

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی
دانشکده فنی و مهندسی
مهندسی سیستم های انرژی – سیستم های انرژی

عنوان

استفاده از نانو سیال در مبدل های حرارتی

استاد راهنما:

دکتر یاسی

استاد مشاور:

دکتر تمیم

پژوهشگر:

میلاد واحدی

شهریور ۹۶

صوتجلسه دفاع از پایان نامه

معاونت پژوهش و فناوری

فرم منشور اخلاق پژوهش

اینجانب.....دانشجوی رشته.....تعهد می نمایم که اصول زیر را در انجام پایان نامه مدنظر قرار داده ام.

۱- اصل حقیقت جویی: تلاش در راستای پی جویی حقیقت و وفاداری به آن و دوری از هرگونه پنهان سازی حقیقت.

۲- اصل رعایت حقوق: التزام به رعایت کامل حقوق پژوهشگران و پژوهیدگان (انسان، حیوان، نبات) و سایر صاحبان حق.

۳- اصل مالکیت مادی و معنوی: تعهد به رعایت کامل حقوق مادی و معنوی دانشگاه و کلیه همکاران پژوهش.

۴- اصل منافع ملی: تعهد به رعایت مصالح ملی و در نظر داشتن پیشبرد و توسعه کشور در کلیه مراحل پژوهش.

۵- رعایت انصاف و امانت: تعهد به اجتناب از هرگونه جانب داری غیرعلمی و حفاظت از اموال، تجهیزات و منابع در اختیار.

۶- اصل رازداری: تعهد به صیانت از اسرار و اطلاعات محرمانه افراد، سازمان ها و کشور و کلیه افراد و نهادهای مرتبط با تحقیق.

۷- اصل احترام: تعهد به رعایت حریم ها و حرمت ها در انجام تحقیقات و رعایت جانب نقد و خودداری از هرگونه حرمت شکنی.

۸- اصل ترویج: تعهد به رواج دانش و اشاعه نتایج تحقیقات و انتقال آن به همکاران علمی و دانشجویان به غیر از مواردی که منع قانونی دارد.

۹- اصل براءت: التزام به براءت جویی از هرگونه رفتار غیرحرفه ای و اعلام موضع نسبت به کسانی که حوزه علم و پژوهش را به شائبه های غیرعلمی می آلاینند.

محل امضاء و تاریخ

شماره :

تاریخ :

پیوست :

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد / دکتری در رشته مهندسی
..... / گرایش که در تاریخ از پایان نامه خود تحت عنوان: "
..... " با کسب درجه دفاع نموده ام، بدینوسیله شرعاً و قانوناً
متعهد می شوم:

- ۱) مطالب مندرج در این پایان نامه / رساله حاصل تحقیق و پژوهش اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران اعم از پایان نامه، کتاب، مقاله و غیره استفاده نموده ام، رعایت کامل امانت را نموده، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ اقدام به ذکر آنها نموده ام.
- ۲) تمامی یا بخشی از این پایان نامه / رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاهها و مؤسسات آموزش عالی ارائه نشده است.
- ۳) مقالات مستخرج از این پایان نامه / رساله کاملاً حاصل کار اینجانب بوده و از هر گونه جعل داده و یا تغییر اطلاعات پرهیز نموده ام.
- ۴) از ارسال همزمان و یا تکراری مقالات مستخرج از این پایان نامه / رساله (با بیش از ۳۰ درصد همپوشانی) به نشریات و یا کنگره های گوناگون خودداری نموده و می نمایم.
- ۵) کلیه حقوق مادی و معنوی حاصل از این پایان نامه / رساله متعلق به موسسه آموزش عالی انرژی مرکز ساوه بوده و متعهد می شوم هر گونه بهره مندی و یا نشر دستاوردهای حاصل از این تحقیق اعم از چاپ کتاب، مقاله، ثبت اختراع و غیره (چه در زمان دانشجویی و یا بعد از فراغت از تحصیل) با کسب اجازه از تیم اساتید راهنما و مشاور و حوزه پژوهشی دانشکده باشد.
- ۶) در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط موسسه آموزش عالی انرژی مرکز ساوه از درجه اعتبار ساقط و اینجانب هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

امضاء

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا برخود لازم می دانم از تمامی اساتید بزرگوار، به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد/ دکتری که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر یاسی که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده اند، نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم. از جناب آقای دکتر تمیم به عنوان مشاور که با راهنمایی خود را مورد لطف قرار داده اند کمال تشکر را دارم.

تقدیم بہ

تمامی یونندگان طریق علم و معرفت

استفاده از نانو سیال در مبدل های حرارتی

مقدمه : مبدل های حرارتی اجزای مهمی در نیروگاهها، صنایع فرایندهای شیمیایی، گرمایشی، تهویه مطبوع، سیستمهای تبرید و خنک کاری سیستمهای الکترونیکی هستند. افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت در سیستم های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنا نیست؛ بنابراین تحقیقات گسترده ای برای استفاده از سیالات جایگزین بجای سیالات متداول که بتواند خواص حرارتی مناسب تری را بروز دهد، انجام شده است. نانو سیال ترکیبی است که با افزودن ذرات در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به یک سیال پایه باهدف بهبود انتقال حرارت حاصل می شود. یکی از کاربردهای نانو سیالات، استفاده در سیستم های انتقال حرارتی مانند مبدل های حرارتی و رادیاتور اتومبیل می باشد. این نانو سیالات باید دارای توانایی بالای انتقال حرارت و در برخی موارد عایق الکتریکی باشند. نانو سیالات دارای ضریب هدایت حرارتی و جابجایی بالاتری نسبت به سیالات معمولی هستند که باعث شده است کاربرد آنها در مبدل های حرارتی علاوه بر صرفه جویی در مصرف انرژی، باعث کاهش ابعاد مبدل و افزایش راندمان آنها شود.

مواد و روش ها : در تحقیق حاضر اثرات افزودن نانو ذرات به سیال پایه بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در مبدل های حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی عوامل مؤثر از قبیل اندازه نانو ذرات، دمای نانو سیال، لزجت نانو سیال، خواص فیزیکی و ... بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بررسی شده و همچنین روابط و مدل های ارائه شده برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت نانو سیال بیان شدند.

نتایج : با افزایش دما ضریب انتقال حرارت نانو سیال افزایش پیدا می کند ضرایب هدایت حرارتی نانو سیال با افزایش pH سیال کاهش پیدا می کند و نتایج تجربی نشان می دهند که بهترین شرایط برای انتقال حرارت توسط نانو سیال در مقادیر pH پایین می باشد. مقایسه اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت های ۲۰ و ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت نشان داد که اثر نانو ذره در بهبود و افزایش خنک کاری موتور در سرعت های پایین بهتر است.

بحث : یافته های ما به اثر سرعت جریان نانو سیال ورودی به مبدل، غلظت نانو ذره در سیال پایه، اندازه نانو ذره و دمای نانو سیال بر ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانو سیال در مبدل های حرارتی اشاره دارد و با مطالعات برخی محققین دیگر مطابقت دارد.

کلمات کلیدی: نانو سیال، نانو ذره، انتقال حرارت، مبدل حرارتی.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه و هدف

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- فرضیات ۳
- ۳-۱- اهداف ۳

فصل دوم: مروری بر منابع

- ۱-۲- مبدل‌های حرارتی ۷
- ۲-۲- کاربرد مبدل‌های حرارتی ۷
- ۱-۲-۲- اجزاء مبدل حرارتی ۷
- ۱-۲-۲-۱- لوله‌ها ۷
- ۲-۲-۱-۲- پوسته ۸
- ۳-۲-۱-۲- صفحه لوله ۸
- ۴-۲-۱-۲- کانال ۸
- ۵-۲-۱-۲- تیغه ۸
- ۶-۲-۱-۲- سر پوسته ۹
- ۳-۲- دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی ۹
- ۱-۳-۲- دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی بر اساس آرایش جریان‌ها ۱۰
- ۱-۳-۲-۱- مبدل‌های حرارتی یک پاس ۱۰
- ۱-۳-۲-۱-۱- مبدل حرارتی با جریان‌های موازی مختلف‌الجهت ۱۰
- ۲-۳-۲-۱-۱- مبدل حرارتی با جریان‌های موازی هم‌جهت ۱۱
- ۳-۳-۲-۱-۱- مبدل‌های حرارتی با جریان‌های متقاطع ۱۲

- ۲-۱-۳-۲- مبدل‌های حرارتی چند پاس ۱۲
- ۲-۳-۲- دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی از نظر شکل و ساختمان (شآه، ۱۹۸۱)..... ۱۳
- ۲-۲-۳-۱- مبدل‌های حرارتی لوله‌ای..... ۱۳
- ۲-۲-۳-۲- کاربرد مبدل‌های لوله‌ای ۱۳
- ۲-۳-۲-۳- انواع مبدل‌های لوله..... ۱۳
- ۲-۳-۲-۱- مبدل حرارتی دو لوله‌ای ۱۳
- ۲-۳-۲-۲- مبدل پوسته و لوله ۱۴
- ۲-۳-۲-۴- مبدل گرمایی صفحه‌ای ۱۵
- ۲-۳-۲-۱- مبدل گرمایی حلزونی ۱۵
- ۲-۳-۲-۲- مبدل گرمایی لام لا ۱۶
- ۲-۳-۲-۳- مبدل گرمایی با سطوح پره دار..... ۱۶
- ۲-۴- انتقال حرارت ۱۷
- ۲-۴-۱- انتقال حرارت هدایتی ۱۷
- ۲-۴-۲- انتقال حرارت جابجایی ۱۸
- ۲-۴-۱-۲- انواع مدل‌های انتقال حرارت جابجایی ۱۹
- ۲-۴-۱-۱- جابجایی اجباری ۲۰
- ۲-۴-۱-۲- جابجایی طبیعی یا آزاد ۲۰
- ۲-۴-۱-۳- جابجایی مخلوط ۲۱
- ۲-۴-۳- انتقال حرارت تشعشعی ۲۲
- ۲-۵- ضرورت و اهمیت نانو سیال ۲۳
- ۲-۵-۱- تاریخچه نانو سیالات (سرلاک‌شمی و همکاران، ۲۰۱۴) ۲۴
- ۲-۵-۲- معرفی نانو سیالات..... ۲۶
- ۲-۵-۳- ویژگی‌های نانو سیالات ۲۶

۲۷.....	۲-۵-۴- انتقال حرارت در نانو سیالات
۲۷.....	۲-۵-۵- مزایای بالقوه نانو سیالات
۲۷.....	۲-۵-۵-۱- بهبود انتقال حرارت و پایداری
۲۸.....	۲-۵-۵-۲- کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال
۲۸.....	۲-۵-۵-۳- کاهش گرفتگی و انسداد مجاری
۲۹.....	۲-۵-۵-۴- کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت
۲۹.....	۲-۵-۵-۵- کاهش هزینه‌ها
۲۹.....	۲-۵-۶- تهیه نانو سیال
۲۹.....	۲-۵-۶-۱- روش تهیه یک مرحله‌ای
۳۱.....	۲-۵-۶-۲- روش تهیه دومرحله‌ای
۳۲.....	۲-۵-۶-۳- پایداری نانو ذرات در نانو سیالات
۳۲.....	۲-۵-۶-۴- جابجایی ذرات در سوسپانسیون های نانو سیالات
۳۳.....	۲-۶- مروری بر تحقیقات انجام شده

فصل سوم: روش مدل سازی و آزمایشگاهی تحقیق

۵۵.....	۳-۱- مقدمه
۵۵.....	۳-۲- مدل سازی نانو سیال
۵۶.....	۳-۲-۱- مدل سازی خواص نانو سیال
۵۷.....	۳-۲-۲- تخمین خواص فیزیکی نانو سیالات
۵۷.....	۳-۲-۳- جرم حجمی
۵۷.....	۳-۲-۴- گرمای ویژه
۵۷.....	۳-۲-۵- لزجت
۵۸.....	۳-۳- ضریب هدایت حرارتی
۵۸.....	۳-۳-۱- اندازه گیری هدایت حرارتی

- ۵۹.....۳-۳-۲- ضریب هدایت حرارتی بر اساس مدل حرکت تصادفی ذرات
- ۶۳.....۳-۳-۲-۱- عدد پکله
- ۶۴.....۳-۳-۳- ضریب هدایت حرارتی بر اساس مدل توده شدن
- ۶۴-۳- بررسی کلی انتقال حرارت در نانو سیالات بر اساس تحقیقات چوآن و همکاران
(۲۰۰۸).....۶۶
- ۶۸.....۳-۴-۱- تخمین خواص فیزیکی نانو سیالات
- ۶۹-۳-۵- نتایج آزمایشگاهی کاربرد نانو سیال در مبدل حرارتی فشرده۶۹
- ۶۹-۳-۶- آماده سازی نانو روانکارها.....۷۰
- ۷۰.....۳-۶-۱- مشخصات سیال پایه (سیال رادیاتور)
- ۷۱.....۳-۶-۲- نانو مواد
- ۷۱-۳-۷- پراکنده کردن نانو مواد در سیال پایه۷۱
- ۷۲.....۳-۷-۱- اولتراسونیک حمامی
- ۷۲-۳-۸- اندازه گیری خواص نانوسیالات ساخته شده۷۲
- ۷۲-۳-۸-۱- اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی۷۲
- ۷۵-۳-۸-۲- اندازه گیری گرانروی۷۵
- ۷۵-۳-۸-۳- اندازه گیری نقطه جوش و نقطه انجماد۷۵
- ۷۵-۳-۹- پارامترهای مورد بررسی۷۵
- ۷۵-۳-۹-۱- موقعیت نصب دماسنج۷۵
- ۷۷-۳-۹-۲- سرعت های مورد بررسی۷۷

فصل چهارم: بحث و نتایج

- ۸۷.....۴-۱- مقدمه
- ۸۷-۴-۲- پایدارسازی سوسپانسیون های حاوی نانو ذرات.....۸۷
- ۸۷-۴-۲-۱- پایدار کننده های شیمیایی۸۷

۸۸.....	۴-۲-۲- پایدارکنندگی به روش نوسانات مافوق صوت
۹۱.....	۴-۳- تأثیر جابجایی ذرات در سوسپانسیون برافزایش شدت انتقال حرارت
۹۴.....	۴-۴- عوامل موثر بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال
۹۴.....	۴-۴-۱- اثر غلظت نانو ذرات بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال
۹۷.....	۴-۴-۲- اثر نوع نانو ذرات و سیال بر ضریب حرارتی نانو سیال
۹۷.....	۴-۴-۳- اثر pH بر ضریب حرارتی نانو سیال
۹۸.....	۴-۴-۴- اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال
۱۰۰.....	۴-۴-۵- اثر اندازه نانو ذرات بر ضریب انتقال حرارت سیال
۱۰۲.....	۴-۵- اثر نانو ذرات بر خواص فیزیکی نانو سیالات
۱۰۲.....	۴-۵-۱- گرمای ویژه نانو سیال
۱۰۳.....	۴-۵-۲- لزجت
۱۰۶.....	۴-۶- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت
۱۰۶.....	۴-۷- چگالی نانو سیال
۱۰۷.....	۴-۸- اثر نانو ذرات بر خواص نانو سیال با سیال پایه ضد یخ
۱۰۷.....	۴-۸-۱- چگالی
۱۰۹.....	۴-۸-۲- ضریب هدایت حرارتی
۱۱۰.....	۴-۸-۳- نقطه انجماد
۱۱۱.....	۴-۸-۴- نقطه جوش
۱۱۳.....	۴-۹- کاربرد نانو سیالات در سیستم خنک کاری خودرو
۱۱۳.....	۴-۹-۱- سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت
۱۱۶.....	۴-۹-۲- سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۲۷.....	۵-۱- نتایج
----------	------------

۱۳۱..... ۲-۵- پیشنهادها.

۱۳۵..... منابع و مراجع.

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) مروری کلی بر تحقیقات انجام شده.....	۵۳
جدول (۱-۳).....	۶۹
جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی ضد یخ مورد استفاده در تحقیق.....	۷۱
جدول (۳-۳) خواص ترمودینامیکی نانو ذرات.....	۷۱
جدول (۴-۳) شرایط مختلف ثبت دمای خروجی رادیاتور و خروجی ترموستات.....	۷۷
جدول (۱-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر چگالی نانو سیال.....	۱۰۸
جدول (۲-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال.....	۱۰۹
جدول (۳-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه انجماد نانو سیال.....	۱۱۱
جدول (۴-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه جوش نانو سیال.....	۱۱۲
جدول (۵-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت.....	۱۱۳
جدول (۶-۴) نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت.....	۱۱۶

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲) دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی (۱).....	۹
شکل (۲-۲) انواع جریان در مبدل‌های یک پاس (۲).....	۱۰
شکل (۳-۲) نمایی از مبدل جریان موازی مخالف جهت (۲).....	۱۱
شکل (۴-۲) نمایی از مبدل جریان موازی هم‌جهت (۲).....	۱۲
شکل (۵-۲) مبدل حرارتی جریان متقاطع (۲).....	۱۲
شکل (۶-۲) مبدل حرارتی دو لوله (۲).....	۱۴
شکل (۷-۲) مبدل پوسته و لوله (۲).....	۱۴
شکل (۸-۲) مبدل حرارتی حلزونی (۲).....	۱۶
شکل (۹-۲) روش‌های انتقال حرارت (۳).....	۱۷
شکل (۱۰-۲) انتقال حرارت بر روی یک صفحه تخت (۳).....	۱۹
شکل (۱۱-۲) روش‌های انتقال حرارت جابه‌جایی (۴).....	۲۰
شکل (۱۲-۲) انتقال حرارت جابجایی اجباری (۴).....	۲۰
شکل (۱۳-۲) انتقال حرارت جابجایی آزاد (۴).....	۲۱
شکل (۱۴-۲) انتقال حرارت جابجایی با اثر جوشش (۴).....	۲۲
شکل (۱۵-۲) انتقال حرارت جابجایی با اثر میعان (۴).....	۲۲
شکل (۱۶-۲) مقایسه ضریب رسانایی حرارتی سیالات متداول، پلیمرها و جامدات (۳).....	۲۴
شکل (۱۷-۲) روش تک‌مرحله‌ای ساخت نانو سیال (۹).....	۳۰
شکل (۱۸-۲) دستگاهی برای تهیه تک‌مرحله‌ای نانو سیال (۱۱).....	۳۱
جدول (۱-۲) مروری کلی بر تحقیقات انجام شده.....	۵۳
جدول (۱-۳).....	۶۹

- شکل (۱-۳) نمودار کلی ارتباط بین موتور و سیستم خنک کاری خودرو (۴۴). ۶۹.....
- جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی ضد یخ مورد استفاده در تحقیق ۷۱.....
- جدول (۳-۳) خواص ترمودینامیکی نانو ذرات ۷۱.....
- شکل (۲-۳) اولتراسونیک حمامی ۷۲.....
- شکل (۳-۳) تصاویر مربوط به دستگاه **KD2-Pro** برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی (۶۰). ۷۴.....
- شکل (۴-۳) موقعیت نصب سنسورهای دمایی ۷۶.....
- شکل (۵-۳) دماسنج تماسی برای تعیین دمای خط جوش ۷۶.....
- جدول (۴-۳) شرایط مختلف ثبت دمای خروجی رادیاتور و خروجی ترموستات ۷۷.....
- شکل (۱-۴) تصویر **TEM** ذرات **CuO** پخش شده در اتیلن گلايگول پس از ۹ ساعت تولید (۶۲). ۸۹.....
- شکل (۲-۴) تصویر **TEM** ذرات **CuO** قبل از پخش در مایع، ذرات به شدت تجمع پیدا کرده اند (۶۲). ۸۹.....
- شکل (۳-۴) اندازه متوسط ذرات **CuO** پس از نوسانات مافوق صوت (۶۲). ۹۰.....
- شکل (۴-۴) تغییر در اندازه متوسط ذره پس از ۱۰۰ روز (۶۲). ۹۱.....
- شکل (۵-۴) تأثیر اندازه ذرات و دما بر عدد پکلت (۱۲). ۹۲.....
- شکل (۶-۴) تأثیر عدد پکلت بر توزیع غلظت (۱۲). ۹۳.....
- شکل (۷-۴) تغییرات غلظت نانو ذره بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال (۶۱). ۹۵.....
- شکل (۸-۴) اثر غلظت و نوع نانو ذرات بر ضریب هدایت حرارتی (۶۳). ۹۶.....
- شکل (۹-۴) برآوردهای حاصل از مدل های مختلف برای تأثیر غلظت نانو ذرات مس بر ضریب هدایت حرارتی سیال (۱۱). ۹۶.....
- شکل (۱۰-۴) تأثیر نوع سیال پایه و نانوذره بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال (۶۴). ۹۷.....
- شکل (۱۱-۴) اثر **pH** بر مقدار ضریب هدایت حرارتی نانو سیال برای سیستم آب-آلومینا (۶۵). ۹۸.....
- شکل (۱۲-۴) افزایش ضریب هدایت حرارتی سیستم آب-اکسید آلومینیوم و اکسید مس (۶۷). ۹۹.....
- شکل (۱۳-۴) اثر درجه حرارت بر درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی برای تیولات طلا در تولوئن (۶۷). ۱۰۰.....

- شکل (۴-۱۴) نمودار ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بر حسب اندازه نانو ذرات برای الف) نتایج تجربی برای سیستم آب-اکسید آلومینیوم با غلظت ۳٪ حجمی ب) مدل ریاضی برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال اتیلن گلیکول-CuO با غلظت ۳٪ حجمی ۱۰۱
- ج) پیش بینی مدل ریاضی برای نانو سیال اتیلن گلیکول-Cu با غلظت ۳٪ حجمی (۶۸)..... ۱۰۱
- شکل (۴-۱۵) مقایسه دو رابطه گرمای ویژه (آبی مربوط به رابطه ۲-۳ و سیاه مربوط به رابطه ۳-۳) (۶۹)..... ۱۰۳
- شکل (۴-۱۶) تغییر ویسکوزیته نانو سیال براساس غلظت جرمی نانو ذره در نانو سیال (۷۰)..... ۱۰۴
- شکل (۴-۱۷) افزایش ویسکوزیته با درصد حجمی آب-Al₂O₃ و آب-TiO₂ (۱۳)..... ۱۰۵
- شکل (۴-۱۸) کاهش ویسکوزیته با افزایش دما در نانو سیال (۱۳)..... ۱۰۶
- شکل (۴-۱۹) تغییرات گرانیروی نانوسیال براساس غلظت نانو ذره در سیال پایه (۷۲)..... ۱۰۷
- جدول (۴-۱) اثر نانو ذره و غلظت آن بر چگالی نانو سیال ۱۰۸
- شکل (۴-۲۰) تغییرات چگالی نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۳)..... ۱۰۸
- جدول (۴-۲) اثر نانو ذره و غلظت آن بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال ۱۰۹
- شکل (۴-۲۱) تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۶۴)..... ۱۱۰
- جدول (۴-۳) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه انجماد نانو سیال ۱۱۱
- شکل (۴-۲۲) تغییرات نقطه انجماد نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۵)..... ۱۱۱
- جدول (۴-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه جوش نانو سیال ۱۱۲
- شکل (۴-۲۳) تغییرات نقطه جوش نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۵)..... ۱۱۲
- جدول (۴-۵) اثر نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور ۱۱۳
- و خروجی رادیاتور در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت..... ۱۱۳
- شکل (۴-۲۴) تغییرات دمای سیال خروجی از موتور نسبت به درصد ۱۱۴
- حجمی نانو ذره در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (۷۷)..... ۱۱۴
- شکل (۴-۲۵) تغییرات دمای سیال خروجی از رادیاتور نسبت به درصد ۱۱۵

- حجمی نانو ذره در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (۷۷)..... ۱۱۵
- شکل (۴-۲۶) اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور (۷۷)..... ۱۱۶
- جدول (۴-۶) نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور و..... ۱۱۶
- خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت ۱۱۶
- شکل (۴-۲۷) تغییرات دمای سیال خروجی از موتور نسبت به درصد ۱۱۷
- حجمی نانو ذره در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت (۷۷)..... ۱۱۷
- شکل (۴-۲۸) تغییرات دمای سیال خروجی از رادیاتور نسبت به درصد ۱۱۸
- حجمی نانو ذره در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت (۷۷)..... ۱۱۸
- شکل (۴-۲۹) اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت (۷۷)..... ۱۱۹

فصل اول

مقدمه و هدف

۱-۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی اجزای مهمی در نیروگاه‌ها، صنایع فرایندهای شیمیایی، گرمایشی، تهویه مطبوع، سیستم‌های تبرید و خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی هستند. امروزه مبدل‌های حرارتی در بخش وسیعی از صنایع کاربرد دارند. از آن جمله می‌توان به نیروگاه‌ها، توربین‌های گازی، تهویه مطبوع، صنایع تبرید، صنایع گرمایشی و بسیاری از صنایع دیگر اشاره کرد (۱).

افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست، از این‌رو تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از سیالات جایگزین بجای سیالات متداول نظیر آب و اتیلن گلیکول، که بتواند خواص حرارتی مناسب‌تری را بروز دهد انجام شده است. از سوی دیگر خواص چند برابری هدایت حرارتی فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم در مقایسه با مایعات متداول باعث شده تا ایده پخش کردن ذرات فلزی در مایعات مطرح شود (۱). نانو سیالات در معنای امروزی را می‌توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گلیکول پایدار شده‌اند (۱). نانو سیالات در سال‌های گذشته در بسیاری از عرصه‌های مهندسی مانند سیستم‌های خورشیدی (۳)، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل‌های سوختی، راکتورهای هسته‌ای و افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص این سیالات در شرایط مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته که بسیاری از آن‌ها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانو سیال نسبت به سیال پایه است (۲).

نانو سیالات محیط جدیدی از انتقال حرارت هستند که از سوسپانسیون ذرات معمولاً فلزی در ابعاد نانو در سیال پایه تشکیل شده‌اند. نانو سیالات دارای ضریب هدایت حرارتی و

جابجایی بالاتری نسبت به سیالات معمولی هستند که باعث شده است کاربرد آن‌ها در مبدل‌های حرارتی علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، باعث کاهش ابعاد مبدل و افزایش راندمان آن‌ها شود. عوامل زیادی از قبیل سرعت جریان نانو سیال ورودی به مبدل، غلظت نانوذره در سیال پایه، اندازه نانوذره، دمای نانو سیال بر ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانو سیال اثرگذارند (۳). از این رو به بررسی نظری اثرات نانو سیالات بر ضریب انتقال حرارت و عوامل موثر بر آن در مبدل‌های حرارتی می‌پردازیم.

۱-۲- فرضیات

۱. اندازه نانوذره و غلظت وزنی آن بر ضریب انتقال حرارت نانو سیال اثر می‌گذارد.
۲. نرخ جریان نانو سیال ورودی به مبدل بر ضریب انتقال حرارت نانو سیال اثر می‌گذارد.
۳. گرانش نانو سیال از سیال پایه بیشتر است.
۴. نانو سیالات بیشتر مانند مایع رفتار می‌کنند تا ترکیبی متعارف از جامد-مایع.
۵. روابط تئوری موجود همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

۱-۳- اهداف

به‌طور کلی اهداف اصلی از این پژوهش عبارتند از

۱. بررسی نظری اثر عواملی مانند سرعت جریان نانو سیال ورودی به مبدل، غلظت نانوذره در سیال پایه، اندازه نانوذره، دمای نانو سیال و بر ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در نانو سیال
۲. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های آزمایشگاهی با روش‌های عددی و تئوری در مبدل‌های حرارتی

فصل دوم

مروری بر منابع

مقدمه

بهینه سازی تجهیزات انتقال حرارت جهت رسیدن به راندمان بالاتر انرژی نیازمند تمرکز بر کوچک سازی تجهیزات از یک سو و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح از سوی دیگر می باشد. سیالاتی نظیر آب، روغن های معدنی و اتیلن گلیکول کاربرد زیادی در انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی مانند فرآیندهای تولید نیرو، فرایندهای شیمیایی، فرآیندهای سرمایش و گرمایش و میکروالکترونیک بر عهده دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر سیالات مذکور اولین مانع جدی در فشرده سازی و کارآمد کردن مبدل های حرارتی است.

هدایت حرارتی برخی از جامدات نظیر فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است. بر این اساس، ایده بهبود و افزایش هدایت حرارتی مایعات با افزودن ذرات جامد بسیار ریز شکل گرفته است. برخی از ذرات جامد مانند ذرات فلزی، غیرفلزی و پلیمری را می توان با مایعات مخلوط کرده و از آن ها سیالات دوغابی شکل تهیه کرد. هرچند اگر سوسپانسیون های حاصل محتوی ذرات با ابعاد میلی متری یا میکرومتری باشند مشکلاتی نظیر گرفتگی مجاری حرکت سیال، ته نشینی سریع و افت فشار بیش از حد را به دنبال خواهد داشت. در صورتی که ذرات دارای اندازه نانومتری باشد، مشکلات فوق بسیار کم رنگ تر خواهد بود. سیالات حامل انرژی در صنایع اغلب با حرکت در مجاری انتقال نظیر لوله ها و مبدل های حرارتی انرژی را به نقاط مورد نظر منتقل می نمایند. در این حالت آنچه مورد توجه قرار می گیرد، میزان انتقال انرژی به واسطه جابجایی سیال می باشد. برای این منظور باید ضریب انتقال حرارت در فرآیند مورد نظر مشخص باشد تا بتوان از آن طریق میزان سطح مورد نیاز برای مبادله انرژی را محاسبه کرد. برای سیالات متداول انرژی این مهم تا حدود زیادی

حل شده و روابطی برای این منظور تدوین شده است. لیکن با مطرح شدن استفاده از نانو سیالات در انتقال انرژی، بحث تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی در این نوع سیالات به وجود آمده است. به سیالات متداول حامل انرژی که حاوی ذرات جامد در اندازه‌های نانومتری باشند، نانو سیال اطلاق می‌گردد. افزودن مقداری نانو ذره علاوه بر تأثیری که روی ضریب هدایت حرارتی سیال پایه دارد فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۲-۱- مبدل‌های حرارتی

برای سرد یا گرم کردن یک سیال به وسیله سیالی دیگر بدون استفاده مستقیم از دستگاه‌های مولد سرما یا گرما و همین‌طور بازیابی گرما و یا سرما از سیالاتی که قبلاً به طریقی به آن‌ها داده شده است از مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود. در مبدل‌های حرارتی دو سیال با دمای متفاوت وجود دارد که این دستگاه شرایطی را فراهم می‌آورد تا تبادل گرما میان دو سیال برقرار شود. معمولاً مبدل‌های حرارتی به منظور خنک کردن سیال گرم و یا گرم کردن سیال با دمای پایین‌تر و یا هر دو، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲- کاربرد مبدل‌های حرارتی

کاربرد مبدل حرارتی در پالایشگاه، نیروگاه، موتورخانه ساختمان، یخچال، دستگاه‌های تهویه مطبوع و ... می‌باشد. مبدل‌های حرارتی در دستگاه‌های مختلف نظیر دیگ بخار، مولد بخار، کندانسور، اواپراتور، تبخیرکننده‌ها، برج خنک‌کن، پیش گرم‌کن فن کویل، خنک‌کن و گرم‌کن روغن، رادیاتورها، کوره‌ها و ... کاربرد فراوان دارد (۱).

۲-۲-۱- اجزاء مبدل حرارتی

اجزاء یک مبدل حرارتی عبارتند از (۱):

۲-۲-۱-۱- لوله‌ها^۱

جنس، تعداد، قطر، طول و ضخامت لوله‌ها به طبیعت سیال (خورنده یا بی‌اثر، تمیز یا کثیف و ...) مقدار جریان سیال، فشار و درجه حرارت سیال و بار حرارتی مبدل بستگی دارد. لوله ممکن است به صورت راست (دو سر باز) یا به شکل U روی صفحه‌ای به نام^۲ پرس یا

^۱ Tubes

^۲ Tube Sheet

جوش داده شوند. لوله‌ها معمولاً به قطر خارجی ۱ اینچ و از جنس فولاد یا مس و گاهی نیز از گرافیت یا تفلون ساخته می‌شوند.

۲-۲-۱-۲- پوسته^۱

جنس، قطر، ضخامت و حجم پوسته به طبیعت سیال، مقدار جریان سیال، فشار و درجه حرارت سیال و مشخصات دسته لوله^۲ از نظر قطر و طول آن بستگی دارد. نوع کاربرد نیز تعیین‌کننده خواهد بود. از جمله پوسته مبدل‌های از نوع تبخیرکننده و همین‌طور جوشاننده دارای فضای تبخیر می‌باشند.

۲-۲-۱-۳- صفحه لوله^۳

صفحه‌ای دایره‌ای شکل که سر لوله‌ها روی آن قرار می‌گیرد، جنس و ضخامت و قطر این صفحه به جنس لوله‌ها، تعداد لوله‌ها و نوع مبدل حرارتی بستگی دارد. لوله‌ها ممکن است به آن جوش داده‌شده یا توسط فلانچ به آن متصل باشد.

لوله‌ها عموماً با دو آرایش مربعی یا مثلثی روی صفحه لوله‌ها نصب می‌گردند. در آرایش مربعی کمترین مقاومت در مقابل جریان و در نتیجه حداقل افت فشار به وجود می‌آید. یکی از معایب آرایش مربعی قرار گرفتن تعداد کمتر لوله در یک سطح معین می‌باشد. وقتی که آرایش لوله‌ها مثلثی باشد، افت فشار جریان پوسته بیشتر از وقتی است که آرایش مربعی باشد، اما میزان انتقال حرارت در آرایش مثلثی بیشتر است.

۲-۲-۱-۴- کانال^۴

جریان سیال به داخل لوله‌ها از طریق کانال صورت می‌گیرد. تعداد یک یا دو کانال در هر مبدل موجود است. در مبدل‌های حرارتی چند گذره^۵ از یک صفحه تقسیم‌کننده جریان استفاده می‌شود تا کانال به دو یا چند قسمت تقسیم شود.

۲-۲-۱-۵- تیغه^۶

تیغه‌ها به شکل دایره برش خورده یا دیسک و حلقه^۷ ساخته می‌شوند. برای افزایش زمان تبادل حرارتی بین لوله‌ها و سیال درون پوسته از تعداد معین و مناسبی تیغه استفاده

¹ Shell

² Tube Bundle

³ Tube Sheet

⁴ Channel

⁵ Multipass

⁶ Baffle

⁷ Disc & Ring

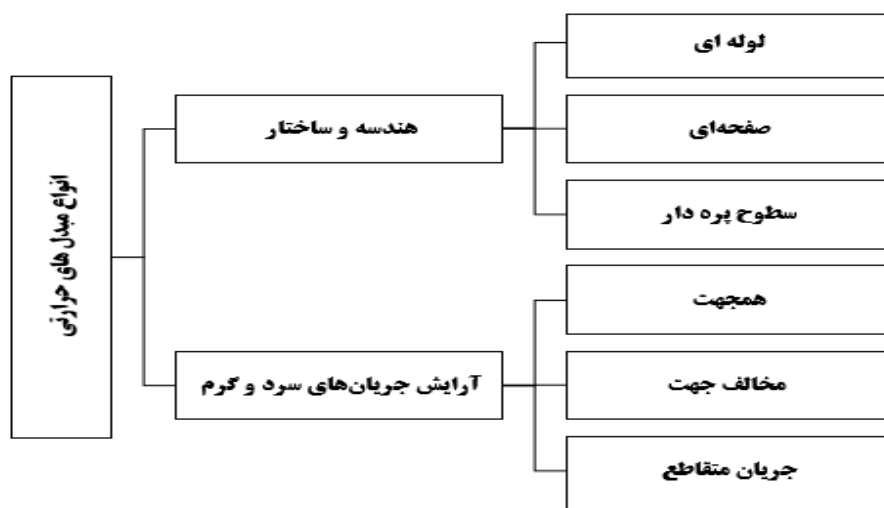
می‌شود. تیغه‌ها در داخل پوسته قرار گرفته و لوله‌ها از میان سوراخ‌های آن‌ها که به تعداد لوله‌ها می‌باشند عبور می‌کنند. این صفحات دو نقش عمده دیگر نیز به عهده دارند. با ایجاد جریان‌های متقاطع مقاومت فیلمی تشکیل شده روی لوله‌ها را از بین برده و ضریب انتقال حرارت را بالا می‌برند. همین‌طور لوله‌ها را نگه‌داشته و از خم شدن آن‌ها جلوگیری می‌کنند. تیغه‌های طولی^۱ گاهی اوقات برای تقسیم کردن جریان پوسته به دو یا سه گذر قرار می‌گیرند.

۲-۱-۶- سر پوسته^۲

معمولاً به شکل نیمکره ساخته شده و به وسیله پیچ و مهره به پوسته وصل می‌شود و در مواقع لزوم برای بازرسی لوله‌ها برداشته می‌شود.

۲-۳ دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی وسایلی هستند که جریان انرژی حرارتی بین دو یا چند شاره در دماهای مختلف فراهم می‌آورند. مبدل‌های حرارتی در محدوده وسیعی کاربرد دارند. این کاربردها شامل تولید برق، صنایع فرایندی، شیمیایی، غذایی، الکترونیک، مهندسی محیط‌زیست، بازیابی گرما، صنایع ساخت و تولید تهویه مطبوع، تبرید و کاربردهای فضایی می‌باشند. مبدل‌های حرارتی را می‌توان مانند شکل ۲-۱ طبقه‌بندی نمود (شاه و سکولیک، ۲۰۱۶):



شکل (۲-۱) دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی (۱).

^۱ Longitudinal Baffle

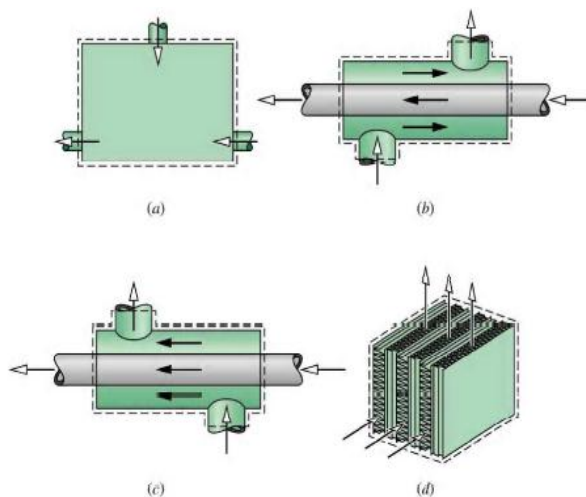
^۲ Shell Head

۲-۳-۱- دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی بر اساس آرایش جریان‌ها

طبقه‌بندی مبدل‌های حرارتی بر اساس آرایش جریان‌های سیال مبدل در دسته‌بندی زیر نشان داده شده است. اگر سیالی در یک مبدل حرارتی و یا قسمتی از آن به‌طور کامل مبدل را طی نماید می‌گویند سیال یک پاس را طی نموده است. اگر سیال این کار را n مرتبه به‌صورت رفت و برگشتی انجام دهد می‌گویند که سیال n پاس را پیموده است. لازم نیست که پاس‌های مختلف یک اندازه باشند، برای اینکه مبدل فضای کمتری را اشغال نماید بیشتر مواقع قسمت‌های مختلف آن روی هم تا می‌شوند یک مبدل حرارتی را چند پاس می‌گویند. در اینجا ابتدا مبدل حرارتی با جریان یک پاس بررسی می‌شود آنگاه چند نمونه از مبدل‌های چند پاس نیز بررسی می‌گردند.

۲-۳-۱-۱- مبدل‌های حرارتی یک پاس

این گروه به سه دسته عمده زیر تقسیم می‌شود (۲).

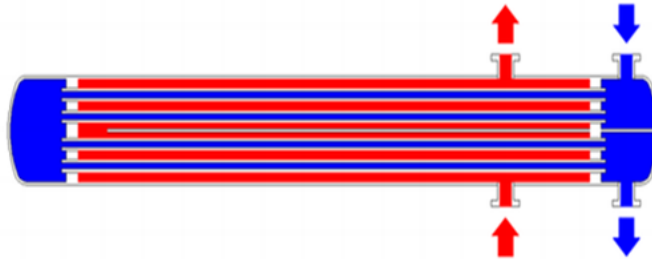


شکل (۲-۲) انواع جریان در مبدل‌های یک پاس (۲).

۲-۳-۱-۱-۱- مبدل حرارتی با جریان‌های موازی مختلف‌الجهت

در مبدل با جریان‌های موازی مختلف‌الجهت سیال‌ها به‌صورت موازی و در جهت مخالف یکدیگر جریان دارند. توزیع درجه حرارت‌های دو سیال طوری است که اختلاف آن‌ها مینیمم و مبدل از نظر ترمودینامیکی دارای بهترین راندمان است. تنش‌های حرارتی که از اختلاف درجه حرارت‌ها در این نوع مبدل به وجود می‌آید کمتر از سایر مبدل‌ها خواهد بود. با توجه به مزایایی که این نوع جریان‌ها از نظر ترمودینامیکی دارند کاربرد آن‌ها در بعضی از

مبدل‌ها با مشکلاتی همراه می‌باشد خصوصاً در مبدل‌های با سطوح فشرده که جداسازی جریان‌ها و طراحی محفظه توزیع و جمع‌آوری سیال‌ها قدری پیچیده می‌شود.

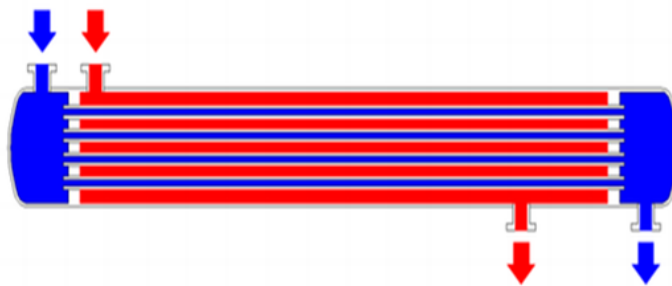


شکل (۲-۳) نمایی از مبدل جریان موازی مخالف الجهد (۲).

۲-۳-۱-۱-۲- مبدل حرارتی با جریان‌های موازی هم‌جهت

در مبدل‌های حرارتی با جریان‌های موازی هم‌جهت سیال‌ها باهم از یکسر مبدل وارد می‌شوند و به‌صورت موازی در یک‌جهت حرکت می‌کنند و باهم از انتهای دیگر مبدل خارج می‌گردند. از نظر ترمودینامیکی این آرایش جریان‌ها کمترین راندمان حرارتی را نتیجه می‌دهد به‌علاوه اختلاف درجه حرارت موجود در مدخل ورودی مبدل باعث ایجاد تنش‌های حرارتی نسبتاً بزرگی در آن قسمت مبدل خواهد شد. باوجود معایبی که در بالا ذکر شده است این نوع جریان‌ها دارای مزایایی می‌باشند که موارد زیر کاربرد آن‌ها را توجیه می‌نماید:

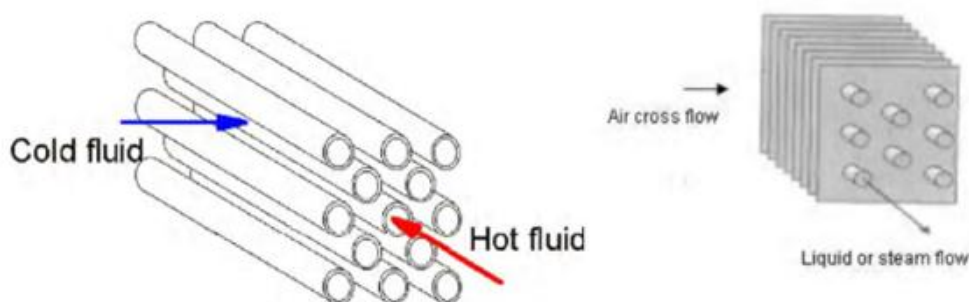
۱. در این مبدل‌ها درجه حرارت جداره لوله‌ها نسبت به سایرین یکنواخت‌تر است و مقدار آن به بزرگی جریان‌های مختلف‌الجهد نیست لذا از این مبدل‌ها در ارتباط با سیالاتی که دارای حساسیت نسبت به درجه حرارت هستند استفاده می‌شود.
۲. در بعضی از کاربردها که نیاز به راندمان حرارتی پایین است یا اینکه تغییرات راندمان حرارتی نسبت به تغییرات دبی سیال‌ها باید یکنواخت‌تر باشد از مبدل‌های حرارتی با جریان‌های موازی استفاده می‌گردد.
۳. برای فرآیندهای جوششی این نوع آرایش جریان‌ها موجب ایجاد جوشش هسته‌ای زودرس می‌گردند.
۴. در بعضی موارد به علت محدودیت‌هایی که در سیستم لوله‌کشی و یا اتصالات خارجی وجود دارد، کاربرد این نوع مبدل‌ها موجه به نظر می‌آید.



شکل (۲-۴) نمایی از مبدل جریان موازی هم‌جهت (۲).

۲-۳-۱-۱-۳-۲- مبدل‌های حرارتی با جریان‌های متقاطع

در مبدل‌های حرارتی با جریان‌های متقاطع سیال‌ها در مسیرهای عمود برهم جریان می‌یابند. از نظر ترمودینامیکی راندمان حرارتی آن‌ها از مبدل‌های موازی مختلف‌الجهت کمتر و از حالت موازی هم‌جهت بهتر است. از این نوع آرایش بیشتر در مبدل‌های فشرده و فین دار استفاده می‌گردد زیرا این موجب می‌شود که بتوان هدرها را با ساختمان ساده‌تری طراحی نمود اما در صورتی که از نظر اقتصادی نیز با مقایسه با جریان‌های متقاطع قابل توجیه است. شکل ۲-۵ چند نمونه جریان متقاطع را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۵) مبدل حرارتی جریان متقاطع (۲).

۲-۳-۱-۲-۲- مبدل‌های حرارتی چند پاس^۱

از ترکیب هر کدام از سه فرم جریان‌های یک پاس که قبلاً بررسی شده‌اند می‌توان یک واحد مبدل چند پاس تشکیل داد. اگر این امتزاج به‌طور صحیح صورت گیرد راندمان حرارتی مبدل چند پاس می‌تواند از راندمان حرارتی اعضای تشکیل‌دهنده خود بیشتر شود. اکثر اوقات انتخاب مبدل‌های چند پاس نیز به همین دلیل صورت می‌گیرد.

^۱ Multi-Pass Heat Exchanger

۲-۳-۲- دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی از نظر شکل و ساختمان (۲).

۲-۳-۲-۱- مبدل‌های حرارتی لوله‌ای^۱

این مبدل‌ها از لوله‌هایی با مقطع دایره‌ای ساخته شده‌اند. یک سیال در داخل لوله‌ها و سیال دیگر در خارج لوله جریان دارد. قطر، تعداد، طول، گام و آرایش لوله‌ها می‌تواند تغییر کند؛ بنابراین، موارد فوق اثرات فراوانی در طراحی و کارایی آن‌ها دارند.

۲-۳-۲-۲- کاربرد مبدل‌های لوله‌ای

هنگامی که ضریب انتقال حرارت سیال داخل لوله نسبت به خارج آن بزرگ‌تر از ۲:۱ باشد، مثلاً داخل لوله مایعات کم لزج مثل آب با ضریب انتقال حرارت بالا باشد و خارج آن از مایعات لزج استفاده شود معمولاً بجای استفاده از مبدل‌های پوسته و لوله از مبدل‌های لوله‌ای استفاده می‌شود. البته در این موارد از پره با طول بلند که باعث افزایش سطح می‌شود، در خارج لوله استفاده می‌شود. همچنین اگر سرویس‌های فشار بالا مورد نیاز باشد، مبدل‌های لوله‌ای ترجیحاً استفاده می‌شود. در سرویس‌های کوچک نیز از این مبدل‌ها استفاده می‌شود.

۲-۳-۲-۳- انواع مبدل‌های لوله

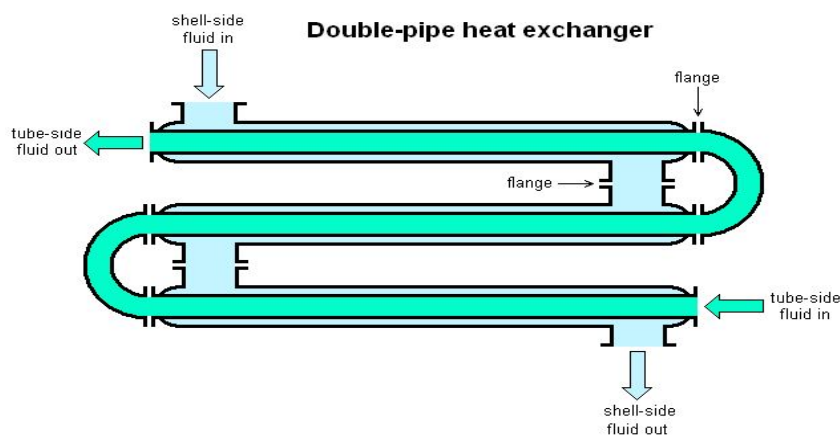
۲-۳-۲-۳-۱- مبدل حرارتی دو لوله‌ای^۲

ساده‌ترین نوع مبدلی که در صنعت ساخته می‌شود مبدل حرارتی دو لوله‌ای است که به آن مبدل سنجاق سری نیز گفته می‌شود. که از دو لوله‌ی هم‌محور و به شکل U تشکیل شده است. در این نوع مبدل یکی از سیال‌ها از درون لوله و سیال دیگر از مجاری بین دو لوله عبور می‌کند و به این ترتیب عمل انتقال حرارت صورت می‌پذیرد.

لوله‌های هم‌محوری که درون هم قرار می‌گیرد در یک انتها توسط یک زانوی ۱۸۰ درجه برگشت داده می‌شود. در برخی موارد که از مجرای بین دو لوله گاز عبور می‌کند سطح خارجی لوله داخلی به صورت پره دار ساخته می‌شود.

^۱ Tubular heat exchanger

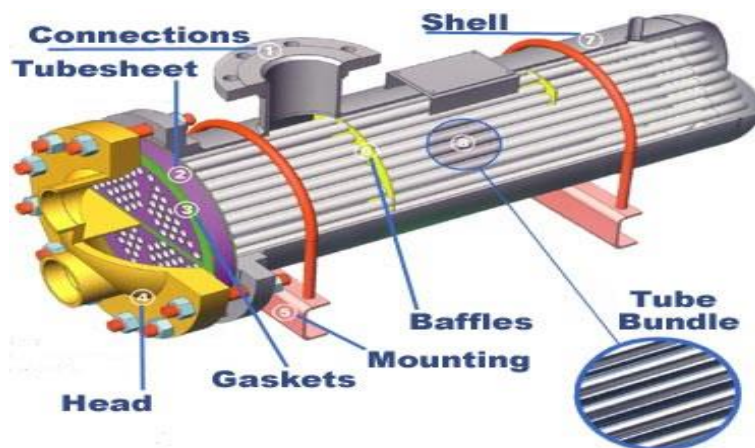
^۲ "Double tube" heat exchanger



شکل (۶-۲) مبدل حرارتی دو لوله (۲).

۲-۳-۲-۳-۲-۲ مبدل پوسته و لوله^۱

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، مبدل‌های دو لوله‌ای که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفت، نمی‌توانند سطح لازم برای تبادل حرارت را در اختیار دو سیال قرار دهند. استفاده از چندین مبدل دو لوله نیز مشکلاتی نظیر احتیاج به فضای زیاد و جز آن را همراه دارد که طرح را ملزم به استفاده از مبدل پوسته و لوله می‌کند.



شکل (۷-۲) مبدل پوسته و لوله (۲).

این نوع از مبدل‌ها از تعداد زیادی لوله حاوی سیال که بخش خارجی آن با سیال دیگر در تماس هست تشکیل یافته و عمل انتقال حرارت از طریق سطح واسطه که همان بدنه یا جداره لوله است امکان می‌پذیرد پس باید جنس لوله‌ها به گونه‌ای انتخاب گردد که علوم بر استقامت، رسانای خوب گرما نیز باشد. در مبدل‌های لوله-پوسته معمول دو صفحه از جنس

^۱ Shell Tube Heat Exchanger

فلز در ابتدا و انتهای مبدل قرار می‌گیرد که به تعداد لوله‌های داخل مبدل بر روی این ورقه‌ها سوراخ ایجاد شده است و این لوله‌ها به صفحه لوله از طریق جوش یا به طریقه مکانیکی متصل شده‌اند. دو سر مبدل یعنی سر جلویی و عقبی مبدل به گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شود که سیال از یکسر مبدل وارد شده و به سمت ورودی لوله‌ها هدایت شود و پس از عبور از لوله‌ها وارد سر عقبی شده و در آنجا جمع‌آوری گردد.

هنگامی که سطح انتقال حرارت لازم برای مبدل‌های دو لوله‌ای زیاد شود (بیشتر از m^2 ۵۰ باشد)، بهتر است از مبدل‌های پوسته و لوله استفاده شود. مبدل‌های پوسته و لوله به‌طور وسیعی در فرایندهای انتقال حرارت برای کاربردهای مایع/مایع و همچنین در کندانسورها و مولدهای بخار استفاده می‌شوند. این مبدل‌ها برای انتقال حرارت مشخصی سطح کمتری به نسبت مبدل‌های لوله‌ای اشغال می‌کنند. در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، یک پوسته استوانه‌ای که تعداد قابل توجهی لوله را در خود جای می‌دهد. برای تبادل حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد، این مبدل‌ها به صورت‌های متفاوتی تولید می‌شوند که در آن یک یا چند گذر لوله و همین‌طور یک یا چند گذر برای پوسته ممکن است پیش‌بینی شود. در شکل ۲-۷ اجزای اصلی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مشخص گردیده است.

۲-۳-۲-۴- مبدل گرمایی صفحه‌ای

این مبدل گرمایی از صفحات نازک که صاف یا موجدار هستند تشکیل شده است. این صفحه‌ها مسیرهای عبوری شاره را تشکیل می‌دهند. این مبدل گرمایی برای انتقال گرما بین گاز/مایع و یا جریان‌های دوفازی مناسب می‌باشند. این مبدل گرمایی دارای چندین نوع است که مبدل گرمایی صفحه‌ای واشر دار^۱، حلزونی^۲ و لاملا^۳ شامل آن‌ها می‌باشند.

مبدل گرمایی صفحه‌ای واشر دار دارای سطح انتقال گرمای نسبتاً فشرده و وزن کم می‌باشد. معمولاً در آن مایع جریان پیدا می‌کند. به سادگی تمیز و استریلیزه می‌شود زیرا قطعات آن کاملاً از هم جدا می‌شوند. به همین دلیل در صنایع غذایی از آن‌ها استفاده می‌شود.

۲-۳-۲-۴-۱- مبدل گرمایی حلزونی

مبدل گرمایی حلزونی با پیچاندن دو صفحه بلند موازی به شکل یک حلزون با استفاده از یک میله اصلی (مندرل^۴) و جوش دادن لبه‌های صفحات مجاور به صورتی که یک کانال را

^۱Gasketed - plane

^۲Spiral tube

^۳Lamella

^۴Mandrel

تشکیل دهد، شکل داده می‌شود. فاصله بین صفحات قابل تنظیم می‌باشد. این مبدل گرمایی نسبتاً فشرده است اما به دلیل ساختار خاص خود گران‌قیمت می‌باشد. مبدل گرمایی حلزونی به‌ویژه در کاربردهای شاره لجن آلود، مایعات لزج و مایعاتی با ذرات جامد معلق و جریان دوفازی مایع / جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

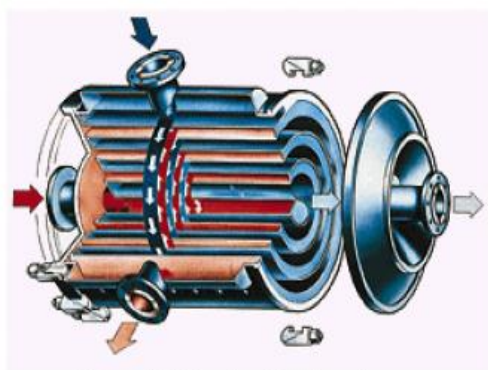


Figure 3. 9 A spiral heat exchanger

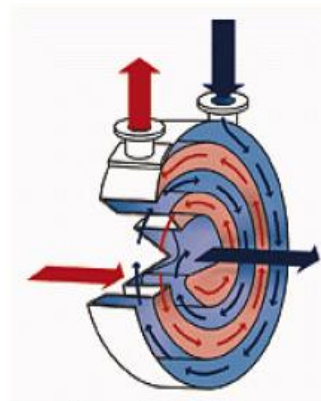


Figure 3. 10 Close up

شکل (۲-۸) مبدل حرارتی حلزونی (۲).

۲-۳-۲-۴-۲- مبدل گرمایی لام لا

مبدل گرمایی لاملا (ریمن^۱) شامل مجموعه‌ای از کانال‌های ساخته‌شده از صفحات فلزی نازک است که به‌طور موازی جوشکاری شده‌اند و به شکل لاملا (لوله‌های تخت یا کانال‌های مستطیلی) می‌باشند که به‌صورت طولی در یک پوسته قرار گرفته‌اند. درواقع این نوع مبدل گرمایی شکل اصلاح‌شده مبدل گرمایی پوسته و لوله با صفحه لوله شناور است.

سطوح بین لاملا برای تمیزکاری شیمیایی مناسب هستند و شاره رسوب‌دهنده باید در قسمت پوسته جریان یابد. به دلیل آشفته‌گی زیاد و توزیع یکنواخت جریان و همچنین سطوح صاف، لاملا به‌سادگی رسوب نمی‌پذیرد و به‌سادگی قابل بازرسی و تعمیرکاری است.

۲-۳-۲-۴-۳- مبدل گرمایی با سطوح پره دار

این نوع مبدل گرمایی در سطح اصلی خود (لوله یا صفحه) دارای پره یا ضمایمی هستند که سطح انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. چون ضریب انتقال گرما در سمت گاز خیلی کمتر از سمت مایع است، معمولاً پره‌ها در سمت گاز قرار می‌گیرند.

دو نوع از پرکاربردترین مبدل گرمایی پره دار عبارت‌اند از:

^۱-Ramen

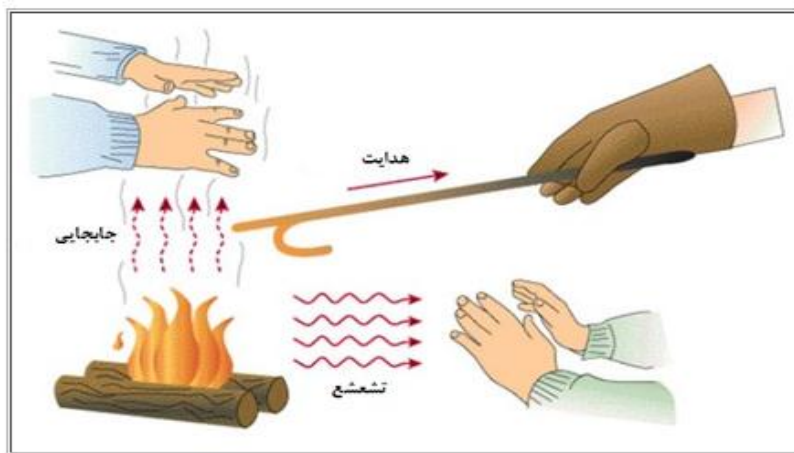
الف) مبدل گرمایی صفحه‌ای پره دار

ب) مبدل گرمایی لوله‌ای پره دار

۲-۴- انتقال حرارت

انتقال حرارت به‌طور کلی در حرکت حرارت از دمای بالا به دمای پایین گفته می‌شود. در زمانی که بین دو نقطه گرادیان دمایی (اختلاف دما) وجود داشته باشد، بین آن‌ها انتقال حرارت صورت می‌گیرد. به‌طور کلی حرارت به سه صورت هدایت، جابجایی و تابش منتقل می‌شود (۳).

انتقال حرارت هدایتی نیاز به محیط مادی داشته و در جامدات و سیالات رخ می‌دهد. انتقال حرارت جابجایی نیز نیاز به محیط مادی داشته و زمانی رخ می‌دهد که یک سیال بر روی یک سطح حرکت کند. انتقال حرارت تشعشعی نیاز به محیط مادی نداشته و همیشه بین اجسامی که اختلاف دما دارند روی می‌دهد.



شکل (۲-۹) روش‌های انتقال حرارت (۳).

۲-۴-۱- انتقال حرارت هدایتی

انتقال حرارت هدایتی در اثر تماس فیزیکی جسم سرد با جسم گرم‌تر رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال در پخت غذا که حرارت از طریق تماس مستقیم ماده‌ی غذایی با ظرف داغ به آن منتقل می‌شود، انتقال حرارت هدایتی رخ می‌دهد. در مقیاس میکروسکوپی، انتقال حرارت به یک جسم، باعث افزایش دامنه‌ی ارتعاش مولکول‌ها و اتم‌های آن می‌شود. انتقال حرارت هدایتی نیز در اثر ارتعاش اتم‌ها و مولکول‌های پرانرژی‌تر و برخورد آن‌ها با اتم‌ها و

مولکول‌های کم انرژی تر و در نتیجه انتقال بخشی از انرژی به آن‌ها، رخ می‌دهد. این نوع انتقال حرارت بیشتر درون اجسام صلب یا بین اجسام صلبی که باهم در تماس هستند رخ داده و کمتر در مورد سیالات (به‌خصوص گازها) اتفاق می‌افتد. هدایت در سیالات از طریق برخورد و نفوذ مولکول‌های پرانرژی‌تر در بین مولکول‌های کم انرژی تر رخ می‌دهد؛ اما در جامدات، به‌صورت ترکیبی از لرزش مولکول‌ها و انتقال الکترون‌های آزاد بین آن‌ها رخ می‌دهد. در شروع هدایت، از آنجاکه گرادیان دمایی قابل توجه هست، لذا دمای جسم به‌صورت تابعی از زمان تغییر می‌کند. به این بخش از هدایت، هدایت گذرا می‌گویند. اما باگذشت زمان، گرادیان دمایی درون جسم ثابت شده و متغیر نیست. به عبارت دیگر سیستم به حالت تعادل می‌رسد. در حالت تعادل، انرژی حرارتی خروجی از یک سطح مقطع دقیقاً برابر با انرژی ورودی به آن هست. به این بخش از هدایت، هدایت پایا می‌گویند (۳).

۲-۴-۲- انتقال حرارت جابجایی

انتقال حرارت جابجایی یا همرفت، صورتی از انتقال انرژی بین یک سطح جامد و مایع یا گاز متحرک موجود در مجاورت آن است که ترکیبی از اثرات هدایت و حرکت سیال را در خود دارد. در واقع، انتقال حرارت همرفتی، جابجا شدن حرارت از یک مکان به مکان دیگر در اثر حرکت سیال است. فرآیندی است که در آن جابجا شدن حرارت در اثر جابجا شدن جرم رخ می‌دهد. هرچه حرکت سیال سریع‌تر باشد، نرخ انتقال حرارت بیشتر است. در غیاب هرگونه حرکت توده‌ای درون سیال، انتقال حرارت بین یک سطح جامد و سیال مجاور آن، به‌صورت هدایت ضعیف رخ می‌دهد. وجود حرکت توده‌ای در سیال، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد، اما محاسبات آن را پیچیده می‌کند (۳).

در انتقال حرارت جابجایی دو مکانیسم سبب انتقال انرژی می‌شوند:

۱- برخورد اتفاقی ذرات و انتقال انرژی^۱

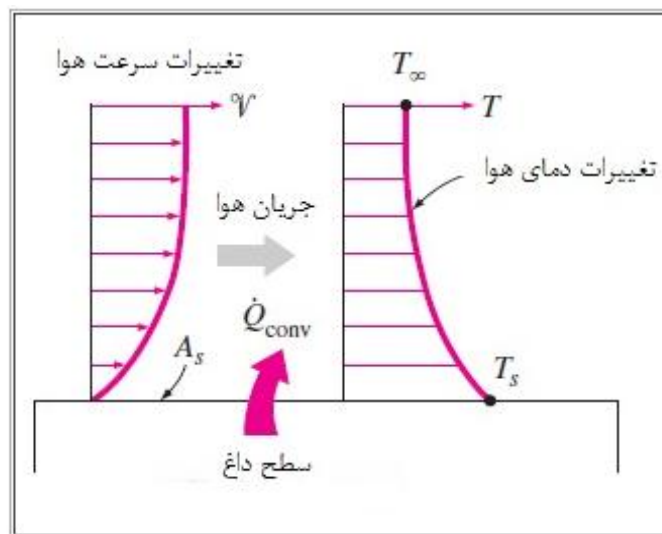
۲- انتقال انرژی بر اثر حرکت کلی سیال^۲

عمدتاً انتقال حرارت جابجایی زمانی مطرح است که تبادل انرژی بین یک سطح و سیال مجاور آن موردنظر باشد.

^۱ diffusion

^۲ Advection

اگر یک سطح خنک شونده با جریان هوا را در نظر بگیریم، در ابتدا انرژی سطح از طریق هدایت به لایه‌ی هوای مجاور منتقل شده و پس از آن، این انرژی توسط جابجایی مولکول‌ها از سطح دور می‌شود. در واقع، این نوع انتقال حرارت با ترکیبی از هدایت و حرکت توده‌ای یا میکروسکوپی ذرات سیال که لایه‌ی مجاور را از سطح دور کرده و آن را با هوای خنک‌تر جایگزین می‌کند، روی می‌دهد. در شکل ۱۰-۲ گرادیان دمایی و گرادیان سرعت درون لایه‌ی مرزی سیال عبوری از روی سطح داغ نام‌برده شده را ملاحظه می‌کنید.



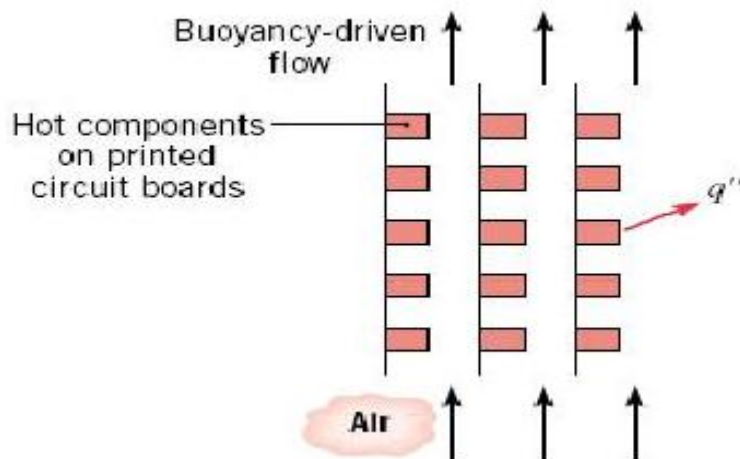
شکل (۱۰-۲) انتقال حرارت بر روی یک صفحه تخت (۳).

۲-۴-۱-۲- انواع مدل‌های انتقال حرارت جابجایی

پدیده انتقال حرارت جابجایی و محاسبه نرخ انتقال حرارت در آن از پیچیدگی‌های خاص خود برخوردار است. خصوصاً این‌که بایستی اثر میدان دما و میدان سرعت به‌صورت هم‌زمان در سیال در نظر گرفته شوند. برای سادگی بررسی و تحلیل انتقال حرارت جابجایی دسته‌بندی زیر صورت می‌گیرد:

انتقال حرارت جابجایی، به دو صورت اجباری^۱ و آزاد^۲ رخ می‌دهد (۴).

^۱ Forced
^۲ Natural



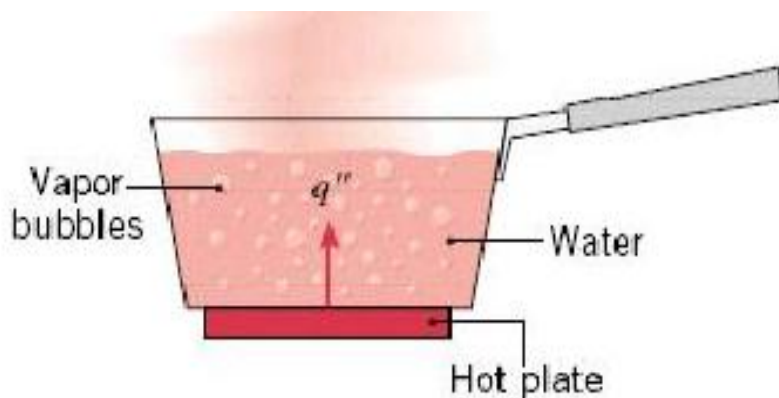
شکل (۲-۱۳) انتقال حرارت جابجایی آزاد (۴).

۲-۴-۲-۱-۳- جابجایی مخلوط^۱

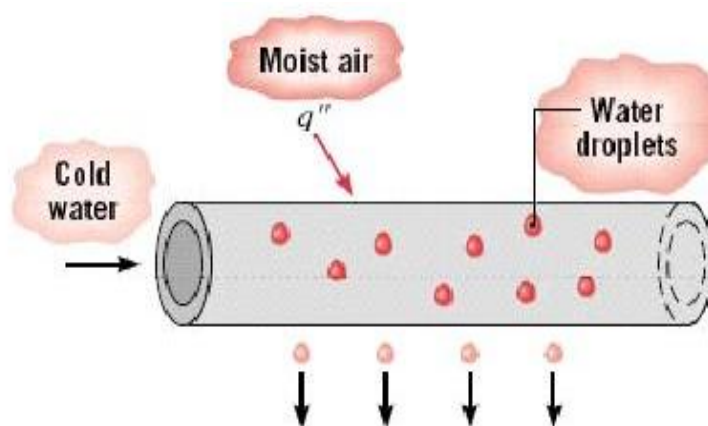
زمانی رخ می دهد که در نظر گرفتن اثر جابجایی طبیعی و اجباری حائز اهمیت باشد. بایستی توجه نمود که جابجایی آزاد همواره وجود دارد، ولی در شرایطی که منبع به حرکت درآوردن سیال عمدتاً یک منبع خارجی باشد، می توان از اثر جابجایی آزاد با تقریب مناسب صرف نظر کرد. معمولاً در موارد متعارف جابجایی انتقال حرارت محسوس^۲ مورد توجه قرار می گیرد اما مواردی وجود دارد که گرمای نهان واکنش (تبخیر و میعان) نیز بایستی در نظر گرفته شود، مثلاً در مسائلی که شامل پدیده های جوشش و تقطیر می باشند. اگر انتقال حرارت با تغییر فاز سیال همراه شود نیز از نوع جابجایی در نظر گرفته می شود. علت این نام گذاری، حرکت القاء شده به سیال در طول فرایند تغییر فاز است، مثل بالا رفتن حباب های بخار در طول جوشش و یا پایین آمدن قطرات آب در طول کندانس (۴).

^۱ Mixed Conv.

^۲ Sensible Energy



شکل (۲-۱۴) انتقال حرارت جابجایی با اثر جوشش (۴).



شکل (۲-۱۵) انتقال حرارت جابجایی با اثر میعان (۴).

علی‌رغم پیچیدگی انتقال حرارت جابجایی، می‌توان نرخ آن را به صورت زیر در نظر گرفت که به قانون خنک شوندگی نیوتون معروف است:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (۲-۱)$$

ثابت انتقال حرارت جابجایی (h)، ویژگی سیال نبوده و تابعی از تمام پارامترهای تأثیرگذار بر جابجایی مثل هندسه سطح، چگونگی حرکت سیال، ویژگی‌های سیال و سرعت توده‌ای درون سیال است. می‌توان بیان کرد که انتقال حرارت جابجایی ترکیبی از هدایت و حرکت سیال است که یکی از مکانیسم‌های بنیادی انتقال حرارت می‌باشد (۳).

۲-۴-۳- انتقال حرارت تشعشی

انتقال گرمای رسانشی و جابه‌جایی نیازمند شیب دما در ماده است؛ اما انتقال گرمای تشعشی به محیط مادی نیاز ندارد. تشعشع فرایند بسیار مهمی است و از نظر فیزیکی

جالب‌ترین نوع انتقال گرماست. بسیاری از فرایندهای گرمایش، سرمایش، خشک‌کردن، احتراق سوخت‌های فسیلی و تابش خورشید با تشعشع سروکار دارند. در روش تشعشعی انتقال حرارت به وسیله امواج شبیه امواج نوری یا رادیویی صورت می‌گیرد. برای مثال انرژی خورشید توسط تشعشعات خورشیدی به زمین انتقال می‌یابد. از آنجایی که حرکت امواج احتیاج به محیط مادی نداشته و در خلاء نیز امکان پذیر است، لذا انجام این روش انتقال حرارت مستقل از وجود یک محیط مادی خواهد بود. در حالی که برای انجام دو روش دیگر وجود یک محیط مادی الزامی است. هر سطح گرمی می‌تواند گرمایش را از طریق تشعشع به فضا یا سطوح سردتر اطراف خود انتقال دهد. در حالی که یک سطح سرد می‌تواند جذب‌کننده تشعشعات حرارتی باشد. در بعضی از دستگاه‌ها برای گرم کردن اتاق از منابع گرمایش تشعشعی در سقف‌ها، دیوارها و یا کف‌ها استفاده می‌نمایند (۳).

هنگامی که گرما به وسیله تشعشع انتقال می‌یابد هوای میان دو جسم گرم و سرد، گرم نمی‌شود زیرا هوا بیشتر تشعشعات را از خود عبور می‌دهد. دمای هوا در معرض خورشید تقریباً هم‌دمای هوایی است که در سایه قرار دارد. با این وجود اگر شخص در معرض تشعشعات خورشید قرار داشته باشد بیشتر احساس گرما خواهد کرد تا هنگامی که در سایه قرار داشته باشد. این فقط به دلیل برخورد مستقیم تشعشعات خورشیدی است که شخص احساس گرمای بیشتری می‌کند. در دماهای پایین و اختلاف دماهای کوچک مقدار تشعشع کم است. لذا در کاربردهای واقعی تبرید، انتقال حرارت تشعشعی کم‌اهمیت می‌باشد. به هر حال اگر سالن سرد در معرض تشعشعات خورشیدی قرار داشته باشد، سالن می‌تواند یک جذب‌کننده گرما باشد. این گرمای جذب‌شده از تشعشعات مستقیم خورشیدی می‌تواند یک برگ خرید بزرگی در محاسبات بار گرمایی باشد.

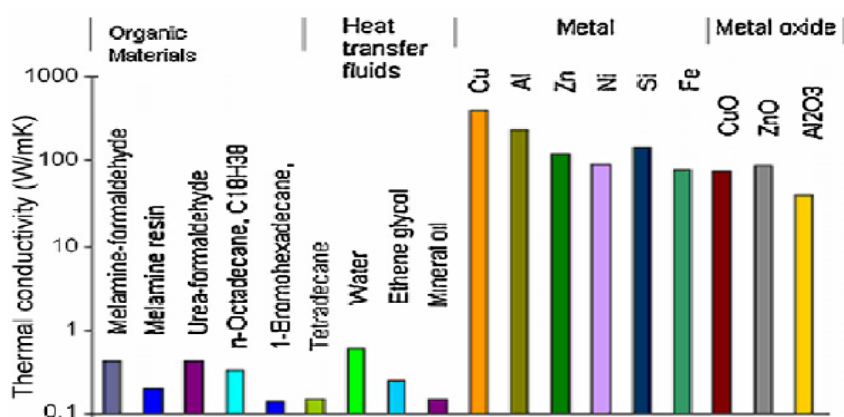
۲-۵- ضرورت و اهمیت نانو سیال

روش‌های گوناگون ارائه شده برای افزایش نرخ انتقال حرارت را می‌توان در دو گروه اصلی دسته‌بندی نمود: روش‌های فعال و غیرفعال.

در روش فعال، انرژی خارجی وارد سیستم می‌گردد. به عنوان نمونه‌هایی از روش فعال می‌توان از ارتعاش، دوران و یا اعمال میدان‌های خارجی الکترواستاتیکی و مغناطیسی در پمپ‌های حرارتی، راکتورها و ... نام برد. هرچند انرژی خارجی ورودی در شرایطی دشوار بوده و همچنین مستلزم هزینه می‌باشد. در روش‌های غیرفعال افزایش انتقال حرارت از طریق بهینه

کردن مشخصات سیال، شکل سطح، افزایش سطح تماس و ایجاد اغتشاش حاصل می‌شود. هرچند پایین بودن نسبی ضریب رسانایی حرارتی سیالات انتقال حرارت مرسوم، محدودیت جدی در این زمینه ایجاد نموده است.

در بین سیالات انتقال حرارت متداول، آب دارای بالاترین ضریب رسانایی حرارتی است که در حدود 0.6 W/mK در درجه حرارت اتاق می‌باشد. در شکل ۲-۱۶ ضریب رسانایی حرارتی چند سیال مرسوم، پلیمرها و جامدات به صورت مقایسه‌ای نمایش داده شده است (۵).



شکل ۲-۱۶ مقایسه ضریب رسانایی حرارتی سیالات متداول، پلیمرها و جامدات (۳).

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ضریب رسانایی حرارتی آب نسبت به فلزات و اکسید فلزات چندین مرتبه کوچک‌تر است. مقایسه‌هایی از این دست، محققان را بر آن داشت تا ایده استفاده از ذرات جامد با ضریب رسانایی حرارتی بالا را در سیالات پایه به منظور افزایش رسانایی آن‌ها مورد آزمایش و مطالعه قرار دهند. مطالعات ابتدایی، مشتمل بر استفاده از ذراتی با ابعاد میلی‌متر و میکرومتر بود که مشکلاتی نظیر پایداری ضعیف سوسپانسیون و همچنین انسداد کانال (که در کانال‌های با ابعاد کوچک بسیار مهم می‌باشد) را به همراه داشت (۵).

۲-۵-۱- تاریخچه نانو سیالات (۶)

چوی^۱ در سال ۱۹۹۵ میلادی در مؤسسه تحقیقاتی آرگونه^۲ در آمریکا، اولین کسی بود که از لفظ نانو سیال برای سوسپانسیون‌های نانوذره در مایع استفاده کرد و ادعا کرد که چنین

^۱ Choi

^۲ Argonne

سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از نظر خواص پایداری و انتقالی در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد/ مایع و ماکرو سیالات تفاوت‌های فراوانی دارند.

تفاوت اساسی نانو سیالات با سوسپانسیون‌های معمولی از اندازه بسیار ریز ذرات پراکنده نشئت می‌گیرد. بسیاری از نیروهای مؤثر در بعد ماکرو، با کوچک شدن ذرات و سطح بسیار بالای آن‌ها، تأثیر خود را از دست می‌دهند و جای خود را به نیروهای بین‌مولکولی می‌دهند. در اندازه‌های مختلف ذره، نیروهای مؤثر بر آن‌ها متفاوت است. در ذرات با مقیاس سانتی‌متری نیروی‌های جاذبه، اصطکاک، درگ، بویانسی و احتراق و غیره مؤثر هستند. در ذرات با مقیاس میلی‌متری؛ جاذبه، اصطکاک، درگ، بویانسی، الکترواستاتیک از نیروهای مؤثر هستند. در ذرات میکرو؛ نیروهای الکترواستاتیک، واندروالس، کشش سطحی، براونی و در ذرات نانو؛ الکترواستاتیک، واندروالس، کشش سطحی، براونی و کوانتوم از نیروهای مؤثر هستند. در مقیاس نانو نیروهای بین‌مولکولی تأثیر بیشتری نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی دارند و با توجه به اینکه خواص موجی شکل (مکانیک کوانتوم) الکترون‌های داخل ماده و اثر متقابل آن‌ها روی یکدیگر از جابجایی مواد در مقیاس نانو تأثیر می‌پذیرد، امکان کنترل و تغییر در خواص ذاتی مواد از جمله خواص گرمایی، الکتریکی، نوری، مغناطیسی و بار هسته و غیره بدون تغییر در خواص شیمیایی وجود دارد. به طور مثال چون در نانو ساختارها نسبت سطح به حجم فوق‌العاده بالایی وجود دارد خواصی مانند چگالی در اثر نانو شدن تغییر می‌کند و همچنین نیروهای بار الکتریکی سطح و درگ که به سطح وارد می‌شود از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند و نیروهای وزن و شناوری، به علت اندازه فوق‌العاده کوچک و جرم فوق‌العاده کم، اهمیت خود را از دست می‌دهد و نیروهای سطحی و بین‌مولکولی اهمیت پیدا می‌کند. رقابت بین پایداری و ناپایداری یک سوسپانسیون به برآیند نیروهای جاذبه واندروالس و نیروهای دفع الکترواستاتیک برمی‌گردد. به عبارت دیگر هنگامی که توده‌ای از مولکول‌ها در نظر گرفته می‌شود، نیروهای دیگری مانند نیروهای کشش سطحی، آب‌دوستی، آب‌گریزی و غیره نیز باید در نظر گرفته شود که باعث ایجاد تفاوت‌هایی بین سیالات نانو و ماکرو می‌شود که این تفاوت‌ها هم در جریان سیال و هم در حالت ایستا، تناقضات خود را نشان می‌دهد. از دید مولکولی، فرضیات جریان ماکرو زیر سؤال می‌رود زیرا رفتار سیال در مقیاس کوچک تغییر می‌کند و مقیاس طول اهمیت پیدا می‌کند. در مقیاس ماکرو، سیال پیوسته است و به سطوح می‌چسبد. در حالی که فرضیه پیوستگی، در ابعاد مولکولی، به علت وجود فواصل بین‌مولکولی زیر سؤال می‌رود. بنابراین برای توجیه رفتار سیالات در این بعد، یا مدل‌های اتمی

و مولکولی که فرضیه پیوستگی در آن نقشی ندارد را در نظر می گیرند و یا فرضیه پیوستگی را با در نظر گرفتن محدودیت هایی استفاده می کنند.

۲-۵-۲- معرفی نانو سیالات

نانو سیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربرهای صنعتی هستند.

اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون مس (Cu)، نقره (Silver)، اکسید فلزی همچون آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، اکسید مس (CuO) هستند. سیالات متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می شوند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی شان با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می شود، می گردند.

درواقع گروهی جدید از سیالات که قادر به انتقال حرارت می باشند، نانو سیال نامیده می شوند. نانو سیالات به وسیله پخش و منتشر کردن ذرات در اندازه های نانومتری در سیالات متداول منتقل کننده گرما، به منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت، ساخته می شوند (۷).

نتایج آزمایش هایی که در رابطه با نحوه انتقال حرارت بر روی چندین نمونه نانو سیال انجام شد، نشان می دهد که عملکرد نانو سیالات در انتقال حرارت عموماً بیشتر از آن چیزی است که به صورت نظری پیش بینی شده است. این واقعیت یک کشف اساسی در مسئله انتقال حرارت هست.

۲-۵-۳- ویژگی های نانو سیالات

از ویژگی های کلیدی نانو سیالات که تاکنون کشف شده اند می توان هدایت های گرمایی بسیار بالاتر از آنچه سوسپانسیون های مرسوم از خود نشان داده بودند، وجود نسبت غیرخطی میان هدایت گرمایی و غلظت نانولوله های کربنی در نانو سیالات و نیز وابستگی شدید هدایت گرمایی به دما و افزایش چشمگیر در شار حرارتی بحرانی را نام برد. هرکدام از این ویژگی ها در جای خود برای دستگاه های حرارتی بسیار مطلوب می باشند و در کنار هم، نانو سیالات را بهترین کاندیدا برای تولید سردکننده های مبتنی بر مایع می نمایند. این یافته ها همچنین وجود

محدودیت‌های اساسی در مدل‌های انتقال گرمایی متداول برای سوسپانسیون‌های جامد/مایع را به‌وضوح نشان می‌دهد. غلظت نانو ذرات را بر حسب درصد غلظت حجمی در سیال پایه بیان می‌کنند. درصد غلظت حجمی نانو ذرات در سیال پایه عبارت است از حجم نانو ذرات استفاده شده تقسیم بر حجم کل سیال پایه.

۲-۵-۴- انتقال حرارت در نانو سیالات

نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت رسانش در نانو سیال می‌شود. بنابراین نانو سیال‌های گزینه‌های مناسبی برای استفاده در کاربردهای انتقال حرارت به شمار می‌روند.

ازجمله عوامل انتقال حرارت در نانو سیالات، عبارت‌اند از: حرکت نانو ذرات، سطح مولکولی لایه‌ای مایع در سطح مشترک مایع با ذرات، انتقال حرارت پرتابه‌ای در نانو ذرات و تأثیر خوشه‌ای شدن نانو ذرات ازجمله عوامل انتقال حرارت در نانو سیالات می‌باشند.

۲-۵-۵- مزایای بالقوه نانو سیالات

فرایند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی در اغلب صنایع کوچک و بزرگ وجود دارد. افزایش میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی صرفه‌جویی میلیون‌ها دلار در هزینه‌های صنایع می‌باشد. با رفتاری که نانو سیالات از خود در زمینه انتقال حرارت نشان داده‌اند امید به چنین صرفه‌جویی در صنایع به‌ویژه صنایع بزرگ شده است. برخی از مزایا و قابلیت‌های بالقوه نانو سیالات به قرار زیر است (۸).

۲-۵-۵-۱- بهبود انتقال حرارت و پایداری

کاهش اندازه ذرات یک جامد که همراه با افزایش تعداد در واحد جرم می‌باشد منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد. بطوریکه سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتری می‌باشد. با کاهش اندازه ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. سطح ذرات در انتقال حرارت مؤثر بوده است و استفاده از نانو سیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می‌گردد بنابراین نانو ذرات یک سطح بسیار زیاد برای انتقال حرارت ایجاد می‌کند و همین عامل یک مزیت بالقوه برای نانو سیال می‌باشد. مقایسه سطح ایجادشده برای انتقال حرارت در نانو ذرات یا سطح پودرهای متداول میکرومتری بیانگر توانایی و قابلیت زیاد نانو ذرات در افزایش انتقال

حرارت و ایجاد سوسپانسیون پایدار می‌باشد. لازم به ذکر است که یکی از مشکلات افزودن ذرات به اندازه میکرو به سیال پایه ته‌نشینی سریع انجا است که با کاهش اندازه به مقیاس نانو تا حدود زیادی مرتفع می‌گردد (۸).

۲-۵-۵-۲- کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال

در سیالات متداول حامل انرژی افزایش میزان انتقال حرارت جابه جایی مستلزم افزایش سرعت سیال و بالا رفتن عدد رینولدز و به تبع آن عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه جایی است. این افزایش سرعت در درون تجهیزات به نوبه خود مستلزم افزایش توان مصرفی پمپ می‌باشد. اما اگر نانو سیال بکار گرفته شود در یک سرعت معین افزایش انتقال حرارت نتیجه افزایش هدایت حرارتی سیال خواهد بود به عنوان مثال افزایش انتقال حرارت به میزان ۲ برابر با استفاده از سیال پایه نیازمند افزایش توان پمپ به حدود ۱۰ برابر می‌باشد. در حالی که اگر نانو ذرات به سیال پایه افزوده شده و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال حاصل حدود ۳ برابر سیال پایه گردد بدون نیاز به پمپ می‌توان به همان ۲ برابر افزایش در انتقال حرارت دست پیدا کرد. بنابراین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپ‌ها از دیگر مزایای نانو سیالات است (۸).

۲-۵-۵-۳- کاهش گرفتگی و انسداد مجاری

ایده افزایش انتقال حرارت با استفاده از افزودن ذرات به سیال پایه قدمتی نزدیک به صدسال دارد. لیکن ذراتی که در تحقیقات قدیمی به سیالات افزوده می‌شد دارای اندازه‌های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته‌نشین می‌شوند. همین امر سبب می‌شود که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود گردد در حالی که ذرات با اندازه نانو تشکیل سوسپانسیون‌های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته‌نشینی آن‌ها سبب می‌گردد تا مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد. از طرفی ذرات میکرومتری سبب می‌شود تا نتوان از آن‌ها در مجاری میکرو کانال‌ها استفاده کرد در حالی که اندازه ذرات نانو این امکان را می‌دهد تا از نانو سیال بتوان در میکرو کانال‌ها استفاده کرد (۸).

۲-۵-۴- کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت

با توجه به قابلیت که نانو سیال از خود در افزایش حرارت نشان داده است برای انتقال یک مقدار مشخص از حرارت وقتی که از نانو سیال بجای سیال معمولی استفاده شود مبدل حرارتی لازم حجم کوچک‌تری خواهد داشت (۸).

۲-۵-۵- کاهش هزینه‌ها

به دلیل کاهش توان مصرفی پمپ‌ها انتقال سیال از طرفی و کاهش اندازه و وزن تجهیزات انتقال حرارت از طرف دیگر با به‌کارگیری نانو سیال صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد گردد (۸).

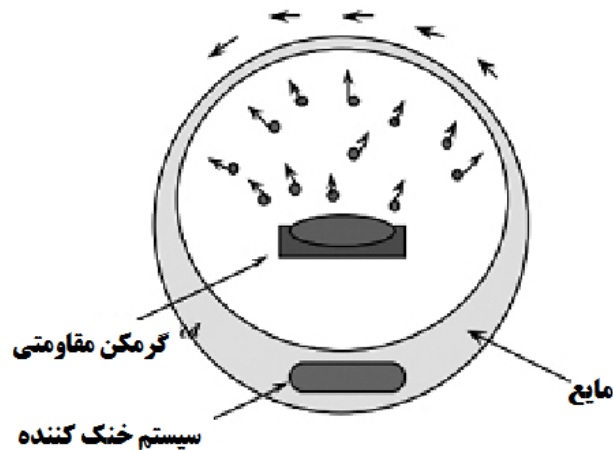
۲-۵-۶- تهیه نانو سیال

طرز تهیه نانو سیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت می‌باشد. تهیه نانو سیال را که از طریق نانو ذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت؛ زیرا تهیه نانو سیالات مستلزم ایجاد شرایطی مانند یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایدار بودن سوسپانسیون، توده‌ای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال می‌باشد. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راهکارهای مختلف استفاده می‌شود به‌عنوان مثال می‌توان از تغییر PH محلول سوسپانسیون استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد و یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد.

شیوه‌های تهیه نانو سیال به دو روش تقسیم می‌گردد:

۲-۵-۶-۱- روش تهیه یک مرحله‌ای

در روش تک مرحله‌ای ذرات موردنظر به‌طور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می‌شوند. به‌عنوان مثال برای تهیه نانو ذرات فلزی درون یک سیال بخار فلز مستقیماً به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانو ذرات کنداس گردد. این روش تهیه نانو سیال به روش پایین به بالا نیز معروف است این روش که در شکل ۲-۱۷ فرایند آن نشان داده شده است روش مناسبی برای تولید نانو سیالات فلزی می‌باشد (۹).



شکل (۲-۱۷) روش تک مرحله‌ای ساخت نانو سیال (۹).

در این روش تهیه نانو سیالات سطح نانو ذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آن‌ها تشکیل نمی‌گردد. به همین دلیل نانو ذرات تهیه شده از این طریق بسیار تمیز می‌باشد که مزیت روش یک مرحله‌ای نانو سیال است. تهیه نانو سیال با این روش اغلب همراه با مقداری متراکم و تجمع ذرات در درون سیال می‌باشد (۱۰).

در شکل ۲-۱۸ مجموعه‌ای نشان داده شده است که برای تهیه نانو سیال به روش یک مرحله‌ای بکار می‌رود. در این دستگاه قطعات فلز موردنظر که تهیه نانو ذرات آن مدنظر می‌باشد توسط بخاری برقی گرم می‌شود. این قطعات فلزی در درون محفظه‌ای تحت خلأ قرار دارد. بخارات فلزی تشکیل شده با یکدیگر برخورد کرده و خوشه‌هایی از ذرات در مقیاس نانو تشکیل می‌دهند. هنگامی که این ذرات به سطح ذرات ماتریس مایع در حال حرکت می‌رسند توسط ماتریس مایع به دام افتاده و به واسطه احاطه شدن توسط مولکول‌های مایع از برخورد بیشتر آن‌ها جلوگیری به عمل آمده و در نتیجه رشد نانو ذرات محدود می‌گردد. با استفاده از این دستگاه محققین نانو سیال حاوی ذرات نقره و مس را در سیال پایه روغن سیلیکون و پارافین مایع تهیه کرده‌اند (۱۱).



شکل (۲-۱۸) دستگاهی برای تهیه تک مرحله‌ای نانو سیال (۱۱).

۲-۵-۶-۲- روش تهیه دومرحله‌ای

روش تهیه یک مرحله‌ای تهیه نانو سیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دومرحله‌ای جهت تهیه نانو سیال اشاره کرده‌اند علت این مسئله نیز آسان‌تر بودن فرمولاسیون نانو سیال با ناو پودرهای آماده و خریداری شده است. در روش دومرحله‌ای برای تهیه نانو سیال می‌توان از انواع نانو پودرها با اندازه‌های مختلف به راحتی استفاده کرد. در این روش ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله مورد نظر تهیه گردیده و سپس به سیال پایه افزوده می‌گردد. به نظر می‌رسد که این روش با توجه به این که می‌توان نانو ذرات و نانولوله‌ها را بیشتر و اغلب آسان‌تر از روش یک مرحله‌ای تهیه کرد اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. در این روش نیز باید مسئله کلوخه شدن و نیز چسبندگی نانو ذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده‌ای ذرات و برگرداندن آن‌ها به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی است که در تهیه نانو سیال باید صورت بگیرد چراکه اندازه و توزیع ذرات در داخل سیال مهم‌ترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی بر عهده دارد.

تجهیزات مختلفی را برای پراکنده سازی نانو ذرات در درون سیال می‌توان بکار برد از جمله این تجهیزات حمام ماورای صوت، همزن مغناطیسی، همزن با توان برشی بالا و هموژنایزر می‌باشند. زمان فراوری نانو سیال و شدت همزن تأثیر مهمی بر پراکندگی نانو ذرات در درون سیال پایه دارند.

پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده‌ای شده با اعمال نیرو شکسته می‌شود. با این حال نانو ذرات به شدت متمایل به توده‌ای شدن مجدد هستند یکی از دلایل این مسئله نیروی **واندوالس می‌باشد (۱۱)**.

۲-۵-۶-۳- پایداری نانو ذرات در نانو سیالات

نانو ذراتی که روش یک مرحله‌ای و یا به روش دوم مرحله‌ای تهیه می‌گردند باید تا حد ممکن پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و ته نشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایداری سازی تعلیق نانو ذرات در سیال مورد توجه قرار گیرد. در اندازه و مقیاس نانو اتم‌های سطحی به شدت افزایش پیدا کرده و اهمیت می‌یابند. به عبارت دیگر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سطح اهمیت بسیار بیشتری نسبت به ساختار ماده پیدا می‌کند وقتی که مواد نانو تحت تأثیر دمای محیط قرار می‌گیرند اتم‌های سطح ذره علت اصلی توده‌ای شدن ذرات می‌باشد. برای پایدار کردن نانو ذرات و جلوگیری از کلوخه و توده‌ای شدن ذرات که سبب سنگینی و تسریع ته نشینی می‌گردد از روش‌های مختلف از جمله پایدار کننده‌ها، تغییر pH با ایجاد نوسان ماورای صوت می‌توان استفاده کرد.

۲-۵-۶-۴- جابجایی ذرات در سوسپانسیون های نانو سیالات

درک رفتار جریان و جابه جایی ذره در نانو سیالات برای استفاده از آن به عنوان محیط بالقوه انتقال حرارت بسیار مهم می‌باشد. رفتار جریان در این گونه سیالات می‌تواند تحت تأثیر جابه جایی ذرات که می‌تواند ناشی از عدم تجانس توزیع غلظت در نانو سیال جاری باشد قرار بگیرد. دو دیدگاه راجع به جابجایی در سوسپانسیون وجود دارد. یک دیدگاه بر اساس قانون بقاء جرم برای فاز توزیع شده و دیدگاه دیگر بر موازنه مومنتوم در فاز ذرات استوار است. دیدگاه مبتنی بر موازنه مومنتوم بسیار پیچیده است در حالی که دیدگاه مبتنی بر موازنه جرم حالت نیمه تجربی دارد. سازگاری این نگرش با نتایج تجربی برای ذراتی با اندازه میکرون اثبات شده است.

در دیدگاه مبتنی بر موازنه جرم سه مکانیزم برای جابه جایی ذره در جریانهای برشی غیر یکنواخت ارائه شده است این مکانیزم ها عبارتند از (۱۲) :

۱. جابجایی ناشی از برش که به وسیله آن ذرات از نواحی با نرخ برش بالا به نواحی با نرخ برش پایین منتقل می‌شوند.

۲. جابه جایی ناشی از گرادیان ویسکوزیته که بوسیله ان ذرات از نواحی با ویسکوزیته بالا به نواحی با ویسکوزیته پایین تر حرکت می کنند.
۳. خود نفوذی ناشی از حرکت براونی که بوسیله ان ذرات از نواحی با غلظت بالا به نواحی با غلظت پایین تر منتقل می شوند.

۲-۶- مروری بر تحقیقات انجام شده

در (۱۳) عملکرد انتقال حرارت نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم پراکنده شده در آب و جاری در یک لوله مدور افقی را مورد بررسی قرار دادند. نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به ترتیب دارای قطرهای ۱۳ نانومتر و ۱ نانومتر بودند. آن ها متوجه شدند که عدد ناسلت نانو سیالات با افزایش در عدد رینولدز و غلظت حجمی نانو ذرات افزایش می یابد اما در عدد رینولدز ثابت ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانو سیالات حاوی ۳٪ نانو ذرات ۱۲٪ نسبت به سیال خالص کاهش نشان دهنده است. علت آن ممکن است این باشد که نانو سیالات گرانیوی بالاتری نسبت به سیال خالص دارند و این گرانیوی با افزایش ذرات بیشتر می شود. نهایتاً رابطه انتقال حرارت جدیدی برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانو سیالات در رژیم جریان متلاطم پیشنهاد کردند.

در (۱۴) به تحقیق در مورد ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانو سیالات اب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس در رژیم جریان آب در یک لوله حلقوی تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره پرداختند. این شرایط با حالت فلاکس حرارتی ثابت دیواره که توسط محققان دیگر بررسی شده بود، متفاوت بود. دستگاه آزمایشگاهی از یک لوله حلقوی به طول ۱ متر که لوله داخلی از جنس مس با قطر داخلی ۶^{mm} و ضخامت ۰/۵^{mm} و لوله خارجی از جنس فولاد ضدزنگ با قطر خارجی ۳۲^{mm} تشکیل شده بود. بخار اشباع برای ایجاد شرایط مرزی دمای دیواره ثابت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش اعداد پکلت و تراکم حجمی نانو ذرات افزایش می یابد. همچنین نانو سیال اب-اکسید آلومینیوم افزایش بیشتری نسبت به نانو سیال اب-اکسید مس از خود نشان داد.

در (۱۵) نتایج آزمایش ها خود را مورد انتقال حرارت و رفتار جریان نانو سیال اب-اکسید تیتانیوم را که در یک لوله عمودی تحت شرایط مرزی فلاکس حرارتی ثابت حرکتی رو به بالا داشت تحت رژیم های جریان آرام و متلاطم ارائه نمودند. نتایج آن ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانو ذرات در هر دو رژیم جریان آرام و متلاطم در

عدد رینولدز ثابت و سایز ذره یکسان افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه در غلظت یکسان و عدد رینولدز ثابت ضریب انتقال حرارت نسبت به قطر میانگین ذرات تحت شرایط آزمایشگاهی تغییرات محسوسی از خود نشان نداد. تأثیر کوچک اندازه ذرات روی ضریب انتقال حرارت می‌تواند ناشی از مهاجرت نانو ذرات باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که افت فشار نیز نسبت به حالت استفاده از سیال پایه تغییر خاصی نداشته است.

در (۱۶) خواص انتقال حرارتی نانو سیالات اب-اکسید آلومینیوم و اب-اکسید تیتانیوم را در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله و تحت شرایط رژیم جریان متلاطم بررسی کردند. تأثیرات عدد پکلت، تراکم حجمی نانو ذرات معلق و نوع ذره را روی خواص حرارتی موردبررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات موجب افزایش خواص انتقال حرارتی سیال پایه می‌شود و برای هردو نانو سیال دو تراکم ذره بهینه وجود دارد. آن‌ها با مقایسه رفتار انتقال حرارت دو نانو سیال دریافتند که در یک پکلت مشخص خواص انتقال حرارت اب-اکسید تیتانیوم در تراکم بهینه ذرات نسبت به آب -اکسید آلومینیوم بزرگ‌تر است. این در حالی است که نانو سیال آب اکسید آلومینیوم رفتار انتقال حرارتی بهتری را در تراکم‌های بیشتر نانو ذرات از خود نشان می‌دهد.

در (۱۷) با فرض جریان تکفاز برای نانو سیال آب -اکسید آلومینیوم و با استفاده از روش عددی به بررسی عوامل مؤثر بر انتقال حرارت مبدل حرارتی فشرده پرداختند. مطالعه مقایسه‌ای نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم به‌عنوان مبرد جدید با مبردهای قدیمی صورت پذیرفته و نتایج نشان‌دهنده ظرفیت سرمایشی بسیار بالاتر نانو سیال بوده‌اند.

در (۱۸) شبیه‌سازی CFD مشخصات نانو سیال جاری در لوله مدوری که یک چرخاننده حلزونی سیال درون آن ثابت شده است و تحت فلاکس حرارتی ثابت قرار دارد با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت در رژیم جریان آرام انجام دادند. محاسبات آن‌ها برای نانو سیال اب-اکسید آلومینیوم در تراکم‌های حجمی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ صورت گرفت و ۵ تا ۱۳٪ افزایش در عدد ناسلت را مشاهده کردند.

در (۱۹) تأثیر نانو سیال آب- اکسید مس را روی عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای کوچک با سطح اضافی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا خواص ترموفیزیکی نانو سیال را اندازه‌گیری کردند سپس با استفاده از کدهای CFD مبدل حرارتی را شبیه‌سازی نموده و نتایج را باحالت سیال پایه بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که به ازای گرمای اعمال‌شده معین دبی

حجمی مورد نیاز نانو سیال نسبت به آب کاهش یافته که خود منجر به کاهش افت فشار می شود به عبارت دیگر تجهیزات کوچک تر و توان پمپ کمتری مورد نیاز است.

در (۲۰) اثر نانو سیال آب- TiO_2 بر ضریب انتقال حرارت را در مبدل دولوله ای به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نانو سیال استفاده شده در این تحقیق آب و TiO_2 با ۲/۰٪ حجمی بود. آن ها در این تحقیق ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانو سیال را در جریان متلاطم بررسی کردند. در اثر استفاده از نانو سیال ضریب انتقال حرارت ۱۱-۶٪ افزایش پیدا کرد و با افزایش نرخ جریان جرمی ورودی به مبدل ضریب انتقال حرارت افزایش و دمای نانو سیال کاهش پیدا کرد. در پایان نیز نتایج آزمایشگاهی را با معادله نیلنسکی مقایسه کردند که نتایج رضایت بخشی را ارائه نکرد.

در (۲۱) انتقال حرارت در مبدل حرارتی پوسته و لوله با نانو سیال آب- Al_2O_3 را در غلظت های مختلف از نانو ذرات Al_2O_3 (۳/۰ تا ۲ درصد حجمی) بررسی کردند. قطر نانو ذرات مورد استفاده ۳۰ نانومتر بود. نتایج نشان داد در یک نرخ جریان سیال و دمای ورودی به مبدل حرارتی میزان انتقال حرارت به واسطه نانو سیال آب- Al_2O_3 افزایش پیدا کرد. هم چنین در حالت استفاده از نانو سیال آب- Al_2O_3 با افزایش نرخ جریان سیال میزان انتقال حرارت نیز افزایش پیدا کرد. افزایش غلظت Al_2O_3 سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شد اما به دلیل افزایش ویسکوزیته سیال سبب افزایش فاکتور اصطکاک در مبدل حرارتی گردید.

در (۲۲) انتقال حرارت و خصوصیات جریان در یک مبدل حرارتی مارپیچی تحت اثر نانو سیال آب-مس، آب-آهن و آب-نقره را بررسی کردند. آن ها در این تحقیق اثرات سرعت جریان (۴ و ۱۰ لیتر بر دقیقه)، سرعت همزنی (۴۰۰ و ۸۰۰ و ۱۳۰۰ دور بر دقیقه) را در سه قطر متفاوت از لوله بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش نرخ جریان سیال و سرعت هم زدن میزان انتقال حرارت در تمام نانو سیال های فلزی آهن-آب، نقره-آب و مس-آب افزایش می یابد اما سبب افزایش کمی فشار در سیال شد. نانو سیال مس-آب سبب افزایش انتقال حرارت بیشتری شد به طوری که نسبت به نانو سیال های آهن-آب و نقره-آب عملکرد مبدل حرارتی را ۲/۴٪ و ۸/۷٪ افزایش داد.

در (۲۳) انتقال حرارت و مشخصه های افت فشار را در مبدل حرارتی صفحه ای بررسی کردند. در این پژوهش از روش ترکیبی نانو ذرات آلومینا و نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNTs) به جای سیال پایه استفاده شد. از سیال اصلی ترکیبی از نانو سیال آب- Al_2O_3

با غلظت حجمی ۱/۸۹٪ و آب- MWCNTs با غلظت حجمی ۰/۲۲۲٪ استفاده شد. نتایج به دست آمده از روش ترکیبی با نانو سیال آب- Al_2O_3 و آب مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش ترکیبی دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری نسبت به روش های آب- Al_2O_3 و آب است اما افت فشار در روش ترکیبی نسبت به سیال پایه (آب) بیشتر و نسبت به نانو سیال آب- Al_2O_3 کمتر است.

در (۲۴) در پژوهشی با استفاده از حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت آن، تأثیر افزودن کسر حجمی نانو ذرات بر عملکرد یک مبدل حرارتی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک را بررسی کردند. آن ها از مدل تکفاز برای مخلوط سیال پایه و نانو ذرات از فرمول های تحلیلی و تجربی استفاده کرده و از روش حجم محدود برای حل عددی معادلات حاکم استفاده کردند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن نانو ذرات در قسمت حلقوی مبدل، آنتروپی تولید شده ی کل به میزان بسیار اندکی افزایش می یابد که قابل چشم پوشی است. با افزایش کسر حجمی نانو ذرات ضریب انتقال حرارت و انتقال حرارت کل به میزان قابل توجهی افزایش یافت.

در (۲۵) به بررسی نرخ انتقال حرارت در مبدل صفحه ای مورد استفاده در صنعت پاستوریزاسیون شیر پرداختند. از نانو ذرات TiO_2 با غلظت وزنی ۰/۲۵٪، ۰/۳۵٪ و ۰/۸٪ استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از نانو سیال آب- TiO_2 به جای سیال پایه سبب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش فشار در سیال می شود.

در تحقیق (۲۶) یک مبدل حرارتی دو لوله ای را به صورت عددی مدل سازی کردند. آن ها میزان تأثیر افزایش در اعداد رینولدز مختلف بر عدد ناسلت، تغییرات تنش برشی و تغییرات دمای نانو سیال و درصد حجمی نانو ذرات Al_2O_3 را بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزودن درصد حجمی نانو ذرات و با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت و تنش برشی افزایش چشم گیری دارند و دمای دیواره و سیال کاهش می یابند.

در (۲۷) در مطالعه ای آزمایشگاهی تأثیر نانو سیال را بر عملکرد حرارتی مبدل خودرو بررسی کردند. آن ها در غلظت های مختلف نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم و در شارهای مختلف در جریان مغشوش نشان دادند که با به کارگیری نانو سیال به جای آب در مبدل حرارتی خودرو می توان افزایش چشمگیری را در ضریب انتقال حرارت مشاهده نمود.

در (۲۸) انتقال حرارت نانو سیال آب - آلو مینا در لوله‌ی متخلخل عمودی، تحت شار ثابت را به دو صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. حداکثر افزایش ۲۰ درصدی انتقال حرارت نانو سیال با غلظت حجمی ۰/۳٪ نسبت به سیال پایه در لوله متخلخل توسط این محققان گزارش شد. با توجه به تأثیر تخلخل بر انتقال حرارت، این محققان پیشنهاد کاربردهایی همچون مبدل‌های متخلخل را مطرح کردند.

(۲۹) در پژوهشی انتقال حرارت آب و نانو سیال آب-آلومینا را در یک لوله دما ثابت حاوی ماده متخلخل به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پس از اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی لوله، عدد ناسلت متوسط برای هر درصد حجمی را محاسبه و همزمان افت فشار در لوله را نیز اندازه‌گیری کردند. نتایج به دست آمده نمایشگر افزایش انتقال حرارت نانو سیال نسبت به سیال پایه بود. آن‌ها استفاده از ماده متخلخل فلزی در لوله‌های مبدل را به عنوان راهکاری جدید برای افزایش انتقال حرارت ارائه دادند. نتایج لوله متخلخل نشان‌دهنده افزایش فراوانی در انتقال حرارت جابجایی تا حدود دو برابر، در مقایسه با لوله خالی است.

(۳۰) در تحقیقی اثرات غلظت نانواکسید مس در آب را بر مشخصات انتقال حرارت در مبدل حرارتی دولوله‌ای در جریان موازی هم جهت و مخالف جهت بررسی کرد. میزان غلظت اکسید مس ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۴ درصد بود. نتایج نشان داد که افزایش غلظت مس در آب سبب افزایش ضریب انتقال حرارت آب خالص بود.

در (۳۱) اثرات نانو ذرات مس، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم را با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵٪ بر خواص انتقال حرارت در مبدل حرارتی صفحه‌ای بررسی نمودند. آن‌ها در نتایج خود گزارش نمودند که:

۱. افزایش غلظت نانو ذرات سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده است. بیشترین اثر در افزایش ضریب انتقال حرارت مربوط به نانو ذرات مس بود.
۲. ضریب مقاومت نانو ذرات با افزایش عدد رینولدز سیال به طور چشمگیری افزایش پیدا کرد.

در (۳۲) از روش تک فاز برای بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مس-آب و مس-روغن درون لوله افقی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال به سرعت سیال و غلظت حجمی نانوذرات بستگی دارد، همچنین در شرایط

یکسان از مقادیر مربوط به سیال پایه بیشتر است. بطوریکه برای نانوسیال با ۲٪ حجمی ذرات مس عدد ناسلت افزایش ۶۰٪ نشان می‌دهد.

در (۳۳) به فرمول بندی ریاضی و حل عددی انتقال حرارت جابجایی و تنش برشی برای جریان‌های آرام و آشفته نانوسیالات آلومینا آب و آلومینا اتیلن گلیکول درون لوله‌ای که بطور یکنواخت تحت حرارت بوده است، پرداختند. آنها مخلوط مایع- جامد را بصورت تک فاز فرض نمودند، بنابراین از سرعت لغزشی صرف‌نظر کردند. آنها نشان دادند که انتقال حرارت و اصطکاک دیواره نانوسیالات با افزایش غلظت نانوذرات بیشتر می‌شود و نانوسیال آلومینا اتیلن گلیکول افزایش انتقال حرارت بیشتری نسبت به نانوسیال آلومینا آب دارد و کارایی انتقال حرارت نانوسیال با افزایش عدد رینولدز در جریان آشفته سرعت بدون بعد هستند.

در (۳۴) انتقال حرارت ترکیبی (آزاد و اجباری) جریان آرام نانوسیال آب- Al_2O_3 در لوله مدور را با به کار بردن مدل دوفازی (مخلوط) به روش عددی بررسی و تحلیل کردند. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با شرایط مرزی فلاکس حرارتی ثابت در نظر گرفته و متغیرهای میدان جریان محاسبه و آنالیز شدند. آنان توزیع سرعت سیال و عدد ناسلت را در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز و گراشف ارائه نمودند. این پژوهش گران با در نظر گرفتن مدل دوفازی، اثر حرکت ذرات درون سیال و همچنین اثر اندزه نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در (۳۵) در مقاله‌ای ضمن مطالعه مراجع منتشرشده در سال‌های اخیر و استفاده از تجربیات و مطالعات خود در زمینه نانو ذرات، پارامترهای تأثیرگذار برافزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیالات نسبت به سیالات پایه را موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد افزایش دبی و غلظت نانو سیالات تأثیر به سزایی برافزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی داشته و ساینز نانو ذرات استفاده‌شده برای ایجاد نانو سیال در محدوده ۵۰-۳۰ نانومتر اثر مطلوب‌ترین برافزایش انتقال حرارت گذاشت. آن‌ها در نتایج خود گزارش کردند که در صورت فراهم شدن شرایط مناسب (دبی و غلظت نانو سیال)، افزایشی در حدود ۶۰-۵۰٪ برای ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیالات نسبت به سیالات پایه گزارش شده است که این افزایش چشمگیر می‌تواند انقلابی در هزینه‌های انرژی در صنایع گوناگون ایجاد نماید.

در (۴) در مقاله‌ای میزان افزایش انتقال حرارت نانوسیال تحت جریان درهم در یک لوله مارپیچ عمودی به صورت آزمایشگاهی را اندازه گیری کردند. آن‌ها ضریب انتقال حرارت

و عدد ناسلت برای نانوسیال را اندازه‌گیری و محاسبه کردند. نانوسیال مورد بررسی مخلوط آب و نانوذره نقره می بود که با کسر حجمی متفاوت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ و ۰/۱ از نانوذرات نقره تهیه شد. در این تحقیق تاثیر پارامترهای متفاوتی از قبیل میزان افزایش دبی، کسر حجمی نانوذره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشانگر بهبود خواص حرارتی با افزودن نانوذرات به سیال پایه بود.

در (۷) تحقیق بررسی تاثیر نانو سیال DZ درافزایش و بهبود میزان انتقال حرارت نسبت به سیال پایه آب در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای می باشد ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سیال پایه و همچنین برای نانو سیال درصد حجمی ۱/۰ از نانوذره DZ و در دبی‌ها و دماهای مختلف محاسبه گردید طبق آزمایش‌ها انجام شده ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از نانو سیال نسبت به سیال پایه افزایش چشمگیری داشته است.

در (۳۶) انتقال حرارت از جریان آرام در حال توسعه نانو سیال را در یک کانال دایروی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات به صورت خطی است.

در (۳۷) تاثیر افزودن نانو ذرات به آب را در یک لوله با شار ثابت روی دیواره بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اضافه کردن ۱ % ذرات نانوی اکسید آلومینیوم به آب بازگشت‌ناپذیری را تا ۳/۶٪ کاهش می‌دهد. در کنار بهبود رسانش گرمایی، افزودن نانو ذرات، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به دنبال خواهد داشت.

در (۳۸) انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از جریان آرام در حال توسعه نانو سیال در یک محیط حلقوی را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که پروفیل سرعت محوری بدون بعد با تغییر کسر حجمی نانو ذرات تغییر چندانی نخواهد داشت؛ اما پروفیل دمای بی‌بعد با تغییرات کسر حجمی تغییر کرده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش می‌یابد.

در (۳۹) انتقال حرارت ترکیبی نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک محیط حلقوی تحت شار ثابت به کمک مدل مخلوط دوفازی و بروش عددی بررسی نمودند و نشان دادند که برای اعداد رینولدز و گراشف ثابت، عدد ناسلت در دیواره‌های داخلی و خارجی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد.

در (۴۰) جریان آرام نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در حال توسعه را در یک لوله مسی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم تا ۱/۶ درصد به آب، عدد ناسلت آن را تا ۳۸ درصد افزایش می‌دهد.

مقالات زیادی در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران مختلفی چاپ شده است که همگی به نتایج یکسانی در خصوص استفاده از نانو سیال در مبدل‌های حرارتی رسیده‌اند ((۴۱)؛ (۴۲)؛ (۴۳)).

جدول (۲-۱) مروری کلی بر تحقیقات انجام شده

میزان افزایش انتقال حرارت	نوع نانو سیال	نوع جریان	دستگاه آزمایش	منبع
۲۴٪	آب-نانو لوله‌های کربنی ۰/۵٪	متلاطم	مبدل دو لوله‌ای	(۲۹)
۱۱-۶٪	آب-اکسید تیتانیوم ۰/۵٪	آرام	مبدل دو لوله‌ای	(۲۰)
۲۵-۱۰٪	روغن مبدل-اکسید آلومینیوم ۰/۵٪	آرام	مبدل دو لوله‌ای	(۴۴)
بیش از ۵۰٪	آب-اکسید آلومینیوم ۰/۵٪	متلاطم	مبدل پوسته و لوله	(۱۶)
بیش از ۵۰٪	آب-اکسید تیتانیوم ۰/۵٪	متلاطم	مبدل پوسته و لوله	(۱۶)
۸٪	آب-اکسید آلومینیوم ۰/۳٪	آرام	لوله‌ای	(۴۵)
۳۵۰٪	آب-نانو لوله‌های کربنی ۰/۵٪	آرام	لوله‌ای	(۴۶)

فصل سوم
روش مدل سازی و
آزمایشگاهی تحقیق

۳-۱- مقدمه

سیالات حامل انرژی در صنایع اغلب در مجاری انتقال نظیر لوله ها و مبدل های حرارتی انرژی را به نقاط مورد نظر منتقل می نمایند. در این حالت برای مهندسين برآورد میزان انتقال انرژی توسط جابه جایی سیال اهمیت دارد. برای این منظور باید ضریب انتقال حرارت در فرایند مورد نظر مشخص باشد تا بتوان از طریق آن میزان سطح مورد نیاز برای مبادله انرژی حرارتی را محاسبه کرد. برای سیالات متداول حامل انرژی این مسئله تا حدود زیادی حل شده و روابطی برای این منظور تدوین شده است لیکن با مطرح شدن استفاده از نوسانات در انتقال انرژی بحث تعیین انتقال حرارت جابه جایی در این سیالات به وجود آمده است. در بررسی انتقال حرارت جابه جایی هر دو فرایند جابه جایی آزاد و جابه جایی اجباری مورد توجه قرار گرفته است. افزودن مقداری نانو ذره به یک سیال پایه علاوه بر اثری که روی ضریب هدایت حرارتی سیال پایه دارد فرایند جابه جایی آزاد و جابه جایی اجباری را تحت تاثیر قرار می دهد. این تاثیر می تواند به دلیل تغییر ضریب هدایت حرارتی، تغییر ظرفیت حرارتی، تغییر ویسکوزیته و نیز پدیده هایی نظیر حرکت براونی ایجاد شود.

در این فصل مطالعات و روش های محاسبه عوامل موثر در ضریب انتقال حرارت در نانو سیالات بحث خواهد شد.

۳-۲- مدل سازی نانو سیال

به طور کلی برای مدل سازی نانو سیالات دو مدل کلی ارائه شده است: مدل دو فاز و مدل تک فاز. در مدل دو فاز، امکان مطالعه و بررسی توابع مربوط به هر دو فاز موجود (ذرات جامد و فاز سیال) حین فرآیند انتقال حرارت وجود دارد؛ اما این امر مستلزم زمان و حجم محاسبات

بیش تر و همچنین نیازمند اختصاص فضای حافظه بیش تر برای ثبت و نگهداری داده ها می باشد. در مدل تک فاز، هر دو فاز سیال و ذرات در شرایط تعادل حرارتی در نظر گرفته می شوند. همچنین فرض می گردد که ذرات و سیال پایه دارای سرعت های یکسانی بوده و از این رو هیچ سرعت نسبی بین آن ها رخ نمی دهد. این مدل که بر مبنای سیال تک فاز بنانهاده شده است، ساده تر بوده و نیازمند زمان محاسبات کمتر می باشد. از این رو، در مواردی که هدف بیش تر بر محاسبات انتقال حرارت معطوف باشد، این مدل مناسب تر به نظر می رسد (۴۶).

مدل مخلوط یکی از انواع مدل دوفازی است. مدل مخلوط بر مبنای یک سیال دوفازی استوار است به طوری که دو فاز کاملاً به یکدیگر پیوسته بوده و ذرات به صورت بسیار نزدیک دنباله رو جریان باشند. در این مدل فرض می شود هر یک از دو فاز دارای میدان سرعت مخصوص به خود بوده و سرعت لغزشی (سرعت نسبی) به صورت اختلاف سرعت فاز نانو ذرات نسبت به سرعت فاز سیال پایه در نظر گرفته می شود. در داخل هر حجم کنترل شده ای یک کسر حجمی از فاز اولیه و یک کسر حجمی از فاز ثانویه وجود دارد. برای مدل سازی نانو سیالات به این مدل توسط (۴۷) به کار گرفته شد، که نتایج پیش بینی شده آن همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشت.

مدل همگن یکی از اقسام مدل تک فاز برای مدل سازی نانو سیالات به شمار می رود. این مدل تنها در خواص مؤثر با مدل سیال خالص متفاوت است. این بدین معناست که، معادلات پیوستگی، ناویر استوکس و انرژی به همراه خواص مؤثر نانو سیال به کار گرفته می شوند. مطابق این مدل، روابط مرسوم جریان و انتقال حرارت سیال تک فاز قابل تعمیم دادن برای نانو سیال می باشد. در سال ۲۰۰۴، می جا و همکاران نانو سیال را بر مبنای این مدل مورد مطالعه قرار دادند.

۳-۲-۱- مدل سازی خواص نانو سیال

در بخش گذشته، مدل های کلی ارائه شده برای شبیه سازی رفتار نانو سیالات بیان گردید. همان طور که ملاحظه می گردد برای استفاده از مدل مخلوط یا مدل همگن نیاز است تا برخی از خواص نانو سیال موجود باشد. از این رو، محققان در سال های اخیر تلاش کردند تا از طریق انجام کارهای آزمایشگاهی، روابطی تجربی برای تخمین این کمیت ها بیابند. در ادامه مطلب روش ها و مدل های ارائه شده برای تخمین خواص فیزیکی نانو سیالات از قبیل جرم حجمی،

گرمای ویژه و لزجت و هم چنین ضریب رسانایی حرارتی نانو سیال مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۲- تخمین خواص فیزیکی نانو سیالات

در تحلیل انتقال حرارت جابه جایی نانو سیالات تعیین دقیق خصوصیات یک مسئله کلیدی به شمار می رود. محاسبه جرم حجمی و گرمای ویژه نانو سیالات کاری نسبتاً آسانی است اما وقتی صحبت از ویسکوزیته حرارتی به میان می آید اختلافات مهمی در نتایج آزمایشگاهی و مدل های تئوری ظاهر می شود. در این تحقیق سعی شده تا ضمن بررسی روابط، از روابطی که بیشتر محققین بر روی آن ها اتفاق نظر دارند استفاده شود.

۳-۲-۳- جرم حجمی

جرم حجمی نانو سیالات را می توان توسط رابطه زیر محاسبه نمود. پاک و چو (۱۹۹۸) در این رابطه Φ را کسر حجمی ذرات نانو، ρ دانسیته و اندیس p نشان دهنده نانو ذرات و f نشان دهنده سیال پایه بیان کردند. همچنین آن ها با روش آزمایشگاهی نشان دادند که معادله (۱-۳) یک بیان دقیق برای جرم حجمی نانو سیالات می باشد (۱۳).

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

۳-۲-۴- گرمای ویژه

ظرفیت گرمایی نانو سیال در معادله انرژی گنجانده شده است، بنابراین مهم است که قادر باشیم به درستی آن را محاسبه کنیم. اکثر محققان از یکی از دو معادله زیر استفاده می کنند.

$$c_p = (1 - \rho) c_{pf} + \Phi c_{pp} \quad (2-3)$$

$$c_p = \frac{(1 - \Phi)(\rho c_p)_f + \Phi(\rho c_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (3-3)$$

که در اینجا C_p ظرفیت گرمایی، Φ درصد حجمی نانو ذرات و ρ دانسیته می باشد. پانویس f به خواص سیال پایه اشاره دارد و پانویس p به خواص نانو ذرات اشاره دارد

۳-۲-۵- لزجت

(۴۸) رابطه زیر را برای لزجت دینامیکی مخلوط رقیق نانو سیال که شامل نانو ذرات کروی می باشند، ارائه کردند.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi) - \mu_f \quad (4-3)$$

در این مدل از اثر متقابل بین ذرات صرف نظر شده است. در تحقیقی دیگر (۴۹) رابطه (۵-۳) را پیشنهاد می‌کند که در این رابطه محدودیتی برای افزایش کسر حجمی نانو ذرات ارائه نشده است.

$$\mu_{nf} = \frac{l}{(l - \phi)^{2.5}} \cdot \mu_f \quad (5-3)$$

در مطالعاتی دیگر (۵۰) اثر متقابل بین ذرات را در نظر گرفته و رابطه زیر را ارائه نموده است.

$$\mu_{nf} = (l + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_f \quad (6-3)$$

همچنین یک رابطه کاربردی توسط (۵۱) برای نانو سیال آب- Al_2O_3 فرض شده است.

$$\mu_{nf} = (l + 2.5\phi + 150\phi^2)\mu_f \quad (7-3)$$

(۳۳) رابطه زیر را برای نانو سیالات Al_2O_3 ارائه کردند.

$$\mu_{nf} = (l + 7.3\phi + 123\phi^2)\mu_f \quad (8-3)$$

۳-۳- ضریب هدایت حرارتی

مطالعات انجام شده بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات نشان می‌دهد که افزایش زیادی در ضریب هدایت حرارتی با استفاده از نانو سیال می‌توان به دست آورد، به طوری که ضریب هدایت حرارتی افزایشی بیش از ۲۰ درصد را در یک نانو سیال با کسر حجمی کمتر از ۵٪ نشان داده است (۵۲). در این مطالعه به بررسی روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌های ضریب هدایت حرارتی پرداخته شده است.

۳-۳-۱- اندازه‌گیری هدایت حرارتی

معمول‌ترین راه اندازه‌گیری رسانایی گرمایی در نانو سیال روش سیم داغ حالت گذرا می‌باشد. یک سیم نازک پلاتین که با یک لایه عایق الکتریکی پوشیده شده است. سیم در نانو سیال غوطه‌ور شده و یک جریان ثابت از میان آن عبور می‌کند. افزایش دمای سیم به عنوان

تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود و سپس ضریب هدایت گرمایی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید.

$$k_{nf} = \frac{Q}{4\pi L} \cdot \left(\frac{dT}{d\ln t} \right) \quad (9-3)$$

k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانو سیال، Q کل توان پخش شده در سیم، L طول سیم، T درجه حرارت سیم و t زمان می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری افزایش دما قسمتی از سیم داغ به صورت پل و تستون ساخته شده است. تغییر دما در سیم سبب تغییر مقاومت سیم می‌شود که این تغییر سبب به هم خوردن بالانس در پل می‌شود. تغییر در مقاومت سیم از تغییر ولتاژ در پل به دست می‌آید. تغییر در مقاومت سیم با اطلاعاتی که وابسته به تغییر مقاومت سیم با تغییر درجه حرارت است مقایسه می‌شود و سپس اختلاف درجه حرارت به دست می‌آید. با استفاده از فن سیم داغ گذرا ضریب افت درجه حرارت به دست می‌آید. باید اشاره کرد که این ضریب شامل همه شکل‌های انتقال حرارت مثل هدایت، جابجایی نانو ذرات یا هر روش انتقال گرمایی دیگر است.

۳-۲-۳- ضریب هدایت حرارتی بر اساس مدل حرکت تصادفی ذرات

تعدادی مدل برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات بر اساس حرکت تصادفی نانو ذرات ایجاد شده است. سه رابطه از مدل‌ها در زیر شرح داده شده است به علاوه یک مدل کاربردی که اطلاعاتی درباره اثرات حرکت تصادفی بر روی نانو سیالات فراهم می‌کند نیز مورد بحث قرار گرفته است. (۵۳) ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات را با در نظر گرفتن اثرات حرکت تصادفی نانو ذرات مدل‌سازی کردند. مدل فرض شده نه تنها تابعی از ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و نانو ذرات می‌باشد بلکه به اندازه و دمای نانو ذرات هم وابسته می‌باشد. همچنین انتقال انرژی در نانو سیالات نیز در نظر گرفته شده است به طوری که هدایت گرما در سیال پایه، هدایت گرما در نانو ذرات تصادف بین نانو ذرات و جابه‌جایی بسیار کوچکی که توسط حرکات اتفاقی نانو ذرات ایجاد شده است را شامل می‌شود. در نتیجه مدل زیر ارائه شده است.

$$k_{nf} = (1 - \phi) + k_p^* \phi + 3 \cdot C_1 \frac{d_f}{d_p} k_f Re_d^2 Pr_f \phi \quad (10-3)$$

که C_1 در آن ثابت تناسب است. d_f قطر مولکول‌های سیال، d_p قطر ذرات، Pr_f عدد پرانتل سیال پایه، k_p^* به صورت رابطه ۳-۱۱ تعریف شده است.

$$k_p^* = \beta k_p \quad (۱۱-۳)$$

که β یک ثابت است. عدد رینولدز نیز به شکل زیر تعریف شده است.

$$Re_d = \frac{\bar{C}_{R.M} d_p}{v_f} \quad (۱۲-۳)$$

که $\bar{C}_{R.M}$ سرعت حرکت تصادفی نانو ذرات و v_f ویسکوزیته سینماتیک سیال پایه می باشد. همچنین $\bar{C}_{R.M}$ را می توان به شکل رابطه ۳-۱۳ بیان کرد.

$$\bar{C}_{R.M} = \frac{D_o}{\lambda_f} \quad (۱۳-۳)$$

که λ_f متوسط فاصله آزاد مولکول‌های سیال پایه و D_o ضریب نفوذ نانو ذرات است که توسط رابطه ۳-۱۴ محاسبه می شود.

$$D_o = \frac{k_B T}{3\pi\mu_f d_p} k_B \quad (۱۴-۳)$$

k_B ثابت بولتزمن، T برحسب کلوین و μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه می باشد. دلیل اینکه این مدل وابسته به اندازه ذرات در نظر گرفته شده این است که ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با کاهش اندازه ذرات افزایش می یابد و کاهش اندازه ذرات باعث افزایش اثرات تصادفی نانو ذرات می شود. در این مدل ضخامت لایه مرزی گرمایی اطراف نانو ذرات برابر $3d_f/Pr$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این کسر حجمی لایه مایع اطراف نانو ذرات برابر کسر حجمی نانو سیال در نظر گرفته شده است.

در (۵۴) ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات را به دو قسمت تقسیم کرد.

$$K_{nf} = K_{STATIC} + K_{BROW.NIAN} \quad (۱۵-۳)$$

که K_{STATIC} افزایش ضریب هدایت به علت ضریب هدایت بالای نانو ذرات و $K_{BROW.NIAN}$ اثرات حرکت تصادفی را در نظر می گیرد. برای قسمت ثابت، مدل کلاسیک ماکسول به شکل زیر بیان شده است.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f + 2(K_p - K_f)\phi}{K_p + 2K_f - (K_p - K_f)\phi} \quad (16-3)$$

برای $K_{BROWNIAN}$ حرکت تصادفی ذرات با اثرات حرکت سیال اطراف نانو ذرات در نظر گرفته شده است. در نتیجه رابطه ۳-۱۷ بیان شده است.

$$K_{BROWNIAN} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f c_{p,f} \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f \quad (17-3)$$

که ρ_p و ρ_f به ترتیب دانسیته ذرات و دانسیته سیال پایه، T دما برحسب کلوین و $c_{p,f}$ گرمای ویژه سیال پایه می باشد. در این تحلیل اثر متقابل بین نانو ذرات و حرکت حجمی سیال اطراف آن ها در نظر گرفته نشده است و یک ترم اضافی β ، به منظور در نظر گرفتن اثرات سیال و نانو ذرات مطرح شده است. همچنین آن ها نشان دادند که این ترم اضافی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات مؤثرتر می شود. پارامتر دیگر f که در مدل مطرح شده است به منظور افزایش وابستگی مدل به گرما می باشد هر دو ترم β و f از داده های آزمایشگاهی به دست می آیند.

در (۵۵) یک مدل دیگر برای ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بر اساس حرکت تصادفی نانو ذرات فرض کرده اند. ضریب هدایت حرارتی به صورت ترکیبی از دو قسمت استاتیک و دینامیک مشابه مطالعات (۵۴) مدل شده است.

$$K_{nf} = K_{STATIC} + K_{BROWNIAN} \quad (18-3)$$

قسمت استاتیک می تواند با استفاده از مدل (۵۶) مدل شود.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_p + (n-1)K_f - (n-1)\phi(K_f - k_p)}{K_p + (n-1)K_f + \phi(K_f - K_p)} k_f \quad (19-3)$$

که n یک ضریب شکل علمی می باشد.

قسمت دینامیکی با در نظر گرفتن جریان بر روی نانو ذرات و اندازه نانو ذرات به شکل رابطه ۳-۲۰ مدل شده است.

$$K_{dynamic} = K_f c. \frac{Nu. d_f (2 - D_f) D_f \left[\left(\frac{d_{p,max}}{d_{p,min}} \right)^{l-D_f} - l \right]^2}{Pr (l - D_f)^2 \left(\frac{d_{p,max}}{d_{p,min}} \right)^{2-D_f} - l} \frac{l}{d_p} \quad (20-3)$$

که در آن

$$D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \left(\frac{d_{p,max}}{d_{p,min}} \right)} \quad (21-3)$$

که c ثابت تجربی، d_p قطر متوسط نانو ذرات و $d_{p,min}$ و $d_{p,max}$ حداقل و حداکثر قطر نانو ذرات می باشند. توجه شود که نسبت قطر مینیمم به قطر حداکثر را می توان 0.001 در نظر گرفت. همچنین عدد ناسلت برای جریان مایع بر روی یک کره به شکل زیر بیان شده است.

$$Nu = 2.0 + 0.5.RePr + (Re^2Pr^2) \quad (22-3)$$

که

$$Pr = \frac{\mu_f c_{p,f}}{k_f} \quad (23-3)$$

$$Re = \frac{d_p v_p}{v_f} \quad (24-3)$$

که v_p سرعت نانو ذرات است. از آنجایی که عدد رینولدز خیلی کوچک تر از یک است و عدد پرانتل در حدود یک می باشد، پس عدد ناسلت تقریباً ۲ برابر می شود. ثابت c از این واقعیت می آید که لایه مرزی گرمایی اطراف نانو ذرات به علت حرکت تصادفی نانو ذرات ناشناخته می باشد. مدل فرض شده با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است و نشان داده است که c یک تابعی از نوع سیال پایه می باشد و بستگی به نوع نانو ذرات ندارد. مقدار c برای آب دی یونیزه ۸۵ و برای اتیلن گلیکول ۲۸۰ به دست آمده است. بایستی توجه شود که فرمول بیان شده برای عدد ناسلت برای جریان های بزرگ است و اثرات با مقیاس کوچک، همچون جریان های خزشی در سطح نانو ذرات را در نظر نمی گیرد. چون و همکاران (۲۰۰۵) ضریب هدایت حرارتی نانو سیال آب- Al_2O_3 را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند و یک رابطه ای برای تعیین ضریب هدایت حرارتی بر اساس داده های آزمایشگاهی برای نانو سیال آب- Al_2O_3 فرض کردند. سه نوع نانو پودر مختلف در آزمایش ها با قطر اسمی ۱۱، ۴۷، ۱۵۰ نانومتر استفاده شده است. داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما و کاهش اندازه ذرات، افزایش می یابد. رابطه به دست آمده عبارت است از:

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = 1 + 64.7 \phi^{3.7460} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.3690} \cdot \left(\frac{K_p}{K_f} \right)^{0.7467} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (25-3)$$

که عدد پرانتل و رینولدز به شکل زیر تعریف شده است.

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (26-3)$$

$$Re = \frac{\rho_f V d_p}{\mu_f} = \frac{\rho_f K_B T}{3\pi \mu_f^2 \lambda_f} \quad (27-3)$$

که α_f ضریب پخش حرارتی سیال پایه است. ویسکوزیته دینامیک سیال پایه عبارت است از:

$$\mu_f = A 10^{B(\tau-c)} \quad (28-3)$$

که A, B, C ثابت‌اند و به ترتیب برابر با 2.414×10^{-5} , 247.8 k, 140k برای آب می‌باشند. V_{Br} سرعت حرکت تصادفی نانو ذرات از رابطه ۳-۲۹ به دست می‌آید.

$$V_{Br} = \frac{K_B T}{3\pi \mu_d \lambda_f} = \frac{K_B}{3\pi \mu_d} \times \frac{T}{A 10^{B(T-C)}} \quad (29-3)$$

که λ_f متوسط فاصله آزاد مولکول‌های است و برای آب برابر 0.17 نانومتر می‌باشد. در رابطه ۳-۲۹ اثرات ضریب هدایت حرارتی سیال پایه، عدد پرانتل و عدد رینولدز بررسی شده است و عدد رینولدز مقدار تحرک ذرات را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه ۳-۲۹ برای نانو ذراتی بین 11 تا 150 نانومتر و محدوده دمایی 21 تا 71 درجه سانتی گراد قابل قبول می‌باشد.

۳-۳-۲-۱- عدد پکله

عدد پکله^۱ یک عدد بدون بعد است که در مطالعه فرایندهای انتقال در شارها به کار می‌رود. عدد پکله نشان‌دهنده نسبت حرکت هدف‌مند (جهت‌دار) یک کمیت فیزیکی به حرکت کاتوره‌ای آن در شار است. کاهش عدد پکلت باعث کاهش نرخ انتقال حرارت به سیال می‌شود. در اعداد پکلت پایین هدایت محوری بیشتر در بالا دست کانال اتفاق می‌افتد و با افزایش عدد پکلت نفوذ حرارت به این ناحیه کاهش می‌یابد (۱۲).

¹ Péclet number

۳-۳-۳- ضریب هدایت حرارتی بر اساس مدل توده شدن

در این قسمت دو مدل تئوری که بر اساس توده شدن نانو ذرات بنا شده است، بیان می‌شود. مدل اول علاوه بر توده شدن نانو ذرات اثر حرکت تصادفی آن‌ها را نیز در نظر گرفته است.

در (۵۷) معادله‌ای که ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات را پیش‌بینی می‌کند به شکل رابطه ۳-۳۰ بیان کردند.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_p + 2k_f - 2\phi(K_f - K_p)}{K_p + 2k_f + \phi(K_f - K_p)} + \frac{\rho_p \phi c_{p,p}}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_d \mu_f}} \quad (3-30)$$

Rd نشان‌دهنده شعاع توده نانو ذرات است که بایستی با آزمایش تعیین شود. T درجه حرارت برحسب کلوین است. μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه است. اولین قسمت سمت راست معادله (۳-۳۰)، مدل ماکسول برای ضریب هدایت حرارتی مخلوط ذرات جامد در سیال است و دومین ترم سمت راست، اثرات حرکت تصادفی نانو ذرات را نشان می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که تأثیر حرکت تصادفی نانو ذرات با افزایش دما بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر همان‌طور که توده شدن نانو ذرات بزرگ‌تر می‌شود. حرکت تصادفی ذرات کندتر شده و این کاهش باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود. بایستی توجه داشت که ترم دوم سمت راست معادله بی‌بعد نیست. چن^۱ و همکاران (۲۰۰۹) ویسکوزیته نانو سیالات آب-TiO₂ و اتیلن گلیکول-TiO₂ را اندازه‌گیری کردند و یک روش محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات را با استفاده از داده‌ها فرض کردند. دو نوع از ذرات کروی با قطر نانو ذرات ۲۵ نانومتر و استوانه‌ای با قطر نانو ذرات ۱۰ نانومتر و طول ۱۰۰ نانومتر استفاده شده است (۵۸). یک مدل برای تعیین ویسکوزیته مخلوط توسط کریگر^۲ و دوگرتی (۱۹۵۹) به منظور در نظر گرفتن اثرات توده شدن ارائه شده است. مدل اصلاح شده تابعی از شعاع توده است. مقدار شعاع توده نمونه نانو سیال به وسیله هماهنگ کردن پیش‌بینی‌های مدل اصلاح شده با نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آید (۵۹). بعد از تعیین مقدار شعاع توده نانو ذرات در مدل فرض شده ضریب هدایت حرارتی به صورت رابطه ۳-۳۱ بیان می‌شود:

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_{cl} + (n-l)K_f - (n-l)\phi_{cl}(K_f - K_{cl})}{K_{ek} + (n-l)K_f + \phi_{cl}(K_f - K_{cl})} \quad (3-31)$$

¹ Chen

² Krieger

که Φ_{cl} و K_{cl} به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و کسر حجمی توده نانو ذرات می باشد. مقدار n برای نانو ذرات کروی ۳ و برای نانو ذرات استوانه ای ۵ می باشد، برای به دست آوردن Φ_{cl} از رابطه ۳-۳۲ استفاده شده است.

$$\Phi_{cl} = \Phi \cdot \left(\frac{r_{cl}}{r_p} \right)^{3-D} \quad (3-32)$$

که r_{cl} شعاع توده نانو ذرات، r_p شعاع نانو ذرات و D وابسته به هندسه شکل است که برابر ۱/۸ در مدل ویسکوزیته می باشد. نسبت شعاع توده نانو ذرات به شعاع نانو ذرات برابر ۲/۷۵ برای نانو سیال آب-TiO₂ با نانو ذرات کروی و برابر ۳/۳۴ برای نانو سیال اتیلن گلیکول-TiO₂ با نانو ذرات کروی می باشد برای تخمین K_{cl} رابطه زیر برای نانو ذرات کروی فرض شده است.

$$\frac{K_{cl}}{K_f} = \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} & (3\Phi_{in} - 1) \cdot \frac{K_p}{K_f} + (3(1 - \Phi_{in}) - 1) \\ & + \left[\left((3\Phi_{in} - 1) \cdot \frac{K_p}{K_f} + (3(1 - \Phi_{in}) - 1) \right)^2 + 8 \frac{K_p}{K_f} \right]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3-33)$$

که Φ_{in} کسر حجمی ذرات توده شده است و به شکل زیر بیان می شود:

$$\Phi_{in} = \Phi \left(\frac{r_{cl}}{r_p} \right)^{3-D} \quad (3-34)$$

همچنین برای حدس K_{cl} برای نانو تیوب ها رابطه زیر ارائه شده است (نان^۱ و همکاران، ۲۰۰۳).

$$\frac{K_{cl}}{K_f} = \frac{3 + \Phi [2\beta_x(1 - L_x)] + \beta_z(l - L_2)}{3 - \Phi [2\beta_x L_x + \beta_z L_2]} \quad (3-35)$$

که در آن داریم

$$\beta_x = \frac{(K_x - K_f)}{K_f} + L_x(K_l - K_f) \quad (3-36)$$

$$\beta_z = \frac{(K_z - K_f)}{K_f} + L_z(K_l - K_f) \quad (3-37)$$

¹ Nan

K_x و K_z ضریب هدایت حرارتی نانو تیوب‌ها به ترتیب در جهت عمود بر حرکت و در طول حرکت می‌باشد. K_l ضریب هدایت حرارتی آیزنتروپیک نانو تیوب‌ها می‌باشد. K_x, K_l و K_z به عنوان یک تقریب می‌توانند برابر K_p در نظر گرفته شوند. علاوه بر این K_x و K_z به شکل زیر قابل محاسبه‌اند.

$$L_x = \frac{p^2}{2(p^2 - 1)} - \frac{P}{2(p^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \cdot \cosh^{-1}(P) \quad (38-3)$$

$$L_z = l - 2 \cdot L_x \quad (39-3)$$

مقدار نسبت r_{cl}/r_p برابر $5/40$ برای نانو سیالات اتیلن گلیکول - TiO_2 با نانو ذرات نانو تیوب و برابر $12/98$ برای نانو سیال آب - TiO_2 با همین نانو ذرات می‌باشد. P عبارت از نسبت طول نانو تیوب به قطر آن‌ها می‌باشد.

۳-۴- بررسی کلی انتقال حرارت در نانو سیالات بر اساس تحقیقات چوآن^۱ و همکاران (۲۰۰۸)

همیشه انتقال حرارت از طرف سیال گرم به طرف سیال سرد برقرار است. نرخ انتقال حرارت مطابق رابطه ۳-۴۰ به دست می‌آید.

$$q_{HW} = \dot{m}_{HW} C_{p,HW} (T_{HW,in} - T_{HW,out}) = q_{NF} \quad (40-3)$$

از طرفی ضریب کلی انتقال حرارت U ^۲ عبارت است از

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{LMTD}} = \frac{\dot{m}_{HW} C_{p,HW} (T_{HW,in} - T_{HW,out})}{A \cdot \Delta T_{LMTD}} \quad (41-3)$$

که در رابطه ۳-۴۱ مقدار ΔT_{LMTD} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{NF,in} - T_{HW,out}) - (T_{NF,out} - T_{HW,in})}{\ln \frac{(T_{NF,in} - T_{HW,out})}{(T_{NF,out} - T_{HW,in})}} \quad (42-3)$$

رابطه‌ی بین ضریب کلی انتقال حرارت (U) و ضریب انتقال حرارت شخصی^۳ در یک مبدل حرارتی دو لوله مطابق رابطه ۳-۴۴ است:

¹ Chun

² overall and individual heat transfer coefficients

³ individual heat transfer coefficients

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\delta_w}{k_w} + \frac{1}{h_o} \quad (43-3)$$

h_i و h_o ضریب جابجایی حرارتی در داخل سیال و خارج سیال است. δ_w جداره لوله داخلی مبدل و k_w ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله داخل مبدل دولوله است. رابطه ۴۳-۳ را می‌توان به صورت رابطه ۴۴-۳ هم نوشت:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i(A_i/A_o)} + \frac{D_o \ln \frac{D_o}{D_i}}{2k} + \frac{1}{h_o} \quad (44-3)$$

که D_i و D_o قطر لوله داخلی و لوله خارجی و A_i و A_o مساحت جانبی لوله‌های داخلی و خارجی هستند.

برای تخمین ضریب جابجایی حرارتی خصوصی نانو سیال اطلاعات خصوصی مربوط به آب گرم لازم است. در این تحقیق h_o از معادله Monrad and Pelton به دست می‌آید که معمولاً در شرایط جریان آشفته تعریف می‌شود.

$$Nu = \frac{h_o D}{k_{HW}} = 0.02 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.53} \quad (45-3)$$

که در رابطه ۴۶-۳، k_{HW} ضریب انتقال حرارت آب گرم، Re و Pr به ترتیب اعداد رینولدز و پرانتل، D_1 و D_2 قطر لوله داخلی و قطر لوله خارجی مبدل دو لوله هستند.

برای استفاده از روابط فوق ضریب انتقال حرارت کلی U در یک جریان در سرعت ثابت از آب داغ به دست آمد. U و Re از نتایج آزمایش‌ها به دست آمدند و ضریب انتقال حرارت و ضخامت جداره لوله فولادی ضدزنگ برابر با 14.9 W/mK و 0.001 m لحاظ شدند. Li و Xuan رابطه ۴۶-۳ را برای تعیین ضریب جابجایی حرارتی در نانو سیالات ارائه دادند:

$$Nu = 0.4328(1 + 11.285 Pe^{0.754} Pr^{0.218}) Re^{0.333} Pr^{0.4} \quad (46-3)$$

که در رابطه فوق Pe عدد پکلت است.

اگر فرض شود که ذرات بسیار ریز هستند در این حالت نانو سیال همگن فرض می‌شود. به این اساس رابطه زیر برای اندازه‌گیری ضریب جابجایی حرارتی خصوصی نانو سیال به کار برده می‌شود:

$$h_i = \alpha \frac{k}{D} \text{Re}^\beta \text{Pr}^\gamma \quad (47-3)$$

در رابطه فوق با این فرض که نانوذره آلومینا باشد مقادیر α, β, γ از طریق رگرسیون غیرخطی از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

۳-۴-۱- تخمین خواص فیزیکی نانو سیالات

در نانو سیال ذرات نانو به طور کاملاً یکنواخت در سرتاسر سیال پراکنده شده‌اند و غلظت سیال در همه جای لوله یکدست است. در روابط زیر BF یعنی سیال پایه، NP یعنی نانو ذرات و NF یعنی نانو سیال.

چگالی نانو سیال از روابط ۴۹-۳ و ۵۰-۳ به دست می‌آید:

$$\rho_{NF} = \rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi \quad (48-3)$$

$$C_{p\ NF} = C_{p\ BF} \frac{\rho_{BF}(1 - \Phi)}{\rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi} + C_{p\ NP} \frac{\rho_{NP}\Phi}{\rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi} \quad (49-3)$$

که Φ غلظت نانوذره در سیال پایه است. به منظور اندازه‌گیری رسانایی گرمایی نانو سیال اثرات درصد حجمی نانوذره خود را در ویسکوزیته نانو سیال نشان می‌دهد که در این بخش به ارائه فرمول محاسبه ویسکوزیته نانو سیال می‌پردازیم:

$$\mu = \mu_{BF}(1 + a\Phi) \quad (50-3)$$

در رابطه ۵۰-۳، a یک ثابت است که برای نانو سیالات به درصد و غلظت نانوذره و اندازه آن بستگی دارد که معمولاً بیشتر از ۲/۵ فرض می‌شود.

Kang and Coworkers رابطه‌ای برای تعیین رسانندگی گرمایی نانو سیالات پیشنهاد

دادند:

$$k = k_{BF} \left(\frac{k_{NP} + 2k_{BF} - \frac{a}{1.25} \Phi (k_{BF} - k_{NP})}{k_{NP} + 2k_{BF} + \frac{a}{2.5} \Phi (k_{BF} - k_{NP})} \right) \quad (51-3)$$

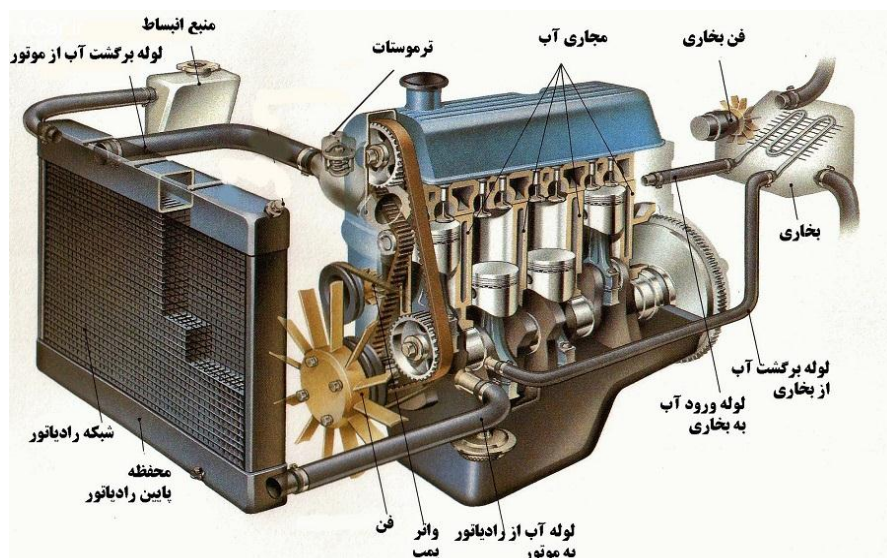
در تحقیق حاضر روابط ۴۱-۳ تا ۵۱-۳ برای ۴ نانو سیال مختلف در غلظت‌های حجمی مختلف بررسی شده است. برخی مشخصات نانو ذرات، سیال پایه و ... در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

جدول (۱-۳)

ردیف	نوع ماده/نانو ذره	چگالی (gr/cm^3)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	مقدار ثابت a
۱	سیال پایه (آب)	۱	۰/۵۶۳	-
۲	اکسید آلومینیوم Al_2O_3	۴/۰۳	۲۵/۲۵	۲/۶۵
۳	اکسید تیتانیوم TiO_2	۴/۲۳	۸/۳	۲/۵
۴	اکسید سیلیسیم SiO_2	۲/۲	۱/۴	۳/۷۵
۵	اکسید مس CuO	۶/۳	۲۰	۱/۰۸

۳-۵- نتایج آزمایشگاهی کاربرد نانو سیال در مبدل حرارتی فشرده

هدف اصلی سیستم خنک کاری بررسی و متعادل کردن مقدار حرارت دفع شده به وسیله موتور و حفظ دمای موتور در شرایط موثر و ایده آل (با حداکثر راندمان) می باشد. شکل ۱-۳ ارتباط کلی بین موتور و بخش های مختلف سیستم خنک کاری خودرو را بصورت شماتیک نشان می دهد.



شکل (۱-۳) نمودار کلی ارتباط بین موتور و سیستم خنک کاری خودرو (۴۴).

برای خنک کردن موتور و سایر اجزاء، سیال خنک کاری توسط پمپ، در کل سیستم خنک کاری به گردش در می آید. موتور در اثر عبور سیال خنک کننده از کانال های درون بلوکه

موتور و سرسیلندر خنک می شود. سیال خنک کننده پس از جذب گرمای موتور، لوله ها و سایر بخش ها با دمای بالا به رادیاتور بر می گردد و گرمای تولید شده در موتور را با خود حمل میکند. با حمل گرمای تولیدی در موتور دمای موتور پایین آمده و خنک کار می کند. از طرفی سیال خنک کننده گرمای جذب شده موتور را در رادیاتور به محیط داده و سیال نیز خنک میشود. با توجه به اینکه معمولاً سیال خنک کننده رادیاتور اتومبیل، مخلوط آب و اتیلن گلیکول می باشد که دارای خواص انتقال حرارتی نسبتاً ضعیفی است در نتیجه نیاز به محیط های انتقال حرارت با خواص حرارتی بالاتر جهت افزایش راندمان انتقال گرما در رادیاتورها وجود دارد. از جمله روش های افزایش انتقال حرارت در رادیاتورها، کاربرد نانوسیالات می باشد. نانوسیال فناوری جدیدی است که با افزودن مواد جامد در ابعاد نانومتر به سیال پایه بدست می آید. این گروه جدید از سیالات می توانند به عنوان خنک کننده در رادیاتور اتومبیل ها استفاده شوند.

لذا در تحقیق حاضر اثرات افزودن نانو ذرات به مایع خنک کاری در خودرو پراید بررسی شد. سیستم خنک کاری موتور پراید همانند موتورهای آب خنک دیگر با استفاده از چرخش آب موتور را خنک می کند. حجم آب موتور پراید ۵ لیتر است.

۳-۶- آماده سازی نانو روانکارها

به منظور ساخت یک نانوسیال نیاز به یک سیال پایه و نانو ذرات به عنوان افزودنی به سیال پایه می باشد. در این تحقیق ضد یخ کاسپین به عنوان سیال پایه انتخاب شد. برای تهیه نانوسیال از ضد یخ و نانو ذرات از روش های اولتراسونیک های حمامی^۱ و پروبی^۲ به خوبی میتوان ذرات نانو را از یکدیگر باز کرده و درون سیال پایه پراکنده کرد.

۳-۶-۱- مشخصات سیال پایه (سیال رادیاتور)

در سیستم خنک کاری خودرو پراید ۵ لیتر ضد یخ کاسپین که بر اساس استانداردهای جهانی ASTM D 3306 و استاندارد ملی ایران شماره ۳۳۸ با پایه اتیلن گلیکول با کیفیت بسیار عالی برای استفاده در انواع خودروهای سبک تولید شده است، استفاده شد. مشخصات ضد یخ کاسپین در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

¹ Bath Ultrasonic

² Probe Ultrasonic

جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی ضد یخ مورد استفاده در تحقیق

مقیاس	خواص فیزیکی
۱/۱۲ gr/cm ³	چگالی
۱۰۸ °C	نقطه جوش
-۳۹ °C	نقطه انجماد
۱/۰۸ cSt	گرانروی

۳-۶-۲- نانو مواد

در این تحقیق از نانو ذرات اکسید سیلیسیوم (SiO₂) و اکسید تیتانیوم (TiO₂) با درصد خلوص ۹۹/۵ درصد با ساختار کروی برای ساخت نانو سیالات استفاده شد. نانو ذرات دارای حالت پودری بوده و اندازه متوسط آنها ۱۵ نانو متر بود. خواص نانو ذرات مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

جدول (۳-۳) خواص ترمودینامیکی نانو ذرات

ردیف	نوع ماده/نانو ذره	چگالی (gr/cm ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	مقدار ثابت a
۱	سیال پایه (آب)	۱/۱۲	۰/۶۷۳	-
۲	اکسید تیتانیوم TiO ₂	۴/۲۳	۸/۳	۲/۵
۳	اکسید سیلیسیوم SiO ₂	۲/۲	۱/۴	۳/۷۵

۳-۷- پراکنده کردن نانو مواد در سیال پایه

یکی از عوامل بسیار مؤثر بر روی خواص نانوسیالات، میزان پراکندگی و پایداری نانو ذرات درون سیال پایه است. موقعی که پراکندگی ذرات درون سیال پایه یکنواخت نباشد، ممکن است انباشتگی یا آگلومره^۱ شدن و رسوب نانو ذرات اتفاق بیفتد که در این صورت ذرات درشت ایجاد شده، همانند مواد ناخالص، موجب آسیب دیدن سطوح اصطکاکی و گرفتگی مجاری خنک کاری می‌شوند.

^۱ Agglomeration

۳-۷-۱- اولتراسونیک حمامی

این اولتراسونیک به صورت حمام آب می باشد و سوسپانسیون با ظرف درون حمام قرار می گیرد و امواج مافوق صوت از اطراف فرستاده میشوند. برای سیالاتی مانند آب به دلیل ویسکوزیته پایین و نیز تهیه نانوسیال در حجم بالا مناسب است. اولترا سونیک حمامی استفاده شده در این تحقیق برای آماده سازی نمونه ها مدل P120h. Elmasonic. Germany بود که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) اولتراسونیک حمامی

۳-۸- اندازه گیری خواص نانوسیالات ساخته شده

نقطه جوش، نقطه انجماد و گرانروی نانو سیالات ساخته شده در غلظت های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی و نیز ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات، به عنوان چهار پارامتر کیفی و مؤثر در عملکرد نانو سیال مورد بررسی قرار گرفتند.

۳-۸-۱- اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی با استفاده از دستگاه KD2 که ساخت شرکت Decagon Devices آمریکا انجام شد. این دستگاه از روش سیم داغ حالت ناپایا استفاده میکند. معادلات مورد استفاده طبق دستورالعمل دستگاه در ادامه آورده شده است. کارسلو و جیجر دمای محیط اطراف یک سیم داغ را که وزن آن صفر و شار حرارتی آن ثابت باشد در یک محیط بینهایت به صورت زیر به دست آوردند (۶۰). اگر مقدار ثابتی از گرما به هیتز بدون وزنی در دوره زمانی مشخص t_1 داد شود، پاسخ دمایی به صورت رابطه ۳-۱ نوشته میشود:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right), 0 < t \leq t_1 \quad (3-52)$$

که $Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$ است. تغییر دما بعد از اینکه گرما قطع شد به صورت رابطه ۳-۲ داده میشود:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} [Ei(\frac{-r^2}{4Dt}) + Ei(\frac{-r^2}{4D(t-t_1)})], t > t_1 \quad (53-3)$$

خواص حرارتی ماده را می‌توان با برازش داده‌های دما بر حسب زمان در حین گرم شدن توسط معادله ۳-۱ و در حین سرد شدن توسط معادله ۳-۲ تعیین کرد. اغلب آزمایش‌ها تحت دمای ثابت روی نمی‌دهد. ما فرض می‌کنیم که افزایش دمای محیط با زمان خطی است و از یک پارامتر تنظیم شونده دیگر استفاده می‌کنیم. این کار خطاها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. برای یک منبع استوانه‌ای گرم شده با شعاع a و طول $2b$ که دما در مرکز آن اندازه گرفته می‌شود، افزایش دما در بازه $0 < t < t_1$ به صورت رابطه ۳-۳ است:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2}^{\infty} u^{-1} \exp(-u) \exp[-\frac{a}{r^2}] (\frac{rau}{r}) \operatorname{erf}(\frac{b}{r} \sqrt{u}) du \quad (54-3)$$

و در حین سرد شدن ($t > t_1$) به صورت

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2/4D(t-t_1)}^{r^2/4Dt} u^{-1} \exp(-u) \exp[-\frac{a}{r^2}] (\frac{rau}{r}) \operatorname{erf}(\frac{b}{r} \sqrt{u}) du \quad (55-3)$$

داده می‌شود. مشاهده شده است که معادلات ۳-۱ و ۳-۲ به خوبی معادلات ۳-۳ و ۳-۴ به داده‌های دمایی برازش داده می‌شوند، اما مقادیر کمی متفاوتی برای پارامترهای λ و D به دست می‌دهند. این اختلافات را میتوان در کالیبراسیون وارد کرد. بنابراین معادلات ساده تر ۳-۱ و ۳-۲ را میتوان به صورت کارآمدی برای تعیین خواص حرارتی استفاده کرد.

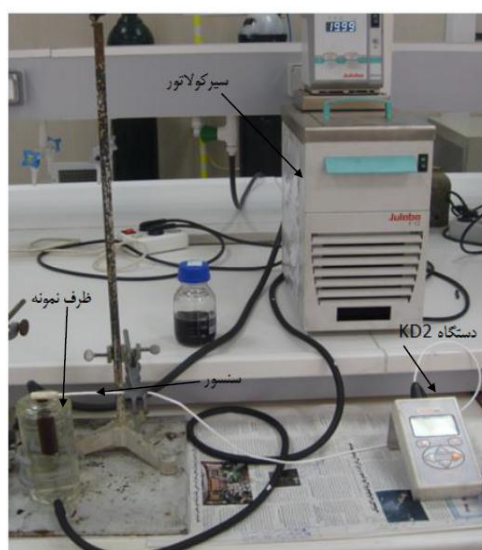
تصویری از دستگاه KD2 در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. این دستگاه سه حسگر مختلف دارد. یکی سوزن تکی ۶ سانتیمتری که بهترین سنسور برای اندازه گیری هدایت حرارتی بیشتر نمونه ها از جمله مایعات است. سنسور دوم سوزن تکی ۱۰ سانتیمتری است که دقت کمتری دارد و عمدتاً برای مواد سخت استفاده می شود و سنسور سوم یک سوزن دوگانه ۳۰ میلیمتری است که برای اندازه گیری نفوذ پذیری و یا ظرفیت حرارتی استفاده می شود. این سنسور فقط برای مایعات با ویسکوزیته بسیار بالا قابل استفاده است. به دلیل گرانش پایین آب رادیاتور برای همه آزمایش‌ها از سنسور اول استفاده شده است.

برای اندازه گیری هدایت حرارتی به وسیله KD2 Pro نکات زیر مهم می‌باشند:

۱. اگر مدل کاملاً به داده‌ها برازش داده شود، آنگاه $r^2=1$ خواهد شد. یک سری خوب داده‌ها با مقادیر r^2 بیش از ۰/۹۹۹۹۹ تنظیم می‌شود مگر در هدایت‌های حرارتی خیلی پایین (مثلاً مواد عایق). حتی در این صورت نیز مقادیر r^2 قابل قبول بیش از ۰/۹۹۹۵ می‌باشد. اگر r^2 کوچکتر از این مقادیر باشد، باید داده‌ها را کنار گذاشت، پانزده دقیقه صبر کرد و دوباره آزمایش را انجام داد.
۲. سنسورها باید کاملاً در نمونه فرو روند و نباید گوشه‌های ظرف حاوی نمونه را لمس کند.

دمای ثابت با استفاده از سیرکولاتور ایجاد می‌شود و برای اینکه چرخش سیال سیرکولاتور باعث حرکت سنسور دستگاه نشود، از یک شیشه دوجداره استفاده شده است که لوله آزمایش حاوی نمونه در قسمت داخلی قرار می‌گیرد و سیرکولاتور از فضای بین دیواره‌ها پمپ می‌شود. شکل ۳-۳ تصویری از سیرکولاتور و دستگاه KD2-Pro را نشان می‌دهد.

در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و نانو سیال با غلظت‌های مختلف در دمای 80°C و در چهار تکرار اندازه‌گیری شد.



شکل (۳-۳) تصاویر مربوط به دستگاه KD2-Pro برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی (۶۰).

۳-۸-۲- اندازه‌گیری گرانروی

تحقیقات مختلف انجام گرفته نشان می‌دهد که نحوه‌ی تغییر گرانروی نانو سیالات، به شدت تحت تاثیر عوامل متعددی از قبیل نوع نانو ذرات، نوع سیال پایه، غلظت نانو ذرات، روش مورد استفاده برای پراکنده سازی نانو ذرات درون سیال پایه و همچنین میزان پراکندگی نانو ذرات درون سیال پایه قرار دارد. بنابراین در این تحقیق حاضر گرانروی نانوسیالات براساس استاندارد ASTM D-445 اندازه گیری شدند.

۳-۸-۳- اندازه‌گیری نقطه جوش و نقطه انجماد

نقطه جوش و نقطه انجماد دو پارامتر مهم در سیال خنک کاری در خودرو است که با تغییر سیال پایه (ضد یخ) این دو پارامتر تغییر می‌کنند. با افزودن نانو ذرات به سیال پایه این دو پارامتر دستخوش تغییراتی میشوند که در این تحقیق اثرات افزودن نانو ذره بر این پارامترها بررسی شد. برای اندازه گیری نقطه انجماد نانو سیالات از دستگاه تست نقطه انجماد دیجیتال و تمام اتوماتیک ساخت شرکت پارسیان تکنولوژی ایران استفاده شد. هم چنین نقطه جوش نانو سیال مطابق استاندارد 17 - ASTM D1120 اندازه گیری شد.

۳-۹-۲- پارامترهای مورد بررسی

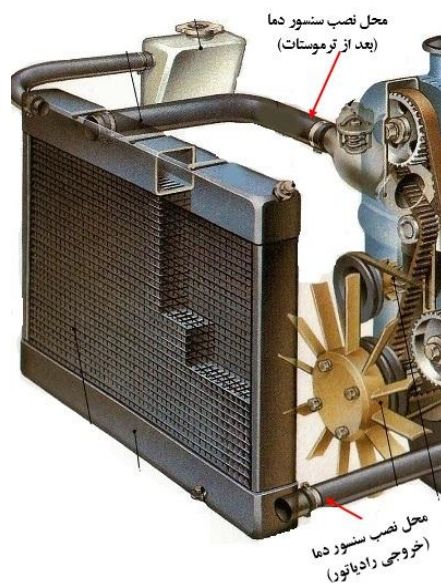
در تحقیق حاضر اثرات دو نوع نانو ذره با چهار غلظت حجمی مختلف بر عملکرد سیستم خنک کاری ماشین پرآید بررسی شد. در این تحقیق حجم نانو سیال مورد استفاده در سیستم خنک کاری ۵ لیتر بود. سیال پایه حاوی ۵۰ درصد آب مقطر و ۵۰ درصد اتیلن گلیکول بود.

بعد از تهیه نانو ذرات با غلظت وزنی مدنظر و پراکنده نمودن نانو ذرات در سیال پایه، آب رادیاتور خودرو پرآید تخلیه شد و تمام سیستم خنک کاری توسط نانو سیال پر شد. پارامترهایی که در این مرحله اندازه گیری شدند عبارتند از دمای آب خروجی از رادیاتور و دمای آب بعد از ترموستات (خروجی موتور).

۳-۹-۱- موقعیت نصب دماسنج

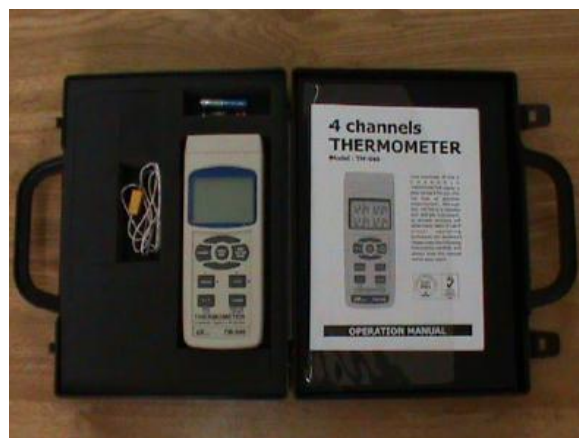
دلیل انتخاب این دو موقعیت این است که دمای آب خروجی رادیاتور، دمای آب خنک شده توسط رادیاتور است و دمای آب بعد از ترموستات، حداکثر دمای جذب شده توسط نانو سیال است. در واقع اختلاف این دو دما معیار مناسب بودن سیستم خنک کاری است. هر چه

این ختلاف دما بیشتر باشد نانو سیال گرمای بیشتری از موتور را جذب کرده است. در شکل ۴-۳ محل نصب سنسورهای دما نشان داده شده است.



شکل (۴-۳) موقعیت نصب سنسورهای دمایی

برای اندازه گیری دمای نشان داده شده در شکل ۴-۳ از دماسنج چهار کاناله شکل ۵-۳ استفاده شد. حسگرهای سیمی دماسنج با ایجاد سوراخ ریزی در جداره لوله لاستیکی متصل به رادیاتور در داخل مسیر سیال خنک شده قرار گرفتند و هر حسگر به طور جداگانه دمای نانو سیال را نشان می داد.



شکل (۵-۳) دماسنج تماسی برای تعیین دمای خط جوش

۳-۹-۲- سرعت‌های مورد بررسی

از آنجایی که رادیاتور خودروها در سرعت‌های زیر ۲۰ کیلومتر بر ساعت (شرایط ترافیک) و سرعت بالای ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت با مشکل خنک کاری مواجه هستند لذا تغییرات دما در دو نقطه خروجی رادیاتور و خروجی ترموستات در این دو سرعت بررسی شد.

با توجه به اینکه پمپ سیستم خنک کاری با تغییر دور موتور میزان پمپاژ آن تغییر می‌کند لذا برای یکسان بودن شرایط گردش جریان اب در موتور دو سرعت فوق در شرایط کاملاً یکسان بررسی شدند (جدول ۳-۴).

جدول (۳-۴) شرایط مختلف ثبت دمای خروجی رادیاتور و خروجی ترموستات

سرعت	دنده	دور موتور
۲۰	۲	۳۰۰۰
۱۰۸	۴	۳۰۰۰

تمامی مراحل داده برداری در شرایط دمایی یکسان انجام شد به طوری که محدوده تغییرات دما بین ۲۸ درجه سلسیوس تا ۳۲ درجه سلسیوس بود.

فصل چهارم

بحث و نتایج

۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از تحقیقات محققین در حوزه اثرات نانو سیالات بر انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی بیان می‌شوند. هم‌چنین اثر افزودن نانو ذرات در سیال پایه را به‌طور مفصل شرح و بحث خواهیم نمود.

۴-۲- پایدارسازی سوسپانسیون‌های حاوی نانو ذرات

۴-۲-۱- پایدار کننده‌های شیمیایی

یکی از روش‌های پایدارسازی سوسپانسیون‌های حاوی نانو ذرات استفاده از پایدار کننده‌های شیمیایی است. هرچند بعضی از محققین استفاده از این روش را مناسب نمی‌دانند علت این مسئله این است که افزودن پخش‌کننده می‌تواند ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تحت تأثیر گذاشته در نتیجه بهبود واقعی هدایت حرارتی با استفاده از نانو ذرات تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد.

جزء پایدارکننده سوسپانسیون که به نانو سیال افزوده می‌شود باید دارای ویژگی‌هایی باشد. ازجمله این ویژگی‌ها می‌توان به سازگاری شیمیایی با سیال پایه، سازگاری شیمیایی با نانو ذرات، عدم ایجاد واکنش شیمیایی با سیال پایه و نانو ذرات، عدم تغییر PH و عدم ایجاد محیط خورنده هست. عامل پراکنده ساز معمولاً به‌خودی‌خود تأثیری بر رفتار حرارتی سیال ندارد. به‌عنوان نمونه در تحقیق انجام‌شده بر روی نانو سیال اتیلن گلايگول-نانو ذرات مس با پراکنده ساز تیوگلايکولیک مشاهده شده است که افزودن اسید گلايکولیک به سیال پایه تأثیری بر خواص حرارتی آن ندارد و فقط نقش پراکنده ساز و پایدارکننده سوسپانسیون در نانو سیال را به عهده دارد (۶۱). متداول‌ترین پایدار کننده‌هایی که تاکنون در مقالات به آن‌ها اشاره شده

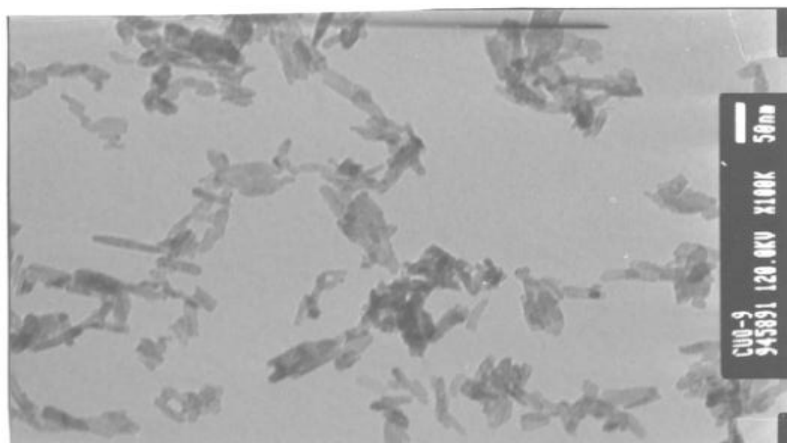
است مواد فعال سطحی مختلف می‌باشند. از جمله این پایدار کننده‌ها می‌توان به تیول‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد (۴۴).

۴-۲-۲- پایدار کنندگی به روش نوسانات مافوق صوت

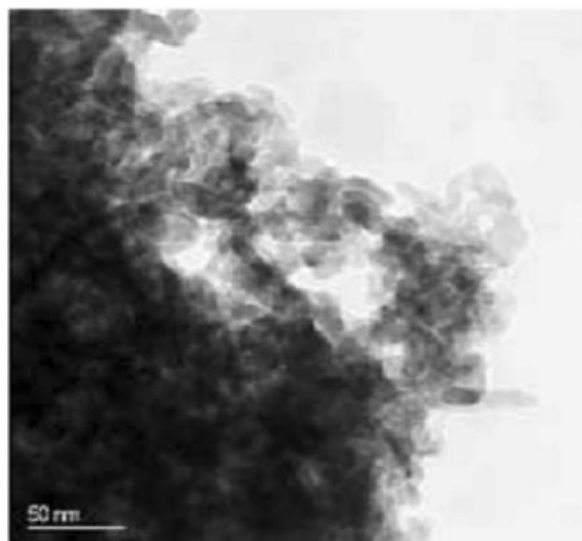
نوسانات ماورای صوت سبب شکسته شدن کلوخه‌های ذرات شده و در نتیجه پایداری سوسپانسیون‌ها را افزایش می‌دهد. در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی خواص نانو سیالات برای پراکنده کردن بهتر نانو ذرات و پایداری بیشتر سوسپانسیون از نوسانات ماورای صوت استفاده شده است. در مورد سوسپانسیون نانولوله‌های کربنی نوسانات مافوق صوت ممکن است سبب شکسته شدن نانولوله‌های کربنی شود.

هرچند استفاده از نوسانات ماورای صوت متداول پراکنده‌سازی نانو ذرات در سیال پایه است لیکن زمان هم زدن و نوسانات نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در مواردی مشاهده شده است که افزایش زمان نوسان از یک حد معین به بعد به تسریع کلوخه شدن ثانویه ذرات سرعت می‌بخشد. کواک^۱ و کیم (۲۰۰۵) به منظور انجام آزمایش‌هایی بر روی خواص نانو سیالات، سوسپانسیون‌هایی از نانوذره CuO در اتیلن گلیکول را به روش دومرحله‌ای تهیه کردند. قطرات ذرات CuO مورد استفاده ۳۰-۱۰ نانومتر بود و قطر متوسط ذرات ۱۲ نانومتر بود. همان‌گونه که شکل ۴-۱ نشان داده است، ذرات میله‌ای شکل می‌باشند. نسبت طول به قطر ذرات مشخص نیست ولی با استفاده از تصاویر TEM این نسبت حدود ۳ تخمین زده می‌شود. وقتی نانو ذرات به سیال افزوده شدند، به دلیل تشکیل کلوخه‌ها، ذرات در عرض چند دقیقه ته‌نشین شدند (شکل ۴-۱). به همین دلیل برای پخش کردن ذرات از نوسانات ماورای صوت استفاده گردید (۶۲).

^۱ Kwak

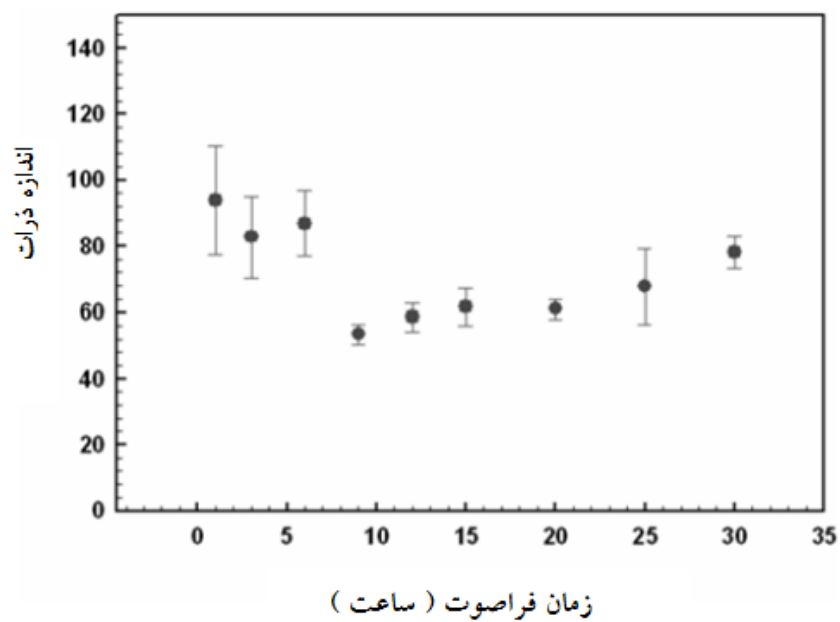


شکل (۴-۱) تصویر TEM ذرات CuO پخش شده در اتیلن گلیکول پس از ۹ ساعت تولید (۶۲).



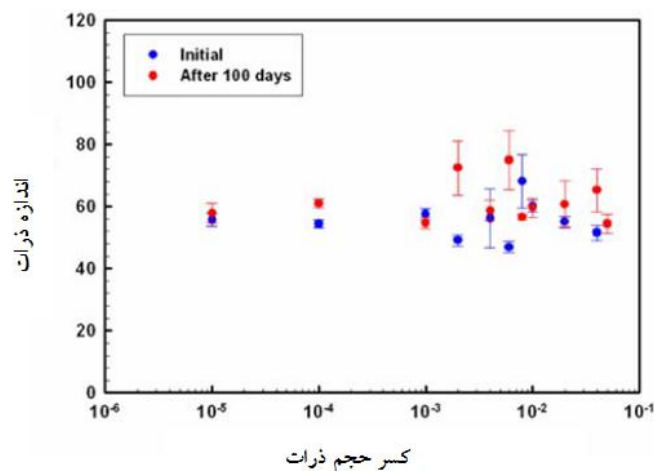
شکل (۴-۲) تصویر TEM ذرات CuO قبل از پخش در مایع، ذرات به شدت تجمع پیدا کرده اند (۶۲).

محققین مذکور به منظور تعیین زمان نوسان بهینه مدت زمان نوسان از ۱ تا ۳۰ ساعت تغییر داده و هر بار متوسط اندازه ذرات را تعیین کردند. اندازه متوسط ذرات پس از پخش برحسب زمان مخلوط شدن در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۴-۳ مشاهده می شود اگر مدت نوسانات ماورای صوت خیلی طولانی شود ذرات مجدداً به هم می چسبند. از شکل ۴-۳ مشاهده می شود که زمان بهینه ۹ ساعت و اندازه متوسط ذرات حدود ۶۰ نانومتر می باشد. این اندازه حدود ۵ برابر ذرات منفرد است یعنی بازهم ذرات کاملاً پخش نشده اند.



شکل (۳-۴) اندازه متوسط ذرات CuO پس از نوسانات مافوق صوت (۶۲).

برای بررسی پایداری نانو ذرات پس از ۱۰۰ روز اندازه‌گیری‌هایی انجام گرفت و مشاهده شد که اندازه متوسط ذرات تقریباً بدون تغییر باقی ماندند. نتایج در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) تغییر در اندازه متوسط ذره پس از ۱۰۰ روز (۶۲).

۳-۴- تأثیر جابجایی ذرات در سوسپانسیون برافزایش شدت انتقال حرارت

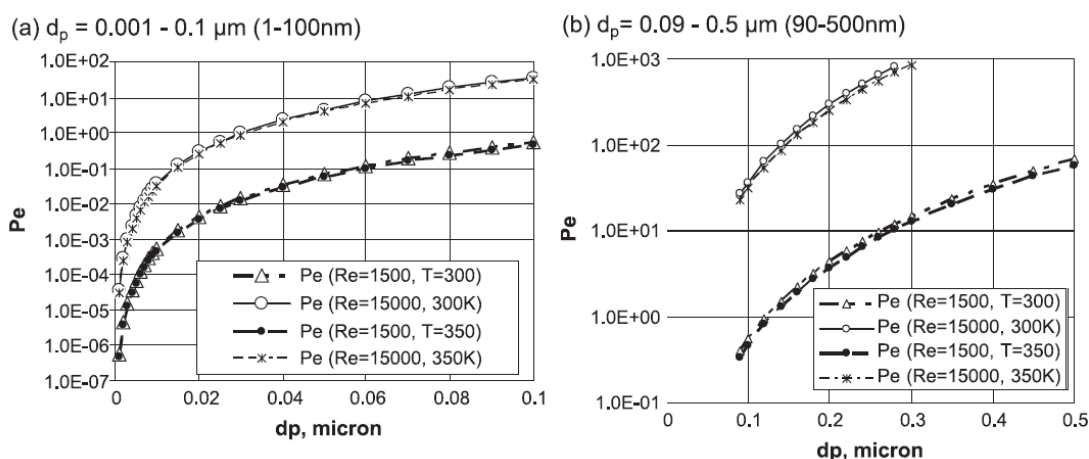
مهاجرت ذرات سبب غیریکنواختی هدایت حرارتی سیال در جهت شعاع لوله می‌شوند. برای انتقال حرارت بین جریان نانو سیال و دیواره لوله، موازنه حرارتی به صورت رابطه ۴-۱ می‌باشد (۱۲):

$$h = -k_{fx} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_s / (T_b - T_s) \quad (4-1)$$

در این رابطه k_{fx} ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال در ناحیه دیواره لوله، h ضریب انتقال حرارت جابجایی، T_b دمای متوسط سیال، T_s دمای دیواره لوله و $(\partial T / \partial r)_s$ گرادیان دمای سیال در دیواره است. مهاجرت و جابجایی ذرات سبب می‌شود که غلظت ذرات و در نتیجه هدایت حرارتی سیال در ناحیه نزدیک دیواره کاهش پیدا کند. این مسئله در مورد ذراتی با اندازه درشت‌تر شدت پیدا می‌کند. اگر دیواره لوله دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی باشد، کاهش ضریب هدایتی حرارتی سوسپانسیون در نزدیک دیواره سبب کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. با این وجود باید توجه داشت که ضریب انتقال

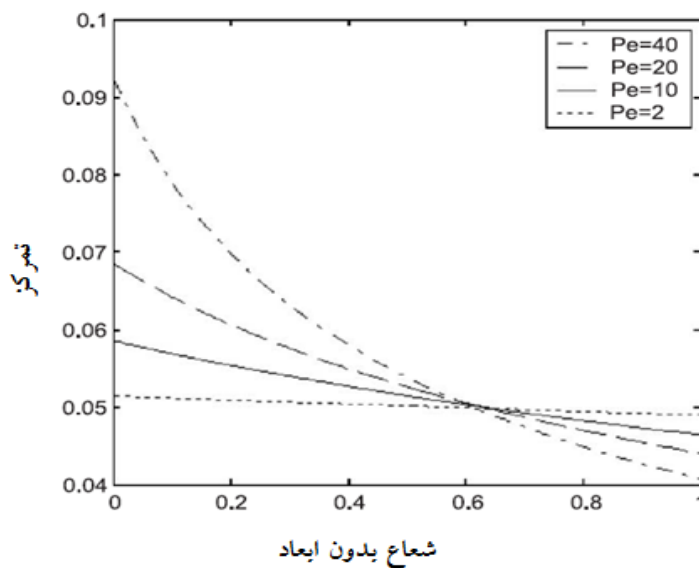
حرارت جابجایی با $(\partial T/r)_s$ نیز متناسب است. این پارامتر به میدان جریان محلی بستگی داشته و در اثر وجود نانو ذرات افزایش یافته و سبب کلی انتقال حرارت می گردد. این موضوع توسط کارهای تجربی نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

مدل سازی های انجام شده نشان می دهد که افزایش قطر متوسط ذرات داخل سیال سبب افزایش قابل توجه عدد پکلت می گردد. همان طور که در شکل ۴-۵ دیده می شود، در یک عدد رینولدز ثابت (اعم از عدد رینولدز پایین مانند ۱۵۰۰ یا عدد رینولدز بالا مانند ۱۵۰۰۰) افزایش قطر متوسط ذرات تا محدوده ۲۰ نانومتر افزایش شدید عدد پکلت را به دنبال دارد. این نشان دهنده این است که پارامترهای ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال تحت تأثیر شدید قرار می گیرد. با افزایش قطر ذرات از ۲۰ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر از شدت افزایش نسبی کاسته شده لیکن بازهم این مسئله قابل توجه است.



شکل (۴-۵) تأثیر اندازه ذرات و دما بر عدد پکلت (۱۲).

توزیع غلظت نانو ذرات در داخل سیال درون یک لوله به گونه ای است که بیشترین غلظت در مرکز لوله و کمترین غلظت در کنار دیواره های لوله خواهد بود. لیکن میزان این اختلاف غلظت بین دیواره و مرکز لوله بستگی به عدد پکلت دارد (شکل ۴-۶). با افزایش عدد پکلت اختلاف غلظت بین مرکز و کنار دیواره های لوله به شدت افزایش یافته و تمرکز شدید ذرات در ناحیه های نزدیک به مرکز لوله به وجود می آید.



شکل (۶-۴) تأثیر عدد پکلت بر توزیع غلظت (۱۲).

مقدار غلظت نانو ذرات نیز بر توزیع غلظت شعاعی در داخل لوله مؤثر است در غلظت‌های پایین نانو ذرات توزیع یکنواخت‌تری را در داخل لوله شاهد هستیم. در صورتی که افزایش غلظت نانو ذرات در درون سیال به ناهمگنی شعاعی غلظت دامن زده و سبب تمرکز بیشتر در نواحی نزدیک به مرکز لوله خواهد شد. نتایج فوق بیانگر این است که پدیده مهاجرت در نانو سیال می‌تواند عملکرد حرارتی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات عمدتاً در ضریب هدایت حرارتی سیال ربط داده می‌شود؛ اما پدیده مهاجرت علاوه بر ضریب هدایت ویسکوزیته نانو سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش غلظت نانو ذرات سبب افزایش ویسکوزیته سیال می‌گردد (۱۲).

افزایش عدد پکلت همانگونه که ایجاد اختلاف غلظت در بین مرکز و جداره لوله می‌نماید سبب ایجاد تغییرات شعاعی محسوس در ویسکوزیته نیز خواهد شد به طوری که در اعداد پکلت کوچک‌تر ویسکوزیته سیال در مرکز و جداره لوله تفاوت زیادی ندارد ولی با افزایش عدد پکلت به شدت این اختلاف زیاد می‌شود بطوریکه سیال در مرکز لوله بیشترین ویسکوزیته (به خاطر بالا رفتن غلظت نانو ذرات) و در کنار دیواره‌های لوله کمترین ویسکوزیته (به خاطر کاهش غلظت نانو ذرات) را خواهد داشت. وقتی که توزیع شعاعی غلظت برای نانو ذرات ایجاد شد سرعت حرکت لایه‌های سیال نیز به واسطه تغییر در ویسکوزیته لایه‌ها دچار تغییر خواهد گردید. کاهش غلظت نانو ذرات در سیال همراه با افزایش اختلاف سرعت لایه‌ها می‌باشد (۱۲).

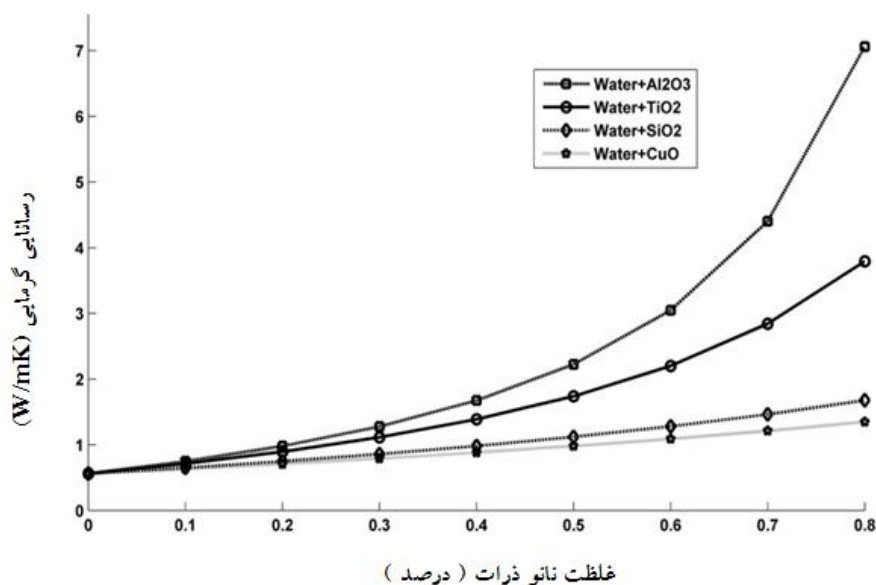
۴-۴- عوامل موثر بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

در فرایندهای انتقال حرارت هدایتی و جابجایی یکی از مشخصه های سیال ضریب هدایت حرارتی آن است. بالا بودن این مشخصه بیانگر بالا بودن نرخ انتقال حرارت است. یکی از دلایل مهم افزایش انتقال حرارت در نانو سیال نسبت به سیال پایه را به افزایش شدید ضریب هدایت حرارتی در نانو سیال ربط می دهند. مقالات منتشر شده برای انواع نانو سیالات (انواع سیال پایه و انواع نانو ذره یا نانو لوله) موید این مطلب است که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه ضریب هدایت گرمایی افزایش یافته و میزان این افزایش به مقدار ذرات، اندازه ذرات، نوع ذرات و نیز نوع سیال پایه همبستگی دارد (۶۱). در این قسمت پارامترهای موثر بر ضریب هدایت نانو سیال معرفی می گردند.

میزان افزایش ضریب حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه بستگی به پارامترهای مختلفی از جمله غلظت، نوع و اندازه نانو ذرات و pH محلول دارد.

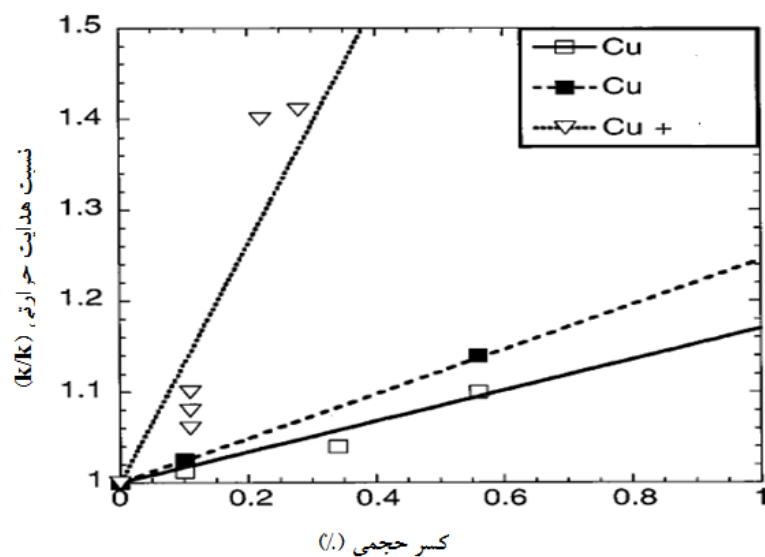
۴-۴-۱- اثر غلظت نانو ذرات بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

در شکل ۴-۷ تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات مختلف براساس تغییرات غلظت نانو ذره در سیال پایه برای نانو سیالات آب-اکسید مس، آب-اکسید آلومینیوم، آب-اکسید تیتانیوم و آب-اکسید سیلیسیوم براساس رابطه ۳-۵۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که هر چه غلظت نانو ذره در سیال پایه بیشتر شود میزان ضریب هدایت حرارتی به صورت نمایی افزایش پیدا کرد. از طرفی نتایج نشان داد که بیشترین ضریب هدایت حرارتی برای نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم و کمترین مقدار مربوط به نانو سیال آب-اکسید مس بود.

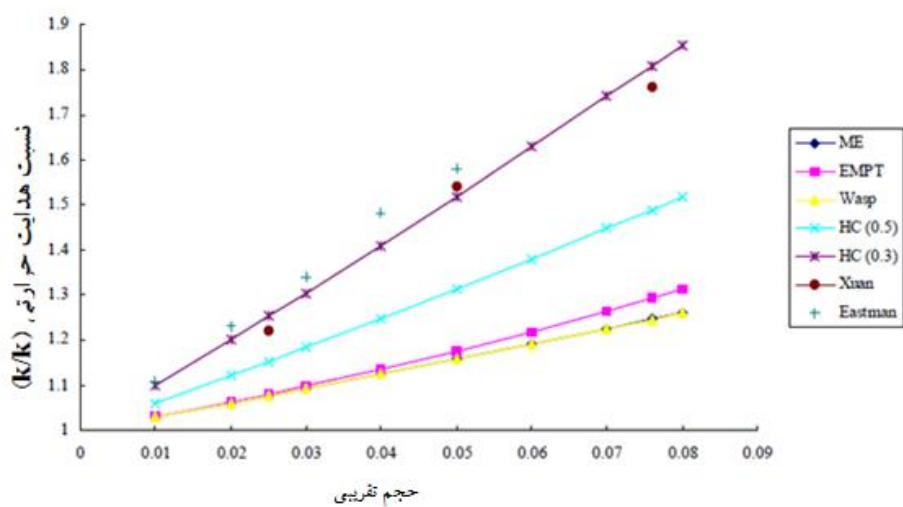


شکل (۷-۴) تغییرات غلظت نانو ذره بر ضریب هدایت حرارتی سیال (۶۱).

با افزایش غلظت نانو ذرات عموماً ضریب هدایت حرارتی سیال افزایش می یابد. در شکل ۸-۴ نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه برای نانو سیال های آب-اکسید آلومینیوم آب-اکسید مس اتیلن گلیکول-اکسید مس و اتیلن-مس بر حسب غلظت نانو سیال رسم شده است. همانگونه که از این شکل پیداست افزایش غلظت نانو ذرات توأم با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال است. همچنین مشخص است که ذرات مس و سیال اتیلن گلیکول بیشترین ضریب هدایت را دارند (۶۳). در شکل ۹-۴ اثرات غلظت نانو ذرات مس بر ضریب هدایت حرارتی آب نشان داده شده است. در این شکل نمودارها بر اساس یافته های حاصل از مدل های ریاضی ارائه شده توسط محققین رسم شده است به وضوح پیداست که نسبت ضرایب هدایت حرارتی با جزء حجمی نانو ذرات بصورت خطی افزایش می یابد اما این افزایش برای مدل های مختلف با شیب های متفاوت صورت می گیرد.



شکل (۴-۸) اثر غلظت و نوع نانو ذرات بر ضریب هدایت حرارتی (۶۳).



شکل (۴-۹) برآوردهای حاصل از مدل‌های مختلف برای تأثیر غلظت نانو ذرات مس بر ضریب هدایت

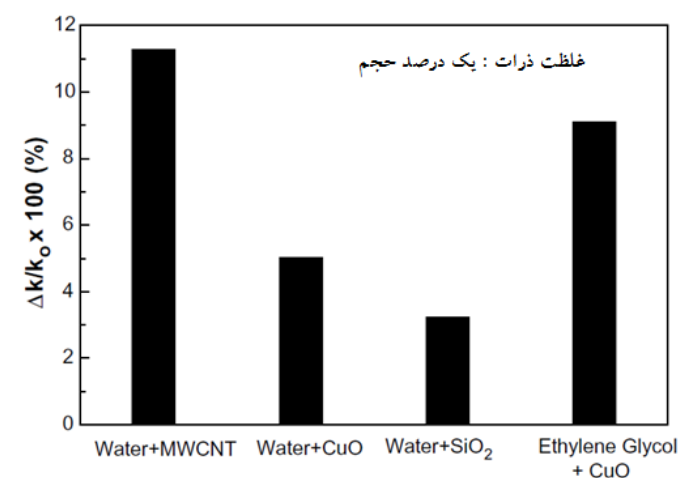
حرارتی سیال (۱۱).

نتایج ارائه شده در این بخش نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش پیدا کرد اما برخی از محققین ((۶۳)؛ (۱۱)) معتقدند

که با افزایش غلظت نانو ذره ضریب هدایت حرارتی به طور خطی و برخی دیگر معتقدند (چوان^۱ و همکاران، ۲۰۰۸) که به طور نمایی افزایش پیدا می کند (۴۴).

۴-۴-۲- اثر نوع نانو ذرات و سیال بر ضریب حرارتی نانو سیال

ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات هم به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه هم به ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات بستگی دارد. به عنوان مثال شکل ۴-۱۰ بیانگر آن است که با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و نانو ذرات افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال کاهش می یابد (۶۴).

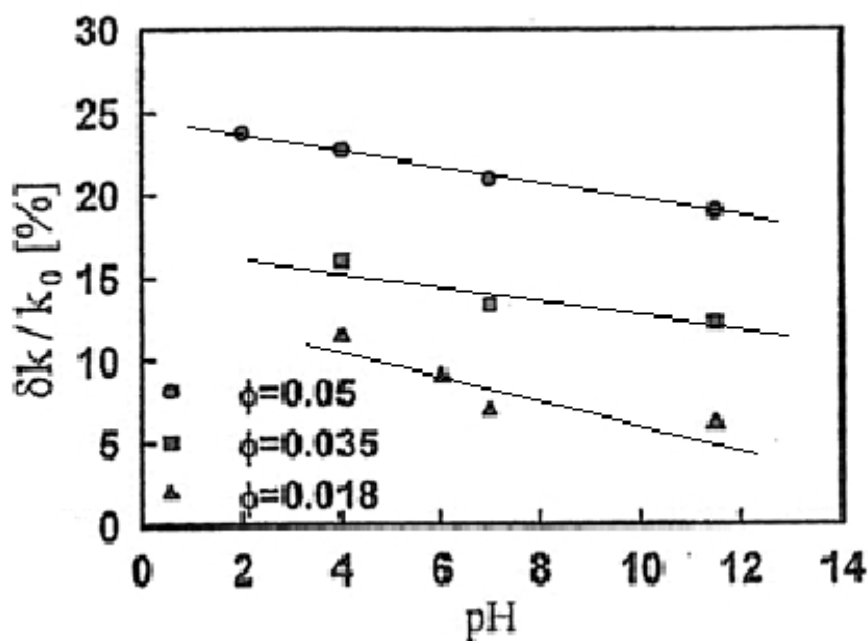


شکل (۴-۱۰) تأثیر نوع سیال پایه و نانو ذره بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال (۶۴).

۴-۴-۳- اثر pH بر ضریب حرارتی نانو سیال

مقدار pH نانو سیال از دیگر عوامل مؤثر بر افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال نسبت به سیال پایه است. در تحقیقی که بر روی نانو سیال حاوی نانو ذرات Al₂O₃ انجام شده این نتیجه حاصل گردیده است که علیرغم افزایش ضریب هدایت حرارتی با افزایش جزء حجمی نانو ذرات شیب این افزایش برای pH های مختلف متفاوت است. شکل ۴-۱۱ نشان می دهد که نسبت ضرایب هدایت حرارتی با افزایش pH کاهش پیدا می کند (۶۵).

¹ Chun



شکل (۴-۱۱) اثر pH بر مقدار ضریب هدایت حرارتی نانو سیال برای سیستم آب-آلومینا (۶۵).

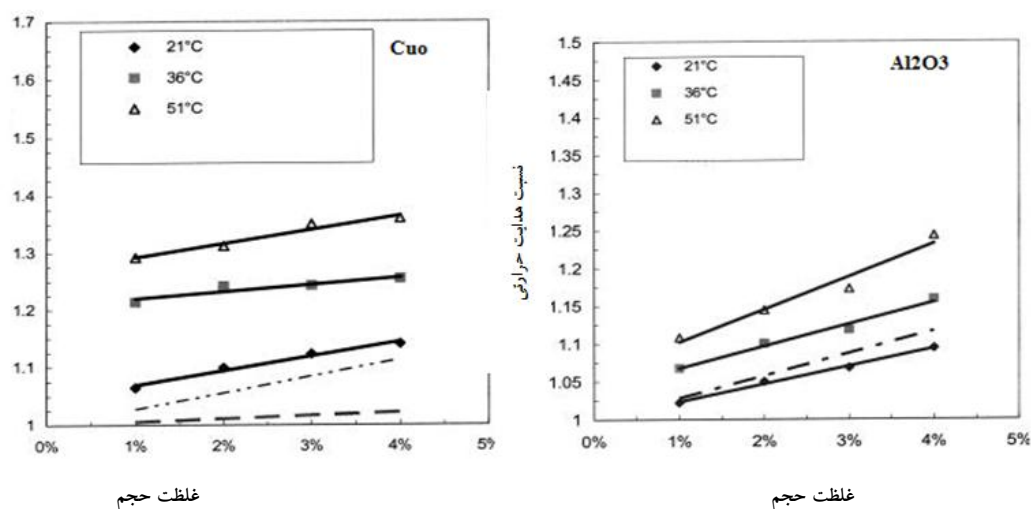
وقتی نانو ذرات در آب پخش می‌شوند رفتار کلی برهم‌کنش سیال-ذره به خواص سطح ذره بستگی دارد. در مورد نانو سیال آب- Al_2O_3 نقطه ایزو الکتریک برابر ۹/۲ است یعنی در این pH نیروی دافعه ذرات Al_2O_3 برابر صفر بوده به هم می‌پیوندند بنابراین وقتی pH نزدیک ۹/۲ باشد سوسپانسیون ناپایدار می‌شود. با افزایش اختلاف pH سوسپانسیون نسبت به pH نقطه ایزو الکتریک، نیروی آب پوشی بین ذرات افزایش یافته در نتیجه تحرک نانو ذرات در سوسپانسیون نیز افزایش می‌یابد. حرکات میکروسکوپی ذرات موجب جابه‌جایی شده و فرایند هدایت حرارت را بهبود می‌بخشد. نتایج تجربی نشان می‌دهند که بهترین شرایط برای انتقال حرارت توسط نانو سیال در مقادیر pH پایین می‌باشد ((۶۵)؛ (۵)).

۴-۴-۴ اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

دما یکی از عوامل مؤثر بر مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال است. یافته‌های تجربی حکایت از آن دارد که با افزایش دما اثر نانو ذرات برافزایش ضریب حرارتی نیز به شدت افزایش می‌یابد (۶۶).

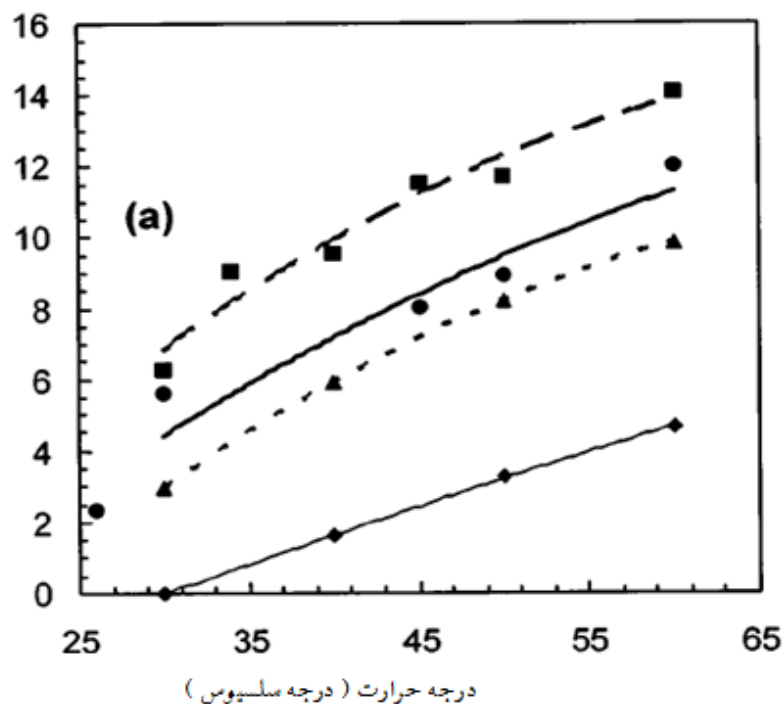
در نانو سیالات تصور بر این است که مکانیسم اصلی ضریب هدایت حرارتی حرکت اتفاقی نانو ذرات می‌باشد. فرض محتمل این است که این حرکت شبه براونی تابع دما سیال است بنابراین مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی با دما برای ذرات کوچک‌تر در دماهای

بالا تر به مراتب بیشتر از افزایش ضریب هدایت حرارتی برای ذرات درشت تر است. در دمای پایین حرکت شبه براونی از اهمیت کمتری برخوردار بوده و لذا اختلاف افزایش ضریب حرارتی توسط ذرات کوچک تر و درشت تر کاهش پیدا می کند. در شکل ۴-۱۲ درصد افزایش هدایت حرارتی برحسب غلظت در دماهای مختلف برای سیستم آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس آورده شده است ((۶۷)؛ (۶۶)). همان گونه که از شکل ۴-۱۲ پیداست با افزایش دما شیب منحنی مربوطه نیز افزایش یافته و این بدان معنا است که در دماهای بالاتر اثر غلظت بر ضریب هدایت حرارتی بیشتر است.



شکل (۴-۱۲) افزایش ضریب هدایت حرارتی سیستم آب-اکسید آلومینیوم و اکسید مس (۶۷).

در شکل ۴-۱۳ مسئله تأثیر دما برافزایش ضریب هدایت حرارتی سیال به شکل گویاتری دیده می شود.

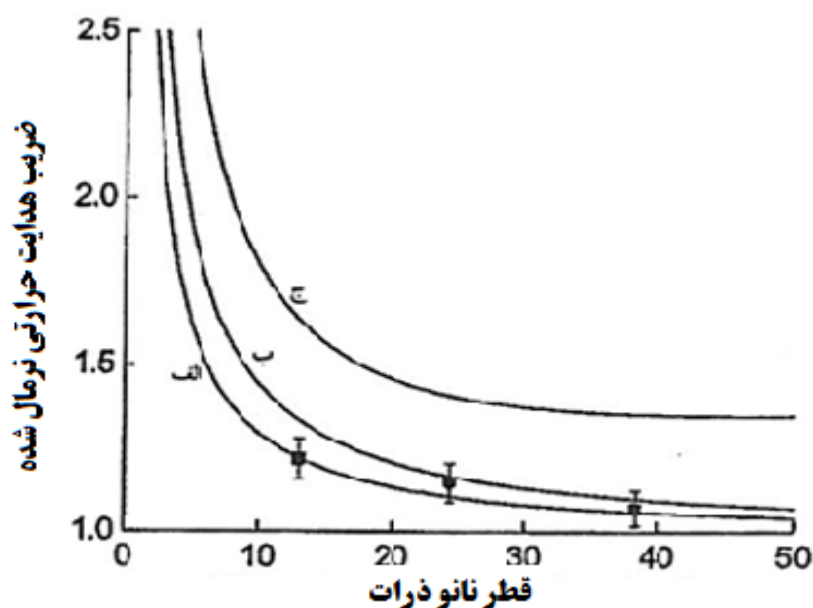


شکل (۴-۱۳) اثر درجه حرارت بر درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی برای تیولات طلا در

تولون (۶۷).

۴-۴-۵- اثر اندازه نانو ذرات بر ضریب انتقال حرارت سیال

آنوپ و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی اثر اندازه متوسط نانو ذرات بر میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون حاصل نسبت به سیال پایه به این نتیجه رسیدند که با درشت تر شدن اندازه ذرات نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه بطور قابل ملاحظه ای رو به کاهش می گذرد. اثر نانو ذرات بر ضریب هدایت حرارتی سیستم اب-اکسید الومینیوم مطالعه و با نتایج حاصل از مدل های ریاضی مقایسه شده است. این نتایج در شکل ۴-۱۴ آمده است (۶۸).



شکل (۴-۱۴) نمودار ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بر حسب اندازه نانو ذرات برای الف) نتایج

تجربی برای سیستم آب-اکسید آلومینیوم با غلظت ۳٪ حجمی ب) مدل ریاضی برای پیش بینی ضریب

هدایت حرارتی نانو سیال اتیلن گلیکول-CuO با غلظت ۳٪ حجمی

ج) پیش بینی مدل ریاضی برای نانو سیال اتیلن گلیکول-Cu با غلظت ۳٪ حجمی (۶۸).

همانگونه که ذکر شد در نانو سیالات تصور بر این است که مکانیزم اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی حرکت انتقالی نانو ذرات باشد. این تحرک برای ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت تر پیش بینی شده و بنابراین میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال توسط ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت تر خواهد بود. اصولاً علت اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش حرکت اتفاقی نانو ذرات است چرا که جزء حجمی نانو ذرات انقدر کوچک است که در هیچ نوع میانگینی اعم از میانگین وزنی یا حجمی چنین اثراتی مشاهده نمی گردد (۶۶).

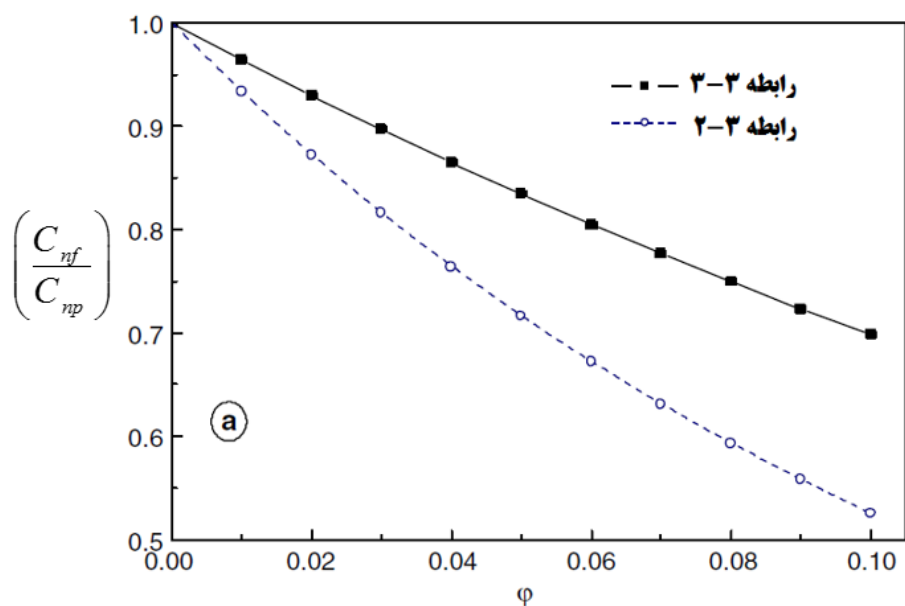
۴-۵- اثر نانو ذرات بر خواص فیزیکی نانو سیالات

۴-۵-۱- گرمای ویژه نانو سیال

منصور^۱ و همکاران (۲۰۰۷) برای هر دو شکل معادلات ۲-۳ و ۳-۳ نسبت گرمای ویژه نانو سیال به گرمای ویژه نانو ذرات را برحسب تمرکز نانو ذرات در نانو سیال رسم کردند. این نتایج برای نانو ذرات آلومینیوم و آب در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است (۶۹). مشاهده می شود که معادله ۲-۳ خیلی پایین تر از ۳-۳ است. آن ها مطمئن نبودند که کدام رابطه صحیح است، بنابراین فرض کردند که هر دو رابطه صحیح است. اما ژو^۲ و نی (۲۰۰۸) این دو رابطه را بیشتر بررسی کردند و دریافتند که معادله ۳-۳ درست تر می باشد (۷۰). اطلاعات تجربی به دست آمده توسط آن ها و کار زیاد بر روی معادله ۳-۳ ثابت می کند که معادله ۳-۳ بهترین رابطه برای پیش بینی گرمایی ویژه در نانو سیال می باشد.

¹ Mansour

² Zhou

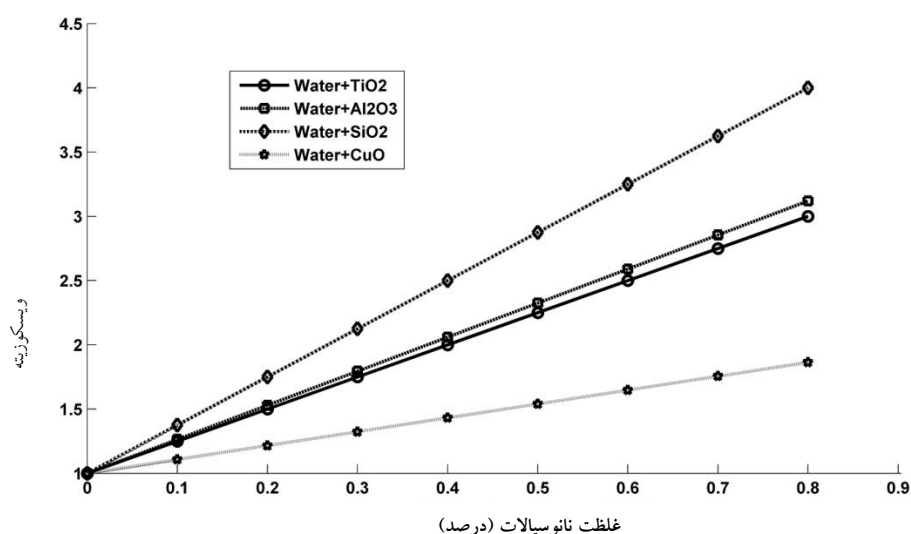


شکل (۴-۱۵) مقایسه دو رابطه گرمای ویژه (آبی مربوط به رابطه ۲-۳ و سیاه مربوط به رابطه ۳-۳)

(۶۹).

۴-۵-۲- لزجت

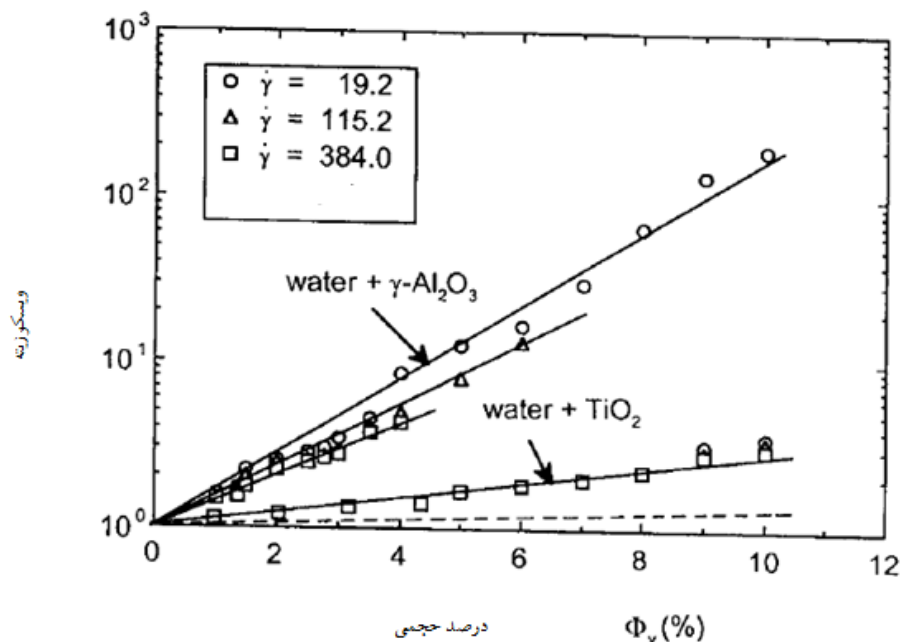
مطابق رابطه ۳-۵۱ روند تغییرات ویسکوزیته نانو سیال بر حسب درصد جرمی نانو ذره برای چهار نانو سیال SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 و CuO با سیال پایه آب بررسی شد. نتایج این بررسی در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است در غلظت حجمی ثابت بیشترین ویسکوزیته برای نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم و کمترین ویسکوزیته متعلق نانو سیال آب-اکسید مس است.



شکل (۴-۱۶) تغییر ویسکوزیته نانو سیال براساس غلظت جرمی نانو ذره در نانو سیال (۷۰).

پراشر^۱ و همکاران (۲۰۰۶) به صورت تجربی ویسکوزیته حاصل از نانو ذرات Al_2O_3 در روپلین گلیکول را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ویسکوزیته به قطر ذرات، درصد حجمی نانو ذرات و دما وابسته است. آن‌ها دریافتند که ویسکوزیته نانو سیال به مقدار زیادی به درصد حجمی نانو ذرات وابسته است اما مستقل از سرعت برشی و قطر نانو ذرات می‌باشد. این واقعیت که ویسکوزیته مستقل از سرعت برشی و قطر ذرات نانو ذرات است نشان می‌دهد که نانو سیال‌ها رفتار نیوتنی دارند. آن‌ها نشان دادند که نانو سیال‌ها با درصد حجمی کم نانو ذرات از قانون ویسکوزیته انیشتین پیروی می‌کنند اما این قانون برای درصدهای حجمی بزرگ صادق نیست زیرا نانو ذرات در نانو سیال شروع به توده شدن می‌کنند (۷۱). شکل ۴-۱۷ شامل اطلاعاتی از دیگر محققان نیز می‌باشد. از این داده‌ها می‌توان برای افزایش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش رسانایی حرارتی استفاده کرد.

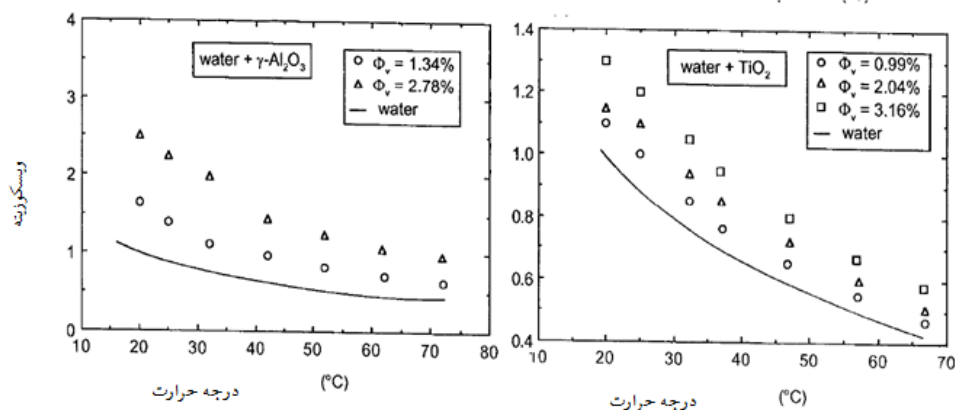
¹ Prasher



۱

شکل (۴-۱۷) افزایش ویسکوزیته با درصد حجمی آب- Al_2O_3 و آب- TiO_2 (۱۳).

مطالعات پاک و چوی (۱۹۹۸) در جریان آشفته داخل لوله ۲۰۰ برابر افزایش ویسکوزیته نسبی را برای آب Al_2O_3 با ۱۰ درصد حجمی و همچنین ۳ برابر افزایش را برای اکسید تیتانیوم با ۱۰ درصد حجمی نانوذره در آب را نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین دریافتند که ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می‌یابد. این نتایج در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. هر چه درصد حجمی نانو سیال افزایش یابد مقدار کاهش ویسکوزیته نسبت به دما بزرگ‌تر می‌شود. همچنین دریافتند که اندازه و شکل کروی نانو ذرات هم بروی ویسکوزیته نانو سیال مؤثر است. بطوریکه با کاهش قطر کروی نانو ذرات و نامنظم‌تر شدن شکل کروی ویسکوزیته افزایش می‌یابد و دلیل این امر افزایش نسبت سطح به حجم نانوذره می‌باشد ((۱۳);(۶۲);(۷۱)).



شکل (۴-۱۸) کاهش ویسکوزیته با افزایش دما در نانو سیال (۱۳).

با استفاده از رابطه ۳-۵۱ مقدار ویسکوزیته برای چندین نانو ذره مختلف در نمودار شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.

به طوری کلی مقایسه تحقیق حاضر با تحقیقات مشابه نتایج نشان داد با افزایش غلظت حجمی نانو ذره در نانو سیال ویسکوزیته نانو سیال افزایش پیدا کرد.

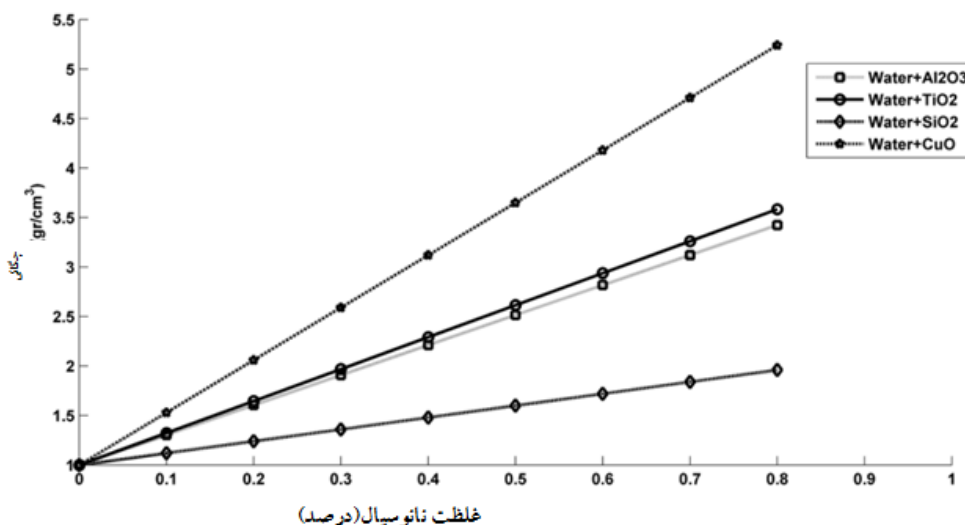
۴-۶- تاثیر عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد. به وضوح مشخص است که در عدد رینولدز ثابت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال خالص بزرگتر است. دلایل احتمالی افزایش ضریب جابجایی را می توان به صورت زیر بیان کرد (۷۲):

- نانو سیال با نانو ذرات معلق هدایت حرارتی مخلوط را بالا می برد
- حرکت آشفته و بی نظم نانو ذرات سبب افزایش انتقال حرارت می شود.

۴-۷- چگالی نانو سیال

در شکل ۴-۱۹ اثرات غلظت نانو ذره در سیال پایه برای چهار نوع نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-اکسید تیتانیوم، آب-اکسید مس و آب-اکسید سیلیسیوم بر گرانشی نانو سیال براساس رابطه ۳-۴۹ بررسی شده است. همانطور که نتایج نشان می دهند با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه میزان چگالی نانو سیال بیشتر می شود به طوری که بیشترین چگالی برای نانو سیال آب-اکسید مس و کمترین چگالی برای آب-اکسید سیلیسیوم است.



شکل (۴-۱۹) تغییرات گرانی نانوسیال براساس غلظت نانو ذره در سیال پایه (۷۲).

در این فصل ابتدا تغییرات رخ داد در خواص فیزیکی و حرارتی نانو سیالات بررسی شده و سپس اثرات آن بر خنک کاری موتور خودرو ارائه شده است. در آخر فصل نیز نتایج این تحقیق با چندین تحقیق به صورت روابط تجربی مقایسه می گردد.

۴-۸- اثر نانو ذرات بر خواص نانو سیال با سیال پایه ضد یخ

در این بخش اثر نوع نانو ذره و درصد حجمی آن بر برخی خواص فیزیکی و ترمودینامیکی نانو سیال بررسی خواهد شد.

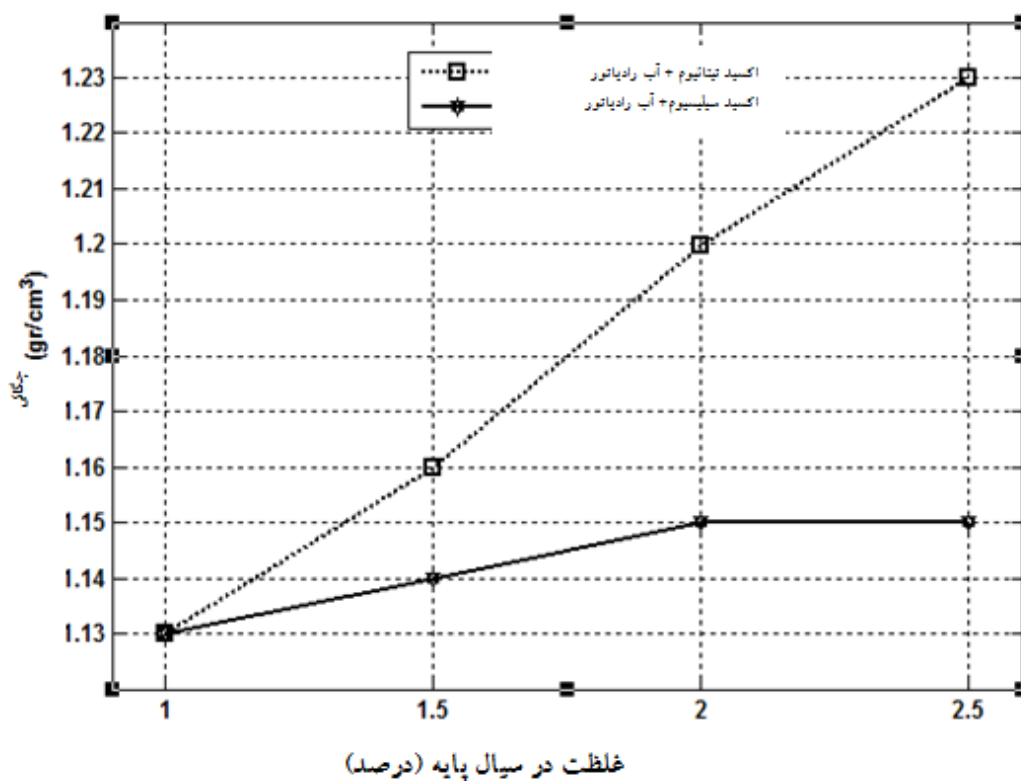
۴-۸-۱- چگالی

نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه و هم چنین با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه میزان چگالی نانو سیال بیشتر می شود. این نتایج در جدول ۴-۱ برای دو نانو ذره اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسوم در غلظت های حجمی مختلف ارائه شده است.

جدول (۴-۱) اثر نانو ذره و غلظت آن بر چگالی نانو سیال

غلظت نانو ذره در سیال پایه (%)				نوع نانو ذره
۲/۵	۲	۱/۵	۱	
چگالی (gr/cm ³)				
۱/۲۳	۱/۲۰	۱/۱۶	۱/۱۳	اکسید تیتانیوم
۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۴	۱/۱۳	اکسید سیلیسیم

نتایج ارائه شده در جدول ۴-۱ نشان داد که چگالی نانو سیال آب رادیاتور-اکسید تیتانیوم با غلظت حجمی ۲/۵ درصد دارای بیشترین مقدار است. شکل ۴-۲۰ نشان می دهد که اثر نانو ذره اکسید تیتانیوم بر چگالی نانو سیال بسیار بیشتر است. این نتایج در تحقیقات (۷۳) و (۵۲) نیز تایید شده است.



شکل (۴-۲۰) تغییرات چگالی نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۳).

به طور کلی افزایش چگالی سیال خنک کننده موتور امری منفی در سیستم خنک کاری محسوب می شود زیرا برای پمپ کردن سیال در سیستم خنک کاری توان بیشتری نیاز است.

لذا افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب ایجاد افت فشار در سیستم خنک کاری موتور می‌گردد (۷۴).

۴-۸-۲- ضریب هدایت حرارتی

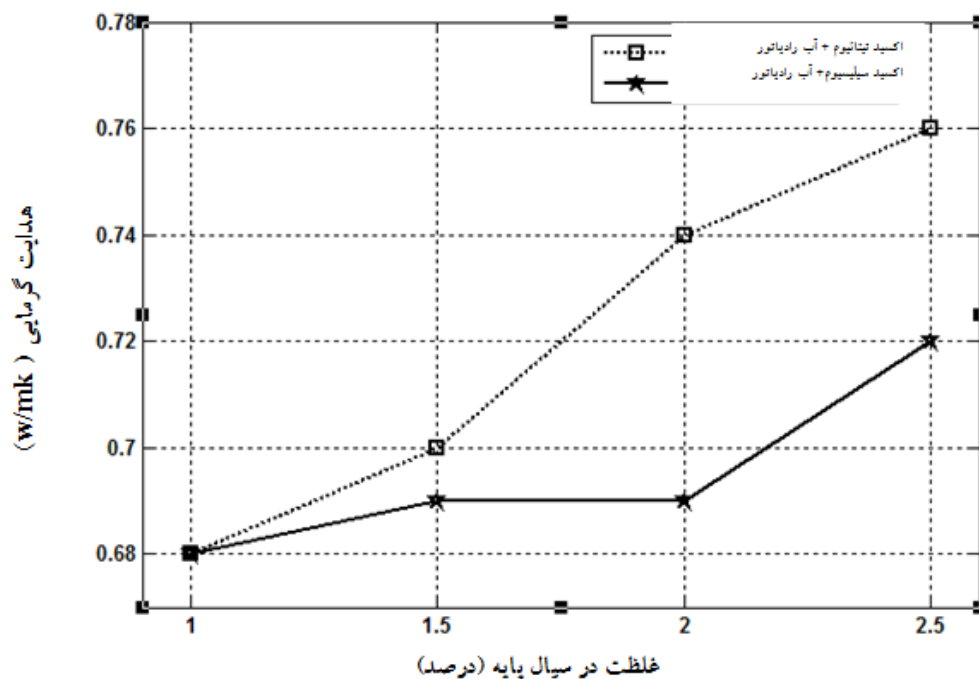
در نانو سیالات مکانیزم اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی حرکت انتقالی نانو ذرات می‌باشد. این تحرک برای ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت تر پیش‌بینی شده و بنابراین میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال توسط ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت تر خواهد بود. اصولاً علت اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش حرکت اتفاقی نانو ذرات است چرا که جزء حجمی نانو ذرات انقدر کوچک است که در هیچ نوع میانگینی اعم از میانگین وزنی یا حجمی چنین اثراتی مشاهده نمی‌گردد (۶۶).

در جدول ۴-۲ و شکل ۴-۲۱ تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با توجه به نوع نانو ذره و غلظت آن آورده شده است. نتایج نشان داد که نانو ذره اکسید تیتانیوم ۲/۵ درصد دارای بیشترین ضریب هدایت حرارتی بود. بررسی شکل ۴-۲۱ نشان می‌دهد که تغییرات غلظت نانو ذره اکسید تیتانیوم بیشتر از نانو ذره اکسید سیلیسوم است. نتایج به دست آمده در این بخش توسط محققینی مانند (۶۴)، (۶۰) و (۵) تایید شده است.

جدول (۴-۲) اثر نانو ذره و غلظت آن بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

غلظت نانو ذره در سیال پایه (%)	نوع نانو ذره	۱	۱/۵	۲	۲/۵
		ضریب هدایت حرارتی (W/mK)			
اکسید تیتانیوم		۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۷۶
اکسید سیلیسیم		۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۲

نتایج نشان داد که افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی شد که در تحقیق حاضر این امر سبب بهبود خاصیت نانو سیال می‌گردد که نشان می‌دهد انتخاب این نوع نانو سیال به جای سیال پایه سبب بهبود خنک کاری در موتور خودرو خواهد شد.



شکل (۴-۲۱) تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال

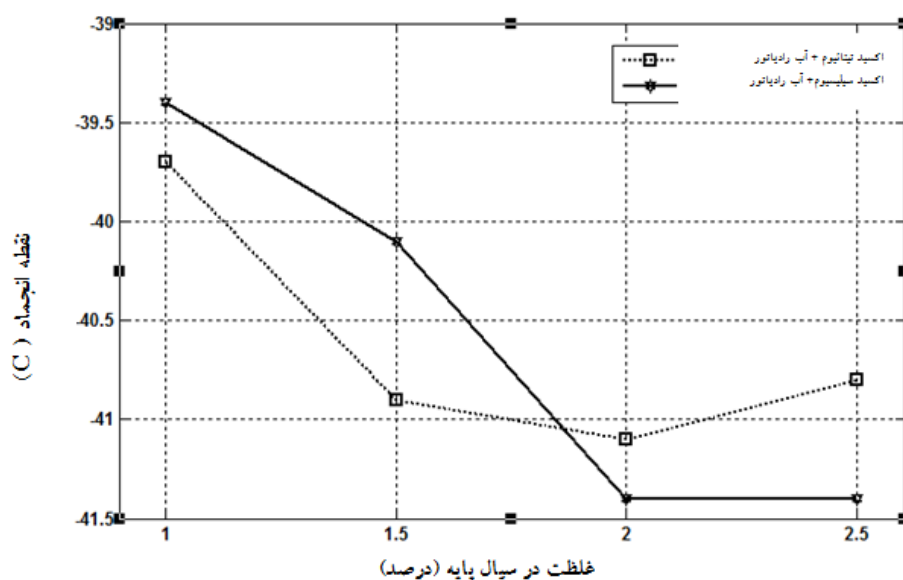
پایه (۶۴).

۴-۸-۳- نقطه انجماد

در جدول ۳-۴ و شکل ۴-۲۲ اثر نوع نانو ذره و غلظت آن بر نقطه انجماد نانو سیال ارائه شده است. به طور کلی افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب کاهش نقطه انجماد نانو سیال شد. در سیستم خنک کاری خودرو هدف استفاده از سیالی است که در دماهای پایین تر یخ بزند لذا افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب بهبود خاصیت مایع خنک کاری موتور خودرو می گردد. نتایج نشان داد که اثر نانو ذره اکسید سیلیسیوم بر کاهش نقطه انجماد نانو سیال بیشتر از نانو ذره اکسید تیتانیوم بود. همانطور که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است با افزایش غلظت نانو ذره ابتدا نقطه انجماد نانو سیال کاهش یافت و سپس افزایش پیدا کرد به طوری که بیشترین کاهش دمایی در نقطه انجماد نانو سیال در غلظت ۲٪ اتفاق افتاد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با تحقیقات (۷۴) و (۷۵) که اثر نانو ذرات را بر روی نقطه انجماد نانو سیالات بررسی کردند همبستگی زیادی دارد.

جدول (۴-۳) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه انجماد نانو سیال

نوع نانو ذره	غلظت نانو ذره در سیال پایه (%)			
	۱	۱/۵	۲	۲/۵
اکسید تیتانیوم	-۳۹/۷	-۴۰/۹	-۴۱/۱	-۴۰/۸
اکسید سیلیسیوم	-۳۹/۴	-۴۰/۱	-۴۱/۴	-۴۱/۴



شکل (۴-۲۲) تغییرات نقطه انجماد نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۵).

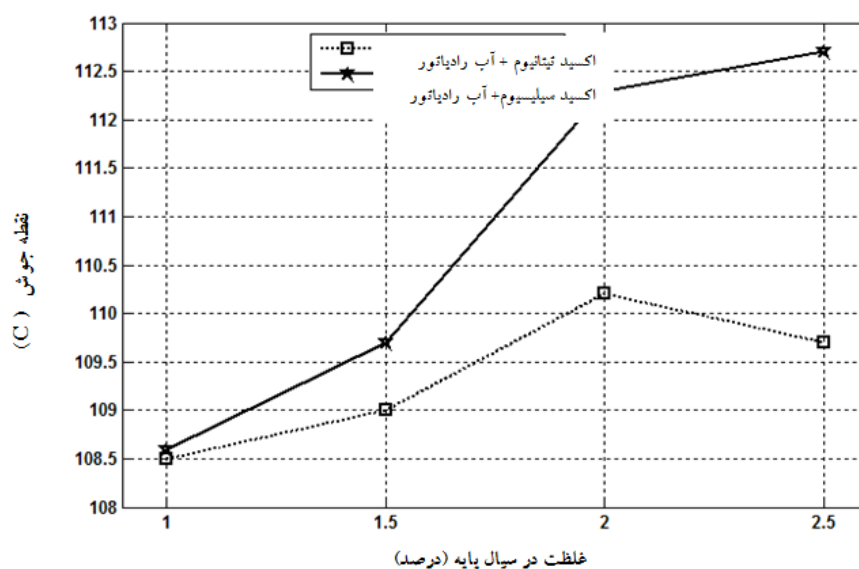
۴-۸-۴- نقطه جوش

در جدول ۴-۴ و شکل ۴-۲۳ اثر نانو ذرات اکسید سیلیسیوم و اکسید تیتانیوم بر نقطه جوش نانو سیال آورده شده است. نتایج نشان دادند که افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش نقطه جوش نانو سیال نسبت به سیال پایه شد به طوری که بیشترین افزایش دمایی در نانو ذره اکسید سیلیسیوم ۲/۵٪ مشاهده شد. در سیستم خنک کاری خودرو استفاده از سیال با نقطه جوش بالا مناسب است لذا افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب بهبود کارکرد مایع خنک کننده موتور می گردد.

جدول (۴-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر نقطه جوش نانو سیال

نوع نانو ذره	غلظت نانو ذره در سیال پایه (%)			
	۱	۱/۵	۲	۲/۵
اکسید تیتانیوم	۱۰۸/۵	۱۰۹	۱۱۰/۲	۱۰۹/۷
اکسید سیلیسیوم	۱۰۸/۶	۱۰۹/۷	۱۱۲/۳	۱۱۲/۷

در شکل ۴-۲۳ اثر دو نوع نانو ذره TiO_2 و SiO_2 بر نقطه جوش نانو سیال نشان داده شده است. تقریباً رفتار نانو سیال با تغییر درصد نانو ذره در سیال پایه برای هر دو نانو ذره مشابه هم است اما تغییرات در افزایش نقطه جوش در نانو سیال با نانو ذره SiO_2 نسبت به نانو سیال با TiO_2 بیشتر است. (۷۶) و (۷۷) در بررسی اثر نانو ذرات بر نقطه جوش نانو سیال به نتایج مشابه تحقیق حاضر دست پیدا کردند.



شکل (۴-۲۳) تغییرات نقطه جوش نانو سیال براساس نوع نانو ذره و غلظت آنها در سیال پایه (۷۵).

۴-۹- کاربرد نانو سیالات در سیستم خنک کاری خودرو

در این بخش به بررسی اثر نانو ذره و نوع آن بر دمای خروجی نانو سیال از موتور و رادیاتور در سرعت های ۲۰ و ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت می پردازیم

۴-۹-۱- سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت

در جدول ۵-۴ دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت برای نانو ذرات SiO_2 و TiO_2 با درصدهای حجمی مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه میزان گرمای جذب شده از موتور توسط نانو سیال نسبت به سیال پایه بیشتری است. در حالت استفاده از سیال پایه برای خنک کاری موتور دمای سیال خروجی از موتور حدود ۸۹ درجه است اما با تغییر سیال پایه به نانو سیال دمای سیال خروجی موتور افزایش می یابد. استنباط این نتیجه کاملاً مشهود و مشخص است چرا که با افزودن نانو ذره به سیال پایه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش پیدا کرد که این امر باعث می شود نانو سیال گرمای بیشتری از موتور را جذب کن که نتیجه آن بالا رفتن دمای نانو سیال خروجی از موتور نسبت به سیال پایه است.

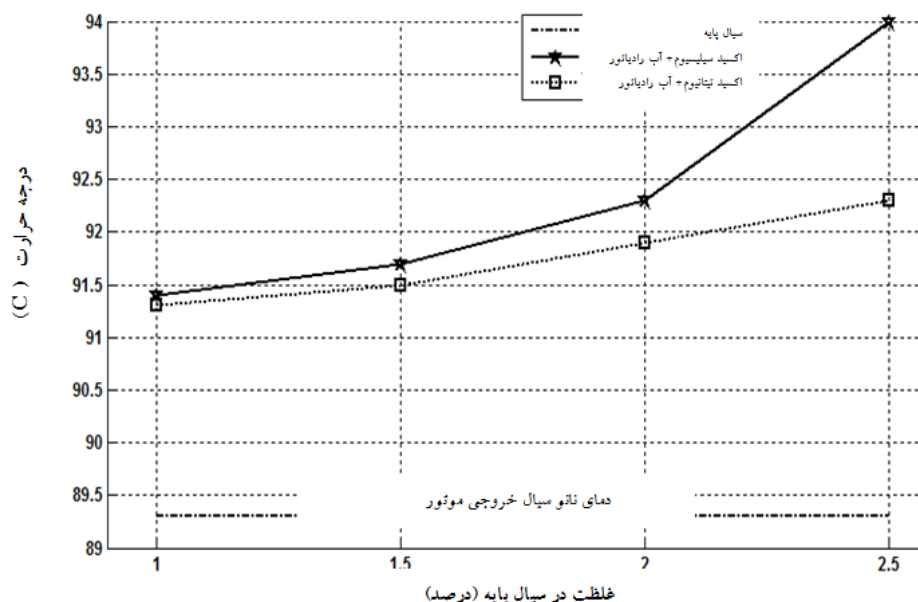
جدول (۵-۴) اثر نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور

و خروجی رادیاتور در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت

نوع سیال محل اندازه گیری دما	سیال پایه	درصد SiO_2 در سیال پایه				درصد TiO_2 در سیال پایه			
		۱	۱/۵	۲	۲/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵
خروجی موتور	۸۹/۳	۹۱/۴	۹۱/۷	۹۲/۳	۹۴	۹۱/۳	۹۱/۵	۹۱/۹	۹۲/۳
خروجی رادیاتور	۷۹/۴	۷۷/۲	۷۷/۱	۷۷/۶	۷۶/۹	۷۷/۳	۷۷/۶	۷۷/۱	۷۷

در شکل های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ تغییرات دمای خروجی سیال از موتور و رادیاتور برای غلظت های مختلف نانو ذرات آورده شده است. همانطور که از جدول ۵-۴ و شکل ۴-۲۴ مشخص است دمای خروجی سیال پایه از موتور ۸۹/۳ درجه سانتیگراد است که به صورت خط راست در شکل ۴-۲۴ مشخص شده است. با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه، دمای

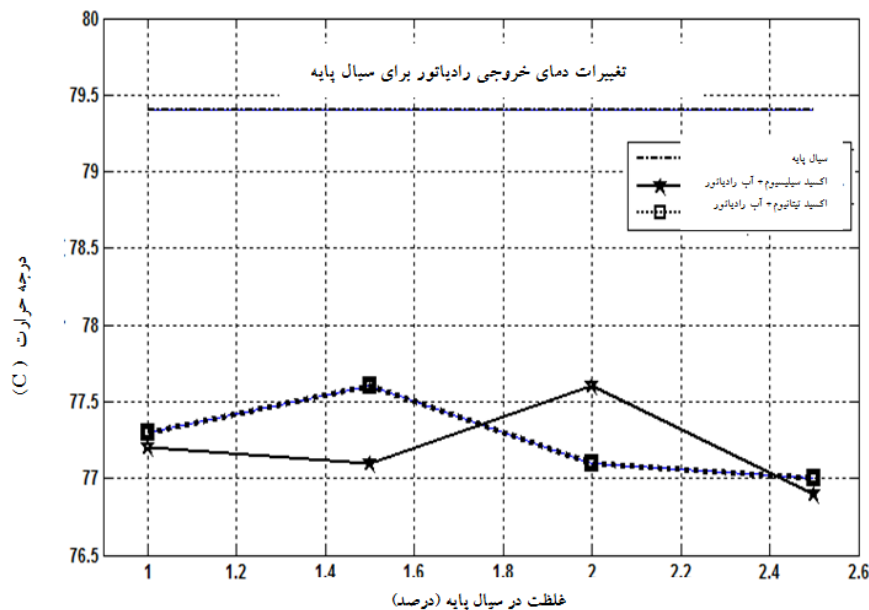
سیال خروجی از موتور افزایش پیدا کرد که بیشترین دمای خروجی در حالت استفاده از نانو سیال ۲/۵ درصد اکسید سیلیسیوم بود. اختلاف بین نمودارهای شکل ۴-۲۴ با خط افقی (دمای خروجی سیال پایه) این مطلب را اثبات می کند که وجود نانو ذرات باعث شده است که نانو سیال خنک کننده گرمای بیشتری از موتور را جذب کند و موتور سریع تر خنک شود.



شکل (۴-۲۴) تغییرات دمای سیال خروجی از موتور نسبت به درصد

حجمی نانو ذره در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (۷۷).

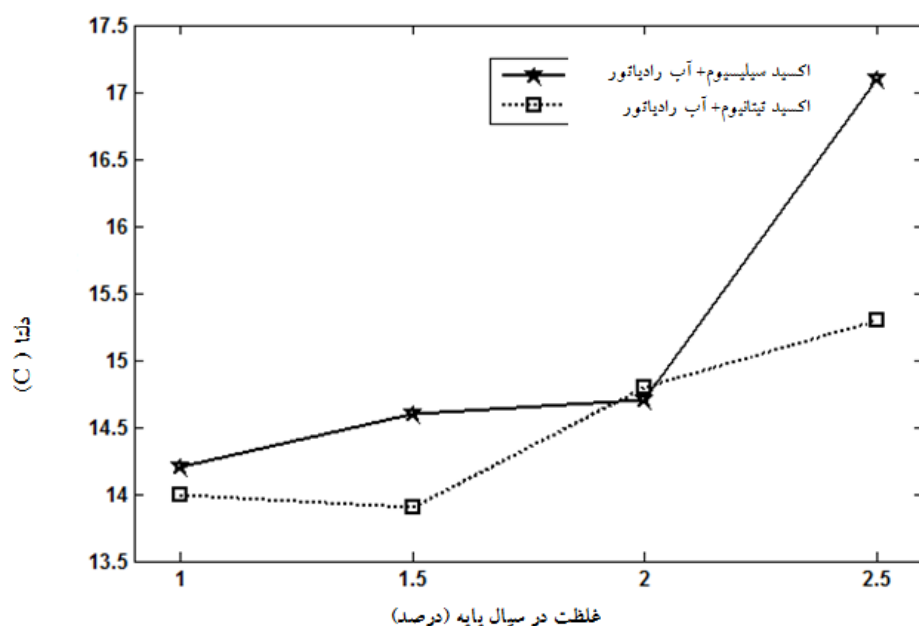
سیال بعد از خنک شدن در رادیاتور خودرو با دمای مشخصی از رادیاتور خارج می شود که در شکل ۴-۲۵ دمای خروجی سیال از رادیاتور برای سیال پایه و نانو سیالات TiO_2 و SiO_2 نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است وجود نانو ذره در سیال پایه باعث می شود که سیال خنک کاری در رادیاتور خودرو گرمای بیشتری از دست دهد و موتور سریع تر خنک شود. اما با تغییر درصد نانو ذره در سیال پایه رفتاری قابل پیش بینی از دمای خروجی رادیاتور سر نمیزند که دلیل آن را می توان ناشی از تغییرات در دمای محیط در حین اندازه گیری دمای خروجی از رادیاتور ذکر کرد. چون آزمایش ها در شرایط غیر آزمایشگاهی انجام شدند و دمای محیط و وزش باد همواره یکسان نبود و هم چنین عواملی مانند دمای محیط و وزش باد بر دمای خروجی رادیاتور تاثیر گذار بودند لذا این موضوع باعث خطا در انجام آزمایش ها شد.



شکل (۴-۲۵) تغییرات دمای سیال خروجی از رادیاتور نسبت به درصد

حجمی نانو ذره در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (۷۷).

بهترین وضعیت سیستم خنک کاری شرایطی است که اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور ماکزیمم باشد. نتایج ارائه شده در این تحقیق نشان داد که در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور ۹/۹ درجه سانتیگراد است. در شکل ۴-۲۶ اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و رادیاتور برای نانو ذرات مختلف در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت نشان داده شده است. در حالت استفاده از نانو سیال ۲٪ اکسید سیلیسیوم اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور نسبت به سیال پایه ۷ درجه بهبود یافته است که این موضوع سبب خنک کاری سریع تر موتور می شود.



شکل (۴-۲۶) اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور (۷۷).

شکل ۴-۲۶ نشان داد که بیشترین اختلاف دما بین دمای خروجی موتور و خروجی رادیاتور ۱۵/۳ درجه سانتیگراد در حالت استفاده از نانوسیال با ۲/۵ درصد اکسید سیلیسیم بود.

۴-۹-۲- سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت

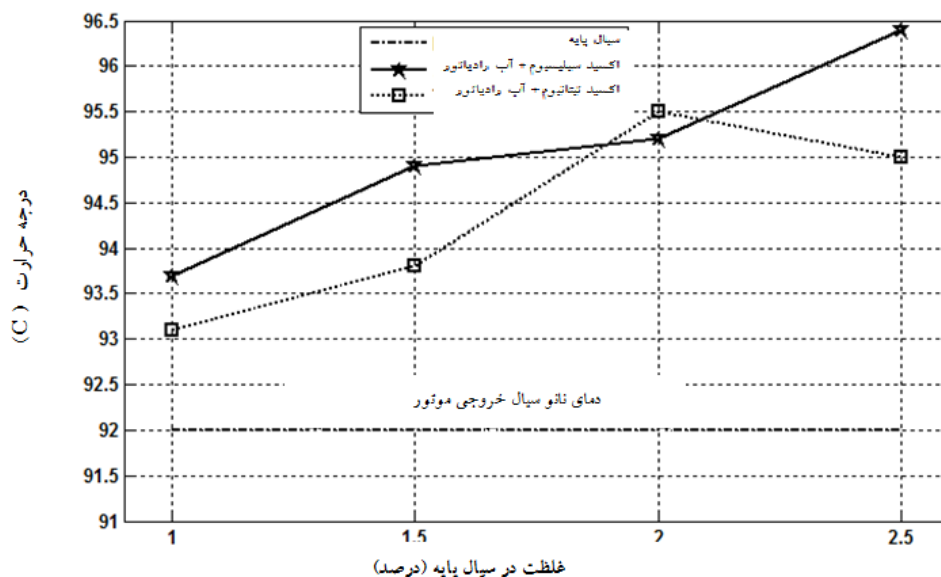
در جدول ۴-۶ اثر نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت آورده شده است. بررسی جدول ۴-۶ نشان داد که اضافه نمودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش دمای سیال خروجی موتور و کاهش دمای خروجی رادیاتور شد که این موضوع سبب بهبود عملکرد سیال خنک کاری می شود.

جدول (۴-۶) نانو ذره و غلظت آن بر دمای سیال خروجی از موتور و

خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت

محل اندازه گیری دما	نوع سیال سیال پایه	درصد SiO_2 در سیال پایه				درصد TiO_2 در سیال پایه			
		۱	۱/۵	۲	۲/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵
خروجی موتور	۹۲	۹۳/۷	۹۴/۹	۹۵/۲	۹۶/۴	۹۳/۱	۹۳/۸	۹۵/۵	۹۵
خروجی رادیاتور	۷۷/۶	۷۵/۹	۷۵	۷۵/۳	۷۶/۱	۷۶/۱	۷۵/۸	۷۶/۴	۷۶/۸

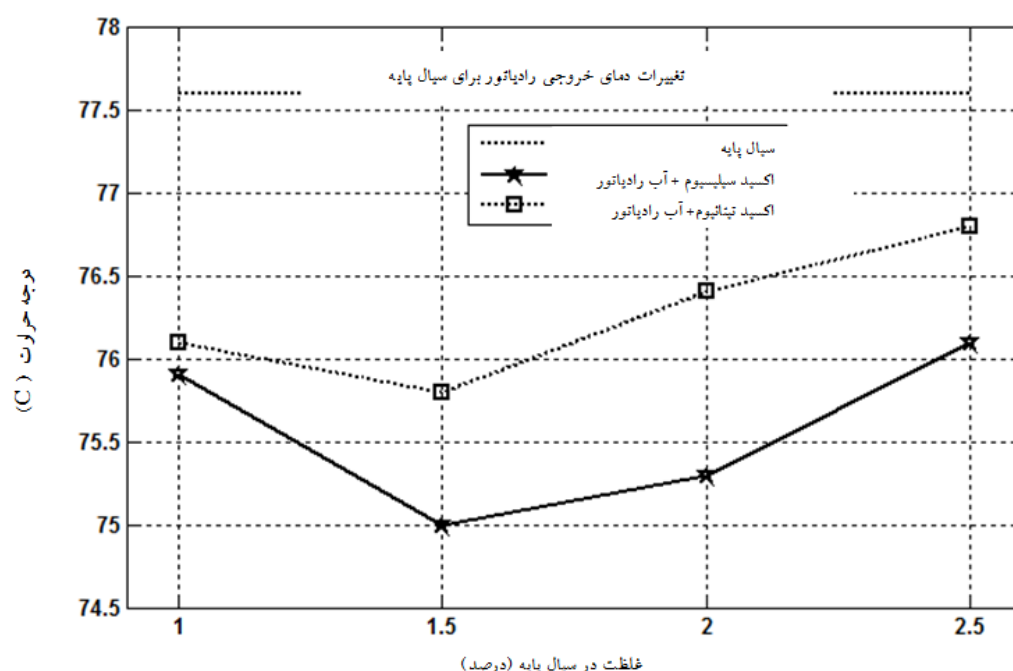
در شکل ۴-۲۷ اثرات ذرات اکسید سیلیسیوم و اکسید تیتانیوم بر دمای نانو سیال خروجی موتور با هم مقایسه شده‌اند. با افزایش درصد نانو ذره در سیال پایه ضریب انتقال حرارت نانو سیال افزایش پیدا کرد که این امر باعث شد تا نانو سیال گرمای بیشتری نسبت به سیال پایه از موتور جذب کند و دمای آن در خروجی موتور افزایش پیدا کند.



شکل (۴-۲۷) تغییرات دمای سیال خروجی از موتور نسبت به درصد

حجمی نانو ذره در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت (۷۷).

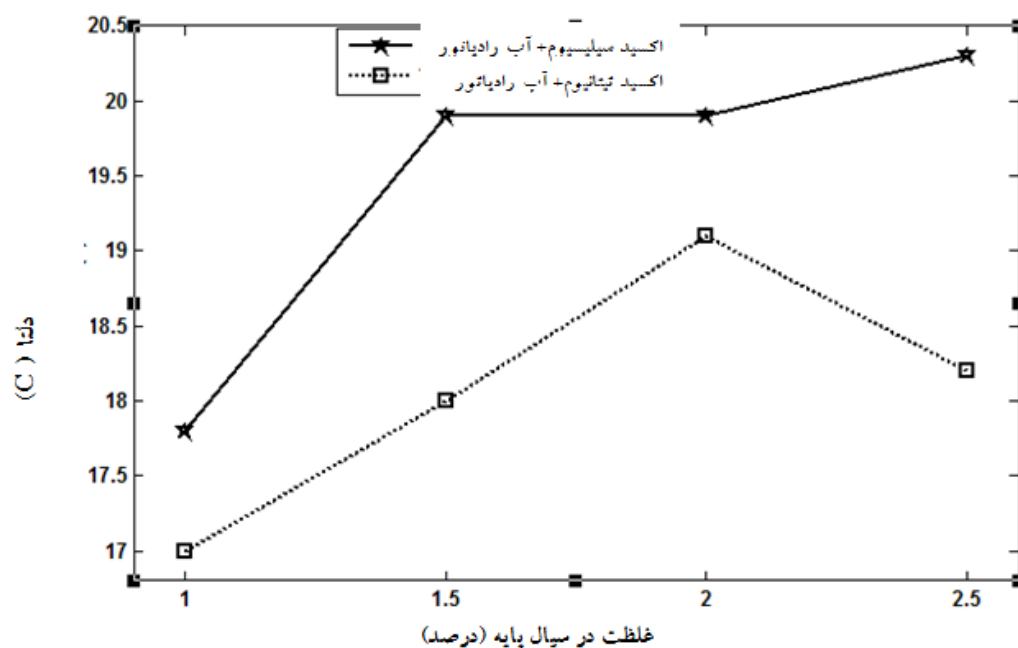
در شکل ۴-۲۸ تغییرات دمای خروجی رادیاتور برای سیال پایه و نانو سیالات اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیوم در سرعت ۱۰۸ کیلومتر در ساعت نشان داده شده است. دمای خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر در ساعت نیز دارای رفتاری قابل پیش بینی نیست که دلیل آن تغییرات دمای محیط و سرعت وزش باد است. اما نکته ای که در شکل ۴-۲۸ وجود دارد این است که ابتدا دمای خروجی رادیاتور کاهش و مجدداً افزایش پیدا می کند از غلظت حجمی ۱/۵ درصد نانو ذره به بعد تقریباً رفتار دمای خروجی خطی می شود که دلیل آن بالا رفتن سرعت حرکت خودرو است. چون در سرعت بالا حجم زیادی از هوا روی پره های رادیاتور در تماس است لذا دمای محیط و سرعت وزش باد تاثیر کمتری بر روی دمای خروجی رادیاتور دارند.



شکل (۴-۲۸) تغییرات دمای سیال خروجی از رادیاتور نسبت به درصد

حجمی نانو ذره در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت (۷۷).

اختلاف دمای سیال پایه (آب رادیاتور) خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت ۱۷/۸ درجه سانتیگراد است. دمای خروجی موتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت در مقایسه با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت بیشتر است. در سرعت های بالاتر حجم زیادی از سوخت در محفظه احتراق می سوزد و دمای موتور هم بالاتر است که باعث می شود دمای خروجی آب موتور بیشتر باشد. به طور کلی اضافه نمودن نانو ذره سبب تغییر در رفتار نانوسیال خنک کاری شده است اما در درصد های حجمی ۱ و ۱/۵ درصد تاثیر زیادی بر اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور ندارد اما نانو سیال دارای ۲٪ اکسید سیلیسیم دارای بهترین عملکرد برای خنک کاری موتور در سرعت بالا است به طوری که نسبت به سیال پایه سبب افزایش اختلاف دما در حد ۴ درجه سانتیگراد شد.



شکل (۴-۲۹) اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸

کیلومتر بر ساعت (۷۷).

مقایسه اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت های ۲۰ و ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت نشان داد که اثر نانو ذره در بهبود و افزایش خنک کاری موتور در سرعت های پایین بهتر است. در سرعت بالا چون حجم و سرعت جریان هوایی که از روی رادیاتور عبور میکند بیشتر است لذا بخش زیادی از گرمای سیال خنک کاری (نانو سیال یا سیال پایه) توسط جریان هوا دفع می گردد که این باعث می شود اثر نانوسیال کمتر دیده شود اما در سرعت پایین که جریان هوای عبوری از روی رادیاتور کمتر است نقش نانو سیال در خنک کاری موتور نسبت به سیال پایه بیشتر است.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

در تحقیق حاضر اثرات افزودن نانو ذرات به سیال پایه بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی عوامل مؤثر از قبیل اندازه نانو ذرات، دمای نانو سیال، لزجت نانو سیال، خواص فیزیکی و ... بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بررسی شده و همچنین روابط و مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت نانو سیال بیان شدند. در این بخش به‌طور کلی نتایج این تحقیق و پیشنهادات لازم در ادامه آورده شده است.

۵-۱- نتایج

نتایج کلی حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

۱. ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات افزایش می‌یابد.
۲. برای افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز بالا به غلظت‌های کمتر نانو ذرات و در اعداد رینولدز پایین به غلظت‌های بالاتر نانو ذرات نیاز داریم.
۳. در یک عدد رینولدز ثابت افزایش قطر متوسط ذرات تا محدوده ۲۰ نانومتر افزایش شدید عدد پکلت را به دنبال دارد. این نشان‌دهنده این است که پارامترهای ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال تحت تأثیر شدید قرار می‌گیرد.
۴. تراکم وزنی نانو سیال دارای یک مقدار بهینه است که در آن انتقال حرارت جابجایی به حداکثر می‌رسد. تراکم بهینه در برخی از مطالعات دیگر نیز گزارش شده است به‌عنوان مثال در مرجع (۱۶) خواص انتقال حرارتی آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم را در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله تحت شرایط رژیم جریان

- متلاطم اندازه‌گیری کردند که نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تراکم بهینه ۰/۵٪ برای اکسید آلومینیوم و ۰/۳٪ برای اکسید تیتانیوم می‌باشد.
۵. پایدار کننده‌های نانو ذرات در سیال پایه مواد شیمیایی فعال سطحی مختلف می‌باشند که می‌توان به تیول‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد.
۶. استفاده از روش نوسانات مافوق صوت یکی دیگر از روش‌های پایدار کردن نانو ذرات در سیال پایه است. لازم به ذکر است اگر مدت نوسانات ماورای صوت خیلی طولانی شود ذرات مجدداً به هم می‌چسبند. نتایج نشان داد که زمان بهینه ۹ ساعت و اندازه متوسط ذرات حدود ۶۰ نانومتر می‌باشد.
۷. با افزودن نانو ذرات به سیال پایه ضریب هدایت گرمایی افزایش یافته و میزان این افزایش به مقدار ذرات، اندازه ذرات، نوع ذرات و نیز نوع سیال پایه همبستگی دارد.
۸. ضرایب هدایت حرارتی نانو سیال با افزایش pH سیال کاهش پیدا می‌کند.
۹. نتایج تجربی نشان می‌دهند که بهترین شرایط برای انتقال حرارت توسط نانو سیال در مقادیر pH پایین می‌باشد.
۱۰. با افزایش دما ضریب انتقال حرارت نانو سیال افزایش پیدا می‌کند. مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی با دما برای ذرات کوچک‌تر در دماهای بالاتر به مراتب بیشتر از افزایش ضریب هدایت حرارتی برای ذرات درشت‌تر است.
۱۱. با درشت‌تر شدن اندازه ذرات نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.
۱۲. ویسکوزیته نانو سیال به مقدار زیادی به درصد حجمی نانو ذرات وابسته است اما مستقل از سرعت برشی و قطر نانو ذرات می‌باشد. این واقعیت که ویسکوزیته مستقل از سرعت برشی و قطر ذرات نانو ذرات است نشان می‌دهد که نانو سیال‌ها رفتار نیوتنی دارند.
۱۳. تغییرات ویژگی‌هایی از قبیل ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و چگالی نانوسیال مطابق با روابط ۳-۴۹، ۳-۵۱ و ۳-۵۲ با غلظت جرمی نانو ذره مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که این روابط همبستگی خوبی با نتایج تحقیقات سایر محققین دارد.

۱۴. نتایج نشان داد که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه و هم چنین با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه میزان چگالی نانو سیال بیشتر شد. چگالی نانو سیال آب رادیاتور-اکسید تیتانیوم با غلظت حجمی ۲/۵ درصد دارای بیشترین مقدار است.
۱۵. افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی شد به طور که نانو ذره اکسید تیتانیوم ۲/۵ درصد دارای بیشترین ضریب هدایت حرارتی بود. اثر تغییرات غلظت نانو ذره اکسید تیتانیوم بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بیشتر از نانو ذره اکسید سیلیسیوم بود.
۱۶. به طور کلی افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب کاهش نقطه انجماد نانو سیال شد. افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب بهبود خاصیت مایع خنک کاری موتور خودرو شد. نتایج نشان داد که اثر نانو ذره اکسید سیلیسیوم بر کاهش نقطه انجماد نانو سیال بیشتر از نانو ذره اکسید تیتانیوم بود.
۱۷. بیشترین کاهش دمایی در نقطه انجماد نانو سیال در غلظت ۲٪ اتفاق افتاد.
۱۸. نتایج نشان داد که نانو ذره اکسید تیتانیوم ۲/۵ درصد دارای بیشترین ضریب هدایت حرارتی بود.
۱۹. افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب کاهش نقطه انجماد نانو سیال شد. اثر نانو ذره اکسید سیلیسیوم بر کاهش نقطه انجماد نانو سیال بیشتر از نانو ذره اکسید تیتانیوم بود.
۲۰. بیشترین کاهش دمایی در نقطه انجماد نانو سیال در غلظت ۲٪ اتفاق افتاد.
۲۱. افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش نقطه جوش نانو سیال نسبت به سیال پایه شد به طوری که بیشترین افزایش دمایی در نانو ذره اکسید سیلیسیوم ۲/۵٪ مشاهده شد. در سیستم خنک کاری خودرو استفاده از سیال با نقطه جوش بالا مناسب است لذا افزودن نانو ذره به سیال پایه سبب بهبود کارکرد مایع خنک کننده موتور می گردد.
۲۲. تغییرات در افزایش نقطه جوش در نانو سیال با نانو ذره SiO_2 نسبت به نانو سیال با TiO_2 بیشتر بود.
۲۳. با افزودن نانو ذرات به سیال پایه میزان گرمای جذب شده از موتور توسط نانو سیال نسبت به سیال پایه افزایش پیدا کرد.

۲۴. در حالت استفاده از سیال پایه برای خنک کاری موتور دمای سیال خروجی از موتور حدود ۸۹ درجه است اما با تغییر سیال پایه به نانو سیال دمای سیال خروجی موتور افزایش یافت.

۲۵. با افزودن نانو ذره به سیال پایه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش پیدا کرد که این امر باعث شد نانو سیال گرمای بیشتری از موتور را جذب کند که نتیجه آن بالا رفتن دمای نانو سیال خروجی از موتور نسبت به سیال پایه است.

۲۶. با افزایش غلظت نانو ذره در سیال پایه، دمای سیال خروجی از موتور افزایش پیدا کرد که بیشترین دمای خروجی در حالت استفاده از نانو سیال ۲/۵ درصد اکسید سیلیسیوم بود.

۲۷. وجود نانو ذرات باعث شد که نانو سیال خنک کننده گرمای بیشتری از موتور را جذب کند و موتور سریع تر خنک شود.

۲۸. وجود نانو ذره در سیال پایه باعث شد که سیال خنک کاری، گرمای بیشتری در رادیاتور از دست دهد و موتور سریع تر خنک شود. اما با تغییر درصد نانو ذره در سیال پایه رفتاری قابل پیش بینی از دمای خروجی رادیاتور سر نزد که دلیل آن را می توان ناشی از تغییرات در دمای محیط در حین اندازه گیری دمای خروجی از رادیاتور ذکر کرد.

۲۹. در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت اختلاف دمای بین سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور ۹/۹ درجه سانتیگراد بود.

۳۰. در حالت استفاده از نانو سیال ۲٪ اکسید سیلیسیوم اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور نسبت به سیال پایه ۷ درجه بهبود یافت که این موضوع سبب خنک کاری سریع تر موتور شد.

۳۱. بیشترین اختلاف دما بین دمای خروجی موتور و خروجی رادیاتور ۱۵/۳ درجه سانتیگراد در حالت استفاده از نانو سیال با ۲/۵ درصد اکسید سیلیسیوم بود.

۳۲. اضافه نمودن نانو ذره به سیال پایه سبب افزایش دمای سیال خروجی موتور و کاهش دمای خروجی رادیاتور شد که این موضوع سبب بهبود عملکرد سیال خنک کاری شد.

۳۳. در سرعت بالای خودرو حجم زیادی از هوا روی پره های رادیاتور در تماس است لذا دمای محیط و سرعت وزش باد تاثیر کمتری بر روی دمای خروجی رادیاتور دارند.

۳۴. اختلاف دمای سیال پایه (آب رادیاتور) خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت ۱۷/۸ درجه سانتیگراد است.

۳۵. دمای خروجی موتور در سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت در مقایسه با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت بیشتر است. در سرعت های بالاتر حجم زیادی از سوخت در محفظه احتراق می سوزد و دمای موتور هم بالاتر است که باعث می شود دمای خروجی آب موتور بیشتر باشد.

۳۶. اضافه نمودن نانو ذره سبب تغییر در رفتار نانوسیال خنک کاری شد اما در درصد های حجمی ۱ و ۱/۵ درصد تاثیر زیادی بر اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور ندارد اما نانو سیال دارای ۲٪ اکسید سیلیسیوم دارای بهترین عملکرد برای خنک کاری موتور در سرعت بالا است به طوری که نسبت به سیال پایه سبب افزایش اختلاف دما در حد ۴ درجه سانتیگراد شد.

۳۷. مقایسه اختلاف دمای سیال خروجی موتور و خروجی رادیاتور در سرعت های ۲۰ و ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت نشان داد که اثر نانو ذره در بهبود و افزایش خنک کاری موتور در سرعت های پایین بهتر است.

۵-۲-پیشنهاها

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهادات زیر برای بهبود نتایج تحقیقات بعدی پیشنهاد می شود:

۱. مدلسازی انتقال حرارت در نانو سیالات در مبدل ها توسط نرم افزارها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی
۲. بررسی آزمایشگاهی اثرات اندازه نانو ذرات مختلف بر ضریب انتقال حرارت در مبدل های مختلف
۳. روابط موجود جهت پیش بینی خواص ترموفیزیکی نانو سیالات همیشه نتیجه دقیقی به همراه ندارد از این رو بهتر است به منظور افزایش دقت خواص

ترموفیزیکی نانو سیال مورد استفاده در تحقیقات به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری شوند.

۴. در تحقیقات آزمایشگاهی قابلیت اعتماد و دقت ضریب انتقال حرارت به شدت تحت تاثیر کالیبره بودن سیستم و تجهیزات آزمایشگاهی می باشد و باید توجه خاصی به این مسئله داشت که دستگاه های انجام آزمایش باید کالیبره باشند.

منابع و مراجع

مراجع

- (1). Shah, R. K., and Sekulic, D. P. Heat Exchanger, Chapter 17, University of Kentucky, 2016. Available at: razifar.com/cariboost_files/Heat_20Exchangers.pdf
- (2). Shah, R. K. Classification of heat exchangers, in Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design, S. Kakac, A. E. Bergles, and F. Mayinger, eds., Hemisphere Publishing, Washington, DC, p. 9–46, 1981.
- (3). Holman, J. Heat Transfer, Tenth Edition, Publication of McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, p. 758, 2015.
- (۴). مصطفوی، ص.، لایق، م.، و عباسپور ثانی، ک. بررسی تاثیر نانوذرات نقره بر افزایش انتقال حرارت در لوله های مارپیچ، چهارمین همایش بین المللی مبدل های گرمایی، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۹۱.
- (5). Murshed, S. M. S., Leong, K. C., and Yang, C. Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂- Water-Based nanofluids, International Journal of Thermal Sciences: 44(4), p. 367-373, 2005.
- (6). Sreelakshmy, K. R., Aswathy, S. N., Vidhya, K. M., Saranya, T. R., and Sreeja, C. N. An overview of recent nanofluid research, International Research Journal of Pharmacy: 5(4), p. 239-243, 2014.
- (۷). حبیب زارع، ا.، و میرزایی، م. بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک مبدل حرارتی صفحه ای با استفاده از نانو سیال DZ، کنفرانس ملی بهینه سازی مصرف انرژی در علوم و مهندسی، بابل، دانشکده فنی و حرفه ای الزهرا بابل، ۱۳۹۳.
- (8). Choi, S. U. S. Nanofluid technology: current status and future research, onference: Korea-U.S. Technical Conference on Strategic Technologies, Vienna, VA (US), 10/22/1998--10/24/1998, p. 22-24, 1998.
- (9). Choi, S. U. S. Two are better than one in nanofluids, Argonne National' Laboratory, 2002.
- (10). Trisaksri, V., and Wongwises, S. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews: 11(3), p. 512–523, 2007.
- (11). Mamut, E. Characterization of Heat And Mass Transfer Properties Of Nanofluids, Rom. Journ. Phys: 51(1–2), p. 5–12, 2004.
- (12). Ding, Y., and Wen, D. Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions, Powder Technology: 149(2-3), p. 84-92, 2005.
- (13). Pak, B. C., and Cho, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles experimental heat transfer: 11(2), p. 151-170, 1998.

- (14). Heris, S. Z., Etemad, S. O., and Esfahany, M. N. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*: 33(4), p. 529–535, 2006.
- (15). He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y. Cang, D., and Lu, H. Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) Flowing Upward Through a Vertical Pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 50(11-12), p. 2272-2281, 2007.
- (16). Farajollahi, B., Etemad, S. G., and Hojjat, M. Heat transfer of nano fluids in a shell and tube heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 53(1-3), p. 12-17, 2010.
- (17). Vasu, V., Krishna, K. R., and Kumar, A. C. S. Empirical correlations to predict thermophysical and heat transfer characteristics of nanofluids, *Thermal science*: 12(2), p. 27-37, 2008.
- (18). Pathipakka, G., and Sivashanmugam, P. Heat transfer behavior of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow, *Superlattices and Microstructures*: 47(2), p. 349-360, 2010.
- (19). Pantzali, M. N., Mouza, A. A., and Paras, S. V. Investigating the efficacy of nanofluids as coolant in plate heat exchangers (PHE), *Chemical Engineering Science*: 64(14), p. 3290-3300, 2009.
- (20). Duangthongsuk, W., and Somchai, W. Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂–water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52(7-8), p. 2059–2067, 2009.
- (21). Albadr, J., Tayal, S., and Alasadi, M. Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations, *Case Studies in Thermal Engineering*: 1(1), p. 38–44, 2013.
- (22). Khoshvaght-Aliabadi, M., Nouri, M. Sartipzadeh, O., and Salami, M. Performance of agitated serpentine heat exchanger using metallic nanofluids. *Chemical Engineering Research and Design*: 109, p. 53-64, 2016.
- (23). Huang, D., Wu, Z., and Sunden, B. Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers, *Experimental Thermal and Fluid Science*: 72, p. 190-196, 2016.
- (۲۴). کمانی، ک و، و رفعی، ر. ا. بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی جریان مخالف، *مجله مدل سازی در مهندسی*: (۴۱) ۱۳، ص. ۵۷-۴۷، ۱۳۹۴.
- (25). Taghizadeh-Tabari, Z., Zeinali Heris, S., Moradi, M., and Kahani, M. The study on application of TiO₂/water nanofluid in plate heat exchanger of milk pasteurization industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 58, p. 1318–1326. 2016.

(۲۶). بت شکن آرتی جانی، ه، بهمنی، م. ح.، و شی خزاده، ق. ع. مطالعه اثر بکارگیری نانوسیال بر کارائی مبدل های حرارتی و شبیه سازی عددی جریان نانو سیال آب- Al_2O_3 در یک لوله از مبدل حرارتی نمونه، نخستین همایش بین المللی مبدل های گرمایی در صنایع نفت و انرژی، شرکت هم اندیشان انرژی کیمیا و نشریه تخصصی مبدل گرمایی، تهران، ۱۹ و ۲۰ آبان ماه، ۱۳۸۸.

(27). Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Jamnani M. S., and. Hoseini, S. M. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nano-fluid, *Applied Thermal Engineering*: 31(8), p. 1833-1838, 2011.

(28). Hajipour, M., and Molaei Dehkordi, A. Mixed-convection flow of Al_2O_3 - H_2O nanofluid in a channel partially filled with porous metal foam: Experimental and numerical study, *Experimental Thermal and Fluid Science*, *Experimental Thermal and Fluid Science*: 53, p. 49-56, 2014.

(۲۹). نظری، م.، آشوری، م.، و م. کیهانی، ح. بررسی آزمایشگاهی جابجائی اجباری نانوسیال درون یک لوله افقی حاوی ماده متخلخل، مجله مهندسی مکانیک مدرس: (۷) ۱۴؛ ص. ۱۱۹-۱۱۶، ۱۳۹۳.

(30). Chavda, N. K. effect of nanofluid on heat transfer characteristics of double pipe heat exchanger: part-ii: effect of copper oxide nanofluid, *International Journal of Research in Engineering and Technology*: 3(12), p. 686-696, 2014.

(31). Sun, B., Peng, C., Zuo, R., Yang, D., and Li, H. Investigation on the flow and convective heat transfer characteristics of nanofluids in the plate heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*: 76, p. 75-86, 2016.

(32). Xuan, Y., and Li, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*: 21(1), p. 58-64, 2000.

(33). Maïga, S. B., Nguyen, C. T., Galanis, N., and Roy, G. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices and Microstructures*: 35(3-6), p. 543-557, 2004.

(34). Mirmasoumi, S., and Behadmehr, A. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model, *Applied Thermal Engineering*: 28(7), p. 717-727, 2008.

(۳۵). سیفی جمنانی، م.، پیغمبرزاده، س. م.، هاشم آبادی، س. ح.، و حسینی، س. م. افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در مبدل های حرارتی با استفاده از نانو سیالات، دومین همایش بین المللی مبدل های گرمایی در صنایع نفت و انرژی، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۸۹.

(36). Tahir, S., and Mital, M. Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel, *Applied Thermal Engineering*: 39, p. 8-14, 2012.

(37). Moghaddami, M., Mohammadzade, A., Alem Varzan Esfehiani, S. Second law analysis of nanofluid flow, *International Journal of Energy Conversion and Management*: 52, p. 1397-1405, 2011.

- (38). Izadi, M., Behzadmehr, A., Jalali-Vahida, D. Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *International Journal of Thermal Sciences*: 48, p. 2119–2129, 2009.
- (39). Mokhtari Moghari, R., Akbarinia, A., Shariat, M., Talebi, F., Laur, R. Two phase mixed convection Al_2O_3 –water nanofluid flow in an annulus, *International Journal of Multiphase Flow*: 37(6), p. 585–595, 2011.
- (40). Wen, D., Ding, Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 47, p. 5181-5188, 2004.
- (۴۱). احمدی، ع.، و رجب پور، ع. بررسی و تحلیل اثر نانو سیال نقره بر مبدل حرارتی لوله‌ای پره‌دار به منظور بهبود راندمان حرارتی، هفتمین همایش علمی تخصصی انرژی های تجدید پذیر، پاک و کارآمد، شرکت هم اندیشان انرژی کیمیا، تهران، ۳۱ اردیبهشت، ۱۳۹۴.
- (42). Mehta, A., Tania, D. K., Jha, N. M., and Patel, N. M. Heat Exchanger Using Nano Fluid, *International Journal of Advanced Engineering Technology*: 3(4), p. 49-54, 2012.
- (43). Zeitoun, O., and Ali, M. Nanofluid impingement jet heat transfer, *Nanoscale Research Letters*: 7(139), p. 1-13, 2012.
- (44). Chun, B.H., Kang, H.U., and Kim, S.H. Effect of alumina no particles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system, *Korean Journal of Chemical Engineering*: 25(5), p. 966-971, 2008.
- (45). Hwang, K. S., Jang, S. P., Choi, S. U. S. Flow and convective heat transfer characteristics of Water- based Al_2O_3 nanofluids in fully developed laminar flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 52, p. 193–199, 2009.
- (46). Göktepe, S., Atalık, K., and Ertürk, H. Comparison of single and two-phase models for nanofluid convection at the entrance of a uniformly heated tube, *International Journal of Thermal Sciences*: 80, p. 83-92, 2014.
- (47). Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., and Galanis, N. Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two-phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*: 28, p. 211–219, 2007.
- (48). Einstein, A. A New Determination of the Molecular Dimensions, *Annalen Der Physik*: 19(2), p. 289-306, 1906.
- (49). Brinkman, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions," *The Journal of Chemical Physics*: 20(4), p. 571-571, 1952.
- (50). Batchelor, G.K. The Effect of Brownian motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, *Journal of Fluid Mechanics* :83(01), p. 97- 117, 1997.
- (51). Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Mare, T., Boucher, S., and Angue Mintsa, H. Temperature and particle- size dependent viscosity data for

water- based nanofluid- hysteresis phenomenon, International Journal of Heat and Fluid Flow: 28(6), p. 1492–1506, 2007.

(52). Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., and Choi, S. U. S. Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid AL2O3 Thermal Conductivity Enhancement: Applied Physics Letters: 87(15), 153107-153107-3, 2005.

(53). Jang, S. P., and Choi, S. U. S. Role of brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluid, Applied Physics Letters: 84(21): p. 4316-4318, 2004.

(54). Koo, J., and Kleinstreuer, C. A new thermal conductivity model for nanofluid, Journal of Nanoparticle Research: 6, p. 577–588, 2004.

(55). Xu, J., Yu, B., Zou, M., and Xu, P. A new model for heat conduction of nanofluids based on fractal distributions of nanoparticles, Journal of Physics D Applied Physics: 39(20), p. 4486-4490, 2006.

(56). Hamilton, R. L., and Crosser, O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals: 1(3), p. 187-191, 1962.

(57). Xuan, Y., Li, Q., and Hu, W. Aggregation Structure and Thermal Conductivity Nanofluid, AIChE Journal: 49(4), p. 1038-1043, 2004.

(58). Chen, H., Witharana, S., Jin, Y., Kim, C., and Ding, Y. Predicting Thermal Conductivity of Liquid Suspensions of Nanoparticles Nanofluid Based on Rheology, Particuology: 7(2), p. 151–157, 2009.

(59). Krieger, I. M., and Dougherty, T. J. A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspension of Rigid Spheres, Journal of Rheology: 3(1), p.137-152, 1959.

(60). Chen, H., Witharana, S., Jin, Y., Kim, C., and Ding, Y. Predicting Thermal Conductivity of Liquid Suspensions of Nanoparticles Nanofluid Based on Rheology, Particuology: 7(2), p. 151–157, 2009.

(61). Assael, M. J., Chen, C. F., Metaxa, I., and Wakeham, W. A. Thermal Conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, International Journal of Thermophysics: 25(4), p. 971-984, 2004.

(62). Kwak, K., and Kim, C. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol, Korea-Australia Rheology Journal: 17(2), p. 35-40, 2005.

(63). Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Applied Physics Letters: 78(6), p. 718-720, 2001.

(64). Hwang, Y.J., Ahn, Y. C., Shin, H. S., Lee, G. C., Kim, G. T., Park, H. S., and Lee, K. J. Investigation on Characteristics of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids, Current Applied Physics: 6(6), p. 1068–1071, 2006.

- (65). Xie, H., Wang, T., Xi, Y., Ai, F., Wu, Q. Thermal Conductivity Enhancement of Suspension Containing Nano sized alumina particles, *Applied Physics*: 91(7), p. 4568-4572, 2002.
- (66). Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nano fluids, *ASME Trans. Journal of Heat Transfer*: 125(4), p. 567-574, 2003.
- (67). Patel, H. E., Das, S. K., Sundararajan, T., Nair, A. S., George, B., and Pradeep, T. Thermal Conductivity of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous Enhancement and chemical Effects, *Applied Physics Letters*: 83(14), p. 2931-2933, 2003.
- (68). Anoop, K. B., Sundararajan, T., and Das, S. K. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region, *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 52, p. 2189–2195, 2009.
- (69). Mansour, R. B., Galanis, N., and Nguyen, C. T. Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids, *Applied Thermal Engineering*: 27(1), p. 240-249, 2007.
- (70). Zhou, S. Q., and Ni, R. Measurement of the specific heat capacity of water-based Al_2O_3 nanofluid, *Applied Physics Letters*: 92(9), 2008.
- (71). Prasher, R., Song, D., Wang, J., and Phelan, P. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications, *Applied Physics Letters*: 89(13), 2006.
- (72). Balla, H. H., Abdullah, S., Al-Mulla, E. A. J., Mahmood, W. M. F. W., Zulkifli, R., and Sopian, K. Effect of Reynolds number on heat transfer and flow for multi-oxide nanofluids using numerical simulation, *Research on Chemical Intermediates*: 39(5), p. 2197–2210, 2013.
- (73). Mehtre, D. N., Kore, S. S., Experimental analysis of heat transfer from car radiator using nanofluids, *International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications*, Vol 2, Issue 4, pp. 101-106, 2014.
- (74). Bozorgan, N., Krishnakumar, K., Bozorgan, N., Numerical Study on Application of CuO -Water Nanofluid in Automotive Diesel Engine Radiator, *Modern Mechanical Engineering*, Vol 2, pp. 130-136, 2012.
- (75). Mare, T., Sow, O., Halelfadl, S., Lebourlout, S., Nguyen, C. T., Experimental Study of the Freezing Point of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ /Water Nanofluid, *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering*, Vol 2012, Article ID 162961, p. 7, 2012.
- (76). Suganya, P., Subburaj, S., Ragupathy, S., Ajith, T., Vinothkambly, K., advance cooling of radiators by using copper-oxide nanofluids, *International conference on explorations and innovations in engineering and technology*, 2016.
- (77). Thorat, S., Gajare, T., Rathod, Y., Hatwalane, S., Comparing Cooling Performance of Radiator With Cu_2O Based Nanofluid, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Special Issue 7, pp. 352-354, March 2017.

Abstract:**Analysis of Nano fluid Usage in Heat Exchanger**

Introduction: Heat exchangers are important components in power plants, chemical process industries, heating, air conditioning, refrigeration and cooling systems for electronic systems. Increasing efficiency and improving energy consumption in industries have always been a concern for researchers. Improvement of heat transfer in heating and cooling systems is no exception; therefore, extensive research has been done to use alternative fluids instead of conventional fluids that can display better thermal properties. The nanosilver is a combination of nanoscale particles (100 nm) to a base fluid to improve heat transfer. One of the applications of nanofluids is to use in thermal transfer systems such as heat exchangers and car radiators. These nanofluids should have high heat transfer capability and, in some cases, electrical insulation. Nano-liquids have a higher thermal conductivity and displacement ratio than ordinary fluids, which makes their use in heat exchangers save energy, reducing the dimensions of the converter and increasing their efficiency.

Materials and Methods: In this study, the effects of adding nanoparticles to base fluid on the thermal conductivity of nanosilver in heat exchangers were investigated. All the effective factors such as nanoparticle size, nano-fluid temperature, nano-fluid viscosity, physical properties, etc., were investigated on the thermal conductivity of the nanosilver, as well as the relationships and models presented to predict the nanosilver heat transfer coefficient.

Results: As the temperature increases, the nanosilver heat transfer coefficient increases. The thermal conductivity coefficients of the nano fluid are reduced by increasing the pH of the fluid. Experimental results show that the best conditions for heat transfer by the nanosilver are low in pH values. Comparison of the difference between the motor output temperature and the radiator output at speeds of 20 and 108 km / h showed that the effect of nanoparticles is better in improving the engine cooling at lower speeds.

Discussion: Our findings refer to the effect of the flow rate of the nanofluid flow into the converter, the concentration of the nanoparticle in the base fluid, the size of the nanoparticle and the temperature of the nano-fluid on the transfer coefficient of heat transfer and the drop in the pressure of the nano fluid in the heat exchangers and corresponds to the studies of some other researchers.

Keywords: Nano fluid, Nano particle, Heat Transfer, Heat Exchanger.



Energy Institute For Higher Education

Faculty of Engineering

Department Of Energy System Engineering – Energy Systems

Thesis For

Master of Science (M.Sc)

Title:

Using nanofluids in heat exchangers

Supervisor:

Yasi (Ph.D)

Advisor:

Tamim (Ph.D)

By:

Milad Vahedi

September 2017