزها در نقطه اول که مماس بر آن هیتر الکتریکی شروع شده دما چندان تفاوتی نداشته و تقریباً نقطه ابتدائی همه نمودارها از یکجا شروع می‌شود. هم‌چنین در آخرین نقطه که تأثیر شار حرارتی هیتر در آنجا به پایان می‌رسد، بیشترین دمای بالک در آن نقطه ثبت شده است، تفاوت دما در این نقطه بین رینولدزهای متفاوت به طور کامل قابل تشخیص است؛ به طور مثال برای رینولدز ۴۰۰ دمای نقطه آخر 30°C و برای رینولدز ۲۶۰ این دما 37.5°C ثبت شده است.

حال برای مشخص شدن نقش نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی صرفاً در دمای بالک سیال در شکل (۱۷-۳) به مقایسه دمای بالک بین آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و هم‌چنین با اعمال میدان مغناطیسی ثابت در رینولدز ۶۶۰ پرداخته شده است.

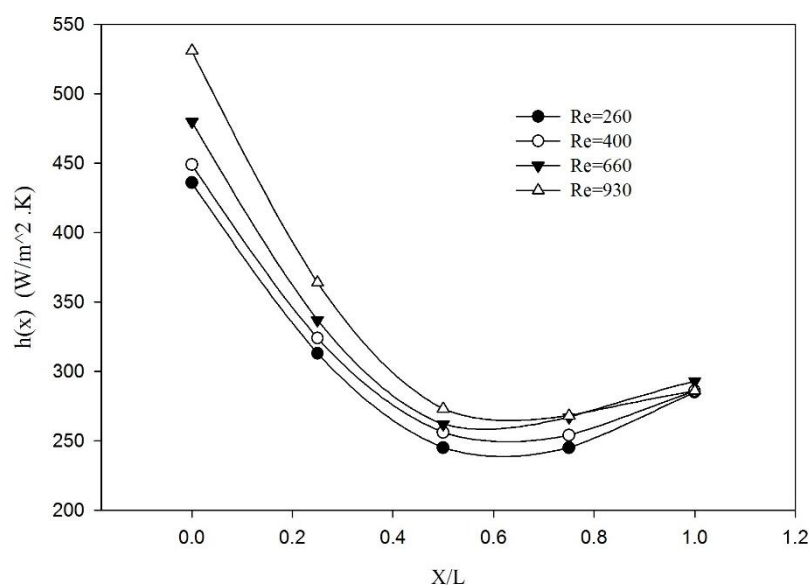


شکل (۱۷-۳) مقایسه دمای بالک سیال برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و در حضور

میدان ثابت در رینولدز ۶۶۰

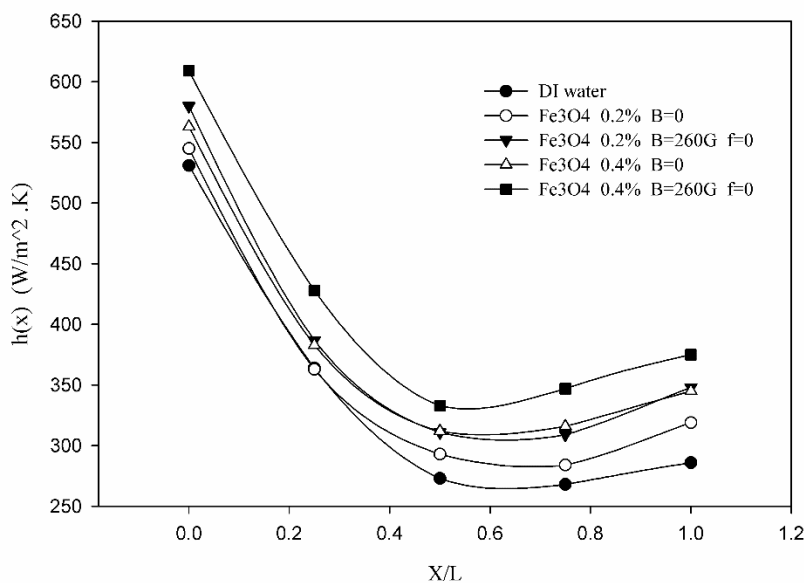
در شکل (۱۷-۳) مشخص است که دمای بالک سیال با به کارگیری نانوسیال افزایش یافته و این افزایش با اعمال میدان مغناطیسی بیشتر شده است؛ اما نکته مهم‌تر در این شکل طبق آنچه در قبل هم اشاره شد

تأثیر بیشتر کسر حجمی نانوسیال می باشد؛ همان طور که در شکل مشخص است نمودار نانوسیال ۰/۴ درصد بدون میدان بالاتر از نانوسیال ۰/۲ درصد با میدان ثابت قرار گرفته است؛ که این امر نشان دهنده تأثیرگذاری چشم گیر کسر حجمی نانوسیال نسبت به اعمال میدان مغناطیسی می باشد (افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال)؛ دلیل این تفاوت هم می تواند تأثیرگذاری یکنواخت نانوذرات پراکنده شده در نانوسیال باشد که در نانوسیال ۰/۴ درصد این نانوذرات دو برابر حالت قبل بوده است؛ ولی زمانی که میدان مغناطیسی بر نانوسیال اعمال می شود با اینکه میدان در راستای تقویت نیروی سانتریفیوژ نانوسیال بوده اما این میدان مغناطیسی توسط دو الکترومگنت به وجود آمده و نواحی محدودی را تحت پوشش قرار می دهد و حالت یکنواخت در تمام طول مسیر وجود ندارد؛ و به این شکل می توان تأثیرگذاری بیشتر تغییرات کسر حجمی نسبت به اعمال میدان مغناطیسی بر روی بهبود انتقال حرارت را توجیه کرد. حال با توجه به آنچه از قبل بیان شد می توان با داشتن شار حرارتی اعمالی و اختلاف دماهای سطح و بالک سیال برای نقاط مختلف، ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی را برای تمامی نقاط به دست آورد. شکل (۳-۱۸) مقایسه ضریب $h(x)$ را برای آب در رینولدزهای متفاوت برای لوله بزرگ نشان می دهد.



شکل (۳-۱۸) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی برای آب در رینولدزهای متفاوت

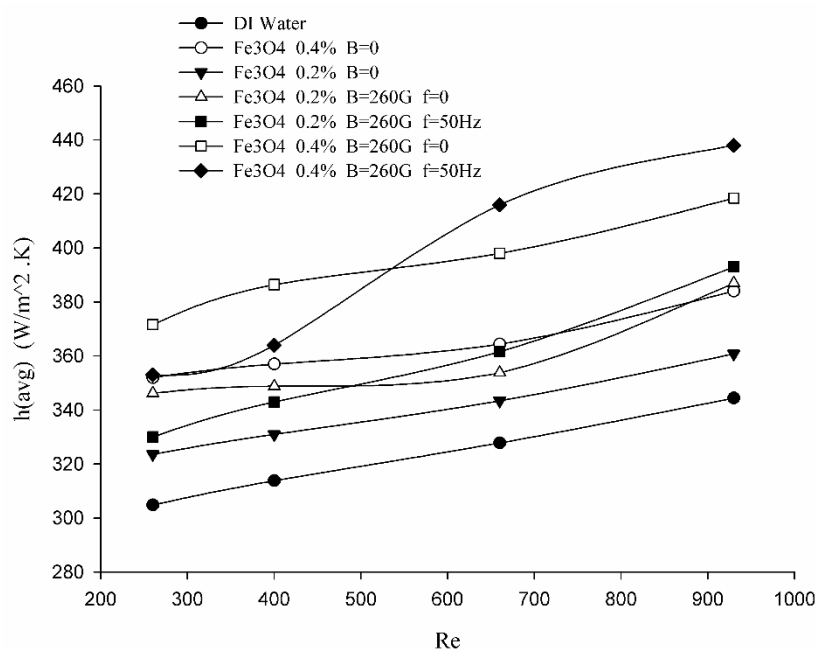
در شکل (۳-۱۸) مشخص است که مقادیر $h(x)$ با افزایش عدد رینولدز بیشتر شده و همچنین در یک عدد رینولدز مشخص با پیشروی از نقطه اول تا نقطه آخر ناحیه تست مشابه آنچه در تست‌های لوله کوچک اتفاق افتاد، مقادیر $h(x)$ از اعداد بیشتر شروع شده و به ناحیه‌ای تقریباً ثابت می‌رسد و تنها در نقطه پایانی به دلیل کاهش در اختلاف دمای بالک سیال و دمای سطح لوله، کمی رشد در مقدار $h(x)$ از نقطه چهارم تا پنجم ثبت شده که در نمودارها قابل تشخیص است. برای مشخص شدن تأثیر استفاده از نانوسیال و تأثیر تغییرات کسر حجمی آن و میدان مغناطیسی اعمالی بر آن، در افزایش $h(x)$ به بررسی روند افزایشی این ضریب تنها در رینولدز ۹۳۰ پرداخته شده است؛ شکل (۳-۱۹) نشانگر این مقایسه می‌باشد.



شکل (۳-۱۹) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون میدان مغناطیسی و در حضور میدان ثابت در رینولدز ۹۳۰

در شکل (۳-۱۹) مشخص است که با افزایش کسر حجمی نانوسیال مقادیر $h(x)$ به‌طور مشخص افزایش یافته است؛ به‌عنوان مثال در نقطه چهارم که مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای آب $268 (W/m^2 K)$ بوده است با استفاده از نانوسیال ۰٫۲ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی این عدد $284 (W/m^2 K)$ ثبت شده و این در حالی است که این مقدار در زمانی که از نانوسیال ۰٫۴ درصد حجمی

استفاده شده به $316 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ رسیده است. که با توجه به این داده‌ها مشخص است که با دو برابر کردن کسر حجمی نانوسیال مقدار $h(x)$ بیش از دو برابر میزان درصد افزایش نانوسیال $0.2/0.4$ درصد نسبت به آب افزایش یافته است. هم‌چنین اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر نانوسیال تأثیر مستقیم داشته و موجب افزایش چشم‌گیر در $h(x)$ شده است به طوری که در شکل مشخص است مقادیر $h(x)$ برای حالت نانوسیال $0.2/0.4$ درصد با میدان ثابت تقریباً منطبق بر حالت نانوسیال $0.4/0.4$ درصد بدون میدان مغناطیسی می‌باشد. برای مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در تمامی رینولدزها مقادیر میانگین h محاسبه شده است و در این بخش برای جلوگیری از تکرار فقط در شکل (۳-۲۰) مقایسه بین نانوسیال‌ها با دو کسر حجمی و آب در لوله بزرگ انجام گرفته است.



شکل (۳-۲۰) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در رینولدزهای متفاوت بین آب و نانوسیال $0.2/0.4$ درصد و $0.4/0.4$ درصد در حالات بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر

در شکل (۳-۲۰) مشخص است که همانند لوله با شعاع انحنای کوچک در این لوله هم در راستای افزایش انتقال حرارت افزودن کسر حجمی نانوسیال اثر بیشتری نسبت به اعمال میدان مغناطیسی داشته و تقریباً

در تمام رینولدزها نمودار نانوسیال با کسر حجمی ۰/۴ درصد بالاتر قرار دارد. هم‌چنین تأثیر افزایش رینولدز در افزایش h_{avg} کاملاً مشخص است؛ در رینولدزهای پایین طبق آنچه از قبل گفته شد اعمال میدان متغیر با فرکانس ۵۰ Hz تأثیر چندانی مثبتی بر افزایش انتقال حرارت نانوسیال نداشته اما با افزایش رینولدز در نقطه خاصی از نمودار (تقریباً رینولدز ۵۵۰) نقطه تقاطع دو نمودار h_{avg} برای دو حالت نانوسیال با اعمال میدان ثابت و میدان متغیر می‌باشد و از این نقطه به بعد اثر مثبت میدان مغناطیسی متغیر تقویت شده و مشاهده می‌شود که در هر دو کسر حجمی نانوسیال، در دو عدد رینولدز بالا نمودار h_{avg} برای میدان متغیر بالاتر از حالت میدان ثابت قرار دارد. پس از مقایسه حالت‌های مختلف آزمایش در لوله با شعاع انحنای بیشتر مشخص شد که تفاوتی بین روند تغییرات پارامترها در دو حالت انحنای وجود ندارد.

۳-۴ مقایسه دمای بالک و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در دو شعاع انحنای متفاوت

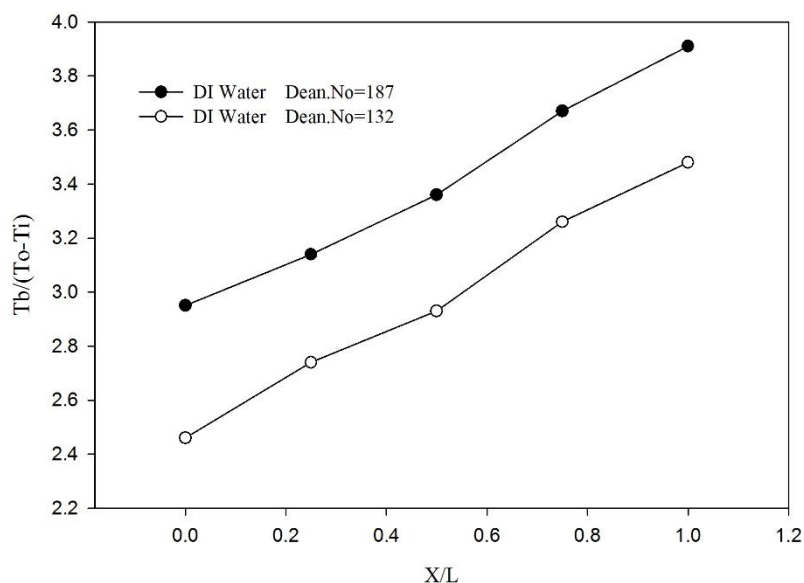
در این قسمت از پایان‌نامه در یک جمع‌بندی کلی به مقایسه دو حالت مختلف شعاع انحنای باهم پرداخته می‌شود. می‌توان گفت این مقایسه‌ها در دو عدد دین متفاوت برای رینولدزهای برابر انجام شده است؛ عدد دین به شکل معادله (۱-۳) تعریف می‌شود.

$$\text{Dean.No} = Re \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1-3)$$

طبق تعریف مشخص است که با افزایش شعاع انحنای، عدد دین کاهش یافته و این امر موجب می‌شود که در یک عدد رینولدز برابر دو عدد دین متفاوت به دست آید. طبق تحلیل سیالاتی مشخص شده است که در اعداد دین بالاتر به دلیل به وجود آمدن جریان‌های ثانویه بیشتر انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ این نکته توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به مصطفی محمودی و همکاران [۴۸] اشاره کرد؛ در این بررسی که بر روی تأثیر انحنای کویل بر انتقال حرارت انجام گرفته است آن‌ها اشاره داشتند که در اعداد دین بالاتر به دلیل به وجود آمدن جریان ثانویه مومنتوم جریان سیال در نزدیکی دیواره

لوله افزایش یافته و این مومنتوم بالاتر در نزدیکی سطح لوله موجب افزایش انتقال حرارت از سطح شده است. در این پایان نامه نیز این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

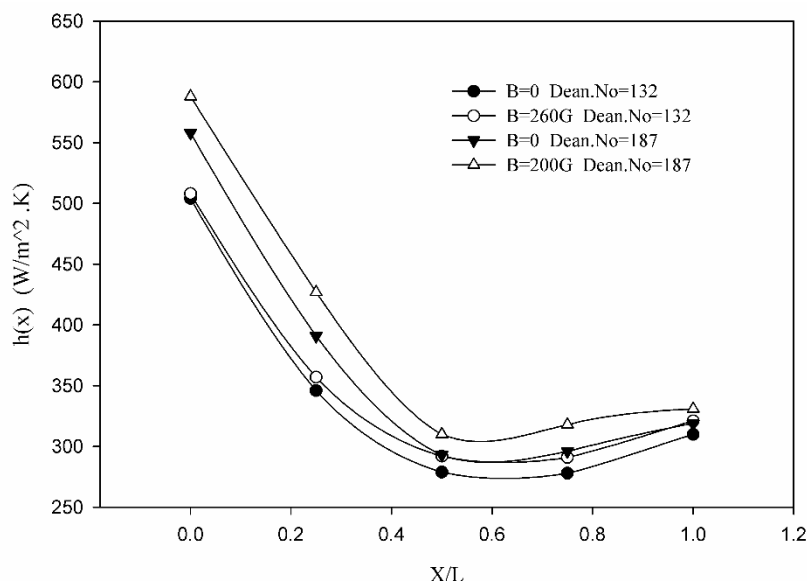
در اولین مقایسه بین لوله‌ها با دو عدد دین متفاوت در شکل (۳-۲۱) دمای بالک سیال به شکل بی بعد شده، در عدد رینولدز ۶۶۰ و در راستای طولی ناحیه تست مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۳-۲۱) مقایسه دمای بالک بی بعد شده برای آب بین دو عدد دین متفاوت در رینولدز ۶۶۰

در شکل (۳-۲۱) مشخص است که در یک رینولدز برابر (۶۶۰) در حالتی که لوله با شعاع انحنا بزرگ مورد آزمایش قرار گرفته و عدد دین پایین تر بوده (۱۳۲) میزان حرارت جذب شده که همان دمای بالک سیال است، دارای مقادیر کمتری نسبت به حالت عدد دین بالاتر (۱۸۷) است؛ تشکیل جریان‌های ثانویه بیشتر و اختلاط بیشتر جریان در لوله با شعاع انحنای کمتر (عدد دین بالاتر) دلیلی بر این افزایش می‌باشد. البته این موضوع روشن است که با شار حرارتی برابر که بر هر دو لوله آزمایش اعمال شده قطعاً لوله بزرگ‌تر (عدد دین پایین‌تر) توان حرارتی کل بیشتری جذب کرده و نقاط دارای دمای بالک بیشتری خواهند بود، اما زمانی که بررسی دمایی به صورت بی بعد شده باشد، با توجه به این که اختلاف دمای ایجاد شده از ورودی تا خروجی

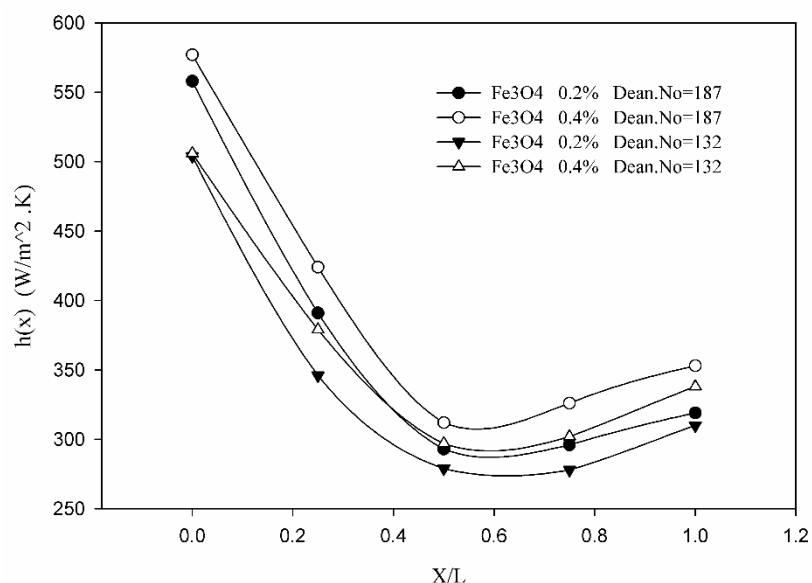
ناحیه تست هم در لوله با عدد دین کوچکتر افزایش خواهد یافت، جواب‌های به‌دست‌آمده منطقی خواهند بود. برای مقایسه افزایش انتقال حرارت در دو عدد دین متفاوت در شکل (۳-۲۲) به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی پرداخته شده است. این بررسی برای نانوسیال ۰٫۲ درصد در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی و هم‌چنین با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و در رینولدز ۶۶۰ انجام گرفته است.



شکل (۳-۲۲) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در رینولدز ۶۶۰ و دو عدد دین متفاوت برای نانوسیال ۰٫۲ درصد در حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت

از شکل (۳-۲۲) مشخص است که در یک عدد رینولدز برابر و در شرایط یکسان و استفاده از سیال یکسان در حالتی که عدد دین بالاتر بوده مقادیر $h(x)$ بیشتر ثبت شده است؛ زیرا با افزایش عدد دین جریانهای ثانویه بیشتر خواهد شد. همان طور که از قبل بیان شد برای افزایش عدد دین، هم می توان عدد رینولدز جریان را افزایش داد و هم می توان شعاع انحنای مسیر سیال را کاهش داد، که در شکل (۳-۲۲) برای دو شعاع انحنای متفاوت در رینولدز ۶۶۰ مقایسه انجام گرفته است؛ از این نمودار می توان این گونه برداشت کرد که برای بهبود انتقال حرارت شرایط هندسی تست (لوله آزمایش) که در اینجا روی عدد دین تأثیرگذار بوده، دارای اثر بسیار بالاتری نسبت به دیگر عوامل تأثیرگذار از جمله استفاده از نانوسیال، میدان

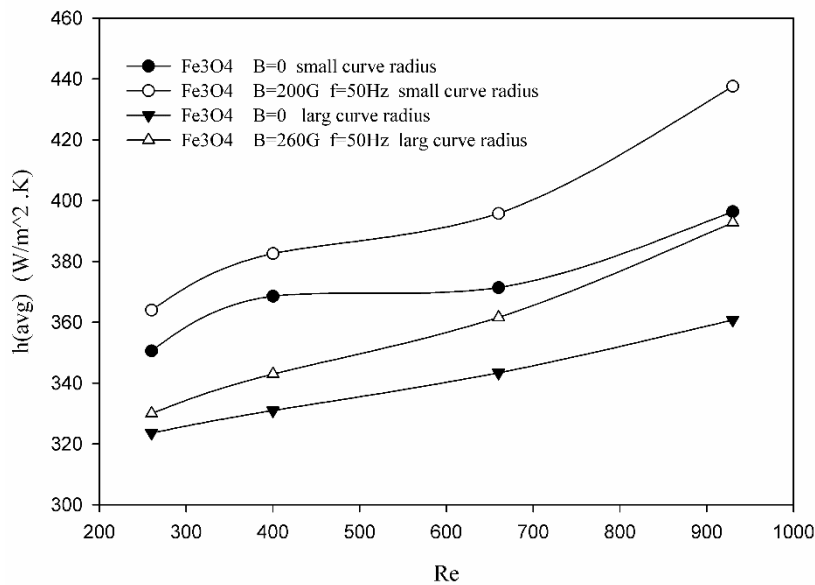
مغناطیسی و ... می باشد؛ به طوری که نانوسیال ۰/۲ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی و با عدد دین بالاتر دارای مقادیر $h(x)$ بیشتری نسبت به حالتی است که نانوسیال ۰/۲ درصد تحت میدان مغناطیسی ثابت قرار گرفته اما عدد دین پایین تری دارد. اکنون برای مقایسه اثر کسر حجمی و تغییر عدد دین در یک نمودار، در شکل (۳-۲۳) بررسی تغییرات $h(x)$ در حالت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در یک عدد رینولدز برابر و دو عدد دین متفاوت انجام شده است.



شکل (۳-۲۳) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی در رینولدز ۶۶۰ برای دو عدد دین متفاوت و دو نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی

در شکل (۳-۲۳) مشخص است که تأثیر افزایش کسر حجمی نانوسیال نیز بر افزایش انتقال حرارت به اندازه تأثیرگذاری تغییرات عدد دین (شکل هندسی لوله) نبوده است، به طوری که در یک عدد دین برابر افزایش کسر حجمی از ۰/۲ درصد به ۰/۴ درصد موجب افزایش قابل توجهی شده است، اما در حالتی که عدد دین افزایش یافته است مشاهده می شود که حتی با کسر حجمی پایین تر نانوسیال نیز در بیشتر نقاط برای $h(x)$ مقادیر بیشتری ثبت شده، هر چند که در نقاط انتهایی (رینولدزهای بالاتر) اثر کسر حجمی تقویت شده است ولی به طور میانگین تأثیر تغییرات عدد دین بیشتر مشاهده می شود. حال برای مقایسه بهتر عوامل

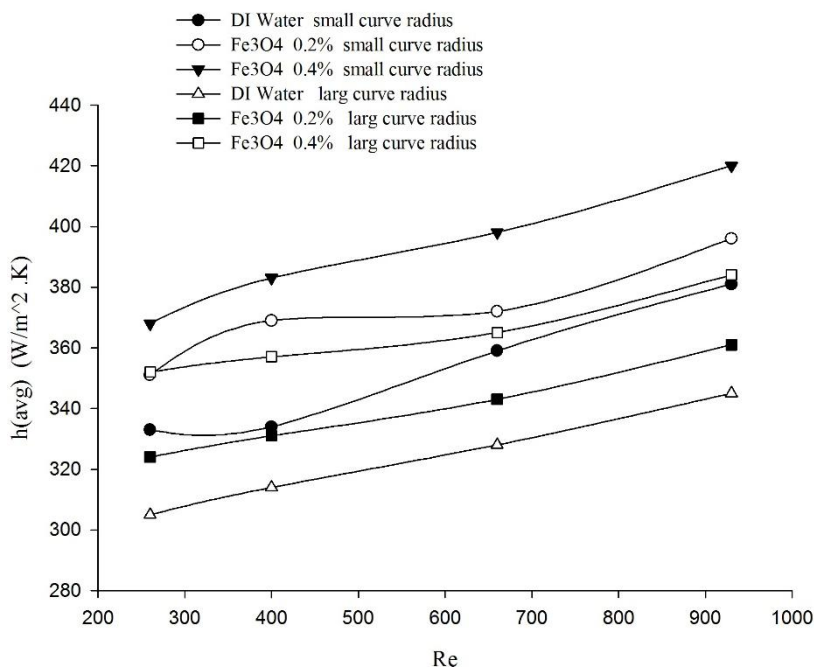
تأثیرگذار بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و هم‌چنین بررسی حالات بیشتر آزمایش از مقدار میانگین ضریب h استفاده خواهد شد. در شکل (۳-۲۴) تأثیر اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر روی نانوسیال برای افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آن در تمامی رینولدزها و در دو عدد دین متفاوت بررسی شده است.



شکل (۳-۲۴) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در اعداد رینولدز متفاوت برای نانوسیال ۰٫۲ درصد در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان متغیر در دو شعاع انحنا متفاوت

با توجه به شکل (۳-۲۴) مشخص است که حتی در بالاترین عدد رینولدز هم که در شکل (۳-۲۳) ابهام وجود داشت، شکل هندسی (افزایش عدد دین) تأثیر بیشتری نسبت به اعمال میدان مغناطیسی متغیر برای افزایش h_{avg} داشته و در شکل نمودار حالت نانوسیال ۰٫۲ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی و عدد دین بیشتر، بالاتر از حالت اعمال میدان متغیر و عدد دین کمتر قرار گرفته است. هم‌چنین مشخص است که در یک عدد رینولدز مشخص و در عدد دین برابر اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر افزایش h_{avg} تأثیر مستقیم داشته و در اعداد رینولدز بالاتر با توجه به تقویت اثر میدان متغیر شیب نمودار افزایشی بیشتر شده و فاصله دو نمودار در حالت‌های بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان متغیر بیشتر شده است.

برای مقایسه دو حالت نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد و افزایش انتقال حرارت این موارد نسبت به آب در دو شعاع انحنای متفاوت نتایجی به دست آمده که در شکل (۳-۲۵) نمایش داده شده است.



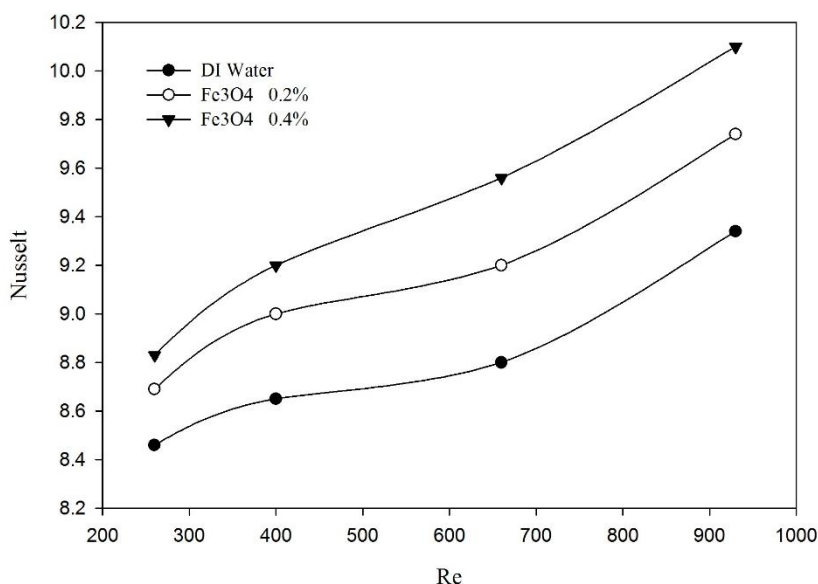
شکل (۳-۲۵) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی میانگین در تمامی رینولدزها و در دو شعاع انحنای متفاوت برای آب، نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی

در این مقایسه که در شکل (۳-۲۵) انجام شد مشخص است در حالتی که اعداد دین بالاتر است (شعاع انحنای کوچکتر) تأثیر این شکل هندسی لوله بسیار قابل توجه است به طوری که مشاهده می شود در تمامی رینولدزها حتی زمانی که آب در حالت عدد دین بالاتر مورد بررسی قرار گرفته است نمودار آن بالاتر از نانوسیال ۰/۲ درصد و عدد دین کمتر قرار دارد؛ یعنی تأثیر شدت گرفتن جریان های ثانویه و اختلاط بیشتر جریان بر اثر این افزایش، خیلی بیشتر از تأثیر استفاده از نانوسیال بوده است. ولی با افزایش کسر حجمی نانوسیال به ۰/۴ درصد برای لوله با عدد دین کمتر، افزایش h_{avg} بیشتر شده و در شکل قابل مشاهده است (افزایش کسر حجمی در عمل افزایش نانوذرات را در پی داشته که به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می انجامد)؛ هر چند که در این حالت هم دو نمودار در رینولدزهای بالا بسیار نزدیک به هم شده اند

(نمودار آب برای عدد دین بیشتر و نانوسیال ۰/۴ درصد برای عدد دین کمتر). هم‌چنین در تمامی نمودارها اثر مستقیم افزایش رینولدز در افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین دیده می‌شود (تأثیر دبی بیشتر سیال که منجر به افزایش سرعت عبور سیال در لوله می‌شود و این افزایش سرعت سیال با شدت گرفتن جریان ثانویه، باعث اختلاط بیشتر جریان و انتقال حرارت بهتر از سطح لوله به سیال وسط لوله خواهد شد).

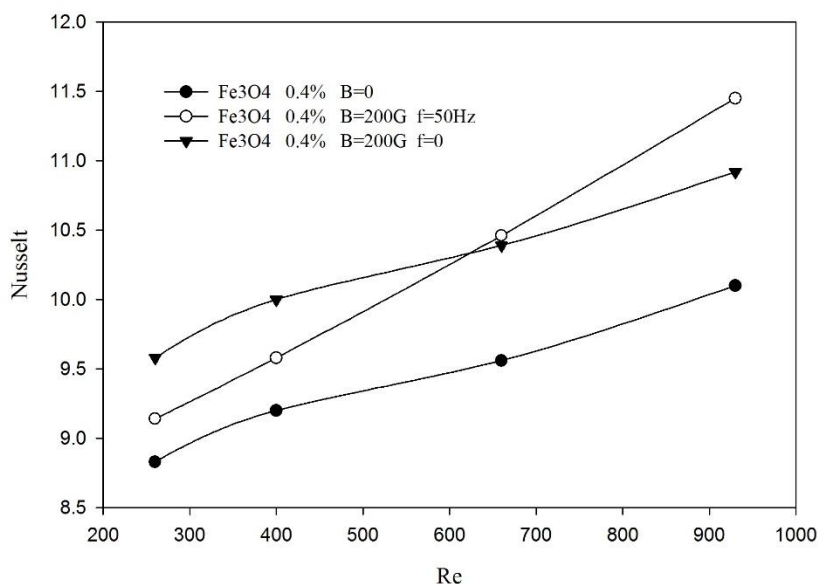
۳-۵ مقایسه عدد ناسلت در هر دو شعاع انحنای

حال برای بررسی دقیق‌تر و بهتر افزایش انتقال حرارت می‌توان از عدد بی بعد ناسلت استفاده کرد. طبق آنچه از قبل گفته شد با داشتن ابعاد هندسی لوله و خصوصیات سیال می‌توان به راحتی از روی h_{avg} عدد ناسلت را برای هر تست به دست آورد. به‌عنوان مثال در شکل (۳-۲۶) مقایسه روند افزایشی ناسلت بین آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی صرفاً برای مشخص شدن اثر افزایش کسر حجمی نانوسیال بر انتقال حرارت انجام شده است. با توجه به این که دمای محیط برای تست‌ها 25°C در نظر گرفته شده است برای تخمین زدن ضریب هدایت حرارتی سیال و به‌طور کلی خصوصیات ترموفیزیکی سیال از همین دما به‌عنوان دمای معیار استفاده شده است و در دمای 25°C مقادیر ضریب K برای آب، نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد به ترتیب 0.63 W/mK ، 0.642 W/mK و 0.657 W/mK محاسبه شده است. قطر لوله آزمایش در هر دو حالت (دو عدد دین) برابر و 16 mm می‌باشد. در نتیجه اعدادی که در رینولدزهای متفاوت با توجه به ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین برای ناسلت به‌دست آمده است در شکل (۳-۲۶) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۲۶) مقایسه تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در لوله کوچک

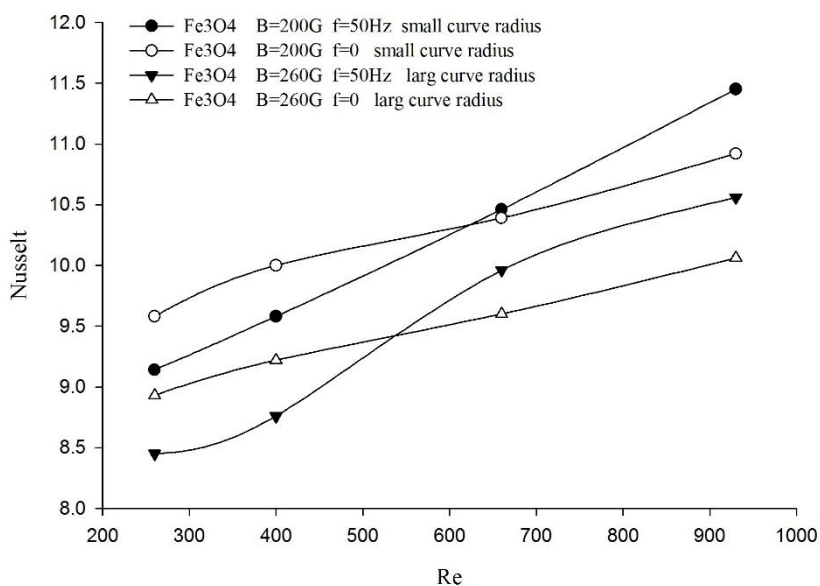
در شکل (۳-۲۶) مشخص است که در رینولدزهای کمتر تأثیر استفاده از نانوسیال و افزایش کسر حجمی نانوسیال در افزایش انتقال حرارت (افزایش عدد ناسلت) کمتر دیده می‌شود و با افزایش عدد رینولدز که موجب افزایش دبی عبوری و ایجاد اختلاط بیشتر در جریان می‌شود، این تأثیر تقویت شده است و مشخص است که فاصله بین تغییرات ناسلت در سیالات متفاوت بیشتر شده، به طوری که در بیشترین حالت در رینولدز ۹۳۰ عدد ناسلت برای آب ۹٫۳ و برای نانوسیال با کسر حجمی ۰٫۴ درصد این عدد به ۱۰٫۲ رسیده است؛ این بدین معنی است که در حالت استفاده از نانوسیال ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی به جای آب تقریباً به اندازه ۸٫۶ درصد افزایش انتقال حرارت به وجود آمده است که طبق آنچه گفته شد اثر تراکم نانوذرات و ایجاد هدایت حرارتی بالاتر در سیال موجب این افزایش می‌شود. حال برای مشخص شدن اثر اعمال میدان مغناطیسی روی نانوسیال بر افزایش انتقال حرارت (افزایش ناسلت) در شکل (۳-۲۷) بین نانوسیال ۰٫۴ درصد در حالت بدون میدان و اعمال میدان ثابت و متغیر مقایسه‌ای برای مشخص شدن تغییرات ناسلت انجام گرفته است.



شکل (۳-۲۷) مقایسه تغییرات عدد ناسلت با افزایش رینولدز در لوله کوچک برای نانوسیال ۰٫۴ درصد در حالات بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر

در شکل (۳-۲۷) مشخص است که با اعمال میدان مغناطیسی و ایجاد نیروی جاذبه روی نانوذرات در جهت موافق با نیروی سانتریفیوژ، که موجب جذب بیشتر ذرات سیال به دیواره میشود، در هر دو حالت (اعمال میدان ثابت و متغیر) مقادیر عدد ناسلت نسبت به حالت بدون میدان افزایش یافته است؛ به طوری که در بیشترین حالت اختلاف، در رینولدز ۹۳۰ عدد ناسلت برای حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی ۱۰٫۲ بوده است و در حالت اعمال میدان متغیر این عدد ۱۱٫۴۵ ثبت شده است. با احتساب این افزایش انتقال حرارت در نانوسیال به وسیله اعمال میدان مغناطیسی مشاهده می شود نسبت به حالتی که سیال آب بوده است و در رینولدز ۹۳۰ مقدار ناسلت ۹٫۳ به دست آمده، به میزان حدوداً ۲۳ درصد افزایش در انتقال حرارت (عدد ناسلت) رخ داده است؛ که این افزایش بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت در تمامی تست ها به شمار می رود. هم چنین اثر افزایش عدد رینولدز در بهبود اثرگذاری میدان مغناطیسی متغیر بر انتقال حرارت در شکل مشخص است و مشاهده می شود که از رینولدز حدود ۶۱۰ به بعد اثر میدان متغیر نسبت به میدان ثابت

بیشتر شده است. طبق آنچه از پیش گفته شد بیشترین مقادیر افزایش انتقال حرارت در حالتی که عدد دین بالاتری (شعاع انحنای کوچکتر) وجود دارد رخ می‌دهد. حال برای مقایسه تأثیر عدد دین در انتقال حرارت نانوسیال، برای دو مورد از حالت‌هایی که بیشترین اعداد ناسلت (بالاترین افزایش انتقال حرارت) را دارند، یعنی اعمال میدان ثابت و متغیر بر نانوسیال $0.4/0$ درصد، در دو شعاع انحنای متفاوت (دو عدد دین متفاوت در هر رینولدز برابر) مقایسه‌ای در شکل (۳-۲۸) انجام گرفته است.



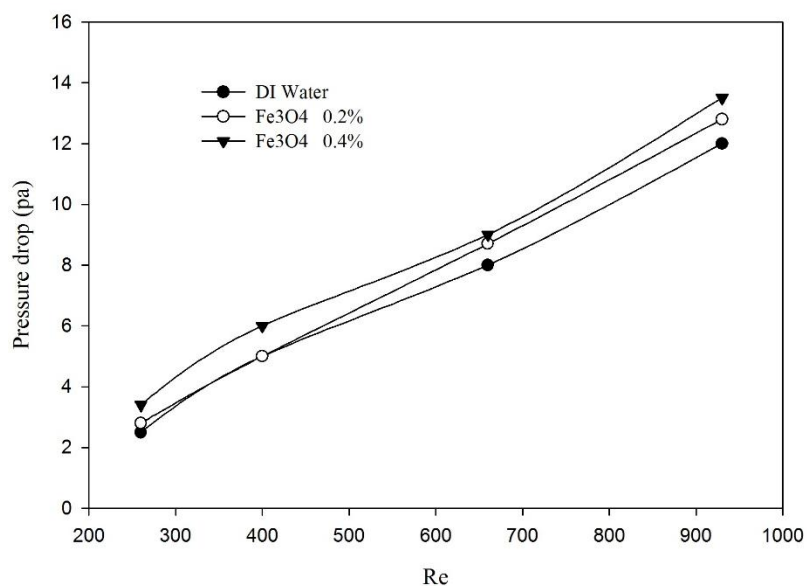
شکل (۳-۲۸) مقایسه روند تغییرات عدد ناسلت با افزایش رینولدز در دو شعاع انحنای متفاوت برای نانوسیال $0.4/0$ درصد در حالت اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر

همان‌طور که در شکل (۳-۲۸) مشخص است در شعاع انحنای بیشتر هم برای حالت اعمال میدان ثابت و هم میدان متغیر نمودار بالاتر از حالتی قرار گرفته است که عدد دین کمتری دارد (تأثیر بیشتر شکل هندسی لوله نسبت به اعمال میدان مغناطیسی)؛ به طوری که در حالت اعمال میدان ثابت بر نانوسیال $0.4/0$ درصد در لوله با عدد دین کمتر در رینولدز 930 مقدار عدد ناسلت $10.6/10$ ثبت شده در حالی که این مقدار برای لوله با عدد دین بیشتر $10.96/10$ بوده است؛ و هم‌چنین در حالت اعمال میدان متغیر بر نانوسیال برای لوله با عدد دین کمتر در رینولدز 930 عدد ناسلت $10.56/10$ و برای لوله با عدد دین بیشتر $11.45/10$ ثبت شده است؛ که

حدود ۸/۴ درصد افزایش انتقال حرارت در این حالت در لوله با عدد دین بیشتر نسبت به لوله با عدد دین کمتر مشاهده می‌شود. این مقایسه‌ها طبق آنچه در قبل هم اشاره شد نشانگر تأثیرگذاری بیشتر شکل هندسی لوله (عدد دین) نسبت به اعمال میدان مغناطیسی و استفاده از نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. لازم به ذکر است تأثیر نوع اعمال میدان مغناطیسی بر نانوسیال در رینولدزهای متفاوت نیز در شکل به راحتی قابل مشاهده است؛ مشخص است که همانند مقایسه انجام شده برای ضریب انتقال حرارت جابه جایی میانگین در اعداد رینولدز بالاتر تأثیر اعمال میدان متغیر بسیار تقویت شده است به طوری که نهایتاً بیشترین مقدار عدد ناسلت در رینولدز ۹۳۰ و با اعمال میدان متغیر برای حالات مختلف ثبت شده است.

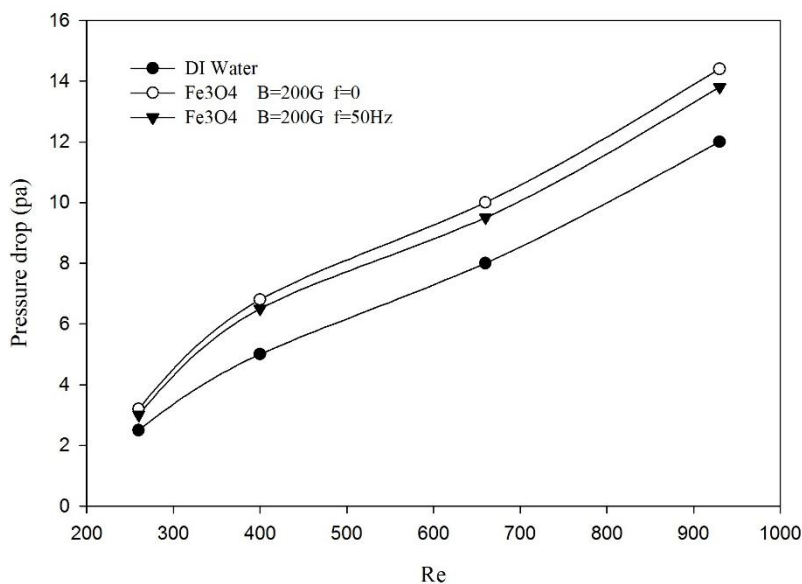
۳-۶ بررسی تغییرات افت فشار

در این قسمت از پایان نامه به موضوع افت فشار پرداخته شده است؛ آنچه مشخص است با افزایش کسر حجمی نانوسیال به دلیل افزایش ویسکوزیته سیال میزان افت بیشتر خواهد شد، هم‌چنین تأثیرات اعمال میدان مغناطیسی در تغییرات افت فشار باید مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۳-۲۹) افت فشار آب و نانوسیال ۰/۲ درصد و ۰/۴ درصد در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی و در لوله کوچک مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۳-۲۹) مقایسه افت فشار در لوله کوچک برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در رینولدزهای متفاوت

با توجه به شکل (۳-۲۹) مشخص است که افزایش کسر حجمی نانوسیال تأثیر مستقیم بر افزایش افت فشار داشته، چرا که با افزایش تراکم نانوذرات، ویسکوزیته سیال بیشتر خواهد شد. در نتیجه برای حالتی که از نانوسیال با کسر حجمی ۰٫۴ درصد استفاده شده است بیشترین افت فشار در شکل مشاهده می‌شود؛ به طوری که در بیشترین رینولدز (۹۳۰) افت فشار برای آب، نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد به ترتیب ۱۲ pa، ۱۲٫۸ pa و ۱۳٫۵ pa ثبت شده است. برای مشخص شدن اثر اعمال میدان مغناطیسی بر افزایش افت فشار در شکل (۳-۳۰) بر روی لوله کوچک و برای آب و نانوسیال ۰٫۴ درصد در حالت اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر بررسی انجام گرفته است.

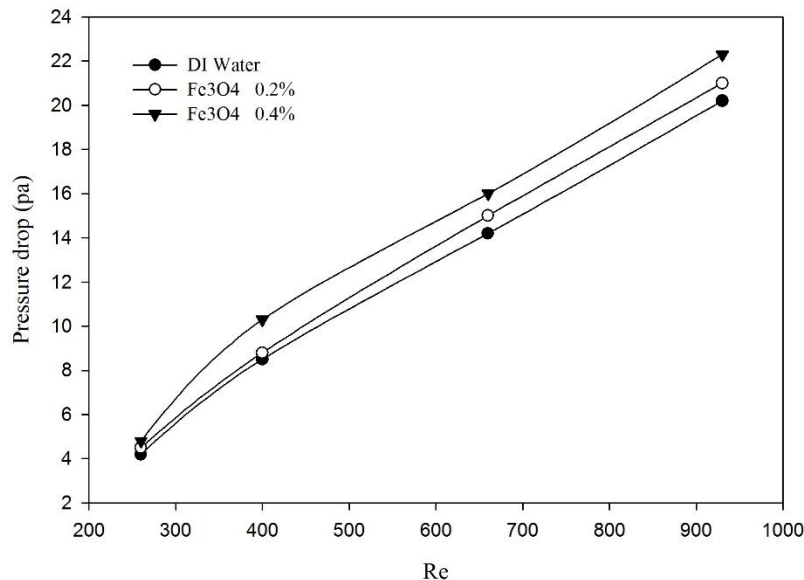


(۳-۳۰) مقایسه افت فشار در لوله کوچک برای آب و نانوسیال ۴٪ در صد با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر در

رینولدزهای متفاوت

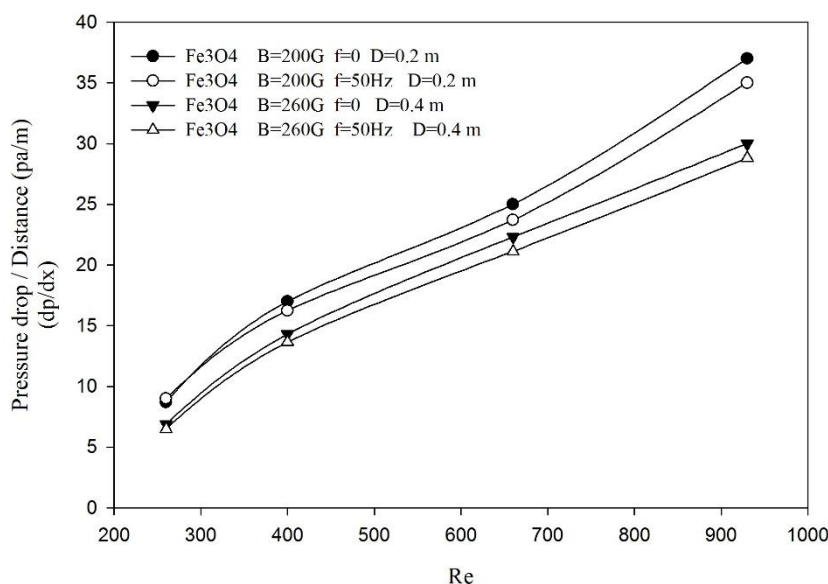
در شکل (۳-۳۰) مشخص است که با اعمال میدان مغناطیسی به طور کلی افت فشار نسبت به حالت بدون میدان نانوسیال بیشتر می شود (با اعمال میدان مغناطیسی و نزدیک شدن نانوذرات به دیواره لوله با توجه به شرط عدم لغزش در دیواره، به نوعی ویسکوزیته بین لایه های سیال افزایش می یابد)؛ اما نکته مهم تر نحوه اعمال میدان مغناطیسی است که با توجه به شکل بالا با اعمال میدان ثابت بیشترین افت فشار رخ داده است، در حالی که با اعمال میدان متغیر به خصوص در رینولدز بالاتر افت فشار مقداری نسبت به اعمال میدان ثابت کاهش یافته که در شکل قابل مشاهده است. این امر نیز دلیلی بر اثبات تأثیرگذاری بهتر میدان مغناطیسی متغیر در رینولدزهای بالاتر می باشد که بنا به آنچه گفته شد در سرعت های بالاتر از سیال فرکانس میدان متغیر برای لحظه ای نانو ذرات را از دیواره آزاد می کند و موجب کمتر شدن اصطکاک می شود، در حالیکه برای میدان ثابت نانوذرات به طور ثابت در مسیر عبور به دیواره جذب میشوند. هم چنین برای لوله بزرگ افت فشار با توجه به کاهش در عدد دین مقادیر دیگری خواهد داشت؛ در شکل (۳-۳۱) افت فشار در

این حالت برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی و در رینولدزهای متفاوت بررسی شده است.



شکل (۳-۳۱) مقایسه افت فشار در لوله بزرگ برای آب و نانوسیال ۰٫۲ درصد و ۰٫۴ درصد بدون اعمال میدان مغناطیسی در رینولدزهای متفاوت

با توجه به شکل (۳-۳۱) مشخص است که با بزرگ شدن شعاع انحنا لوله افت فشار با افزایش روبه‌رو شده و مقادیر بیشتری ثبت شده است؛ اما این افزایش به دلیل افزایش طول مؤثر لوله رخ داده است، یعنی به دلیل اینکه سیال مسیر بیشتری طی کرده، افت فشار هم بیشتر شده است. بنابراین این مقایسه برای افت فشار در دو عدد دین متفاوت منطقی به نظر نمی‌رسد. در نتیجه افت فشار در هر لوله را می‌توان بر طول مؤثر طی شده در همان لوله تقسیم کرد ($\frac{dp}{dx}$) که با توجه به اینکه شعاع انحنا در لوله بزرگ دو برابر شده پس طول طی شده هم دو برابر خواهد شد و طبیعتاً مقدار ($\frac{dp}{dx}$) نصف خواهد شد. شکل (۳-۳۲) این مقایسه دقیق بین افت فشارها در دو لوله با شعاع انحنای متفاوت را در رینولدزهای مختلف نشان می‌دهد. در این شکل بین دو حالت که با توجه به توضیحات قبل بیشترین افزایش انتقال حرارت و بیشترین افت فشار را دارند، یعنی نانوسیال ۰٫۴ درصد تحت اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متغیر، مقایسه انجام گرفته است.



شکل (۳-۳۲) مقایسه افت فشار در دو شعاع انحنای متفاوت برای نانوسیال ۴/۰ درصد تحت تأثیر میدان مغناطیسی ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت

مطابق آنچه در شکل (۳-۳۲) مشخص شده، با افزایش عدد دین افت فشارها کاهش یافته است؛ در هر دو حالت اعمال میدان، هم میدان ثابت و هم میدان متغیر، در تمامی رینولدزها افت فشار در لوله بزرگ کمتر شده است. همان طور که اشاره شد میزان طولی که سیال در داخل خم بزرگتر طی می کند، دو برابر مسیر طی شده در لوله کوچک می باشد ولی با این مقایسه که در شکل بالا انجام شده مشخص می شود که افت فشار پس از اینکه بر طول مسیر طی شده تقسیم شده است مقدار کمتری دارد. به طوری که در رینولدز ۹۳۰ که بیشترین افت فشار وجود دارد برای لوله با عدد دین کمتر این مقدار (۲۸/۸ pa/m) بوده اما این رقم برای لوله با عدد دین بیشتر (۳۵ pa/m) ثبت شده است؛ بنابراین می توان گفت که تأثیر عدد دین در افت فشار به صورت مستقیم بوده است. قبلاً اشاره شد که با افزایش عدد دین جریان های ثانویه افزایش می یابد، ولی با توجه به مطالب ذکر شده، این نکته روشن شد که با اینکه ایجاد جریان ثانویه باعث افزایش انتقال حرارت می شود اما افت فشار را هم در جریان سیال افزایش می دهد. البته نحوه تأثیرگذاری اعمال میدان مغناطیسی هم در ایجاد افت فشار بیشتر قابل توجه است که از قبل به آن اشاره شد.

۳-۷ اهمیت بازدهی حرارتی و بازدهی هیدرودینامیکی

در این تحقیق اثر استفاده از نانوسیال Fe_3O_4 در دو کسر حجمی متفاوت و تحت تأثیر دو نوع میدان مغناطیسی ثابت و متغیر به جای آب، بر بهبود انتقال حرارت در داخل یک لوله مسی با خم یوشکل مورد بررسی قرار گرفت. از نظر هندسه شکل نیز دو لوله با شعاع انحنای متفاوت (که موجب به وجود آمدن دو عدد دین متفاوت در یک رینولدز برابر می‌شود) بررسی شد. در این قسمت از پایان‌نامه در مورد میزان تأثیرگذاری استفاده از نانوسیال و بهبود بخشیدن بر انتقال حرارت توسط نانوسیال در زمان ایجاد کنترل فعال روی آن با اعمال میدان مغناطیسی بررسی انجام خواهد شد؛ هم‌چنین میزان کارآمدی لوله‌های خمیده با شعاع انحنای متفاوت در مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به نتایج قبل مشخص شد که استفاده کردن از نانوسیال Fe_3O_4 و اعمال میدان‌های مغناطیسی خارجی بر آن، علاوه بر این که نقش بسیار تأثیرگذاری در ایجاد بهبود در انتقال حرارت دارد از طرفی بر افت فشار جریان سیال نیز مؤثر است؛ به طوری که هرگونه اعمال میدان مغناطیسی باعث ایجاد افزایشی چشم‌گیر در افت فشار جریان خواهد شد. حال باید بررسی کرد که در هر سیستمی کدام فاکتور مهم‌تر است (بهبود انتقال حرارت و افزایش افت فشار) و کدام یک قابلیت جبران را دارد، به نحوی که با اعمال تغییراتی در سیستم کمبود آن جبران شود؛ به عنوان مثال در بسیاری از سیستم‌ها و مبدل‌های حرارتی امکان استفاده از پمپی با فشار کاری و هد بالاتر وجود دارد، یا می‌توان با اضافه کردن ایستگاهی در ناحیه بعد از افت فشار و افزودن یک پمپ جدید در آنجا فشار سیال را به میزان لازم افزایش داد. هم‌چنین ممکن است در بعضی موارد فقط بهبود انتقال حرارت مدنظر باشد و افت فشار اصلاً مورد بحث قرار نگیرد.

۳-۸ معرفی بازدهی کلی

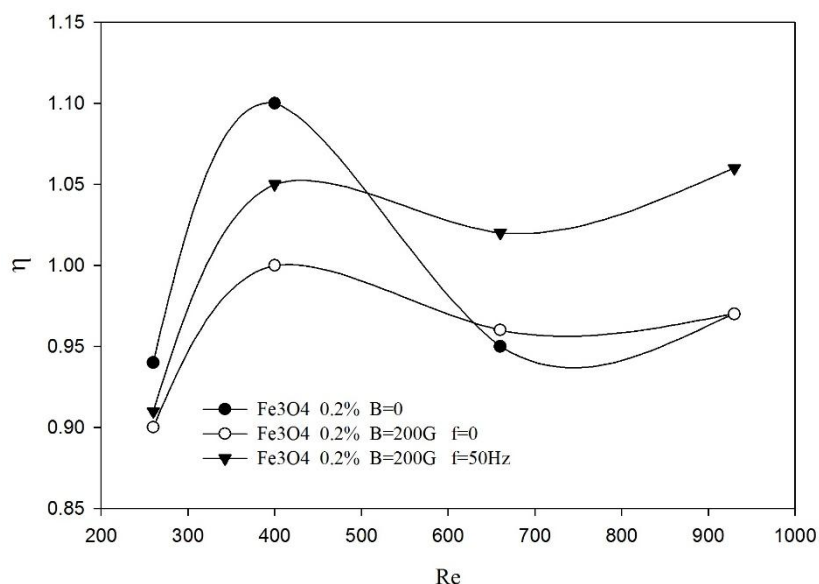
اینک با توجه به این که در این بررسی آزمایشگاهی استفاده از نانوسیال و ایجاد انحنا در مسیر لوله مورد تحقیق قرار گرفته است، طبق آنچه گفته شد باید میزان کارایی این روش با توجه به مفید بودن برای انتقال

حرارت و مضر بودن برای افت فشار تحت یک مقایسه کلی قرار گیرد. در بسیاری از مقالات و تحقیق‌ها [۳۶] و [۳۷] پس از مشخص شدن میزان افزایش انتقال حرارت و هم‌چنین افزایش افت فشار در تمامی تست‌ها، یک فرمول بازدهی کلی برای سیستم در این روش تعریف می‌شود که بر اساس تغییرات در نانوسیال نسبت به آب می‌باشد؛ فرمول (۱-۴) نشان‌دهنده این تعریف می‌باشد.

$$\eta = \frac{h_{n.f}/h_{b.f}}{\Delta P_{n.f}/\Delta P_{b.f}} \quad \text{or} \quad \eta = \frac{Nu_{n.f}/Nu_{b.f}}{\Delta P_{n.f}/\Delta P_{b.f}} \quad (1-4)$$

با استفاده از این فرمول می‌توان یک تحلیل کلی برای محاسبه مفید بودن یا نبودن به کارگیری نانوسیال و یا اعمال کردن میدان مغناطیسی خارجی بر نانوسیال و عدم اعمال آن نتیجه‌گیری کرد. همان‌طور که اشاره شد تست‌ها بر روی دو لوله مسی با شعاع انحنای متفاوت انجام گرفته است؛ در فصل قبل مشاهده شد که کوچک کردن شعاع انحنای خم باعث افزایش یافتن عدد دین در لوله شد و در نتیجه آن جریان‌های ثانویه شدت بیشتری گرفته و انتقال حرارت افزایش یافت؛ اما از طرفی همین افزایش عدد دین باعث افزایش افت فشار گردید؛ پس در محاسبات فوق که برای یافتن حالت بهینه مبدل حرارتی در این تحقیق آزمایشگاهی انجام می‌گیرد باید اثر شعاع انحنای لوله هم به صورت جداگانه بررسی شود.

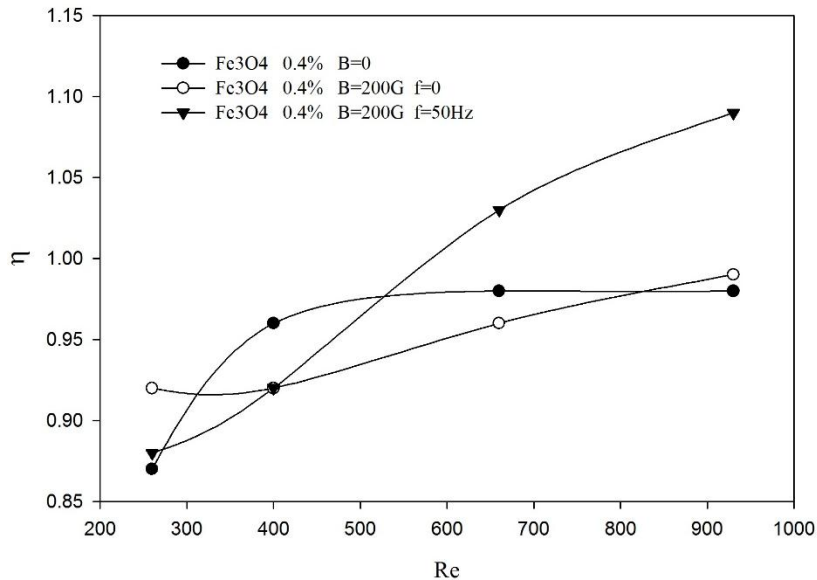
شکل (۱-۴) نشان‌دهنده مقایسه‌ای در مورد بازدهی نانوسیال ۰٫۲ درصد در سه حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی، اعمال میدان ثابت و میدان متغیر و هم‌چنین سیال آب در لوله کوچک می‌باشد. برای به دست آوردن بازدهی طبق تعریفی که در فرمول (۱-۴) انجام گرفت و با استفاده از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین h_{avg} در هر حالت محاسبه شده است.



شکل (۳-۳۳) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۲ درصد در لوله کوچک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۴-۱) مشخص است که در بسیاری از موارد که با اعمال میدان مغناطیسی افزایش چشم گیری در انتقال حرارت به وجود آمد، با همین روند افزایشی و با شیب بیشتری افت فشار در این موارد افزایش یافته است به طوری مشاهده می شود فقط در پنج نقطه روی نمودار عدد بازدهی سیستم بزرگ تر و مساوی یک می باشد و این در حالی است که در فصل قبل مشاهده شد که در تمامی موارد روی نمودار بالا میزان انتقال حرارت افزایش داشت. نکته قابل توجه در نمودار بالا نقطه ماکسیمم در نمودارهاست، مشخص است که در هر سه حالت استفاده از نانوسیال ۰/۲ درصد نقطه ای که در آن بازدهی سیستم ماکسیمم است مربوط به رینولدز ۴۰۰ می باشد (به استثناء حالت اعمال میدان متغیر که بیشترین بازدهی در رینولدز ۹۳۰ رخ داده و برابر ۱/۰۶ است) این امر نشان دهنده این است که برای نانوسیال ۰/۲ درصد در رینولدز ۴۰۰ میزان افت فشار برای لوله کوچک کمترین مقدار بوده است، چراکه در فصل قبل مشاهده شد بیشترین افزایشها در انتقال حرارت در تمامی تستها در بیشترین عدد رینولدز یعنی ۹۳۰ اتفاق افتاد. در شکل

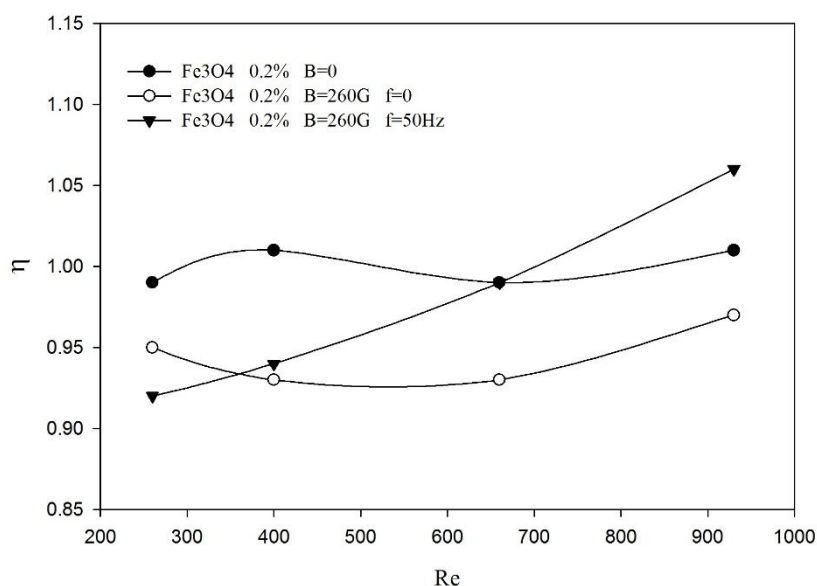
(۲-۴) برای مشخص شدن تأثیر کسر حجمی نانوسیال مقایسه مقادیر بازدهی کلی سیستم برای نانوسیال ۰/۴ انجام گرفته است.



شکل (۳-۳) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله کوچک برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۲-۴) مشخص است که برای نانوسیال ۰/۴ درصد در اکثر موارد و در بیشتر اعداد رینولدز که بررسی انجام شده، بازدهی سیستم کمتر از یک ثبت شده است و این بدان معناست که با افزایش کسر حجمی از ۰/۲ درصد به ۰/۴ درصد افت فشار نیز افزایش چشم‌گیری داشته است؛ چراکه در فصل قبل مشخص شد که افزودن کسر حجمی تأثیر بسیار زیادی بر بهبود انتقال حرارت داشته (تأثیری بسیار بیشتر از اعمال میدان مغناطیسی) پس عامل کاهش بازدهی سیستم تنها افزایش افت فشار در این حالت نسبت به حالت قبل (نانوسیال ۰/۲ درصد) می‌باشد. هم‌چنین برخلاف حالت قبل بیشترین بازدهی برای هر سه نمودار در شکل (۲-۴) در بالاترین عدد رینولدز ثبت شده است؛ که این امر به دلیل بالا رفتن میزان نانوذرات موجود در نانوسیال با کسر حجمی بالاتر می‌باشد؛ همان‌طور که قبلاً اشاره شد بالا رفتن کسر حجمی نانوسیال در اعداد رینولدز پایین می‌تواند موجب اغتشاش بیشتر و افزایش ویسکوزیته سیال شود که خود

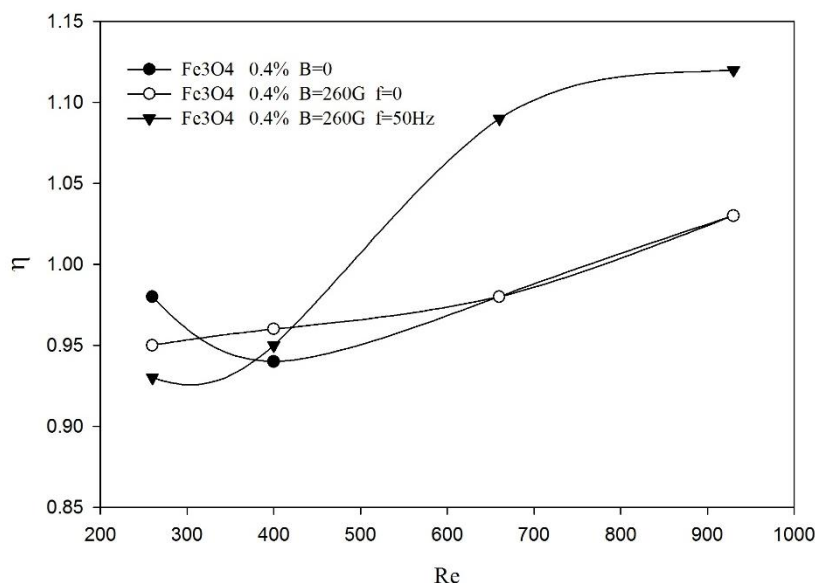
موجب افت فشار بیشتر می شود و حتی به دلیل پایین بودن سرعت عبور سیال و ناتوانی در جذب و انتقال بیشتر حرارت جذب شده از دیواره، مقاومت در برابر نیروی سانتریفیوژ وارد بر سیال ایجاد کند که موجب کاهش در انتقال حرارت نیز خواهد شد. از این رو با بالا رفتن کسر حجمی نانوسیال مقدار ماکسیمم بازدهی در رینولدز بالا رخ می دهد. اینک برای مشخص شدن تاثیرات شعاع انحنای لوله در شکل (۳-۴) به بررسی بازدهی کلی برای استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۰٫۲ درصد در لوله با شعاع انحنای بزرگتر پرداخته شده است.



شکل (۳-۴) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰٫۲ درصد در لوله بزرگ برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت

با توجه به شکل (۳-۴) مشخص است هنگامی که از لوله با شعاع انحنای بزرگتر استفاده شده است مقادیر بازدهی کلی سیستم به طور متوسط برای نانوسیال ۰٫۲ درصد کمتر شده است. این در حالی است که در فصل قبل مشاهده شد که افت فشارها در لوله بزرگ کمتر شده است اما از طرف دیگر در انتقال حرارت هم کاهش چشم گیری نسبت به لوله با عدد دین بالاتر اتفاق افتاد و چون نرخ کاهش در انتقال حرارت بیشتر است لذا بازدهی کلی پایین آمده است؛ به طوری که مشاهده می شود فقط در دو نقطه بازدهی بالاتر از یک

ثبت شده و بالاترین عدد هم مربوط به حالت اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر نانوسیال در رینولدز ۹۳۰ می باشد که بازدهی سیستم در این نقطه ۱/۰۶ به دست آمده است. برای مشخص شدن تأثیر کسر حجمی نانوسیال روی بازدهی کل در لوله با شعاع انحنای بزرگ نیز در شکل (۴-۴) مقایسه ای بین حالات مختلف در نانوسیال ۰/۴ درصد انجام گرفته است.



شکل (۳-۳) مقایسه بازدهی نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله بزرگ برای سه حالت بدون میدان مغناطیسی و اعمال میدان ثابت و متغیر در رینولدزهای متفاوت

در شکل (۴-۴) مشخص است که در لوله با شعاع انحنای بزرگ برای نانوسیال ۰/۴ درصد در حالت اعمال میدان مغناطیسی متغیر برای دو عدد رینولدز بالا بازدهی سیستم بالاترین مقادیر را در تمامی تست ها دارا می باشد. این امر به دلیل افزایش تراکم نانوذرات و هم چنین تأثیرپذیری بهتر نانوسیال از میدان متغیر به دلیل بالا رفتن سرعت عبور سیال که طبق آنچه گفته شد فرکانس ایجاد شده در راستای جهت گیری نانوذرات به سمت دیواره لوله بوده و سبب جذب بهتر حرارت از سطح شده و هم چنین دفع ذرات از سطح داغ با فرکانس اعمالی باعث افزایش بیشتر در انتقال حرارت شده است. از قبل اشاره شد که در لوله با عدد دین پایین تر افت فشار کمتر از لوله با عدد دین بالاتر می شود. این کاهش افت فشار با نرخ رخ داده که کمبود در کاهش

انتقال حرارت نسبت به لوله کوچک را جبران کرده است، به طوری که بیشترین عدد بازدهی به میزان ۱/۱۲ در رینولدز ۹۳۰ و با اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر نانوسیال ۰/۴ درصد در لوله بزرگ رخ داده است. این واقعیت می‌تواند گواهی به تأثیرگذاری بیشتر شکل هندسی مبدل حرارتی نسبت به تمامی عوامل دیگر از جمله استفاده از نانوسیال با کسر حجمی بالاتر و اعمال میدان مغناطیسی باشد.

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱ نتیجه گیری

به طور کلی در این بررسی آزمایشگاهی عوامل تأثیرگذار بر بهبود انتقال حرارت مبدل حرارتی با هم مقایسه شد. در نهایت مشخص شد که بیشترین بازدهی حرارتی در حالت اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر نانوسیال ۴/۰ درصد در لوله با شعاع انحنای کمتر و در رینولدز ۹۳۰ رخ داده است و این در حالی است که این گزینه لزوماً بهترین انتخاب در تمام شرایط نیست زیرا طبق آنچه از قبل گفته شد در بسیاری از سیستم‌ها ممکن است افت فشار قابل جبران نباشد و افت فشار در این حالت تقریباً بیشترین افت فشار در تمامی حالات به حساب می‌آید. همان طور که در بازدهی کلی مشخص شد حالت بهینه در لوله با شعاع انحنای بزرگ‌تر رخ داده است. حال باید بررسی شود که در سیستم مبدل حرارتی امکان استفاده از لوله بزرگ‌تر وجود دارد یا نه. تنها چیزی که به طور قطعی از این تحقیق به دست آمده است، میزان تأثیرگذاری هر کدام از عوامل افزایش دهنده انتقال حرارت می‌باشد، به طوری که مشخص شد در جهت افزایش انتقال حرارت، عوامل تغییر شکل هندسی مبدل، افزایش کسر حجمی نانوسیال و در رتبه سوم اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب دارای بیشترین تأثیر می‌باشند. در نتیجه می‌توان گفت برای طراحی یک مبدل حرارتی بهترین گزینه در ابتدا استفاده از ایجاد تغییر در هندسه مبدل می‌باشد، همان طور که در اکثر مبدل‌های گذشته از طولانی کردن مسیر عبور سیال مانند پیچیدن کوئل و یا افزودن فین برای افزایش سطح انتقال حرارت استفاده می‌کردند. در صورتی که امکان استفاده از این عامل وجود نداشته باشد مانند بسیاری از مبدل‌های امروزی از عواملی همچون استفاده از نانوسیال و یا ایجاد محیط پروس استفاده می‌شود. نهایتاً در صورت امکان با اعمال یک میدان مغناطیسی بر روی مبدل حرارتی شرایط کنترل اکتیو سیستم به وجود می‌آید که می‌توان با تغییر در شدت میدان مغناطیسی و یا تغییر در فرکانس اعمالی به مقادیر متفاوتی در میزان بهبود انتقال حرارت برای رینولدزهای مختلف جریان دست یافت. با توجه به اینکه در این تحقیق فقط یک شدت میدان مغناطیسی و دو کسر حجمی برای نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است نتایج به این صورت بوده که تأثیر افزایش کسر

حجمی در اکثر موارد غالب بر اعمال میدان بوده است؛ این در حالی است که طبق آنچه از قبل گفته شد بنا به نتایج دیگر تحقیقات انجام گرفته در صورت تقویت شدت میدان مغناطیسی اعمالی میزان اثرگذاری آن بر افزایش انتقال حرارت تقویت خواهد شد. برای جمع‌بندی این تحقیق می‌توان با بررسی بازدهی حرارتی و هیدرودینامیکی، نتایج را به صورت زیر بیان کرد:

۱- با افزایش کسر حجمی نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی در هر دو شعاع انحنای لوله آزمایش انتقال حرارت بیشتر شده و بازدهی حرارتی افزایش می‌یابد.

۲- بیشترین افزایش در بازدهی حرارتی برای لوله با شعاع انحنای کوچک و با اعمال میدان مغناطیسی بر روی نانوسیال ۰/۴ درصد در بالاترین عدد رینولدز رخ داده که نسبت به آب حدود ۲۳ انتقال حرارت (عدد ناسلت) افزایش داشته است.

۳- افزایش عدد دین بر روی انتقال حرارت تأثیر مثبت دارد و با افزایش جریان‌های ثانویه اختلاط جریان بیشتر شده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۴- ایجاد تغییر در عدد دین به دو صورت انجام می‌شود، تغییر دادن رینولدز جریان که با تنظیم دبی سیال امکان‌پذیر است، همچنین تغییر دادن شعاع انحنای لوله؛ در هر سیستمی ممکن است شرایط ایجاد یک تغییر وجود داشته باشد.

۵- افزایش عدد رینولدز به طور مستقیم بر انتقال حرارت تأثیرگذار بوده و در تمامی حالات بیشترین عدد ناسلت و یا ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین، در عدد رینولدز ۹۳۰ ثبت شده است.

۶- در بالاترین عدد رینولدز با اعمال میدان مغناطیسی متغیر به دلیل افزایش اختلاط جریان در نزدیکی پایه‌های الکترومگنت‌ها انتقال حرارت بیش از همه حالت‌ها افزایش دارد.

۷- افزایش عدد دین باعث کاهش در بازدهی هیدرودینامیکی سیستم می‌شود، به طوری که بیشترین افت فشار در بالاترین عدد رینولدز و کوچک‌ترین شعاع انحنا رخ داده است.

۸- با توجه به ارائه بازدهی کلی مشخص شد که در بسیاری از سیستم‌ها که افت فشار در آن‌ها دارای اهمیت است، استفاده از نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی مشکل‌ساز خواهد شد.

۹- ایجاد تغییر در شکل هندسی مبدل (تغییر شعاع انحنا در این تحقیق) دارای بیشترین تأثیر در بازدهی حرارتی بوده و به‌عنوان ساده‌ترین روش در صورت امکان توصیه می‌شود.

۲-۴ پیشنهادها

- بررسی آزمایش‌ها با نانوسیالات و یا نانوفروسیالات دیگر
- بررسی آزمایش‌ها با ایجاد ارتعاش سطح در لوله آزمایش
- بررسی آزمایش‌ها با اعمال میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های متفاوت
- بررسی آزمایش‌ها با اعمال فرکانس‌های متفاوت در میدان مغناطیسی
- بررسی آزمایش‌ها با اعمال میدان ثابت بر روی قوس بیرونی لوله به‌صورت آهنربای نواری
- بررسی آزمایش‌ها در اعداد رینولدز بالاتر و جریان توربولانت

[١] Ramesh K. Shah and Dušan P. Sekulic, 2003, **Fundamentals of Heat Exchanger Design**, Published by JohnWiley&Sons,Inc.,Hoboken,NewJersey, Published simultaneously in Canada. P: 12-47

[٢] Choi and Estman. 1995, **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. ASME-publications-Fed, 231: p. 99-106. USA

[٣] D.Zhou. 2004, **Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47: p 3109-3117.

[٤] N.Putra, W. Roetzel, S.K. Das. 2003, **Natural convection of nano-fluids**, Heat and Mass Transfer, 39: p 775-785.

[٥] قدیری یزدی م، (١٣٩٤)، پایان‌نامه ارشد، بررسی تجربی اثر نانوسیال مغناطیسی بر بازده کلکتور فتوولتاییک صفحه تخت تحت تاثیر میدان مغناطیسی، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک (گروه مهندسی مکانیک)، دانشگاه صنعتی شاهرود

[٦] Hong, K.T-K.Hong, and H.-S. Yang. 2006, **Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles**. Applied Physics Letters, 88: p. 31-91

[٧] Ho C, Liu W, Chang Y, Lin C. 2010, **Natural convection heat transfer of aluminawater nanofluid in vertical square enclosures an experimental study**. Int J Therm Sci; 49:1345–53.

[٨] Khanafer K, Vafai K. 2011. **A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids**. Int J Heat Mass Transf; 54: 4410–28

[٩] Xuan Y, Roetzel W. 2000. **Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids**. Int J Heat Mass Transfer; 43: 3701–7

[١٠] O'Hanley, H, Buongiorno, J, McKrell, T, Hu, L-w. 2011. **Measurement and model correlation of specific heat capacity of water-based nanofluids with silica, alumina and copper oxide nanoparticles**. In: ASME 2011 international mechanical engineering congress and exposition; p. 1209–14.

[١١] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. 1993. **Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles**. NetsuBussei; 7: 227–33

[١٢] Minakov AV, Rudyak VY, Guzei DV, Lobasov AS. 2015. **Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid based on water and copper oxide particles in a cylindrical channel**. High Temp; 53: 246–53.

[١٣] Das SK, Choi SU, Patel HE. 2006. **Heat transfer in nanofluids—a review**. Heat Transfer Eng; 27: 3–19.

- [١٤] Wang XQ, Mujumdar AS. 2008. **A review on nanofluids – part II: experiments and applications**. Braz J Chem Eng; 25:631–48.
- [١٥] Beck MP, Yuan Y, Warriar P, Teja AS. 2009. **The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids**. J Nanopart Res; 11:1129–36.
- [١٦] Shima PD, Philip J. 2014. **Role of thermal conductivity of dispersed nanoparticles on heat transfer properties of nanofluid**. Ind Eng Chem Res; 53:980–8.
- [١٧] Hwang Y, Park HS, Lee JK, Jung WH. 2006. **Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids**. Curr Appl Phys; 6(Supplement 1): 67–71.
- [١٨] Patel HE, Sundararajan T, Das SK. 2010. **An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids**. J Nanopart Res; 12:1015–31.
- [١٩] J.M Garnett, 1906, **Colours in metal glasses and in metallic solutions**, Philosophical Transaction of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a Mathematical or Physical Character, pp. 237-288.
- [٢٠] R. Hamilton and O. Crosser, 1962. **Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems**, Industrial & Engineering chemistry fundamentals, 1: pp. 187-191
- [٢١] Nguyen C, Desgranges F, Roy G, Galanis N, Mare T, Boucher S, et al, 2007. **Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon**. Int J Heat Fluid Flow; 28:1492–1506.
- [٢٢] Namburu P, Kulkarni D, Dandekar A, Das D. 2007. **Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids**. Micro Nano Lett IET; 2:67–71.
- [٢٣] Tavman I, Turgut A, Chirtoc M, Schuchmann H, Tavman S. 2008. **Experimental investigation of viscosity and thermal conductivity of suspensions containing nanosized ceramic particles**. Arch Mater Sci; 100.
- [٢٤] Davood Toghraie, S. M. Alempour and Masoud Afrand, 2016. **Experimental determination of viscosity of water based magnetite nanofluid for application in heating and cooling systems**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 417:243-248
- [٢٥] Williams W, Buongiorno J, Hu LW. 2008, **Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes**. J Heat Transf; 130:412-420.
- [٢٦] L. Wang, et al., 2016. **Investigation on viscosity of Fe₃O₄ nanofluid under magnetic field**, Int. Commun. Heat Mass Transf, 72: 23-28
- [٢٧] Mohammad Amani, et al. 2017, **Experimental study on viscosity of spinel-type manganese ferrite nanofluid in attendance of magnetic field**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 428: 457–463
- [٢٨] Abdullah A.A.A. Alrashed, Maryam Soltanpour Gharibdousti, Marjan Goodarzi, Leticia Raquel de Oliveira, Mohammad Reza Safaei, Enio Pedone Bandarra Filho, 2018, **Effects on**

thermophysical properties of carbon based nanofluids:Experimental data, modelling using regression, ANFIS and ANN, International Journal of Heat and Mass Transfer 125: 920–932

[۳۹] Arash Karimipour, Seyed Amin Bagherzadeh, Marjan Goodarzi, Abdulwahab A. Alnaqi, Mehdi Bahiraei, Mohammad Reza Safaei, Mostafa Safdari Shadloo, 2018, **Synthesized CuFe₂O₄/SiO₂ nanocomposites added to water/EG:Evaluation of the thermophysical properties beside sensitivity analysis &EANN**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 127: 1169–1179

[۳۰] Erfan Khodabandeh, Mohammad Reza Safaei, Soheil Akbari, Omid Ali Akbari, Abdullah A.A.A. Alrashed, 2018, **Application of nanofluid to improve the thermal performance of horizontal spiral coil utilized in solar ponds: Geometric study**, Renewable Energy, 122: 1-16

[۳۱] Krichler M, Odenbach S. 2013, **Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials; 326: 85–90

[۳۲] Li Q, Xuan Y, Wang J. 2005, **Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids**. Experimental Thermal and Fluid Science; 30:109–16.

[۳۳] Innocent Nkurikiyimfura, 2013, **Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 21: 548–561

[۳۴] Bishop KJM, Wilmer CE, Soh S, Grzybowski BA.2009, **Nanoscale forces and their uses in self-assembly**. Small; 5:1600–30.

[۳۵] Hong KS, Hong TK, Yang HS. 2006, **Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles**. Applied Physics Letters; 40: 3164-3171

[۳۶] Mohammad Goharkhah, et al. 2015, **Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field**. Powder Technology, 274: 258–267

[۳۷] Mohammad Goharkhah, et al, 2016, **Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field**. International Journal of Thermal Sciences, 99: 113-124

[۳۸] Mehdi Bahiraei and Morteza Hangi. 2013, **Investigating the efficacy of magnetic nanofluid as a coolant in double-pipe heat exchanger in the presence of magnetic field**. Energy Conversion and Management, 76: 1125–1133

[۳۹] J. Wensel, B. Wright, D. Thomas, W. Douglas, B. Mannhalter, W. Cross, H. Hong, J. Kellar, P. Smith, W. Roy, 2008. **Enhanced thermal conductivity by aggregation in heat transfer nanofluids containing metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes**, Appl. Phys. Lett. 92, issue 2.

[۴۰] P.D. Shima, J. Philip, 2009, **Tuning of thermal conductivity and rheology of nanofluids using an external stimulus**, J. Phys. Chem.94: 20097–20104.

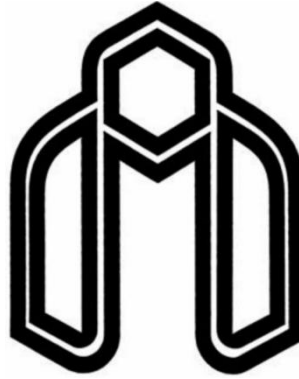
- [٤١] A. Karimi, S.S. Afghahi, H. Shariatmadar, M. Ashjaee, 2014, **Experimental investigation on thermal conductivity of MFe₂O₄ (M = Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field**, *Thermochim. Acta*, 598: 59–67.
- [٤٢] S. Valiallah Mousavi, et al. 2016, **The Influence of magnetic field on heat transfer of magnetic nanofluid in a sinusoidal double pipe heat exchanger**. *Chemical engineering research and design*, 113: 112-124
- [٤٣] M. Khoshvaght-Aliabadi, et al. 2016, **Thermal-hydraulic characteristics of plate-fin heat exchangers with corrugated/vortex-generator plate-fin (CVGPF)**, *Heat Mass Transf.* 52: 819–828.
- [٤٤] A. Hosseinian, et al. 2018, **Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coefficient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger**, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90: 275–285
- [٤٥] Adrian Bijan, 2013, **Convection heat transfer**, fourth edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada.
P: 110-120
- [٤٦] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, 1996, **Introduction to Heat Transfer**, Third ed. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [٤٧] S.J. Kline and F. McClintock, 1953. **Describing uncertainties in single-sample experiments**, *Mechanical Engineering*, 75: 3-8.
- [٤٨] Mostafa Mahmoudi, et al. 2017, **Experimental and numerical investigation on forced convection heat transfer and pressure drop in helically coiled pipes using TiO₂/water nanofluid**. *International Journal of Refrigeration*, 74: 627-643.

Abstract

The subject of efficiency of heat exchangers has been taken into a specific concern by researchers. In the past in order to increase the heat transfer used to be techniques like adopting fins or creating vortex generator on the flow pass and change of the geometry of the heat exchanger. But today there needs to be an improvement to the heat transfer. Therefore researchers are trying new techniques to increase efficiency of heat exchangers. Using nanofluids instead of which is used in heat exchangers is one of the most widely used methods. In this experimental research we study heat transfer in force convection mode for iron oxide as a nanofluid in a U-shape copper pipe under the effect of magnetic field; the surface of the pipe is heated by an electrical heater and the constant heat-flux boundary condition is applied. Iron-oxide nanofluid has been studied in 0.2% & 0.4% volume fraction, in Reynolds number limit 260-930. Also tests have been done in 2 different curve radii which allows us to compare the two modes with different Dean Number in same Re.No, also pressure drop in both modes. The results show a remarkable increase of heat transfer when 0.4% volume nanofluid under the effect of an alternating magnetic field is used, in this mode Nusselt number increased about 23% compared to the mode when water is used. But considering pressure drop for each pipe it was revealed that pressure drop was more when Reynolds number is the same and small curve radius pipe is used. Therefore after introducing a general efficiency for the system, it was observed that for the pipe with a larger curve radius and 0.4% volume nanofluid under the effect of alternating magnetic field which resulted in general efficiency of 1.12 that is considered as maximum efficiency in all modes.

Finally after investigating all modes it was revealed that only in few modes the general efficiency of system is higher than 1; so for designing the heat exchangers in shape of curve pipes, applying magnetic fields will cause hydrodynamical problems to the system and leads to a high increase of pressure drop. But heat efficiency will increase by applying magnetic field, increase of nanofluid volume fraction & increase of Dean Number.

Key words: nanofluid, constant heat flux, magnetic field, Dean Number, general efficiency



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Experimental investigation of nanofluid heat transfer in U-Bend pipe
under the effect of magnetic field**

By: Milad Kelidari

Supervisor:

Dr Ali Jabbari Moghaddam

September 2018