

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی  
دانشکده فنی و مهندسی  
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
مهندسی سیستم‌های انرژی - سیستم‌های انرژی

**عنوان**

# **بررسی افت فشار و انتقال حرارت درون سیستم‌های لوله‌کشی و گرمایشی با به‌کارگیری نانوسیالات و آشفته‌سازهای جریان**

**استاد راهنما**

**دکتر یوسف یاسی**

**استاد مشاور**

**دکتر حیدر مداح**

**پژوهشگر**

**سارا عباسی زنگنه**

**زمستان ۹۷**



باسمه تعالی  
صور تجلسه دفاع

تاریخ صور تجلسه گروه آموزشی	
شماره دانشجویی	
کد دفاع	
تاریخ صور تجلسه شورای پژوهشی	

با تأییدات خداوند متعال جلسہ دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم		زنگنه
در رشته:	مهندسی سیستم های انرژی گرایش سیستم انرژی	تحت عنوان:
بررسی افت فشار و انتقال حرارت درون سیستم های لوله کشی و گرمایشی با به کارگیری نانو سیالات و آشفته سازه های جریان		
با حضور استاد راهنما، استاد (استادان) مشاور و هیأت داوران در مؤسسه آموزش عالی انرژی ساوه در تاریخ		
تشکیل گردید.		
در این جلسه، پایان نامه: □ با موفقیت مورد دفاع قرار گرفت □ نیازمند اصلاحات است □ مردود اعلام گردید.		
نامبرده نمره	با امتیاز	(بدون احتساب نمره مقاله) دریافت نمود.

نام و نام خانوادگی استاد راهنما	دکتر یوسف یاسی	محل امضاء
نام و نام خانوادگی استاد مشاور	دکتر حیدر مداح	محل امضاء
هیأت داوران:		
۱-	محل امضاء ۱	محل امضاء ۲
۲-		
مدیر گروه یا رئیس تحصیلات تکمیلی واحد:		معاون پژوهشی و فناوری مؤسسه آموزش عالی انرژی ساوه
نام و نام خانوادگی		
محل امضاء		

\*\*\*\*\* (اطلاعات این قسمت حتماً توسط کارشناس پژوهشی تکمیل گردد) \*\*\*\*\*

نمره حاصل از ارزشیابی مقاله / مقالات دانشجو برابر ضوابط (از سقف ۲ نمره)..... محاسبه و نمره نهایی پایان نامه (مجموع نمره دفاع و مقاله) به عدد..... به حروف..... با درجه.....

به تصویب رسید. / موارد اصلاحیه جهت اجرا به اطلاع دانشجو رسید.

تأیید معاون پژوهشی و فناوری مؤسسه آموزش عالی انرژی ساوه

تأیید کارشناس حوزه پژوهشی

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یوری دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

## سپاسگزاری

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

## چکیده

در این مطالعه، جریان سیال نانوسیال  $Al_2O_3$  در یک مبدل حرارتی دوسطحی با نوارپیچی اصلاح شده به صورت آزمایشگاهی تحت شرایط جریان آشفته مورد مطالعه قرار می گیرد. آزمایش ها با نسبت گشتاور هندسی متفاوت (GPR) پیچیده به عنوان نوارهای پیچیده اصلاح شده جدید و غلظت نانوسیال مختلف در شرایط عملکردی مشابه انجام شد. طول ارتفاع از نوارهای پیچیده پیشنهاد شده و در نتیجه نسبت پیچ و تاب آن ها در طی پیچ ها با توجه به نسبت گشتاور هندسی (GPR)، چه کاهش ( $RGPR < 1$ ) و یا افزایش ( $> 1$ ) تغییر می کند. با توجه به اطلاعات آزمایشگاهی، استفاده از پیچش RGPR همراه با نانوسیال ها باعث افزایش میزان انتقال حرارت و عامل اصطکاک از ۱۲٪ تا ۵۲٪ و از ۵٪ تا ۲۸٪ در مقایسه با لوله های معمولی پیچ خورده ( $GPR = 1$ ) و نانوسیال ها است. در مقابل، عملکرد با استفاده از پیچش IGPR از ۰/۶ تا ۰/۹۲ و از ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ ضعیف تر شد. عملکرد حرارتی مبدل حرارتی با نانوسیال و نوارهای پیچیده اصلاح شده برای ارزیابی بهبود کلی رفتار حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت. همبستگی های کلی برای برآورد تعداد  $Nusselt$ ، عامل اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی در شرایط جریان آشفته توسعه یافت. سازگاری کافی بین همبستگی های فعلی و داده های تجربی به دست آمده، اعتبار همبستگی پیشنهادی را تأیید می کند.

**کلمات کلیدی:** افت فشار، انتقال حرارت، نانوسیال.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات پژوهش .....	۱
۱-۱ نانوتکنولوژی .....	۲
۱-۱-۱ کاربردها .....	۳
۲-۱ نانو ذرات .....	۳
۱-۲-۱ کاربردهای نانوذرات .....	۴
۳-۱ روش های تولید و بررسی خواص نانوذرات .....	۴
۱-۳-۱ روش های عمل آوری شیمیایی .....	۴
۱-۳-۱-۱ افزودن سورفکتانت .....	۵
۱-۳-۱-۲ عامل دار کردن سطحی .....	۶
۱-۳-۱-۳ کنترل pH .....	۷
۱-۳-۲ روش های عمل آوری فیزیکی .....	۷
۱-۳-۲-۱ التراسونیک کردن .....	۸
۱-۳-۲-۲ هموژن سازی .....	۹
۱-۳-۲-۳ بال میل کردن .....	۱۰
۱-۴ نوع نانوسیال .....	۱۱
۵-۱ فرضیات .....	۱۵
۱-۶ اهداف .....	۱۵
۷-۱ روش پژوهش و مراحل انجام پایاننامه .....	۱۵
فصل دوم: ادبیات پژوهش .....	۱۷

۱۸.....	۱-۲ مقدمه
۲۲.....	۲-۲ ترکیب نانوسیالات
۲۲.....	۱-۲-۲ روش دو مرحله‌ای
۲۳.....	۲-۲-۲ روش تک مرحله‌ای
۲۳.....	۳-۲ افزایش پایداری نانوسیالات
۲۳.....	۲-۴ پیشینه مطالعاتی تحقیق
۲۸.....	<b>فصل سوم: مواد و روش جمع‌آوری داده‌ها</b>
۲۹.....	۱-۳ مقدمه
۲۹.....	۱-۱-۳ بررسی افت فشار در سیستم‌های لوله‌کشی بر پایه سیال اتیلن گلیکول
۳۰.....	۲-۳ مشخصات ابعادی سیستم لوله‌کشی
۳۵.....	۳-۳ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب
۳۵.....	۳-۳-۱ روش انجام آزمایش
	۴-۳ مقدار افت فشار قرائت شده روی لوله‌های پیزومتر توسط دستگاه تلفات انرژی
۳۶.....	به واسطه سیال مورد آزمایش (اتیلن گلیکول و آب)
۳۸.....	۵-۳ آماده‌سازی نمونه‌ها
۴۰.....	۳-۶ نوارهای پیچ خورده
۴۱.....	۷-۳ روش و ساختار آزمایشگاهی انتقال گرما
۴۳.....	<b>فصل چهارم: یافته‌های پژوهش</b>
۴۴.....	۱-۴ مقدمه
۴۴.....	۴-۱-۱ ارزیابی خواص ترموفیزیکی
۴۸.....	۴-۲ کاهش داده‌ها

۴-۳ تجزیه و تحلیل عدم قطعیت.....	۵۱
۴-۴ نتایج و بحث.....	۵۲
۴-۴-۱ رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها.....	۵۲
۴-۴-۲ ویسکوزیته‌ی نانوسیال.....	۵۲
۴-۴-۳ آزمون تأیید با آب.....	۵۳
۴-۴-۴ آزمون تأیید مربوط به نوار پیچانیده شده.....	۵۴
۴-۴-۵ اثر نوارهای در هم پیچیده‌ی اصلاح شده.....	۵۷
۴-۴-۶ ارتباط‌ها (همبستگی‌ها).....	۶۰
فصل پنجم: نتیجه‌گیری.....	۶۵
۱-۵ نتیجه‌گیری.....	۶۶
۲-۵ پیشنهادات.....	۶۶
منابع.....	۶۷

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳ مقادیر تقریبی ضریب افت $k$ برای قطعات تجاری در لوله‌کشی .....	۳۳
جدول ۲-۳ افت فشار در تنگ‌شدگی .....	۳۴
جدول ۳-۳ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب .....	۳۵
جدول ۴-۳ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب .....	۳۶
جدول ۵-۳ جدول داده‌های به‌دست آمده از آزمایش مخلوط سیال اتیلن گلیکول و نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم .....	۳۷
جدول ۶-۳ جدول داده‌های به‌دست آمده از آزمایش مخلوط سیال اتیلن گلیکول و نانوسیال اکسید آلومینیوم .....	۳۷
جدول ۳-۷ اختلاف فشار به‌وجود آمده .....	۳۷
جدول ۱-۴ عدم قطعیت‌های مربوط به ادوات و خواص .....	۶۳
جدول ۲-۴ عدم قطعیت‌ها برای پارامترها و متغیرها .....	۶۳

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ نمونه‌ای از ساختار سورفکتانت: دودسیل سولفات سدیم (SDS).....	۵
شکل ۲-۱ توصیف شکل میسل سورفکتانت.....	۶
شکل ۳-۱ اصلاح سطح CNT با پیوند کووالانسی.....	۷
شکل ۴-۱ نمودار شماتیک کاوش فراصوتی.....	۸
شکل ۵-۱ توصیف شماتیک همگن‌ساز برشی بالا.....	۱۰
شکل ۶-۱ نمودار شماتیک آسیاب‌های گلوله‌ای سیاره‌ای.....	۱۰
شکل ۷-۱ دستگاه اتلاف انرژی سیستم لوله‌کشی منبع: نگارنده.....	۱۶
شکل ۱-۲ متغیرها در سنتز nanoMWCNT: نانو کربنی چند دیواره.....	۲۱
شکل ۲-۲ تصویرسازی سنتز نانوسیال‌ها.....	۲۲
شکل ۱-۳ دستگاه اتلاف انرژی سیستم لوله‌کشی منبع: نگارنده.....	۲۹
شکل ۲-۳ افت در اثر ضریب اصطکاک ناگهانی.....	۳۲
شکل ۳-۳ افت بار در اثر انقباض ناگهانی.....	۳۴
شکل ۴-۳ (a) تصویر SEM از ذرات <b>Al2O3</b> (b) تصویر TEM از ذرات <b>Al2O3</b> .....	۳۹
شکل ۵-۳ هندسه‌ها (a) نوار پیچ‌خورده نوعی (b) نوارهای پیچ‌خورده (c) IGPR نوارهای پیچ‌خورده RGPR (۸۷).....	۴۰
شکل ۶-۳ نمای شماتیک از ساختار آزمایشگاهی [۸۷].....	۴۱
شکل ۴-۱ (a) مقایسه رسانایی گرمایی بین داده اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده از سایر همبستگی‌ها. (b) رسانایی گرمایی به‌عنوان تابعی از دما و بخشی از حجم.....	۴۵
شکل ۲-۴ (a) مقایسه چسبندگی بین داده اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده از همبستگی‌های دیگر. (b) چسبندگی به‌عنوان نرخ برش و کسر حجمی.....	۴۸
شکل ۳-۴ اعتباربخشی داده آزمایشگاهی لوله ساده برای عدد ناسلت.....	۴۹
شکل ۴-۴ اعتباربخشی لوله ساده با آب برای عامل اصطکاک.....	۴۹

- شکل ۴-۵ اعتباربخشی لوله ساده با نوارهای پیچ خورده و آب: (a) عدد ناسلت و (b) عامل اصطکاک ..... ۵۰
- شکل ۴-۶ تأیید تیوب صفحه‌ای با نوارهای پیچانیده و نانوسیال: (a) عدد ناسلت و (b) فاکتور اصطکاک ..... ۵۳
- شکل ۴-۷ اثر نرخ تصاعد هندسی مربوط به عدد ناسلت (a)  $RGPR$ ، (b)  $IGPR$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۸ تأثیر نسبت تصاعد هندسی بر عدد ناسلت (a)  $RGPR$  (b)  $IGPR$  ..... ۵۶
- شکل ۴-۹ تأثیر نسبت تصاعدی هندسی بر عامل اصطکاک (a)  $RGPR$  (b)  $IGPR$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰ تغییرات شاخص بهبود گرمایی یا عدد رینولدز برای (a)  $RGPR$  (b)  $IGPR$  ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۱ اعتباربخشی همبستگی‌های تجربی برای (a) عدد ناسلت، (b) فاکتور اصطکاک، (c) عملکرد گرمایی ..... ۶۲

## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۱-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های CuO.....	۱۱
نمودار ۲-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	۱۲
نمودار ۳-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های Ti <sub>2</sub> O.....	۱۲
نمودار ۴-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های ZnO.....	۱۲
نمودار ۵-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های مغناطیسی.....	۱۳
نمودار ۶-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های فلزی.....	۱۳
نمودار ۷-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های کریستالی.....	۱۳
نمودار ۸-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های CNT.....	۱۴
نمودار ۹-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های هیبریدی.....	۱۴
نمودار ۱۰-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌ها با مواد مختلف نانو ذره.....	۱۵
نمودار ۱-۲ ارقام و جداول (تمامی داده‌ها از السویر).....	۱۹
نمودار ۲-۲ تعداد نشرهای برحسب قلمروی موضوعی (تمامی داده‌ها از السویر) [۴۵].....	۱۹
نمودار ۳-۲ هدایت حرارتی مواد نانوذرات و مایعات پایه مورد استفاده در نانوسیال‌ها.....	۲۱

## فصل اول

### کلیات پژوهش

## ۱-۱ نانوتکنولوژی

یک نانومتر  $10^{-9}$  متر می باشد. بسته به اندازه ی اتم بین سه تا شش اتم را می توان در یک نانومتر جای داد. با ایجاد ارتباط میان اندازه ی اتم ها و مقیاس نانو می توان یک نانومتر را راحت تر تصور کرد. طبق تعاریف مقیاس طولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر را مقیاس نانو می گویند. نانو فناوری عبارت است از هنر دست کاری مواد در مقیاس اتمی یا مولکولی و به خصوص ساخت قطعات و لوازم میکروسکوپی (مانند روبات های میکروسکوپی). این فناوری بر پایه ی تک تک اتم ها و مولکول ها استوار است، بدین منظور که بتوان ساختاری پیچیده را با خصوصیات اتمی تولید کرد. این دانش توانایی کار در سطح اتمی و ایجاد ساختارهایی که نظم مولکولی جدیدی دارند را دارا می باشد. ماده ی اصلاح شده در مقیاس نانو خصوصیات مفید و جدیدی را دارا می گردد که قبلاً در آن مشاهده نمی گردید. فناوری نانو می تواند شامل توسعه و استفاده از ادوات و قطعاتی که اندازه ی آن ها تنها چند نانومتر است، نیز باشد. به طور کلی فناوری نانو واژه ای است که به تمام فناوری های پیشرفته در عرصه ی کار با مقیاس نانو اطلاق می گردد. پیشرفت های اخیر در نانوتکنولوژی و نانومواد به توسعه دسته جدیدی از سیالات انتقال حرارت شامل ذرات در اندازه نانو که نانوذرات نامیده می شوند، می پردازد که از نانولوله های کربنی، فلزات، یا اکسیدها ساخته شده است. نانوسیالات به وسیله سوسپانسیونی کردن نانوذرات با اندازه های متوسط زیر ۱۰۰ نانومتر در یک سیال پایه مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن طراحی شده است [۱].

تعیین فشار و دبی جریان در یک سیستم اتصال لوله ها (شبکه لوله ها) از مسائل مهم هیدرولیک می باشد. شبکه لوله ها به سیستمی از لوله ها اطلاق می شود که از یک لوله منفرد و یا سیستم پیچیده ای از لوله ها با قطر ها و طول های مختلف تشکیل شده است. به عنوان مثال می توان شبکه آب رسانی در شهرها را از نمونه های خوب شبکه لوله های پیچیده نام برد، عموماً شبکه لوله ها به صورت سری، موازی و حلقوی در سیستم های آب رسانی طراحی می گردند؛ بنابراین سنجش میزان افت انرژی در نقاط مختلف برای انجام محاسبات دقیق آب رسانی لازم است.

## ۱-۱-۱ کاربردها

زمینه‌های بالقوه‌ی نانو تکنولوژی عبارتند از الکترونیک، ارتباطات، برق (قدرت)، کامپیوتر، صنایع شیمیایی و داروسازی، بهداشت و محیط زیست، تکنولوژی اطلاعات، بیوتکنولوژی، امنیت ملی، پزشکی و انرژی. به دست آوردن یا رسیدن به قدرت و توانایی کنترل در سطح مولکولی در سرتاسر ساختار ماده تنوع گسترده‌ای از کاربردهای مثبت را به همراه خواهد آورد. زمینه‌هایی که نانو تکنولوژی قبلاً در آن‌ها به کار رفته است عبارتند از پزشکی و دارویی، تولید و توزیع انرژی، نساجی، مخابرات و ارتباطات، مواد شیمیایی، علوم و مهندسی مواد، محیط زیست، فناوری اطلاعات، صنایع دفاعی، خودرو و هوافضا و زمینه‌هایی که در آینده با استفاده از نانو تکنولوژی پیشرفت خواهند کرد: سیستم‌های میکروالکترومکانیکی<sup>۱</sup>، مواد مقاوم در برابر فرسودگی، بهبود و اصلاح نامرئی مواد آسیب دیده (دارای نقص‌های ساختاری)، نانو ماشین‌ها، نانو الاستیسیته، وسایل نانو الکتریکی و مغناطیسی، دستگاه‌های محاسبه‌ی جدید و ابزارهای اپتوالکترونیک خواهند بود [۲].

## ۱-۲ نانو ذرات

ذرات نانومتری به عنوان مواد نانومتری پیش سازنده برای تولید ساختارها و ادوات پیچیده به کار می‌روند و استفاده از آن‌ها سبب بهبود و تغییر پدیده‌های فیزیکی شیمیایی یا فرآیندهای بیولوژیکی می‌گردد و باعث بروز خواص جدیدی می‌شود. این خواص نیروی محرکه‌ای را به وجود آورده و سبب پیگیری و انگیزه‌ی بیشتر برای ادامه‌ی تحقیقات می‌گردد [۱].

نانومواد را گاهی اوقات وقتی که متراکم و فشرده نشده باشند، نانوپودر<sup>۲</sup> می‌نامند که اندازه‌ی دانه‌های آن‌ها حداقل در یک بعد و یا معمولاً در سه بعد در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. نانوذرات انواع فلزی، اکسیدهای فلزی، عایق‌ها و نیمه‌هادی‌ها، نانوذرات ترکیبی نظیر ساختارهای هسته لایه و حتی نانولوله‌های کربنی را دربر می‌گیرد. نانوذرات به عنوان مواد با سطح مقطع بالا، خواص شیمیایی، مکانیکی، نوری و مغناطیسی بهتری از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را از مواد توده‌ای با ابعاد معمولی و بزرگ متمایز می‌سازد [۳].

<sup>۱</sup> Micro Electro Mechanical System (MEMS)

<sup>۲</sup> Nanopowder

## ۱-۲-۱ کاربردهای نانوذرات

از جمله کاربرد آن‌ها می‌توان به سیستم‌های بیولوژیکی، پزشکی، توزیع دارو در بدن، کاتالیست، سرامیک، الکترونیک و مغناطیس، محیط‌زیست و انرژی اشاره کرد [۳]. مواد عایق‌کننده، ماشین‌ابزارها، فسفرها یا مواد تابنده، باتری‌ها، آهنرباهای پرقدرت، وسایل نقلیه‌ی موتوری و هواپیما، کاشت‌های طبی، کاربردهای پزشکی و نانوسیال که از مخلوط کردن نانوذرات در یک سیال پایه تشکیل می‌شود نیز از سایر کاربردهای نانوذرات می‌باشد [۱].

## ۱-۳-۱ روش‌های تولید و بررسی خواص نانوذرات

### ۱-۳-۱-۱ روش‌های عمل‌آوری شیمیایی

پایداری<sup>۱</sup> نانوسیال‌ها به طبیعت مایع پایه و نانوذرات مورد استفاده، بستگی دارد. برای مثال، نانوذرات اکسیدی دارای طبیعت آب‌دوست هستند در حالی که نانوتیوب‌های کربنی (CNTs) آب‌گریز هستند. علاوه بر این، آب به‌عنوان یک مایع پایه، قطبی است در حالی که روغن یک ماده‌ی غیرقطبی است؛ بنابراین، افزودن سورفکتانت یا اصلاح‌کننده‌ی سطح ذرات می‌تواند موجب بهبود خاصیت پراکندگی نانوذرات در داخل سیال پایه شود. مثلاً این مسئله مشاهده می‌شود که با استفاده از این مواد، می‌توان CNTها را در داخل آب و یا نانوذرات اکسیدی را در داخل روغن پراکنده ساخت.

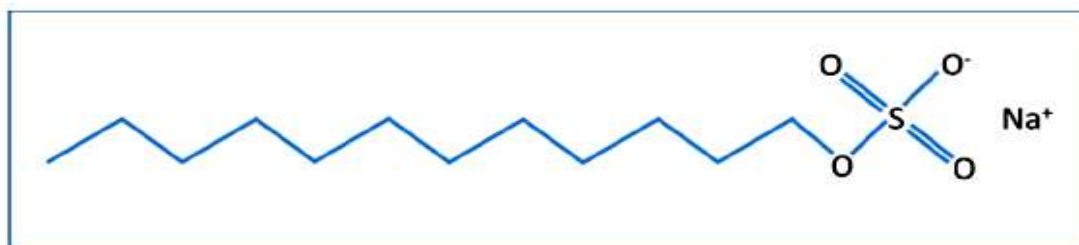
سورفکتانت در واقع عوامل فعال سطحی هستند که به‌عنوان یک پل میان نانوذره و سیال پایه عمل می‌کنند و بدین‌صورت از آگلومره شدن<sup>۲</sup> ذرات جلوگیری می‌کنند. یکی دیگر از روش‌های پایدارسازی شیمیایی دیگر، اصلاح سطحی است که در حقیقت پیش از پراکنده‌سازی نانوذرات در داخل سیال پایه، بر روی سطح نانوذرات انجام می‌شود. افزودن اسیدها یا بازها می‌تواند pH را در خارج از گستره‌ی pH مربوط به نقطه‌ی ایزوالکتریک (IEP) قرار دهد و بدین‌صورت پایداری سوسپانسیون کلوئیدی بهبود می‌یابد. این روش‌ها به‌صورت خلاصه در بخش‌های زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Stability  
<sup>2</sup> aggregation

### ۱-۳-۱-۱ افزودن سورفکتانت

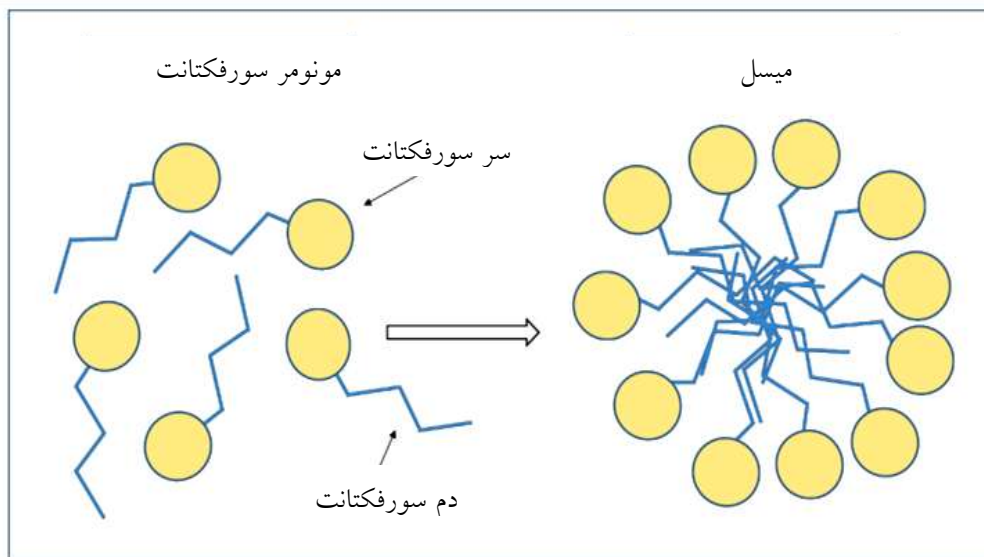
سورفکتانت یکی از محصولات فراگیر مورد استفاده در صنعت شیمیایی، شوینده، داروسازی، گل مورد استفاده در حفاری، فرایند فلوتاسیون و... می باشد. این ماده به صورت گسترده در تولید نانوسیال های با خاصیت پراکنده سازی خوب، استفاده می شود. سورفکتانت ها می توانند به عنوان مواد محلول در روغن و مواد محلول در آب مورد استفاده قرار گیرند؛ بنابراین، نوع سورفکتانت می تواند بر اساس نوع سیال پایه، انتخاب شود. سورفکتانت ها می توانند آنیونی (دارای بار منفی)، کاتیونی (دارای بار مثبت)، غیر آنیونی (خنثی) یا آمفوتر (هم دارای بار منفی و هم مثبت) باشند. در حقیقت این طبقه بندی بر اساس بار ایجاد شده در سرگروه های عاملی این مواد، انجام شده است. در اصل، بار سطحی نانوذرات و نوع سیال پایه ی مورد استفاده، این مسئله را تعیین می کند که چه سورفکتانتی مورد استفاده قرار گیرد. چندین سورفکتانت متداول در تحقیقات نانوسیال عبارتند از: سدیم دو دسیل سولفونات (SDS) [۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹]، سدیم دو دسیل بنزن سولفونات (SDBS) [۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳]، اولئیک اسید [۵، ۱۴]، ستیل تری متیل آمونیوم برومید (CTAB) [۱۵ و ۱۶]. دو دسیل تری متیل آمونیوم برومید (DTAB) [۱۷، ۱۸]، صمغ عربی [۱۹، ۱۸، ۲۰] و پلی وینیل پیرولیدین (PVP) [۱۶، ۲۱]. یک مثال از ساختار شیمیایی سورفکتانت ها در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ نمونه ای از ساختار سورفکتانت: دودسیل سولفات سدیم (SDS)

عبارت غلظت بحرانی میسل<sup>۱</sup> (CMC) در حقیقت غلظتی است که در بالا آن سورفکتانت تشکیل میسل می دهد و تمام سورفکتانت های اضافی به میسل تبدیل می شوند (شکل ۱-۲) [۲۲].

<sup>۱</sup> Critical Micelle Concentration



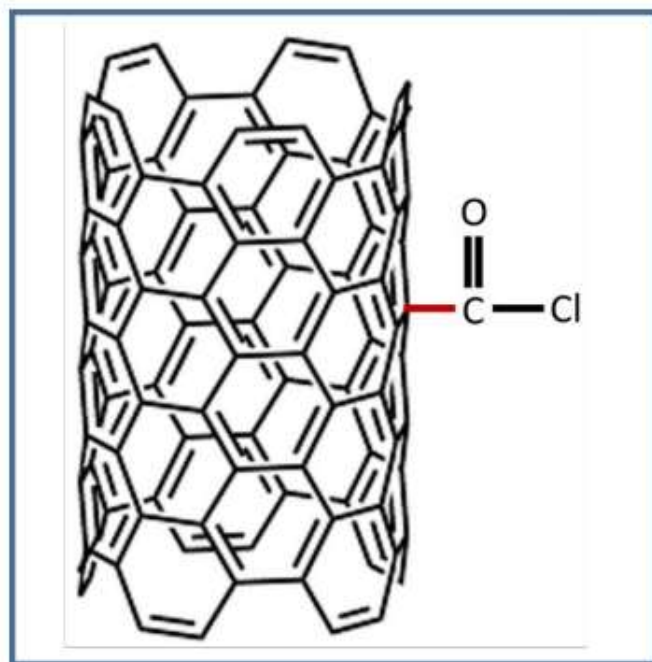
شکل ۱-۲ توصیف شکل میسل سورفکتانت

بنابراین، در طی افزودن سورفکتانت‌ها به سیستم‌های نانوسیال، با کاهش غلظت سورفکتانت به کمتر از غلظت CMC، از تشکیل میسل‌ها جلوگیری می‌شود. این مسئله باید در نظر گرفته شود که استفاده از سورفکتانت ممکن است استفاده از نانوسیال در دماهای بالا را با مشکل روبرو کند [۲۳، ۲۴، ۲۵] وقتی دما بالاتر از ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد، سورفکتانت‌ها به‌صورت کلی تخریب می‌شود [۲۶]. این مسئله به‌طور قابل توجهی، استفاده از این مواد در کاربردهای انتقال حرارت دما بالا و متوسط را محدود می‌کند.

## ۲-۱-۳-۱ عامل دار کردن<sup>۱</sup> سطحی

در این روش، سطوح نانوذرات یا نانوتیوب‌ها قبل از پراکنده شدن در داخل سیال پایه، عامل دار می‌شود. یک مثال نمونه‌وار از اصلاح کننده‌های سطحی عامل دار کردن CNTs با استفاده از عمل‌آوری اسیدی (شکل ۱-۳) می‌باشد. عامل دار کردن در حقیقت ایجاد مکان‌های فعال الکتروشیمیایی بر روی سطوح CNTها است که موجب بهبود پراکنده‌سازی این مواد در آب می‌شود.

<sup>۱</sup> Functionalization



شکل ۱-۳ اصلاح سطح CNT با پیوند کووالانسی

### ۱-۳-۱-۳ کنترل pH

دستکاری پتانسیل زتا یک روش برای افزایش پایداری پراکنده‌سازی کلوئیدی است. نانوذرات در زمانی پایداری بیشتری دارند که pH محلول در خارج از نقطه‌ی ایزوالکتریکی (IEP) قرار دارد. در این گستره، بار سطحی ذرات و مقادیر پتانسیل زتا صفر است [۲۷ و ۲۸]. به هر حال pH مربوط به سوسپانسیون معمولاً باید در حوالی pH خنثی نگهداری شود زیرا محلول‌های قلیایی و اسیدی ممکن است منجر به خوردگی سطوح انتقال حرارت و ته‌نشینی نانوذرات شوند [۲۹].

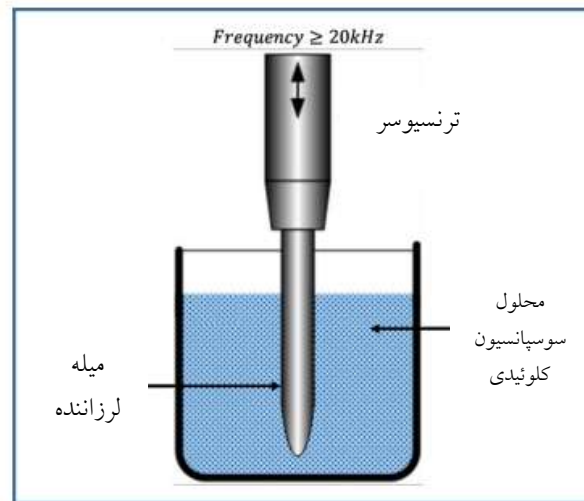
### ۱-۳-۲ روش‌های عمل‌آوری فیزیکی<sup>۱</sup>

در این روش، یک میزان انرژی بالا از طریق التراسونیک به نانوسیال وارد می‌شود. همورژن‌سازی یا بال میل کردن موجب شکسته شدن خوشه‌های نانوذره‌ای و تشکیل یک سوسپانسیون کلوئیدی پایدار می‌شود. معمولاً سورفکتانت‌ها سپس به‌منظور جلوگیری از آگلومره شدن نانوذرات استفاده می‌شوند.

<sup>۱</sup> Physical Treatment

### ۱-۳-۲-۱ التراسونیک کردن

حمام‌ها یا پروب‌های التراسونیک (شکل ۴-۱) معمولاً برای پراکنده‌سازی فیزیکی خوشه‌های نانوذره‌ای<sup>۱</sup> استفاده می‌شوند. پروب‌های التراسونیک متداول‌ترین روش پایداری‌سازی در بین روش‌های عمل‌آوری فیزیکی است.



شکل ۴-۱ نمودار شماتیک کاوش فراصوتی

انرژی صوت در یک سطح التراسونیک ۲۰kHz و بالاتر، برای یک دوره‌ی زمانی از پیش تعیین شده مورد استفاده قرار می‌گیرد و بدین‌صورت خوشه‌های نانوذره‌ای شکسته می‌شود و نانوذرات در داخل سیال پایه پراکنده می‌شوند [۳۰]. محققین از سطوح فرکانس و توان مختلف التراسونیک در بازه‌های زمانی مختلف استفاده می‌کنند. شرایط بهینه‌ی اعمال فرایند التراسونیک ممکن است با پارامترهای مختلف، تغییر کند. این پارامترها، عبارتند از غلظت نانوذره، اندازه‌ی نانوذره، نوع ذره، نوع سیال پایه و... برای مثال، مهبوبل<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۱] اثر زمان التراسونیک بر روی پایداری نانوسیال‌های آلومینا در سیال پایه‌ی آب را مورد بررسی قرار دادند. با افزایش زمان التراسونیک، یک پراکنده‌ی کلوییدی بهتر و یک ویسکوزیته‌ی پایین‌تر حاصل می‌شود. گارگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۳۲] اثر زمان التراسونیک بر روی ویسکوزیته و کارایی انتقال حرارت نانوسیال<sup>۴</sup>‌های حاوی نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها زمان‌های التراسونیک مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ دقیقه) را مورد

<sup>1</sup> nanoparticle clusters

<sup>2</sup> Mahbubul

<sup>3</sup> Garg

<sup>4</sup> nanofluid

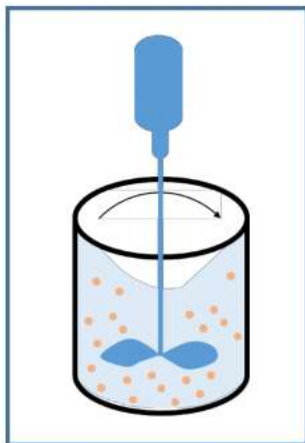
بررسی قرار دادند. زمان بهینه‌ی التراسونیک برای این پژوهش ۴۰ دقیقه برای نانوسیال MWCNT بود که حاوی ۱ درصد وزنی از MWCNT بود. توان و فرکانس التراسونیک در این روش، به ترتیب ۱۳۰ W و ۲۰ kHz بود. یک مطالعه‌ی مشابه که به وسیله‌ی کواک و کیم (۳۲) انجام شده است، نشان می‌دهد که نانوسیال‌های CuO بر پایه‌ی اتیلن گلیکول که با استفاده از ژنراتور التراسونیک (۱۰۰ W، ۲۰ kHz) تولید شده‌اند، برای دوره‌ی زمانی ۱ تا ۳۰ ساعت، پایدار بودند. زمان التراسونیک بهینه برای نانوسیال CuOEG در شرایط گفته شده، برابر ۹ ساعت بود. لی و همکارانش [۳۳] یک مخلوط از آب و آلومینا را با اعمال یک نوسان التراسونیک در فرکانس ۳۰-۴۰ kHz پایدار کردند. در این آزمون، دوره‌ی التراسونیک ۵، ۲۰ و ۳۰ ساعت، مورد استفاده قرار گرفت. پایدارترین نانوسیال بعد از ۵ ساعت التراسونیک، ایجاد شد. نمادی و واگولی [۳۴] اثر تغییر زمان التراسونیک را بر روی پایداری نانوسیال‌های مس-آب، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که فرایند التراسونیک پروبی برای به دست آوردن نانوسیال‌های پایدار CuO بر پایه‌ی آب مناسب است.

## ۲-۲-۳-۱ هموژن سازی<sup>۱</sup>

هموژن‌سازهای با انرژی برشی بالا (شکل ۱-۵) برای شکستن خوشه‌های نانوذره‌ای در سوسپانسیون‌های کلوئیدی مناسب می‌باشند. هوانگ و همکارانش [۳۵] از روش‌های مختلف از جمله هم زدن، استفاده از حمام التراسونیک، پراکنده سازهای التراسونیکی و هموژن‌سازهای با فشار بالا برای پایداری نمونه‌های نانوسیال، استفاده کردند. آن‌ها اندازه‌ی کلوئیدها را به منظور بررسی آگلومره شدن ذرات در سوسپانسیون‌ها، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پیشنهاد کردند که هموژن‌سازهای فشار بالا یک ابزار مؤثر برای شکستن آگلومره‌های نانوذره‌ای می‌باشد. بوبی و همکارانش [۳۶] همچنین از هموژن سازی فشار بالا برای پایداری نانوتیوب‌های کربنی تک جداره<sup>۲</sup> و نانوذرات اکسید تیتانیم در سوسپانسیون‌ها، استفاده کردند. این فهمیده شد که روش اعمال شده برای پراکنده سازی نانوذرات در داخل سیال‌های پایه، مفید می‌باشد.

<sup>۱</sup> Homogenization

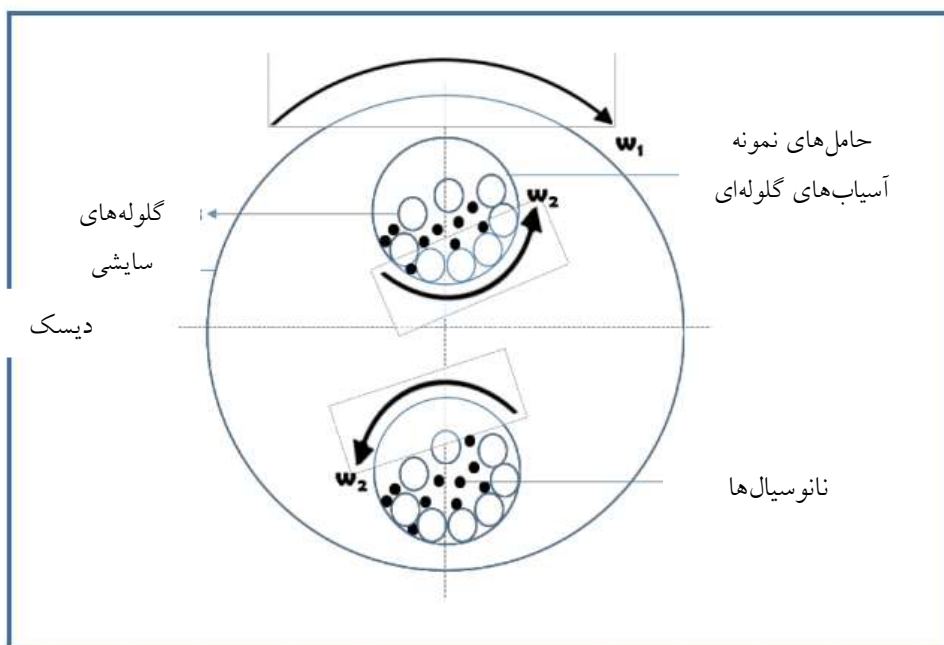
<sup>۲</sup> SWCNH



شکل ۱-۵ توصیف شماتیک همگن ساز برشی بالا

### ۳-۲-۳-۱ بال میل کردن

بال میل کردن نیز یک روش دیگر برای پراکنده سازی یا باز کردن نانوذرات و نانوتیوب ها در سیال های پایه می باشد. یک دیاگرام شماتیک از آسیاب سیاره ای در شکل (۱-۶) آورده شده است. اگرچه بال میل کردن یک روش پیش پا افتاده در افزایش پایداری سوسپانسیون هاست، چندین محققین گزارش کرده اند که این روش، یک روش مؤثر در تولید سوسپانسیون های با پراکندگی مناسب است.

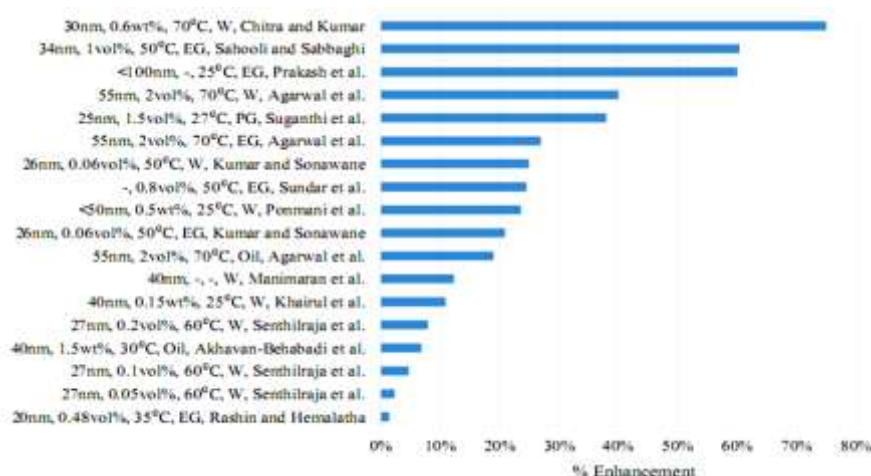


شکل ۱-۶ نمودار شماتیک آسیاب های گلوله ای سیاره ای

فاربود و همکارانش [۳۷] نانوسیال‌هایی بر پایه‌ی روغن موتور سنتزی تولید کرده‌اند که در آن، از نانوذرات CuO استفاده می‌شود. روغن، نانوذره و گلوله‌های آسیاب در داخل یک محفظه قرار داده می‌شود و به مدت ۳ ساعت در داخل یک آسیاب سیاره‌ای آزمایشگاهی، آسیاب می‌گردد. گلوله‌ها دارای اندازه‌ی قطر یک سانتیمتر بود و محفظه نیز از جنس فولاد ضدزنگ بود. نسبت وزنی گلوله به نانوسیال ۷ به ۱ انتخاب شد. بعد از بال میل کردن، نانوسیال بسیار پایدار بودند و هیچ ته‌نشینی بعد از ۳۰ روز، مشاهده نشد. علاوه بر این، هیچ تغییری در مورفولوژی نانوذرات موجود نیز یافت نشد. مطالعه‌ی دیگر در این زمینه که به‌وسیله‌ی اتفاقی و همکاران انجام شد [۳۸] نشان داد که آسیاب کردن در داخل آسیاب سیاره‌ای یک روش مناسب برای تولید نانوسیال‌های بر پایه‌ی روغن حاوی نانوذرات می‌باشد.

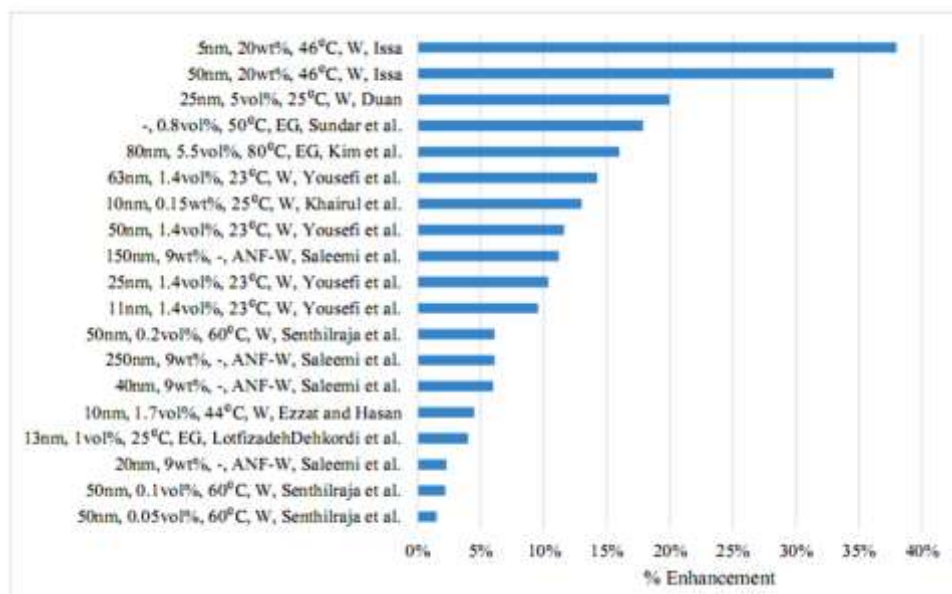
## ۴-۱ نوع نانوسیال

نانوسیال‌های حاوی انواع مختلف از نانوذرات مانند نانوذرات فلزی (مس و نقره)، اکسیدهای فلزی (آلومینا و CuO)، نانومواد کربنی (نانوتیوب‌های تک دیواره و چند دیواره) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش مقاله‌های منتخب در زمینه‌ی سنتز، پایداری و خواص ترموفیزیکی<sup>۱</sup> نانوسیال با استفاده از انواع مختلف از نانوذرات را مورد بررسی قرار داده است. رسانایی گرمایی نانوسیال‌های بهبود یافته که در مطالعه‌های مورد بررسی در اینجا، حاصل شده است، بر اساس نوع نانوذره در نمودار (۱-۱) تا (۱۶-۱) ترسیم شده است.

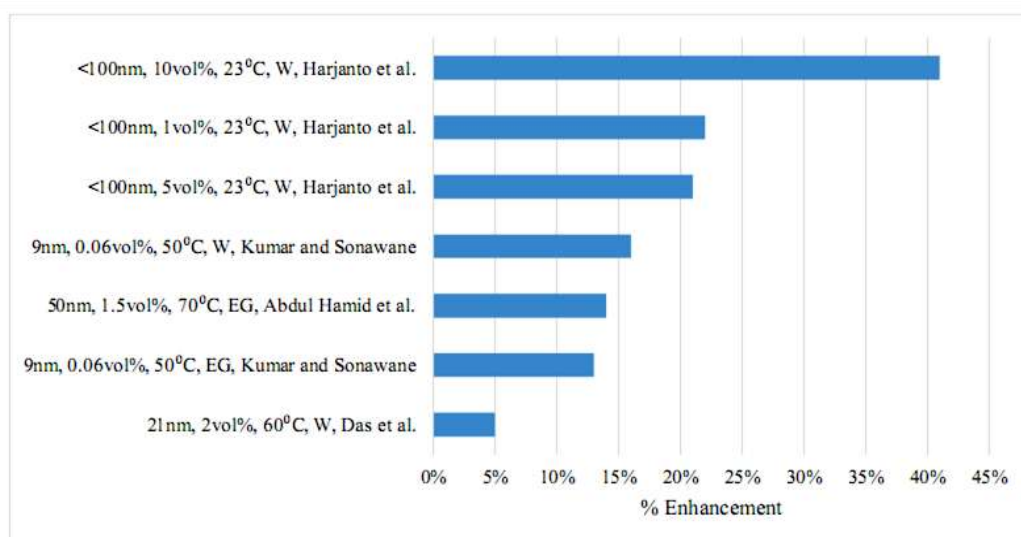


نمودار ۱-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های CuO

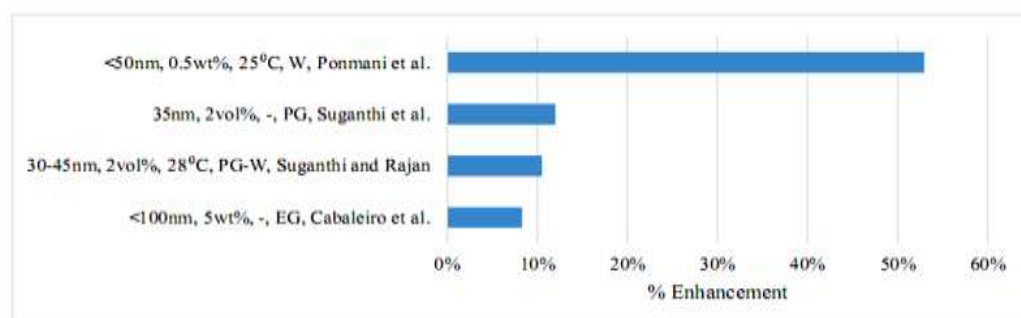
<sup>1</sup> thermophysical



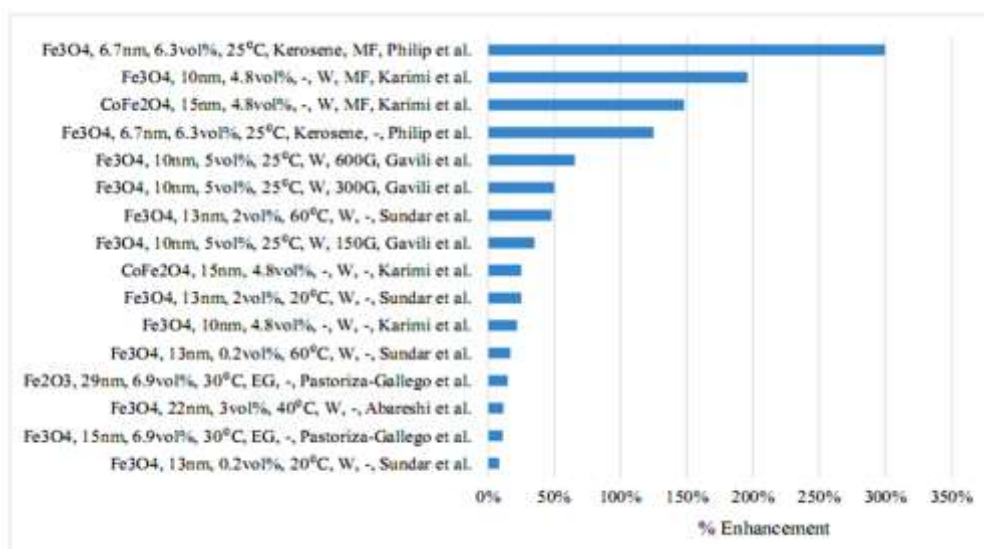
نمودار ۱-۲ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های  $\text{Al}_2\text{O}_3$



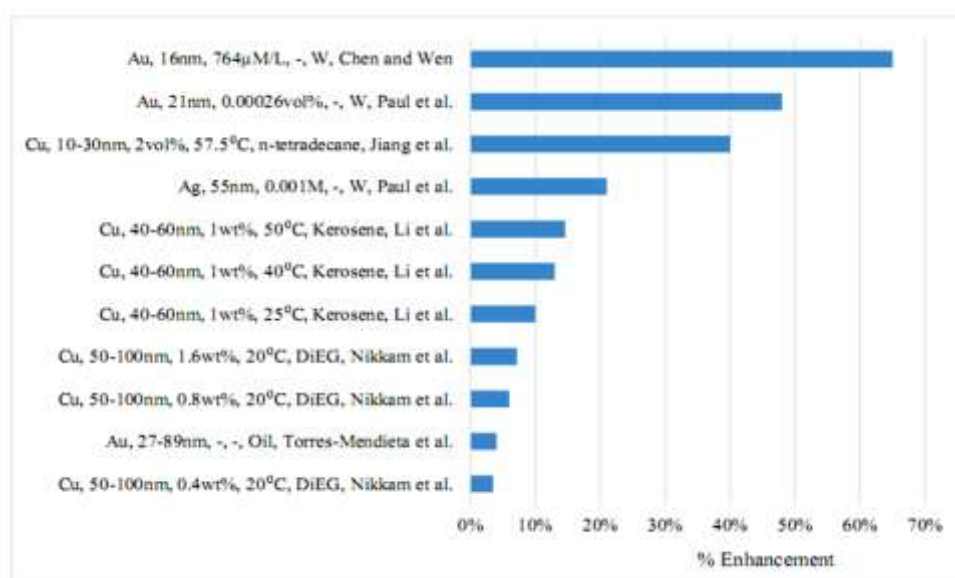
نمودار ۱-۳ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های  $\text{TiO}_2$



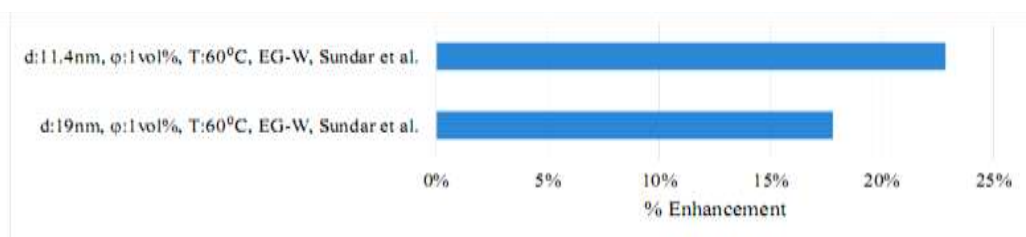
نمودار ۱-۴ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های  $\text{ZnO}$



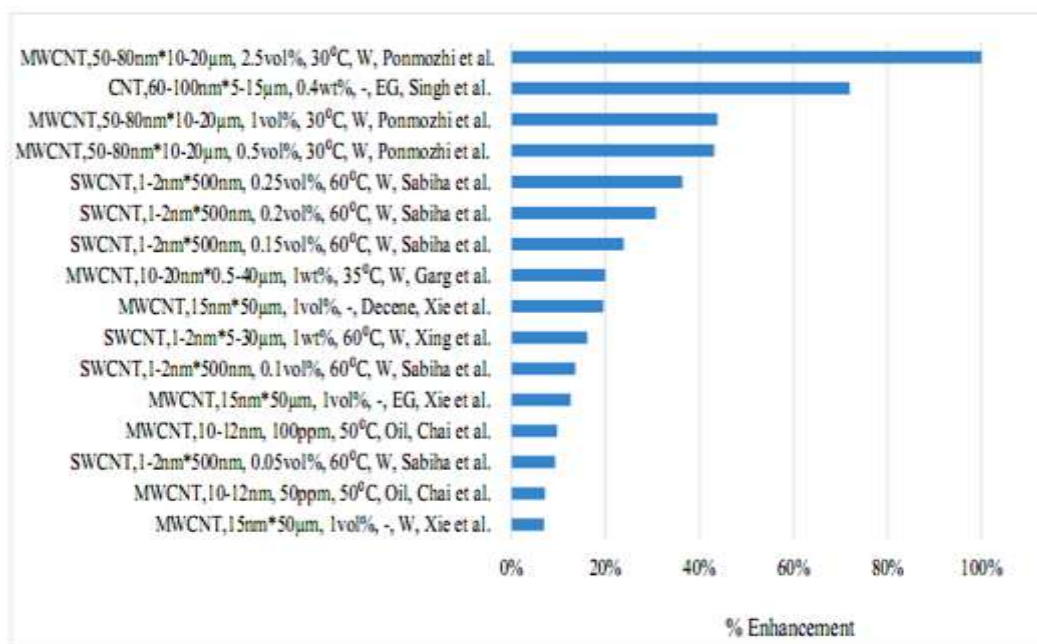
نمودار ۵-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های مغناطیسی



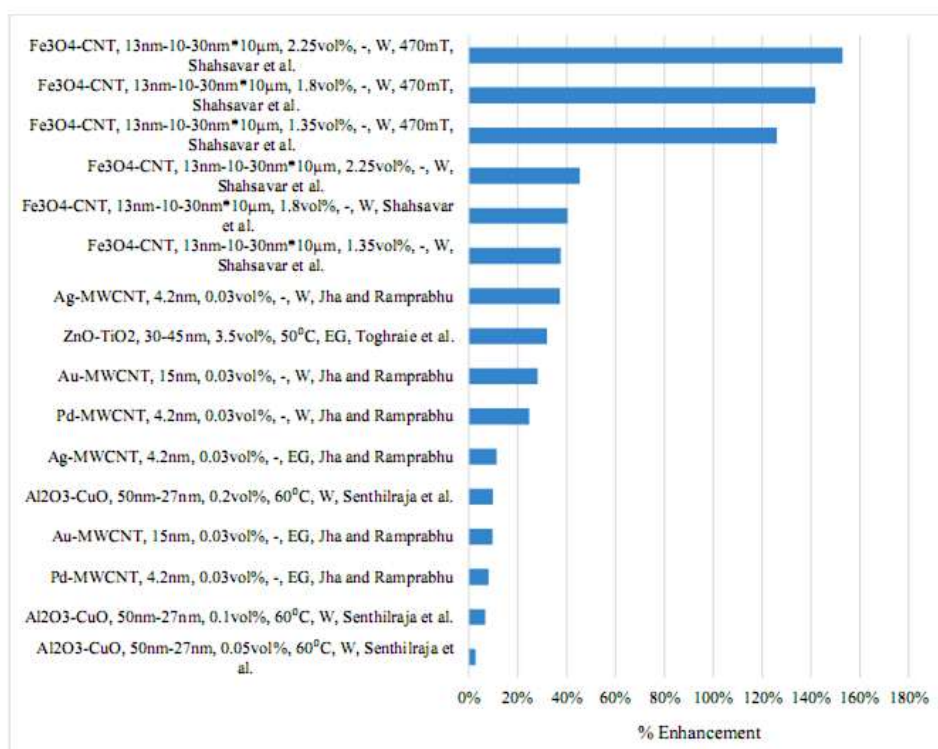
نمودار ۶-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های فلزی



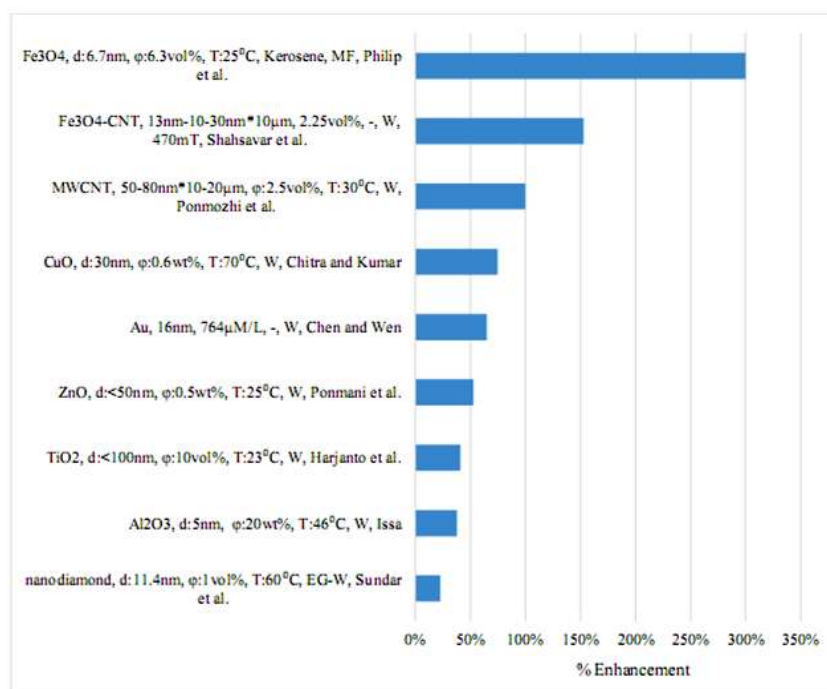
نمودار ۷-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های کریستالی



نمودار ۸-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های CNT



نمودار ۹-۱ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌های هیبریدی



نمودار ۱-۱۰ افزایش رسانش گرمایی نانوسیال‌ها با مواد مختلف نانو ذره

## ۵-۱ فرضیات

- نانوسیال هیبریدی تهیه شده قادر به افزایش قابلیت حرارتی سیال پایه می‌باشد.
- استفاده از نانوسیال سبب بهبود کارایی اکسرژی‌تیک مبدل می‌گردد.
- شبکه‌های عصبی قادرند تا با دقت بالا عملکرد مبدل را پیش‌بینی نمایند.

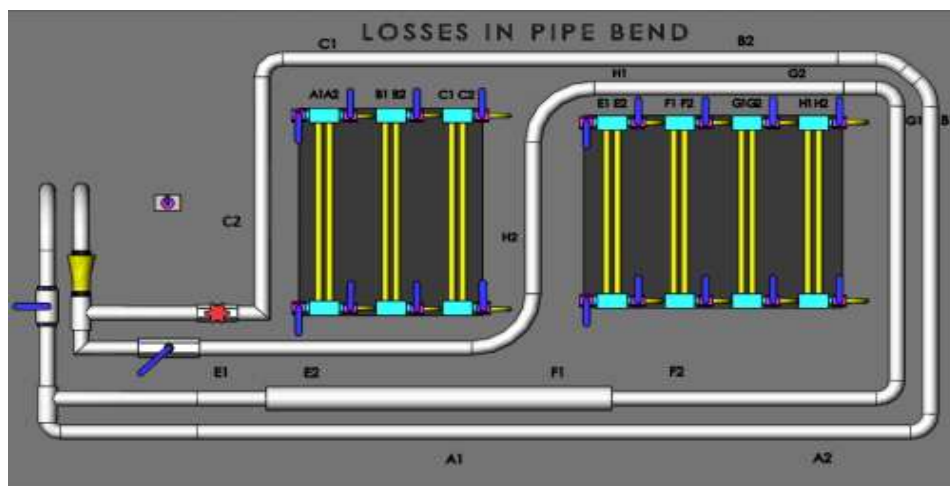
## ۶-۱ اهداف

- با توجه به کاربرد فراوان مبدل‌های حرارتی، ارائه روشی جهت کاهش اتلاف آن‌ها ضروری می‌باشد.
- کاهش اتلاف مبدل حرارتی با به کار بردن نانوسیال هیبریدی.

## ۷-۱ روش پژوهش و مراحل انجام پایان‌نامه

شبکه از دو مدار (مدار اول و دوم) تشکیل شده است. مدار اول شامل شیر کشویی شماره Gate valve خم زانوئی استاندارد خم ۹۰° استاندارد و لوله‌های مستقیم است و مدار دوم شامل شیر ساچمه‌ای (تویی) شماره ۲ بازشدگی ناگهانی، تنگ‌شدگی ناگهانی، سه خم ۹۰°

با شعاع‌های مختلف و لوله‌های مستقیم می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری افت فشار در اجزا در دو انتهای همه اجزا به جز شیرها، لوله‌های پیزومتر تحت فشار متصل شده است. دستگاه دارای یک مخزن آب و یک پمپ جهت گردش آب در سیستم لوله‌کشی می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری دبی آب ورودی به سیستم یک رونا متر بر روی دستگاه تعبیه شده است. واحد اندازه‌گیری دبی لیت‌ر بر دقیقه می‌باشد. برای اندازه‌گیری افت فشار در دو سر شیرها از گیج‌های عقربه‌ای استفاده شده است. جهت انجام آزمایش باید کلیه حباب‌های هوا از لوله‌ها خارج شوند. برای این منظور شیر ۲ را بسته و شیر ۱ را باز شود تا پس از روشن نمودن پمپ جریان در مدار برقرار گردد. بعد از برقراری جریان به مدت چند دقیقه شیر ۱ و شیر تنظیم دبی پمپ را بسته و با تکان دادن شیلنگ‌های پیزومترها حباب‌های هوای محبوس در قسمت‌های مختلف را به فضای پر از هوای بالای پیزومترها هدایت شود. شیرهای هواگیری واقع (شیرهای سمت راست) در انتهای منیفولد پیزومترها را به طور کامل و شیر تنظیم دبی پمپ را به مقدار بسیار کم باز ده تا هوای داخل پیزومترها از طریق شیر هواگیری خارج شود. پس از این کار شیر تنظیم دبی را بسته و پمپ را خاموش کرده و با کمی باز کردن شیر بالا و سمت چپ پیزومترها اجازه داده شود تا سطح آب در پیزومترها به مقدار دلخواه پایین بیاید. سپس ابتدا شیر ۱ و سپس شیر هواگیری پیزومترها را ببندید به این ترتیب مانومترهای مدار اول هواگیری شده و آماده آزمایش می‌باشد. جهت هواگیری مدار دوم نیز شیر ۱ را بسته و شیر ۲ را باز شده و مراحل اخیر را تکرار شود.



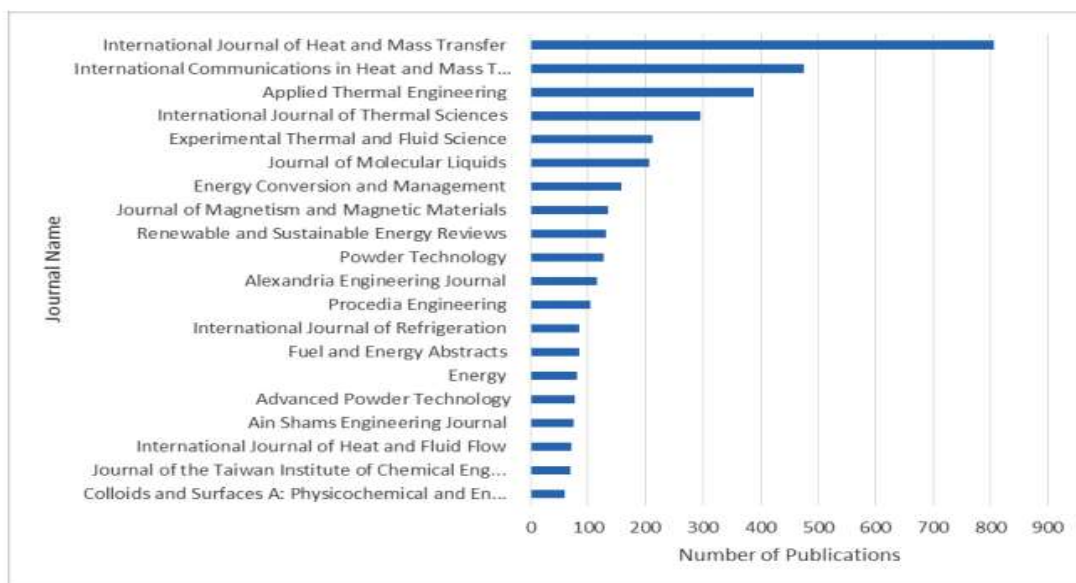
شکل ۱-۷ دستگاه اتلاف انرژی سیستم لوله‌کشی منبع: نگارنده

## فصل دوم

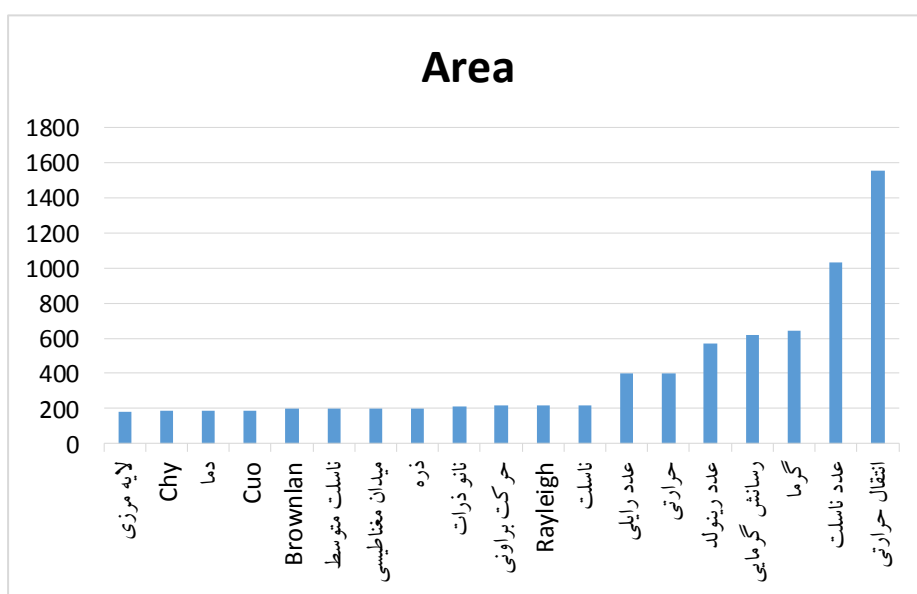
### ادبیات پژوهش

## ۲-۱ مقدمه

یک افزایش خلاف عادت رسانندگی گرمایی از طریق افزودن ذرات جامد به سیالات انتقال گرمایی، علاقه محققان رشته‌های گوناگون را به خود جلب نموده است. این تعلیقات که به صورت نانوسیالات شناخته می‌شوند، به عنوان مواد دارای یک پتانسیل برجسته در کاربردهای انتقال انرژی و گرما برای توسعه دستگاه‌ها و سیستم‌های انرژی نگهداشت پذیر قلمداد شده‌اند [۳۹]. در این زمینه، تعداد تحقیقات پیرامون نانوسیالات، به طور وسیعی از زمان ابداعشان توسط چوئی و همکارانش در سال ۱۹۹۵ [۴۰] افزایش یافته است. پیش از سال ۲۰۰۲، کاربردهای در دسترس معدودی پیرامون نانوسیالات وجود داشته است. در سال ۲۰۱۶، با این وجود، تعداد مقالات علمی در سال، تقریباً به ۲۰۰۰ مقاله رسیده است. مهم‌ترین ویژگی یک نانوسیال، سرعت انتقال گرمایی مضاعفش است [۴۱، ۴۲]. محققان یک بهبود شدید در رسانندگی گرمایی را با افزودن نانوذرات در یک سیال، در غلظت‌های بسیار پایین یافتند [۴۳، ۴۴، ۴۵ و ۴۶]. نمودار (۱-۲) و نمودار (۲-۲)، تعداد کاربردهای علمی پیرامون تحقیقات نانوسیالات را به ترتیب به وسیله روزنامه و رشته علمی نشان می‌دهد. همان‌طور که ظاهراً در این شکل‌ها نشان داده شده است، افزایش انتقال گرمایی تحت شرایط کاربردی مختلف، مورد تأکید اصلی قرار داشته است.



نمودار ۱-۲ ارقام و جداول (تمامی داده‌ها از السویر)



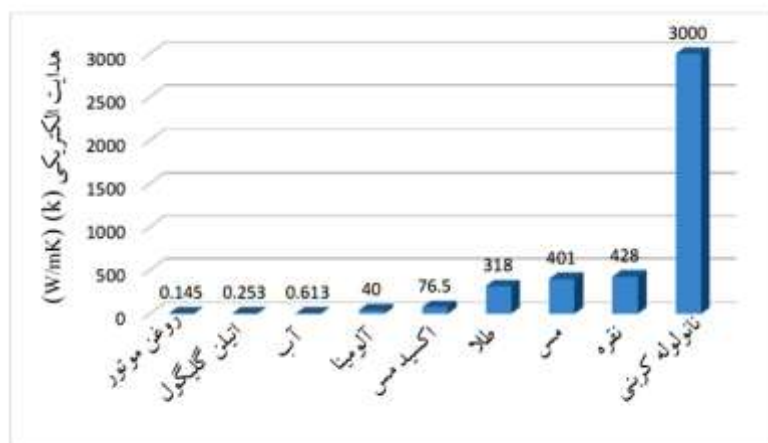
نمودار ۲-۲ تعداد نشرهای برحسب قلمروی موضوعی (تمامی داده‌ها از السویر) [۴۵]

در واقع، افزودن ذرات جامد به سیالات انتقال‌دهنده گرما به بیش از یک‌صد سال قبل بازمی‌گردد [۴۷]. در شیوه معروف گذشته، ذرات در اندازه میکرون با سیالات برای افزایش سرعت انتقال گرمایی ترکیب می‌شدند. با این وجود، پایداری ضعیف و ته‌نشینی ذرات در اندازه میکرون و مسدود شدن مجراها، همچنین نیروی مکش مضاعف سیال در سیستم‌های انتقال گرمایی، مانع به‌کارگیری این میکروسیالات شد [۴۸، ۴۹]. مفهوم نانوسیالات برای غلبه

بر این مسائل مواجه شده، پدید آمده است. گرچه انتظار می‌رود پاشیدگی ذرات در اندازه نانو برای دوره زمانی طولانی‌تر، پایدار بماند، اما مساحت سطحی بزرگ‌تر به نسبت حجمی و انرژی سطحی بالاتر نانو ذرات هم‌چنین منجر به تجمع و ته‌نشینی نانوذرات می‌شود. حفظ رسانندگی گرمایی مضاعف نانوسیالات به پایداری پاشیدگی بستگی دارد [۵۰، ۵۱]. لذا، ترکیب نانوسیالات چیزی فراتر از ترکیب ساده ذرات جامد با سیال میزبان است، بیشتر شامل عملیات‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف برای افزایش پایداری تعلیقات کلئیدی می‌شود.

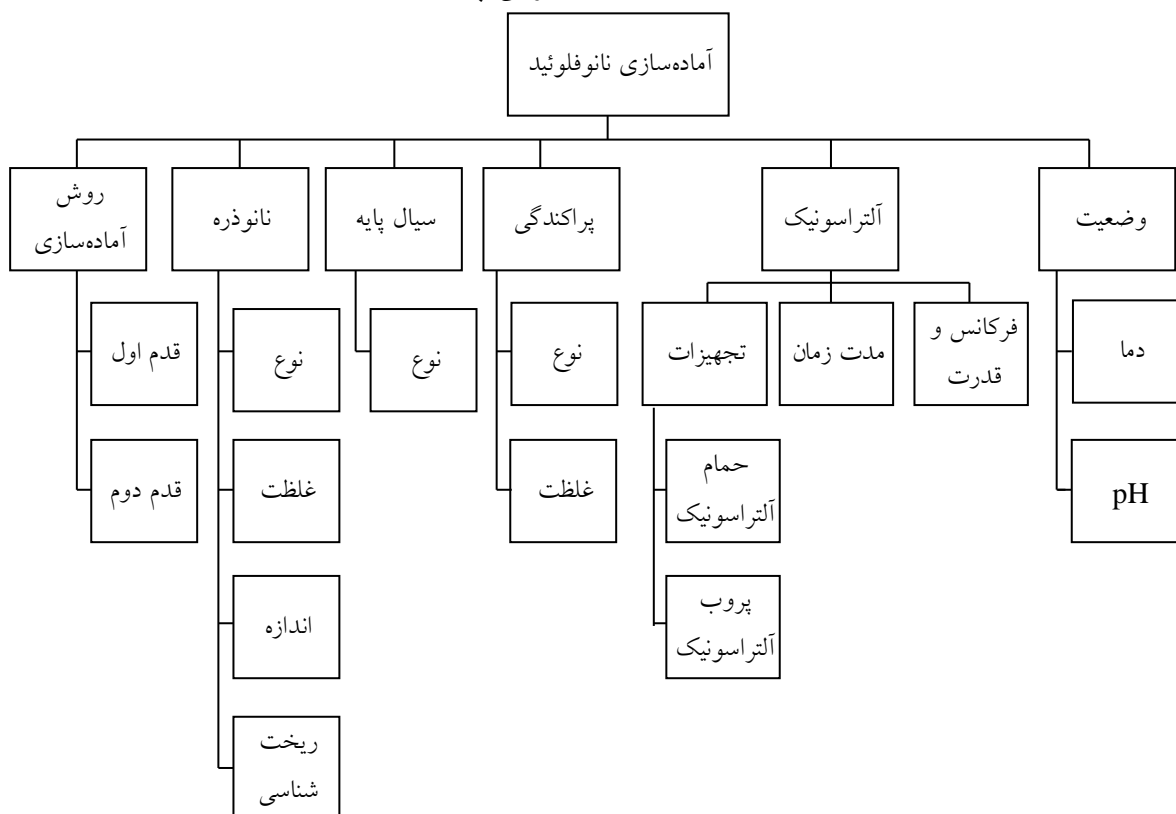
رسانندگی گرمایی (k) بسیاری از مواد جامد، همانند مس، اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسیدهای آهن، مواد کربنی، از انتقال گرمایی متداول سیالات از نظر مرتبه‌های بزرگ‌تر، بالاتر است [۵۲]، همان‌طور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. اکسید مس، به‌عنوان نمونه، دارای ۵۰۰ برابر رسانندگی گرمایی بیشتر از روغن موتور است. گزارش شده است، پاشیدگی فقط ۰/۰۶wt% از نانو ذرات مس در آب، رسانندگی گرمایی را به اندازه ۷۵٪ افزایش می‌دهد [۵۳]. در تحقیقات نانوفلوئیدها، انواع بی‌شمار نانو مواد (فلزات، سرامیک‌ها و لوله‌های نانو و...) برای ارتقاء رسانندگی گرمایی سیالات انتقال‌دهنده گرما، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

یک افزایش خلاف عادت در رسانندگی گرمایی نانوسیالات، توجه زیادی را از سوی پژوهشگران به خود جلب نموده است. با این حال، با افزایش تعداد انتشارات در طول زمان، تفاوت‌های قابل توجهی در یافته‌های تحقیقات انتشار یافته، ظاهر شده است. عوامل زیادی ممکن است در تفاوت‌های افزایش خواص گرمایی نانوسیالات دخیل باشد همانند اندازه ذره، شکل ذره، pH تعلیق، درما، روش‌های پایداری به‌کار رفته و تکنیک‌های اندازه‌گیری انتخاب شده که در نمودار (۲-۴) فهرست شده‌اند و به‌طور مختصر در بخش‌های ذیل شرح داده شده‌اند. علاوه بر آن، عوامل دیگر همانند خلوص نانوذرات و مقیاس انباشتگی هم می‌تواند در بی‌ثباتی‌ها دخیل باشد.



نمودار ۲-۳ هدایت حرارتی مواد نانوذرات و مایعات پایه مورد استفاده در نانوسیال ها

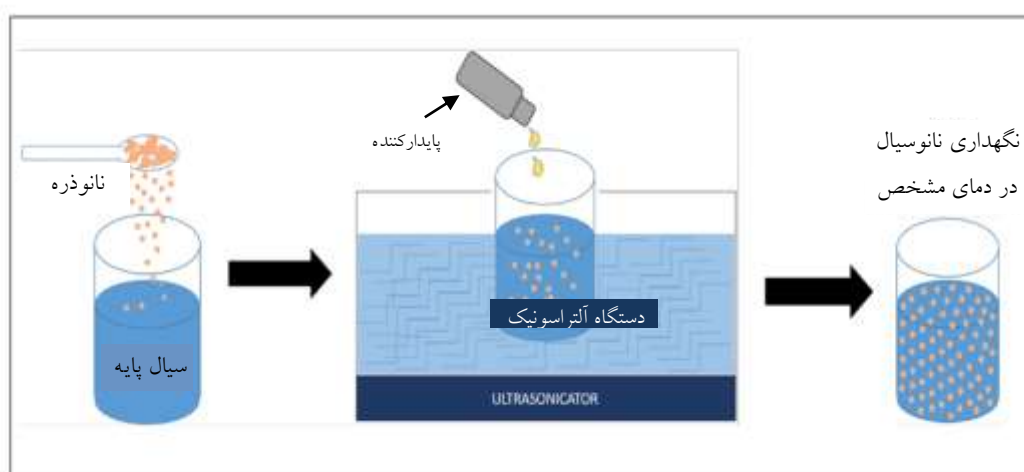
### MWCNT: نانولوله های کربنی چند دیواره



شکل ۲-۱ متغیرها در سنتز nanoMWCNT: نانو کربنی چند دیواره

## ۲-۲ ترکیب نانوسیالات

نانوسیالات می‌توانند با پراکنده‌سازی نانوذرات در سیالات پایه، ترکیب شوند. با این حال، دقت ویژه برای خودداری از انباشتگی ذرات لازم است (شکل ۲-۵). ترکیب یک نانوسیال پایدار و دارای عمر زیاد برای حفظ خواص گرمایی ارتقا یافته ضروری است. زمان پایداری بهینه می‌تواند به صورت حداکثر زمانی تعریف شود که نانوسیالات کاملاً در حالت ناپیوسته باقی می‌مانند. شیمی کلئید بیانگر این است زمانی که اندازه یک ذره به یک اندازه بحرانی می‌رسد، ذره پایدار می‌ماند و هیچ ته‌نشینی روی نمی‌دهد. با این وجود، انرژی‌های سطحی بالا و برهمکنش‌های بعدی نانوذرات سبب انباشتگی، تشکیل خوشه‌ها و رسوب سریع‌تر در سیالات می‌شود. دو روش مختلف برای ترکیب نانوسیالات به کار می‌رود که روش دوم مرحله‌ای و تک مرحله‌ای هستند [۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸].



شکل ۲-۲ تصویرسازی سنتز نانوسیال‌ها

## ۲-۲-۱ روش دوم مرحله‌ای

در این روش، نانوذرات اولاً از طریق روش‌های فیزیکی و شیمیایی گوناگون ساخته می‌شوند [۵۹، ۶۰، ۶۱]. آنگاه با سیالات پایه ترکیب می‌شوند. روش دوم مرحله‌ای به‌طور وسیعی در تحقیقات نانوسیالات برای نانوذرات غیرفلزی به کار رفته است. مزایای روش دوم مرحله‌ای، ظرفیت تولیدی بالاتر و هزینه پایین‌تر است.

## ۲-۲-۲ روش تک مرحله‌ای

روش تک مرحله‌ای شامل ترکیب نانوذرات و پاشیدگی آن‌ها در سیالات پایه به‌طور هم‌زمان می‌شود [۶۲]. این روش، مراحل خشک کردن، ذخیره‌سازی، حمل و نقل و پاشیدگی را از بین می‌رود که می‌توانند سبب اکسیداسیون نانوذرات فلزی شوند. با این حال، معایب این روش، هزینه تولید نسبتاً بالاتر آن و کاربردپذیری فقط برای سیالات پایه دارای فشار بخار پایین است [۶۳، ۶۴، ۶۵]. نقص دیگر این روش این است که در باب دسته‌ای کار می‌کند و دارای کنترل محدودی بر روی چند پارامتر مهم من جمله اندازه ذره است.

## ۲-۳ افزایش پایداری نانوسیالات

نیروهای برهم‌کنش ذره-ذره و ذره-سیال، پایداری نانوسیالات را شرح می‌دهد. نانوذرات در واسطه ناپیوسته شروع به تجمع می‌کنند زمانی که نیروی جاذبه واندروالس بین ذره‌ای بر سایر نیروهای دافعه غلبه می‌کند به‌ویژه دفع‌های الکترواستاتیکی لایه دابل، نیروهای آبپوشی و نیروهای فضایی [۶۶] (که منجر به ته‌نشینی سریع ذرات تجمع یافته (تا اندازه میکرون)، انسداد متعاقب مجراهای تبادل گر گرمایی و کاهش رسانندگی گرمایی نانوسیالات می‌شود. پایداری درازمدت نانوسیالات، یک نیاز ضروری برای کاربردهاست. روش‌های شیمیایی (افزودن مواد فعال در سطح، تنظیم pH و اصلاح سطحی) و روش‌های فیزیکی (اغتشاش فراصوتی، هم‌جنس شدگی و فرزکاری توپی) برای حفظ پایداری درازمدت هم‌چنین خواص گرمایی نانوسیالات به‌کار رفته‌اند.

## ۲-۴ پیشینه مطالعاتی تحقیق

درک و بهبود سرعت انتقال حرارت، دغدغه اصلی در صنایع مختلف، از جمله فرآیندهای شیمیایی، فرایندهای گرمایشی و خنک‌کننده و کاربردهای در سطح خرد است. برای کاهش هزینه‌های عملکرد، چندین تکنیک انجام شده است. مهم‌ترین متغیرها در کاهش اندازه و هزینه تجهیزات انتقال حرارت عبارتند از ضریب انتقال حرارت و افت فشار یا گرانشی. موضوع اصلی در طراحی تجهیزات به حداقل رساندن گرانشی است در حالی که ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، توسعه تکنیک‌ها برای بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی ضروری است. معمولاً این‌گونه استنباط می‌شود که عملکرد مبدل‌های حرارتی

می‌تواند با بسیاری از تکنیک‌های تقویت بهبود یابد. در میان آن‌ها، استفاده از نانوسیال‌ها و تکنیک‌های تقویت منفعل مانند افزودن شتابگر آشفته به عنوان مؤثرترین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود [۶۷].

نانوسیال، تعلیق نانو ذرات در یک مایع پایسته و اشباع، رسانای گرمای بیشتری نسبت به مایع پایه خود دارد که منجر به بهتر شدن ضریب انتقال حرارت می‌شود [۶۸]. استفاده از نانوذرات در مایعات حاوی مزایای بالقوه زیادی است مانند ثبات تعلیق طولانی، بدون چسبندگی در سیستم و افت فشار کم است. این مزایا به این خاطر است که نانوذرات در غلظت‌های بسیار کم و اندازه نانومتری استفاده می‌شود. انواع نانوذرات و مایع پایه نقش حیاتی در افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال‌ها دارند [۶۹]. اگرچه نانوسیال‌ها موجب برخی مزایایی می‌شوند، ممکن است در مقایسه با جریان‌های مایع پایه‌ای افت فشار داشته باشد که در کاربردهای عملی نامطلوب است.

شاید چائوی [۷۰] اولین کسی بود که افزودن ذرات جامد در اندازه نانومتری به یک مایع پایه پیشنهاد کرد و افزایش رسانایی حرارتی نسبت به سیال پایه را ارائه کرد. بسیاری از مطالعات بر روی ارزیابی عملکرد انتقال حرارت و ویژگی‌های جریان نانوسیال‌های مختلف در هر دو رژیم جریان آرام و جریان آشفته انجام شده است [۷۱]. نتایج این مطالعات نشان داد که ورود نانوذرات موجب بهبود رسانش حرارتی در مقایسه با مایع معمولی می‌شود و میزان انتقال حرارت را با غلظت نانوذرات افزایش می‌دهد. اگرچه بسیاری از تحقیقات، سهم هدایت حرارتی را در جهت افزایش ضریب انتقال حرارت کنونی نانوسیال‌ها نشان می‌دهد، دیگر عوامل مؤثر بر آن که در برخی از مقالات بررسی شده [۷۲]، باید در نظر گرفته شود. نگوین و همکاران [۷۳] اندازه‌گیری‌های گسترده‌ای از ویسکوزیته دینامیکی را برای نانوسیال آب  $Al_2O_3$  انجام داده‌اند که نگرانی‌های پدیده هیستریزیس را در مورد قابلیت اطمینان استفاده از نانوسیال‌ها برای اهداف تقویت انتقال حرارت مورد توجه قرار داده است. حجت و همکاران [۷۴] آزمایش انتقال حرارت گرمای همرفتی از نانوسیال‌های نیوتنی با سه نوع نانوسال را در رژیم جریان آرام انجام داد و برای پیش‌بینی تعداد ناسلت از نانوسیال‌های غیرنیوتنی به عنوان تابع رینولدز و تعداد پراوندل همبستگی پیشنهاد کرد.

اصل اساسی تکنیک منفعل، مستلزم عدم استفاده مستقیمی از قدرت خارجی است و شامل سطح پوشش، سطح سفت و دستکاری جریان مانند جریان چرخشی و جریان اصلاح شده است [۷۵]. نوار پیچشی یکی از رایج‌ترین اعضای تکنیک‌های منفعل به کار رفته در

بسیاری از سیستم‌های مبدل حرارتی است. یکی از بهترین تکنیک‌های منفعل مطلوب تولید جریان چرخش با قرار دادن یک نوار پیچیده است زیرا نوار ارزان است و می‌تواند به راحتی در سیستم موجود استفاده گردد. اثرات ورود نوار پیچیده به طور گسترده‌ای برای هر دو کارهای شبیه‌سازی آزمایشی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. حضور نوار پیچشی به سمت توسعه مجدد لایه مرزی حرارتی و ایجاد جریان چرخش منجر به انتقال گرما بیشتر هدایت می‌کند. برای ارتقاء مبدل حرارتی فشرده موجود، استفاده از نوار پیچشی می‌تواند منافع را به دلیل هزینه کم، سهولت تعمیر و نگهداری و نصب، افزایش دهد. با این حال، افزایش انتقال حرارت منعکس کننده تلفات اصطکاک همزمان در فرآیند [۷۶] است. در نتیجه قدرت پمپاژ ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش ضریب عملکرد در یک پمپاژ با یکدیگر شود و در نهایت بالا رفتن پمپاژ باشد؛ بنابراین برای دستیابی به میزان انتقال حرارت مورد نظر در یک مبدل حرارتی موجود در یک قدرت پمپاژ به صرفه، طراحی یک نوار پیچشی با شکل هندسی مناسب لازم است تا میزان انتقال حرارت مطلوب را در مبدل‌های حرارتی به دست آید. بسیاری از کارها به منظور بررسی اثرات ورود نوار پیچشی انجام شده است [۷۷، ۷۸]. به تازگی، برخی از انواع جدید محققان، استفاده از نوارهای پیچشی همراه با نانوسیال‌ها را توسعه دادند [۷۹، ۸۰]. نتایج این تحقیقات نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال‌ها بالاتر از مایعات معمولی است و در مقایسه با ضریب انتقال حرارت در یک لوله ساده در شرایط مشابه عمل می‌کند. افزایش بیشتری خواهیم داشت هنگامی که نوار پیچشی وارد می‌شود. به عنوان مثال، فکور- پاکدامن و همکاران [۸۱] یک بررسی تجربی بر روی خواص حرارتی فیزیکی نانوسیال‌های نفتی / MWCNTs انتقال حرارت و عملکرد کلی لوله‌های پیچ‌خورده عمودی انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که استفاده از نانوسیال‌ها و لوله‌های پیچ‌خورده، منجر به شاخص کلی عملکرد بالا تقریباً ۶/۴ می‌شود.

به نظر نگارنده، هرچند تمام آثار تلاش زیادی را برای افزایش انتقال گرما و حرارت در مبدل‌های حرارتی دوگانه انجام داده است، عملکرد ترموهیدرولیک و بهینه‌سازی لوله‌ها با استفاده از نوارهای پیچشی و نانوسیال‌ها نیاز به توجه بیشتری دارند. از آنجا که نوارهای پیچشی با اشکال هندسی مختلف نتایج مختلف ترموهیدرولیک را ارائه می‌دهند، ارزیابی پتانسیل طراحی‌های جدید و اصلاح نوارهای پیچشی با شکل هندسی مؤثر جالب بوده تا تغییرات مجدد جهت چرخش را در طول لوله آزمایش که انتظار می‌رود ترکیب بهتر از یک نمونه معمولی صورت پذیرد. در تحقیق حاضر، انتقال گرمای آشفته و وضعیت اصطکاک

جریان در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای متناسب با نوارهای اصلاح شده پیچشی است که طول امواج در طول پیچ‌ها و نانوسیال  $Al_2O_3$  به‌عنوان یک مایع کارا متفاوت است. تمام کارهای قبلی از مایعات نیوتونی به‌عنوان مایع پایه استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، نانوسیال به‌عنوان غیرنیوتنی برای طیف گسترده‌ای از تعداد رینولدز بین ۵۰۰۰ و ۲۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با غلظت نانوذرات  $1-0/2$ ، نسبت پیچشی  $3-10$  و نسبت پیشرفت هندسی بین  $0/6$  و  $2$  انجام شد. آزمایش‌ها با و بدون نوارهای پیچشی معمولی و نانوسیال تحت شرایط عملیاتی مشابه انجام شد و با همبستگی خوبی در رابطه با بررسی نصب آزمایشی خواص ترموفیزیکی مانند هدایت حرارتی نانوسیال  $Al_2O_3$  از طریق آزمایش‌ها در شرایط مختلف و اعتبارسنجی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج تجربی، همبستگی جدیدی برای پیش‌بینی تعداد نوزلت، ضریب اصطکاک و عملکرد حرارتی مبدل حرارتی با نانوسیال و نوارهای پیچشی اصلاح شده ارائه شده است.

ظهور مواد نانوکامپوزیت، تحولی اساسی در خواص مکانیکی و حرارتی مواد ایجاد کرده است. خواص منحصر به فرد مواد نانوکامپوزیت را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

پودرهای نانوکامپوزیت نسبت سطح به حجم بالایی دارند. این نسبت در حالت بی‌شکل نسبت به حالت بلوری، بیشتر است. کسر زیادی از اتم‌ها در سطح ذرات پودرهای نانوکامپوزیت و یا در مرز دانه‌های ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها قرار دارند. به دلیل دو خاصیت اخیر پودرهای نانوکامپوزیت، قابلیت تف‌جوشی (زیتتر) بالایی دارند. در ساخت نانوکامپوزیت‌ها از پودرهای نانوکامپوزیت یا پودرهای نانومتری، به دلیل کنترل فرآیند در مقیاس نانومتری، ریزساختاری کاملاً یکنواخت به‌دست می‌آید. نانوکامپوزیت‌ها خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل استحکام، سختی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالایی در محدوده وسیعی از دما دارند. افزودن پنج تا ده درصد حجمی فاز دوم به فاز زمینه، باعث افزایش چشمگیری در خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. لذا جدیدترین فناوری‌ها در طراحی ریزساختاری نانوکامپوزیت‌ها، برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌باشد [۸۲، ۸۳].

در مقابل خواص منحصر به فرد مواد نانوکامپوزیت، در ساخت نانوکامپوزیت‌ها مشکلات فرآیندی قابل توجهی وجود دارد که نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. از اساسی‌ترین این مشکلات می‌توان به این موارد اشاره کرد: عدم توزیع یکنواخت فاز دوم در فاز زمینه در نانوکامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد. تجمع ذرات پودر بسیار ریز در نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش انرژی سطحی آن‌ها شده، کاهش خواص مکانیکی

نانوکامپوزیت‌ها را به دنبال دارد. استفاده از مواد شیمیایی گران‌قیمت برای توزیع یکنواخت فاز دوم در داخل فاز زمینه و جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات پودر نانوکامپوزیتی و ساخت نانوکامپوزیت‌هایی با ریزساختاری همگن و خواص مکانیکی بالا، باعث غیراقتصادی شدن و همچنین پیچیده‌تر شدن فرآیند می‌گردد [۸۴، ۸۵].

گزارش‌های کمی از مطالعه خواص خمشی پلیمر خالص و نانوکامپوزیت حاصل از آن با سیلیکات‌های لایه‌ای اصلاح شده وجود دارند. مقاومت خمشی و میزان پیچش در نقطه شکست در نانوکامپوزیت بسیار بیشتر از پلیمر خالص است. با افزایش مقدار خاک رس این افزایش نیز خفیف‌تر می‌شود. مدول کششی مواد پلیمری با تشکیل نانوکامپوزیت‌ها با سیلیکات‌های لایه‌ای افزایش قابل توجه‌ای نشان می‌دهد. میزان این افزایش مستقیماً به میانگین طول ذرات خاک رس پراکنده شده و نسبت ابعادی آن‌ها وابسته است [۸۶].

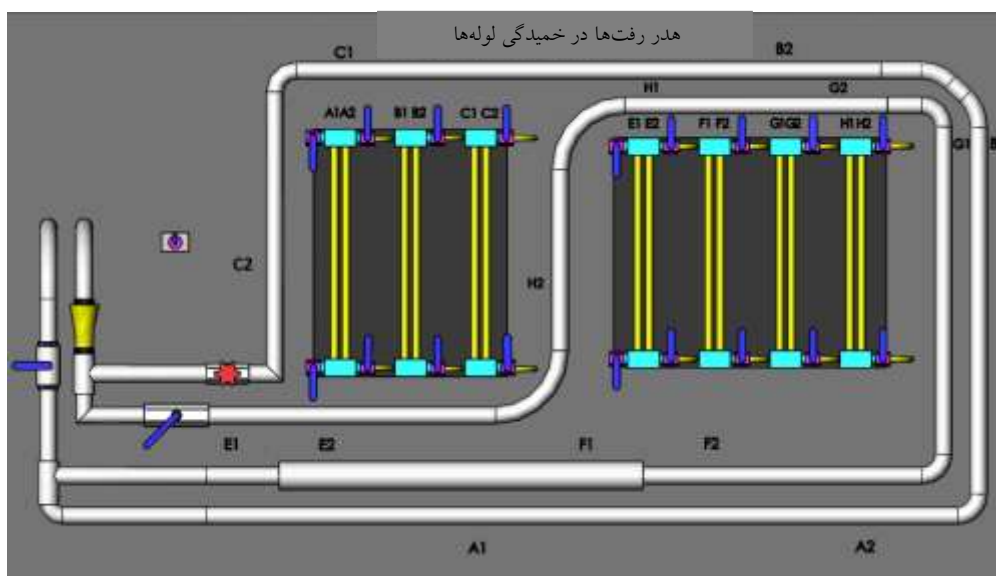
تحقیقاتی که تا سال ۱۳۹۷ صورت گرفته همواره فقط در زمینه افزایش انتقال حرارت و بررسی افت فشار درون مبدل‌های حرارتی بوده است که بیشتر تحقیقات مربوط به بررسی راندمان حرارتی مبدل‌های حرارتی بوده و تاکنون تحقیقات خیلی کمی در زمینه بررسی و مطالعه افت فشار و ضرایب انتقال حرارت درون سیستم‌های لوله کشی و انتقال حرارت درون سیستم‌های گرمایشی به کمک نانوسیالات صورت گرفته است.

## **فصل سوم**

### **مواد و روش جمع آوری داده‌ها**

### ۳-۱-۱ مقدمه

### ۳-۱-۱-۱ بررسی افت فشار در سیستم‌های لوله‌کشی بر پایه سیال اتیلن گلیکول



شکل ۳-۱-۱-۱ دستگاه اتلاف انرژی سیستم لوله‌کشی منبع: نگارنده

تعیین فشار و دبی جریان در یک سیستم اتصال لوله‌ها (شبکه لوله‌ها) از مسائل عمومی هیدرولیک می‌باشد. شبکه لوله‌ها به سیستمی از لوله‌ها اطلاق می‌شود که از یک لوله منفرد و یا سیستم پیچیده‌ای از لوله‌ها با قطرهای و طول‌های مختلف تشکیل شده است. به‌عنوان مثال می‌توان شبکه آبرسانی در شهرها را از نمونه‌های خوب شبکه لوله‌های پیچیده نام برد. عموماً شبکه لوله‌ها به‌صورت سری، موازی و حلقوی در سیستم‌های آبرسانی طراحی می‌گردند؛ بنابراین سنجش میزان افت انرژی در نقاط مختلف برای انجام محاسبات دقیق آبرسانی لازم است.

شبکه از دو مدار (مدار اول و دوم) تشکیل شده است. مدار اول شامل شیر کشویی شماره Gate vatve خم زانوئی استاندارد خم ۹۰° استاندارد و لوله‌های مستقیم است و مدار دوم شامل شیر ساچمه‌ای (تویی) شماره ۲ بازشدگی ناگهانی، تنگ‌شدگی ناگهانی، سه خم ۹۰° با شعاع‌های مختلف و لوله‌های مستقیم می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری افت فشار در اجزا در دو انتهای همه اجزا به جز شیرها، لوله‌های پیزومتر تحت فشار متصل شده است.

دستگاه دارای یک مخزن آب و یک پمپ جهت گردش آب در سیستم لوله‌کشی می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری دبی آب ورودی به سیستم یک رونامتر بر روی دستگاه تعبیه شده است. واحد اندازه‌گیری دبی لیتر بر دقیقه می‌باشد.

برای اندازه‌گیری افت فشار در دو سر شیرها از گیج‌های عقربه‌ای استفاده شده است. جهت انجام آزمایش باید کلیه حباب‌های هوا از لوله‌ها خارج شوند. برای این منظور شیر ۲ را بسته و شیر ۱ را باز نمایید تا پس از روشن نمودن پمپ جریان در مدار برقرار شود. بعد از برقراری جریان به مدت چند دقیقه شیر ۱ و شیر تنظیم دبی پمپ را بسته و با تکان دادن شیلنگ‌های پیزومترها حباب‌های هوای محبوس در قسمت‌های مختلف را به فضای پر از هوای بالای پیزومترها هدایت کنید. شیرهای هواگیری واقع (شیرهای سمت راست) در انتهای منیفولد پیزومترها را به‌طور کامل و شیر تنظیم دبی پمپ را به مقدار بسیار کم باز نمایید تا هوای داخل پیزومترها از طریق شیر هواگیری خارج شود. پس از این کار شیر تنظیم دبی را بسته و پمپ را خاموش کرده و با کمی باز کردن شیر بالا و سمت چپ پیزومترها اجازه دهید تا سطح آب در پیزومترها به مقدار دلخواه پایین بیاید. سپس ابتدا شیر ۱ و سپس شیر هواگیری پیزومترها را ببندید به این ترتیب مانومترهای مدار اول هواگیری شده و آماده آزمایش می‌باشد. جهت هواگیری مدار دوم نیز شیر ۱ را بسته و شیر ۲ را باز نموده و مراحل اخیر را تکرار کنید.

## ۲-۳ مشخصات ابعادی سیستم لوله‌کشی

برخی از اطلاعات مربوط به آزمایش عبارتند از:

- قطر داخلی لوله‌ها: ۱۶ mm
- قطر داخلی لوله بعد از بازشدگی و قبل از تنگ‌شدگی: ۲۶ mm
- قطر داخلی لوله قبل از بازشدگی و بعد از تنگ‌شدگی: ۱۶ mm
- فاصله بین نقاط اندازه‌گیری فشار برای لوله‌های مستقیم و خم‌ها: ۱m

شعاع‌های انحنای خم‌ها:

$$- \text{خم } 2/5m: G_1/G_2$$

$$- \text{خم } 5cm: J_1/J_2$$

روابط پیوستگی و انرژی برنولی برای محاسبه جریان آب در لوله‌ها با رابطه‌های (۳-۱) و (۳-۲) استفاده می‌شوند:

رابطه پیوستگی:

$$Q=A_1V_1=A_2V_2 \quad (3-1)$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = h_2 \quad (3-2)$$

رابطه برنولی:

$P$ : فشار

$p$ : چگالی

$V$ : سرعت سیال

$Z$ : فاصله قائم نقطه نسبت به خط مبنا

$A$ : سطح مقطع

$h_2$ : افت انرژی

افت فشار در لوله‌ها را می‌توان به موارد زیر طبقه‌بندی نمود:

(الف) افتی که ناشی از ویسکوزیته و اصطکاک داخلی سیال است.

(ب) افتی که به واسطه عوارض موضعی و یا تغییر ناگهانی سطح مقطع پدید می‌آید.

افت فشار جریان آب در یک لوله مستقیم با سرعت  $V$ ، طول  $L$  و قطر ثابت  $d$  مطابق

رابطه (۳-۳) است:

$$h_1 = f \frac{L V_2}{d 2g} \quad (3-3)$$

در رابطه فوق ضریب دارسی - وایباخ است و ضریب بی‌بعدی است که تابع عدد

رینولدز و زبری سطح می‌باشد. یکی از روابطی که جهت محاسبه  $f$  در لوله‌های صاف ارائه

شده بلازیوس است که برای  $Re \leq 10^5$  صادق است:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (3-4)$$

ضریب  $f$  در حالت عمومی لوله‌ها توسط دیاگرام مودی تعیین می‌شوند. عدد رینولدز را نیز از رابطه (۳-۵) به دست می‌آوریم.

$$Re = \frac{vd}{u} \quad (3-5)$$

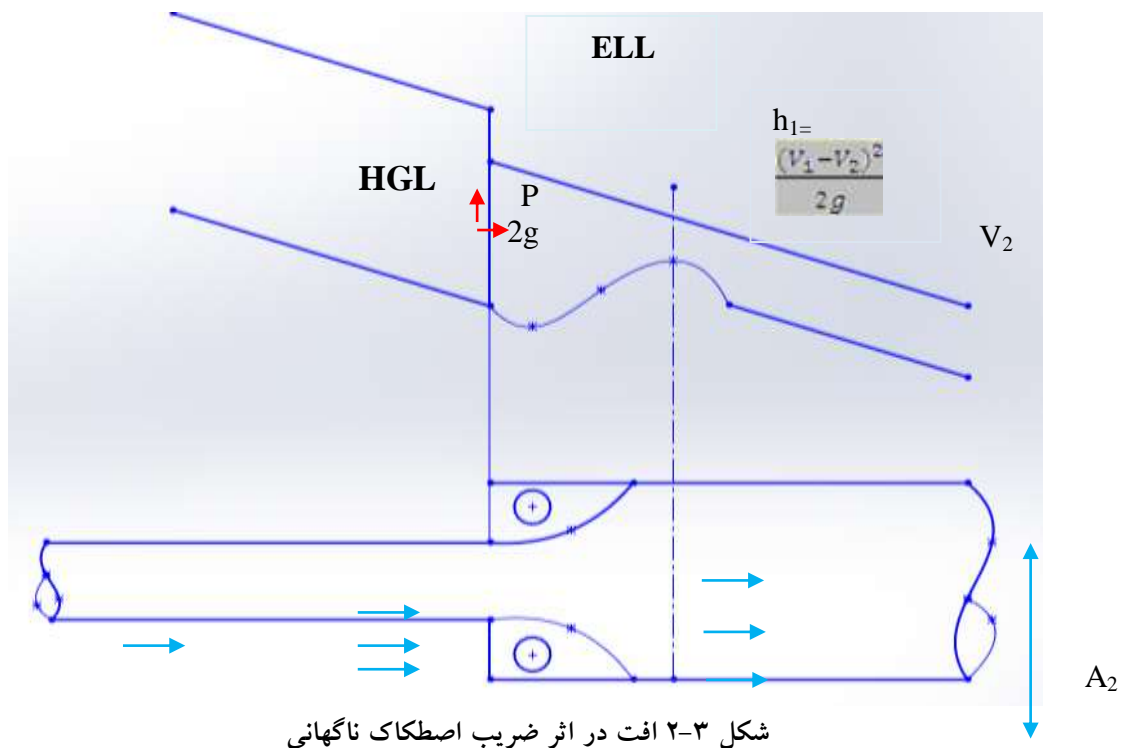
$V = \frac{\mu}{\rho}$  از جهت سیستماتیک است که در مورد آب در دما  $25^\circ C$  برابر  $10^{-6} \times 897 / s$  می‌باشد. خواص فیزیکی آب در دماهای مختلف از  $0^\circ C$  تا  $100^\circ C$  در پیوست کتب مکانیک سیالات موجود است:

سطح مقطع جریان می‌تواند به صورت ناگهانی افزایش یا کاهش یابد. در اتصالات لوله‌ای معمولاً در اثر اتصال دو لوله با اقطار متفاوت، سطح مقطع به صورت ناگهانی تغییر می‌نماید.

اگر لوله‌های با سطح مقطع کم به لوله‌ای با سطح مقطع زیاد متصل گردد افت موضعی ناشی از بازشدگی ناگهانی مطابق شکل (۳-۲) از رابطه (۳-۶) و (۳-۷) به دست می‌آید:

$$h_1 = k_e \frac{V_1^2}{2g} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (3-6)$$

$$k_e = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^2 \quad (3-7)$$



همچنین اگر لوله‌ای با سطح مقطع زیاد به لوله‌ای با سطح مقطع کمتر متصل شود، افت موضعی از رابطه (۸-۳) و (۹-۳) به دست می‌آید (شکل ۳-۳)

$$h_1 = k_e \frac{V_2^2}{2g} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (3-8)$$

$$k_e = \left( \frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 = \left[ \frac{1}{C_c} - 1 \right]^2 \quad (3-9)$$

$A_c$  سطح مقطع در قسمت جمع شده جریان و  $C_c$  ضریب انقباض می‌باشد.

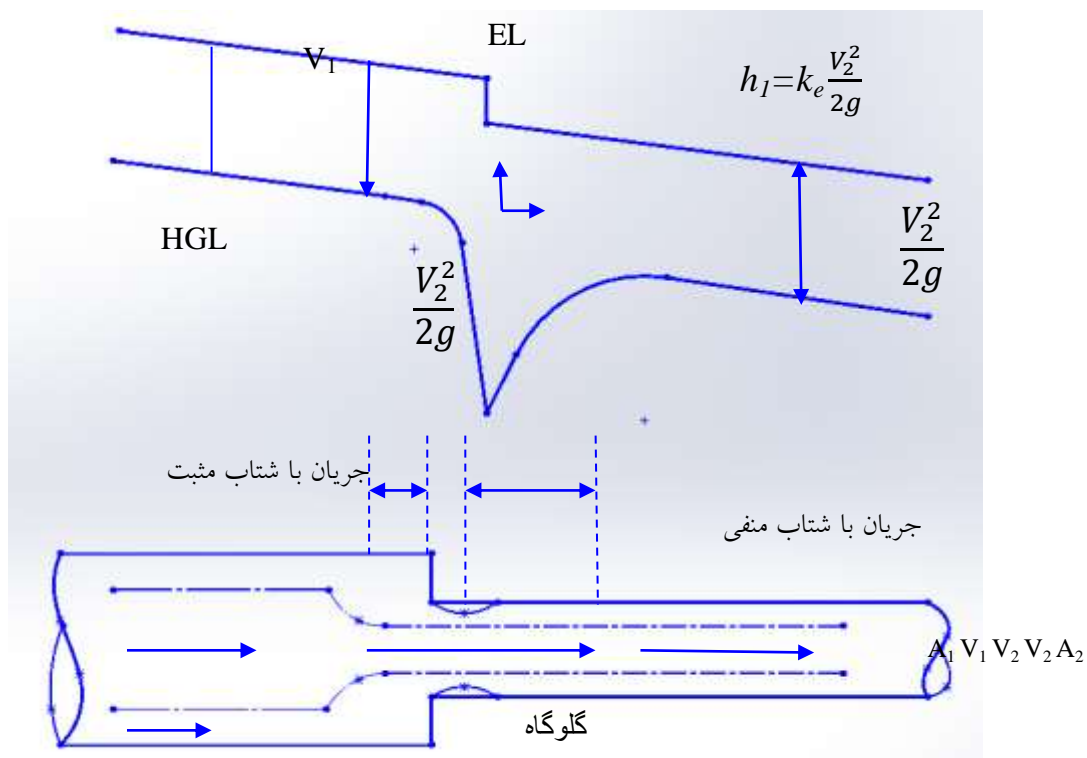
جدول ۱-۳ مقادیر تقریبی ضریب افت  $k$  برای قطعات تجاری در لوله‌کشی

مقدار $k$		نوع قطعه
با فلنج نصب شده	پیچ شده	
۵	۱/۰	شیر فلکه گرد تمام باز
۰/۱	۰/۲	شیر فلکه کشویی
۰/۲	۱/۵	خم برگردان
۰/۳	۱/۵	زانوی $90^\circ$ معمولی
۰/۲	۰/۷	زانوی $90^\circ$ با انحنای زیاد
-	۰/۴	زانوی $45^\circ$ معمولی
۰/۲	-	زانوی $45^\circ$ با شعاع انحنای زیاد

جهت اندازه‌گیری افت چنانچه پیزومتر را به دو نقطه از جریان مطابق شکل (۳-۳) وصل کنیم، اگر در لوله‌های پیزومتر جریانی وجود نداشته باشد. اختلاف تراز بین دو لوله پیزومتر اندازه اختلاف انرژی بین دو مقطع را خواهد داد. مقدار اختلاف یا به عبارت دیگر افت اندازه‌گیری شده را با  $h_{lw}$  نمایش می‌دهیم.

$$h_{lw} = X - (Z_2 - Z_1) = X + Z$$

با استفاده از روابط پیوستگی و برنولی بین نقاط ۱ و ۲ و پس از ساده کردن می‌توان افت فشار را با استفاده از این روابط محاسبه کرد.



شکل ۳-۳ افت بار در اثر انقباض ناگهانی

در رابطه فوق  $k_e$  ضریب بی بعد افت فشار در تنگ‌شدگی است و از جدول زیر به دست می‌آید.

جدول ۳-۲ افت فشار در تنگ‌شدگی

$A_2/A_1$	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱/۰
K	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۰

افت انرژی موضعی در اثر تلاطم جریان آب در قسمت خم لوله به وجود می‌آید. مقدار این افت برای خم‌ها از رابطه (۳-۱۰) به دست می‌آید.  $K_a$  ضریب بدون بعد است که به شعاع لوله و زاویه خم بستگی دارد.

$$h_{ln} = k_a \frac{V^2}{2g} \quad (۳-۱۰)$$

از جمله اتصالات موضعی شیرها هستند که به علت ساختمان داخلی باعث افت نسبتاً زیادی در جریان می‌شوند. مقدار افت انرژی در شیرها از رابطه (۳-۱۱) به دست می‌آید.

$$h_l = k_a \frac{V^2}{2g} \quad (۳-۱۱)$$

در رابطه فوق  $1k$  ضریب انرژی در شیر است که بی‌بعد بوده و به نوع شیر و درجه بازشدگی آن بستگی دارد. در حالتی که شیر کاملاً بسته باشد  $k = \infty$ . **جدول (۲)** مقادیر تقریبی ضریب انرژی شیرها و بقیه اتصالات را در بر دارد.

### ۳-۳ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب

#### ۳-۳-۱ روش انجام آزمایش

پیزومترها را مطابق روش شرح داده شده در دستورالعمل دستگاه هواگیری نموده سپس آزمایش را در دو حالت (الف) و (ب) برای مدار اول و دوم انجام دهید.

الف- مدار اول: در حالی که شیر ۱ را کاملاً باز گذاشته‌اید (مدار ۱) و شیر ۲ بسته ست برای دبی‌های مختلف جدول (۳-۳) را کامل نمایید.

جدول ۳-۳ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب

شماره آزمایش	حجم آب عبوری lit	مدت زمان (s)	قرائت‌های روی لوله‌های پیزومتر						قرائت‌های روی لوله u شکل
			لوله مستقیم		خم راست گوشه		خم زانویی prop		شیر کشویی (۱) (gate Valve $D_1/D_2$ )
			$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$C_2$	
مدار ۱	۳		۵۳	۵۰	۵۵	۵۱	۴۸/۵	۴۴/۵	
	۶	LPM	۵۹	۵۱/۵	۶۲	۵۰	۵۵	۴۴	
	۹	LPM	۶۵	۵۳/۵	۶۸/۵	۴۹/۵	۶۲/۵	۴۱	
	۱۲	LPM	۷۹	۵۵	۸۶/۵	۴۵/۵	۷۹	۳۷/۵	
	۱۵	LPM	۸۳	۵۵/۵	۹۳/۵	۴۳	۸۶	۳۷	
	۱۸	LPM	۸۵/۵	۵۵/۵	۹۷	۴۲	۸۶	۳۷	

ب- مدار دوم: شیر ۱ را بسته و شیر ۲ را باز نمایید و برای دبی‌های مختلف جدول (۳-۳) را کامل کنید.

جدول ۳-۴ سیال مورد آزمایش مخلوط اتیلن گلیکول و آب

شماره آزمایش	حجم آب عبوری V(lit)	مدت زمان (s)	قرائت‌های روی لوله‌های پیزومتر										قرائت‌های روی لوله u شکل
			بازشدگی		تنگ‌شدگی		خم ۲		خم ۴		خم ۵		شیر کشویی (1) (gate Valve K <sub>1</sub> /K <sub>2</sub> )
			E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	
مدار ۲	۳	لیتر بر دقیقه	۴۴	۴۲	۴۲	۴۰/۵	۵۰/۵	۴۷	۴۸	۳۵/۵			
	۶		۵۱	۴۴	۴۶/۵	۴۱/۵	۵۶/۵	۴۷	۵۲	۳۷			
	۹		۶۱/۵	۴۷	۵۷	۴۵/۵	۶۷/۵	۴۶	۶۱	۳۷/۵			
	۱۲		۶۹	۴۸	۶۳/۵	۴۷/۵	۷۵	۴۴/۵	۴۵/۵	۳۸/۵			
	۱۵		۷۷/۵	۴۸	۷۱/۵	۴۹	۸۳/۵	۴۲/۵	۷۲	۳۸/۵			
	۱۸		۸۲/۵	۴۸/۵	۷۶	۵۰	۸۹/۵	۴۱/۵	۷۶	۳۹			

### ۳-۴ مقدار افت فشار قرائت شده روی لوله‌های پیزومتر توسط دستگاه تلفات انرژی به واسطه سیال مورد آزمایش (اتیلن گلیکول و آب)

آزمایش انجام گرفته به وسیله دستگاه اندازه‌گیری تلفات انرژی سیستم‌های لوله‌کشی از نظر اصطکاک تغییرات ابعادی و اتصالات با سیال مخلوط اتیلن گلیکول و آب (حجم سیال ۴ لیتر) انجام گرفته است. نتایج حاصل از افت فشار به واسطه‌ی آیت‌های اندازه‌گیری چشم‌گیر بوده. داده‌های به دست آمده حاکی از تغییرات دبی در جریان‌های مختلف باعث بروز بیشترین افت فشار در تغییرات ابعادی و همین‌طور اتصالات با دو خم زانویی ۴۵ مشاهده شده و همین‌طور افت فشار ناشی از اصطکاک درون لوله که با توجه به جنس لوله و ضریب اصطکاک به دست آمده از طریق دیاگرام مودی کمترین افت فشار را در این آزمایش دارا بوده است.

جدول ۳-۵ جدول داده‌های به‌دست آمده از آزمایش مخلوط سیال اتیلن‌گلیکول و نانوسیال دی‌اکسید

تیتانیوم

لیتر بر دقیقه	A1	A2	B1	B2	C1	C2	E1	E2	F1	F2	G1	G2	H1	H2
۳	۵۹	۵۲	۶۰	۵۷	۵۲	۴۸	۴۶	۴۴	۴۴	۴۲/۵	۵۰/۵	۴۸	۴۹	۳۵
۶	۶۳	۵۴	۶۶/۵	۵۵	۵۷/۵	۴۷	۵۴	۴۷	۴۸	۴۳	۵۵	۵۱	۵۲/۵	۳۵/۵
۹	۶۹	۵۵/۵	۷۲	۵۲	۵۹	۴۴/۵	۶۴/۵	۵۰	۵۷	۴۵	۶۷	۵۹	۵۸	۳۷
۱۲	۷۹	۵۶	۸۱	۵۰	۶۴/۵	۴۲	۷۰	۵۲	۶۲	۴۵	۷۳	۶۲	۶۲/۵	۳۷
۱۵	۸۵	۵۸	۸۸	۴۸	۷۰	۴۰/۵	۷۷	۵۳	۶۹/۵	۴۸	۷۹	۶۷/۵	۶۶/۵	۳۸/۵
۱۸	۸۸	۵۸/۵	۹۴	۴۶/۵	۸۱/۵	۳۸	۸۰	۵۸	۷۵	۵۳	۸۸	۶۹	۷۰/۵	۴۰/۵

جدول ۳-۶ جدول داده‌های به‌دست آمده از آزمایش مخلوط سیال اتیلن‌گلیکول و نانوسیال اکسید

آلومینیوم

لیتر بر دقیقه	A1	A2	B1	B2	C1	C2	H2	E1	E2	F1	F2	G1	G2	H1	H2
۳	۶۱	۵۹	۷۶	۷۲	۷۰	۶۰	۷۳	۶۷	۶۴	۶۴	۶۲	۷۰	۶۶	۷۶	۷۳
۶	۶۵	۵۸	۸۰	۶۸	۸۰	۶۲	۷۵	۷۴	۶۸	۷۲	۶۷	۷۸	۶۸	۸۲	۷۵
۹	۷۲	۶۳	۸۹	۶۹	۸۶	۵۹	۷۵	۸۱	۶۸	۷۸	۶۸	۸۵	۶۷	۸۷	۷۵
۱۲	۷۹	۶۲	۹۶	۶۵	۸۶	۴۹	۷۳	۸۶	۶۶	۸۲	۶۷	۹۱	۶۲	۹۵	۷۳
۱۵	۷۹	۵۶	۹۱	۵۱	۸۶	۴۲	۶۷	۸۷	۶۰	۸۲	۶۱	۹۲	۵۴	۹۰	۶۷
۱۸	۷۹	۵۲	۱۰۵	۴۹	۷۶	۷۱	۵۶	۸۵	۵۰	۷۸	۵۲	۸۹	۴۲	۸۵	۵۶

جدول ۷-۳ اختلاف فشار به‌وجود آمده

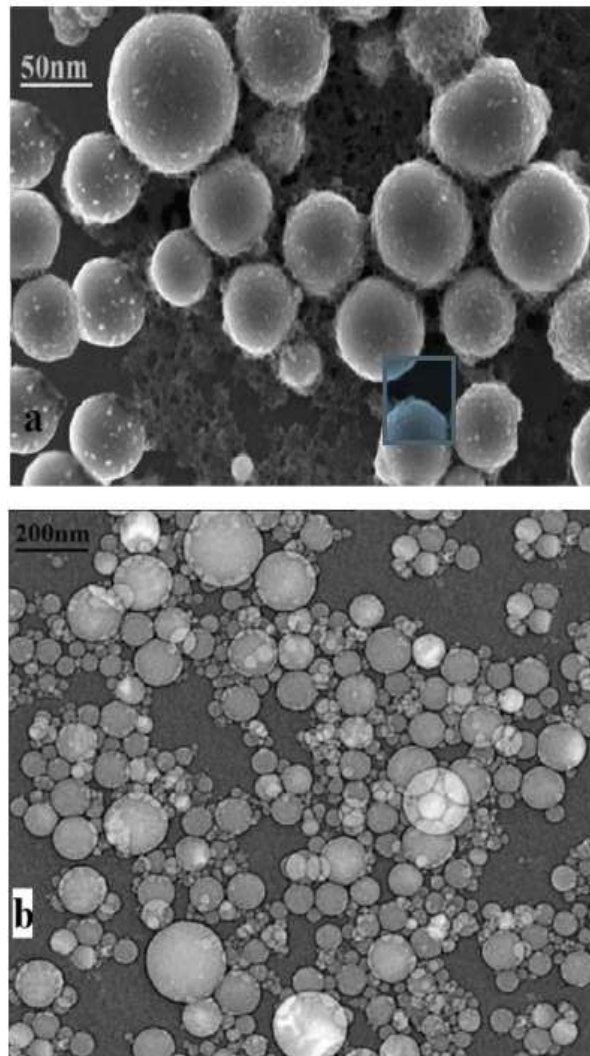
Lpm	A1/A2	B1/B2	C1/C2	E1/E2	F1/F2	G1/G2	H1/H2
۳	۲	۴	۱۰	۳	۲	۴	۳
۶	۷	۱۲	۱۸	۶	۵	۱۰	۷
۹	۹	۲۰	۲۷	۱۳	۱۰	۱۸	۱۲
۱۲	۱۷	۳۱	۳۷	۲۰	۱۵	۲۹	۱۷
۱۵	۲۳	۴۰	۴۴	۲۷	۲۱	۳۸	۲۳
۱۸	۲۷	۵۶	۵۸	۳۵	۲۶	۴۷	۲۹

در دستگاه‌ها و سیستم‌های مختلف امور از باز و بسته که به نوعی با جریان سیال در ارتباط هستند، عموماً لازم است که میزان سیال عبوری از یک محل اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری میزان جریان آب، نفت و گاز در لوله‌ها با کانال‌ها را می‌توان به عنوان نمونه‌های بارز برشمرد. روش‌های متنوع جهت اندازه‌گیری شدت جریان سیال یا دبی وجود دارد. شاید بتوان گفت که ساده‌ترین راه اندازه‌گیری دبی، سنجش حجم با وزن سیال عبوری در مدت زمان مشخص است. وسایل اندازه‌گیری شده است، جریان به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ جریان‌سنج‌های منقول، مانند جریان‌سنج price که معمولاً برای اندازه‌گیری شدت جریان در رودخانه‌ها و یا کانال‌ها به کار می‌رود و جریان‌سنج‌های غیرمنقول که در تأسیسات هیدرولیکی در مسیر جریان نصب می‌شوند؛ مانند سرریزها، کنتورهای آب، ونتوری متر، اوریفیس متر و روتامتر.

### ۳-۵ آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور تهیه نانوسیال‌ها به وسیله پخش کردن نانو ذرات در سیال پایه، نیاز به مخلوط مناسب و تثبیت ذرات مورد نیاز می‌باشد. اساساً، سه روش مختلف برای دست یافتن به پایداری و تثبیت نانوسیال‌ها، در دسترس می‌باشد. این روش‌ها به این شرح لیست شده است: (۱) اسیدی نمودن سیال پایه، (۲) اضافه نمودن روان کننده و پخش کننده، (۳) استفاده از ارتعاشات فراصوتی. هدف همه این تکنیک‌ها تغییر خصوصیات سطحی یک سیستم و جلوگیری از ته نشینی به منظور دست یافتن به یک سوسپانسیون پایدار می‌باشد. در مطالعه فعلی، نانوذراتی  $Al_2O_3$  در اندازه‌های ۲۰-۲۲ nm با آب مقطر و تثبیت کننده‌ها مخلوط گردیده و سپس به صورت مداوم به وسیله ویبراتور فراصوت (توشیبا، هند) که پالس‌های فراصوت ۱۰۰ وات را در  $36 \pm 3 \text{ kHz}$  و به مدت ۵ ساعت جهت شکستن توده‌ها و انباشتگی‌های نانوذرات تولید می‌نماید، قبل از اینکه در سیال عامل مورد استفاده قرار گیرد، سونیکیت می‌نماید. غلظت حجمی مطلوب در این مطالعه بین ۰/۲ و ۱ بود. مقدار pH سیال‌ها نشان داد که شیمی محلول‌ها، تقریباً خنثی می‌باشد. برای هر تست یک نانوسیال جدید محیا گردیده و بلافاصله مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی ثبات انتشار نانوسیال‌ها، چگالی برخی از نمونه‌های نانوسیال قبل و بعد از انجام تست آزمایشگاهی، اندازه‌گیری گردید. هیچ گونه تفاوت قابل توجهی در چگالی اندازه‌گیری شده مشاهده نشد. توزیع نانو ذرات اصلی  $Al_2O_3$  در مقیاس نانو را می‌توان توسط یک میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و SEM مشاهده نمود.

شکل (۳-۴) a، تصاویر SEM از  $Al_2O_3$  را هنگامی که جریان در ۷۵ A تنظیم شده بود را نشان می‌دهد.

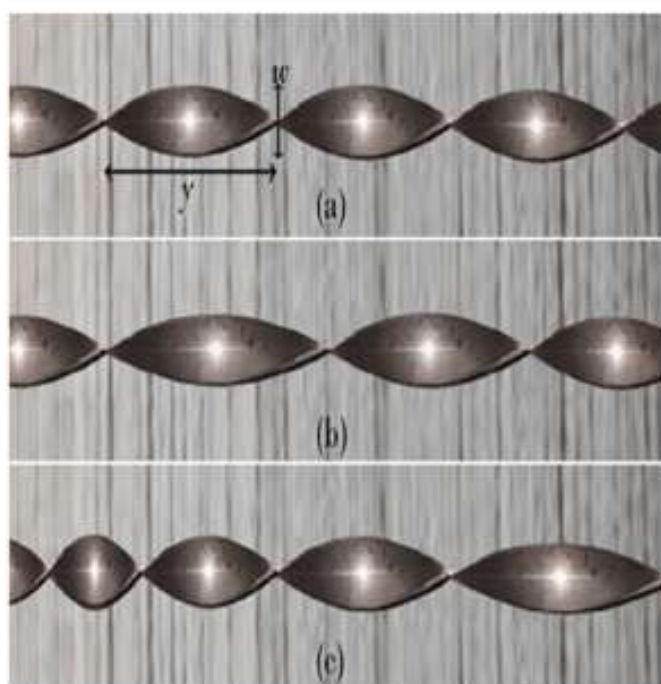


شکل ۳-۴ (a) تصویر SEM از ذرات  $Al_2O_3$  (b) تصویر TEM از ذرات  $Al_2O_3$  (۸۷).

اندازه تقریبی ذرات  $Al_2O_3$  تولید شده، مستقیماً از تصاویر SEM به‌وسیله سیستم اندازه‌گیری اپتیکی میدفان پروتک ۲۵۰۰، اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، نانو ذرات تولید شده که در شکل (۳-۴) نشان داده شد، گردی خوبی داشته و اندازه آن نیز یکنواخت است. شکل (۳-۴) b تصویر TEM از سوسپانسیون نانو ذرات می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-۴) b نشان داده شده است، نانو ذرات  $Al_2O_3$  که به‌وسیله سیستم ترکیب پیشنهادی تهیه گردید، نشان‌دهنده پخش خوب نانو ذرات با اندازه میانگین ۲۰-۲۲ nm می‌باشد. برای این آزمایش، رابطه جریان به سمت نانو ذرات را می‌توان به‌وسیله جریان‌های مختلف، تحلیل نمود.

## ۶-۳ نوارهای پیچ خورده

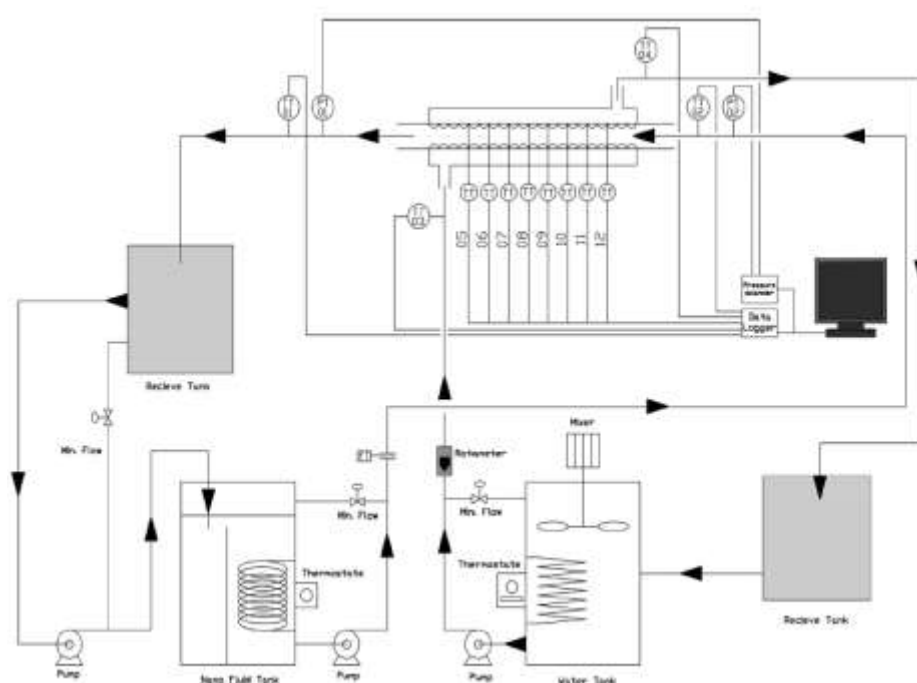
جنس نوارهای پیچ خورده آلومینیوم بوده که ضخامت آن (d) ۰/۸ mm، عرض آن (W) ۴۸mm و طول آن ۸۰۰ mm می باشد. ضخامت ۰/۸ mm به منظور اجتناب از اصطکاک اضافی در سیستم که ممکن است به وسیله ضخامت نوار حادث گردد، انتخاب گردید. جهت تولید نوارهای پیچ خورده اصلاح شده، پیچ خوردگی های نوعی به وسیله تغییر نسبت پیچ خوردگی و نسبت تصاعد هندسی در سرتاسر پیچ خوردگی، تغییر داده شد. نسبت پیچ خوردگی به عنوان طول پیچ خوردگی به عرض نوار (w) در نظر گرفته می شود. نسبت تصاعد هندسی، نسبت طول های pitch در سرتاسر پیچ خوردگی می باشد. این نوارها در هفت نسبت تصاعد هندسی (GPR) مختلف، به ترتیب ۲، ۱/۵، ۱/۲، ۱، ۰/۸۵، ۰/۷۵ و ۰/۶۰ تهیه گردید. در حالی که پیچ خوردگی های با GPR کمتر از یک (GPR کاهشدهنده) در سرتاسر طول خود (RGPR) کوتاه شدند، پیچ خوردگی های با GPR بزرگ تر از یک (GPR افزایشدهنده) در سرتاسر طول خود (IGPR)، درازتر گردیدند. جزئیات هندسی نوارها در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ هندسه ها (a) نوار پیچ خورده نوعی (b) نوارهای پیچ خورده (c) IGPR نوارهای پیچ خورده RGPR (۸۷).

### ۳-۷ روش و ساختار آزمایشگاهی انتقال گرما

آزمایش بررسی خصوصیت انتقال گرمای نانوسیال، با استفاده از ابزار آزمایشگاهی که در شکل (۳-۶) نشان داده است، صورت پذیرفت. آن عموماً شامل یک بخش تستی، مخزن‌های دریافت‌کننده که در آن سیال‌های عامل ذخیره می‌شوند، سیستم سرمایشی و گرمایشی، دما، حسگر جریان، دوارسنج (روتامتر)، سیستم اندازه‌گیری فشار و سیستم اکتساب داده‌ها می‌باشد. سیال‌های عامل در چرخه به‌وسیله پمپ‌های با سرعت متغیر که دارای ظرفیت مناسبی می‌باشند، به چرخش درآمده شد. طول قسمت تست، ۱/۵ میلی‌متر، با مسیر جریان مخالف در داخل مبدل گرمایی با لوله‌های دوگانه افقی که در آن نانوذره داغ در داخل لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌باشد در حالی که آب خنک‌کننده به لوله بیرونی هدایت می‌شود. لوله داخلی از مس نرم ساخته شده و دارای قطر داخلی و خارجی ۵۰ mm و ۶۰/۲ mm بوده در حالی که جنس لوله بیرونی فولاد ضدزنگ، با قطر داخلی ۷۴/۲ mm و ضخامت دیواره لوله آن ۶ mm می‌باشد. این بخش به‌منظور به حداقل رساندن اتلاف‌های گرما به محیط، به‌وسیله لوله‌های پلاستیکی ایزوله گردید. از ۱۰ ترموکوپل نوع T با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$  در سرتاسر دیواره لوله داخلی و در فواصل یکسان به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات دما در محیط لوله، استفاده گردید.



شکل ۳-۶ نمای شماتیک از ساختار آزمایشگاهی [۸۷].

تمامی ترموکوپل‌ها قبل از نصب، کالیبره و تنظیم شدند. دمای ورودی و خروجی سیال‌ها به وسیله RTD کالیبره و اندازه‌گیری گردید. همه داده‌های دما به وسیله دیتالاگر ضبط گردید. جهت اندازه‌گیری افت فشار در سرتاسر بخش تست، فرستنده فشار تفاضلی در نوار فشار که در ورودی و خروجی آن بخش قرار دارد، نصب گردید. نرخ جریان نانوسیال به وسیله یک سنسور جریان مغناطیسی که در ورودی بخش تست قرار گرفته، اندازه‌گیری گردید.

برای هر بخش از تست، ضبط داده‌های دما، نرخ‌های جریان حجمی و افت فشار در سرتاسر آن بخش و در شرایط حالت یکنواخت، ضروری می‌باشد. دو مخزن ذخیره که جنس آن از فولاد ضدزنگ بوده و دارای حجم ۵۰ لیتر می‌باشد، جهت جمع‌آوری سیالاتی که بخش تست را ترک می‌کنند، استفاده گردید. ظرفیت مخزن خنک‌کننده ۴/۵ kw بوده که جهت ثابت نگه‌داشتن دمای آب دارای یک ترموستات می‌باشد. استفاده از ترموستات باعث می‌شود که سریع‌تر به شرایط حالت پایدار برسیم. دما آب ورودی در محدوده  $25^{\circ}\text{C}$  نگه‌داشته شد و نرخ جریان آب به صورت ثابت در ۵۰۰ l/hr حفظ گردید. مشابه تانکر خنک‌کننده، یک گرم‌کننده الکترونیکی با یک ترموستات جهت ثابت نگه‌داشتن دمای نانوسیال در دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد، نصب گردید. نانوسیال داغ از مخزن سیال از طریق لوله داخلی که دارای نوارهای پیچ خورده در اعداد رینولدز مختلف بین ۵۰۰ و ۲۱۰۰۰ می‌باشد، پمپ گردید. جهت حصول اطمینان از شرایط حالت یکنواخت برای هر مرحله، یک دوره حدوداً ۲۰-۳۰ دقیقه مبتنی بر اعداد رینولدز و نوارهای پیچ خورده، قبل از رکورد داده در نظر گرفته شد.

پس از آماده‌سازی چیدمان آزمایش، مخازن ذخیره از سیال‌های عامل پر گردید. آزمایش‌های اولیه‌ای در ارتباط با اعتبارسنجی سیستم صورت پذیرفت. این امر به وسیله آب و نانوسیال آب- $\text{Al}_2\text{O}_3$  با نوارهای پیچ خورده و بدون آن انجام گردید. علاوه بر این خصوصیات گرمایی فیزیکی نانوسیال نیز ارزیابی گردید.

## فصل چهارم

### یافته‌های پژوهش

## ۴-۱ مقدمه

### ۴-۱-۱ ارزیابی خواص ترموفیزیکی

اندازه‌گیری خصوصیات گرمایی فیزیکی سیال (چگالی، گرمای ویژه، چسبندگی و رسانایی گرمایی) برای استفاده در کاربردهای عملی، مورد نیاز می‌باشد. همبستگی‌های مناسبی جهت ارزیابی چگالی نانوسیالات به‌وسیله پک و چو [۸۸] ارائه گردیده که با رابطه (۴-۱) تعریف می‌گردد:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{bf} \quad (4-1)$$

گرمای ویژه به‌وسیله معادله ژوان و روتزل [۸۹] محاسبه گردید:

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi (\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi) (\rho C_p)_{bf} \quad (4-2)$$

رسانایی گرمایی در غلظت‌های حجمی مختلف نانوسیال  $Al_2O_3$  با استفاده از رساناسنج گرمایی سریع QTM-500 که به‌وسیله KEM ژاپن تحت شرایط یکنواخت عرضه گردیده، اندازه‌گیری گردید. داده آزمایشگاهی به‌دست آمده از رسانایی گرمایی با آن‌هایی که از مدل‌های نظری معروف تخمین زده شده‌اند مقایسه گردیده و در شکل ۴-۱ نیز نشان داده شده است. مدل‌هایی که برای محاسبه رسانایی گرمایی جهت مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند با رابطه (۴-۳) شرح داده می‌شود.

(a) مدل مکسول

$$K_{nf} = K_w \left[ \frac{1 + 2\varphi \left( \frac{1 - \frac{K_w}{K_{np}}}{2 \frac{K_w}{K_{np}} + 1} \right)}{1 - \varphi \left( \frac{1 - \frac{K_w}{K_{np}}}{\frac{K_w}{K_{np}} + 1} \right)} \right] \quad (4-3)$$

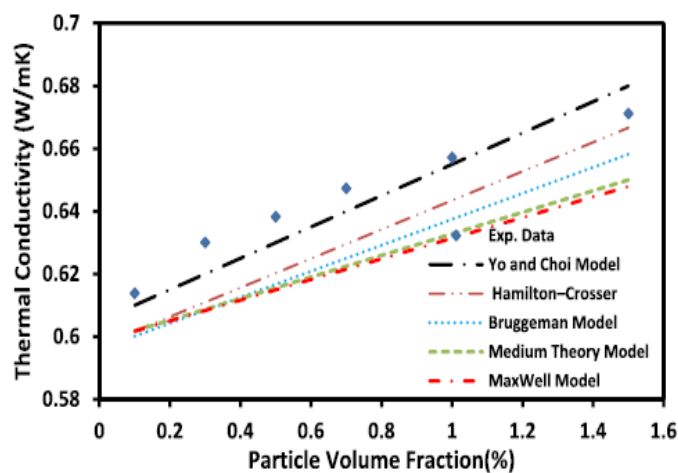
که در آن  $K_{nf}$  رسانایی گرمایی نانوسیال بوده،  $K_{np}$  رسانایی گرمایی نانو ذرات و  $K_w$  رسانایی گرمایی سیال پایه می‌باشد.

(b) مدل همیلتون - کراس که می‌توان آن را با رابطه (۴-۴) بیان نمود [۹۰]:

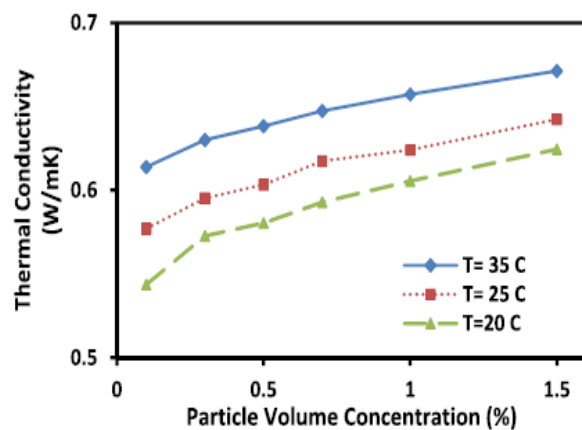
$$K_{nf} = K_w \left[ \frac{K_{np} + (n-1)K_w - \phi(n-1)(K_w - K_{np})}{K_{np} + (n-1)K_w + \phi(K_w - K_{np})} \right] \quad (4-4)$$

$$n = 3/\Psi$$

که در آن  $n$  عامل شکلی بوده و  $\Psi$  کرویت بوده که به عنوان محدوده سطحی یک کره با یک حجمی برابر با میانگین محدوده سطحی ذره می باشد.



(a)



(b)

شکل ۴-۱ (a) مقایسه رسانایی گرمایی بین داده اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده از سایر همبستگی ها. (b) رسانایی گرمایی به عنوان تابعی از دما و بخشی از حجم.

(c) مدل یو و چوی که می توان آن را به صورت رابطه (۴-۵) بیان نمود [۹۱]:

$$K_{nf} = \left[ \frac{K_{np} + 2K_w - 2\phi(1 + \beta)^3(K_w - K_{np})}{K_{np} + 2K_w + \phi(1 + \beta)^3(K_w - K_{np})} \right] \quad (4-5)$$

در این همبستگی،  $\beta$  نسبت ضخامت نانو لایه به شعاع ذره اصلی که معمولاً به عنوان ۰/۱ جهت محاسبه رسانایی گرمایی نانوسیال در نظر گرفته می شود.

(d) مدل بروگمن [۹۲]:

$$K_{nf} = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)K_{np} + (2 - 3\phi)K_w] + \frac{K_w}{4}\sqrt{\Delta} \quad (4-6)$$

$$\Delta = \left[ (3\phi - 1)^2 \left( \frac{K_{np}}{K_w} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left( \frac{K_{np}}{K_w} \right) \right]$$

(e) نظریه میانی مؤثر که به وسیله تیموفیوا و همکارانش معرفی گردید [۹۳]:

$$K_{nf} = [1 + 3\phi]K_w \quad (4-7)$$

از لحاظ چسبندگی، نانوسیالی که در این مطالعه استفاده گردیده، رفتار رئولوژی غیرنیوتنی برش باریک را از خود نشان داد. برای این سیال ها مرسوم است که رابطه بین تنش برشی و نرخ برش از لحاظ حرکت دوبعدی را با رابطه (۴-۸) تعریف نمود [۹۴]:

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (4-8)$$

که در آن  $\eta$  چسبندگی غیرنیوتنی می باشد. برای سیال نیوتنی  $\eta = \mu$  می باشد. بسیاری از روش های تجربی برای چسبندگی غیرنیوتنی با تابع  $\eta$  پیشنهاد شده است. ساده ترین روش برای  $\eta$ ، قانون توان دو پارامتری مدل استوالد- دوال برای یک سیال غیرنیوتنی برش باریک می باشد [۹۴]:

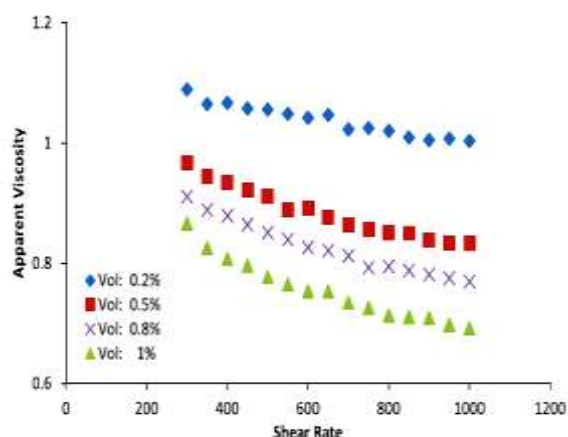
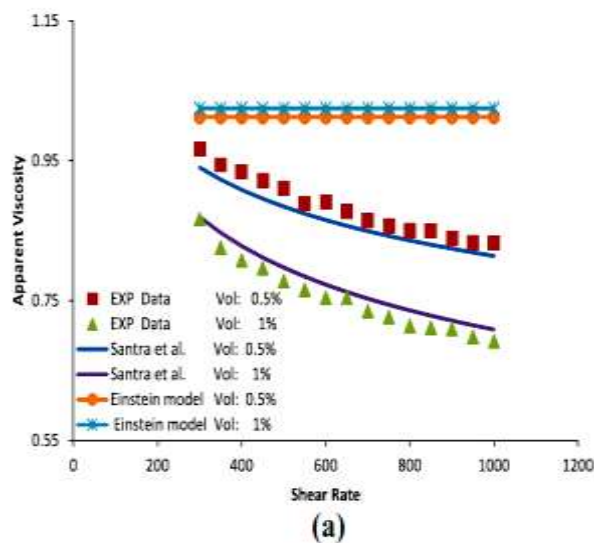
$$\eta = m\gamma^{n-1} \quad (4-9)$$

که در آن  $m$  و  $n$  ثابت هایی از مشخصه های سیال بوده و بستگی به نوع نانوسیالی که مورد استفاده قرار گرفته است دارد. در اینجا  $m$  شاخص ثبات جریان با واحدهای  $N M^{-2}$  می باشد.  $S^n$  و  $n$  شاخص رفتار جریان ( $n$ ) می باشد. به صورت کلی، غلظت نانو ذرات نمی تواند، به شدت شاخص رفتار جریان را که در آن رابطه به سمت دما معطوف گردیده تحت تأثیر قرار دهد و هنگامی که دما افزایش می یابد، افزایش می یابد. می توان آن را به این حقیقت

نسبت داد که افزایش دما، فاصله بین سلولی را افزایش داده و فعل و انفعال بین سلول‌ها را کاهش می‌دهد. شاخص ثبات جریان، رفتار کاملاً متفاوتی را در ارتباط با دما و تغییر غلظت از خود نشان می‌دهد. هنگامی که دما کاهش می‌یابد و کسر حجمی افزایش می‌یابد، آن نیز افزایش می‌یابد. دلیل مورد اول با انرژی بالاتر مولکول‌ها و فاصله بین مولکولی در دماهای بالاتری که منجر به این می‌شود تأثیرات مولکول‌ها بر همدیگر کاهش یابد، مرتبط است. دلیل مورد اول را می‌توان به فعل و انفعال بین نانو ذرات و مولکول‌های آب نسبت داد [۹۵]. مقدار  $\gamma$  که در اینجا مثبت در نظر گرفته می‌شود، نرخ برش خوانده می‌شود. باید توجه نمود که برای یک سیال برش باریک، مقدار  $n$  کمتر از یک می‌باشد [۹۴].

رئومتر (شارش شناس)  $DV3T$  (عرضه شده توسط بروک فیلد) با دقت  $\pm 0.1\%$  از دامنه و تکرارپذیری  $\pm 0.2\%$  جهت بررسی رفتار روان‌شناسی (رئومتری)  $Al_2O_3$  به کار گرفته شد. حمام دمای ثابت که به رئومتر متصل شده بود، دما را کنترل نمود. حداقل ۸ اندازه‌گیری در غلظت‌های مورد نظر، صورت پذیرفته و یک مقدار میانگین جهت بررسی پارامترها محاسبه گردید. تا جایی که اطلاع داریم، تنها سانترا و همکارانش [۹۶] به صورت آزمایشگاهی رابطه بین تنش برشی و نرخ برش برای نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب را ارائه نمودند. با استفاده از این داده، سانترا و همکارانش، مقادیر  $m$  و  $n$  را برای  $0.5\%$  تا  $5\%$  از کسر حجمی جامد را محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها برای معتبر نمودن نتایج آزمایشگاهی کسب شده مورد استفاده قرار گرفته است. این نتایج به همراه مقادیری که از مطالعه سانترا و همکارانش و معادله انیشتین گرفته شد در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. معادله انیشتین جهت محاسبه چسبندگی، که رای ذرات کروی در کسرهای حجمی کمتر از  $5\% vol.$  قابل استفاده است، با رابطه (۴-۱۰) تعریف می‌شود:

$$\mu_{rapp} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_w} \quad (4-10)$$



شکل ۴-۲ (a) مقایسه چسبندگی بین داده اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده از همبستگی های دیگر.  
(b) چسبندگی به عنوان نرخ برش و کسر حجمی

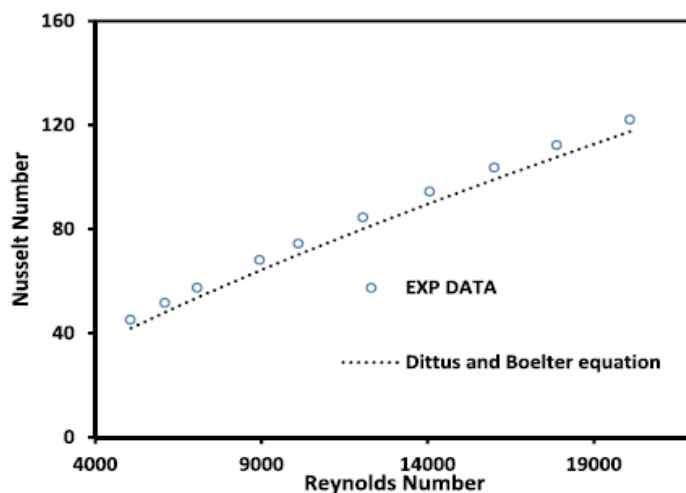
## ۴-۲ کاهش داده ها

در مطالعه حاضر، نانو ذرات  $Al_2O_3$  با غلظت های حجمی ۰/۳٪، ۰/۵٪ و ۰/۷٪ در آب پخش شدند. در طی تست، آب سرد گرما را از نانوسیال داغ جذب نمود. نرخ انتقال گرما از سیال گرمایشی، از طریق رابطه (۴-۱۱) محاسبه گردید:

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p_{nf}} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (4-11)$$

که در این معادله  $Q_{nf}$  نرخ انتقال گرمای نانوسیال و  $\dot{m}_{nf}$  نرخ انتقال جرم نانوسیال می باشد. نرخ انتقال گرما به آب سرمایشی از طریق رابطه (۴-۱۲) محاسبه گردید:

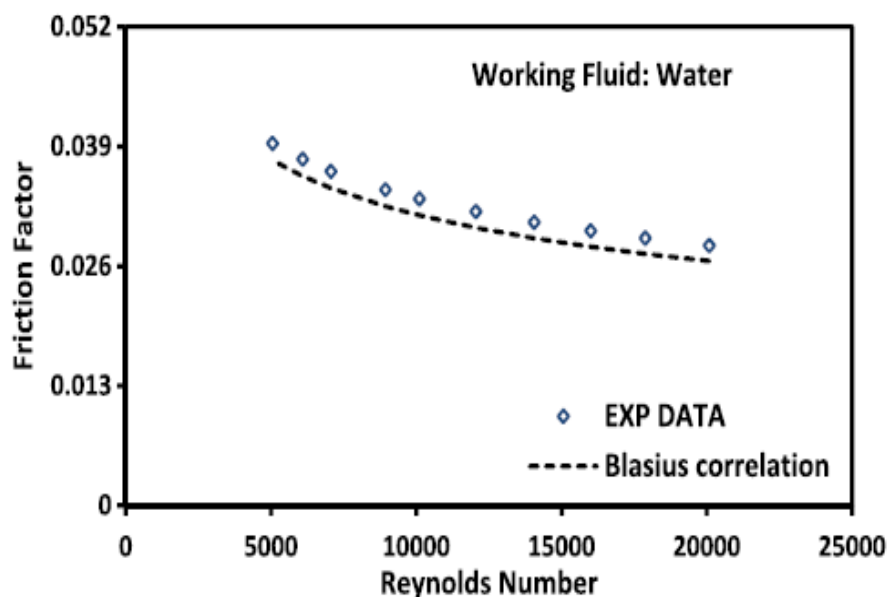
$$Q_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{out} - T_{in})_w \quad (4-12)$$



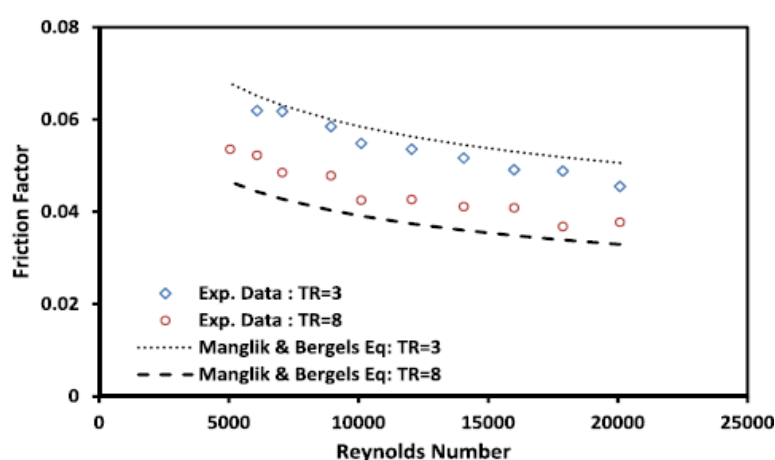
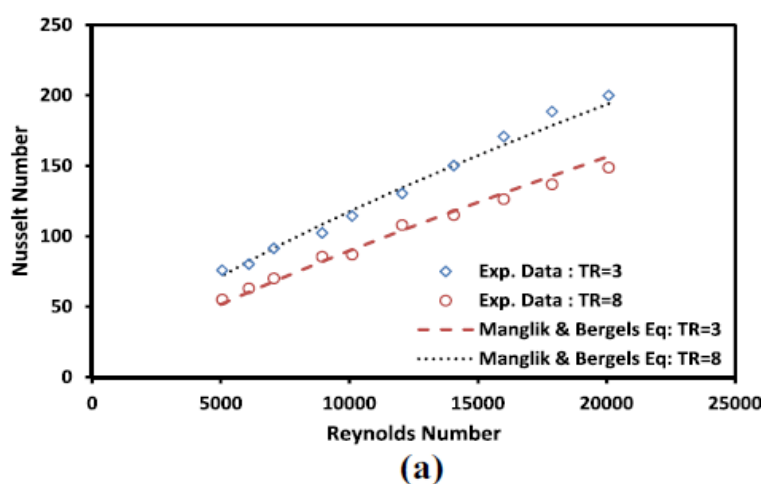
شکل ۳-۴ اعتباربخشی داده آزمایشگاهی لوله ساده برای عدد ناسلت

در این مطالعه به این نتیجه رسید که گرمای فراهم شده به وسیله نانوسیال ۳٪ بالاتر از گرمای دریافت شده بود. این انحراف را می توان به وسیله انتقال گرمای همرفت و اتلاف گرمای تشعشع در طی بخش تست تفسیر نمود. میانگین نرخ انتقال گرما به صورت رابطه (۴-۱۳) است:

$$Q_{ave} = \frac{Q_w + Q_{nf}}{2} \quad (4-13)$$



شکل ۴-۴ اعتباربخشی لوله ساده با آب برای عامل اصطکاک



شکل ۴-۵ اعتباربخشی لوله ساده با نوارهای پیچ خورده و آب: (a) عدد ناسلت و (b) عامل اصطکاک

مقدار میانگین ضریب انتقال گرمای آزمایشگاهی و میانه عدد ناسلت نانوسیال، با رابطه

(۴-۱۴) و (۴-۱۵) ارزیابی می‌شود:

$$h_{nf} = \frac{q_{ave}}{\bar{T}_{wall} - T_{bnf}} \quad (4-14)$$

$$NU_{nf} = \frac{h_{nf} D}{K_{nf}} \quad (4-15)$$

که در اینجا  $\bar{T}_{wall}$  میانه دماهای سطح دیواره می‌باشد که به‌وسیله ۱۰ ایستگاه که بین ورودی و خروجی لوله تست به صف شده‌اند اندازه‌گیری گردید.

$$\bar{T}_{wall} = \sum \frac{T_{wall}}{10} \quad (4-16)$$

که در اینجا  $T_{wall}$  دمای دیواره محلی می‌باشد.

میانه دمای توده نانوسیال  $T_{b,nf}$  می‌باشد:

$$T_{b,nf} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (4-17)$$

حالت جریان را می‌توان از اعداد رینولدز، بر اساس نرخ جریان در ورودی لوله تست تعریف نمود. برای سیال غیرنیوتنی کاملاً چسبناک، عدد رینولدز با رابطه (4-18) تعریف می‌شود:

$$RE = \frac{\rho_{nf} v_{nf}^{2-n} d_i^n}{m \gamma^{n-1}} \quad (4-18)$$

که در اینجا  $v_{nf}$  میانگین سرعت نانوسیال و  $d_i$  قطر لوله می‌باشد. عامل اصطکاک را می‌توان از رابطه (4-19) محاسبه نمود:

$$F_{nf} = \frac{\Delta P_{nf}}{(L/d_i) \rho_{nf} (v_{nf}^2/2)} \quad (4-19)$$

که در آن  $F_{nf}$  عامل اصطکاک،  $\Delta P_{nf}$  افت فشار اندازه‌گیری شده نان سیال و  $L$  طول لوله می‌باشد.

عدد پرندل و عدد پکلت را می‌توان از طریق رابطه (4-20) ارزیابی نمود:

$$Pr_{nf} = \frac{m \gamma^{n-1}}{K_{nf}} \quad (4-20)$$

$$Pe_{nf} = \frac{v_{nf} d_p}{\alpha_{nf}} \quad (4-21)$$

که در این معادله  $d_p$  قطر نانو ذرات و  $\alpha_{nf}$  ضریب پخش گرمایی نانوسیال می‌باشد. تحلیل ارزیابی عملکرد ( $\eta$ ) به عنوان ضریب انتقال گرمای همرفتی ارتقاء یافته ( $h_E$ ) به گونه غیرارتقاء یافته آن ( $h_{NE}$ ) در توان پمپ یکسان تعریف می‌گردد.

$$\eta = \frac{h_E}{h_{NE}} \quad (4-22)$$

این پارامتر مربوط به هزینه عملیات و ذخیره انرژی می‌باشد.

### ۳-۴ تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

یک تجزیه و تحلیل دقیق عدم قطعیت جهت تخمین خطاهای مرتبط با آزمایش‌هایی که از روش کلمن و استیل استفاده می‌نمایند ایجاد گردید.

عدم قطعیت‌های فردی مرتبط با ابزارهای مختلفی که در آزمایش حضور دارند، در ابتدا جهت محاسبه حداکثر خطای ممکن در عدد رینولدز، عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک، ارزیابی گردید. به این نتیجه رسیده شد که حداکثر عدم قطعیت عدد ناسلت، عدد رینولدز و فاکتور اصطکاک به ترتیب  $\pm 0.26\%$ ،  $0.14\%$  و  $0.24\%$  می‌باشد. جزئیات بیشتر در ارتباط با عدم قطعیت را می‌توان در بخش (۵-۱) یافت.

## ۴-۴ نتایج و بحث

قبل از ارزیابی نانوسیال  $Al_2O_3$  و عملکرد نوارهای پیچ خورده اصلاح شده، قابلیت اطمینان امکانات آزمایشگاهی به وسیله انجام آزمایش‌هایی با نانوسیال و نوار پیچ خورده و بدون آن‌ها تأیید گردیده، سپس نتایج تحقیق با نتایج ارائه شده در همبستگی‌های معروف، تحت یک شرایط یکسان، مقایسه گردید.

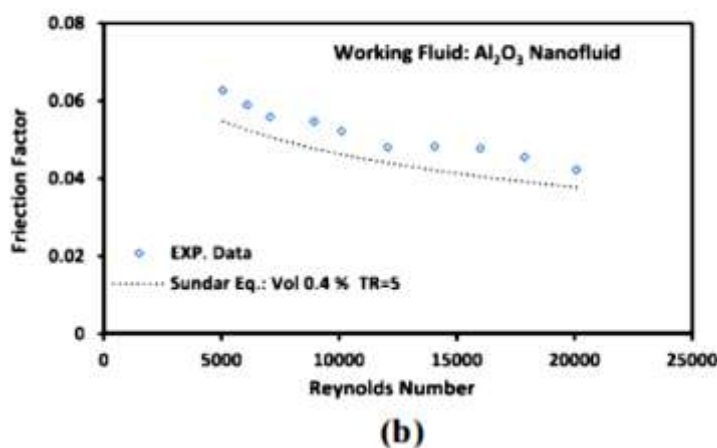
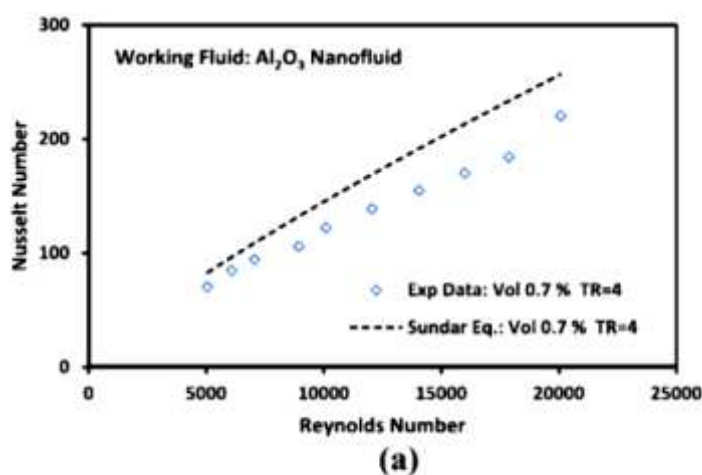
### ۴-۴-۱ رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها

به منظور اعتبار دادن به داده آزمایشگاهی رسانایی گرمایی به دست آمده از  $QTM$ ، رسانایی گرمایی نانوسیال در دمای  $35^\circ C$  درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های حجمی مختلف در یک حالت یکنواخت، اندازه‌گیری شد. داده آزمایشگاهی در شکل (۴-۱-a) به همراه مقادیر محاسبه شده از همبستگی‌ها و روش‌های معروف بیان شده، نشان داده شد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، نتایج، مطابقت خوبی بین مقدار اندازه‌گیری شده و مدل یو و چوی را نشان می‌دهد. هرچند، نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شده کمی بزرگ‌تر از پیش‌بینی‌های مدل‌های دیگر می‌باشد. شکل (۴-۱-b) مقدار آزمایشگاهی رسانایی گرمایی نانوسیال  $Al_2O_3$  را به عنوان تابعی از دما و غلظت حجمی نشان می‌دهد. می‌توان یافت که افزایش دما و غلظت حجمی نانوذره‌ها، به صورت قابل توجهی رسانایی گرمایی نانوسیال را افزایش خواهد داد.

### ۴-۴-۲ ویسکوزیته‌ی نانوسیال

جهت معتبر نمودن ابزار  $ATS$  جهت اندازه‌گیری چسبندگی نانوسیال، نتایج به دست آمده در نرخ‌های برشی مختلف با نتایج سانترا و همکارانش [۹۶] مقایسه گردید. شکل (۴-۲-a) مقایسه داده ارزیابی شده را با مدل پیش‌بینی ارائه شده، نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، نتایج آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه‌شده‌ی نتایج سانترا و همکارانش، تطابق

نزدیکی دارد. هرچند، انحرافی بین نتایج اندازه‌گیری شده و نتایج پیش‌بینی شده مدل انیشتین وجود دارد زیرا فرض چسبندگی سیال خطی حاصل نگردید. همان‌طور که در شکل (۴-۲-۲) نشان داده شده است، نتایج نشان داد که چسبندگی نانوسیال‌ها با افزایش غلظت حجمی ذره افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش نرخ برش نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶- تأیید تیوب صفحه‌ای با نوارهای پیچانیده و نانوسیال: (a) عدد ناسلت و (b) فاکتور اصطکاک

### ۳-۴-۴ آزمون تأیید با آب

جهت تأیید امکانات سیستم و اعتبار روش، آزمایش‌هایی با آب و با استفاده از لوله خالی در اعداد رینولدز هدف، در حالت آشفته انجام شد. صلاحیت عملکرد نرخ انتقال گرمای سیستم با مقایسه نتایج این تحقیق و نتایج حاصل از معادله دیتوس و بولتر [۹۷] برای آب معتبر گردید. این همبستگی‌ها به شرح ذیل تعریف گردید:

معادله دیتوس و بولتر:

$$Nu = 0.04Re^{0.75}Pr^{0.4} \quad (4-23)$$

جهت مقایسه فاکتور اصطکاک، از همبستگی بلاسیوس برای آب مورد استفاده قرار گرفت:

معادله بلاسیوس:

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (4-24)$$

همان‌طور که در اشکال (۳-۴) و (۴-۴) نشان داده شده است، داده به دست آمده از آزمایش‌ها، مطابقت معقولانه خوبی با نتایج حاصل از همبستگی‌های اشاره شده برای هر دو اعداد ناسلت و فاکتور اصطکاک برای حالت جریان آشفته دارد. انحراف‌های داده آزمایشگاهی ارزیابی شده از مقادیر همبستگی برای عدد ناسلت ۵٪ و برای عامل اصطکاک از لحاظ تھی از آب، ۱٪ می‌باشد.

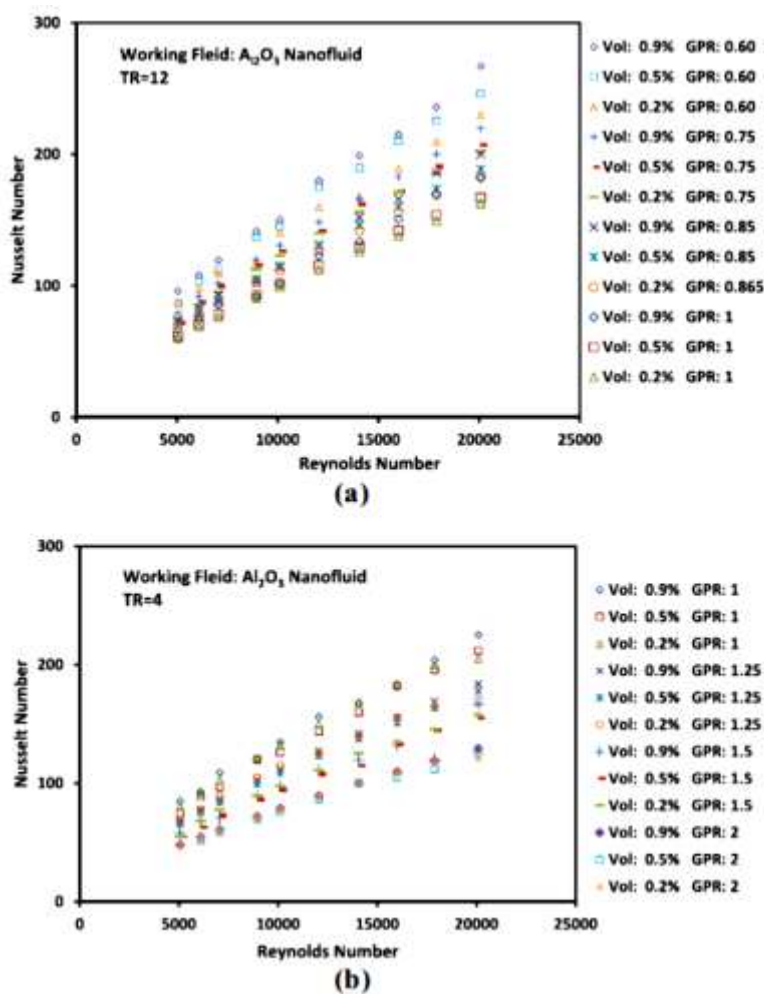
#### ۴-۴-۴ آزمون تأیید مربوط به نوار پیچانیده شده

جهت بررسی روش آزمایشگاهی با استفاده از نوارهای پیچ خورده، تست‌های بدون آب و سیال  $Al_2O_3$ ، در دو نسبت پیچش مختلف انجام شد و نتایج همان‌طور که در اشکال (۴-۵) و (۴-۶) نشان داده شده است با نتایج همبستگی پیش‌بینی شده مقایسه گردید. همبستگی‌های مورد بررسی برای عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک تک‌مرحله‌ای همانند آب، توسط مانگلیک و برگلز [۹۸] برای لوله ساده که داری نوار پیچ خورده است، در یک جریان آشفته با رابطه‌های (۴-۲۵) و (۴-۲۶) پیشنهاد شد:

$$Nu = \left( 1 + \frac{0.769}{\left( \frac{y}{w} \right)} \right) \times \left[ 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \left( \left( \frac{\pi}{\pi - \left( \frac{4\delta}{d_i} \right)} \right)^{0.8} \left( \frac{\pi + 2 - \left( \frac{2\delta}{d_i} \right)}{\pi - \left( \frac{4\delta}{d_i} \right)} \right)^{0.2} \right) \right] \quad (4-25)$$

$$f = \left( 1 + 2.06 \left( 1 + \left( 2 \frac{y}{W} \right)^2 \right)^{-0.74} \right) \times \left[ 0.079 \text{Re}^{-0.25} \left( \frac{\pi}{\pi - \left( \frac{4\delta}{d_i} \right)} \right)^{1.75} \left( \frac{\pi + 2 - \left( \frac{2\delta}{d_i} \right)}{\pi - \left( \frac{4\delta}{d_i} \right)} \right)^{1.25} \right] \quad (4-26)$$

عدد ناسلت آزمایشگاهی و فاکتور اصطکاک نانوسیال برای جریان در یک لوله با نوارهای پیچ خورده، با مقادیر پیش‌بینی شده توسط همبستگی‌های سیام ساندر و شارما [۹۸] با فرض اینکه نانوسیال به‌عنوان یک سیال تک فاز عمل می‌نماید مقایسه گردید:

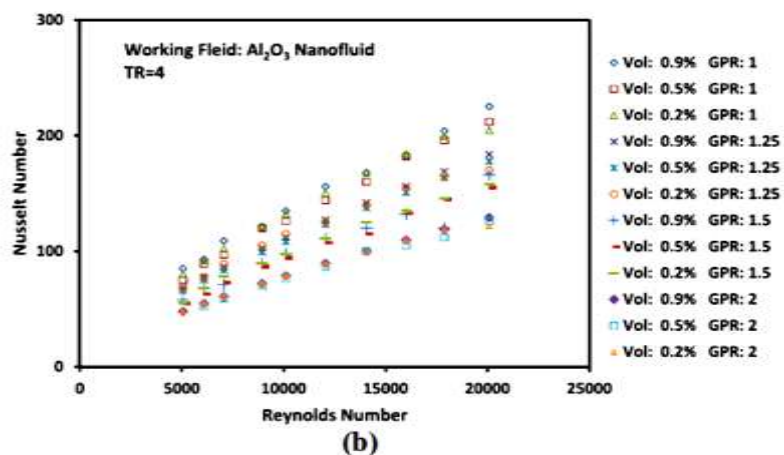
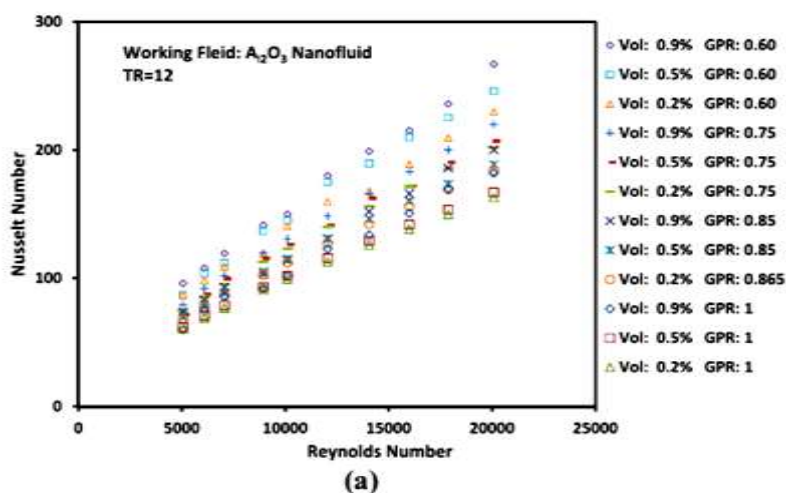


شکل ۴-۷ اثر نرخ تصاعد هندسی مربوط به عدد ناسلت (a) RGPR، (b) IGPR

روابط مربوطه با فرض اینکه نانوسیال مانند یک مایع تک فاز عمل کند، به صورت رابطه (۲۷-۴) و (۲۸-۴) می باشد:

$$Nu = 0.0366 Re_{nf}^{0.8204} Pr_{nf}^{0.4} \left( 0.001 + \frac{H}{D} \right)^{0.06281} (0.001 + \varphi)^{0.04704} \quad (27-4)$$

$$f = 2/068 Re_{nf}^{-0.04330} (1 + \varphi)^{0.01} \left( 1 + \frac{H}{D} \right)^{0.004815} \quad (28-4)$$



شکل ۴-۸ تأثیر نسبت تصاعد هندسی بر عدد ناسلت (a) RGPR (b) IGPR

همان گونه که در شکل (۴-۵) و (۴-۶) مشاهده می شود، داده های به دست آمده از آزمایش ها دارای توافقی مطلوبی با داده های به دست آمده از روابط مربوط به آب می باشند اما اندکی از مقادیر تخمین زده شده برای نانوسیال های با نوارهای به هم پیچیده، متفاوت است. انحراف داده های تجربی ارزیابی شده از مقادیر همبستگی  $0.6/2\%$  عدد ناسلت و  $0.12\%$  فاکتور

اصطکاک مربوط به آب در نوارهای به هم پیچیده است. این مقدار در مورد نانوسیال‌های آلومینای قرار داده شده در داخل یک تیوب فیت شده با دو نوار به هم پیچیده، به ترتیب ۲۰٪ و ۲۲٪ بیشتر است.

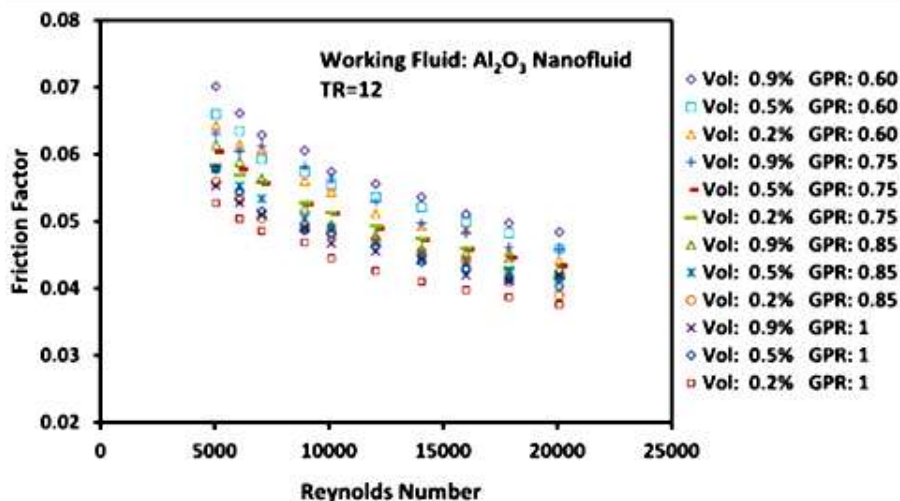
اثر ورود نوارهای به هم پیچیده در مسیر جریان می‌تواند با مقایسه‌ی اشکال (۴-۳)، (۴-۴) و (۴-۶) با شکل (۴-۴) انجام شود. این مشاهده می‌شود که انتقال حرارت مربوط به استفاده از نانوسیال و نوار پیچیده‌ای مؤثرتر است موارد ارائه شده به تک‌تک این روش‌هاست.

#### ۴-۴-۵ اثر نوارهای در هم پیچیده‌ی اصلاح شده

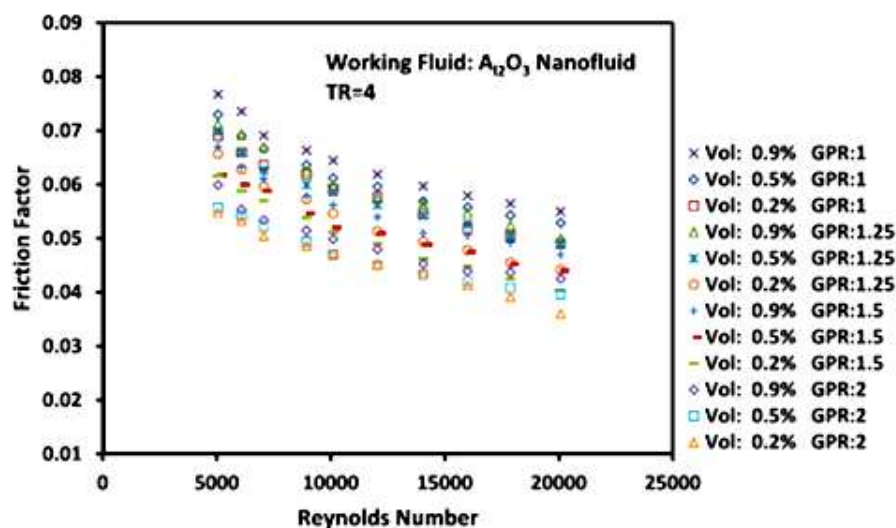
تأثیر استفاده از نوارهای پیچ‌خورده اصلاح شده با نسبت پیچ‌خوردگی مختلف در انتقال گرما از لحاظ عدد ناسلت، در شکل (۴-۷) نشان داده شد. در تمامی موارد، روند کلی یافته شده در شکل (۴-۷) این بود که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یافت. این تأثیر به دلیل چگالی آشفته‌گی بود که منجر به بهبود انتقال گرما می‌شود. به همین ترتیب در ارتباط با عدد رینولدز، نتایج نشان داد که با نسبت تصاعدی هندسی کوچک ( $RGPR$ ) و برعکس، نرخ انتقال گرما افزایش می‌یابد. نسبت‌های تصاعدی هندسی کوچک ( $GPR$ )، نوارهایی با طول  $pitch$  و نسبت پیچ‌خوردگی ایجاد می‌نماید که در طول نوارها کاهش می‌یابد. همان‌طور که به‌وسیله روند داده‌ها تأیید می‌گردد، کاهش نسبت پیچ‌خوردگی در طی نوار می‌تواند چگالی جریان پیچشی را افزایش دهد که این امر ترکیب شدن سیال را بهبود می‌بخشد. به همین ترتیب، آشفته‌گی اضافی در سرتاسر دیواره لوله، منجر به کاهش مؤثر لایه مرزی در نزدیکی منابع انتقال گرما گردیده و بنابراین یک عملکرد انتقال گرمای عالی را حاصل می‌نماید. علاوه بر این، استفاده از پیچ‌خوردگی‌های  $GPR$  کاهش، به دلیل مسیر جریان طولانی‌تر، یک افزایش در زمان مقاومت جریان را ایجاد می‌نماید؛ بنابراین افزایش طول گرمایی که بین منابع گرما (دیواره لوله) و سیال مبادله می‌شود، در مقایسه با افزایش نوارهای  $GPR$ ، یک بهبود انتقال گرمای عالی را حاصل می‌نماید. در یک عدد رینولدز و نسبت‌های  $GPR$  داده شده، ضریب انتقال گرمای نانوسیالات با یک افزایش در غلظت نانو ذرات بهبود می‌یابد. علاوه بر بهبود رسانایی گرمایی به دلیل حضور نانو ذرات، رفتار پلاستیک‌گونه‌ی نانوسیال، دلیل بهبود انتقال گرما می‌باشد. افزایش نرخ برش، چسبندگی ظاهری را کاهش خواهد داد. نرخ برش بالاتر در نزدیکی دیواره، تمایل به کاهش چسبندگی ظاهری نانوسیال داشته که منجر به ممانعت از ایجاد لایه‌های مرزی گرمایی در نزدیکی سطوح انتقال می‌گردد و

بنابراین با نرخ انتقال گرمای بهبود یافته مرتبط خواهد بود. برخورد و حرکت تصادفی نانوذرات و حرکت ذرات از مناطقی با نرخ برشی بالاتر به پایین‌تر، از فاکتورهای دیگر، در بهبود انتقال گرمای نانوسیالات می‌باشند.

تأثیر نوارهای پیچ خورده اصلاح شده بر خصوصیات فاکتور اصطکاک، در چندین غلظت نانوذره و  $GPR$ ، در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.



(a)



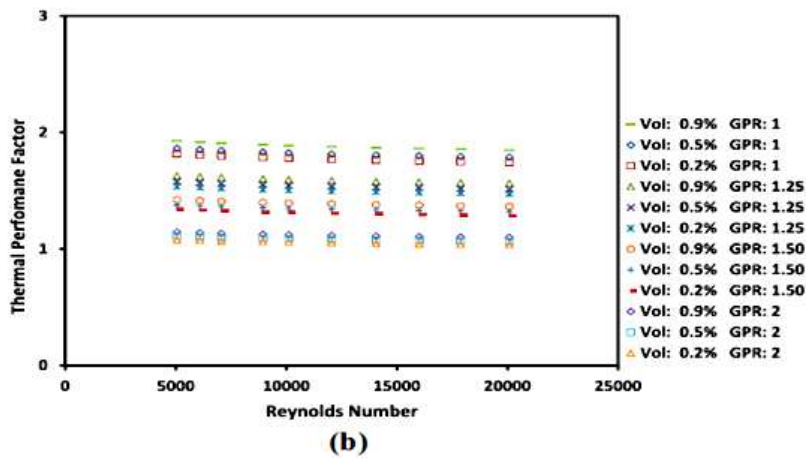
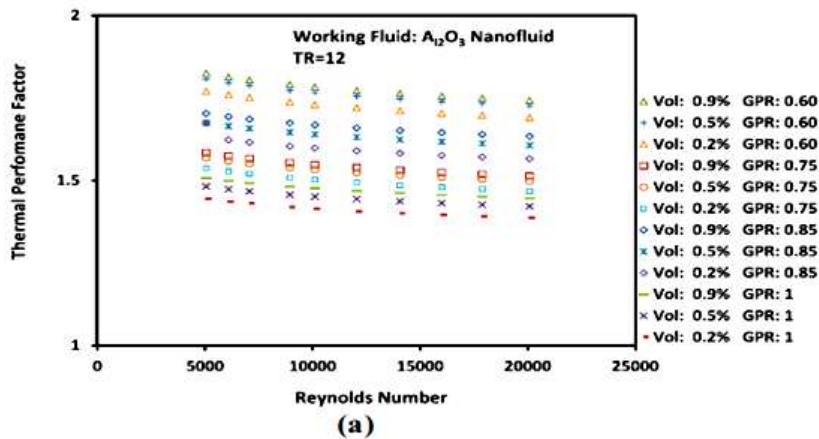
(b)

شکل ۴-۹ تأثیر نسبت تصاعدی هندسی بر عامل اصطکاک (a)  $RGPR$  (b)  $IGPR$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، عامل اصطکاک به‌صورت قابل توجهی با کاهش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همانند عدد ناسلت که در شکل (۴-۷) نشان داده شد، عامل اصطکاک

با استفاده از نوارهای GPR کاهشی، تمایل به افزایش دارد. چنین چیزی به میزان آشفستگی که به دلیل حضور نوارهای با طول pitch کوتاه شونده ایجاد می‌شود و افزایش منطقه سطح تماس که منجر به اتلاف چسبندگی بالاتری در نزدیک دیواره لوله می‌گردد بستگی دارد. لازم به ذکر است که غلظت بالاتر نانوسیال به دلیل افزایش چسبندگی سیال عامل، ممکن است منجر به یک نکته منفی در اتلاف فشار گردد.

فاکتور بهبود انتقال گرما که نشان‌دهنده مزایای عملی استفاده از ابزارهای تقویتی می‌باشد، از طریق معادله (۴-۲۹) در یک توان مکشی یکسان، مورد ارزیابی قرار گرفت. اختلاف فاکتور عملکرد گرمایی با اعداد رینولدز در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، این فاکتور با افزایش عدد رینولدز، کاهش یافت. در یک عدد رینولدز یکسان، نوارهای پیچ‌خورده GPR کاهشی، فاکتور عملکرد بالاتری نسبت به نوارهای GPR افزایشی و نوعی را حدوداً ۲۰٪ حاصل می‌نماید. کاهش فاکتور عملکرد با افزایش عدد رینولدز به صورت ضمنی نشان‌دهنده این است که استفاده از نوارهای GPR کاهشی جهت ذخیره انرژی حیاتی می‌باشد. باید توجه نمود که فاکتور عملکرد، با یک افزایش در غلظت نانو ذرات، افزایش یافت. این بدین معناست که استفاده از هر دوی نانوسیال و نوارهای پیچ‌خورده اصلاح شده منجر به عملکرد گرمایی بالاتری نسبت به سایر موارد می‌گردد. اگر محدوده را در نظر بگیریم، فاکتورهای در یک محدوده بین ۱/۵ - ۲/۵۶ قرار داشتند.



شکل ۴-۱۰ تغییرات شاخص بهبود گرمایی یا عدد رینولدز برای (a) RGPR (b) IGPR

#### ۴-۴-۶ ارتباطها (همبستگی‌ها)

همبستگی‌های تجربی، برای نتایج آزمایش فعلی جریان نانوسیال در مبدل گرمایی لوله‌ای دوتایی که به نوارهای پیچ‌خورده اصلاح شده در یک محدوده از اعداد رینولدز بین ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ تجهیز شده است، ایجاد گردید. اعتباربخشی همبستگی‌ها برای عدد رینولدز، فاکتور اصطکاک و فاکتور عملکرد، به وسیله مقایسه داده‌ی پیش‌بینی شده از همبستگی‌ها با داده‌های آزمایش و خطاهای بررسی شده، ایجاد گردید.

همبستگی‌های تجربی برای نتایج آزمایش و استفاده از رگرسیون غیرخطی برای عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک به صورت رابطه (۴-۲۹) و (۴-۳۰) می‌باشد:

$$Nu = 0.056 Re^{0.72} Pr^{0.4} (1 + \pi \phi)^{2.75} \left(1 + \frac{\pi}{2RT}\right)^{1.1} GPR^{-0.75} \quad (4-29)$$

$$f = 0.37 Re^{-0.24} Pr^{0.4} (1 + 3\pi \phi)^{0.6} \left(1 + \frac{\pi}{TR^{1.4}}\right) GPR^{-0.35} \quad (4-30)$$

جهت ارزیابی این معادله، رابطه بین نرخ جریان حجمی و افت فشار بین مبدل‌های خالی (بهبود نیافته) و لوله‌هایی که با نوار (بهبود یافته) تجهیز شده‌اند را می‌توان به صورت رابطه (۴-۳۱) نوشت:

$$(V\Delta P)_E = (V\Delta P)_{NE} \quad (4-31)$$

معادله فوق را می‌توان از لحاظ عدد رینولدز و فاکتور اصطکاک به صورت رابطه (۴-۳۲) بازنویسی نمود:

$$(fRe^3)_E = (fRe^3)_{NE} \quad (4-32)$$

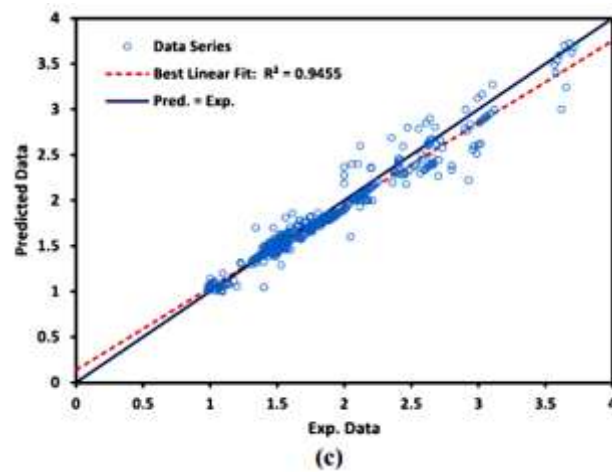
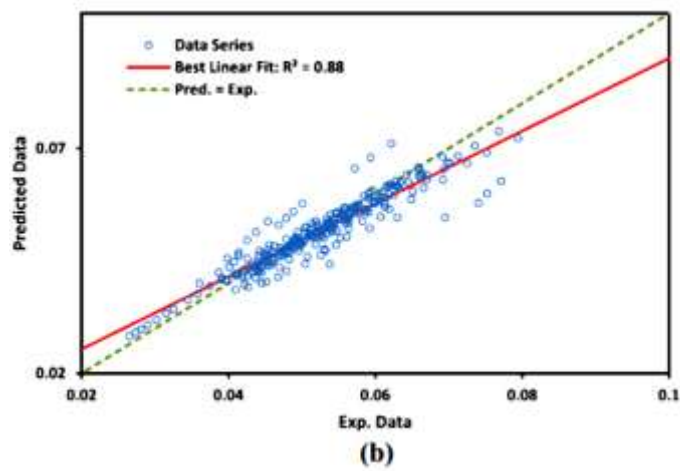
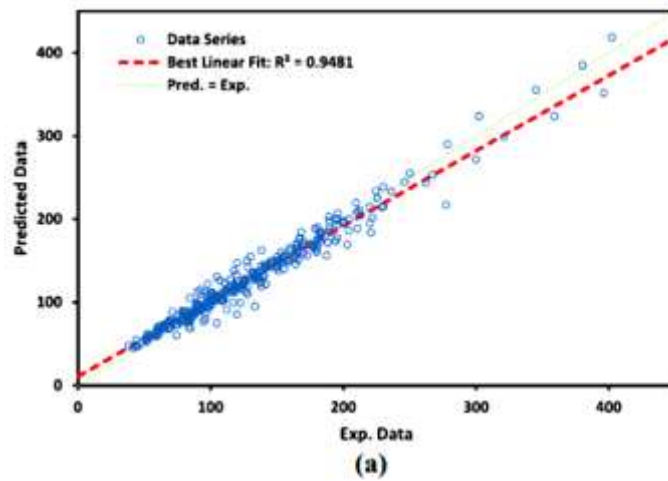
با اعمال معادلات (۴-۲۵) و (۴-۳۱)، عدد رینولدز لوله تهی را می‌توان به عنوان تابعی از عدد رینولدز لوله بهبود یافته بیان نمود:

$$Re_{NE} = 1.061 (1 + 3\pi\varphi)^{0.281} \left(1 + \frac{\pi}{TR^{1.4}}\right)^{0.363} GPR^{0.127} Re_E^{1.01} \quad (4-33)$$

با استفاده از معادلات (۴-۲۴)، (۴-۲۵)، (۴-۳۱) و (۴-۳۳) فاکتور گرما را می‌توان به صورت رابطه (۴-۳۴) بیان نمود:

$$\eta = 1.4Re^{-0.04} \frac{\left(1 + \frac{\pi}{3TR}\right)^{1.1}}{\left(1 + \frac{\pi}{TR^{1.4}}\right)^{0.727}} \frac{(1 + \pi\varphi)^{2.75}}{(1 + 3\pi\varphi)^{0.163}} GPR^{-0.653} \quad (4-34)$$

شکل (۴-۱۱) مقایسه نتایج آزمایش را با مقادیر به دست آمده از همبستگی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱ اعتباربخشی همبستگی‌های تجربی برای (a) عدد ناسلت، (b) فاکتور اصطکاک، (c) عملکرد گرمایی

جدول ۴-۱ عدم قطعیت‌های مربوط به ادوات و خواص

No	Name of instrument	Range of instrument	Variable measured	% Uncertainty
1	Themocouple	1370°C	Wall temperature	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
2	Flow meter	1-10,000l	Mass flow rate, m	$\pm 0.1$
3	Rotameter	1-600l	Mass flow rate, m	$\pm 0.5$
3	Pressure measurement	0-10 bar	Pressure drop	$\pm 0.075$
4	Digitizer		Temperature indicator	
5	RTD PT 100	-200 to 500°C	Temp. of inlet/Outlet flow	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
6	QTM -500	0.023-12 W/mk	Thermal conductivity	$\pm 0.3$
7	DV3T rhemeter	0.1-250 RPM	Viscosity	$\pm 1.0$
8	Properties	Density, specific heat		$\pm 0.1$

جدول ۴-۲ عدم قطعیت‌ها برای پارامترها و متغیرها

	Variable name	%Uncertainty error
۱	Reynolds number, Re	$\pm 4/1$
۲	Nusselt number, Nu	$\pm 0.26$
۳	Friction factor, f	$\pm 0.42$

جدول عدم قطعیت‌ها برای ادوات مختلف مورد استفاده در این آزمایش، در جدول (۴-۱) آورده شده است. ماکزیمم خطای ممکن برای پارامترهای مربوط به این آنالیز، تخمین زده شده و مقادیر آن در جدول (۴-۲) آورده شده است. این مسئله باید تذکر داده شود که عدم قطعیت‌های تخمین زده شده، بر اساس ویژگی‌های تولید می‌باشند و بر اساس کالیبراسیون وسایل حاصل نشده‌اند.

عدد رینولدز (Re):

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}, \frac{U_{\text{Re}}}{\text{Re}} = \left( \left( \frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{U_{\mu}}{\mu} \right)^2 \right)^{1/2} = 1/4\% \quad (4-35)$$

انتقال حرارت مربوط به نانوسیال:

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} C P_{nf} (T_{out} - T_{in})_{nf}, \quad (4-36)$$

$$\frac{U_{Q_{nf}}}{Q_{nf}} = \left( \left( \frac{U_{\dot{m}_{nf}}}{\dot{m}_{nf}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_{CP_{nf}}}{CP_{nf}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_{T_{out}-T_{in}}}{T_{out}-T_{in}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.17\%$$

نرخ انتقال حرارت برای آب:

$$Q_w = \dot{m}_w CP_w (T_{out} - T_{in})_w, \quad (4-37)$$

$$\frac{U_{Q_w}}{Q_w} = \left( \left( \frac{U_w}{\dot{m}_w} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_{cp_w}}{CP_w} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_{T_{out}-T_{in}}}{T_{out}-T_{in}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.5\%$$

Nusselt number, Nu:

$$Nu = \frac{hD}{K}, \quad \frac{U_{Nu}}{Nu} = \left( \left( \frac{U_h}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_K}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.26\%$$

فاکتور اصطكاك (f) به صورت زیر است:

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{1}{D}\right)\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)}, \quad U_f = \left( \left( \frac{U_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{U_{\rho}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{2U_V}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.42\% \quad (4-38)$$

## فصل پنجم

### نتیجه گیری

## ۵-۱ نتیجه گیری

یک مطالعه تجربی از جریان آشفته نانوسیال آب -  $Al_2O_3$  از مبدل گرمایی با لوله دوگانه که با نوارهای پیچ خورده اصلاح شده تجهیز شده بود برای محدوده‌ای از اعداد رینولدز (۵۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰) با یک محدوده گسترده‌ای از کسر حجمی جامد (۰.۲٪ تا ۰.۹٪)، اجرا شده است. رفتار نانوسیال، فی‌نفسه غیرنیوتنی در نظر گرفته شد. از مفهوم ریاضی تصاعد هندسی برای تهیه نوارهای پیچ خورده اصلاح شده استفاده شد. طول  $pitch$  نوارهای پیچ خورده پیشنهادی و در نتیجه نسبت‌های پیچ خوردگی در سرتاسر پیچ خوردگی‌ها از لحاظ نسبت تصاعدی هندسی ( $GPR$ ) چه کاهنده ( $GPR < 1$ ) و چه افزایشنده ( $GPR > 1$ ) باشد، تغییر نمود. تأثیرات نسبت تصاعد هندسی، نسبت پیچ خوردگی و غلظت حجمی بر نرخ انتقال گرما و خصوصیات فاکتور اصطکاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یک نسبت تصاعد هندسی که با یک نوار پیچ خورده تقسیم شده است، نقش قابل توجهی در بهبود انتقال گرما و فاکتور اصطکاک دارد. بسته به نسبت تصاعد هندسی، نرخ انتقال گرما و فاکتور اصطکاک در مبدل گرمایی با لوله دوگانه به همراه نوار پیچ خورده و نانوسیال، به ترتیب  $1/3$  تا  $4$  بوده و  $1/4$  تا  $2/8$  برابر نسبت به لوله ساده می‌باشند. عملکرد گرمایی جهت ارزیابی بهبود کلی رفتار گرمایی، محاسبه گردید. همبستگی‌های تجربی برای عدد ناسلت، عامل اصطکاک و فاکتور عملکرد گرمایی مبتنی بر داده آزمایشی فعلی نیز ارائه گردید.

## ۵-۲ پیشنهادات

- استفاده از سیالات گوناگون
- استفاده از سیستم‌های برودتی و گرمایشی
- مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار ماشین‌های پشتیبان بردار

- [1] A.E. Bergles, Techniques to augment heat transfer, in: W.M. Rohsenow et al. (Eds.), *Hand Book of Heat Transfer Applications*, second ed., McGraw-Hill, New York, 1985.
- [2] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nano-fluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653.
- [3] characteristics of TiO<sub>2</sub>–water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (2009) 2059–2067.
- [4] Y. Hwang *et al.*, “Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids,” *Thermochim. Acta*, vol. 455, no. 1–2, pp. 70–74, Apr. 2007.
- [5] Y. Hwang *et al.*, “Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids,” *Powder Technol.*, vol. 186, no. 2, pp. 145–153, Aug. 2008.
- [6] X. Zhang, H. Gu, and M. Fujii, “Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 593–599, May 2007.
- [7] L. Jiang, L. Gao, and J. Sun, “Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 260, no. 1, pp. 89–94, Apr. 2003.
- [8] M. Chandrasekar, S. Suresh, and A. Chandra Bose, “Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 210–216, Feb. 2010.
- [9] A. Ghozatloo, A. M. Rashidi, and M. Shariaty-Niasar, “Effects of surface modification on the dispersion and thermal conductivity of CNT/water nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 54, pp. 1–7, May 2014.
- [10] G. Paul, J. Philip, B. Raj, P. K. Das, and I. Manna, “Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al<sub>95</sub>Zn<sub>05</sub> dispersed nanofluid prepared by a two-step process,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 15–16, pp. 3783–3788, Jul. 2011.
- [11] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, “A review on development of nanofluid preparation and characterization,” *Powder Technol.*, vol. 196, no. 2, pp. 89–101, Dec. 2009.
- [12] X. Wang, D. Zhu, and S. Yang, “Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 470, no. 1–3, pp. 107–111, Feb. 2009.
- [13] M. A. Khairul, K. Shah, E. Doroodchi, R. Azizian, and B. Moghtaderi, “Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 98, pp. 778–787, Jul. 2016.
- [14] Y. Ding *et al.*, “Forced convective heat transfer of nanofluids,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 813–824, Nov. 2007.
- [15] M. J. Assael, I. N. Metaxa, J. Arvanitidis, D. Christofilos, and C. Lioutas, “Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Different Dispersants,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 26, no. 3, pp. 647–664, May 2005.

- [16] M. N. Pantzali, A. A. Mouza, and S. V. Paras, "Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE)," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 14, pp. 3290–3300, Jul. 2009.
- [17] X. F. Li, D. S. Zhu, X. J. Wang, N. Wang, J. W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids," *Thermochim. Acta*, vol. 469, no. 1–2, pp. 98–103, Mar. 2008.
- [18] I. Madni, C.-Y. Hwang, S.-D. Park, Y.-H. Choa, and H.-T. Kim, "Mixed surfactant system for stable suspension of multiwalled carbon nanotubes," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 358, no. 1–3, pp. 101–107, Apr. 2010.
- [19] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R. A. Williams, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 240–250, Jan. 2006.
- [20] N. Sezer and M. Koç, "Stabilization of the aqueous dispersion of carbon nanotubes using different approaches," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 8, no. June, pp. 411–417, 2018.
- [21] N. Sezer and M. Koç, "Dispersion Stability of CNT and CNT/Metal-based Nanofluids," in *International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications*, 2018, pp. 1–4.
- [22] T. D. Pham, "Adsorption Characteristics of Organic Anions onto Large  $\alpha$ -Alumina Beads with Positively Charged Surface," 2014.
- [23] X.-Q. Wang and A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2007.
- [24] H. Xie and L. Chen, "Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids," *Phys. Lett. A*, vol. 373, no. 21, pp. 1861–1864, May 2009.
- [25] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 5, pp. 560–568, May 2008.
- [26] E. K. Goharshadi, H. Ahmadzadeh, S. Samiee, and M. Hadadian, "Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review," *Phys. Chem. Res.*, vol. 1, pp. 1–33, 2013.
- [27] Babita, S. K. Sharma, and S. M. Gupta, "Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 202–212, Dec. 2016.
- [28] D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 7, no. 2–3, pp. 265–274, Jun. 2005.
- [29] D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 7, no. 2–3, pp. 265–274, Jun. 2005.
- [30] B. Ruan and A. M. Jacobi, "Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 7, no. 1, p. 127, 2012.
- [31] I. M. Mahbubul, R. Saidur, M. A. Amalina, and M. E. Niza, "Influence of ultrasonication duration on rheological properties of nanofluid: An experimental study with alumina–water nanofluid," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 33–40, Aug. 2016.

- [32] K. Kwak and C. Kim, "Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol," *Korea-Australia Rheol. J.*, vol. 17, pp. 35–40, 2005.
- [33] J.-H. Lee *et al.*, "Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 11–12, pp. 2651–2656, Jun. 2008.
- [34] K. Nemade and S. Waghuley, "A novel approach for enhancement of thermal conductivity of CuO/H<sub>2</sub>O based nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 95, pp. 271–274, Feb. 2016.
- [35] Y. Hwang *et al.*, "Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids," *Powder Technol.*, vol. 186, no. 2, pp. 145–153, Aug. 2008.
- [36] S. Bobbo *et al.*, "Viscosity of water based SWCNH and TiO<sub>2</sub> nanofluids," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 36, pp. 65–71, Jan. 2012.
- [37] M. Farbod, R. Kouhpeymani asl, and A. R. Noghreh abadi, "Morphology dependence of thermal and rheological properties of oil-based nanofluids of CuO nanostructures," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 474, pp. 71–75, Jun. 2015.
- [38] E. Ettefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, S. Mohtasebi, and M. Alaei, "Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive," *Int. J. Ind. Chem.*, vol. 4, no. 1, p. 28, 2013.
- [39] E. Shahsavani, M. Afrand, and R. Kalbasi, "Experimental study on rheological behavior of water–ethylene glycol mixture in the presence of functionalized multi-walled carbon nanotubes," *Journal Therm. Anal. Calorim.*, 2018.
- [40] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, pp. 99–105, 1995.
- [41] L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, and S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids—An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 629–641, Feb. 2010.
- [42] M. Xing, J. Yu, and R. Wang, "Thermo-physical properties of water-based single-walled carbon nanotube nanofluid as advanced coolant," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 87, pp. 344–351, Aug. 2015.
- [43] G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, and P. K. Das, "Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 1913–1924, Sep. 2010.
- [44] V. Trisaksri and S. Wongwises, "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 3, pp. 512–523, Apr. 2007.
- [45] J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, and S. Lee, "Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids," *MRS Proc.*, vol. 457, p. 3, Jan. 1996.
- [46] S. M. Fotukian and M. Nasr Esfahany, "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid inside a circular tube," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 31, no. 4, pp. 606–612, Aug. 2010.
- [47] M. Raja, R. Vijayan, P. Dineshkumar, and M. Venkatesan, "Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 163–173, Oct. 2016.

- [48] S. K. Gupte, S. G. Advani, and P. Huq, "Role of micro-convection due to non-affine motion of particles in a mono-disperse suspension," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 38, p. 2945, 1995.
- [49] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [50] V. Srinivas, C. V. K. N. S. N. Moorthy, V. Dedeepya, P. V. Manikanta, and V. Satish, "Nanofluids with CNTs for automotive applications," *Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 4, pp. 701–712, Apr. 2016.
- [51] X. F. Li, D. S. Zhu, X. J. Wang, N. Wang, J. W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids," *Thermochim. Acta*, vol. 469, no. 1–2, pp. 98–103, Mar. 2008.
- [52] S. Lee, S. U.-S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *J. Heat Transfer*, vol. 121, no. 2, p. 280, 1999.
- [53] B. Chitra and K. S. Kumar, "Heat transfer enhancement using single base and double base nanofluids," *J. Mol. Liq.*, vol. 221, pp. 1128–1132, Sep. 2016.
- [54] M.-S. Liu, M. C.-C. Lin, C. Y. Tsai, and C.-C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 17–18, pp. 3028–3033, Aug. 2006.
- [55] Y. Hwang *et al.*, "Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids," *Powder Technol.*, vol. 186, no. 2, pp. 145–153, Aug. 2008.
- [56] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 6, p. 718, 2001.
- [57] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 44, no. 4, pp. 367–373, Apr. 2005.
- [58] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 21, no. 1, pp. 58–64, Feb. 2000.
- [59] E. K. Goharshadi, S. Samiee, and P. Nancarrow, "Fabrication of cerium oxide nanoparticles: Characterization and optical properties," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 356, no. 2, pp. 473–480, Apr. 2011.
- [60] E. K. Goharshadi, S. H. Sajjadi, R. Mehrkhah, and P. Nancarrow, "Sonochemical synthesis and measurement of optical properties of zinc sulfide quantum dots," *Chem. Eng. J.*, vol. 209, pp. 113–117, Oct. 2012.
- [61] M. Yazdanbakhsh, I. Khosravi, E. K. Goharshadi, and A. Youssefi, "Fabrication of nanospinel ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> using sol–gel method and its application on removal of azo dye from aqueous solution," *J. Hazard. Mater.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 684–689, Dec. 2010.
- [62] H. Zhu, Y. Lin, and Y. Yin, "A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 277, no. 1, pp. 100–103, Sep. 2004.
- [63] X.-Q. Wang and A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2007.
- [64] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, "A review on development of nanofluid preparation and characterization," *Powder Technol.*, vol. 196, no. 2, pp. 89–101, Dec. 2009.

- [65] P. Keblinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill, "Nanofluids for thermal transport," *Mater. Today*, vol. 8, no. 6, pp. 36–44, Jun. 2005.
- [66] M. A. Khairul, K. Shah, E. Doroodchi, R. Azizian, and B. Moghtaderi, "Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 98, pp. 778–787, Jul. 2016.
- [67] A.E. Bergles, Techniques to augment heat transfer, in: W.M. Roshenow et al. (Eds.), *Hand Book of Heat Transfer Applications*, second ed. , McGraw-Hill, New York, 1985 .
- [68] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nano-fluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653 .
- [69] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO<sub>2</sub> –water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (2009) 2059–2067 .
- [70] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, FED-V.231/MD-V.66 , ASME, New York, 1995, pp. 99–105 .
- [71] X.Q. Wang, A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *Int. J. Therm. Sci.* 46 (2007) 1–19 .
- [72] L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids – a n overview, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 14 (2009) 629–641 .
- [73] C.T. Nguyen, F. Desgranges, N. Galanis, G. Roy, T. Maré, S. Boucher, Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –water nanofluid – hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?, *Int J. Therm. Sci.* 47 (2008) 103–111 .
- [74] M. Hojjat, S.Gh. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, Convective heat transfer of non- Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube, *Int. J. Therm. Sci.* 50 (2011) 525–531 .
- [75] S.W. Chang, Y.J. Jan, J.S. Liou, Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape, *Int. J. Therm. Sci.* 46 (2007) 506–518 .
- [76] K. Wongcharee, S. Eiamsa-ard, Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tubes inserted with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 38 (2011) 348–352 .
- [77] R.M. Manglik, A.E. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes. Part I – Laminar flows, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 115 (1993) 881–889 .
- [78] X. Zhang, Z. Liu, W. Liu, Numerical studies on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a tube with multiple regularly spaced twisted tapes, *Int. J. Therm. Sci.* 58 (2012) 157–167 .
- [79] L. Syam Sundar, K.V. Sharma, Turbulent heat transfer and friction factor of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in circular tube with twisted tape inserts, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (2010) 1409–1416 .
- [80] K. Wongcharee, S. Eiamsa-ard, Heat transfer enhancement by using CuO/water nanofluid in corrugated tube equipped with twisted tape, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 39 (2012) 251–257 .

- [81] M. Fakoor-Pakdaman, M.A. Akhavan-Behabadi, P. Razi, An empirical study on the pressure drop characteristics of nanofluid flow inside helically coiled tubes, *Int. J. Therm. Sci.* 65 (2013) 206–213
- [82] R.M. Manglik, A.E. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes. Part II: Transition and turbulent flows, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 115 (1993) 890–896 .
- [83] P.K. Sarma, T. Subrahmanyam, P.S. Kishore, V. DharmaRao, S. Kakac, A new method to predict convective heat transfer in a tube with twisted tape inserts for turbulent flow, *Int. J. Therm. Sci.* 41 (2002) 955–960 .
- [84] P.K. Sarma, P.S. Kishore, V. DharmaRao, T. Subrahmanyam, A combined approach to predict friction coefficients and convective heat transfer characteristics in a tube with twisted tape inserts for a wide range of Re and Pr, *Int. J. Therm. Sci.* 44 (2005) 393–398 .
- [85] P. Naphon, Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 33 (2006) 166–175 .
- [86] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvonge, Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape elements in tandem, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 37 (2010) 39–46 .
- [87] Alizadeh, Mostafa et al., Experimental study of Al 203/ water nanofluid turbulent heat transfer enhancement in the horizontal double pipes fitted with modified twisted tapes , *international journal of heat and mass transfer*. 2014.pp
- [88] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer* 11 (1998) 151– 170 .
- [89] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 43 (2000) 3701–3707 .
- [90] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *I&EC Fundam.* 1 (3) (1962) 187 .
- [91] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J. Nanoparticle Res.* 5 (2003) 167 .
- [92] D.A.G. Bruggeman, Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. I: Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen, *Ann. Phys.* 14 (1935) 636–664 .
- [93] E.V. Timofeeva, A.N. Gavrilov, J.M. McCloskey, Y.V. Tolmachev, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory, *Phys. Rev.* 76 (2007). E76, 061203 .
- [94] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, second ed. , John Wiley & Sons, 2002 .
- [95] M. Hojjat, S.Gh. Etemad, S.G.R. Bagheri, J. Thibault, Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: experimental investigation, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 38 (2011) 144–148 .
- [96] A.K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *Int. J. Therm. Sci.* 48 (2009) 391–400 .
- [97] F.P. Incropera, P.D. Witt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John-Wiley & Sons, 2006 .

- [98] R.M. Manglik, A.E. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes. Part II: Transition and turbulent flows, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 115 (1993) 890–896 .
- [99] L. Syam Sundar, K.V. Sharma, Turbulent heat transfer and friction factor of Al nanofluid in circular tube with twisted tape inserts, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (2010) 1409–1416 .

## **Abstract**

In this study, fluid flow of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid in a horizontal double pipe heat exchanger fitted with modified twisted tapes were experimentally studied under turbulent flow conditions. The experiments with different geometrical progression ratio (GPR) of twists as the new modified twisted tapes and different nanofluid concentration were performed under similar operation condition. Pitch length of the proposed twisted tapes and consequently the twist ratios changed along the twists with respect to the geometrical progression ratio (GPR) whether reducer ( $\text{RGPR} < 1$ ) or increaser ( $\text{IGPR} > 1$ ). Regarding the experimental data, utilization of RGPR twists together with nanofluids tends to increase heat transfer and friction factor by 12% to 52% and 5% to 28% as compared with the tube with typical twisted tapes ( $\text{GPR} = 1$ ) and nanofluid. Contrarily, performances were weakened by using for IGPR twists 0.6 to 0.92 and 0.75 to 0.95. The thermal performances of the heat exchanger with nanofluid and modified twisted tapes were evaluated for the assessment of overall improvement in thermal behavior. Generalized correlations were developed for the estimation of Nusselt number, friction factor and thermal performance factor under turbulent flow conditions. Satisfactory agreement between the present correlations and obtained experimental data validate the proposed correlations.

**Key Word:** Pressure drop, Heat transfer, Nano fluid.



Energy Institute For Higher Education  
Faculty Of Engineering

Departement Of Energy System Engineering- Energy System

Thesis For

Degree Of Master Of Science (M.Sc)

Title

**Investigation of pressure drop and heat  
transfer in piping and heat exchangers  
with nanofluid and equipped with  
tabulator**

**Supervisor**

Yousef Yassi (Ph.D)

**Advisor**

Heydar Maddah (Ph.D)

**By**

Sara Abbasi Zangeneh

**Winter 2019**