

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

# توسعه روابط برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان آرام نانوسیال در میکرولوله

نگارنده: محمد شکوریان پور

استاد راهنما

دکتر محمود فرزانه گرد

استاد مشاور

دکتر محمدرضا بهی

اردیبهشت ۱۳۹۶

شماره: ۱۲۲ / ۲۹۶ / ۳۹۶  
تاریخ: ۱۴ / ۱۲ / ۱۳۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد شکوریان پور با شماره دانشجویی ۹۲۳۷۲۱۴ رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان توسعه روابط برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان آرام نانوسیال در میکرولوله که در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۸٫۳۶ درجه .....):  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر محمود فرزانه گرد	۱- استاد راهنمای اول
—	—	—	۲- استاد راهنمای دوم
	دکترای مکانیک	دکتر محمد رضا بهی	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر پوریا اکبرزاده	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر محسن نظری	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر احمد نظری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

تقدیم بہ

ساحت مقدس حضرت ولی عصر (عج)

ارواحنا لہ الفداء

و روح پاک پدرم

## تقدیر و مشکر

سپاس خدای را که سخنوران، دستوران او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد (ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم علیم السلام، هم آنان که وجودمان و مدار وجودشان است.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. انا از آنجایی که بحلیل از معلم سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت بایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمُنْعِمَ مِنَ الْمَخْلُوقِينَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ عَزَّ وَجَلَّ:"

از مادر عزیز و همسر مهربانم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور می بدون چشم داشت برای من بوده اند؛

از استاد صبور و باتقوا؛ جناب آقای دکتر محمود فرزانه کرد که در سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ لگی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمد رضایی، که زحمت مشاوره این پایان نامه را در حالی متممّیل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ کمال مشکرو قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **محمد شکوریان پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد حرارت و سیالات دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **توسعه روابط برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در**

**جریان آرام نانوسیال در میکرولوله** تحت راهنمایی آقای **دکتر محمود فرزانه** گرد متعهد می شوم.

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

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

افزایش انتقال حرارت و همچنین افزایش راندمان انرژی با توجه به محدودیت منابع طبیعی و کاهش هزینه‌ها همواره یکی از اساسی‌ترین دغدغه‌های مهندسين و محققين بوده است. این امر به‌خصوص در سیالات به دلیل کوچکی ضریب رسانش حرارتی از اهمیت بیشتری برخوردار است. یکی از مهم‌ترین راه‌های دستیابی به این امر، که در سال‌های اخیر به آن توجه زیادی شده، افزودن ذرات جامد با رسانش حرارتی بالا در ابعاد نانو می‌باشد.

تحقیقات در زمینه انتقال حرارت سوسپانسیون‌های با ذرات جامد در ابعاد نانومتر درون سیال پایه در دهه اخیر آغاز شده است. تحقیقات اخیر در زمینه نانوسیالات، نشان داده است که افزودن نانوذرات باعث افزایش چشمگیری در انتقال حرارت سوسپانسیون می‌شود. از راه‌های مرسوم دیگر جهت بهبود عملکرد حرارتی دستگاه‌ها، استفاده از کانال‌ها با ابعاد میلی و میکرو است.

بیشتر سیال‌ها ضریب هدایت گرمایی پایینی نسبت به جامدات دارند؛ لذا افزودن ذرات جامد، ضریب هدایت گرمایی را بالا می‌برد. از طرفی با افزودن این ذرات لزجت دینامیکی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد که به دنبال آن توان بالای پمپ و مصرف انرژی را به دنبال دارد. در این پژوهش جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در میکرولوله متقارن محوری در جریان آرام به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم با قطر ۱۳، ۴۰، ۶۵، ۹۰، ۱۱۵ و ۱۳۰ نانومتر در سیال آب به حالت تعلیق درآمده‌اند. نانوسیال با غلظت‌های حجمی ۱، ۲/۵، ۴، ۵/۵، ۷، ۹ درصد برای بررسی تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت گرمایی و لزجت دینامیکی استفاده شده است.

در این تحقیق روابط مورد استفاده برای چگالی، ویسکوزیته، گرمای ویژه و ضریب انتقال حرارت نانوسیال تابعی از غلظت حجمی نانوذرات، اندازه نانوذرات و دما در نظر گرفته شده است. نتایج عددی ابتدا

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در میکرو لوله صحت سنجی شده است.

با افزایش دما و کاهش کسر حجمی، لزجت دینامیکی نانو سیال کاهش پیدا می‌کند و همچنین با افزایش دما و افزایش کسر حجمی ضریب هدایت گرمایی نانو سیال در مقایسه با سیال پایه افزایش چشمگیری دارد. در کسرهای حجمی پایین افزایش هدایت گرمایی چشمگیرتر است. افزایش دما پیوندهای بین‌مولکولی را سست‌تر کرده و سیال قابلیت حرارتی بیشتری پیدا می‌کند؛ ضمن آنکه لزجت نیز کاهش دارد.

برای اعداد رینولدز یکسان، نتایج نانوسیال نشان داد که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد همچنین تحت قدرت پمپاژ یکسان نانوسیال ضریب انتقال حرارت بالاتری را نسبت به سیال پایه ایجاد می‌کند. در نهایت دو رابطه جدید برای تعیین ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک برای جریان نانوسیال در میکرولوله ارائه شده است. در بررسی عددی کلیه مطالعات فوق از بسته نرم‌افزاری حجم محدود فلونت استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، جریان آرام، نانوسیال، ضریب اصطکاک، عدد ناسلت



## فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- معرفی روشهای افزایش انتقال حرارت .....	۲
۳-۱- نانوسیال .....	۵
۴-۱- مزایای نانوسیال ها .....	۸
۵-۱- کاربردهای نانوسیال .....	۱۱
۶-۱- تولید نانوسیال .....	۱۱
۷-۱- پارامترهای انتقال حرارت در نانوسیالات .....	۱۳
۱-۷-۱- انباشتگی ذرات .....	۱۴
۲-۷-۱- نسبت حجمی ذرات نانو .....	۱۶
۳-۷-۱- حرکت براونی .....	۱۷
۴-۷-۱- ترموفورسیس .....	۱۹
۵-۷-۱- جنس نانوذرات .....	۱۹
۶-۷-۱- اندازه نانوذرات .....	۲۰
۷-۷-۱- شکل نانوذرات .....	۲۱
۸-۷-۱- تاثیر سیال پایه .....	۲۲
۹-۷-۱- ضخامت لایه سیال نزدیک به سطح ذرات نانو .....	۲۳
۱۰-۷-۱- تاثیر دما .....	۲۵
۲- فصل دوم: میکروکانال ها .....	۲۷
۱-۲- مقدمه .....	۲۸
۲-۲- تاریخچه میکروکانالها .....	۲۹
۳-۲- مزایا و چالشهای میکروکانالها .....	۲۹
۴-۲- دسته‌بندی کانالها از لحاظ ابعاد .....	۳۱
۵-۲- روشهای ساخت میکروکانالها .....	۳۲
۱-۵-۲- فناوری متداول .....	۳۳
۱-۵-۲-۱- تغییر شکل میکرو .....	۳۳
۱-۵-۲-۲- اره کردن میکرو (برش کاری میکرو) .....	۳۴

۳۴	..... ۲-۵-۲- تکنولوژی مدرن
۳۴	..... ۲-۵-۲-۱- MEMS (سیستم میکرو الکترومکانیک)
۳۵	..... ۲-۵-۲-۲- ماشین کاری میکرو لیزر
۳۶	..... ۲-۶- کاربردهای میکرو کانالها
۳۷	..... ۲-۷- اثرات ابعادی در میکرو کانال
۳۷	..... ۲-۷-۱- اثر ورودی
۳۹	..... ۲-۷-۲- اتلافات لزجی
۴۰	..... ۲-۷-۳- شرط عدم لغزش
۴۱	..... ۲-۸- جریان سیال خالص در میکرو کانالها
۴۱	..... ۲-۹- روابط افت فشار
۴۴	..... ۲-۱۰- روابط انتقال حرارت
۴۷	..... <b>۳- فصل سوم: پیشینه تحقیق</b>
۴۸	..... ۳-۱- مقدمه
۴۸	..... ۳-۲- کارهای انجام شده در زمینه خواص نانوسیال
۴۹	..... ۳-۲-۱- مدل های ارائه شده برای ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال
۵۶	..... ۳-۲-۲- مدل های ارائه شده برای ویسکوزیتهی موثر نانوسیال
۵۹	..... ۳-۳- کارهای انجام شده در زمینهی انتقال حرارت در میکرو کانال و نانوسیال
۵۹	..... ۳-۳-۱- بررسی جریان در میکرو کانال ها
۶۴	..... ۳-۳-۲- بررسی انتقال حرارت نانوسیال ها
۶۸	..... ۳-۳-۳- بررسی انتقال حرارت نانوسیال در میکرولوله ها
۷۳	..... ۳-۴- جریان سیال های معمولی در میکرولوله
۷۳	..... ۳-۴-۱- مدل های ریاضی تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی
۷۵	..... ۳-۴-۲- مدل های ریاضی تعیین ضریب اصطکاک
۷۶	..... ۳-۵- مدل های ریاضی تعیین ضریب انتقال حرارت جابهجایی نانوسیالات
۸۱	..... ۳-۶- مدل های ریاضی تعیین ضریب اصطکاک نانوسیالات
۸۳	..... ۳-۷- معرفی تحقیق حاضر
۸۴	..... ۳-۸- اهداف کلی تحقیق حاضر
۸۵	..... <b>۴- فصل چهارم: معادلات حاکم</b>
۸۶	..... ۴-۱- مقدمه

۸۷	۲-۴- فرض پیوستگی
۸۸	۳-۴- فرضیات مسأله
۸۹	۴-۴- معادلات حاکم
۸۹	۵-۴- پارامترهای بدون بعد
۹۱	۶-۴- شرایط مرزی
۹۲	۷-۴- روابط حاکم برای محاسبه خواص نانوسیال
۹۴	۱-۷-۴- چگالی
۹۴	۲-۷-۴- ظرفیت گرمایی ویژه
۹۴	۳-۷-۴- ضریب هدایت حرارتی
۹۵	۴-۷-۴- لزجت دینامیکی
۹۷	<b>۵- فصل پنجم: تحلیل و بررسی نتایج</b>
۹۸	۱-۵- مقدمه
۹۸	۲-۵- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی
۱۰۱	۳-۵- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت
۱۰۲	۴-۵- ارزیابی صحت نتایج
۱۰۳	۱-۴-۵- ارزیابی مقادیر روابط مربوط به خواص نانوسیال
۱۰۴	۲-۴-۵- ارزیابی صحت نتایج عددی میدان جریان برای سیال پایه
۱۰۶	۳-۴-۵- ارزیابی صحت نتایج عددی معادله انرژی برای سیال پایه
۱۱۲	۴-۴-۵- ارزیابی صحت نتایج عددی برای نانوسیال
۱۱۹	۵-۵- بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی
۱۳۵	۶-۵- توسعه روابط برای عدد ناسلت و ضریب اصطحکاک
۱۳۹	۷-۵- نتیجه گیری
۱۴۱	۸-۵- پیشنهادات
۱۴۳	<b>مراجع</b>

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- سیالات پایه رایج ، نانوذرات ، سورفکتانت ها برای تهیه نانوسیال ..... ۸
- شکل ۲-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به زمان برای مخلوط آب اکسید مس [۷]..... ۱۵
- شکل ۳-۱- افزایش انباشتگی نانوذرات با افزایش زمان برای مخلوط آب اکسید مس ( $\phi = 0/1$ ) الف) ۲۰ دقیقه ب) ۶۰ دقیقه ج) ۷۰ دقیقه [۷]..... ۱۵
- شکل ۴-۱- افزایش ضریب حرارتی بدلیل افزایش حجم موثر هدایت بالای خوشه ها [۹]..... ۱۶
- شکل ۵-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به نسبت حجمی ذرات نانو [۷]..... ۱۷
- شکل ۶-۱- حالت های انتقال انرژی در نانوسیال به دلیل حرکت براونی [۱۴]..... ۱۸
- شکل ۷-۱- اثر جنس ذره برای ذرات معلق در اتیلن گلیکول..... ۲۰
- شکل ۸-۱- تغییرات ضریب هدایت گرمایی نسبت به اندازه ذرات..... ۲۱
- شکل ۹-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و اشکال متفاوت نانوذرات برای مخلوط آب - SIC..... ۲۲
- شکل ۱۰-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و انواع مختلف سیال پایه برای مخلوط آب - اکسید آلومینیم..... ۲۳
- شکل ۱۱-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به ضخامت لایه سیال پیرامون نانوذرات [۳۴ و ۳۵]... ۲۵
- شکل ۱۲-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به دما برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم [۳۶]..... ۲۶
- شکل ۱-۲- ناحیه ورودی برای سیالی با  $Pr > 1$  [۴۳]..... ۳۸
- شکل ۱-۴- دامنه حل و هندسه جریان..... ۸۸
- شکل ۱-۵- شبکه محاسباتی هندسه مسأله برای چهار نوع شبکه M1 ، M2 ، M3 و M4..... ۹۹
- شکل ۲-۵- مقایسه سرعت جریان در خط مرکزی برای چهار نوع شبکه M1 ، M2 ، M3 و M4 به ازای  $Re = 913$ ..... ۱۰۱
- شکل ۳-۵- مقایسه مدل پیشنهاد شده توسط کورسیون برای هدایت حرارتی با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۰۳
- شکل ۴-۵- مقایسه مدل ارائه شده توسط خانفر و وفایی برای ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۰۴
- شکل ۵-۵- مقایسه حل عددی و تحلیلی توزیع سرعت جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$ ..... ۱۰۵

- شکل ۵-۶- مقایسه حل عددی و تحلیلی توزیع دمای بدون بعد جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در مقطعی در فاصله محوری ۰/۲۵۷۵ لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/0.6$  در حالت شار ثابت ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۷- توزیع ناسلت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/0.6$  در حالت شار ثابت ۱۰۸
- شکل ۵-۸- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/0.6$  در حالت شار ثابت ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۹- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 937$  و  $Pr = 5/3$  در حالت شار ثابت ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۰- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام نانوسیال در لوله در حالت شار ثابت ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۱- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام نانوسیال در لوله به ازای  $Re = 774$ ،  $Pr = 9/36$  و  $\phi = 0/0.242$  در حالت شار ثابت ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۲- توزیع ناسلت موضعی جریان آرام نانوسیال در لوله به ازای  $Re = 774$ ،  $Pr = 9/36$  و  $\phi = 0/0.242$  در حالت شار ثابت ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۳- مقایسه ضریب اصطکاک آزمایشگاهی و عددی با ضریب اصطکاک داری برای غلظت حجمی ۲/۲۴ ... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۴- دمای موضعی دیوار برای غلظت های مختلف نانوسیال و سیال پایه در قطر نانوذره ۱۳ و عدد رینولدز .. ۱۲۰
- شکل ۵-۱۵- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب قطر نانوذرات در غلظت حجمی ۱ درصد ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۱۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب قطر نانوذرات در غلظت حجمی ۱ درصد ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۱۷- تغییرات افت فشار با عدد رینولدز برای آب و غلظت های مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم برای قطر ۱۳ نانومتر ..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۸- مقایسه قدرت پمپاژ نانوسیال در کسر حجمی های مختلف نانوذره برای قطر ۱۳ نانومتر و سیال آب ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۹- تاثیر عدد رینولدز روی ضریب انتقال حرارت آب و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف و قطر نانوذره (الف) ۱۳ نانومتر (ب) ۴۰ نانومتر (ج) ۹۰ نانومتر ..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۰- تاثیر عدد رینولدز روی عدد ناسلت برای سیال آب و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف و قطر نانوذره (الف) ۱۳ نانومتر (ب) ۴۰ نانومتر (ج) ۹۰ نانومتر ..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲۱- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابهجایی میانگین نسبت به تغییر غلظت حجمی در اندازه نانوذرات مختلف ۱۲۹
- شکل ۵-۲۲- عدد ناسلت متوسط نسبت به عدد پکلت برای نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر های مختلف (الف) با ۱ درصد غلظت حجمی (ب) ۲/۵ درصد غلظت حجمی (ج) ۴ درصد غلظت حجمی (د) ۵/۵ درصد غلظت حجمی ..... ۱۳۲

- شکل ۵-۲۳- نتایج عددی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی برای نانوذره الف(۱۳ نانومتر ب) ۶۵ نانومتر..... ۱۳۵
- شکل ۵-۲۴- تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی در طول لوله برای غلظت های حجمی مختلف وقطر ۱۳ نانومتر.. ۱۳۶
- شکل ۵-۲۵- تغییرات ضریب اصطکاک در طول لوله برای غلظت های حجمی مختلف وقطر ۱۳ نانومتر..... ۱۳۶
- شکل ۵-۲۶- مقایسه مقادیر عدد ناسلت حساب شده از رابطه حاضر (معادله (۹-۵) ) با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی عددی..... ۱۳۸
- شکل ۵-۲۷- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حساب شده از رابطه حاضر ، معادله (۱۰-۵) با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی عددی..... ۱۳۹

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- طبقه‌بندی روش‌های انتقال حرارت [۱]..... ۴
- جدول ۲-۱- طبقه بندی انواع مبدل های حرارتی از لحاظ قطر هیدرولیکی ..... ۳۱
- جدول ۲-۲- دسته‌بندی انواع کانال از لحاظ قطر هیدرولیکی ..... ۳۱
- جدول ۳-۲- روش‌های ساخت میکروکانالها ..... ۳۳
- جدول ۴-۲- خلاصه‌ای از برخی از روش‌های ساخت میکروکانالها..... ۳۵
- جدول ۵-۲- مقادیر مشخصه جریان آرام در کانال‌های مدور و غیر مدور ..... ۴۳
- جدول ۱-۳- تعیین متغیر  $\beta$  برای استفاده در رابطه (۳-۷) ..... ۵۲
- جدول ۲-۳- مدل‌های لزجت برای نانوسیالات ..... ۵۸
- جدول ۳-۳- مروری بر کارهای انجام شده پیرامون جریان نانوسیالات در میکروکانال ..... ۷۲
- جدول ۵-۳- روابط مربوط به محاسبه ضریب اصطکاک در جریان آشفته ..... ۷۶
- جدول ۶-۳- روابط مربوط به محاسبه عدد ناسلت برای نانوسیال ..... ۸۰
- جدول ۱-۴- خواص ترموفیزیکی نانوذره  $Al_2O_3$  ..... ۹۳
- جدول ۱-۵- خواص شبکه بندی‌های مختلف ..... ۹۹
- جدول ۲-۵- مقایسه عدد ناسلت متوسط در چهار نوع شبکه بندی به همراه خطای نسبی ..... ۱۰۰
- جدول ۳-۵- مقایسه افت فشار جریان آب عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران به ازای  $Re = ۹۱۵$  ... ۱۰۶
- جدول ۵-۴- ناسلت متوسط جریان سیال آب در لوله به ازای  $Re = ۹۱۵$  و  $Pr = ۵/۰۶$  در حالت شار ثابت ..... ۱۰۸
- جدول ۵-۵- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان آب به ازای  $Re = ۹۱۵$  و  $Pr = ۵/۰۶$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت ..... ۱۱۰
- جدول ۶-۵- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان آب به ازای  $Re = ۹۳۷$  و  $Pr = ۵/۳$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت ..... ۱۱۱
- جدول ۷-۵- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان نانوسیال به ازای  $Re = ۱۰۸۹$ ،  $Pr = ۲۵/۵$  و  $\phi = ۰/۰۶$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت ..... ۱۱۲
- جدول ۸-۵- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان نانوسیال به ازای

۱۱۴.....  $\phi = 0.0242$  و  $Pr = 9/36$ ،  $Re = 774$  در حالت شار ثابت

جدول ۵-۹- مقایسه افت فشار عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای غلظت ۲/۲۴ درصد به ازای (الف)

۱۱۷.....  $Re = 613$  (ب)  $Re = 774$



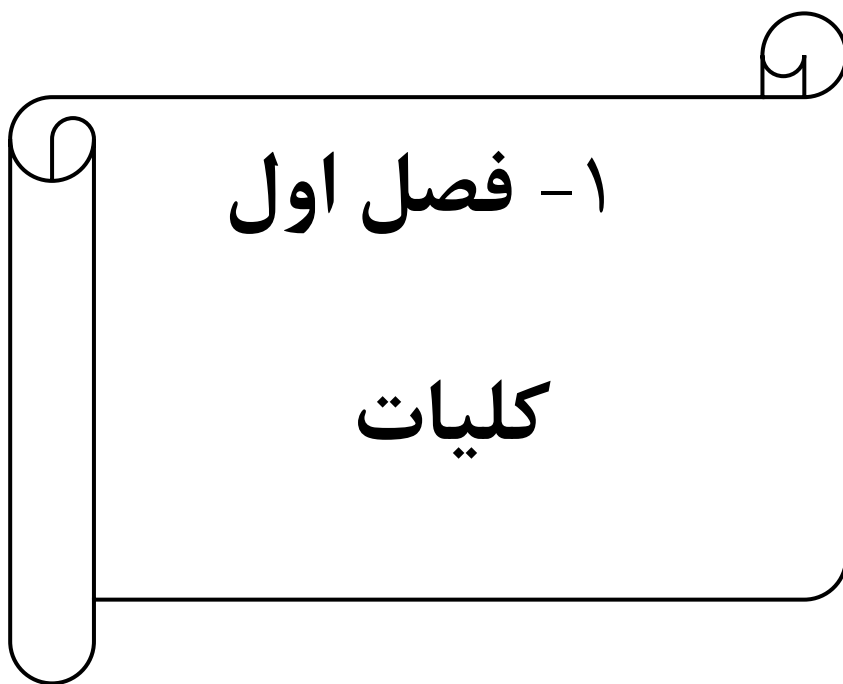
## لیست علائم و اختصارات

$A \text{ (m}^2\text{)}$	سطح مقطع
$P_w \text{ (m)}$	محیط خیس
Br	عدد برینکمن
$C_p \text{ (J/KgK)}$	ظرفیت گرمایی ویژه
$d_h \text{ (m)}$	قطر هیدرولیکی
$d_p \text{ (nm)}$	قطر ذرات نانو
$D \text{ (m)}$	قطر
Gz	عدد گراتز
$k \text{ (W/mK)}$	ضریب هدایت حرارتی
$h \text{ (W/m}^2\text{K)}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
$K_B \text{ (J/K)}$	ثابت بولتزمن
Kn	عدد نادسن
$L \text{ (m)}$	طول کانال
Nu	عدد ناسلت
$P \text{ (Pa)}$	فشار
Pr	عدد پرنتل
Pe	عدد پکلت
$q'' \text{ (W / m}^2\text{)}$	شار حرارتی
Re	عدد رینولدز
$T \text{ (K)}$	دما
$T_b \text{ (K)}$	دمای توده سیال
$\Delta T \text{ (K)}$	اختلاف دما
$u \text{ (m/s)}$	مولفه سرعت در راستای محور X
$v \text{ (m/s)}$	مولفه سرعت در راستای محور Y
$x \text{ (m)}$	مولفه طول افقی
$y \text{ (m)}$	مولفه طول عمودی
	<b>علائم یونانی</b>
$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)}$	ضریب پخش حرارتی

$\varphi$	کسر حجمی نانو ذرات
$\lambda$	پویش آزاد مولکولی
$\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	لزجت دینامیکی
$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	چگالی
$\tau (\text{Pa})$	تنش برشی
$\Omega(\text{m}^2)$	سطح مقطع
	<b>زیر نویس ها</b>
ave	متوسط
slip	لغزش
eff	موثر
f	سیال
in	ورودی
nf	نانوسیال
w	دیوار
S	نانوذرات







## ۱-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر شاهد پیشرفت روزافزون علوم درزمینه های مختلف هستیم که پیامد مستقیم آن رشد تکنولوژی و راحتی و آسایش هر چه بیشتر برای انسان‌ها می‌باشد. علوم مربوط به انتقال حرارت نیز از این قضیه مستثنا نیست و در سالهای اخیر دستخوش تغییرات فراوانی شده است که نتیجه‌ی تلاش‌ها و مطالعات انجام‌شده توسط دانشمندان علم انتقال حرارت در این زمینه می‌باشد. افزایش انتقال حرارت اصلی‌ترین و مهم‌ترین زمینه فعالیت‌ها را در این خصوص به خود اختصاص داده است لذا در اکثر مقالات و مطالعات ارائه‌شده سعی دارند که به نحوی راندمان حرارتی را افزایش دهند. گرمایش و سرمایش یک سیستم از مهم‌ترین چالش‌هایی می‌باشد که بسیاری از صنایع مانند صنایع الکترونیک، نیروگاه‌ها، حمل‌ونقل، مبدل‌های حرارتی، کامپیوترهای فوق‌سریع و فرایندهای تولید با آن مواجه می‌باشند. دستگاه‌های خنک‌کننده و گرمایشی بر پایه روش‌های مختلف انتقال حرارت طراحی می‌شوند. اگر اصول مربوط به روش‌های افزایش انتقال حرارت با توجه به محدودیت منابع طبیعی و تمایل به کاهش هزینه‌ها و طراحی دستگاه‌های انتقال حرارت با سطح زیاد به‌خوبی شناخته شوند، امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط‌زیست میسر خواهد بود. در این فصل ابتدا روش‌های بهبود انتقال حرارت را دسته‌بندی کرده و سپس نانوسیال و هندسه‌ای که در این پایان‌نامه به کار گرفته خواهد شد، با جزئیات بیشتری شرح داده خواهند شد.

## ۱-۲- معرفی روشهای افزایش انتقال حرارت

در چند دهه اخیر به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مواد اولیه و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی تلاش‌های زیادی برای ساخت دستگاه‌های تبادل کننده حرارتی پربازده صورت پذیرفته است که هدف اصلی آن‌ها کاهش اندازه وسایل حرارتی موردنیاز برای یک‌بار حرارتی معین و افزایش

ظرفیت انتقال حرارت می‌باشد. روش‌های متعددی برای افزایش انتقال حرارت وجود دارند که به دودسته کلی تقسیم می‌شوند [۱]:

- روش‌های فعال<sup>۱</sup>
- روش‌های غیرفعال<sup>۲</sup>

روش‌های فعال به روش‌هایی گفته می‌شود که در آن بقای مکانیزم تقویت انتقال حرارت وابسته به وجود یک نیروی خارجی است. درحالی‌که در روش‌های غیرفعال نیازی به وجود چنین نیرویی نیست. در جدول ۲-۲۱ این طبقه‌بندی را به‌طور دقیق‌تر و با ذکر مهم‌ترین روش‌های موجود در هر دسته بیان شده است.

استفاده از هر کدام از این روش‌ها به شرایط کاری موجود و نیازهای کاربر بستگی دارد. اما روش‌های فعال به دلیل استفاده دائمی از یک منبع توان معمولاً پرهزینه‌تر از روش‌های غیرفعال هستند. لذا روش‌های غیرفعال در زمینه‌های مختلف صنعت و تولید قدرت نقش پیشگام را دارند. مروری بر تاریخچه روش‌های غیرفعال نشان می‌دهد که فن‌آوری انتقال حرارت را می‌توان به سه نسل تقسیم کرد [۲]. نسل اول بر کانال‌های ساده برای انتقال حرارت متمرکز بود. توسعه انتقال حرارت در نسل دوم به‌واسطه استفاده از تجهیزات و ابزار تقویت‌کننده دوبعدی که دارای ابعادی قابل‌مقایسه با ابعاد کانال بودند، ارتقا یافت. نسل سوم به‌واسطه استفاده از ابزار و تجهیزات سه‌بعدی (زبری‌های سه‌بعدی، برآمدگی‌ها و زائده‌ها) در مقیاس‌های ریزتر و حتی در حد میکرون زمینه بهبود انتقال حرارت را فراهم کرد.

---

1. Passive techniques  
2. Active techniques

جدول ۱۲-۲- طبقه‌بندی روش‌های انتقال حرارت [۱]

روش‌های غیرفعال	روش‌های فعال
میکروکانالها	کمک‌کننده‌های مکانیکی
سطوح پرداخت‌شده	ارتعاش سطح
سطوح زبر	ارتعاش سیال
سطوح گسترش‌یافته	میدان‌های الکتروستاتیکی
ابزارهای تقویت‌کننده جابه‌جاشده	مکش یا دمش
ابزارهای پیچش جریان	برخورد جت
لوله‌های مارپیچ	
افزودنی‌ها به سیالات	
ابزارهای کشش سطحی	

یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت، استفاده از میکروکانالها می‌باشد. میکروکانالها در صنایع و دستگاه‌های متفاوتی نظیر سرمایش قطعات الکترونی، مبدل‌های حرارتی میکروکانال، سرمایش و روانکاری سیستم‌های رباتیک، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی و میکروراکتورها کاربرد دارند. اساس کار میکروکانالها افزایش نسبت سطح انتقال‌دهنده حرارت می‌باشد. انتقال حرارت زیاد، اندازه کوچک، نیاز به مقدار کم سیال خنک‌کننده از ویژگی میکروکانالها است. انتقال حرارت در میکروکانالها ممکن است به دلیل محدودیت در هدایت گرمایی آنها محدود شود. از این رو جهت بهبود انتقال حرارت، افزودن نانوذره به یک سیال پایه مفید می‌باشد. افزودن ذرات جامد به صورت معلق در سیال پایه‌یکی دیگر از روش‌های افزایش انتقال حرارت می‌باشد. افزایش ضریب هدایت حرارتی ایده اصلی در بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت سیالات است. از آنجاکه ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد فلزی معمولاً بزرگتر از سیالات می‌باشد، انتظار می‌رود افزودن این ذرات جامد موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه گردد. افزودن ذرات با اندازه میلی‌متر و میکرومتر بیش از ۱۰۰ سال است که شناخته‌شده می‌باشد [۳]. اما استفاده از این



ذرات بدلیل مشکلات عملی نظیر ته‌نشین شدن سریع ذرات، ایجاد سایش شدید، افزایش افت فشار و عدم امکان استفاده از آن‌ها در مجاری بسیار کوچک، میسر نیست. پیشرفت‌های اخیر در مهندسی مواد و توسعه فناوری‌های جدید زمینه را برای تولید ذرات با اندازه نانومتر (نانو مواد) که توان فائق آمدن بر این مشکلات را دارند، فراهم کرده است. با پخش کردن این مواد در سیال نوع جدیدی از سیال به وجود می‌آید که نانوسیال<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. ایده اصلی در این روش در واقع از همان روش اضافه کردن ذرات جامد به سیال گرفته شده است. نانو مواد خواص حرکتی و حرارتی سیال را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. نانو ذرات در مقایسه با ذرات در اندازه میلی‌متر یا میکرومتر دارای سطح تماس بیشتری هستند که قابلیت انتقال انرژی را بین ذرات جامد و سیال افزایش می‌دهند. مزیت دیگر این نوع سیال کوچک بودن نانوذرات پخش شده در آن است. این ذرات دارای ممنوم کمتری هستند که در نتیجه از خوردگی دیواره لوله‌ها و کانال‌ها جلوگیری می‌شود. امکان ته‌نشین شدن این ذرات بدلیل وزن کم آن کمتر است. در قسمت‌های بعد درباره نانوسیال، پارامترهای مؤثر در انتقال حرارت، خواص و ویژگی‌های آن و... به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

### ۱-۳- نانوسیال

یکی از راه‌های بهبود فرآیند انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، افزودن موادی با ضریب هدایت حرارتی بالا به سیال است. محققان سال‌ها بر روی استفاده از مخلوط ذرات جامد معلق بسیار کوچک در ابعاد میکرو در سیال برای بهبود انتقال حرارت کار کردند. همانطور که قبلاً اشاره شد این سیالات مشکلات فراوانی مانند رسوب‌گذاری، ناخالصی، خوردگی و افزایش افت فشار و... داشته‌اند تا اینکه در سال ۱۸۸۱ ایده استفاده از نانوذرات برای اولین بار توسط ماکسول [۳] مطرح شد و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال

---

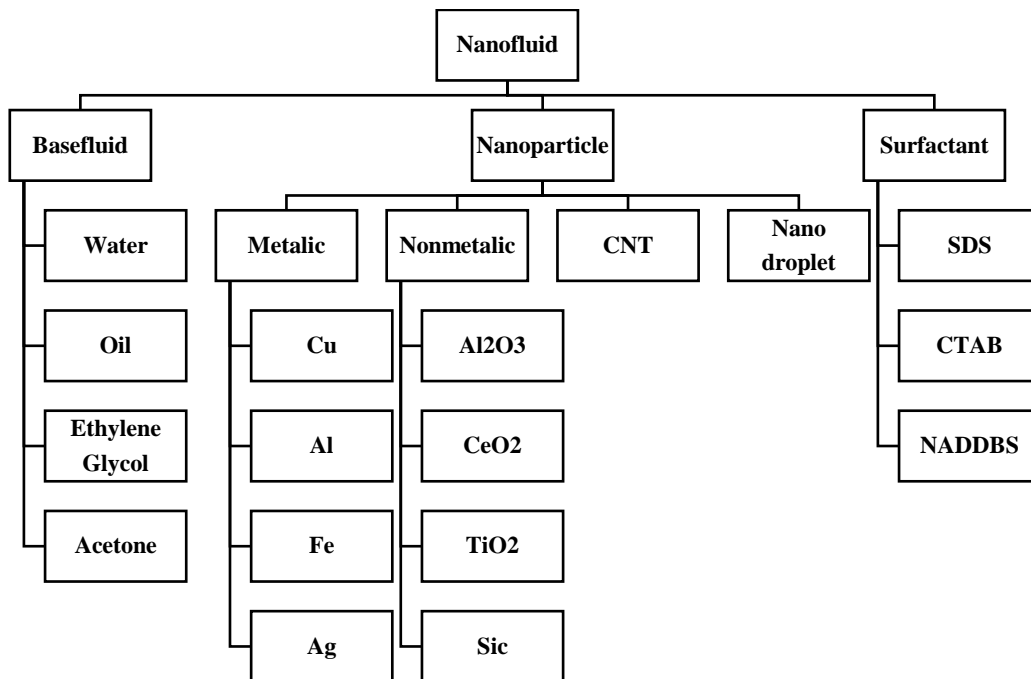
1. Nanofluid

حرارت در سیالات پدید آمد. در واقع او دیدگاه تازه‌ای را در مورد سوسپانسیون سیال جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح کرد. اولین مشاهدات در خصوص افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال در اثر استفاده از نانوذرات در مایعات در سال ۱۹۹۳ توسط ماسودا<sup>۱</sup> و همکاران [۴] گزارش شد و بعد از آنها چوی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۵ در موسسه تحقیقاتی آرگونه<sup>۳</sup> در آمریکا اولین کسی بود که از لفظ نانوسیال برای سوسپانسیون‌های نانوذره در مایع استفاده کرد [۵]. نانوسیالات طبقه‌بندی جدیدی از سیالات انتقال حرارت هستند که از طریق معلق‌سازی نانوذرات در درون سیالات معمولی و متداول انتقال حرارت که به‌عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند به دست می‌آیند. پراکندگی نانوذرات درون سیال می‌تواند کاملاً یا تقریباً همگن باشد. متوسط اندازه ذرات استفاده‌شده در نانوسیالات، کمتر از ۵۰ نانومتر است. با این وجود امروزه تحقیقات به این اندازه محدود نبوده و ذراتی با توزیع اندازه‌های مختلف در دامنه ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بطور معمول نانوذرات از جنس فلزاتی مانند مس، آلومینیوم، پتاسیم، سیلیسیم و اکسیدهای آن‌ها و همچنین نانولوله‌های کربن<sup>۴</sup> و سیالات پایه نیز عمدتاً از سیالات با رسانایی نسبتاً پایین‌تر مانند آب، اتیلن گلیکول و سیالاتی از این دسته که در صنعت به عنوان هادی انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌باشند. افزودن نانوذرات به یک سیال نظیر آب فقط هدایت گرمایی آن را تحت تاثیر قرار نداده بلکه سایر خواص فیزیکی نظیر ظرفیت گرمایی سیال نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مجموعه تغییرات ایجادشده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش هدایت گرمایی در انتقال حرارت جابه‌جایی نیز شاهد افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت باشیم. نانوذرات نسبت به ذرات بزرگتر مانند میکروذرات، بسیار پایدارتر بوده و سطح تماس بیشتری با ناحیه سیال دارند. در واقع دو مشخصه اصلی نانوسیال یکی پایداری بسیار زیاد و دیگری ضریب هدایت حرارتی بسیار بالای آن است.

---

2. Masuda  
1. Choi  
2. Argonne  
3. Carbon nanotube

همچنین به دلیل کوچک بودن ذرات تا حد زیادی مشکلات خوردگی و افت فشار کاهش پیدا می کند و همچنین پایداری برخی سیالات در مقابل رسوب گذاری بطور چشمگیری بهبود می یابد. امروزه تحقیقات در زمینه نانوسیالات ابعاد بسیار گسترده ای پیدا کرده است. از یک سو محققین در رابطه با افزایش هدایت گرمایی سیالات و افزایش انتقال حرارت، پیگیر ساخت و تهیه نانوسیالات با انواع نانوذرات و نانولوله ها با توزیع اندازه های مختلف هستند، در حالی که برخی دیگر از محققین به بررسی مسئله پایداری و عدم ته نشینی نانوذرات در طی فرآیند انتقال حرارت و عدم کلوخه شدن یا مهاجرت آن ها می پردازند. ذرات با مواد گوناگون و متعددی برای تهیه نانوسیالات استفاده می شوند. در این بین نانوذرات  $SiC$ ،  $Ag$ ،  $Au$ ،  $Fe$ ،  $Al_2O_3$  و  $CuO$ ،  $TiO_2$  اغلب در تحقیقات مربوط به نانوسیالات به کار رفته اند. ایجاد تغییرات در خواص رئولوژیکی سیال پایه با افزودن نانوذرات، بخشی از تلاش های محققین را به بررسی این موضوع معطوف داشته است و این در حالی است که محققین دیگر در حال تهیه و ساخت نانوسیالات هیبریدی پیشرفته، اعم از پلی نانوسیالات و نانوسیالات کاهش دهنده اصطکاک هستند. شیوه تهیه و فرآوری نانوسیال یا به عبارت دیگر نحوه معلق سازی ذرات جامد در سیال پایه و افزودن نانوذره به سیال پایه نیز یکی از حوزه های تحقیقاتی مهم در زمینه نانوسیالات است. در شکل ۱-۱ سیالات پایه، نانوذرات و سورفکتانت ها برای تهیه نانوسیال نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱- سیالات پایه رایج، نانوذرات، سورفکتانت ها برای تهیه نانوسیال

## ۱-۴- مزایای نانوسیال ها

فرآیند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی در اغلب صنایع کوچک و بزرگ وجود دارد. افزایش میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی صرفه‌جویی میلیون‌ها دلار در هزینه‌های صنایع می‌باشد. با رفتاری که نانوسیال از خود در زمینه انتقال حرارت نشان داده است، امید به چنین صرفه‌جویی در صنایع، به‌ویژه صنایع بزرگ بیشتر شده است. برخی از مزایا و قابلیت‌های نانوسیالات به‌قرار زیر است:

### الف- بهبود انتقال حرارت و پایداری

کاهش اندازه ذرات جامد که توأم با افزایش تعداد آن‌ها در واحد جرم است، منجر به افزایش سطح مخصوص می‌شود. به‌طوری‌که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتر است. با کاهش ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری از اتم‌های آن در

نزدیکی سطح قرار می‌گیرد. سطح ذرات در انتقال حرارت مؤثر بوده و استفاده از نانوسیال منجر به افزایش سطح انتقال حرارت می‌شود. نانوذرات به کار گرفته شده یک سطح بسیار زیاد برای موضوع انتقال حرارت ایجاد می‌کند و همین عامل یک مزیت نهان برای نانوسیال است. مقایسه سطح ایجاد شده برای انتقال حرارت در نانوذرات با سطح پودرهای متداول میکرومتری بیانگر توانایی و قابلیت زیاد نانوذرات در افزایش انتقال حرارت و ایجاد سوسپانسیون پایدار است. لازم به ذکر است یکی از مشکلات افزودن ذرات به اندازه میکرو به سیال پایه ته‌نشینی سریع آن‌ها است که با کاهش اندازه به مقیاس نانو تا حدود زیادی مرتفع می‌شود.

### **ب- کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال**

در سیالات متداول حامل انرژی، افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی مستلزم افزایش سرعت سیال برای بالا رفتن عدد رینولدز و به تبع آن عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. این افزایش سرعت در درون تجهیزات به نوبه خود، مستلزم افزایش توان مصرفی پمپ است؛ اما اگر نانوسیال برای انتقال حرارت بکار گرفته شود، در یک سرعت مشخص و معین افزایش انتقال حرارت ناشی از افزایش ضریب هدایت گرمایی سیال خواهد بود. به عنوان مثال افزایش انتقال حرارت به میزان دو برابر، با استفاده از سیال پایه، نیازمند افزایش توان پمپاژ به حدود ۱۰ برابر است. در حالی که اگر نانو ذرات به سیال پایه افزوده شده و ضریب هدایت گرمایی نانوسیال حاصل حدود ۳ برابر سیال پایه شود، بدون نیاز به افزایش پمپاژ می‌توان به همان دو برابر افزایش در انتقال حرارت دست پیدا کرد؛ بنابراین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپ‌ها، از دیگر مزایای نانوسیالات است.

### **ج- کاهش گرفتگی و انسداد مجاری**

ایده افزایش انتقال حرارت با استفاده از افزودن ذرات به یک سیال پایه قدمتی نزدیک به صد سال دارد. بر این اساس ایده بهبود و افزایش هدایت حرارتی مایعات با افزودن ذرات جامد بسیار ریز شکل

گرفته است. برخی از ذرات جامد مانند ذرات فلزی، غیرفلزی و پلیمری را می‌توان با مایعات مخلوط کرده و از آن‌ها سیال دوغابی شکل تهیه کرد. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته‌نشین شدند. همین امر سبب می‌شد که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود شوند. درحالی‌که ذرات با اندازه نانو سوسپانسیون‌های بسیار پایدارتری تشکیل داده و پایین بودن سرعت ته‌نشینی آن‌ها سبب می‌شود تا مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد. از طرفی بزرگی ذرات میکرومتری سبب می‌شود تا نتوان از آن‌ها در مجاری میکروکانال‌ها استفاده کرد. درحالی‌که اندازه ذرات در مقیاس نانو این امکان را می‌دهد تا از نانوسیال بتوان در میکروکانال‌ها نیز استفاده کرد.

#### د- کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت

بهینه‌سازی تجهیزات انتقال حرارت جهت رسیدن به راندمان بالاتر انرژی نیازمند تمرکز بر کوچک‌سازی تجهیزات از یک‌سو و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح از سوی دیگر می‌باشد. سیالاتی نظیر آب، روغن‌های معدنی و اتیلن گلیکول نقش زیادی در انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی مانند فرآیند-های تولید نیرو، فرآیندهای شیمیایی، فرآیندهای سرمایش و گرمایش و میکروالکترونیک بر عهده‌دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر سیالات مذکور اولین مانع جدی در فشرده‌سازی و کارآمد کردن مبدل‌های حرارتی است.

با توجه به قابلیت‌هایی که نانوسیال در افزایش انتقال حرارت از خود نشان داده است، برای انتقال یک مقدار مشخص حرارت، مبدل‌های حرارتی لازم وقتی که از نانوسیال به‌جای سیال معمولی برای انتقال حرارت استفاده شود، از حجم و اندازه کوچک‌تری برخوردار خواهند شد.

## ه- کاهش هزینه‌ها

به دلیل کاهش توان مصرفی پمپ‌های انتقال سیال از طرفی و کاهش اندازه و وزن تجهیزات انتقال حرارت از طرف دیگر، با به‌کارگیری نانوسیال صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد می‌شود.

### ۱-۵- کاربردهای نانوسیال

از نانوسیال می‌توان برای بهبود انتقال حرارت و افزایش راندمان در سیستم‌های مختلف انرژی همانند خنک‌کاری اتومبیل‌ها و موارد مشابه استفاده کرد. در حال حاضر تعداد مؤسسات صنعتی و تحقیقاتی که در حال بررسی استفاده از نانوسیال در محصولات خود هستند در حال افزایش است. در مورد زمینه‌های مختلف کاربرد نانوسیال، چه آنان که بصورت بالقوه وجود دارند و چه آنهایی که بصورت بالفعل در آمده‌اند، بطور مختصر می‌توان به کاربردهای آن در صنعت حمل و نقل، خنک‌کاری صنعتی، رنوکتورهای اتمی، استخراج انرژی از منابع گرمایی و دیگر منابع انرژی، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، زمینه‌های نظامی، کاربردهای فضایی، زمینه‌های پزشکی و انتقال دارو نام برد.

### ۱-۶- تولید نانوسیال

طرز تهیه نانوسیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر بازده انتقال حرارت است. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت؛ زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط خاص عبارت‌اند از یکنواخت بودن سوسپانسیون<sup>۱</sup>، پایدار بودن سوسپانسیون، توده‌ای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راهکارهای مختلف استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال از تغییر pH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده

---

1 . Suspension

از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد ذرات و یا ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور می‌توان استفاده کرد. تمام این روش‌ها منجر به تغییر خواص سطحی ذرات معلق شده می‌شوند و سبب خوشه‌ای<sup>۱</sup> شدن ذرات جهت ایجاد یک سوسپانسیون پایدار می‌شوند. با در نظر گرفتن ملاحظات ذکرشده، شیوه‌های تهیه نانوسیال به دو روش تقسیم می‌شود:

الف- روش تهیه یک مرحله‌ای

ب- روش تهیه دو مرحله‌ای

در روش یک مرحله‌ای، ذرات موردنظر به‌طور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می‌شود. به‌عنوان مثال برای تهیه نانوذرات فلزی درون یک سیال، بخار فلز مستقیم به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانو ذرات کندانس شود. این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا<sup>۲</sup> نیز معروف است. این روش، روش مناسبی برای تولید نانوسیالات فلزی است. در این روش تهیه نانوسیال، سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آن‌ها تشکیل نمی‌شود. به همین دلیل نانوذرات تهیه‌شده از این طریق بسیار تمیز است و این مزیت روش یک مرحله‌ای به دلیل فرمول‌بندی نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با متراکم شدن و تجمع ذرات در درون سیال است. روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال به دلیل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است، در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی، محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دومرحله‌ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده‌اند. این به علت آسان‌تر بودن فرمول‌بندی نانوسیال با نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

در روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال، به‌راحتی می‌توان از انواع پودرها با اندازه‌های مختلف استفاده کرد، مسئله‌ای که در روش یک مرحله‌ای با مشکلات بیشتری همراه است. در این روش، ابتدا نانوذره

---

1. Clusters

2. Bottom-up method



موردنظر تهیه شده و سپس به سیال پایه افزوده می شود. به نظر می رسد که این روش با توجه به این که می توان نانوذرات و نانولوله ها را بیشتر و اغلب آسان تر از روش یک مرحله ای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. در روش دو مرحله ای نیز باید مسئله کلوخه شدن و توده ای شدن و نیز چسبندگی نانوذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده ای ذرات و برگرداندن آن به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی است که در تهیه نانوسیال باید صورت بگیرد. چراکه اندازه و توزیع ذرات در داخل سیال مهم ترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی بر عهده دارد. روش دو مرحله ای شیوه ای مناسب برای تهیه نانوسیالات اکسیدی می باشد. تجهیزات مختلفی را برای پراکنده سازی نانوذرات در درون سیال می توان به کار برد. از جمله این تجهیزات حمام ماورای صوت، همزن مغناطیسی، همزن با توان برشی بالا و هموژنایزر می باشند. زمان فرآوری نانوسیال و شدت همزن تاثیر مهمی بر پراکندگی نانوذرات در درون سیال پایه دارند. پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده ای شده با اعمال نیرو شکسته می شود. باین حال نانوذرات به شدت متمایل به توده ای شدن مجدد هستند. یکی از دلایل این مسئله نیروی واندروالس می باشد. نانوذراتی که به روش یک مرحله ای و یا به روش دومرحله ای تهیه می شوند باید تا حد ممکن پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و ته نشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایداری تعلیق نانوذرات در سیال مورد توجه قرار بگیرد.

## ۷-۱- پارامترهای انتقال حرارت در نانوسیالات

نتایج اولیه تجربی از بررسی انتقال حرارت نانوسیال در کانال هایی با هندسه های مختلف، حاکی از بهبود شدید در انتقال حرارت و به تبع آن، ضریب انتقال حرارت جابجایی می باشد. تحقیقات متعددی برای بررسی علت این رفتار غیر متعارف صورت گرفت. عوامل مؤثر بر افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات عبارتند از:

کسر حجمی، جنس نانوذرات، نوع سیال پایه، اندازه نانوذرات، شکل نانوذرات، دما، حرکت براونی، خوشه‌ای شدن، لایه‌ای شدن در اطراف نانوذره، ترموفورسیس<sup>۱</sup>.

در این بخش هر کدام از آن‌ها بطور مختصر توضیح داده خواهد شد.

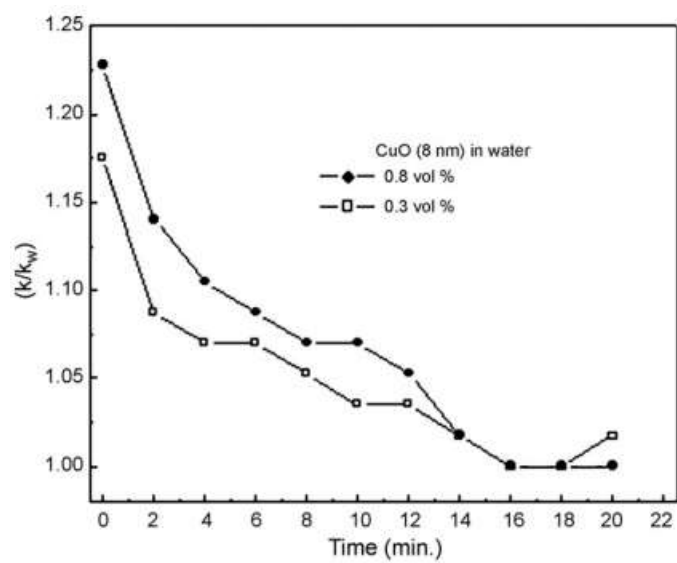
### ۱-۷-۱- انباشتگی ذرات<sup>۲</sup>

نانوذرات در اثر نیروهای بین ملکولی مانند نیروی واندروالس تمایل به انباشتگی دارند [۶]. کارتیکین و همکاران [۷] آزمایش‌های تجربی روی مخلوط اکسید مس-آب انجام دادند و نشان دادند که اندازه و خوشه شدن نانوذرات اثر مهمی روی رسانش حرارتی نانوسیال دارند. همچنین آن‌ها نشان دادند که انباشتگی نانوذرات به زمان بستگی دارد و با گذشت زمان انباشتگی آن‌ها افزایش می‌یابد در نتیجه رسانش حرارتی در نانوسیال کاهش می‌یابد. شکل ۱-۲ نشان می‌دهد که رسانش حرارتی در نانوسیال با افزایش زمان شدیداً کاهش می‌یابد و همچنین در شکل

۱-۳ انباشتگی نانوسیال با گذشت زمان به صورت میکروسکوپی نشان داده شده است. آن‌ها نشان دادند که در این فاصله زمانی هیچگونه ته‌نشینی در نانوسیال اتفاق نیفتاده است. گروهی دیگر از دانشمندان نشان دادند که با افزایش مقدار نانوذرات جامد میزان انباشتگی به دلیل بزرگ شدن توده‌های نانوذرات و در نتیجه افزایش نیروهای واندروالس، افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۸] ویسکوزیته‌ی مخلوط آلومینیوم-آب را اندازه‌گیری کرده و نشان داده‌اند که با افزایش انباشتگی نانوذرات ویسکوزیته نانوسیال نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱-۴ اثر خوشه بندی روی ضریب حرارتی نشان می‌دهد.

---

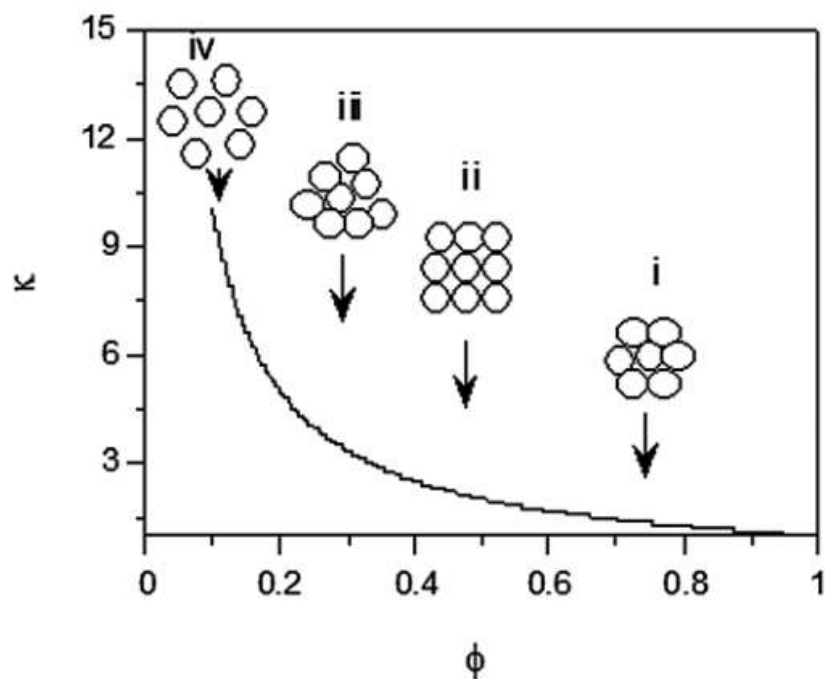
1. Thermophoresis  
2. Agglomeration



شکل ۲-۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به زمان برای مخلوط آب اکسید مس [۷]



شکل ۳-۱- افزایش انباشتگی نانوذرات با افزایش زمان برای مخلوط آب اکسید مس ( $\phi=0/1$ ) (الف) ۲۰ دقیقه (ب) ۶۰ دقیقه (ج) ۷۰ دقیقه [۷]



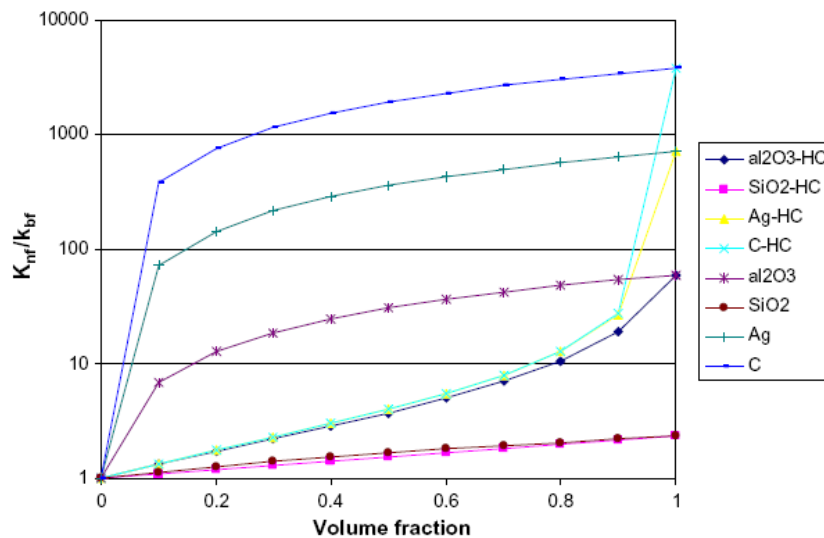
شکل ۱-۴- افزایش ضریب حرارتی بدلیل افزایش حجم موثر هدایت بالای خوشه ها [۹]

### ۱-۷-۲- نسبت حجمی ذرات نانو

ضریب رسانش حرارتی نانوسیال با افزایش نسبت حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد [۷] (شکل ۱-۵).

اما افزایش زیاد کسر حجمی سبب می‌شود که نانوذرات ته نشین شوند، به همین دلیل ضریب حرارتی

نانوسیال در محدوده غلظت های پایین مشاهده می‌شود [۱۰].



شکل ۱-۵- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به نسبت حجمی ذرات نانو [۷]

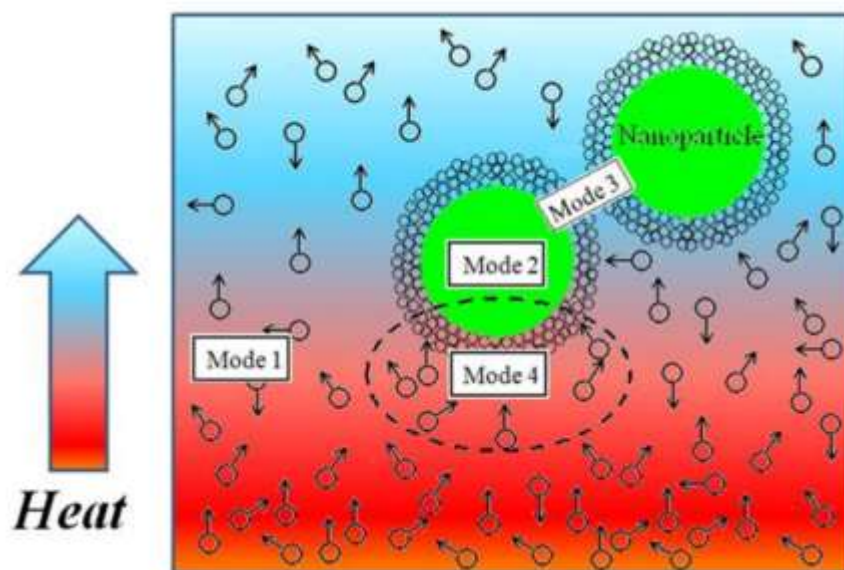
### ۱-۷-۳- حرکت براونی

حرکت‌های تصادفی و نامنظم ذرات معلق در بین ملکول‌های گاز یا مایع در اثر برخوردهای مکرر ذرات سیال با آن را حرکت براونی<sup>۱</sup> می‌نامند. حرکت براونی نیز یکی دیگر از عوامل موثر بر افزایش ضریب رسانش حرارتی موثر در نانوسیال است [۱۱-۱۲]. هر چه اندازه‌ی نانوذرات کوچکتر باشد حرکت براونی آن‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب رسانش حرارتی نیز افزایش می‌یابد و همین‌طور با افزایش اندازه نانوذرات حرکت براونی کاهش می‌یابد [۱۳]. نتایج حاصل از مقایسه زمان لازم برای جابه‌جایی ذره به اندازه خودش و زمان لازم برای انتقال حرارت در مایع به اندازه خود ذره نشان می‌دهد که نفوذ حرارتی خیلی سریع‌تر از حرکت براونی یا نفوذ جرمی صورت می‌گیرد و حرکت براونی نمی‌تواند عامل تشدید نفوذ گرمایی باشد. ولی نقش حرکت براونی در افزایش هدایت حرارتی نانوسیال از جنبه‌های دیگر قابل بررسی

1. Brownian Motion

و تحقیق است. به طور مثال تأثیر حرکت براونی در خوشه‌ای شدن<sup>۱</sup> بسیار پراهمیت بوده و این حرکات تصادفی از طریق افزایش احتمال تشکیل خوشه در اثر برخورد نانوذره باعث افزایش هدایت می‌شوند.

جانگ و چوی [۱۴] حرکت براونی نانوذرات را بررسی کردند و چهار حالت انتقال انرژی در نانوسیال پیشنهاد دادند: نفوذ گرما در سیال پایه، نفوذ گرما در نانوذرات، برخورد بین نانوذرات به علت حرکت براونی و تداخل دمایی بین نانوذرات و مولکولهای سیال پایه که آخرین مورد نشان دهنده اثر جابجایی ناشی از حرکت براونی ذرات می باشد (شکل ۱-۶).



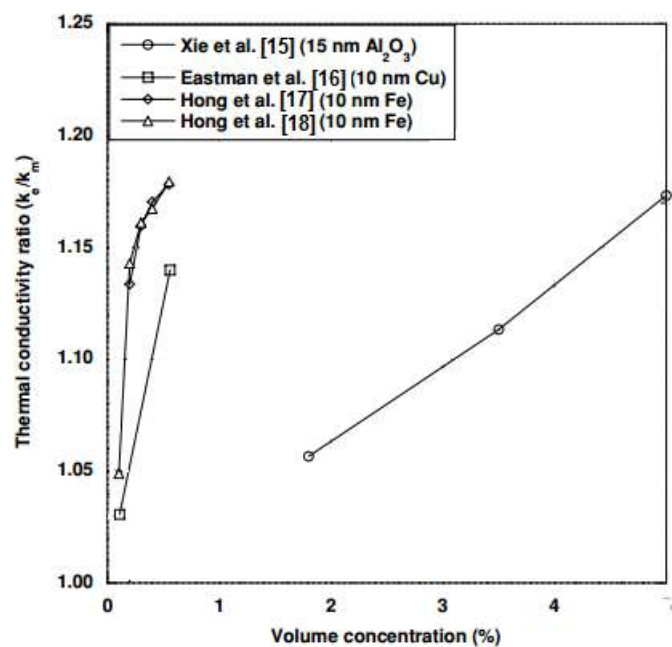
شکل ۱-۶- حالت های انتقال انرژی در نانوسیال به دلیل حرکت براونی [۱۴]

## ۱-۷-۴ - ترموفورسیس

مولکول‌هایی که در محیط گرم‌تر قرار دارند بدلیل بالا بودن انرژی مومنتم بالاتر، با مولکول‌های مجاور برخورد می‌کنند. این امر موجب حرکت مولکول‌ها از محیط گرم‌تر به محیط سردتر و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. به این پدیده ترموفورسیس<sup>۱</sup> می‌گویند.

## ۱-۷-۵ - جنس نانوذرات

نتایج افزایش هدایت حرارتی در شکل ۱-۷ نشان داده شده است و شامل دوزره فلز و یک ذره اکسید می‌باشد. همانگونه که نشان داده شده است، ذرات فلز به همان مقدار ذرات اکسید باعث افزایش هدایت حرارتی اما در غلظت بسیار پایین‌تر شده‌اند. ذرات فلز هدایت گرامایی بالاتری نسبت به ذرات اکسید دارند اما فرایند تولید نانوسیالات با ذرات فلز بدون ذرات اکسید کننده مشکل است به عبارتی مشکل اصلی برای نانوسیالهایی با ذرات فلز حذف فرایند اکسیداسیون در هنگام تولید است. پوشش دادن ذرات یک روش برای حل این مشکل می‌باشد.



شکل ۱-۷- اثر جنس ذره برای ذرات معلق در اتیلن گلیکول

### ۱-۷-۶- اندازه نانوذرات

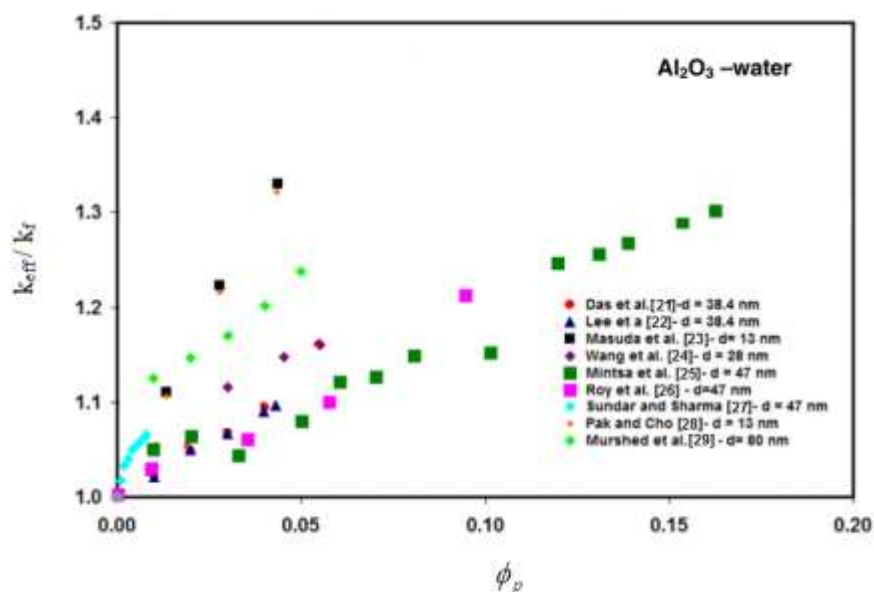
تحقیقات نشان داده اند که با کاهش اندازه نانوذرات ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال افزایش می یابد

[۱۹]. این افزایش ضریب رسانش حرارتی به دلیل افزایش حرکت براونی نانوذرات و همچنین کاهش

رسوب آن ها می باشد [۲۰].

شکل ۱-۸ اثر اندازه ذرات روی ضریب رسانش حرارتی نشان می دهد.

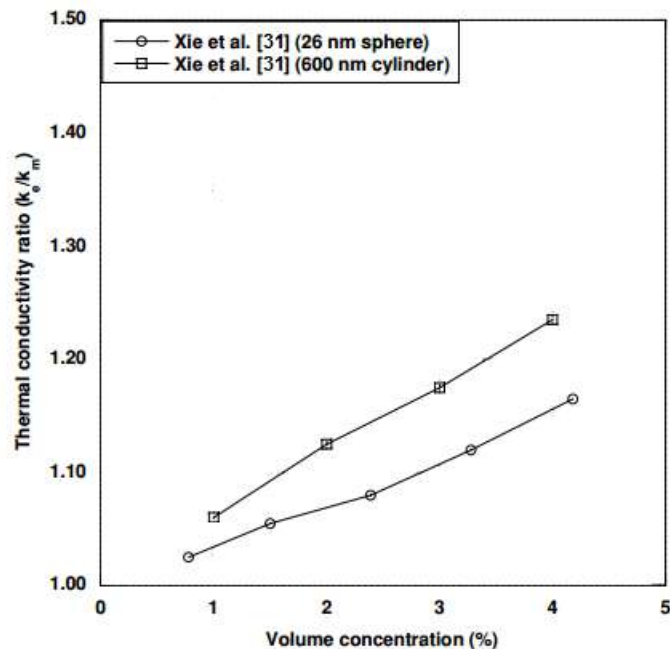




شکل ۸-۱- تغییرات ضریب هدایت گرمایی نسبت به اندازه ذرات

### ۷-۷-۱- شکل نانوذرات

تحقیقات نشان داده‌اند که هر چه شکل نانوذرات<sup>۱</sup> چند وجهی‌تر باشد، ضریب رسانش حرارتی آن بیشتر است [۳۰]. دلیل این امر افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات می‌باشد. هر چه این نسبت بزرگتر باشد ضریب رسانش حرارتی موثر بیشتر می‌باشد. شکل ۹-۱ نشان می‌دهد که ضریب رسانش حرارتی موثر مخلوط آب-SiC با افزایش وجه‌های نانوذرات از کروی به استوانه‌ای، افزایش می‌یابد.

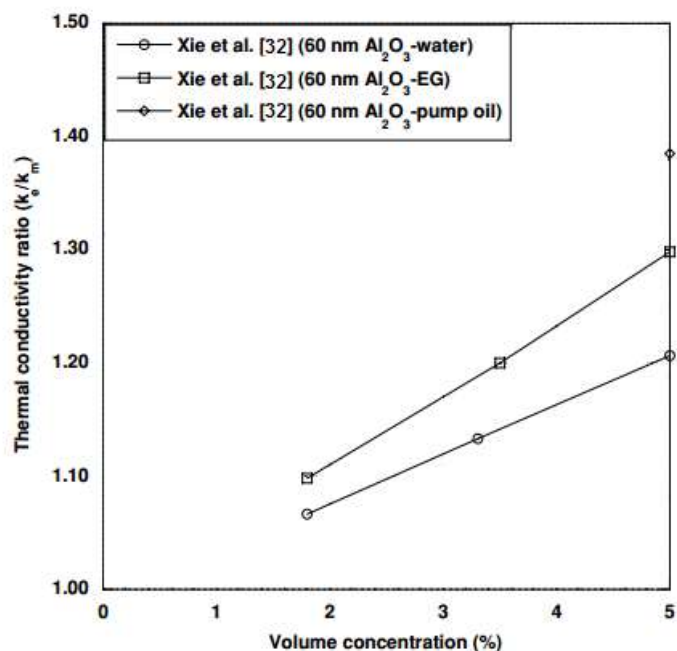


شکل ۱-۹- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و اشکال متفاوت نانوذرات برای مخلوط آب - SiC

### ۱-۷-۸- تاثیر سیال پایه

اثر سیال پایه روی افزایش هدایت حرارتی نانوسیال برای سه سیال پایه (آب، اتیلن گلیکول و روغن) در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد افزایش هدایت حرارتی در سیالهایی با انتقال حرارتی ضعیفتر بیشتر می باشد. نتایج شکل ۱-۱۰ حداقل افزایش برای آب که بهترین سیال برای انتقال حرارت با بالاترین هدایت حرارتی در مقایسه با دیگر سیالهاست را نشان می دهد. اگر چه این روند در تمام حالات برای تمام داده های آزمایشگاهی اتفاق نمی افتد، اما یک حالت کلی می باشد. این نتیجه مطلوب است به علت اینکه اغلب افزایش انتقال حرارت هنگامی که سیال انتقال حرارت کمی دارد حائز اهمیت است.

اتیلن گلیکول به تنهایی در مقایسه با آب دارای انتقال حرارت نسبتاً ضعیفی است، در نتیجه انتقال حرارت مخلوط اتیلن گلیکول و آب بین مقدار آنها قرار می گیرد.



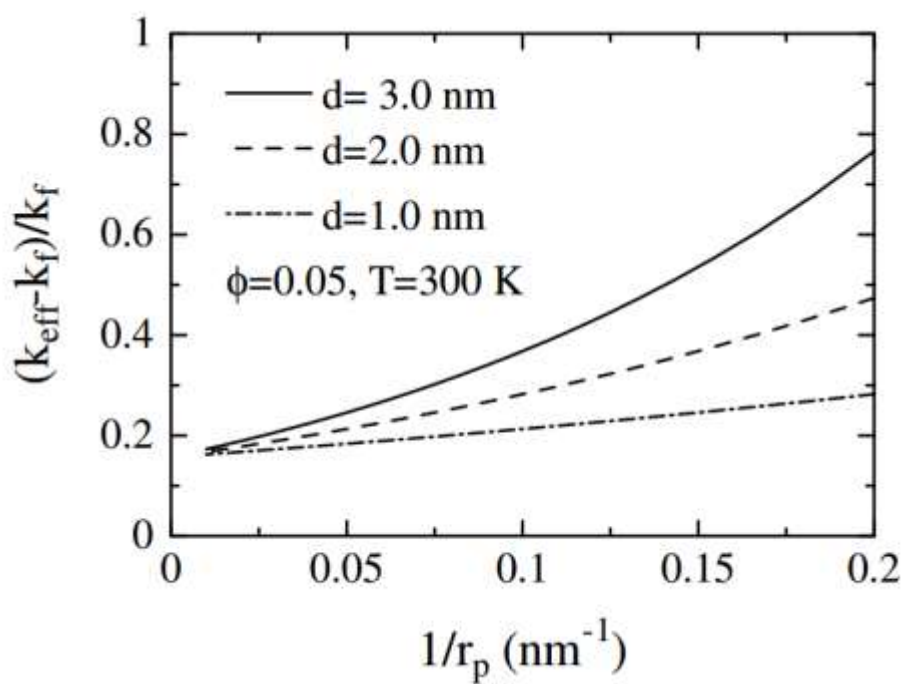
شکل ۱-۱۰- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و انواع مختلف سیال پایه برای مخلوط آب - اکسید آلومینیم

### ۱-۷-۹- ضخامت لایه سیال نزدیک به سطح ذرات نانو

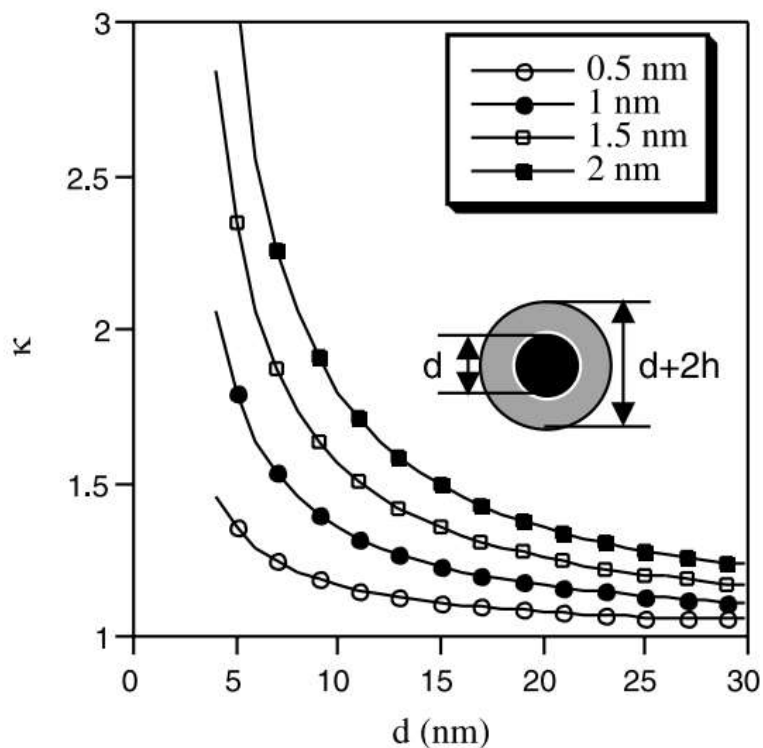
لایه سیال<sup>۱</sup> پیرامون ذرات نانو در نانوسیال نیز به افزایش انتقال حرارت کمک می‌کند. هر چند ضخامت و رسانش حرارتی این لایه ملکولی سیال هنوز مشخص نیست اما شکل لایه‌های ملکولی سیال محصور بین نانوذرات جامد توسط یو و همکاران [۳۳] مشخص شده است. رن و همکاران [۳۴] یک مدل تئوری برای مطالعه تغییرات رسانش حرارتی موثر نسبت به ملکول‌های سیال پیرامون ذرات نانو ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه سیال ضریب رسانش حرارتی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱-۱۱-الف). کبلینسکی و همکاران [۳۵] نیز روی اثر لایه سیال پیرامون نانوذرات بر ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها نیز نشان دادند که با افزایش لایه سیال پیرامون نانوذرات ضریب

1. Liquid Layer

رسانش حرارتی موثر افزایش می‌یابد (شکل ۱-۱۱-ب). در این اشکال،  $d$  بیان کننده ضخامت لایه سیال و  $r_p$  بیان کننده شعاع نانوذرات است. شکل نشان می‌دهند که با افزایش لایه سیال اطراف نانوذرات و یا کاهش شعاع ذرات نانو ضریب رسانش حرارتی افزایش می‌یابد.



(الف)

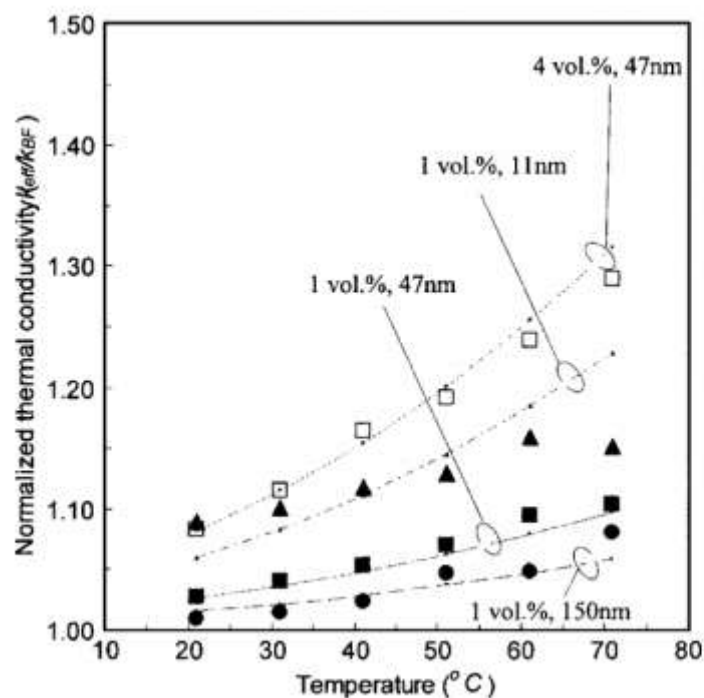


(ب)

شکل ۱-۱۱- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به ضخامت لایه سیال پیرامون نانوذرات [۳۴ و ۳۵]

### ۱-۷-۱۰- تاثیر دما

ضریب رسانش حرارتی موثر و حرکت براونی نانوسیال با دما افزایش می‌یابد. چون و همکاران [۳۶] با انجام آزمایش تجربی روی نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم چگونگی تغییرات ضریب رسانش حرارتی با دما را نشان دادند. شکل ۱-۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش دمای نانوسیال ضریب رسانش حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۱۲- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به دما برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم [۳۶].

موضوع افزایش انتقال حرارت در نانوسیال بسیار جدید بوده و تعیین مکانیزم‌های افزایش انتقال حرارت در آن هنوز نیازمند مطالعه بیشتر می‌باشد. همچنین اکثر تحقیقات انجام شده تاکنون روی ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال است و هنوز تحقیقات زیادی روی مکانیزم‌های موثر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی انجام نشده است و تحقیقات بیشتری برای یافتن مکانیزم‌های افزایش انتقال حرارت مورد نیاز است.

۲- فصل دوم

میکروکانال‌ها

گرمایش و سرمایش یک سیستم توسط سیال در بسیاری از صنایع مانند صنایع الکترونیک، نیروگاه‌ها، دستگاه‌های نوری، آهنرباهای ابر رسانا، کامپیوترهای فوق سریع، موتور اتومبیل و ... حائز اهمیت است. با توجه به طراحی سیستم‌های خنک‌کننده و گرمایشی بر پایه روش‌های مختلف انتقال حرارت و محدودیت منابع طبیعی و تمایل به کاهش هزینه‌ها، توسعه تکنیک‌های موثر انتقال حرارت بسیار ضروری می‌باشد. در این فصل بطور مختصر، برخی از اثرات و نتایج در ابعاد میکرو مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

تقاضای رو به رشد برای کوچک‌سازی محصولات در تمام بخش‌های صنعتی، با رقابت جهانی برای اطمینان بیشتر، سرعت بیشتر و محصولات مقرون‌به‌صرفه همراه شده است و منجر به چالش‌های جدیدی برای طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های مدیریت حرارتی شده است. افزایش سریع در تعداد ترانزیستورها بر روی تراشه، با افزایش قابلیت یا قدرت و در نتیجه شار حرارتی بالاتر، یکی از این چالش بزرگ در صنعت الکترونیک است. تکنولوژی‌های مبدل حرارت و مبدل جرم میکروکانال در حال پیدا کردن کاربردهای جدید در صنایع گوناگون به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای تغییر تکنولوژی‌ها است. در این راه ما نسل بعدی سیستم‌های مدیریت حرارتی با کارایی بالا را طراحی و راه‌اندازی می‌کنیم. در این فصل با اصول میکروکانال‌ها برخورد خواهیم کرد. با معرفی تاریخچه، زمینه‌های فنی، طبقه‌بندی، مزایا و معایب میکروکانال‌ها شروع می‌کنیم. روش ساخت (تکنولوژی متداول و تکنولوژی مدرن) برای میکروکانال‌ها در کنار هم در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، ارتباط افت فشار و ضریب انتقال حرارت برای جریان تک فاز برای انواع شرایط جریان داخلی ارائه خواهد شد.



## ۲-۲- تاریخچه میکروکانال‌ها

کارهای زیادی برای انتقال حرارت تک فاز در میکروکانال‌ها توسط تاکرمین<sup>۱</sup> و پیز<sup>۲</sup> [۳۷] برای خنک‌سازی مدارات یکپارچه در مقیاس بسیار بزرگ (VLSI)<sup>۳</sup> انجام شد. در سال‌های اول تاکرمین و پیز [۳۷] اولین توضیح را برای بیان مفهوم چاه حرارتی میکروکانال دادند و پیش‌بینی کردند که خنک‌کاری جابه‌جایی اجباری تک فاز در میکروکانال‌ها می‌تواند ۱۰۰۰ وات بر مترمربع حرارت را حذف کند. جابه‌جایی اجباری در کانال و تزریق مایع برای خنک‌کاری سریع‌تر و در مقیاس بزرگ‌تر در صنعت برای چند دهه استفاده شد. انتقال حرارت میکروکانال، در مقایسه با هوای معمولی و مایع سیستم‌های سرد دارای ضریب انتقال حرارت بالا، همراه با پتانسیل بالا برای ضریب انتقال حرارت و افت فشار متوسط می‌باشد. انتقال حرارت میکروکانال، به پدیده‌ای محبوب و جالب برای پژوهشگران تبدیل شده است. به‌عنوان مثال، برای خنک‌کاری چاه حرارتی میکروکانال با قدرت بالا با آرایش دیود لیزری حذف شار حرارت ۵۰۰ وات بر مترمربع اثبات شده است. در چند دهه گذشته، مطالعات انجام‌شده روی جریان دو فازی و ویژگی‌های انتقال حرارت در جریان میکروکانال، به توسعه سریع میکرو دستگاه‌های مورد استفاده برای کاربردهای مهندسی مختلف مانند دستگاه‌های پزشکی، مبدل‌های حرارتی فشرده با شار حرارت بالا، خنک‌کاری میکروالکترونیک با چگالی قدرت، ابررایانه‌ها، پلاسما و لیزرهای قوی و ... منجر شده است.

## ۲-۳- مزایا و چالش‌های میکروکانال‌ها

جریان در میکروکانال‌ها، در دو دهه گذشته به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، این بررسی‌ها برای خنک‌سازی مؤثر و سریع‌تر دستگاه‌های الکترونیکی با چگالی قدرت بالا بوده است. استفاده از

---

1. Tuckerman  
2. Pease  
3. Very large-scale integrated

میکروکانال‌ها از مباحث جدید در زمینه روش‌های افزایش انتقال حرارت است که به دلیل عدم استفاده از نیروی خارجی در این روش می‌توان آن را جزو روش‌های غیرفعال محسوب کرد. ضریب انتقال حرارت بالای نهفته در میکروکانال‌ها، به‌طور قابل‌توجه توانایی کاهش اندازه مبدل‌های حرارتی را دارد. از دیگر مزایای میکروکانال‌ها کاهش وزن، حجم کم و کاهش استفاده از مواد می‌باشد. فرآیند انتقال حرارت به مساحت سطح دیواره بستگی دارد که برای هندسه دایروی با قطر لوله  $D$  متناسب است، در حالیکه دبی حجمی سیال عبوری با سطح مقطع سیال متناسب است که بطور خطی با  $D^2$  تغییر می‌کند؛ بنابراین نسبت مساحت دیواره به حجم سیال که معیاری از نسبت گرمای دفع شده توسط کانال مورد نظر به دبی سیال عبوری یا حجم سیال موجود است و در طراحی مبدل‌های حرارتی بخصوص میکرو مبدل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است، با  $1/D$  تغییر می‌کند؛ بنابراین با کاهش قطر، نسبت مساحت دیواره به حجم سیال و کارایی حرارتی مبدل افزایش می‌یابد. بنابراین با کاهش قطر هیدرولیکی کانال، نسبت سطح به حجم آن و در نتیجه کارایی حرارتی آن افزایش می‌یابد.

میکروکانال‌ها کاربردهای گسترده عملی در زمینه‌های بسیار تخصصی، از جمله مهندسی زیست و سیستم‌های جریان‌ی میکرو ساخت<sup>۱</sup>، میکروپمپ‌ها و میکرولوله‌های حرارتی دارند. به‌عنوان مثال، تراکم و وزن پایین میکروکانال‌ها، صنعت خودرو را دگرگون کرد. مبدل‌های حرارتی کوچک و میکروکانال‌ها، امروز جایگزین لوله‌های مدور در کندانسورهای خودرو و مبدل‌های حرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلی‌متر شده است. اخیراً، میکروکانال‌ها با موفقیت در سیستم‌های تهویه مطبوع خودرو، سلول‌های سوختی و میکروالکترونیک اعمال شده‌اند. مشکلات ساخت و فیلتر کردن سیال عامل با درجه بالا برای آن‌که از طریق کانال‌ها جریان یابد، افت فشار بالا و توان پمپاژ موردنیاز نیز از چالش‌های میکروکانال‌ها در نظر گرفته می‌شود.

---

1. microfabricated fluidic systems

## ۴-۲- دسته‌بندی کانال‌ها از لحاظ ابعاد

معیارهای مختلفی برای دسته‌بندی کانال‌ها وجود دارد. همان‌طور که در بخش بعد خواهیم گفت، نتایج برخی تحقیقات حاکی از تغییر رفتار سیال در ابعاد کوچک است. در مورد این‌که آیا این تغییرات اصولاً وجود دارند یا این‌که در صورت وجود برای یک هندسه کانال خاص از چه قطر هیدرولیکی اتفاق می‌افتند، اختلاف وجود دارد، اما آنچه که در مورد آن توافق کلی وجود دارد، عدم تبعیت گاز از شرط عدم لغزش در دیواره کانال در ابعاد خیلی کوچک است. مهندل<sup>۱</sup> و همکاران [۳۸] از قطر هیدرولیکی برای طبقه‌بندی میکرو مبدل حرارتی استفاده کردند که در جدول ۲-۱ بیان شده است.

جدول ۲-۱- طبقه‌بندی انواع مبدل‌های حرارتی از لحاظ قطر هیدرولیکی

$1 \mu\text{m} \leq d_h \leq 100 \mu\text{m}$	مبدل حرارتی مقیاس میکرو
$100 \mu\text{m} \leq d_h \leq 1 \text{mm}$	مبدل حرارتی مقیاس مزو
$1 \text{mm} \leq d_h \leq 6 \text{mm}$	مبدل حرارتی فشرده
$d_h > 6 \text{mm}$	مبدل حرارتی متداول

کاندلیکار<sup>۲</sup> [۳۹] نیز کانال‌ها را از لحاظ قطر هیدرولیکی طبقه‌بندی کرد که در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۲- دسته‌بندی انواع کانال از لحاظ قطر هیدرولیکی

$D_h > 3 \text{mm}$	کانال معمولی
$200 \mu\text{m} < D_h \leq 3 \text{mm}$	مینی‌کانال
$10 \mu\text{m} < D_h \leq 200 \mu\text{m}$	میکروکانال
$1 \mu\text{m} < D_h \leq 10 \mu\text{m}$	ناحیه انتقال به میکروکانال
$0.1 \mu\text{m} < D_h \leq 1 \mu\text{m}$	ناحیه انتقال به نانوکانال
$D_h \leq 0.1 \mu\text{m}$	نانوکانال

1. Mehendale  
2. Kandlikar

پالم<sup>۱</sup> [۴۰] یک تعریف کلی‌تر از میکروکانال‌ها ارائه داد که آن‌ها را به‌عنوان المان‌های انتقال حرارت توصیف کرد که در آن تئوری‌های کلاسیک به‌درستی نمی‌تواند ضریب اصطکاک و انتقال حرارت را پیش‌بینی کند. استفان<sup>۲</sup> یک میکرو سیستم تعریف کرد که در آن پدیده‌های معمول یک سیستم ماکرو وجود ندارد. بنابراین برای تمایز مینی و میکروکانال‌ها با قطر خاص مانند قطر هیدرولیکی از ۱ میلی‌متر همیشه مفید نیست، اگرچه این تعریف اغلب استفاده می‌شود.

## ۲-۵- روش‌های ساخت میکروکانال‌ها

میکروکانال‌ها توسط انواع فرآیندها، بسته به ابعاد و مواد استفاده‌شده در آن‌ها ساخته می‌شوند. مواد رایج مورد استفاده برای میکروکانال‌ها سیلیکون، سیلیس، پلی کربنات، پلی‌میدها، پلاستیک و یا فلز هستند. میکروکانال‌ها، دارای مقاطع مستطیل، دایره، مثلث و یا دوزنقه‌ای هستند که به‌طور گسترده در متون گزارش‌شده و توسط نگوین<sup>۳</sup> و ورلی<sup>۴</sup> [۴۱] خلاصه شده است.

هندسه‌های پیچیده میکروکانال‌ها ممکن است عملکرد جذاب‌تر را ارائه دهند، اما هنوز انجام نشده است. تعدادی از روش‌های ساخت میکروکانال‌ها تبدیل به روش پردازش استاندارد در این زمینه شده‌اند. این روش‌ها را به دو گروه، تکنولوژی‌های متداول و تکنولوژی‌های مدرن، می‌توان تقسیم کرد. تکنولوژی ساخت متداول شامل روش‌هایی از قبیل تغییر شکل میکرو، اره کردن میکرو، فرزکاری میکرو و Dicing می‌باشد. تکنولوژی ساخت مدرن شامل روش MEMS (سیستم میکرو الکترومکانیک)، ماشین‌کاری میکرو لیزر، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و مدل‌سازی میکرو می‌باشد. تکنولوژی MEMS به‌طور چشمگیری در کنار تکنولوژی نیمه‌هادی رشد داشته و این تکنولوژی به‌طور گسترده مورد استفاده در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی قرار گرفته است. این روش‌ها در جدول ۲-۳ بطور خلاصه بیان شده است.

---

1.Palm  
2.Stefan  
3.Nguyen  
4.Werely

تکنولوژی متداول	تکنولوژی مدرن
تغییر شکل میکرو	MEMS <sup>۱</sup>
اره کردن میکرو	ماشین کاری میکرو لیزر
فرزکاری میکرو	ماشین کاری تخلیه الکتریکی
Dicing	مدل سازی میکرو

## ۲-۵-۱- فناوری متداول

### ۲-۵-۱-۱- تغییر شکل میکرو<sup>۲</sup>

همان‌طور که در جدول ۲-۴ نشان داده، روش تغییر شکل میکرو می‌توان کانال‌های مستطیل شکل با هر ماده‌ای ساخت. در گزارشی که توسط کوکوسکی<sup>۳</sup> [۴۲] در سال ۲۰۰۳ داده شده است، با فرآیند تغییر شکل میکرو می‌توان تا ۵۰۰ کانال در هر اینچ تشکیل داد. در این زمان، برای میکروکانال‌ها تا ۲۵۰ کانال در هر اینچ به‌طور معمول در طیف گسترده‌ای از مواد تشکیل شده است. کانال‌ها در یک پاس پیوسته و یا با عبور از چند برش بسته به سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزایای استفاده از تکنولوژی تغییر شکل میکرو شامل هزینه پایین و سرعت بالاست. با این حال، با توجه به میزان کرنش و سختی مواد، برخی از مواد پردازش شده پس از پردازش تغییر شکل میکرو ممکن است نیاز به عملیات اضافی داشته باشد.

اصول کار تکنولوژی تغییر شکل میکرو ساده است. با استفاده از ابزار و زاویه مشخص با قطعه کار، روند شکل‌پذیری و تغییر شکل پلاستیک مواد انعطاف‌پذیر انجام می‌شود. حرکت ابزار مواد پایه و وابستگی

1. Micro-Electro-Mechanical Systems  
2. Micro-Deformation  
3. Kukowski

به تنظیمات هندسی ابزار، تغییر شکل پلاستیک مواد که به شکل قابل تکرار تعریف شده است فقط یک ابزار برای هر یک از تنظیمات موردنظر، موردنیاز است.

## ۲-۵-۱-۲-اره کردن میکرو<sup>۱</sup> (برش کاری میکرو)

روش برش کاری میکرو به طور گسترده در صنعت استفاده می شود که می توان کانال مستطیلی از فلز یا سیلیکون با عرض در محدوده ۱۰-۰٫۱ میلی متر بسازد. با این تکنولوژی می توان میکروکانال های با نسبت های بالا و یا نسبت های پایین ساخت. این روش بسیار سریع است و پایین ترین هزینه تولید را در میان همه فن آوری های میکروساخت دارد. این تکنولوژی از یک اره منبت کاری<sup>۲</sup> برای ساخت میکروکانال-های مستطیلی استفاده می کند.

## ۲-۵-۲-تکنولوژی مدرن

### ۲-۵-۲-۱-MEMS (سیستم میکرو الکترومکانیک)

بسیاری از پژوهش های حاضر در زمینه MEMS در گروه روش های ساخت مقیاس میکرو، از بخش نیمه هادی برخاسته است. بسیاری از تکنولوژی ها، شامل روش های MEMS هستند: حکاکی مرطوب، حکاکی خشک،<sup>۳</sup> LIGA و حکاکی یون واکنش های عمیق (DRIE)<sup>۴</sup>. در این بخش در بین فناوری های MEMS بر روی فن آوری DRIE که به طور گسترده استفاده می شود تمرکز خواهیم کرد. همان طور که در جدول ۲-۴ نشان داده شده است، کانال های مستطیل، دایره، مثلث و یا دوزنقه را با استفاده از روش DRIE می توان ساخت. این تکنولوژی با فلز، سیلیکون و شیشه با طیف گسترده ای از

---

1. Micro-Sawing

2. fret saw

3. (Lithographie, Galvanoformung, and Abformung)

4. deep reactive ion etching

اندازه کانال، از مقیاس نانومتر تا مقیاس میلی‌متر قابل اجرا است. علاوه بر این، این فن‌آوری دارای مزیت تولید کم است. با این حال، فن‌آوری DRIE برای استفاده در زمینه‌های صنعتی به دلیل فرآیند زمان‌بر بودن آن مناسب نیستند.

## ۲-۵-۲-۲- ماشین کاری میکرو لیزر<sup>۱</sup>

به تازگی، از تکنولوژی ماشین کاری میکرو لیزر برای ساخت میکروکانال‌ها استفاده می‌شود. ماشین کاری میکرو لیزر قابل اجرا برای هرگونه مواد است و طیف گسترده‌ای از اندازه کانال، از مقیاس نانو تا مقیاس میلی‌متر و تعداد نامحدودی از هندسه‌ها را می‌تواند تولید نماید. علاوه بر این، این فن‌آوری قابلیت تولید کم را دارا است. تکنولوژی ماشین کاری میکرو لیزر در مقایسه با فن‌آوری‌های بحث شده در بالا در همه ابعاد به جز هزینه و سرعت پروسه بهتر است. به همین دلیل، این روش هنوز در صنعت فراگیر نشده است.

جدول ۲-۴ - خلاصه‌ای از برخی از روش‌های ساخت میکروکانال‌ها

ماشین کاری میکرو لیزر	MEMS	فرزکاری میکرو	تغییر شکل میکرو	
نامحدود	مستطیل، دایره، مثلثی، ذوزنقه	مستطیل	مستطیل	هزینه
فلز و شیشه	فلز و سیلیکون و شیشه	فلز و سیلیکون	فلز و غیرفلز	ماده
ابعاد نانومتر و میلی‌متر	ابعاد نانومتر و میلی‌متر	0.1-10 mm	۲۵۰ کانال بر اینچ	ابعاد کانال
تولید پایین	تولید پایین	نسبت ابعاد بالا و یا پایین، ارزان، سریع	هزینه کم و سریع	مزا یا
بسیار گران	پروسه کند (۱ روز)	طراحی‌های پیچیده غیرممکن	بعضی از مواد نیازمند ترمیم‌اند	معایب

1.Laser Micro-Machining

## ۲-۶- کاربردهای میکروکانال‌ها

الف- مبدل‌های حرارتی میکروکانال

- خودرو و هوافضا
- راکتورهای شیمیایی
- سیستم‌های برودتی
- کاربردهای دیود لیزر
- اواپراتورهای میکرولوله شیاردار پیشرفته برای کاربردهای بازیافت حرارت

ب- لوله‌های حرارتی میکروکانال

- لوله‌های حرارتی ضربانی<sup>۱</sup> مقیاس میکرو
- لوله‌های حرارتی میکروکانال تخت<sup>۲</sup>
- لوله‌های حرارتی میکرو جریان نوسانی جریان<sup>۳</sup> مخالف

ج- صفحات حرارتی میکروکانال

---

1. Micro-Pulsating Heat Pipes  
2. Microchannel Flat Heat Pipes  
3. Counter-Stream-Mode Oscillating Flow Micro Heat Pipe



## ۷-۲ - اثرات ابعادی در میکروکانال

با توجه به فرضیاتی که در رسیدن به معادلات حاکم بر جریان سیال در کانال‌هایی با ابعاد معمول از آنها استفاده می‌شود، همانند فرض جریان پایا و خواص ثابت سیال، به نظر می‌رسد که با تغییر ابعاد کانال، معادلات برقرار هستند. اما با دقت بیشتر مشاهده خواهد شد که برخی از فرضیات در ابعاد خیلی کوچک برقرار نیستند یا برخی موارد جدید باید در نظر گرفته شوند که بر معادلات حاکم تأثیر خواهند گذاشت. در این قسمت به بررسی اجمالی اثر ترم اتلاف لزجی، بر شرایط فیزیکی جریان پرداخته خواهد شد.

### ۲-۷-۱ - اثر ورودی

عدد ناسلت در جریان آرام درون کانال‌ها، تنها برای جریان کاملاً توسعه‌یافته یعنی حالتی که پروفیل سرعت و گرادیان دما بدون تغییر باقی بمانند، ثابت است. در ناحیه ورودی، پروفیل سرعت و دما در حال توسعه می‌باشند و عدد ناسلت تغییر می‌کند. در تئوری کلاسیک دینامیک سیال، دو طول ورودی حائز اهمیت هستند:

۱- طول ورودی هیدرودینامیکی،  $L_{H1}$ ، که بعد از آن پروفیل سرعت توسعه یافته می‌شود.

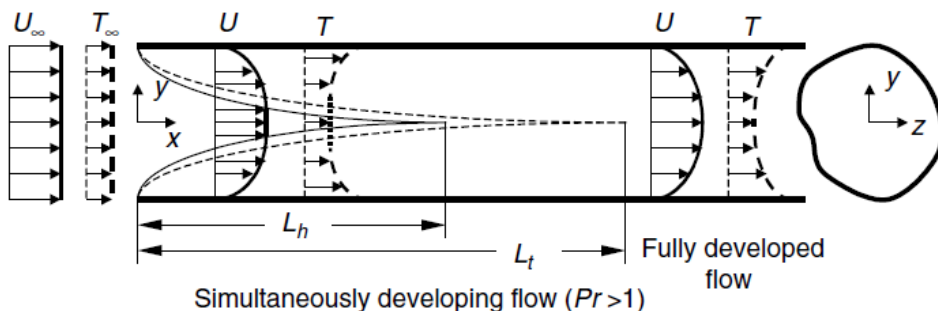
۲- طول ورودی دما  $L_t$  که بعد از آن پروفیل دما توسعه یافته می‌شود.

هرگاه هیچ‌کدام از پروفیل‌های سرعت و دما توسعه نیافته نباشند، گفته می‌شود که جریان به طور همزمان در حال توسعه<sup>۱</sup> است، یعنی جریان در حال توسعه هیدرودینامیکی و گرمایی است. هرگاه پروفیل سرعت توسعه یافته باشد و پروفیل دما در حال توسعه باشد، جریان را از لحاظ گرمایی در حال توسعه<sup>۲</sup> گویند که در این حالت تنها طول ورودی گرمایی حائز اهمیت است.

---

1.simultaneously developing (SD)  
2.thermally developing (TD)

حالت (در حال توسعه گرمایی) در سیال‌های با  $Pr$  بسیار زیاد اتفاق می‌افتد. شکل ۱-۲ ناحیه توسعه یافته و نواحی در حال توسعه را نشان می‌دهد. هر دو حالت فوق در مقالات متعدد بررسی شده‌اند و روابط مختلفی برای توزیع عدد ناسلت متوسط و محلی این نوع جریان‌ها استخراج شده است.



شکل ۱-۲ ناحیه ورودی برای سیالی با  $Pr > 1$  [۴۳]

برای تعیین عدد ناسلت محلی، همیشه اثر طول ورودی باید در نظر گرفته شود. در مورد عدد ناسلت متوسط، در حالت جریان کاملاً توسعه یافته، این پارامتر مقدار ثابتی به خود می‌گیرد، اما در جریان در حال توسعه، با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد.

برای بررسی اثر طول ورودی از عدد بدون بعد گراتز<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

$$Gz = \frac{Re Pr D_h}{L} \quad (۲-۱)$$

مورینی شرط صرف‌نظر کردن اثر طول ورودی بر عدد ناسلت متوسط را نامساوی زیر اعلام کرد [۴۴]:

1. Graetz

$$Gr = \frac{Re Pr D_h}{L} < 10 \quad (2-2)$$

با مرتب کردن رابطه فوق داریم:

$$Re < \frac{10L}{Pr D_h} \text{ یا } D_h < \frac{10L}{Re Pr} \quad (3-2)$$

## ۲-۷-۲- اتلافات لزجی

در سیستم‌های با ابعاد ماکرو، اثر ترم اتلاف لزجی تنها زمانی حائز اهمیت می‌شود که عدد رینولدز یا لزجت سیال بسیار زیاد باشد؛ اما در ابعاد میکرو که نسبت طول به قطر هیدرولیکی بزرگ است، گرادیان‌های فشار و سرعت در طول کانال زیاد بوده و این اثرات منجر به تولید انرژی گرمایی بوسیله اتلاف لزجی می‌شود. از آنجائیکه در میکروکانال‌ها با گرادیان دمای پایینی سر و کار داریم، یک افزایش اندک در دما تأثیر شدیدی در انتقال حرارت جابجایی و سایر خواص وابسته به دمای سیال، بخصوص لزجت آن داشته که این امر افزایش شدید تغییرات در نرخ انتقال حرارت جابجایی و افت فشار را در پی خواهد داشت.

برای تعیین تاثیر جمله اتلاف لزجی، عدد بدون بعد برینکمن<sup>۱</sup> که بصورت نسبت انتقال حرارت ناشی از اتلاف لزجی و انتقال حرارت بین سیال و دیواره کانال است، مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به شرط مرزی دیواره، بصورت زیر تعریف می‌شود:

برای دیواره دما ثابت:

$$Br = \frac{\mu_f u_{in}^2}{k_f (T_w - T_f)} \quad (4-2)$$

---

1. Brinkman

و برای دیواره شار ثابت:

$$Br = \frac{\mu_f u_{in}^2}{q} \quad (5-2)$$

برای تعیین محدود حائز اهمیت بودن اثرات اتلاف لزجی در میکروکانالها، از نامساوی زیر که برای عدد بریکمن بدست می آید، می توان استفاده کرد [۴۴]:

$$Br < \frac{k_{kim}}{2\Omega^* f Re} \quad (6-2)$$

اگر این نامساوی ارضاع شود، اثرات اتلاف لزجی را می توان نادیده گرفت.

## ۲-۷-۳- شرط عدم لغزش

بر اساس تعریف عدد نادسن (Kn)، رژیم جریان های گازی در میکروکانالها را می توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد [۴۵]: رژیم جریان پیوسته ( $Kn \leq 0.01$ )، رژیم جریان لغزشی ( $0.1 < Kn < 1$ ) و رژیم جریان آزاد ملکولی ( $Kn > 10$ ). جریان در اغلب کاربردهای این سیستمها در رژیم لغزشی است که وجه مشخصه آن وجود سرعت لغزشی و نیز پرش دمایی روی دیوارهاست. در  $Kn \leq 0.01$  فرکانس برخورد بین ملکولی بسیار بیشتر از فرکانس برخورد بین ذرات سیال با سطح جامد است. با افزایش عدد نادسن، پویش آزاد ملکولی تقریباً هم مرتبه با قطر هیدرولیکی کانال می شود که به معنای کاهش فرکانس برخورد ملکولی است. در نتیجه جریان از رژیم پیوسته فاصله می گیرد و وارد رژیم لغزشی می شود. اما در جریان های مایع، به دلیل این که فاصله بین ملکولی بسیار کم است، انحراف جریان از رژیم پیوسته غیر محتمل به نظر می رسد. چگالی مایعات حدود ۱۰۰۰ برابر گازها است، یعنی فاصله بین ملکولها در مایعات تقریباً ۱۰ بار کم تر از گازها است. ملکولهای

مایعات، پویش آزاد ملکولی ندارند. لذا به جای آن از فاصله شبکه‌ای<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. برای آب، فاصله شبکه حدود ۰/۳nm است. در یک کانال به قطر ۵۰μm، اعداد نادسن معادل به ترتیب برابر با  $۳ \times ۱۰^{-۴}$  و  $۶ \times ۱۰^{-۶}$  هستند که در محدوده محیط پیوسته قرار دارند. بنابراین اثرات شرایط مرزی لغزش و پرش دما تنها در صورتی رخ می‌دهد که قطر کانال‌ها به صورت تقریبی از ۳nm کم‌تر باشد. به عنوان نتیجه می‌توان گفت که میدان جریان و انتقال حرارت مایعات در میکروکانالی با قطر هیدرولیکی بین ۱μm تا ۱mm را به راحتی با مدل‌های پیوستار کلاسیک می‌توان توصیف کرد [۴۶].

## ۲-۸- جریان سیال خالص در میکروکانال‌ها

بسیاری از روابط تجربی برای کاهش فشار از اندازه‌گیری‌های تجربی توسعه یافته‌اند. از آنجاکه کارهای اولیه توسط تاگرمین و پیز [۴۷]، برای حذف شار حرارت بالا به وسیله آرایش میکروکانال انجام شده، بسیاری از پژوهش‌ها روی جریان سیال با سطح مقطع ثابت متمرکز شده است. در سال ۱۹۸۱، تاگرمین و پیز [۴۷] توانایی میکروکانال‌ها را برای خنک‌سازی مدارهای یکپارچه بررسی کردند. مدت کوتاهی پس از تاگرمین و پیز، وو<sup>۲</sup> و لیتل<sup>۳</sup> [۴۸] چندین آزمایش با جریان گاز به جای مایع در میکروکانال دوزنقه‌ای شکل سیلیکون-شیشه برای اندازه‌گیری اصطکاک جریان و خصوصیات انتقال حرارت انجام دادند.

## ۲-۹- روابط افت فشار

معادلات زیر به آسانی بر اساس فرضیه پیوستگی برای سیال نیوتنی که در یک لوله مدور و صاف جریان می‌یابد به دست آمده است.

---

1.Lattice Spacing  
2.Wu  
3.Little

$$\left(\frac{\pi}{4}d^2\right)dp = (\pi d dx)\tau_w \quad (7-2)$$

$dx$  المانی از طول،  $d$  قطر لوله،  $dp$  اختلاف فشار و  $\tau_w$  تنش دیواره است.

گرادیان فشار و تنش برشی دیوار به صورت زیر است.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{4\tau_w}{d} \quad (8-2)$$

برای مایعات نیوتنی، تنش برشی دیوار  $\tau_w$  در ترم گرادیان سرعت در دیوار بیان شده است.

$$\tau_w = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_w \quad (9-2)$$

که در آن  $\mu$  لزجت مایع است. فاکتور اصطکاک  $f$  توسط معادله زیر بیان می‌شود.

$$f = \frac{\tau_w}{(1/8)\rho u_m^2} \quad (10-2)$$

که در آن  $u_m$  سرعت متوسط جریان در کانال است.

از معادله داری برای محاسبه افت فشار در ناحیه کاملاً توسعه یافته می‌توان استفاده کرد و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta p = f \frac{\rho u_m^2}{2d} L \quad (11-2)$$

برای جریان کانال‌های غیر دایره‌ای  $d$  در معادله (۱۱-۲) با قطر هیدرولیکی  $d_h$  ارائه شده توسط معادله زیر جایگزین می‌شود.

$$d_h = \frac{4A_c}{P_w} \quad (12-2)$$

که در آن  $A_c$  سطح مقطع کانال است و  $P_w$  محیط خیس شده است. برای یک کانال مستطیل شکل با ابعاد  $a$  و  $b$ ،  $d_h$  برابر است با.

$$d_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (13-2)$$

فاکتور اصطکاک  $f$  در معادله (۱۱-۲) بستگی به شرایط جریان دارد. در زیر رابطه ضریب اصطکاک جریان آرام آورده شده است.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (14-2)$$

که در آن ثابت ۶۴ را می‌توان برای هندسه سطح مقطع کانال تغییر داد. جدول ۲-۵ لیستی از مقادیر ثابت (که عدد پوازیه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود) را برای هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵ مقادیر مشخصه جریان آرام در کانال‌های مدور و غیر مدور

ثابت	قطر هیدرولیکی	هندسه کانال	سطح مقطع کانال
۶۴	$d_h$	قطر $d$	دایره
۸۵/۷۶	$2ab/(a+b)$	$a/b=0.1$	مستطیل
۷۶/۸	$2ab/(a+b)$	$a/b=0.2$	مستطیل
۶۵/۲۸	$2ab/(a+b)$	$a/b=0.4$	مستطیل
۶۰/۱۶	$2ab/(a+b)$	$a/b=0.6$	مستطیل
۵۷/۶	$2ab/(a+b)$	$a/b=0.8$	مستطیل
۵۶/۹۶	$a$	وجه $a$	مربع

1. Poiseuille

برای جریان مغشوش انواع بسیار متنوعی برای ضریب اصطکاک در دسترس هستند. برای لوله های صاف ضریب اصطکاک تنها تابع عدد رینولدز است. یکی از معادلاتی که برای محاسبه ضریب اصطکاک در این لوله ها استفاده می شود معادله بلازیوس<sup>۱</sup> است که برای  $Re \leq 2 \times 10^4$  صادق است و به صورت زیر تعریف شده است.

$$f = 0.316 Re^{-1/4} \quad (15-2)$$

## ۲-۱۰- روابط انتقال حرارت

عدد ناسلت جریان آرام کامل توسعه یافته ۴/۳۶ است که شرط مرزی در دیواره لوله شار حرارتی ثابت است.

انتقال حرارت در مایعات خالص اغلب با استفاده از پارامترهای بدون بعد مانند عدد پرانتل، رینولدز، ناسلت و گراتز مشخص می شود. عدد ناسلت محلی در جریان آرام با شار حرارتی ثابت می توان به عنوان تابعی از عدد گراتز با استفاده از رابطه شاه<sup>۲</sup> [۴۹] محاسبه گردد.

$$Nu_x = \begin{cases} 1.302 / (Gz)^{1/3} - 1 & 1 / Gz \leq 0.00005 \\ 1.302 / (Gz)^{1/3} - 0.5 & 0.0005 \leq 1 / Gz \leq 0.0015 \\ 4.364 + 8.68 / (1000Gz)^{0.506} e^{-41/Gz} & 1 / Gz \geq 0.0015 \end{cases} \quad (16-2)$$

برای جریان آرام با شرایط مرزی شار گرمایی ثابت، ضریب انتقال حرارت میانگین در ناحیه ورودی را می توان با استفاده از رابطه شاه [۵۰] محاسبه کرد:

---

1. Blasius  
2. Shah



$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left( \frac{L}{d Re Pr} \right)^{-1/3} & \frac{L}{d Re Pr} \leq 0.03 \\ 4.364 + 0.0722 \left( \frac{L}{d Re Pr} \right)^{-1} & \frac{L}{d Re Pr} > 0.03 \end{cases} \quad (17-2)$$

آدامز و همکاران<sup>۱</sup> [۵۱] کاری تجربی در رژیم آشفته با جریان آب در میکروکانال‌های دایره‌ای ۰٫۷۶ و ۰٫۱۰۹ میلی‌متر انجام دادند. بر اساس داده‌های خود، آن‌ها معادله زیر را ارائه دادند:

$$Nu = Nu_{Gn} (1 + F) \quad (18-2)$$

که

$$Nu_{Gn} = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (19-2)$$

$$f = (1.82 \log(Re) - 1.64)^{-2} \quad (20-2)$$

$$F = 7.6 \times 10^{-5} Re (1 - (d_h / d_0)^2) \quad (21-2)$$

$Nu_{Gn}$  نشان‌دهنده عدد ناسلت پیش‌بینی شده توسط رابطه گنیلینسکی<sup>۲</sup> [۵۲] است.

---

1. Adams et al  
2. Gnielinski



۳- فصل سوم

پیشینه تحقیق

### ۳-۱- مقدمه

افزایش ضریب هدایت گرمایی در نانوسیالات نویدبخش استفاده از آن‌ها به‌عنوان سیال عامل انتقال حرارت خواهد شد. به‌منظور استفاده از نانوسیالات در کاربردهای صنعتی و عملی، نیاز به فهم ویژگی‌های انتقال حرارت جابه‌جایی در آن‌ها است. به این منظور، محققان زیادی بر روی عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات تحقیق کرده‌اند. تحقیق بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی با استفاده از نانوسیال‌ها به‌طور مشخص از دهه قبل آغاز شد.

جابجایی اجباری در کانال و تزریق مایع برای خنک کاری سریع‌تر و در مقیاس بزرگ‌تر در صنعت برای چند دهه استفاده شده است. انتقال حرارت میکروکانال، در مقایسه با هوای معمولی و مایع سیستم‌های سرد دارای ضریب انتقال حرارت بالا، همراه با پتانسیل بالا برای ضریب انتقال حرارت و افت فشار متوسط می‌باشد. انتقال حرارت میکروکانال، به پدیده‌ای محبوب و جالب برای پژوهشگران تبدیل شده است.

ابتدا شرح مختصری در مورد کارهایی در زمینه نانوسیال که به منظور ارائه روابط تئوری و تجربی برای خواص نانوسیال انجام شده ارائه می‌گردد و در پایان مروری بر مطالعات و تحقیقات حائز اهمیت در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات در مقیاس میکرو خواهیم داشت.

### ۳-۲- کارهای انجام شده در زمینه خواص نانوسیال

از آنجاییکه ضریب رسانش حرارتی و ویسکوزیته موثر نانوسیال از خواص مهم نانوسیال به شمار می‌روند که بیشترین نقش را در افزایش انتقال حرارت در نانوسیال دارند، بیشتر تحقیقات تئوری و تجربی انجام شده در این زمینه می‌باشند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

## ۳-۲-۱- مدل های ارائه شده برای ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال

به طور کلی بر طبق تحقیقات به عمل آمده، عوامل یا متغیرهای مختلفی بر ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات تأثیر دارند. از جمله این متغیرها به غلظت نانوذرات در محلول، جنس ذرات، سیال پایه، اندازه ذرات، شکل ذرات، دما، خوشه‌ای شدن ذرات و میزان pH محلول می‌توان اشاره نمود. جهت تعیین اثر هر یک از این عوامل تحقیقات وسیعی به عمل آمده و به سازوکارهای متعددی در توجیه این تأثیرات اشاره شده است. از جمله مهم‌ترین سازوکارها می‌توان حرکت براونی ذرات<sup>۱</sup>، پدیده خوشه‌ای شدن<sup>۲</sup> و همچنین لایه‌بندی مایع<sup>۳</sup> را برشمرد که محققان بعضاً یکی از این سازوکارها را مهم‌ترین مکانیزم در توجیه افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات دانسته و بر اساس این فرضیه مدل‌های تئوریک را برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات پیشنهاد کرده‌اند. لذا مهم‌ترین مدل‌های تئوریک غالباً در سه دسته‌بندی اصلی، مدل‌های بر اساس حرکت براونی، مدل‌های بر اساس خوشه‌ای شدن ذرات و مدل‌های بر اساس پدیده لایه‌بندی مایع قرار می‌گیرند.

به‌رحال نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که ناهمخوانی آشکاری در مشاهدات آزمایشگاهی وجود دارد. به‌عنوان مثال تأثیر اندازه ذره بر ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات هنوز به‌طور کامل روشن نشده است. انتظار می‌رود حرکت براونی نانو ذرات، افزایش بیشتر ضریب گرمایی را در اندازه‌های کوچک‌تر ذرات نتیجه دهد. با این وجود، برخی آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ضریب هدایت گرمایی با کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد. این تناقض می‌تواند به سبب خوشه‌ای شدن کنترل نشده نانو ذرات که ذراتی بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند، توجیه شود. نتیجه اینکه هیچ‌کدام از مدل‌های تئوریک موجود به‌تنهایی و به‌طور کامل

---

1. Brownian Motion  
2. Clustering  
3. Liquid Layer

قادر به پیش‌بینی و توصیف افزایش هدایت گرمایی در نانوسیالات نیستند. [۵۳]. در زیر به معرفی شناخته‌شده‌ترین مدل‌ها در تعیین ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات می‌پردازیم.

## الف- مدل‌های کلاسیک

بیش از یک قرن پیش، ماکسول معادله‌ای را برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی مخلوط‌های جامد و مایع شامل ذرات کروی شکل استخراج کرد [۵۴].

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (1-3)$$

که در آن  $k_p$ ،  $k_f$  و  $k_{nf}$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی نانوسیال، نانوذرات و سیال پایه هستند و  $\phi$  درصد حجمی ذرات در مخلوط است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر اندازه و شکل ذرات در این تحلیل در نظر گرفته نشده است. همچنین از اثر متقابل بین ذرات نیز چشم‌پوشی شده است.

همیلتون و کراسر<sup>۱</sup> [۵۵] مدل ماکسول [۵۴] را به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر شکل ذرات توسعه دادند.

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_f + (k_f - k_p)\phi} k_f \quad (2-3)$$

که در آن  $n$  ضریب شکل بوده و به شکل زیر تعریف شده است:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا  $\psi$  ضریب کروی بودن شکل است که حاصل تقسیم مساحت سطح یک کره با حجمی معادل حجم ذره بر مساحت سطح ذره است؛ بنابراین  $n$  برای ذرات استوانه‌ای شکل ۶ و برای ذرات کروی شکل مساوی ۳ بوده و با جایگزین کردن عدد ۳ در معادله بالا به معادله ماکسول تبدیل می‌شود. هر دو معادله بالا عملاً برای ذراتی با اندازه‌های بزرگ‌تر و در مقیاس میلی و میکرو استخراج شده‌اند و کاربرد آن‌ها برای نانوسیالات ابهام‌آمیز بوده و به جواب‌های معتبری منجر نخواهد شد.

1. Hamilton and Crosser

## ب- مدل‌های مبتنی بر حرکت براونی

حرکت براونی، حرکت یا جابه‌جایی تصادفی ذرات معلق در یک محلول است. در بحث نانوسیالات، این حرکت تصادفی انرژی را به‌طور مستقیم از طریق نانوذرات منتقل می‌کند. مقالات زیادی در رابطه با اثر حرکت براونی بر ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات وجود دارد. مدل‌های متعددی برای تعیین ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات بر مبنای حرکت براونی نانوذرات تعریف شده‌اند که در اینجا بعضی از آن‌ها را معرفی می‌کنیم. باتاچاریا و همکاران<sup>۱</sup> [۵۶] با استفاده از شبیه‌سازی حرکت براونی ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال را به‌صورت زیر تعریف کردند:

$$k_{nf} = \phi k_p + (1 - \phi)k_f \quad (۴-۳)$$

باید توجه کرد که در معادله (۴-۳)،  $k_p$  ضریب هدایت گرمایی توده ذرات نیست و اثر حرکت براونی نانوذرات را در محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانوسیال به همراه دارد. روشی به نام شبیه‌سازی دینامیک براونی برای محاسبه  $k_p$  مورد استفاده قرار می‌گیرد و سپس از آن برای محاسبه  $k_{nf}$  استفاده می‌شود.

کو و کلینشترورث<sup>۲</sup> [۵۷] ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات را به‌صورت ترکیبی از دو قسمت مجزا موردتوجه قرار دادند:

$$k_{nf} = k_{static} + k_{Brownian} \quad (۵-۳)$$

که در آن  $k_{Static}$  افزایش هدایت گرمایی نانوسیال ناشی از عامل هدایت گرمایی بالاتر نانوذرات را در برمی‌گیرد و  $k_{Brownian}$  اثر حرکت براونی را در نظر می‌گیرد. برای قسمت سکون<sup>۳</sup> مدل کلاسیک ماکسول پیشنهاد شد. [۵۴].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (۶-۳)$$

---

1. Bhattacharya et al.  
2. Koo and Kleinstreuer  
3. Static

برای  $k_{Brownian}$ ، حرکت براونی ذرات همراه با اثر جابه‌جایی ذرات سیال با نانوذرات اطراف آن‌ها در نظر گرفته شد به‌عنوان نتیجه تعریف زیر پیشنهاد شد.

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f c_{pf} \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f \quad (7-3)$$

که در رابطه بالا،  $\rho_p$ ،  $\rho_f$  و  $C_{pf}$  به ترتیب چگالی نانوذرات، چگالی سیال پایه و ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و  $T$  دما برحسب کلین است. در این تحلیل، تقابل بین نانوذرات و حجم سیال در حال حرکت اطراف آن‌ها مورد توجه قرار نگرفته است و یک قسمت اضافی  $\beta$  به‌منظور لحاظ کردن اثر آن معرفی شده است. متغیر  $\beta$  از جدول ۱-۵ قابل استخراج است. [۵۷].

جدول ۳-۱- تعیین متغیر  $\beta$  برای استفاده در رابطه (۷-۳)

نوع ذرات	$\beta$	
Au-citrat و AgCitrate،CuO	$0.137(100\phi)^{-1.8229}$	$\phi < 1\%$
CuO	$0.011(100\phi)^{-0.7372}$	$\phi > 1\%$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0.017(100\phi)^{-1.0841}$	$\phi > 1\%$

$f$  برای نانو ذرات CuO از معادله (۸-۳) و برای سایر ذرات به دلیل فقدان داده‌های آزمایشگاهی، برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود.

$$f = (-134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi)T \quad (8-3)$$

چون و همکاران<sup>۱</sup> [۵۸] به‌طور آزمایشگاهی بر روی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تحقیق کردند و بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای را برای تعیین هدایت گرمایی نانوسیال اکسید آلومینیوم پیشنهاد نمودند. آن‌ها از سه نانو پودر مختلف با قطرهای ۱۱، ۴۷، ۱۵۰ نانومتر استفاده کردند.

1.Chon et al.



نتایج نشان می‌دهند که ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما و کاهش اندازه ذرات، افزایش می‌یابد. وابستگی به دما، در دماهای بالاتر مشهودتر است. رابطه به صورت زیر است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.7460} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (9-3)$$

که در آن

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (10-3)$$

$$Re = \frac{\rho_f V_{Br} d_p}{\mu_f} = \frac{\rho_f k_B T}{3\pi\mu_f^2 \lambda_f} \quad (11-3)$$

که  $\alpha_f$  ضریب پخش گرمایی سیال پایه است. لزجت دینامیکی سیال پایه نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_f = A \times 10^{B/(T-C)} \quad (12-3)$$

که  $A$ ،  $B$  و  $C$  اعداد ثابت بوده و برای آب به ترتیب برابر با  $10^{-5} \times 2/414$  پاسکال در ثانیه،  $247/8$  کلوین و  $140$  کلوین هستند.  $T$  بر حسب کلوین بوده و  $V_{Br}$  سرعت براونی نانوذرات است.

$$V_{Br} = \frac{K_B T}{3\pi\mu d_p \lambda_f} \frac{T}{A 10^{B/(T-C)}} \quad (13-3)$$

که  $\lambda_f$  پویش آزاد ملکولی<sup>۱</sup> بوده و برای آب در حدود  $0.17$  نانومتر در نظر گرفته شده است. رابطه

بالا برای نانوذراتی با ابعاد  $11$  تا  $150$  نانومتر معتبر بوده و اعتبار آن در بازه دمایی  $21$  تا  $71$  درجه سانتی‌گراد است.

## ج- مدل‌های مبتنی بر پدیده خوشه‌ای شدن

در این قسمت دو مدل تئوریک که بر اساس خوشه‌ای شدن نانوذرات استخراج شده‌اند را ارائه می‌کنیم.

---

1. Mean- free Path

ایوانز و همکاران<sup>۱</sup> [۵۹] پیشنهاد دادند که خوشه‌ای شدن می‌تواند موجب تسریع در انتقال گرما در فواصل نسبتاً زیاد شود، چراکه گرما در جامدات بسیار سریع‌تر از مایعات می‌تواند منتقل شود. تأثیر خوشه‌ای شدن در سه‌گام و با استفاده از مدل براگمن<sup>۲</sup> [۶۰]، مدل نان و همکاران<sup>۳</sup> [۶۱] و مدل ماکسول-گارتنت<sup>۴</sup> [۵۴ و ۶۲] تحلیل شده است. در نتیجه نسبت ضریب هدایت گرمایی به صورت زیر تعریف شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(k_{cl} + 2k_f) + 2(k_{cl} - k_f)\varphi_{cl}}{(k_{cl} + 2k_f) - (k_{cl} - k_f)\varphi_{cl}} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن  $k_{cl}$  ضریب هدایت گرمایی خوشه‌ها و  $\varphi_{cl}$  نسبت حجمی ذرات خوشه‌ها است که در مطالعات تعریف شده است. به‌علاوه ایوانز و همکاران [۵۹] ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال را از طریق کاربرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعیین کردند. آن‌ها نشان دادند که ضریب هدایت گرمایی مؤثر با افزایش اندازه خوشه‌ها، افزایش می‌یابد.

ژوان و همکاران<sup>۵</sup> [۶۳] ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات را از طریق توجه بر حرکت براونی و خوشه‌ای شدن نانوذرات مورد مطالعه قراردادند و رابطه زیر را برای پیش‌بینی ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات پیشنهاد کردند،

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} + \frac{\varphi\rho_p c_p}{2k_f} \sqrt{\frac{K_B T}{3\pi r_{cl} \mu_f}} \quad (۱۵-۳)$$

که  $r_{cl}$  شعاع ظاهری خوشه‌های نانوذرات است که از طریق آزمایش تعیین می‌شود.  $T$  دما برحسب کلوین و  $\mu_f$  لزجت دینامیکی سیال پایه است که از مطالعات لی و ژوان<sup>۶</sup> [۶۴] می‌تواند محاسبه شود. بخش اول

---

2.Evans et al.  
1.Braggman  
2.Nan et al.  
3.Maxwell-Garnett  
4.Xuan et al.  
5.Li and Xuan

از سمت راست معادله بالا مدل ماکسول برای هدایت گرمایی محلول معلق حاوی ذرات جامد در سیالات است. بخش دوم اثر حرکت تصادفی نانوذرات را اضافه نموده و مورد توجه قرار می‌دهد.

### د- مدل‌های مبتنی بر لایه‌بندی مایع

مدل‌های تئوریک زیادی وجود دارند که اثر لایه‌ای شدن مایع در اطراف نانوذرات را مورد توجه قرار می‌دهند. یکی از این مدل‌ها توسط لی و همکاران<sup>۱</sup> [۶۵] ارائه شد. این مدل تأثیر حرکت براونی، لایه‌ای شدن مایع در اطراف نانوذرات و همچنین خوشه‌ای شدن، هر سه را مورد توجه قرار می‌دهد. تأثیر دما بر اندازه متوسط خوشه‌ها، حرکت براونی و هدایت گرمایی نانوذرات در نظر گرفته شده است. ضریب هدایت گرمایی نانوذرات با استفاده از تعریف زیر محاسبه می‌شود.

$$k_p = \frac{3r^*}{\frac{3r^*}{4} + 1} k_b \quad (۱۶-۳)$$

که  $k_b$  ضریب هدایت گرمایی توده مواد و  $r^* = \frac{r_p}{\lambda}$  است و  $\lambda$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود. [۶۵].

$$\lambda = \frac{10aT_m}{\gamma T} \quad (۱۷-۳)$$

که  $a$  ثابت کریستال جامد،  $\gamma$  ثابت گرونیزن<sup>۲</sup>،  $T$  دما (کلوین) و  $T_m$  دمای نقطه ذوب است. ضخامت نانولایه اطراف نانوذرات از رابطه زیر تعیین می‌شود،

$$t = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{4\mu_f}{\rho_f N_A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۱۸-۳)$$

---

1. Li et al.  
2. Gruneisen

$\rho_f$  و  $\mu_f$  به ترتیب وزن ملکولی و چگالی سیال پایه و  $N_A$  ثابت آووگادرو و برابر با  $6.023 \times 10^{23}$  است. فرض می‌شود که ضریب هدایت گرمایی نانولایه با ضریب هدایت گرمایی نانوذرات برابر است. در نتیجه نسبت حجمی ذرات بر طبق رابطه زیر اصلاح می‌شود.

$$\varphi_{eff} = \left(1 + \frac{t}{r_p}\right)^3 \varphi \quad (19-3)$$

که  $\Gamma_p$  شعاع ذره است. تعریف ارائه شده بالا در معادله مدل ژوان و همکاران [۶۳] جایگزین می‌شود.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi_{eff}}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi_{eff}} + \frac{\varphi_{eff} \rho_p c_p}{2k_f} \sqrt{\frac{K_B T}{3\pi r_{cl} \mu_f}} \quad (20-3)$$

هنگامی که مدل‌های تئوریک بر اساس شکل‌گیری نانولایه در اطراف نانوذرات مورد توجه قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود که مهم‌ترین چالش یافتن ضریب هدایت گرمایی و ضخامت نانولایه است. بنابراین، مطالعات آتی باید بر رفع این مشکل متمرکز شوند.

### ۳-۲-۲- مدل‌های ارائه شده برای ویسکوزیته‌ی موثر نانوسیال

لزجت نانوسیال متغیری مهم برای عملکردهای کاربردی است چراکه مستقیم بر افت فشار در جابه‌جایی اجباری تأثیرگذار است. بنابراین، برای ایجاد امکان استفاده از نانوسیالات به شکل کاربردی، میزان افزایش لزجت نانوسیالات در مقایسه با سیالات خالص باید بررسی شود. در حال حاضر در مقایسه با تحقیقات انجام شده در رابطه با ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات تحقیقات محدودی در مورد لزجت در مقالات فعلی وجود دارد. در اینجا به‌طور خلاصه، در مورد برخی مدل‌های تئوریک لزجت نانوسیالات بحث می‌شود.

انیشترین<sup>۱</sup> [۶۶] تعریفی را برای تعیین لزجت دینامیکی در محلول‌های معلق حاوی ذرات کروی پیشنهاد داد. در این مدل از اثر متقابل ذرات چشم‌پوشی شده است. رابطه مذکور به صورت زیر است.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_f \quad (21-3)$$

برخی تحقیقات بعدی این حقیقت را مورد توجه قرارداد که لزجت باید تا جایی که کسر حجمی ذرات به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد افزایش پیدا کند. برای مثال برینکمن<sup>۲</sup> [۶۷] معادله زیر را پیشنهاد داد.

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}} \mu_f \quad (22-3)$$

در برخی مطالعات، اثر متقابل بین ذرات در نظر گرفته شده است. مثالی در این رابطه مربوط به مطالعات باچلر<sup>۳</sup> [۶۸] است.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2)\mu_f \quad (23-3)$$

این مدل‌ها که اغلب در تحقیقات نانوسیال استفاده شده‌اند، لزجت سیال را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. [۶۹]. یک رابطه توسط نگوین و همکاران<sup>۴</sup> [۶۹] برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به صورت زیر پیشنهاد شد.

$$\mu_{nf} = (1 + 0.025\varphi + 0.015\varphi^2)\mu_f \quad (24-3)$$

رابطه بالا برای نانوسیالاتی به اندازه ۳۶ نانومتر صحیح است. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که اندازه ذرات متغیر مهمی است که بر لزجت نانوسیالات اثر می‌گذارد. به دست آوردن مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی که بازه وسیعی از اندازه ذرات و کسر حجمی ذرات را پوشش دهد، دشوار است. بنابراین برای شروع معادله (۳-۲۴) می‌تواند به عنوان تقریبی برای نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم با اندازه‌های ذرات

---

1. Einstein  
2. Brinkman  
1. Batchelor  
2. Nguyen et al

متفاوت استفاده شود. در هنگام مواجهه با وابستگی لزجت به دما گوین و همکاران [۶۹] نشان داد که برای نسبت‌های حجمی زیر ۰.۴٪، نرخ افزایش لزجت (لزجت نانوسیال تقسیم بر لزجت سیال پایه) تغییر قابل‌ملاحظه‌ای با دما ندارد. بعضی مدل‌های تئوریک جدید و مدل‌های تجربی که به‌طور مشخص برای نانوسیالات به کار می‌روند در جدول ۲-۳ همراه با نوع نانوسیال مورد کاربرد ارائه شده است.

جدول ۲-۳ مدل‌های لزجت برای نانوسیالات

نام مدل	نوع سیال	فرمول
تی سنگ و لین <sup>۱</sup> [۷۰]	آب-اکسید تیتانیوم	$\mu_{nf} = 13.47e^{35.98\phi} \mu_f$
مایگا و همکاران <sup>۲</sup> [۷۱]	آب-اکسید آلومینیوم	$\mu_{nf} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \mu_f$
مایگا و همکاران [۷۱]	اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیوم	$\mu_{nf} = (1 - 0.19\phi + 306\phi^2) \mu_f$
کولکرنی و همکاران <sup>۳</sup> [۷۲]	آب-اکسید مس	$\mu_{nf} = \exp[-2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2 + (1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2)(\frac{1}{T})]$
معصومی و همکاران [۷۳]	سیال پایه : آب ، اتین گلیکول نانوذرات: اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم	$\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta}$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi} d_p}$
کورسیون <sup>۴</sup> [۷۴]	نانوسیال های شامل ذرات اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیوم	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p / d_f)^{-0.3} \phi^{1.03}}$ $d_f = 0.1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right)^{1/3}$

1. Tseng and Lin
2. Maiga et al.
3. Kulkarni et al.
4. Corcione

### ۳-۳- کارهای انجام شده در زمینه‌ی انتقال حرارت در میکروکانال و نانوسیال

در این بخش به بررسی مقالات موجود در زمینه بررسی عددی و یا تجربی میکروکانال‌ها و نانوسیال پرداخته خواهد شد. در ابتدا به هر مقوله بصورت مجزا پرداخته شده و در انتهای فصل مقالاتی که هر دو مقوله را تحت پوشش قرار می‌دهند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

### ۳-۳-۱- بررسی جریان در میکروکانال‌ها

مبدل‌های حرارتی به روش‌های مختلف از سیال برای خنک‌کاری استفاده می‌کنند: میکروکانال سینک‌های گرمایی، خنک‌کاری افشانه‌ای<sup>۱</sup> و خنک‌کاری با برخورد جت<sup>۲</sup>. پرکاربردترین سینک گرمایی، سینک گرمایی میکروکانال است که سیال خنک‌کننده در درون آن به گردش در می‌آید. سیال خنک‌کننده، با استفاده از انتقال حرارت جابجایی اجباری تک-فاز گرما را دفع می‌کند. بدنه میکروکانال از جنس فلزاتی با ضریب هدایت بالا از قبیل سیلیکون و مس است که توسط روش‌های مختلف تولید می‌شود. با توجه به اهمیت میکروکانال در صنایع مختلف تحقیقات متعددی در این زمینه انجام گرفته است و بررسی همگی آنها از حوصله این پایان‌نامه خارج است. در اینجا به اشاره گذرای تعدادی از کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

استفاده از مایع در میکروکانال‌های سیستم خنک‌کاری پردازشگرها اولین بار توسط تاکرمن و پیس [۴۷] معرفی گردید و سپس توسط محققان متعدد مورد بررسی قرار گرفت. آنها از یک میکرو سینک گرمایی سیلیکونی که از آب جهت خنک‌کاری بهره می‌جست، استفاده کردند.

تسو و ماهولیکار [۷۵] و [۷۶] به تحلیل تجربی و نظری جریان سیال در میکروکانال‌های دایروی با در نظر گرفتن جمله اتلاف لزجی پرداختند. آنها در بررسی‌های تجربی خود با اعداد برینکمن بسیار کوچکی

---

1. spray cooling  
2. jet impingement cooling

مواجه شدند (از مرتبه  $10^{-8}$ ). بنابراین در بررسی‌های تجربی آنها اتلاف لزجی برای تأثیرگذاری بر دمای متوسط آب بسیار کوچک بود. آنها نشان دادند که نتایج تجربی مربوط به ضریب اصطکاک به خوبی با استفاده از عدد برینکمن یا جمله اتلاف لزجی، قابل توجیه است.

کو و کلینستروئر [۷۷] و [۷۸] با استفاده از آنالیز ابعادی و شبیه‌سازی عددی اثر جمله اتلاف لزجی را بر میدان دما و ضریب اصطکاک بررسی کردند. آنها سه عامل قطر هیدرولیکی، عدد رینولدز و عدد برینکمن را پارامترهای تعیین کننده اثر جمله اتلاف لزجی بیان کردند و نتیجه‌گیری کردند که این جمله برای سیالاتی با ظرفیت حرارتی پایین و لزجت بالا حائز اهمیت می‌شود. آنها نشان دادند که هنگامی که ابعاد سیستم کوچک می‌شود (بعنوان مثال برای آب هنگامی که قطر هیدرولیکی کوچک‌تر از ۵۰ میکرومتر می‌شود)، اثر جمله اتلاف لزجی بر ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر تغییر خواص با دما بر اتلاف لزجی در کانال‌های طویل با قطر هیدرولیکی کوچک و بخصوص برای سیال مایع با اهمیت می‌شود. این اثر، باعث افزایش دمای سیال و در نتیجه کاهش اثر اتلاف لزجی می‌شود.

مورینی و اسپیگا [۷۹] به بررسی عددی جریان مایع در میکروکانال با مقاطع مختلف پرداختند و نقش جمله اتلاف لزجی را بررسی کرده و روابطی را برای ارتباط بین عدد ناسلت و عدد برینکمن در میکروکانال‌ها ارائه دادند. آنها نشان دادند که نوع سیال و نسبت منظری<sup>۱</sup> (نسبت ارتفاع به عرض کانال) تأثیر بسزایی در میزان اهمیت جمله اتلاف لزجی در میکروکانال دارند. در حالی که برای ایزوپروپانول<sup>۲</sup> در قطرهای هیدرولیکی کمتر از ۲۰۰ میکرومتر جمله اتلاف لزجی باید در نظر گرفته شود، این مقدار برای آب به ۵۰ میکرومتر می‌رسد. در نهایت آنها نشان دادند که بهبود انتقال حرارت تنها با کاهش بی قید و شرط ابعاد کانال امکان‌پذیر نیست و هرچه با کاهش ابعاد ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، جمله اتلاف لزجی اثر خود را بصورت افزایش دمای سیال و کاهش عدد ناسلت بیشتر نشان می‌دهد.

---

1. Aspect Ratio  
2. Isopropanol



هانگ در دو مقاله خود [۸۰] و [۸۱] انتقال حرارت جابجایی در میکروکانال از دیدگاه قانون دوم را مورد بررسی قرار داد. او دریافت که اگر چه جمله اتلاف لزجی مهمترین پارامتر در تولید انتروپی نیست، اما بسیار تأثیرگذار است. لذا او نتیجه گیری کرد که بر اساس نتایج مقالات خود و همچنین مقالات دیگر، در تحلیل انتقال حرارت در ابعاد میکروکانال، این جمله باید در نظر گرفته شود.

ستین و همکاران [۸۲] جریان دوبعدی سیال را در یک میکرولوله با در نظر گرفتن اثر رقیق‌شدگی، اتلاف لزجی و هدایت محوری با شرایط مرزی شار حرارتی ثابت بررسی کردند. آن‌ها برای حل معادله انرژی از روش تحلیلی و نرم‌افزار Mathematica استفاده کردند. نتایج بیانگر این مطلب بود که عدد ناسلت موضعی با افزایش عدد ناسن و برینکمن افزایش می‌یابد. با افزایش عدد ناسن نیز اثر عدد برینکمن بر عدد ناسلت کم‌رنگ‌تر می‌شود. مکرانی و همکاران [۸۳] به بررسی تجربی جریان درون یک میکروکانال مستطیلی طویل پرداختند. بررسی نتایج هیدرودینامیکی و گرمایی نشان داد که با تغییر قطر هیدرولیکی از ۱ میلی‌متر تا ۱۰۰ میکرومتر داده‌های تجربی استخراج شده با نتایج بدست آمده از روابط کلاسیک کانال‌های در ابعاد بزرگ مطابقت دارد. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که برای میکروکانال‌هایی با دیواره هموار و قطرهای هیدرولیکی بزرگتر و مساوی ۱۰۰ میکرومتر، قوانین و روابط جریان و انتقال حرارت جابجایی (ناویر-استوکس) قابل استفاده است.

با توجه به پراکندگی نتایج موجود در زمینه میکروکانال، محققان مختلف به بررسی و تحلیل نتایج موجود مقالات تجربی پرداخته و با بحث در زمینه دلایل انحرافات دیده شده، به مقایسه توجیه‌های متعدد ارائه شده در این مقالات پرداختند.

کو و کلینستروئر [۸۴] با بررسی مقالات تجربی مرتبط با میکروکانال‌ها، آن‌ها را به سه دسته تقسیم کردند. دسته اول بر ناپایداری جریان در ابعاد کوچک تأکید دارند. دسته دوم تغییرات لزجت را عامل انحراف جریان از تئوری متداول آن می‌دانند و دسته سوم معتقدند که هیچ انحرافی وجود ندارد و تنها

عامل آن را مشکلات در اندازه‌گیری در ابعاد کوچک می‌دانند. با مطالعه نتایج آن‌ها نظر گروه سوم را به واقعیت نزدیک‌تر دانستند.

نتایج بدست آمده توسط کو و کلینستروئر [۸۴] را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

الف- برای میکروکانال‌ها اثر ورودی حرارتی باید در نظر گرفته شود که تابعی از طول کانال، نسبت منظر و عدد رینولدز است. برای کانال‌های کوتاه و همچنین کانال‌هایی با نسبت منظر بالا یا اعداد رینولدز بالا این اثر حائز اهمیت می‌شود.

ب- در زمینه اثر لغزش برای مایعات، استفاده از عدد نادسن معمول در گازها برای مایعات مجاز نیست و یک عدد نادسن جدید تعریف می‌شود [۸۵]:

$$Kn = \frac{\lambda_{lm}}{D_h} \quad (25-3)$$

که در آن  $\lambda_{lm}$  فاصله بین ملکولی است که برای ملکول‌های آب حدود ۳ آنگستروم (۰/۳ نانومتر) است و  $D_h$  طول مشخصه سیستم یا قطر هیدرولیکی آن است. بدین ترتیب نتیجه‌گیری می‌شود که برای آب، تنها در کانال‌هایی با  $Kn > 0.1$  لغزش اتفاق خواهد افتاد.

از طرف دیگر آن‌ها با در نظر گرفتن معادله ماکسول:

$$u_{slip} = l_{slip} \left( \frac{du}{dy} \right)_w \quad (26-3)$$

که در آن  $u_{slip}$  سرعت لغزش سیال در دیواره و  $l_{slip}$  طول لغزش است و استفاده از فاصله بین ملکولی (۳ آنگستروم) بعنوان طول لغزش، به حل معادلات حاکم بر جریان در یک کانال مربعی  $200\mu m \times 200\mu m$  پرداختند. آن‌ها حداکثر میزان لغزش سرعت را ۱۴ میکرومتر بر ثانیه محاسبه کردند که

در مقایسه با سرعت متوسط سیال و در ابعاد در نظر گرفته شده‌ی کانال، مقدار کمی می‌باشد. در نهایت استفاده از شرط مرزی لغزش را برای جریان مایعات در میکروکانال‌ها جایز ندانستند.

ج- اثر اتلاف لزجی بر افت اصطکاکی برای سیال آب، تنها برای قطرهای هیدرولیکی کمتر از ۱۰۰ میکرومتر حائز اهمیت است.

مورینی [۸۶] با بررسی بیش از ۸۰ مقاله تجربی در زمینه جریان و انتقال حرارت درون میکروکانال تا سال ۲۰۰۴ به دسته‌بندی انحرافات مشاهده شده پرداخت. با وجود این دسته‌بندی، او با مقایسه نتایج مقالات مشاهده کرد که میزان انحراف مشاهده شده در مقالات رو به کاهش و حذف است. او این امر را با توسعه چشم‌گیر در تکنیک‌های ساخت میکروکانال‌ها به‌مراه کاهش زبری سطح آن‌ها و کنترل مناسب‌تر سطح مقطع میکروکانال و همچنین پیشرفت در دقت و اطمینان‌پذیری وسایل اندازه‌گیری توجیه‌پذیر دانست و لذا نتیجه‌گیری کرد که نتایج قبلی تجربی مربوط به میکروکانال قابل استناد نیست.

حریرچیان و گاریملا [۸۷] ضرایب انتقال حرارت موضعی و افت فشار در طول جوشش مایع دی-الکتريک فلورین FC-77 در میکروکانال‌های موازی را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک معیار گذار جدید برای توصیف اینکه اثرات رژیم میکرومقیاس در فرآیند جوشش چه زمانی حائز اهمیت می‌شود ارائه کردند.

رضانیا و روزندال [۸۸] اثر یک مولد ترموالکتريک را روی یک سینک حرارتی میکروکانالی موازی بررسی کردند. آنها اثر چیدمان همگانی<sup>۱</sup> در ورودی را روی توزیع جریان آرام در میکروکانال‌ها در گستره وسیعی از افت فشار در طول سینک حرارتی مورد بررسی قرار دادند و برای شرایط کاری شان به توان پمپاژ بهینه دست یافتند.

---

1.plenum

سور و لیو [۸۹] بصورت آزمایشگاهی جریان دوفازی گاز- مایع در میکروکانال‌ها با قطره‌های هیدرولیک مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها اثرات اندازه کانال و سرعت مرحله ای ظاهری روی الگوی جریان دوفازی و افت فشار مخلوط هوا- آب در میکروکانال‌های دایروی را ارائه کردند و مدل بهینه برای افت فشار را معرفی کردند.

### ۳-۳-۲- بررسی انتقال حرارت نانوسیال‌ها

در زمینه جریان و انتقال حرارت نانوسیال نیز تحقیقات تجربی و عددی مختلفی صورت گرفته است. ژوان و روتزل [۹۰] بر این اساس که نانوسیال بیشتر شبیه به یک سیال تک فاز عمل می‌کند تا یک مخلوط جامد- مایع، دو مدل مختلف برای تحلیل انتقال حرارت آن ارائه دادند. آنها اثر خصوصیات انتقال و پراکندگی گرمایی را بر نانوسیال در نظر گرفتند. مدل اول آنها یک مدل تک فازی و مدل دوم مدل چندفازی و پراکندگی بود.

ژوان و لی [۹۱] یک الگو برای تولید نانوسیال ارائه داده و چند نانوسیال را به این روش تولید کردند. آنها همچنین یک مدل برای توصیف کارایی حرارتی جریان نانوسیال در درون یک لوله ارائه دادند که پخش نانوذرات را نیز در نظر می‌گرفت. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شود. بعنوان مثال افزایش کسر حجمی از ۲/۵٪ به ۷/۵٪ باعث افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه از ۱/۲۴ به ۱/۷۸ می‌شود.

ژوان و لی [۹۲] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب- مس در یک لوله در رژیم جریان مغشوش پرداختند. محدوده اعداد رینولدز در نظر گرفته شده، ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰ و کسرهای حجمی بین ۰ تا ۲ درصد بود. نتایج حاکی از بهبود چشمگیر در عدد ناسلت و تغییر بسیار ناچیز ضریب اصطکاک در اثر افزودن نانوذرات بود. آن‌ها با در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر بهبود عدد ناسلت، یک رابطه نیمه تجربی برای عدد ناسلت ارائه دادند.

نگوین و همکارانش [۹۳] یک مدل عددی برای تعیین راندمان نانوسیال‌های آب-اکسید آلومینیم و اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیم برای خنک‌کاری میکرو پردازشگرهای با گرمای خروجی بالا، با در نظر گرفتن جریان اجباری آرام در درون یک سینک گرمایی ارائه دادند. شکل مورد بررسی، یک شکاف مستطیلی  $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}$  با یک مقطع عبور جریان نانوسیال  $3 \times 48 \text{ mm}$  بود. فرضیات، عبارت بودند از: جریان آرام و پروفیل‌های سرعت و دمای یکنواخت در ورودی. سطح تماس برای تبادل حرارت  $10 \times 10 \text{ mm}$  در نظر گرفته شد. نتایج عددی بیانگر این مطلب بود که با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیم نسبت به آب-اکسید آلومینیم دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری بود.

ون و دینگ [۹۴] با بررسی حرکت نانوسیال در مینی‌کانال‌ها به این نتیجه رسیدند که نانوذرات در شرایط خاص می‌تواند جابجا شود. بعبارت دیگر، کارایی حرارتی نانوسیال می‌تواند کمتر از مقدار پیش‌بینی شده باشد و بنابراین، طراحی و کارکرد این سیستم‌ها دستخوش تغییر خواهد شد. آنها با این پیش‌زمینه به بررسی اثر جابجایی نانوذرات بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال در جریان آرام توسعه یافته در یک کانال کوچک پرداختند. آنها در مدل خود اثر جابجایی نانوذرات بر اثر برش و گرادیان لزجت و همچنین پخش نانوذرات بر اثر حرکت براونی که به معادله انرژی وابستگی دارد را در نظر گرفتند. نتایج، نشان‌دهنده غیر یکنواختی بسیار زیادی در غلظت نانوذرات و در نتیجه در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در مقاطع لوله بر اثر جابجایی ذرات بود. میزان این غیریکنواختی برای نانوذرات درشت‌تر با غلظت بیشتر، شدیدتر بود. با در نظر گرفتن جابجایی نانوذرات، عدد ناسلت نانوسیال در مقایسه با حالتی که ضریب هدایت ثابت فرض می‌شد، افزایش می‌یابد و البته مقدار این پارامتر به عدد پکلت و غلظت متوسط ذرات بستگی دارد.

دینگ و همکاران [۹۵] به بررسی تجربی نانوسیال‌ها مختلف پرداختند. نانوسیال‌های در نظر گرفته شده عبارت بودند از نانوذرات تیتانیوم در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول، نانولوله‌های تیتانیوم و همچنین

کربن در آب و نانوذرات الماس در آب. نتایج نشان دادند که بجز نانوسیال تیتانیوم- اتیلن گلیکول مابقی نانوسیال‌ها غیرنیوتنی رفتار می‌کنند. در تمامی نانوسیال‌ها بهبود قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی مشاهده شد. در نانوسیال تیتانیوم و نانولوله‌های کربن و تیتانیوم در آب، بهبود در ضریب انتقال حرارت جابجایی بسیار بیشتر از بهبود در انتقال حرارت هدایتی بود. آنها در مورد مکانیزم‌های ممکن برای توجیه ناهمخوانی بین نتایج بحث کردند و در بین مکانیزم‌های موجود، اثر انتقال نانوذرات بر ضخامت لایه مرزی و ضریب هدایت حرارتی مهمترین عوامل از دیدگاه نتایج تجربی شناخته شدند.

هریس و همکاران [۹۶] جریان جابجایی آزاد آرام نانوسیال را در یک کانال دایروی با شرط مرزی دمای دیواره ثابت بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها از مدل پراکندگی برای بررسی انتقال حرارت نانوسیال استفاده کردند. نتایج عددی با نتایج تجربی آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان مقایسه و مورد تأیید قرار گرفت. آنها دریافتند که افزودن نانوذرات باعث بهبود انتقال حرارت شده و افزایش غلظت نانوسیال و کاهش قطر نانوذرات میزان بهبود را افزایش می‌دهد.

میرمعصومی و بهزادمهر [۹۷] جریان آرام جابجایی مختلط نانوسیال آب- اکسید آلومینیم را در یک لوله افقی مورد بررسی عددی قرار دادند. آنها از مدل دوفازی مخلوط برای بررسی هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی نانوسیال در اعداد رینولدز و گراشف مختلف استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در ناحیه توسعه یافته غلظت نانوسیال اثر خاصی بر پارامترهای هیدرودینامیکی ندارد. همچنین غلظت نانوسیال در پایین لوله و نزدیک دیواره‌ها بیشتر بود. افزایش کسر حجمی باعث تقویت جریان ثانویه شده و توزیع دما یکنواخت‌تر شده و حداکثر سرعت افقی به مرکز دیواره نزدیک‌تر می‌شود.

واجها و همکاران [۹۸] جریان و انتقال حرارت آرام سه بعدی نانوسیال‌های اکسید آلومینیم در مخلوط آب و اتیلن گلیکول و اکسید مس در مخلوط آب و اتیلن گلیکول را که در لوله‌های مسطح رادیاتور خودرو

جریان دارند، با روش عددی بررسی کردند. آنها در مقاله خود روابط جدیدی را برای لزجت و ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال‌ها بر حسب کسر حجمی و دما ارائه دادند. نتایج بیانگر افزایش ضریب اصطکاک و انتقال حرارت با افزودن نانوذرات بود. همچنین در هر دو ناحیه توسعه یافته و درحال توسعه حضور نانوذرات باعث بهبود زیادی در ضریب انتقال حرارت می‌شد. بعنوان مثال در عدد رینولدز ۲۰۰۰، برای نانوسیال با ۱۰٪ اکسید آلومینیم، میزان درصد افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه ۹۴٪ بود و برای نانوسیال با ۶٪ اکسید مس، این مقدار به ۸۹٪ می‌رسد. بهرحال آنها اشاره کردند که اگرچه با افزایش غلظت نانوسیال افت فشار افزایش می‌یابد، اما با توجه به افزایش ضریب انتقال حرارت، به دبی کمتری از سیال نیاز است و این باعث کاهش توان پمپی مورد نیاز برای به جریان انداختن نانوسیال در سیکل می‌شود. برای یک مقدار انتقال حرارت معین، توان پمپی مورد نیاز برای نانوسیال با ۱۰٪ اکسید آلومینیم، ۸۲٪ و همچنین برای نانوسیال با ۶٪ اکسید مس، ۷۷٪ کمتر از سیال پایه است.

هریس و همکاران [۹۹] جریان آرام نانوسیال اکسید آلومینیم- آب را در یک کانال با مقطع مثلثی بررسی کردند. آن‌ها از روش اجزاء محدود استفاده کردند. نتایج، حاکی از بهبود انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی و کاهش قطر بود و همچنین در اعداد رینولدز بالاتر میزان بهبود افزایش یافت.

اکبری و همکاران [۱۰۰] به مقایسه انواع مدل تک‌فازی و سه مدل دوفازی (VOF، مخلوط و اویلری) در انتقال حرارت مختلط نانوسیال آب- اکسید آلومینیم در درون یک لوله افقی پرداختند. نتایج نشان دادند که میدان سرعت در روش‌های مختلف تقریباً یکسان بوده و میدان دما متفاوت است. نتایج مقایسه نشان دادند که اگرچه مدل‌های دوفازی به نتایج تجربی نزدیک‌تر بودند اما مقدار ضریب انتقال حرارت را بیشتر از مقدار تجربی نشان می‌دادند. نویسندگان مقاله اعلام کردند که برای مقایسه بهتر مدل‌های فوق نیاز به نتایج تجربی بیشتری با شرایط مختلف جریان می‌باشد. از طرفی اعمال مدل‌های مختلف محاسبه خصوصیات نانوسیال در این مدل‌ها نیز می‌تواند به نتایج متفاوتی منجر شود.

بیانکو و همکاران [۱۰۱] جریان در حال توسعه مغشوش آب-اکسید آلومینیم را در یک کانال مربعی، تحت تأثیر شار حرارتی ثابت بصورت عددی مدل کردند. آن‌ها از مدل مخلوط استفاده کردند و قطر نانوذرات را ۳۸ نانومتر در نظر گرفتند. آن‌ها از مدل مخلوط برای مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال و از یک مدل تحلیلی ساده برای بررسی آن از دیدگاه قانون دوم و یافتن یک شرایط کاری بهینه استفاده کردند. عدد رینولد بهینه بدست آمده از ۸۹۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪ به ۵۶۰۰۰ در کسر حجمی ۶٪ کاهش یافت. نتایج تحلیلی و عددی همخوانی خوبی با یکدیگر داشتند.

### ۳-۳-۳- بررسی انتقال حرارت نانوسیال در میکرولوله ها

در این بخش مقالاتی مختص موضوع نانوسیال در میکروکانال بصورت مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرند. جنگ و چوی [۱۰۲] جریان نانوسیال را در یک میکروکانال سینک گرمایی<sup>۱</sup> بصورت عددی حل کردند. آنها از یک رابطه جدید برای تعیین ضریب هدایت استفاده کردند که اثر حرکت براونی<sup>۲</sup> را نیز در نظر می‌گیرد. مقایسه مقادیر ضریب هدایتی محاسبه شده با نتایج تجربی بیانگر دقت مطلوب این رابطه است. جنس میکروکانال از سیلیکون (با ضریب هدایتی  $150 \text{ W/mK}$ ) بوده و نانوسیال مورد استفاده نیز مخلوط ۱٪ حجمی آب-اکسید مس و مخلوط ۱٪ حجمی آب-الماس در نظر گرفته شده بود. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که سیال پایه آب به همراه ۱ درصد حجمی ذرات الماس به قطر  $2 \text{ nm}$ ، در یک توان پمپ ثابت  $2.25 \text{ W}$  منجر به بهبود ۱۰٪ در کارایی خنک کاری شد.

کو و کلینستروتر [۱۰۳] به حل عددی جریان پایدار نانوسیال در درون یک میکروکانال پرداختند. طول کانال مورد بررسی  $1 \text{ cm}$  و سطح مقطع کانال  $300 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  می‌باشد. آب و اتیلن گلیکول با

---

1. Microchannel heat sink



درصدهای حجمی ۲ و ۴٪ نانوذرات اکسید مس، بعنوان ماده مورد بررسی انتخاب شدند. نتایج، نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید مس با قطر میانگین ۲۰ nm و در کسرهای حجمی بین ۱ تا ۴٪ به سیالی با عدد پرانتل بالا، به طرز مشهودی کارایی سینک گرمایی را افزایش می‌دهد. آنها تأکید زیادی در استفاده از یک سیال پایه با عدد پرانتل بالا برای بهبود عملکرد نانوسیال داشتند.

چین و هوانگ [۱۰۴] و سای و چین [۱۰۵] به روش‌های مختلف تحلیلی به حل معادلات حاکم بر جریان یا بررسی کارایی نانوسیال در میکروکانال پرداختند.

کلت و همکاران [۱۰۶] به بررسی دوبعدی جریان نانوسیال در میکروکانال در رژیم جریان آرام پرداختند. آن‌ها از مدل دوفازی اوپلری- اوپلری استفاده کردند و از جمله اتلاف لزجی صرف‌نظر کردند. با توجه به نتایج بدست آمده، آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که مدل تک‌فازی می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال در میکروکانال مورد استفاده قرار گیرد و دلیل اختلاف نتایج، مدل‌های استفاده شده در تعیین خواص نانوسیال است.

رئیزی و همکاران [۱۰۷] جریان نانوسیال در درون میکروکانال را در رژیم آرام با صرف‌نظر از جمله اتلاف لزجی و در نظر گرفتن لغزش سیال در دیواره بصورت عددی بررسی کردند نتایج آن‌ها حاکی از بهبود انتقال حرارت با اعمال شرط لغزش در دیواره بود.

امین‌فر و معروفی‌آذر [۱۰۸] جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب- آلومینا را در یک میکروکانال مستطیلی در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل مخلوط برای در نظر گرفتن لغزش بین نانوذرات و سیال استفاده کردند نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف بین نتایج مدل تک‌فازی و مدل مخلوط بسیار کم و در ناحیه توسعه یافته ناچیز است. آنها بیان کردند که در صورتی که توزیع اولیه نانوذرات غیر یکنواخت بوده و یا پدیده خوشه‌ای شدن نانوذرات در نظر گرفته شود، اختلاف بین نتایج واضح‌تر خواهد شد.

للی [۱۰۹] در مقاله خود به تحلیل عددی جریان نانوسیال در میکروکانال پرداخت. او در مدل خود اثرات جمله اتلاف لزجی، وابستگی به دما و انتقال حرارت توأمان را در نظر گرفت و نانوسیال آب-اکسید آلومینیم را با آب خالص در یک توان پمپی یکسان مقایسه کرد. نتایج او حاکی از این بود که برخلاف شرایط رینولدز یکسان، که میزان بهبود در انتهای کانال به یک مقدار معین میل می‌کند، در این حالت با افزایش کسر حجمی نانوذرات در مسیر کانال بهبود بیشتری مشاهده می‌شود.

هونگ و همکاران [۱۱۰] در مقاله خود بهبود انتقال حرارت در یک میکروکانال سه بعدی را با استفاده از نانوسیالات بصورت عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گیری کردند که افزودن نانوذرات به سیال مبرد ویژگی‌های ترموفیزیکی آن را تغییر می‌دهد. این ویژگی‌ها شدیداً به نوع نانوذرات، سیال پایه، کسر حجمی ذره، اندازه ذره و توان پمپاژ وابسته‌اند. محاسبات انجام گرفته در این مقاله نشان داد که بهترین بهبود انتقال حرارت می‌تواند با استفاده از سیستم نانوسیال آب-اکسید آلومینیم به دست آید. هرچند، استفاده از سیال پایه با ویسکوزیته دینامیکی پایین‌تر (مثل آب) و مواد زیر لایه‌ای با ضریب هدایت حرارتی بالا عملکرد میکروسینک‌های حرارتی (MCHS)<sup>۱</sup> را بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذره، مقاومت حرارتی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت.

بهی و میرمحمدی [۱۱۱] در سال ۲۰۱۲ اثر دما، غلظت، اندازه، شکل و زمان فراصوت روی ویسکوزیته، رسانایی حرارتی و پایداری نانوسیالها بطور آزمایشگاهی مطالعه کردند. از نظر انتقال حرارتی، آنها دریافتند که افزایش دما، غلظت و زمان فرایند آماده سازی با دستگاه مافوق صوت می‌تواند نتیجه ی افزایش هدایت حرارتی بالاتر باشد در حالی که اثر اندازه و شکل ممکن است دارای محدوده ی افزایشی بهینه باشد. بعلاوه آنها پتانسیل جایگزینی سیالات پایه را با پراکندگی ها در انتقال حرارت جابجایی تک فاز بررسی کردند.

---

1. Micro Channel Heat Sink

کلته و همکاران [۱۴۴] در پژوهشی دیگر بصورت آزمایشگاهی و عددی انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال آب- اکسید آلومینیم در داخل یک میکروسینک حرارتی با ابعاد مشخص بررسی کردند. آنها در مطالعه عددی از مدل دوفازی اوپلری- اوپلری برای مدل سازی جریان نانوسیال استفاده کردند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که نتایج مدل دوفازی نسبت به مدل همگن (تک فازی) تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارند.

توکیت و همکاران [۱۱۲] بصورت عددی عملکرد حرارتی میکروسینک‌های حرارتی متناوب (IMCHS)<sup>۱</sup> را با استفاده از نانوسیالات بررسی کردند. آنها اثر ویژگیهای حرکتی، نوع نانوسیال، کسر حجمی نانوذره و قطر ذره را روی عملکرد این میکروسینک‌ها آزمایش کردند. آنها نتیجه گرفتند که عدد ناسلت برای میکروسینک‌های حرارتی متناوب بزرگتر از میکروسینک‌های حرارتی مرسوم است.

در جدول ۳-۳ خلاصه ای از کارهایی که در زمینه نانوسیال در میکروکانال ها صورت گرفته است گزارش داده شده است.

جدول ۳۰-۳- مروری بر کارهای انجام شده پیرامون جریان نانوسیالات در میکروکانال

محققین	شرح کار انجام شده	نوع کار	سیال انجام	سیال عامل	محدوده عدد رینولدز	نتایج مرتبط
لی و کلینسترییر [۱۱۳]	بررسی عملکرد انتقال حرارت در میکروکانال	عددی	۲۰۰۸	نانوسیال آب-اکسید مس	-	استفاده از نانوسیال آب-مس به جای استفاده از آب خالص باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت در میکروکانال می‌شود.
چین و چوانگ [۱۱۴]	بررسی عملکرد انتقال حرارت در میکروکانال با چشمه حرارتی	تجربی	۲۰۰۷	نانوسیال آب-اکسید مس	-	عملکرد بهتر انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس نسبت به آب خالص زمانی به وجود می‌آید که نرخ جریان پایین باشد.
جونگ و همکاران [۱۱۵] و هوو و همکاران [۱۱۶]	بررسی عملکرد خنک کاری نانوسیال در جریان اجباری در میکروکانال	تجربی	۲۰۰۹ ۲۰۱۰	نانوسیال آب-اکسید آلومینیم	-	نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در مقایسه با آب خالص دارای عملکرد بالاتری از سهم انتقال حرارت در میکروکانال است.
بتاچرییا و همکاران [۱۱۷]	مطالعه انتقال حرارت جریان مغشوش نانوسیال در میکروکانال	عددی	۲۰۰۹	نانوسیال آب-اکسید آلومینیم	-	استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیم به جای استفاده از آب خالص باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت در میکروکانال با چاه حرارتی می‌شود.
شیخ زاده و همکاران [۱۱۸]	بررسی تأثیر افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال	عددی	۲۰۱۰	نانوسیال آب-اکسید آلومینیم	۵۰-۵۰۰	با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با این افزایش درصد حجمی، افت فشار نیز افزایش می‌یابد و استفاده از نانوسیال در رینولدزهای بالاتر نسبت به اعداد رینولدز پایین‌تر افزایش عدد ناسلت بالاتری را به همراه دارد.

جونگ و همکاران [۱۱۹]	انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیالات در میکروکانال‌ها	تجربی	۲۰۰۹	نانوسیال آب / اکسید آلومینیوم	۵-۳۰۰	۱- ضریب جابه‌جایی نانوسیال با ۱/۸٪ نسبت حجمی نانوذرات، بیش از ۳۲٪ نسبت به ضریب جابه‌جایی آب خالص بالاتر است. ۲- در میکروکانال‌های با ابعاد کوچک‌تر، ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز کوچک‌تر قابل مقایسه و یا بزرگ‌تر از ضرایب انتقال حرارت در میکروکانال‌های بزرگ‌تر تحت اعداد رینولدز بالاتر است که نشان‌دهنده خواص انتقال حرارت میکروکانال است.
له‌ئا [۱۲۰]	بررسی عملکرد جریان نانوسیال در چشمه حرارتی میکروکانالی	عددی	۲۰۱۱	نانوسیال آب / اکسید آلومینیوم	----	۱- به ازای قدرت پمپ پایین‌تر افزایش غلظت نانوذرات، تقویت انتقال حرارت را در پی دارد. ۲- در حالت گرمایش برای قدرت پمپ پایین با افزایش قطر نانوذرات، ضریب جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

### ۳-۴- جریان سیال های معمولی در میکرولوله

برای تخمین ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک سیالهای معمولی در لوله تحت رژیم جریان آرام و آشغته ، روابطی در دسترس می باشد که رایجترین آنها در بخشهای بعدی ارائه میشود.

### ۳-۴-۱- مدل های ریاضی تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

در بررسی مسئله انتقال حرارت جابه‌جایی برای یک سیال پایه عاری از ذرات نانومتری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را از طریق روابط تجربی و نیمه تجربی و با توجه به خواص فیزیکی سیال و نیوتنی و غیر نیوتنی بودن آن می‌توان تعیین کرد.

از جمله روابطی که برای انتقال حرارت جابه‌جایی توسط سیال پایه بکار می‌رود می‌توان به معادلات زیر اشاره کرد.

معادله سیدر و تیت<sup>۱</sup> [۱۲۱] مقدار عدد ناسلت را برای جریان آرام در درون یک لوله به صورت تابعی از اعداد بی بعد رینولدز و پراتل به شکل زیر ارائه می نماید.

$$Nu = 1.86(\text{Re Pr } D / L)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (27-3)$$

در رابطه بالا Nu عدد ناسلت، Re عدد رینولدز، Pr عدد پراتل و  $\mu$  زجت سیال است. جمله  $\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14}$  نیز نشان دهنده تغییرات شعاعی لزجت سیال و اثرات جابه جایی طبیعی است.

رابطه دیگر مورد استفاده در تعیین عدد ناسلت برای جابه جایی رابطه کیز [۱۲۱] برای شرط مرزی دمای ثابت سطح است. شکل ریاضی رابطه کیز به صورت زیر است.

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668(D / L) \text{Re Pr}}{1 + 0.04[(D / L) \text{Re Pr}]^{\frac{2}{3}}} \quad (28-3)$$

همچنین برای تعیین عدد ناسلت به معادله شاه [۵۰] همانطور که در فصل دوم اشاره شد می توان استفاده کرد. شکل ریاضی این معادله به صورت زیر است.

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left(\frac{L}{d \text{Re Pr}}\right)^{-1/3} & \frac{L}{d \text{Re Pr}} \leq 0.03 \\ 4.364 + 0.0722 \left(\frac{L}{d \text{Re Pr}}\right)^{-1} & \frac{L}{d \text{Re Pr}} > 0.03 \end{cases} \quad (29-3)$$

برای جریان مغشوش در درون لوله می توان از معادله ارائه شده در جدول ۳-۴ عدد ناسلت را محاسبه کرد.

جدول ۳-۴- روابط مربوط به محاسبه عدد ناسلت در جریان آشفته

$Nu = 0.0233 Re^{0.8} Pr^{0.385} \left(\frac{x}{D}\right)^{-0.0054} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$ $3 \leq \frac{x}{D} \leq 192, 7000 \leq Re \leq 49000, 4 \leq Pr \leq 34, 1.1 \leq \frac{\mu_b}{\mu_w} \leq 1.7$	تام و قجر <sup>۱</sup> [۱۲۲]
$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14}$ $10 \leq \frac{L}{D}, 10000 \leq Re, 0.7 \leq Pr \leq 16700$	سیدر و تیت [۱۲۱]
$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4}$ $3000 \leq Re \leq 10^5, 1/5 \leq Pr \leq 500$	گنیلینسکی <sup>۲</sup> [۱۲۳]
$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ $10 \leq \frac{L}{D}, 10000 \leq Re, 0.7 \leq Pr \leq 160$	دیتوس-بولتر <sup>۳</sup> [۱۲۱]

### ۳-۴-۲- مدل های ریاضی تعیین ضریب اصطکاک

مقدار ضریب اصطکاک برای جریان آرام در درون یک لوله به صورت تابعی از عدد بی بعد رینولدز با استفاده از رابطه (۲-۱۴) بدست می آید.

در بررسی هیدرودینامیکی جریان برای یک سیال پایه بدون ذرات نانومتری ضریب اصطکاک جریان آشفته را می توان از طریق روابط جدول ۳-۵ تعیین کرد.

1. Tam and Ghajar  
2. Gnelinski's  
3. Dittus-Boelter

جدول ۳-۵- روابط مربوط به محاسبه ضریب اصطکاک در جریان آشفته

$f = 0.046 \text{Re}^{-0.2}$ $2 \times 10^4 < \text{Re} < 10^6$	مودی <sup>۱</sup> [۱۲۴]
$f = 0.079 \text{Re}^{-0.25}$ $3 \times 10^3 < \text{Re} < 2 \times 10^4$	بلازیوس <sup>۲</sup> [۱۲۵]
$f = (0.79 \ln(\text{Re}) - 1.64)^{-2}$ $3000 < \text{Re} < 5 \times 10^6$	پتوخوف <sup>۳</sup> [۱۲۶]
$f = 0.25(0.79 \ln(\text{Re}) - 1.64)^{-2}$ $3000 < \text{Re} < 5 \times 10^6$	فیلوننکو <sup>۴</sup> [۱۲۷] برای لوله صاف

### ۳-۵- مدل‌های ریاضی تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات

آزمایش‌های تجربی نشان داده‌اند که با افزودن نانوذرات به سیال پایه مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. دلایل این افزایش را در نانوسیالات به تشدید اغتشاش چرخابه‌ها، کوچک شدن ضخامت لایه مرزی، پراکندگی معکوس نانوذرات معلق، افزایش قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی و نیز ظرفیت حرارتی سیال ربط می‌دهند [۹۲]. به همین دلایل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات را تابعی از خواص، ابعاد و جز حجمی نانوذرات معلق و سرعت جریان می‌توان در نظر گرفت.

جریان نانوسیال تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند جاذبه حرکت براونی، نیروی اصطکاک بین سیال و ذره، پدیده نفوذ براونی و پراکندگی قرار می‌گیرد. حرکت اتفاقی نانوذرات معلق نرخ تبادل انرژی در سیال را افزایش می‌دهد. پراکندگی موجب هموار شدن توزیع دما گشته و گرادیان دمای بین دیواره و سیال را افزایش داده و سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [۹۲].

---

1.Moody  
 2.Blasius  
 3.Petukov  
 4.Filonenko



با در نظر گرفتن تفاوت رفتاری نانوسیال با سیال پایه می‌توان تابعیت عدد ناسلت از پارامترهای مختلف را برای نانوسیالات به صورت زیر نمایش داد. [۹۲].

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{k_d}{k_f}, \frac{(\rho c_p)_d}{(\rho c_p)_f}) \quad (30-3)$$

(کسر حجمی قطر و شکل ذرات ،

یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲۸] جهت تعیین عدد ناسلت برای نانوسیالات، معادله سیدر و تیت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معادله سیدر و تیت را به صورت زیر بازآرایی کردند.

$$\Omega = Nu Pr^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0.14} = 1.86 Re^{1/3} \quad (31-3)$$

آن‌ها از نتایج تجربی به دست آمده و بررسی معادله بالا به این نتیجه رسیدند که می‌توان معادله‌ای به شکل زیر را برای تعیین عدد ناسلت نانوسیالات به کار برد.

$$\Omega = a Re^b \quad (32-3)$$

این معادله با استفاده از داده‌های تجربی و پس از پردازش آن‌ها به صورت رابطه  $y=1.86x^{0.3333}$  برای تعیین  $\Omega$  در اعداد رینولدز مختلف مورد استفاده قرار گرفت. و نشان داده شد که افزایش انتقال حرارت نانوسیال خیلی کمتر از مقادیری که توسط رابطه (۱-۵۷) تخمین زده می‌شود. [۱۲۸].

ون<sup>۲</sup> و دینگ<sup>۳</sup> [۱۲۹] نیز تلاش کردند به صورت تجربی میزان موفقیت معادله شاه [۴۹] و معادله دیتوس-بولتر را در برآورد عدد ناسلت برای نانوسیالات بیازمایند. برای این منظور آن‌ها نانوسیال آب-مس را در سیستم آزمایشگاهی خود مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها برای ضریب هدایت گرمایی از داده‌های تجربی و برای لزجت نانوسیال از رابطه زیر استفاده کردند.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_f \quad (33-3)$$

---

1.Y.Yang  
1.D.Wen  
2.Y.Ding

در رابطه بالا  $\mu_f$  لزجت سیال پایه و  $\phi$  جز حجمی نانوذرات است. البته این معادله برای سوسپانسیون‌های با غلظت کم ذره (کمتر از ۲ درصد حجمی) بکار می‌رود. ژوان<sup>۱</sup> و لی<sup>۲</sup> [۹۰] برای تعیین عدد ناسلت در نانوسیالات روابط زیر را ارائه کردند.

$$Nu_x = [1 + C^*Pe f'(0)]\theta'(0)Re^m \quad (3-34)$$

$$Nu_x = [1 + C^*Pe^n f'(0)]\theta'(0)Re^m \quad (1-60)$$

در این رابطه  $Pe$  عدد پکله است. توان‌های  $n$  و  $m$  به نوع جریان، سرعت بدون بعد و دمای بدون بعد بستگی دارد.  $f'$  و  $\theta'$  مشتقات سرعت بی‌بعد و دمای بی‌بعد هستند. برای تعیین مقدار  $C^*$  باید از اطلاعات آزمایشگاهی استفاده کرد. بر اساس رابطه بالا محققین مذکور رابطه زیر را برای نانوسیالات جهت برازش اطلاعات تجربی بر آن پیشنهاد کردند. [۹۲].

$$Nu = c_1(1.0 + c_2\phi^{m_1}Pe_{nf}^{m_2})Re_{nf}^{m_3}Pr_{nf}^{0.4} \quad (3-35)$$

تعیین ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  و توان‌های  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  از طریق برازش اطلاعات تجربی بر معادله مذکور صورت می‌گیرد.

در مقایسه با روابط انتقال حرارت متداول برای جریان تک فازی جز حجمی نانوذرات و عدد پکله به این رابطه اضافه شده‌اند. عدد پکله بیانگر اثر پراکندگی حرارتی ناشی از میکرو جابه‌جایی و میکرو نفوذ نانوذرات معلق است. در صورتی که مقدار ثابت  $C_2$  برابر صفر باشد جمله مربوط به پراکندگی حرارتی از رابطه بالا حذف شده و معادله متناظر با حالت سیال پایه خالص خواهد بود. عدد پکله ذره که در رابطه قبل استفاده شده است از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Pe_d = \frac{u_m d_p}{\alpha_{nf}} \quad (3-36)$$

عدد رینولدز نانوسیال و عدد پرائنتل نیز از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\text{Re}_{nf} = \frac{u_m D}{\nu_{nf}} \quad (37-3)$$

$$\text{Pr}_{nf} = \frac{\nu_{nf}}{\alpha_{nf}} \quad (38-3)$$

جمله نفوذ گرمایی ( $\alpha_{nf}$ ) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} = \frac{k_{nf}}{(1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_d} \quad (39-3)$$

در رابطه بالا  $k_{nf}$  ضریب هدایت گرمایی و  $\nu_{nf}$  لزجت سینماتیکی نانوسیال بوده که از طریق تجربی به دست می‌آیند.

لی و ژان [۱۳۰] در مقاله‌ای دیگر جهت تعیین عدد ناسلت برای نانوسیال آب اکسید مس در یک لوله افقی با جریان آرام رابطه زیر را پیشنهاد دادند. ثوابت و توان‌های آن بر اساس اطلاعات تجربی تعیین شده‌اند.

$$Nu = 0.4328(1.0 + 11.285\phi^{0.754} Pe_{nf}^{0.218}) Re_{nf}^{0.333} Pr_{nf}^{0.4} \quad (40-3)$$

مایگا<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳۱] جهت محاسبه عدد ناسلت میانگین برای جریان نانوسیال در درون لوله روابط زیر را ارائه نمودند.

$$Nu = 0.086 Re^{0.55} Pr^{0.5} \quad \text{برای شار ثابت دیواره} \quad (41-3)$$

$$Nu = 0.28 Re^{0.35} Pr^{0.36} \quad \text{برای دمای ثابت دیواره} \quad (42-3)$$

انتقال حرارت انواع نانوسیال در میکرو و ماکرو لوله‌ها بطور عددی و آزمایشگاهی توسط محققان مختلف تحت رژیم‌های جریان آرام و آشفته و همچنین در ناحیه توسعه یافته بررسی شده است. که برخی از این روابط در جدول ۳-۶ آمده است.

---

1..Maiga

جدول ۳-۶- روابط مربوط به محاسبه عدد ناسلت برای نانوسیال

رابطه	نانوذرات	غلظت حجمی %	محدوده رینولدز	مرجع
$Nu = 0.293 Re^{0.485} Pr^{0.2} (1 + 13.2\phi)^{8.1}$	مس	۰/۳ (درصد وزنی)	$200 < Re < 900$	[۱۳۲]
$Nu = 0.2521 Re^{0.397} Pr^{0.432} (1 + \phi)^{9.836}$	اکسید آلومینیوم	۰/۷۷	$600 < Re < 2000$	[۱۳۳]
$Nu = a Re^b Pr^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)^{1/3}$ l و b به ترکیب نانوسیال و دما بستگی دارد.	گرافیت	۲/۵	$5 < Re < 120$	[۱۳۴]
$Nu = 0.031 (Re Pr)^{0.68} (1 + \phi)^{95.73}$	اکسید آلومینیوم- مس	۰/۱	$Re < 2300$	[۱۳۵]
$Nu = 1.619 (x^+)^{1/3}$ $x^+ < 0.01, x^+ = \frac{2(x/D)}{Re Pr}$	اکسید آلومینیوم	۶	$431 < Re < 2000$	[۱۳۶]
	اکسید زیرکونیم	۳	$140 < Re < 362$	
$Nu = 0.0059 (1 + 7.6286 \phi^{0.6886} Pe_d^{0.001}) Re^{0.9238} Pr^{0.4}$	مس	۲	$10^4 < Re < 2/5 \times 10^4$	[۱۳۰]
$Nu = 0.074 Re^{0.707} Pr^{0.385} \phi^{0.074}$	اکسید تیتانیوم	۲	$3000 < Re < 18000$	[۱۳۷]
$Nu = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35}$	اکسید آلومینیوم	۱۰	$10^4 < Re < 5 \times 10^5$	[۱۳۸]
$Nu = 0.067 Re^{0.71} Pr^{0.35} + 0.0005 Re$	اکسید تیتانیوم	۰/۲۵	$5000 < Re < 30000$	[۱۳۹]
$Nu = 0.02172 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1 + \phi)^{0.5181}$	اکسید آهن	۰/۶	$3000 < Re < 22000$	[۱۴۰]

$Nu = 0.065(Re^{0.65} - 60.22)(1 + 0.0169\phi^{0.15}) Pr^{0.542}$	اکسید مس- اکسید سیلیسیوم	۰/۰۶	$3000 < Re < 16000$	[۱۴۱]
$Nu = 0.065(Re^{0.65} - 60.22)(1 + 0.0169\phi^{0.15}) Pr^{0.542}$	اکسید آلومینیوم	۰/۱	$3000 < Re < 16000$	[۱۴۱]
$Nu = 0.00105 Re^{0.984} Pr^{0.4} (1 + \phi)^{-80.78} (1 + \frac{P}{d})^{2.089}$	اکسید مس	۰/۳	$25000 < Re < 6000$	[۱۴۲]

### ۳-۶- مدل‌های ریاضی تعیین ضریب اصطکاک نانوسیالات

اضافه کردن نانوذرات درون سیال پایه باعث افزایش انتقال حرارت و افت فشار در طول لوله می‌شود. محققان دریافته‌اند که افزایش فاکتور اصطکاک با اضافه کردن نانوسیال‌ها همراه است در نتیجه رابطه‌های ضریب اصطکاک را توسعه دادند.

با در نظر گرفتن تفاوت رفتاری نانوسیال با سیال پایه می‌توان تابعیت ضریب اصطکاک از پارامترهای مختلف را برای نانوسیالات به صورت زیر نمایش داد [۱۴۳].

$$f_{nf} = f(Re, \phi, \text{شکل و قطر ذرات, ساختار جریان}) \quad (۳-۴۳)$$

سروش و همکاران [۱۳۵] بطور آزمایشگاهی نانوسیال ترکیب اکسید آلومینیوم- مس درون لوله را بررسی کردند و رابطه‌ای برای تخمین ضریب اصطکاک بدست آوردند.

$$f = 26.4 Re^{-0.8737} (1 + \phi)^{156.23} \quad (۳-۴۴)$$

$$Re < 2300, \quad 0 < \phi < 0.1 \%$$

ساندر و همکاران<sup>۱</sup> [۱۴۰] بطور آزمایشگاهی پیش بینی کرد که در یک لوله با ۰/۶ درصد غلظت حجمی نانوسیال اکسید آهن در مقایسه با آب ۱/۰۹ و ۱/۱ برابر بترتیب برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰ و ۲۲۰۰۰ افزایش ضریب اصطکاک به همراه دارد.

$$f = 0.3491 \text{Re}^{-0.25} (1 + \varphi)^{0.1517} \quad (۴۵-۳)$$

$$۳۰۰۰ < \text{Re} < ۲۲۰۰۰, \quad ۰ < \varphi < ۰/۶ \quad \%$$

واجها و داس<sup>۲</sup> [۱۴۱] بصورت آزمایشگاهی نانوسیال اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید سیلسیوم در لوله ای تحت رژیم جریان آشفته بررسی کردند. برای نانوسیال اکسید آلومینیوم رشد ۱۰ درصدی کاهش فشار در رینولدز ۶۷۰۰ را نشان دادند.

$$f = 0.3164 \text{Re}^{-0.25} \left( \frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}} \right)^{0.707} \left( \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right)^{0.108} \quad (۴۶-۳)$$

$$۴۰۰۰ < \text{Re} < ۱۶۰۰۰, \quad ۰ < \varphi < ۰/۱ \quad \%$$

زوهانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳۲] بطور آزمایشگاهی ویژگی های جریان نانوسیال اکسید آهن را در میکرولوله بررسی کردند و رابطه زیر را برای ضریب اصطکاک پیشنهاد دادند.

$$f = 6.3265 \text{Re}^{-0.656} (1 + \varphi)^{4.835} \quad (۴۷-۳)$$

$$۶۰۰ < \text{Re} < ۲۰۰۰, \quad ۰ < \varphi < ۰/۷۷ \quad \%$$

عزیزی و همکاران [۱۳۳] نانوسیال مس-آب در میکرولوله را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده رابطه (۳-۴۶) را اصلاح کردند و رابطه زیر ارائه دادند.

---

1.Sundar  
2.Vajzha and Das  
1.Zhang

$$f = 16.5(\varphi Re)^{-0.11} Re^{-0.928} \quad (48-3)$$

$$200 < Re < 900, \quad 0 < \varphi < 0.3 \text{ wt \%}$$

### ۷-۳- معرفی تحقیق حاضر

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می دهد که تا کنون روابط جامعی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک برای جریان نانوسیال در درون یک میکرولوله ارائه نشده است. روابط موجود تنها بخشی از پارامترهای تاثیر گذار برانتقال حرارت درون میکرولوله را در نظر گرفته اند.

در این تحقیق رفتار هیدرودینامیکی جریان و انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم درون میکرولوله، تحت رژیم جریان آرام تحت شرط مرزی شار گرمایی ثابت روی دیواره ها، با استفاده از ابزار **CFD** و روش حجم محدود و بهره گیری از نرم افزار **Fluent** مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین از

الگوریتم پایه سیمپل<sup>۱</sup> به عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم های تراکم ناپذیر به همراه شبکه جابجا

شده<sup>۲</sup> برای حل جریان جابجایی اجباری استفاده شده است. در این پژوهش نانو ذرات کروی اکسید

آلومینیوم با قطرهای ۱۳۰، ۱۱۵، ۹۰، ۶۵، ۴۰، ۱۳ نانومتر که در سیال آب به حالت تعلیق درآمده اند، در نظر

گرفته شده است. نانوسیال با غلظت های حجمی ۱، ۲/۵، ۴، ۵/۵، ۷، ۹ درصد حجمی برای بررسی تأثیر

کسر حجمی بر ضریب انتقال گرما و ضریب اصطکاک در نظر گرفته ایم. همچنین، خواص رئولوژیکی و

ترمودینامیکی تابع دمای نقطه ای سیال در نظر گرفته شده است. با این فرض، خواص سیال بعد از هر

مرحله با دماهای جدید به دست آمده و دوباره مورد محاسبه قرار می گیرند. نانو سیال به صورت تراکم

ناپذیر و هندسه مسأله دو بعدی متقارن محوری در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این تحقیق توسعه

یک رابطه کلی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک درون یک میکرو لوله می

باشد تأثیر دما، اندازه ذرات، غلظت ذرات، عدد رینولدز، عدد پرانتل و عدد پکلت بر ضریب انتقال حرارت و

---

2.SIMPLE  
3.Staggered

عدد ناسلت و همچنین ضریب اصطکاک درون میکرو لوله بررسی خواهد شد در نهایت با توجه به نتایج، یک رابطه کلی که اثر پارامترهای مختلف در نظر گرفته شده باشد برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک یک نانوسیال درون میکرولوله توسعه داده خواهد شد.

### ۳-۸- اهداف کلی تحقیق حاضر

به طور خلاصه اهداف کلی تحقیق حاضر به صورت زیر می باشد:

- مدل کردن جریان آرام نانو سیال در میکرو لوله
- اعتبار سنجی روش عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی
- بررسی اثرات دما، غلظت، اندازه ذرات، عدد رینولدز و عدد پرانتل و عدد پکلت روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در میکرو لوله
- بررسی اثرات غلظت، اندازه ذرات و عدد رینولدز روی ضریب اصطکاک نانوسیال در میکرو لوله
- توسعه روابط برای محاسبه ی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در جریان آرام نانوسیال در میکرولوله با توجه به پارامترهای مختلف



۴- فصل چہارم

معادلات حاکم

تقاضای رو به رشد برای کوچک‌سازی محصولات در تمام بخش‌های صنعتی، افزایش سریع در تعداد ترانزیستورها بر روی تراشه‌ها با توان بالا و در نتیجه شار حرارتی بالاتر باعث استفاده از میکروکانال‌ها در صنایع شده است. در سوی دیگر، فناوری جدید نانو تکنولوژی این امکان را فراهم آورده تا بتوان ذراتی با اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فرآوری کرد. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات از مقدار قابل انتظار آن‌که به جهت افزایش در میزان هدایت گرمایی سیال است، تجاوز می‌نماید. در سال‌های اخیر مکانیزه‌ها و مدل‌های متعددی برای توجیه این افزایش بیش از انتظار در انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات پیشنهاد شده است. در حال حاضر برتری نسبی این مکانیزم‌ها نسبت به یکدیگر، هنوز مورد بحث است و برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر نیاز به مطالعات بیشتری است. صحت مکانیزم‌ها یا مدل‌های پیشنهادی نیز از طریق حل مسئله‌های انتقال حرارت با استفاده از این مدل‌ها و تحلیل و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی قابل بررسی است. بنابراین تحلیل عددی ابزاری مهم در انجام چنین بررسی‌ها و مطالعاتی است. در این فصل ابتدا به تشریح مسئله، دامنه حل و هندسه مورد نظر، فرضیات و مدل‌های به‌کاررفته برای جریان نانوسیال داخل میکروکانال پرداخته و سپس روند شبیه‌سازی و حل عددی معادلات بقا ارائه می‌شوند. همچنین **فرض مدل تک‌فازی مورد**

**توجه بوده** و معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال در دستگاه مختصات استوانه‌ای ارائه شده است. این دستگاه مختصات، جهت مطالعه‌ی جریان و انتقال حرارت در هندسه‌های متقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات حاکم ارائه شده در این فصل، برای بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال بصورت **متقارن محوری** مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فصل بعد نیز نتایج این تحلیل عددی و جمع‌بندی آن‌ها ارائه خواهند شد.

## ۴-۲- فرض پیوستگی

قبل از اینکه بتوان نانوسیال را به صورت پیوسته در نظر گرفت باید عدد نادسن را که از معادله ی (۴-۱) بدست می آید محاسبه نمود [۱۴۵].

$$K_n = \frac{\lambda}{d_p} \quad (۴-۱)$$

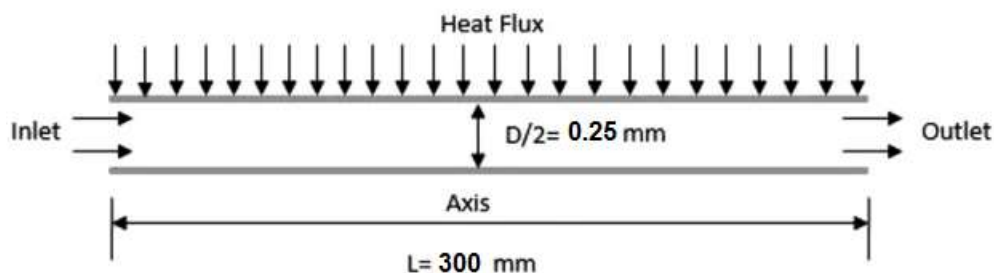
همان طور که گفته شد عدد نادسن به صورت نسبت متوسط فاصله ی آزاد بین ملکول های سیال (در این تحقیق آب) به قطر ذره تعریف می شود.

فرض که عدد نادسن کوچکتر از ۰/۱ باشد، فرض پیوستگی قابل قبول است و نیاز به حل ملکول به ملکول سیستم نمی باشد. متوسط فاصله ملکول های آب حدود ۰/۳ nm است و محدوده قطر ذرات بکار رفته در این تحقیق  $130 \text{ nm} < d_p < 13 \text{ nm}$  می باشد. این اعداد عدد نادسن کوچکتر از ۰/۱ را شامل می شود در نتیجه فرض پیوستگی قابل قبول می باشد.

شایان ذکر است که در تمام اجراها عدد بریکمن (معادله (۶-۲)) بررسی شده و این نامساوی ارضاع می شود در نتیجه در این پژوهش از اتلافات لزجت صرفه نظر می شود.

در شکل ۴-۱ نمایی از هندسه مورد مطالعه و سایر ابعاد آورد شده است. همان طور که در شکل ۴-۱ ملاحظه می شود، به دلیل تقارن محوری تنها نیمی از هندسه در نظر گرفته شده است. در این شکل، قطر میکرولوله ۰/۵ میلیمتر، طول میکرولوله ۳۰۰ میلیمتر می باشد. در انتهای میکرولوله جریان حالت توسعه یافتگی هیدرودینامیکی و دما نیز به حالت توسعه یافتگی حرارتی تبدیل شود. برای اطمینان از این موضوع، نمودارهای سرعت در محور تقارن و توزیع ناسلت موضعی دیواره رسم شده اند تا توسعه یافتگی

جریان و توسعه یافتگی دما در انتهای میکرولوله مشخص شود.



شکل ۴-۱- دامنه حل و هندسه جریان

در این تحقیق به منظور شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال، از نرم افزار Ansys Fluent، استفاده شده است.

#### ۴-۳- فرضیات مسأله

در این پژوهش، جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکرو لوله متقارن محوری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور خلاصه فرضیات در نظر گرفته شده در این تحقیق به شرح زیر می باشند:

- نانوسیال، نیوتونی و تراکم ناپذیر است.
- جریان متقارن محوری و آرام بررسی شده است.
- اثرات انتقال حرارت تشعشع ناچیز می باشد.
- شکل نانو ذرات کروی در نظر گرفته شده اند و مدلسازی بصورت تکفاز انجام گرفته است.
- از اثرات شتاب جاذبه و نیروهای حجمی صرف نظر شده است.
- کار تراکم و اتلافات لزجت صرف نظر شده است.

- سیال در نواحی ورودی میکرولوله با سرعت یکنواخت وارد می‌شود.

#### ۴-۴ - معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان نانوسیال شامل معادلات پیوستگی و بقای جرم و انرژی می‌باشند که در شرایط آرام و در مدلسازی تکفاز بصورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V) = 0 \quad (۲-۴)$$

معادله مومنتم:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} VV) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V) \quad (۳-۴)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V c p_{nf} T) = \nabla \cdot (K_{nf} \nabla T) \quad (۴-۴)$$

در معادلات فوق،  $V$  بردار سرعت،  $P$  فشار،  $T$  دما،  $Cp_{nf}$  ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال در فشار ثابت،  $\mu_{nf}$  ویسکوزیته،  $\rho_{nf}$  چگالی،  $k_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی نانو سیال می‌باشد.  $D$

#### ۴-۵ - پارامترهای بدون بعد

در این تحقیق از دستگاه مختصات استوانه‌ای جهت شبیه سازی جریان نانوسیال در میکرولوله بصورت

متقارن محوری استفاده شده است. پارامترهای بدون بعد مسأله شامل موارد زیر می باشند:

$$\begin{aligned}
 r^* &= \frac{r}{D} & v_r^* &= \frac{v_r}{U_{in}} & v_z^* &= \frac{v_z}{U_{in}} & z^* &= \frac{z}{D} \\
 \text{Re} &= \frac{\rho_{nf} U_{in} D}{\mu_{nf}} & p^* &= \frac{p}{\rho_{nf} U_{in}^2} & T^* &= \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}} \\
 \text{Pr} &= \frac{\mu_{nf} C_{p_{nf}}}{k_{nf}}
 \end{aligned}
 \tag{۵-۴}$$

که در آن‌ها زیرنویس in و w به ترتیب مبین خصوصیات مربوط به ورودی و دیوار است. D نیز قطر میکرولوله می باشد.

در تحقیق حاضر، جریان آرام، تراکم ناپذیر، دوبعدی و دائمی نانوسیال در میکرولوله بصورت متقارن محوری مورد مطالعه قرار می گیرد. معادلات فوق صورت کلی معادلات حاکم بر جریان سیال نانوسیال هستند؛ با در نظر گرفتن سیستم مختصات استوانه‌ای برای هندسه متقارن محوری و با جایگذاری این اعداد در معادلات حاکم و ساده‌سازی معادلات، صورت بدون بعد معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی در دستگاه مختصات استوانه‌ای به صورت زیر می شود.

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* v_r^*) + \frac{\partial v_z^*}{\partial z^*} = 0
 \tag{۶-۴}$$

$$v_r^* \frac{\partial v_r^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial v_r^*}{\partial z^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial r^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_r^*}{\partial r^*} \right) - \frac{v_r^*}{r^{*2}} + \frac{\partial^2 v_r^*}{\partial z^{*2}} \right)
 \tag{۷-۴}$$

$$v_r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial v_z^*}{\partial z^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial z^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 v_z^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (۸-۴)$$

$$v_r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{1}{\text{RePr}} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (۹-۴)$$

بسیاری از مطالعات انجام شده بر روی نانوسیال ها، نشان داده شده است که غلظت‌های پایین نانوذرات در سیال پایه یک سیال تکفاز ایجاد می کند.

#### ۴-۶- شرایط مرزی

با توجه به هندسه‌ی مسأله و فیزیک جریان می‌توان دریافت که این جریان دارای تقارن محوری است؛ در نتیجه مؤلفه سرعت  $v_r$  عمود به محور تقارن و مؤلفه سرعت  $v_z$  مماس به این محور می‌باشد. در مرز ورودی فرض بر این است که جریانی با سرعت یکنواخت در راستای  $z$  و برابر با  $U_{in}$  و با دمای  $T_{in}$  وارد می‌شود. در این مرز میدان تنش و گرادیان فشار صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$(z=0): v_z = U_{in} = Cte, \quad v_r = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (۱۰-۴)$$

$$T = T_{in} = Cte$$

در مجاورت دیواره‌های لوله از شرط عدم لغزش برای سرعت و شار حرارتی یکنواخت به دیوار استفاده شده است. همچنین، گرادیان فشار و تنش در راستای عمود بر دیوار صفر می‌باشد.

$$v_r = 0, \quad v_z = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad (11-4)$$

$$q_w = -k_{eff} \frac{\partial T}{\partial n}$$

در مرز خروجی نیز مشتق محوری برای کلیه متغیرها به جز فشار برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

$$(z = z_{max}) \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v_r}{\partial z} = 0 \quad (12-4)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial z} = 0$$

در این پژوهش نتایج برای حالتی بدست آمده است که شار حرارتی یکنواخت به دیواره وارد می شود. در این حالت، سیال با دمای یکنواخت وارد لوله شده و بعد از تماس با دیواره‌ها و تشکیل لایه مرزی حرارتی، رفته رفته دمای آن افزایش می یابد. با رسیدن به شرایط توسعه یافته حرارتی، پروفیل دمای سیال به حالت دائم خود رسیده و بدون تغییر باقی می ماند؛ بنابراین، دمای سیال در ورودی برابر با  $T_{in}$  فرض شده است، و دیواره نیز تحت شار حرارتی یکنواخت  $q_w$  می باشد.

#### ۷-۴- روابط حاکم برای محاسبه خواص نانوسیال

در این پژوهش از نانوذره  $Al_2O_3$  با سیال پایه آب استفاده شده است.

روابط (۴-۱۳) - (۴-۱۶) مربوط به خواص آب با استفاده از برازش دیتا، برای مدلسازی خواص وابسته به دما استفاده شده است [۱۵۰].



$$\rho_f(T) = 765.33 + 1.8142 \times T - 0.0035 \times T^2 \quad (13-4)$$

$$C_{p_f}(T) = (28.7 - 0.2817 \times T + 0.00125 \times T^2 - 2.48e^{-6} \times T^3 + 1.857e^{-9} \times T^4) \times 1000 \quad (14-4)$$

$$k_f(T) = -0.5752 + 0.006397 \times T - 8.151e^{-6} \times T^2 \quad (15-4)$$

$$\mu_f(T) = 0.0967 - 8.207e^{-4} \times T + 2.344e^{-6} \times T^2 - 2.244e^{-9} \times T^3 \quad (16-4)$$

خواص ترموفیزیکی نانوذره  $Al_2O_3$  در جدول ۴-۱ بیان شده است.

جدول ۴-۱ - خواص ترموفیزیکی نانوذره  $Al_2O_3$

	$\rho(Kg/m^3)$	$C_p(J/kg.k)$	$K(W/m.k)$	$\mu(kg/m.s)$	$d_p(nm)$
$Al_2O_3$	۳۹۷۰	۷۶۵	۲۷	-	۱۴

همان طور که پیداست برای حل معادلات بقا به تعیین خواص ترموفیزیکی نانوسیال از جمله چگالی، ضریب گرمایی ویژه و ضریب هدایت گرمایی نیاز است.

همچنین یکی از مهم ترین مسائل در شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات یافتن خواص ترموفیزیکی نانوسیالات است. از جمله این خواص می توان به لزجت و ضریب هدایت گرمایی اشاره کرد که نتایج تحقیق به شدت به تعیین مقادیر واقعی آن ها وابسته است. تاکنون محققان بسیاری در زمینه بدست آوردن خواص نانوسیالات پژوهش های متعددی انجام داده اند که به رابطه ی مناسبی برای تعیین این خصوصیات دست یابی پیدا کنند. که در بخش ۳-۱ برخی از این پژوهش ها را بیان کردیم.

در این تحقیق از روابطی که در ادامه آورده شده برای خواص نانوسیال استفاده شده است.

#### ۴-۷-۱- چگالی

بر اساس فیزیک حاکم بر مخلوط دو ماده خواهیم داشت:

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m}{v} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (۱۷-۴)$$

بنابراین:

$$(\rho)_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (۱۸-۴)$$

#### ۴-۷-۲- ظرفیت گرمایی ویژه

برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از رابطه‌ای مشابه با رابطه فوق برای دانسیته نانوسیال بر اساس تئوری مخلوط استفاده شده که توسط پک و چو [۱۴۶] پیشنهاد شده است:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (۱۹-۴)$$

که در این معادلات،  $\varphi$  کسر حجمی نانوذرات و زیرنویس‌های f، nf و S به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به سیال، نانوسیال و نانوذرات هستند.

#### ۴-۷-۳- ضریب هدایت حرارتی

در این تحقیق برای هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه تجربی که توسط کورسیون [۱۴۷] پیشنهاد شد، بصورت زیر مورد استفاده قرار گرفته است. معادله کورسیون اثر حرکت براونی و همچنین اندازه ذرات را در تعیین مقدار ضریب هدایت گرمایی مورد توجه قرار می‌دهد.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left( \frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left( \frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \varphi^{0.66} \quad (۲۰-۴)$$

در رابطه (۴-۲۰)، عدد رینولدز نانوذرات، عدد پراتل سیال پایه،  $T$  دمای نانوسیال،  $T_{fr}$  نقطه انجماد سیال پایه،  $K_p$  هدایت حرارتی نانوذرات،  $K_f$  هدایت حرارتی سیال پایه و  $\phi$  غلظت نانوذرات می باشد.

عدد رینولدز نانوذرات بصورت زیر تعریف می شود.

$$\text{Re} = \frac{\rho_f V_{Br} d_p}{\mu_f} = \frac{2\rho_f K_B T}{\pi\mu_f^2 d_p} \quad (۴-۲۱)$$

$V_{Br}$  سرعت براونی نانوذرات بر مبنای تئوری انیشتین می باشد که بصورت زیر بیان می شود.

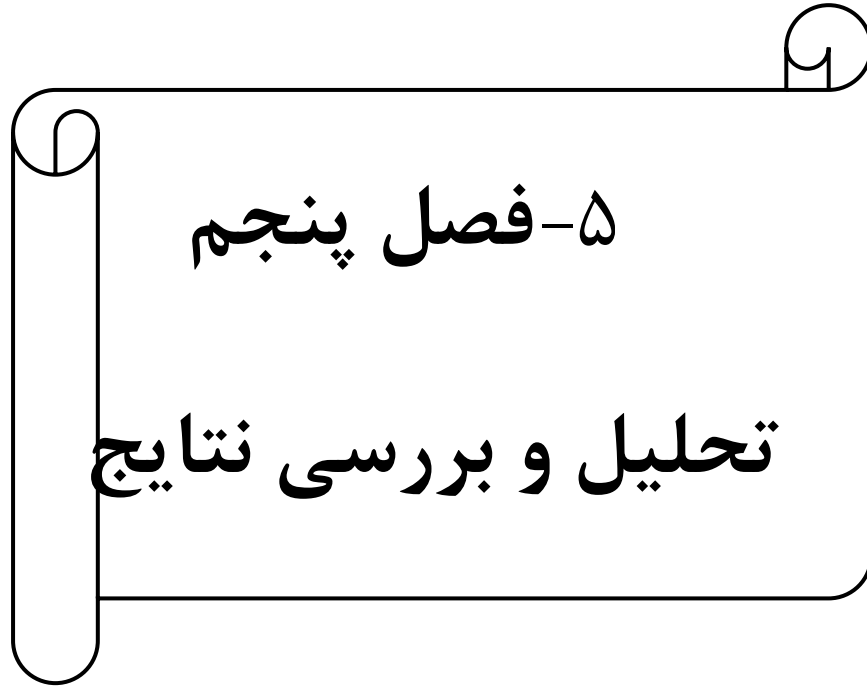
$$V_{Br} = \frac{2K_B T}{\pi\mu_f d_p^2} \quad (۴-۲۲)$$

#### ۴-۷-۴- لزجت دینامیکی

یک رابطه کلی برای ویسکوزیته نانوسیال  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -آب بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی مختلف به عنوان تابعی از کسرحجمی، قطر نانو ذرات و دما توسعه داده شده است که بصورت رابطه (۴-۲۳) بیان می شود [۱۴۸].

$$\mu_{nf} = -0.4491 + \frac{28.837}{T} + 0.574\varphi - 0.1634\varphi^2 + 23.053\frac{\varphi^2}{T^2} + 0.0132\varphi^3 - 2354.735\frac{\varphi}{T^3} + 23.498\frac{\varphi^2}{d_p^2} - 3.0185\frac{\varphi^3}{d_p^3} \quad (23-4)$$

در فصل بعد رابطه ضریب هدایت گرمایی و لزجت دینامیکی بیشتر مورد بررسی قرار می دهیم.



## ۵-۱- مقدمه

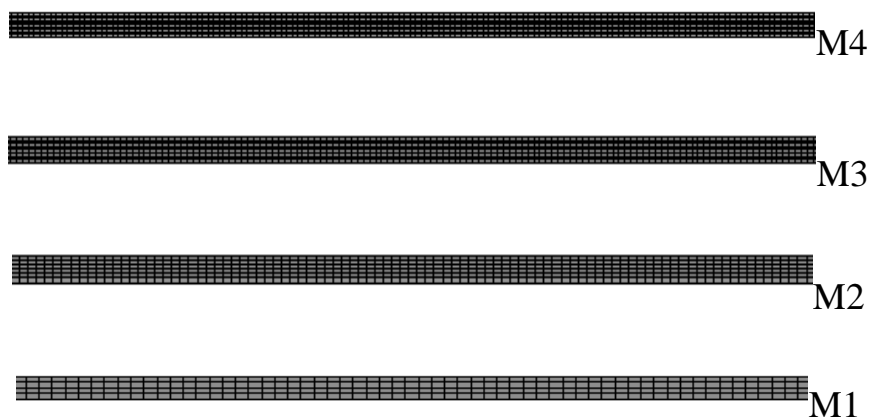
در این فصل، نتایج حاصل از حل عددی برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکرو لوله متقارن محوری ارائه شده است. همانطور که در فصل سوم به آن اشاره شد تا کنون روابط جامعی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک برای جریان نانوسیال در درون یک میکرولوله ارائه نشده است؛ از این رو، ارائه ی یک رابطه ای که تاثیر پارامتر های مختلف در محدوده ی مختلف را شامل شود ضروری به نظر میرسد.

در ابتدای این فصل، استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و صحت نتایج حاصل از حل عددی میدان جریان و دما ارزیابی میشود. جهت ارزیابی صحت نتایج حاصل از حل عددی میدان جریان و دما، از نتایج حل تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده شده است. در قسمت های بعدی نتایج حاصل از حل میدان جریان و دما به صورت نمودارها، کانتورها و جداولی ارائه شده است.

## ۵-۲- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

در این قسمت، استقلال حل عددی را از شبکه محاسباتی بررسی می کنیم. به طور کلی کوچک کردن سلول های شبکه از یک سو سبب دقیق تر شدن حل عددی می گردد و از سوی دیگر هزینه محاسباتی را افزایش می دهد. به همین علت، محدوده حل با شبکه های مختلفی بررسی شده است. برای شبکه بندی های مختلف، تعداد سلول های متفاوتی در راستای شعاعی و محوری در نظر گرفته شده است.

نام گذاری این چهار شبکه با توجه به تعداد سلول ها به ترتیب M1، M2، M3 و M4 می باشد، این شبکه بندی ها در شکل ۵-۱ ارائه شده است.



شکل ۵-۱- شبکه محاسباتی هندسه مسأله برای چهار نوع شبکه M1، M2، M3 و M4

در جدول ۵-۱ مشخصات تعداد سلول‌های شبکه در جهت‌های شعاعی ( $N_r$ ) و محوری ( $N_z$ ) و تعداد کل سلول‌های شبکه ارائه شده است.

جدول ۵-۱- خواص شبکه بندی‌های مختلف

$N_r \times N_z$	
$2000 \times 4$	M1
$3000 \times 6$	M2
$4000 \times 8$	M3
$5000 \times 10$	M4

در این قسمت برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، شبکه M4 به عنوان شبکه مرجع در نظر گرفته شده است و عدد ناسلت متوسط برای جریان آب در عدد رینولدز ۹۱۵ برای شبکه‌های M1،

M2، M3 و M4 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه و درصد خطای (Error) ناشی از آن در جدول ۲-۵ آورده شده است.

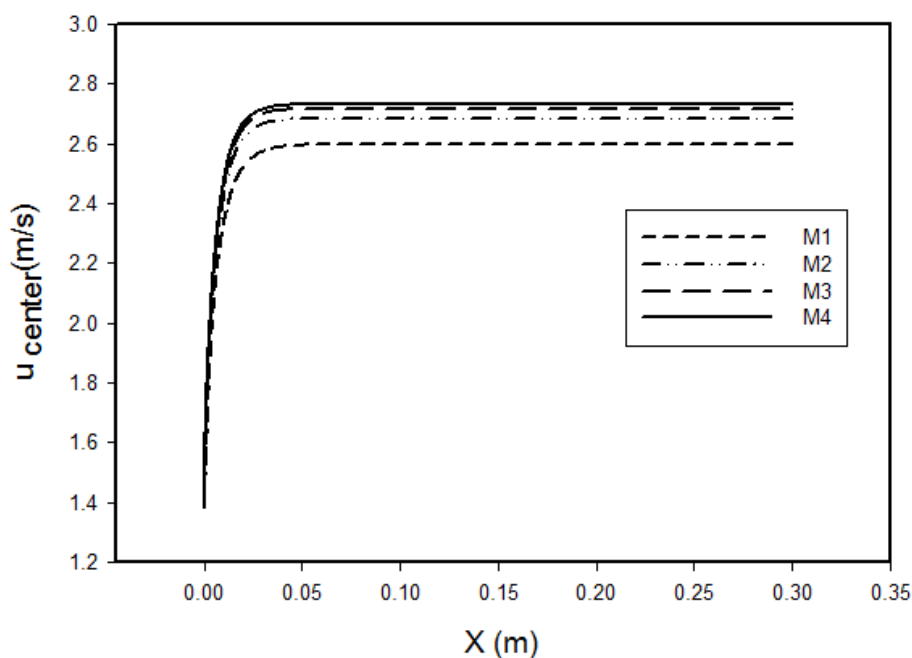
جدول ۲-۵- مقایسه عدد ناسلت متوسط در چهار نوع شبکه بندی به همراه خطای نسبی

مش ها	$Nu_{ave}$	خطا %
M1	۴/۹۳	-
M2	۴/۷۹	۳
M3	۴/۷۳	۱/۲
M4	۴/۷۱	۰/۴

در شکل ۲-۵ سرعت روی خط مرکزی میکرولوله برای چهار شبکه M1، M2، M3 و M4 مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۲-۵ مشخص است، سرعت روی خط مرکزی برای شبکه M3 تفاوت کمی با شبکه M4 دارد. بدیهی است، افزایش تعداد سلول های شبکه محاسباتی، سبب افزایش دقت حل عددی و کاهش خطای کل محاسبات می گردد؛

ولی باید توجه داشت که این امر سبب افزایش شدید زمان محاسبات نیز می شود. در نتیجه با توجه به اطلاعات جدول ۲-۵ و شکل ۲-۵، می توان با تقریب خوبی از شبکه M3 استفاده نمود. شایان ذکر است، نتایج ارائه شده در قسمت های بعدی با استفاده از شبکه M3 حاصل شده است.





شکل ۵-۲- مقایسه سرعت جریان در خط مرکزی برای چهار نوع شبکه M1، M2، M3 و M4 به ازای

Re=۹۱۳

### ۵-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$h_{nf}(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (1-5)$$

در معادله بالا  $q''$  شار گرمایی ثابت روی جدارها است که مقدار آن در این تحقیق  $29959/6$  وات بر مترمربع فرض شده است.  $T_w(x)$  و  $T_b(x)$  به ترتیب دمای موضعی دیواره در طول لوله و دمای توده ای یا کپه‌ای<sup>۱</sup> موضعی سیال است.  $T_w(x)$  مستقیماً از منحنی‌های خروجی نرم‌افزار قابل دستیابی است. برای محاسبه  $T_b(x)$  نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود،

1. Bulk temperature

$$T_b(x) = \frac{\int \rho c_p V T dA}{\int \rho c_p V dA} \quad (2-5)$$

در معادله بالا  $v(r)$  و  $T(r)$  به ترتیب منحنی سرعت سیال و دمای سیال در راستای شعاعی در هر نقطه از طول لوله است. بنابراین با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار و معادلات بالا، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$h_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx \quad (3-5)$$

عدد ناسلت متوسط نیز از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Nu_{av} = \frac{h_{av} D}{k_{nf}} \quad (4-5)$$

در معادله بالا  $h_{nf}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال است که از معادله (1-5) و پس از ترسیم کانتورهای دمای نرم‌افزار و بر طبق مراحل که گفته شد محاسبه می‌شود.  $k_{nf}$  ضریب هدایت گرمایی نانوسیال است که برای اندازه‌ها و غلظت‌های مختلف محاسبه می‌شود.  $D$  قطر لوله است که مقدار آن در این تحقیق 0/0005 متر است.

## 5-4- ارزیابی صحت نتایج

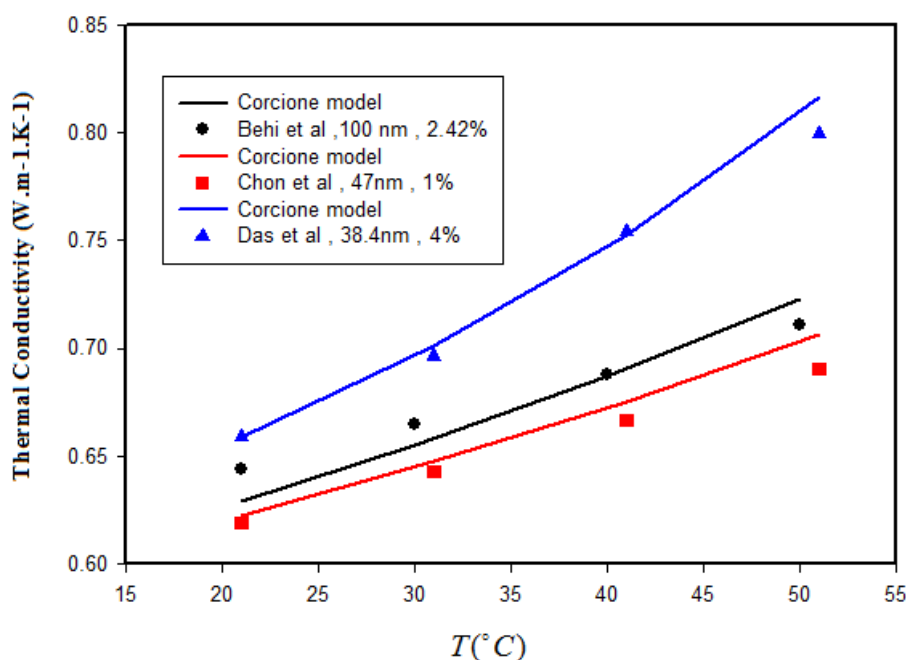
در این قسمت صحت نتایج حاصل از حل عددی میدان جریان و دما و همچنین ارزیابی مقادیر خواص نانوسیال شامل ضریب هدایت گرمایی و لزجت دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای صحت‌گذاری، نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شده است.

## ۵-۴-۱- ارزیابی مقادیر روابط مربوط به خواص نانوسیال

در این بررسی به منظور اطمینان از دقت نتایج، روابط مورد استفاده برای خواص نانو سیال با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در فصل قبل اشاره شد در این تحقیق ضریب هدایت گرمایی را از رابطه (۴-۲۰) تعیین می کنیم. شایان ذکر است در این رابطه تمام خواص فیزیکی در دمای نانو سیال محاسبه می شوند. همچنین این رابطه برای شرایط زیرمعتبر می باشد.

$$0.2\% \leq \phi \leq 9\%, \quad 21 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 51, \quad 10\text{nm} \leq d_p \leq 150\text{nm} \quad (5-5)$$

شکل ۳-۵ مقادیر حاصل از مدل ارائه شده توسط کورسیون (رابطه (۴-۲۰)) با نتایج آزمایشگاهی مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۳-۵ مشخص است رابطه کورسیون به خوبی ضریب هدایت گرمایی می تواند پیش بینی کند.



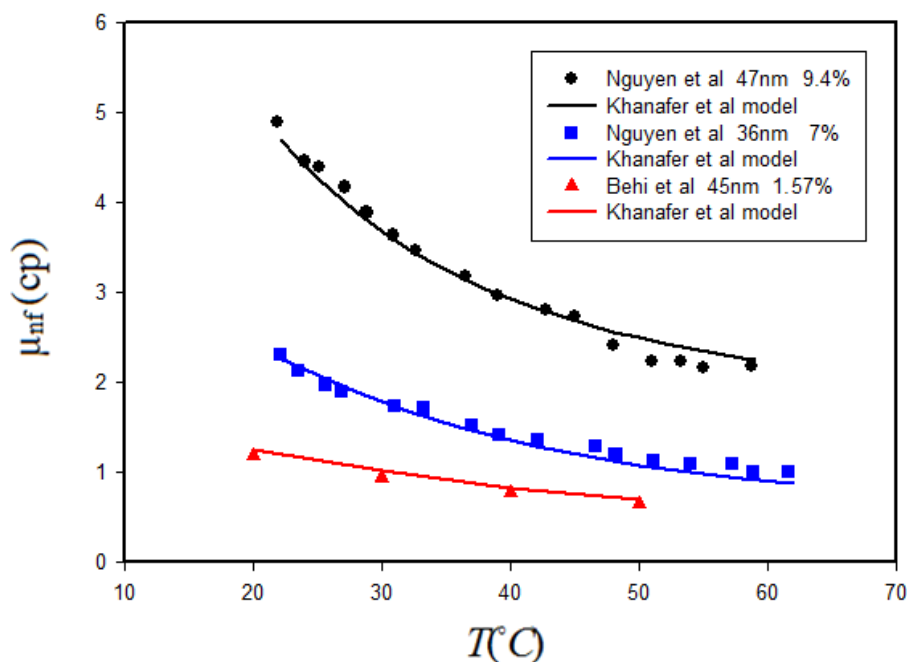
شکل ۳-۵- مقایسه مدل پیشنهاد شده توسط کورسیون برای هدایت حرارتی با نتایج آزمایشگاهی

برای لزجت دینامیکی نانوسیال در این پژوهش از رابطه (۲۳-۴) که توسط خانفر و وفایی پیشنهاد شد

استفاده می شود. این رابطه برای شرایط زیر معتبر می باشد.

$$1\% \leq \phi \leq 9\%, \quad 20 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 70, \quad 13\text{nm} \leq d_p \leq 131\text{nm} \quad (6-5)$$

در شکل ۴-۵ مدل خانفر و وفایی با نتایج آزمایشگاهی مختلف مقایسه شده است و طبق شکل مقادیر حاصل از این رابطه به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می باشد.



شکل ۴-۵- مقایسه مدل ارائه شده توسط خانفر و وفایی برای ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با نتایج آزمایشگاهی

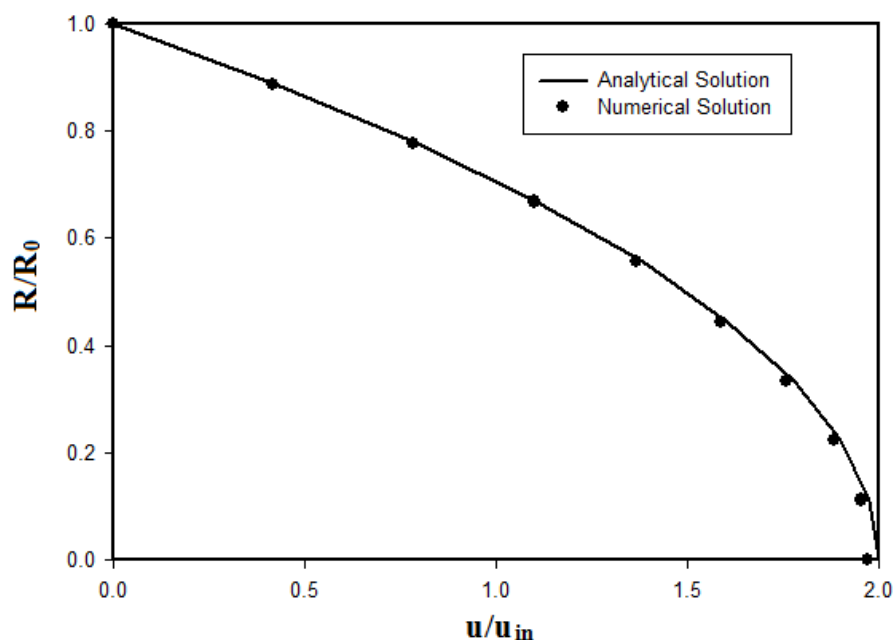
## ۵-۴-۲- ارزیابی صحت نتایج عددی میدان جریان برای سیال پایه

در این قسمت نتایج حاصل از حل عددی میدان جریان آب با نتایج تحلیلی مقایسه شده است.

حل تحلیلی توزیع سرعت جریان آرام و توسعه یافته سیال نیوتنی در لوله با شرط مرزی عدم لغزش در دیواره و بیشینه سرعت در مرکز لوله بصورت زیر بیان می شود.

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left( \frac{dP}{dZ} \right) r_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (7-5)$$

بنابراین جهت ارزیابی صحت نتایج عددی، نتایج حاصل از حل عددی جریان توسعه یافته سیال آب در لوله با رابطه (7-5) مقایسه شده است. شکل 5-5 مقایسه نتایج حاصل از حل تحلیلی و عددی توزیع سرعت جریان آرام و توسعه یافته سیال آب را در لوله نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر حاصل از حل عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج تحلیلی (رابطه (7-5)) دارند.



شکل 5-5- مقایسه حل عددی و تحلیلی توزیع سرعت جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$

در این قسمت برای ارزیابی دقت حل عددی جریان آب در میکرولوله، افت فشار نیز بصورت عددی محاسبه شده و با روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد از معادلات (11-2) و (14-2) برای محاسبه افت فشار و ضریب اصطکاک در ناحیه کاملاً توسعه یافته می‌توان استفاده کرد.

در جدول ۳-۵ مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک برای آب بصورت عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران [۱۱۱] مقایسه شده است.

جدول ۳-۵- مقایسه افت فشار جریان آب عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران [۱۱۱] به ازای

$$Re = 915$$

خطا عددی نسبت به تحلیلی	خطا عددی نسبت به آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	عددی	
۱ (%)	۴/۶ (%)	۳۹۸۴۰	۳۸۴۰۱	۴۰۲۶۰	افت فشار (پاسکال)
۱ (%)	۵ (%)	۰/۰۷۰۱	۰/۰۶۷۲۱	۰/۰۷۰۸	ضریب اصطکاک

بنابراین باتوجه به شکل ۵-۵ و جدول ۳-۵ می‌توان از صحت نتایج حل عددی میدان جریان اطمینان حاصل کرد.

### ۵-۴-۳- ارزیابی صحت نتایج عددی معادله انرژی برای سیال پایه

در این قسمت، جهت اطمینان از صحت حل عددی معادله انرژی، نتایج حاصل از حل عددی انتقال حرارت جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در لوله در حالت اعمال شار حرارتی ثابت بر دیواره لوله، با نتایج حل تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شده است.

سه موردی که نتایج عددی معادله انرژی با آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد عبارتند از:

- نتایج حل تحلیلی جریان توسعه یافته سیال نیوتنی در لوله

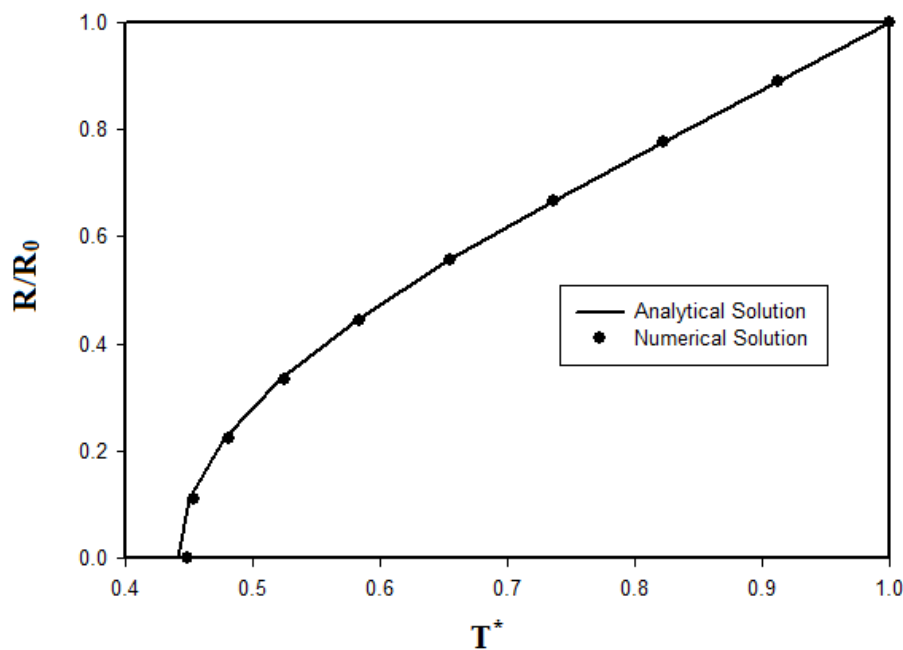
- نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران [۱۱۱]

• نتایج آزمایشگاهی بونجورنو و همکاران [۱۳۶]

در این قسمت با صرفنظر کردن از ترم تلفات در معادله انرژی، توزیع دما، ناسلت موضعی و ضریب انتقال حرارت جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در لوله در حالت شار ثابت، با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وهمچنین با رابطه شاه (۲-۱۶) مورد مقایسه قرار گرفته است. حل تحلیلی توزیع دمای جریان آرام و توسعه یافته سیال نیوتنی در لوله در حالت شار ثابت، به صورت زیر بیان می‌شود.

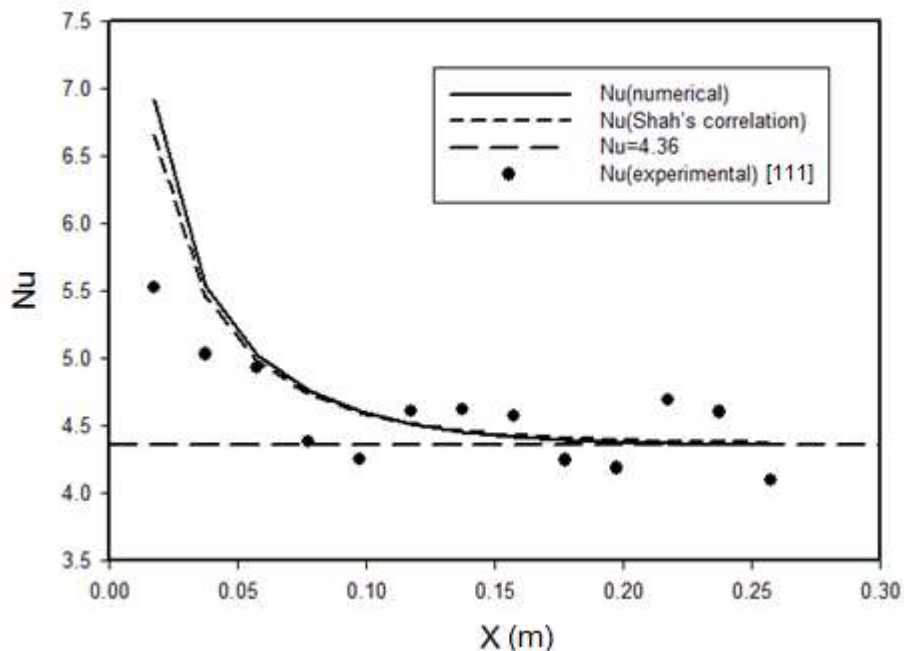
$$T(r) = T_w + \left( \frac{q'' r_0}{k} \right) \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 - \frac{1}{4} \left( \frac{r}{r_0} \right)^4 - \frac{3}{4} \right] \quad (۸-۵)$$

در رابطه (۵-۸)،  $(T_w)$  دمای سطح لوله،  $(q'')$  شار اعمال شده بر دیواره لوله،  $(k)$  ضریب هدایت حرارتی سیال و  $(r_0)$  قطر لوله می‌باشد. در شکل ۵-۶ توزیع دمای جریان آرام سیال آب در لوله در حالت شار ثابت، با نتایج تحلیلی آن مقایسه شده است.



شکل ۵-۶- مقایسه حل عددی و تحلیلی توزیع دمای بدون بعد جریان آرام و توسعه یافته سیال آب در مقطعی در فاصله محوری ۰/۲۵۷۵ لوله به ازای  $Re = ۹۱۵$  و  $Pr = ۵/۰۶$  در حالت شار ثابت

عدد بدون بعد ناسلت با استفاده از ضریب انتقال حرارت می تواند محاسبه شده و با روابط کلاسیک مقایسه شود. عدد ناسلت در جریان آرام و در حالتی که دیواره در معرض شار حرارتی یکنواخت می باشد، می تواند به عنوان تابعی از عدد گراتز که توسط رابطه شاه [۴۹] معرفی می شود، محاسبه شود. در شکل ۷-۵ توزیع ناسلت موضعی در لوله در حالت شار ثابت، با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و رابطه شاه [۴۹] مقایسه شده است. در جدول ۴-۵ مقادیر ناسلت متوسط بیان شده است.



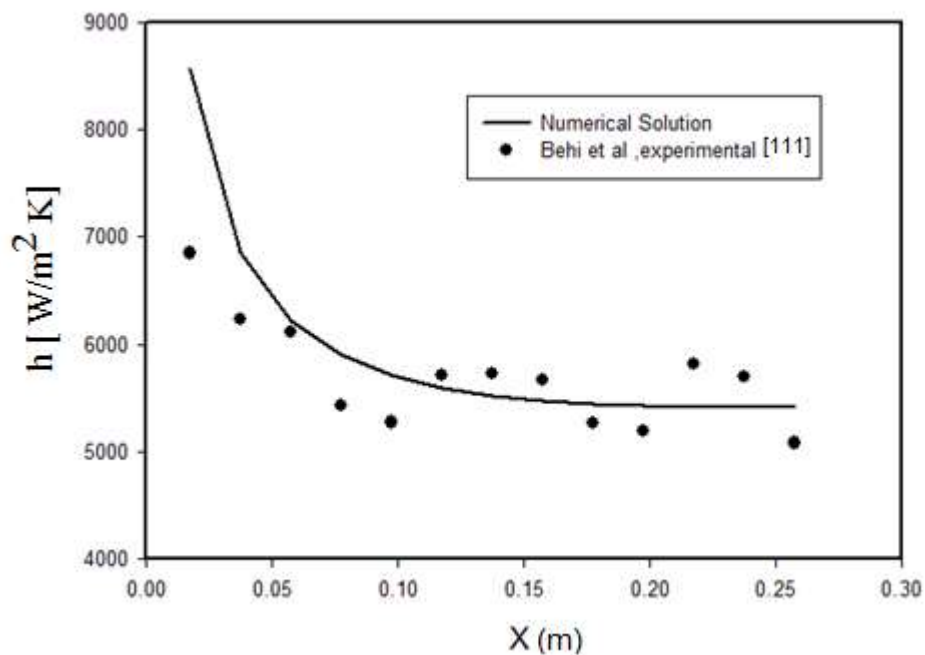
شکل ۷-۵- توزیع ناسلت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/06$  در حالت شار ثابت

جدول ۴-۵- ناسلت متوسط جریان سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/06$  در حالت شار ثابت

$Nu_{\text{Numerical, Avg}}$	$Nu_{\text{Expeimental, Avg}}$ [۱۱۱]	$Nu_{\text{ave, shah}}$ [۴۹]	$Nu_{\text{analytical}}$ (It is available in fully developed) [۱۲۱]
۴/۵۷	۴/۷۸	۴/۹۲	۴/۳۶



در شکل ۵-۸ ضریب انتقال حرارت برای جریان آب در عدد رینولدز ۹۱۵ و عدد پرانتل ۵/۰۶ با نتایج آزمایشگاهی بهی وهمکاران [۱۱۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه و درصد خطای ناشی از آن در جدول ۵-۵ آورده شده است.



شکل ۵-۸- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 915$  و  $Pr = 5/06$  در حالت شار ثابت

جدول ۵-۵- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان آب به ازای  $Pr = 5/06$  و  $Re = 915$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت

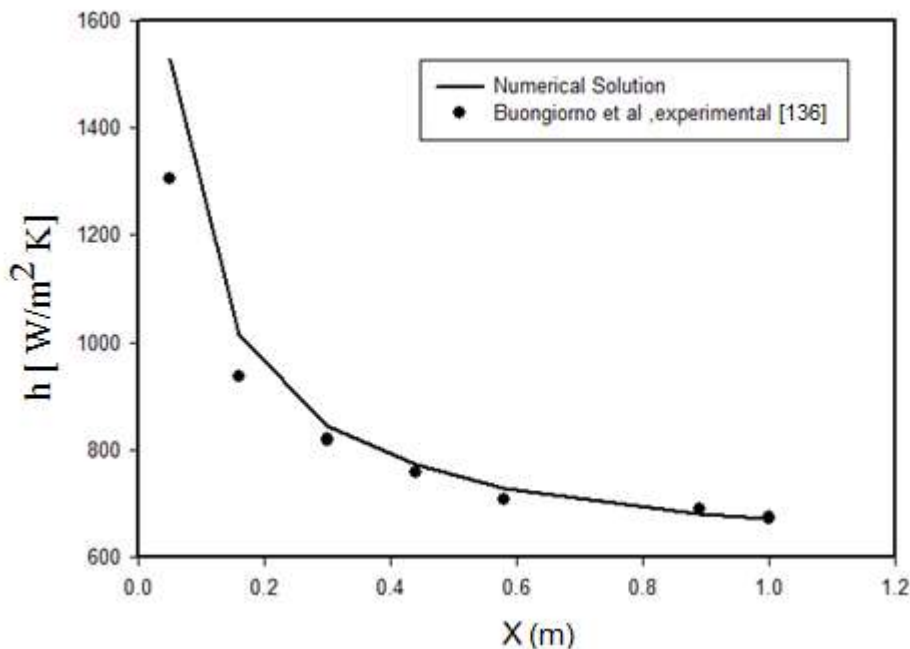
خطا %	نتایج عددی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	نتایج آزمایشگاهی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	موقعیت محوری $X(m)$
۹	۶۸۶۴/۶۲۵۰	۶۲۳۲/۸۸۱۲	۰/۰۳۷۵
۲	۶۲۲۵/۶۲۱۸	۶۱۰۹/۴۰۵۰	۰/۰۵۷۵
۸	۵۸۹۷/۲۵۹۶	۵۴۲۹/۳۹۳۰	۰/۰۷۷۵
۷	۵۷۰۶/۹۹۰۵	۵۲۷۱/۵۴۹۸	۰/۰۹۷۵
۲	۵۵۹۱/۵۳۲۵	۵۷۰۸/۹۴۹۲	۰/۱۱۷۵
۳	۵۵۱۹/۵۹۵۸	۵۷۲۰/۴۲۲۸	۰/۱۳۷۵
۳	۵۴۷۳/۸۰۷۸	۵۶۶۴/۰۶۷۳	۰/۱۵۷۵
۳	۵۴۴۴/۷۷۹۳	۵۲۵۸/۶۰۴۶	۰/۱۷۷۵
۴	۵۴۲۵/۶۳۶۵	۵۱۸۴/۹۹۰۳	۰/۱۹۷۵
۷	۵۴۱۳/۹۳۲۹	۵۸۱۴/۶۳۸۰	۰/۲۱۷۵
۵	۵۴۰۶/۲۱۴۹	۵۷۰۰/۴۵۹۵	۰/۲۳۷۵
۶	۵۴۰۱/۱۶۹۹	۵۰۷۷/۵۴۸۴	۰/۲۵۷۵

در این قسمت ضریب انتقال حرارت برای جریان آب در عدد رینولدز ۹۳۷ و عدد پرانتل ۵/۳ با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو [۱۳۶] مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه و درصد خطای ناشی از آن در جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو وهمکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان آب به ازای  $Re = 937$  و  $Pr = 5/3$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت

موقعیت محوری $X(m)$	نتایج آزمایشگاهی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	نتایج عددی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	خطا %
۰/۰۵	۱۳۰۵/۲۳	۱۵۲۹/۲	۱۴/۷
۰/۱۶	۹۳۵/۸۰	۱۰۱۲/۴	۷/۶
۰/۳	۸۱۸/۲۹	۸۴۵/۴	۳/۲
۰/۴۴	۷۵۶/۸۷	۷۷۱/۲	۱/۹
۰/۵۸	۷۰۶/۳۰	۷۲۸/۶	۳
۰/۸۹	۶۸۸/۹۹	۶۸۰/۳	۱/۳
۱	۶۷۲/۸۵	۶۷۱	۰/۳

در شکل ۵-۹ ضریب انتقال حرارت موضعی در حالت شار ثابت و نتایج آزمایشگاهی بونجورنو وهمکاران [۱۳۶] نشان داده شده است.



شکل ۵-۹- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام سیال آب در لوله به ازای  $Re = 937$  و  $Pr = 5/3$  در حالت شار ثابت

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از حل عددی تطابق خوبی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دارند. به همین دلیل، با توجه به این نتایج، می‌توان از صحت حل عددی معادله انرژی اطمینان حاصل کرد.

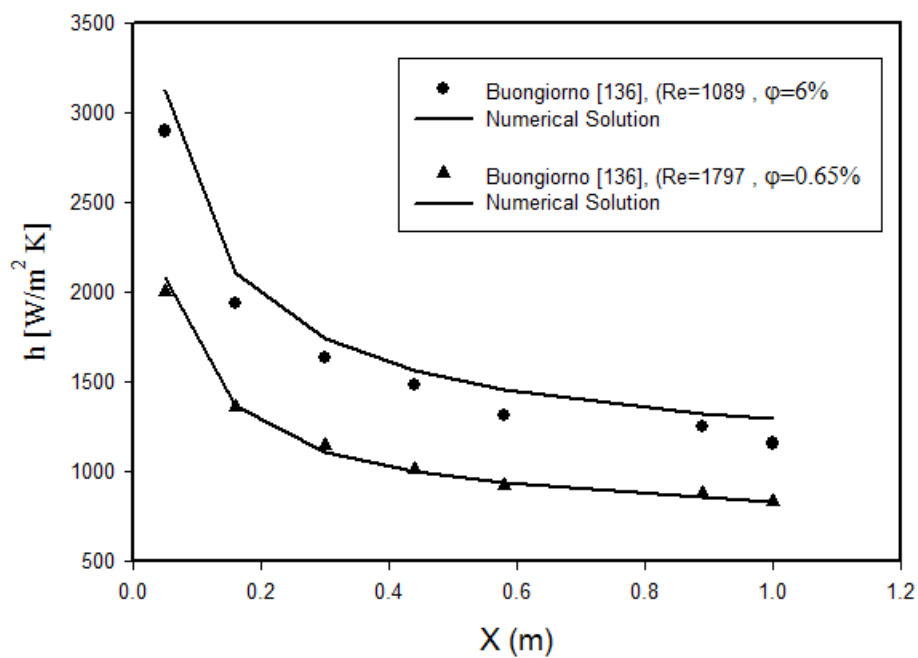
#### ۵-۴-۴- ارزیابی صحت نتایج عددی برای نانوسیال

در این بخش ضریب انتقال حرارت برای جریان نانوسیال در عدد رینولدز  $1089$  و پیرانتل  $25/5$  با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو [۱۳۶] مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه و درصد خطای ناشی از آن در جدول ۵-۸ آورده شده است.

در شکل ۵-۱۰ ضریب انتقال حرارت موضعی در حالت شار ثابت و نتایج آزمایشگاهی بونجورنو و همکاران [۱۳۶] نشان داده شده است.

جدول ۵-۷- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بونجورنو و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان نانوسیال به ازای  $Re = 1089$ ،  $Pr = 25/5$  و  $\phi = 0.06$  به همراه خطای نسبی در حالت شار ثابت

خطا %	نتایج عددی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	نتایج آزمایشگاهی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	موقعیت محوری $X(m)$
۷	۳۱۲۳/۲	۲۸۹۷/۶۷	۰/۰۵
۸	۲۱۰۷/۴	۱۹۳۶/۸۲	۰/۱۶
۶	۱۷۳۸/۹	۱۶۳۴/۵۴	۰/۳
۵	۱۵۶۲/۱	۱۴۸۳/۳	۰/۴۴
۱۰	۱۴۵۵/۷	۱۳۱۲/۲۲	۰/۵۸
۵	۱۳۲۳/۳	۱۲۵۱/۱۶	۰/۸۹
۱۰	۱۲۹۴	۱۱۵۵/۶۴	۱

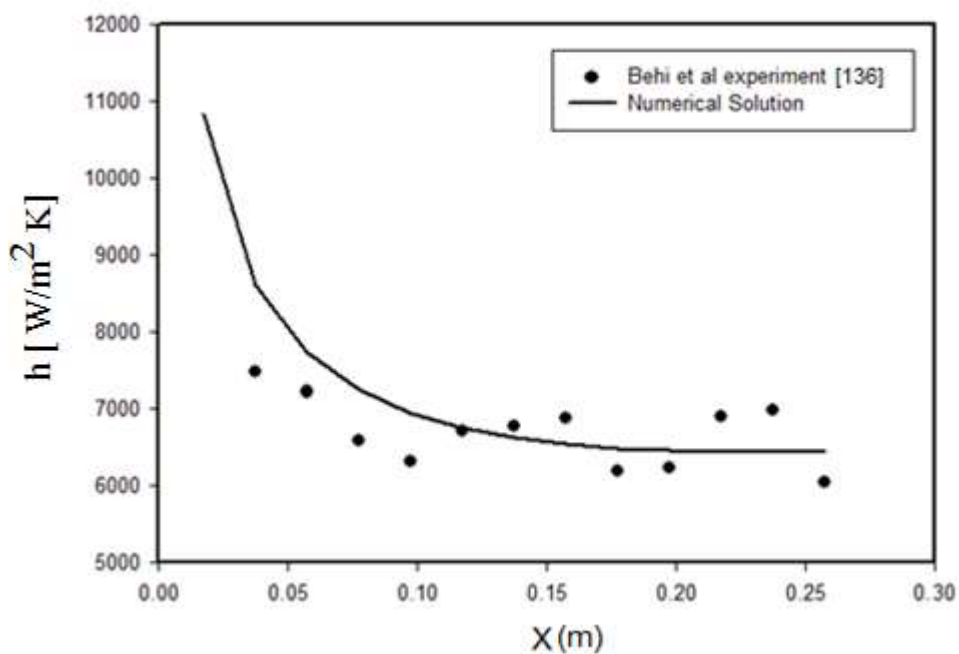


شکل ۵-۱۰- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان نانوسیال در لوله در حالت شار ثابت

نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران [۱۱۱] نیز مقایسه شده و حاصل آن در جدول ۵-۹ و شکل ۵-۱۱ گزارش شده است.

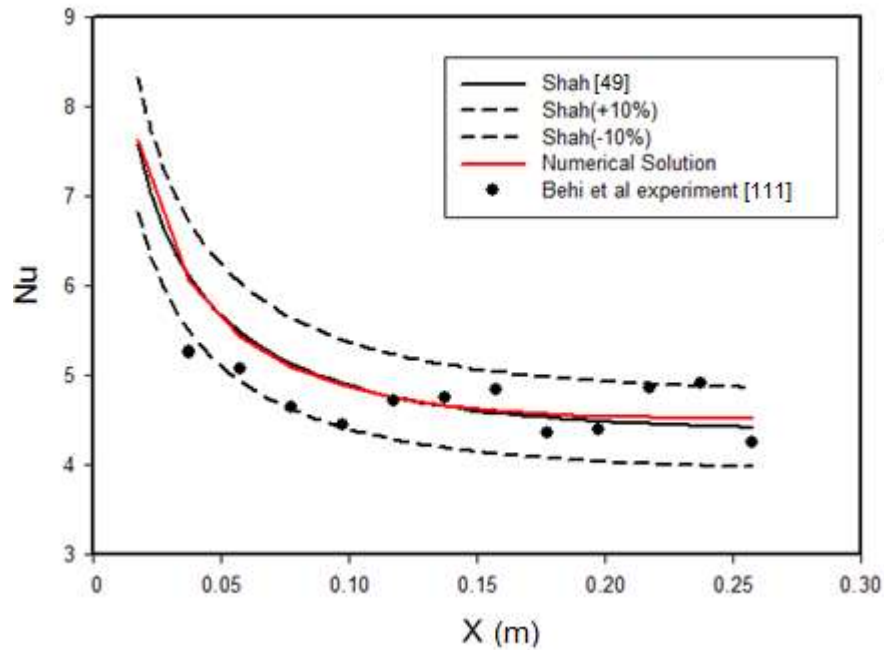
جدول ۵-۸- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای ضریب انتقال حرارت جریان نانوسیال به ازای  $Pr = 9/36, Re = 774$  و  $\phi = 0/0242$  در حالت شار ثابت

خطا %	نتایج عددی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	نتایج آزمایشگاهی $h(w.m^{-2}.k^{-1})$	موقعیت محوری $X(m)$
۱۳	۸۶۰۳/۶۲	۷۴۷۵/۱	۰/۰۳۷۵
۶/۵	۷۷۲۲/۸۷	۷۲۱۷/۳	۰/۰۵۷۵
۹	۷۲۴۳/۲۱	۶۵۸۷/۳	۰/۰۷۷۵
۹	۶۹۴۷/۳۵	۶۳۱۲/۵	۰/۰۹۷۵
۰/۸	۶۷۵۵/۶۴	۶۷۰۲/۲	۰/۱۱۷۵
۲	۶۶۲۹/۳۲	۶۷۶۰/۱	۰/۱۳۷۵
۵	۶۵۴۴/۹۹	۶۸۷۹/۳	۰/۱۵۷۵
۵	۶۴۸۹/۹۶	۶۱۸۹/۹	۰/۱۷۷۵
۳	۶۴۵۶/۶۶	۶۲۳۲/۴	۰/۱۹۷۵
۷	۶۴۳۷/۸۲	۶۹۰۲/۵	۰/۲۱۷۵
۸	۶۴۲۹/۷۷	۶۹۷۰/۲	۰/۲۳۷۵
۶	۶۴۳۰/۵۳	۶۰۴۴/۳	۰/۲۵۷۵



شکل ۵-۱۱- توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی جریان آرام نانوسیال در لوله به ازای  $Pr = 9/36$ ،  $Re = 774$  و  $\phi = 0/0.242$  در حالت شار ثابت

در شکل ۵-۱۲ توزیع ناسلت موضعی در لوله در حالت شار ثابت برای نانوسیال با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و رابطه شاه مقایسه شده است. نتایج در محدوده ی دقت  $\pm 10\%$  نسبت به رابطه شاه (۱۶-۲) می باشد.



شکل ۵-۱۲- توزیع ناسلت موضعی جریان آرام نانوسیال در لوله به ازای  $Re = 774$ ،  $Pr = 9/36$  و  $\phi = 0.0242$  در حالت شار ثابت

در این قسمت برای ارزیابی دقت حل عددی جریان نانوسیال در میکرولوله، افت فشار نیز بصورت عددی محاسبه شده و با روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

همانطور که قبلاً اشاره شده است از معادله داری برای محاسبه افت فشار در ناحیه کاملاً توسعه یافته می توان استفاده کرد که برای جریان آرام نانوسیال بصورت زیر بیان می شود.

$$\Delta p_{nf} = f \frac{\rho_{nf} u^2}{2d} L, \quad f = \frac{64}{Re_{nf}} \quad (9-5)$$

بر اساس افت فشار ضریب اصطکاک برای نانوسیال محاسبه شده است و اختلاف بین نتایج تجربی، عددی و تئوری (رابطه داری) در محدوده  $\pm 10\%$  می باشد. در جدول ۵-۱۰ مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک بصورت عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران [۱۱۱] مقایسه شده است.



جدول ۵-۹- مقایسه افت فشار عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی بهی و همکاران برای غلظت ۲/۲۴ درصد به

ازای (الف)  $Re=613$  (ب)  $Re=774$

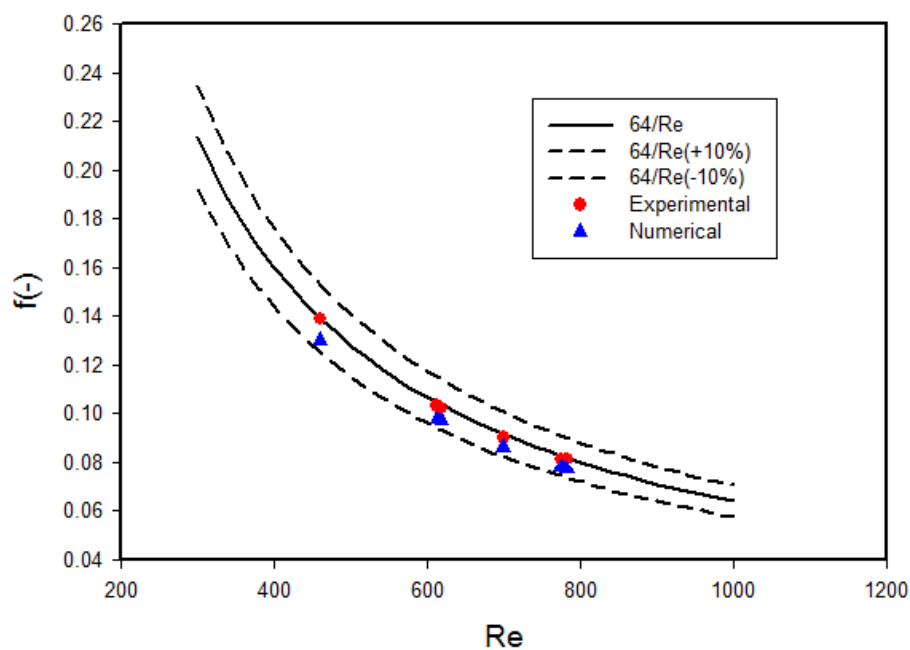
(الف)

خطا عددی نسبت به تحلیلی	خطا عددی نسبت به آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	عددی	
۶ (%)	۴/۸ (%)	۱۱۴۴۲۲	۱۱۲۴۴۴	۱۰۷۰۳۱	افت فشار (پاسکال)
۶ (%)	۵ (%)	۰/۱۰۴۴	۰/۱۰۳۱۵	۰/۰۹۷۷	ضریب اصطحکاک

(ب)

خطا عددی نسبت به تحلیلی	خطا عددی نسبت به آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	عددی	
۵/۵ (%)	۳/۳ (%)	۱۴۱۲۷۶	۱۳۷۹۹۹	۱۳۳۴۱۱	افت فشار (پاسکال)
۵/۵ (%)	۳/۶ (%)	۰/۰۸۲۶۹	۰/۰۸۱۰۳	۰/۰۷۸۱	ضریب اصطحکاک

در شکل ۵-۱۳ نیز ضریب اصطکاک آزمایشگاهی و عددی با ضریب اصطکاک داری مقایسه شده و تطابق خوبی با نتایج تحلیلی مشاهده می شود.



شکل ۵-۱۳- مقایسه ضریب اصطکاک آزمایشگاهی و عددی با ضریب اصطکاک داری برای غلظت حجمی ۲/۲۴ درصد

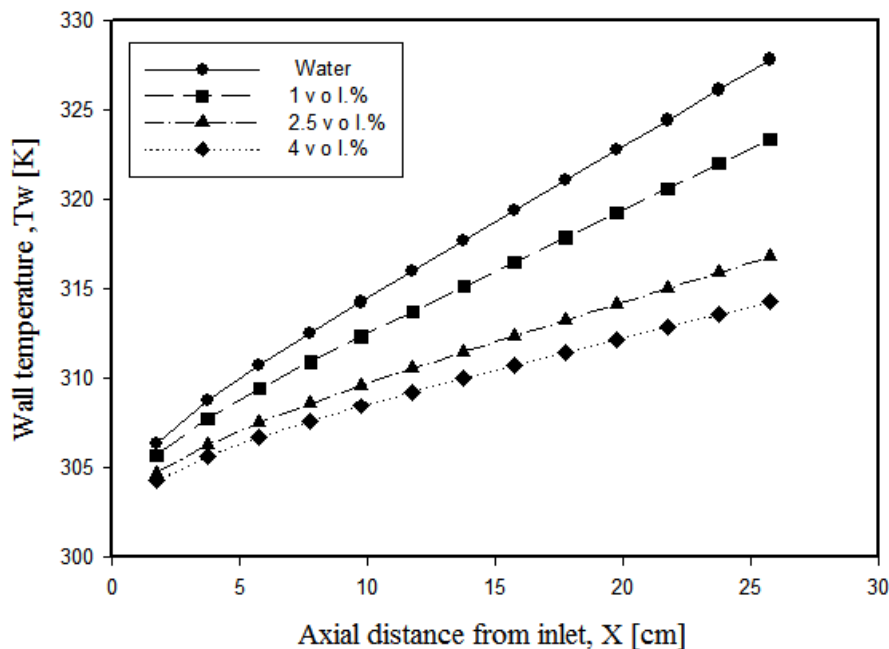
همان طور که نشان داد شد نتایج حاصل از حل عددی تحقیق حاضر تطابق خوبی با روابط تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی بهی و بونجورنو دارد؛ بنابراین باتوجه به شکلها و جداول ارائه شده در این بخش می توان از صحت نتایج حل عددی اطمینان حاصل کرد.

## ۵-۵- بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی

در این قسمت نتایج حاصل از تاثیر پارامترهای مختلف شامل اندازه ذرات، غلظت حجمی ذرات، عدد رینولدز، عدد پراتل و عدد پکلت بر میدان جریان و انتقال حرارت آرام نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در میکرو لوله متقارن محوری ارائه میشود. نتایج بدست آمد برای کسر حجمی ۱ تا ۹ درصد و قطر نانوذرات ۱۳ تا ۱۳۰ نانومتر می باشد. مقادیر محاسبه شده هر پارامتر، در هر یک از حالتها نسبت به پارامترهای مشابه در میکرولوله با شرایط هندسی و مرزی (حرارتی-سیالاتی) یکسان، با سیال خنک کننده آب خالص سنجیده می شود و نهایتاً به ارائه نتایج این تحقیق می پردازیم. روند محاسبات پیش نیاز و همچنین محاسبات صورت گرفته بر روی خروجی های نرم افزار و تحلیل های انجام شده را تشریح می کنیم و در قالب شکل های لازم نتایج مذکور را جمع بندی می نماییم.

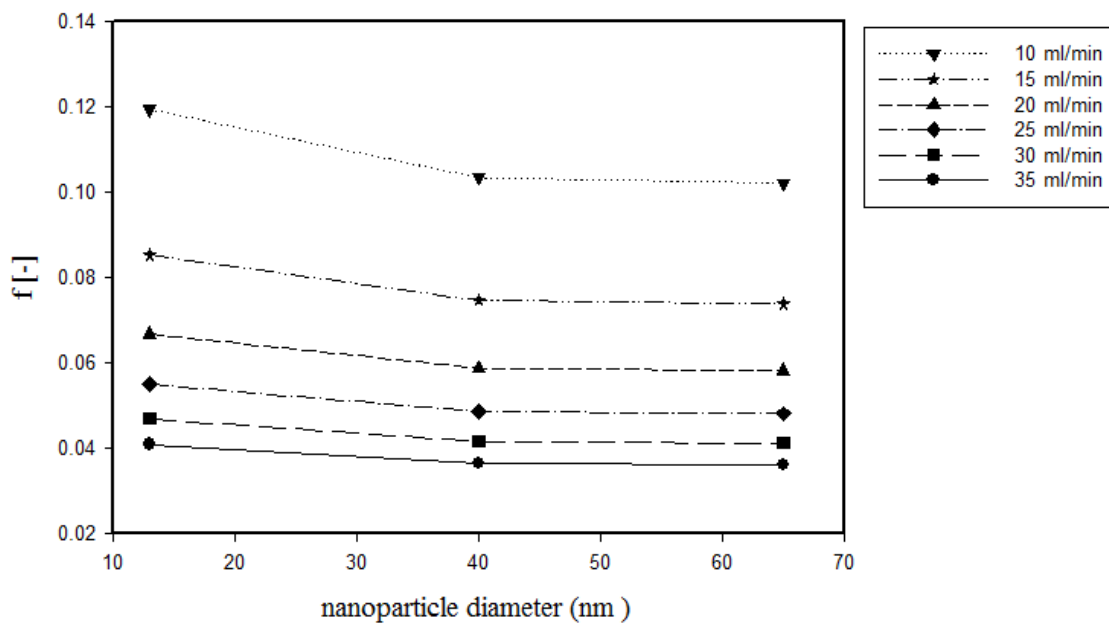
در این تحقیق، عدد رینولدز براساس سرعت یکنواخت ورودی ( $U_{in}$ )، قطر میکرولوله (d) و متوسط دما میکرو لوله  $(T_m = \frac{T_{in} - T_{out}}{2})$  محاسبه شده است.

اندازه گیری دمای دیواره میکرو لوله در ارزیابی عملکرد انتقال حرارت و همچنین تاثیر حضور نانوذرات در سیال پایه، کمک می کند. شکل ۵-۱۴ نشان می دهد با افزایش کسر حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم در سیال پایه دمای دیواره کاهش می یابد. علاوه بر این همانطور که در شکل مشاهده می شود، دمای دیوار در جهت جریان افزایش می یابد. نکته ای که از این شکل قابل استنتاج است این است که دمای دیواره در سیال پایه بیش از مقدار مشابه آن برای نانوسیال است؛ بنابراین از همین جا می توان نتیجه گرفت که ضریب انتقال حرارت جابه جایی موضعی در نانوسیال مذکور از ضریب انتقال حرارت جابه جایی سیال پایه بیشتر است.

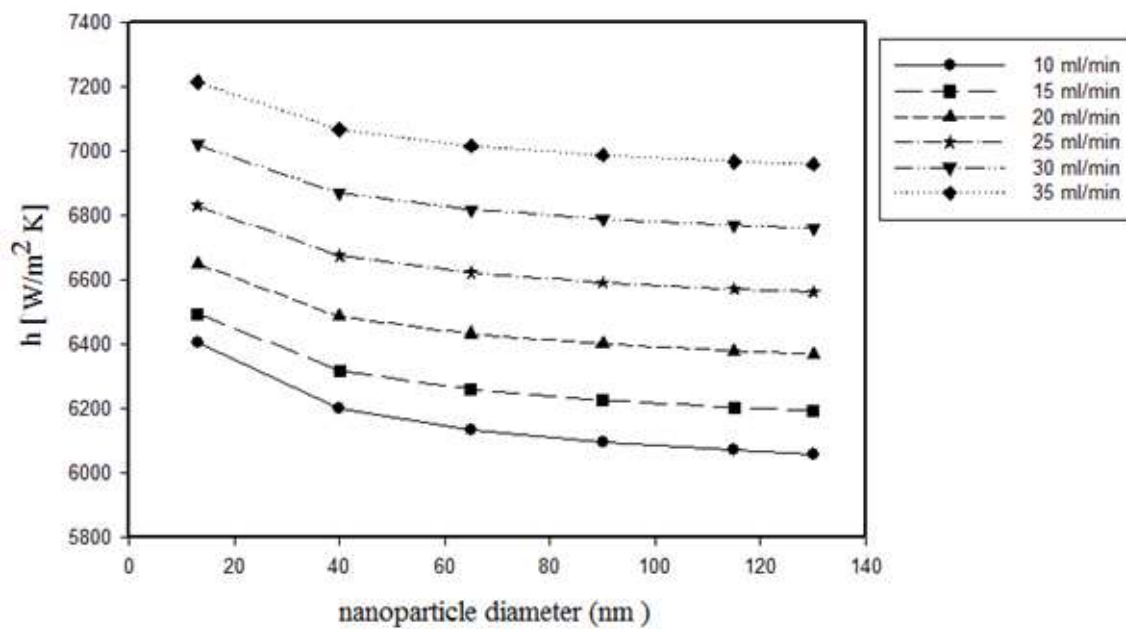


شکل ۵-۱۴- دمای موضعی دیوار برای غلظت های مختلف نانوسیال و سیال پایه در قطر نانوذره ۱۳ و عدد رینولدز ۴۰۰

شکل ۵-۱۵ و ۵-۱۶ تغییرات ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت نسبت به قطر نانوذرات برای حالتی که مقادیر مختلف نرخ جریان ورودی میکرو لوله استفاده شده است را نشان می دهد. ضریب انتقال حرارت با افزایش نرخ جریان افزایش یافته و ضریب اصطکاک نیز کاهش می یابد. با افزایش نرخ جریان، انرژی جنبشی جریان افزایش یافته و این باعث می شود فشار دینامیکی جریان افزایش یافته که این امر سبب کاهش ضریب اصطکاک می شود از طرفی افزایش نرخ جریان سبب می شود نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی افزایش یابد. وقتی که نانوسیال با ذرات ریز استفاده می شود هدایت حرارتی موثر افزایش می یابد؛ بنابراین بدلیل رابطه مسقیم بین ضریب انتقال حرارت و هدایت حرارتی موثر، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. از طرف دیگر استفاده از نانوذرات بزرگتر باعث می شود که ناحیه تماس، ویسکوزیته و حرکت براونی کاهش یابد در نتیجه ضریب اصطکاک با افزایش قطر نانوذرات کاهش می یابد.

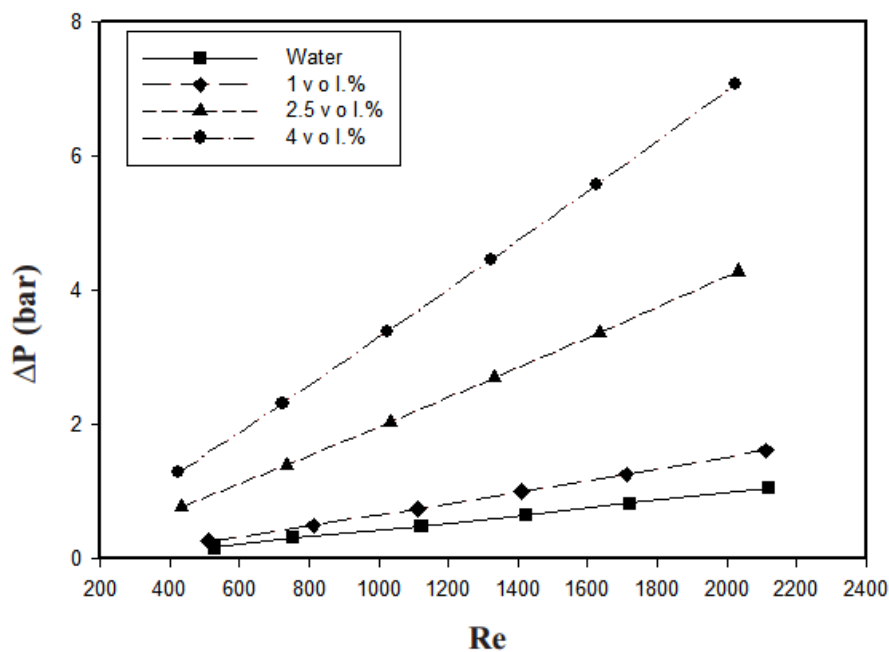


شکل ۵-۱۵- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب قطر نانوذرات در غلظت حجمی ۱ درصد



شکل ۵-۱۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب قطر نانوذرات در غلظت حجمی ۱ درصد

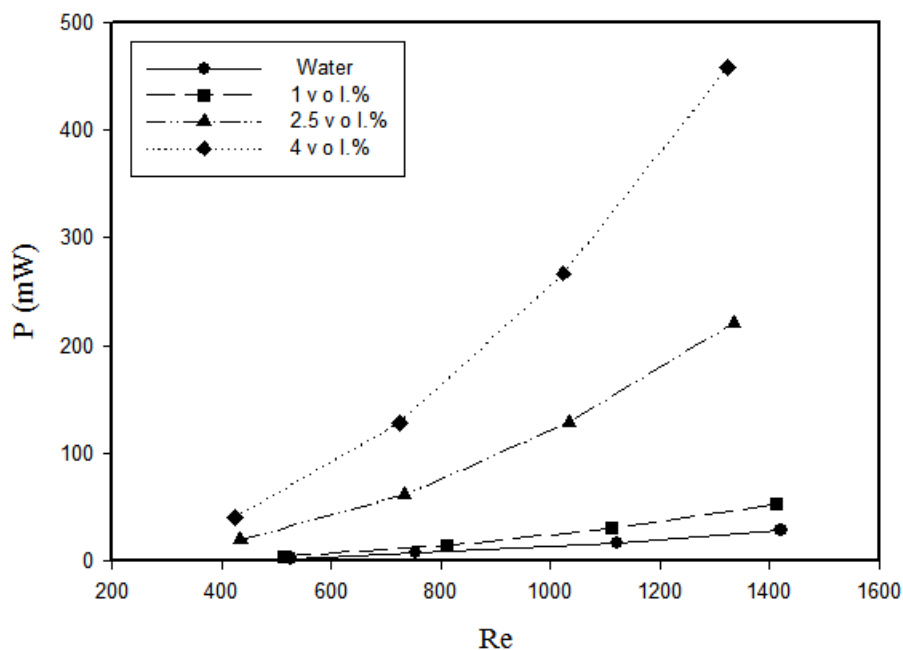
شکل ۵-۱۷ نشان می دهد که چطور افت فشار در میکرو لوله برای آب و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف تغییر می کند. تمام نانوسیال ها افت فشار بیشتری در مقایسه با افت فشار آب خالص نشان می دهند. همانطور که در شکل مشخص است افت فشار با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد از طرفی وجود نانوذرات جامد در سیال خنک کننده باعث افزایش چشمگیر افت فشار ناشی از حرکت سیال لزج تر در مقایسه با سیال، با لزجت کمتر است به عبارتی با افزایش کسر حجمی نانوذره، میزان افت فشار افزایش می یابد که علت این امر افزایش ویسکوزیته می باشد.



شکل ۵-۱۷- تغییرات افت فشار با عدد رینولدز برای آب و غلظت های مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم برای قطر ۱۳ نانومتر

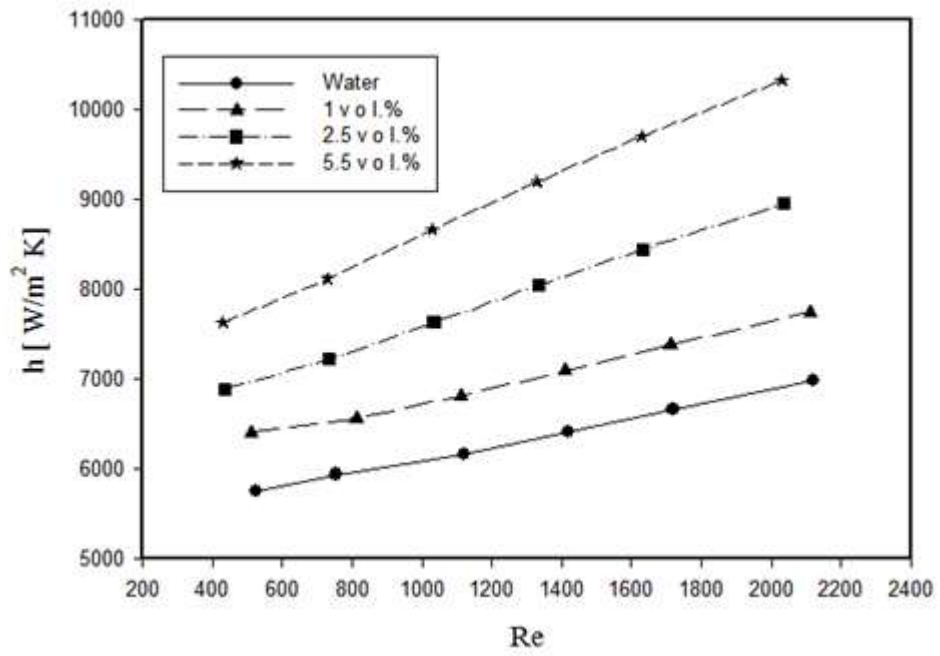
در شکل ۵-۱۸ قدرت پمپاژ برای سیال آب و نانوسیال با کسر حجمی مختلف در میکرو لوله در رینولدز های مختلف مقایسه شده است. مشاهده می شود که به علت وجود نانوذرات و افزایش غلظت حجمی نانوذرات میزان چگالی و لزجت دینامیکی سیال خنک کننده افزایش می یابد و سیال لزج تر برای جابه جایی در میکروکانال به توان بالاتری نیازمند است؛ که با توجه به موارد ذکر شده میزان قدرت پمپاژ

افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، قدرت پمپاژ نیز افزایش می‌یابد؛ که علت آن ناشی از افزایش سرعت در رینولدزهای بالاتر است. افزایش سرعت باعث افزایش دبی حجمی جریان می‌شود که خود عامل افزایش قدرت پمپاژ است.

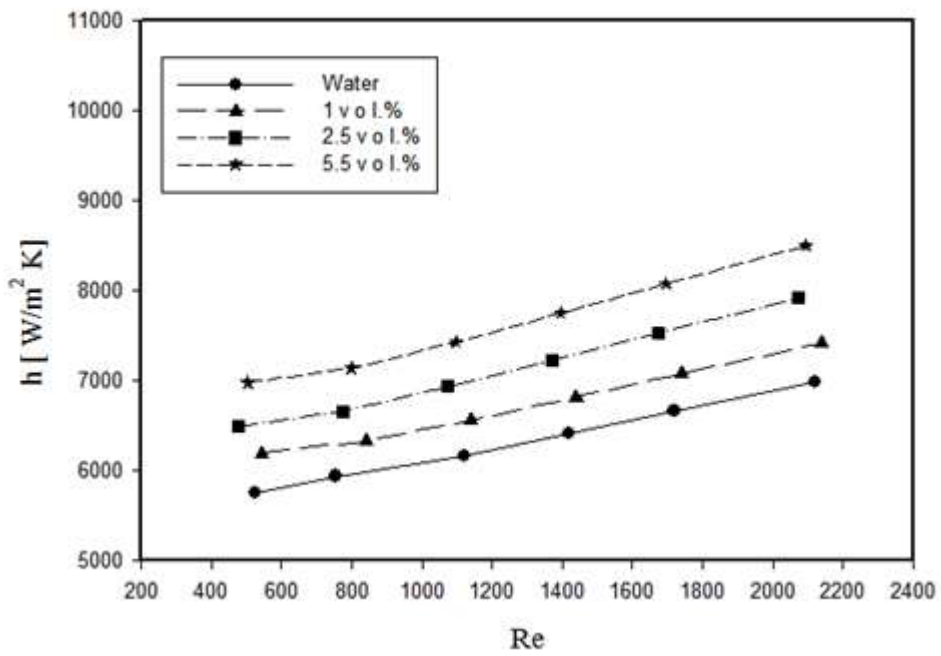


شکل ۵-۱۸- مقایسه قدرت پمپاژ نانوسیال در کسر حجمی های مختلف نانوذره برای قطر ۱۳ نانومتر و سیال آب

در شکل ۵-۱۹ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین محاسبه شده برای نانوسیال حاوی ذرات ۱۳، ۴۰ و ۹۰ نانومتری اکسید آلومینیوم با غلظت‌های حجمی ۱، ۲/۵ و ۵/۵ درصد، در رینولدزهای مختلف ترسیم شده است.

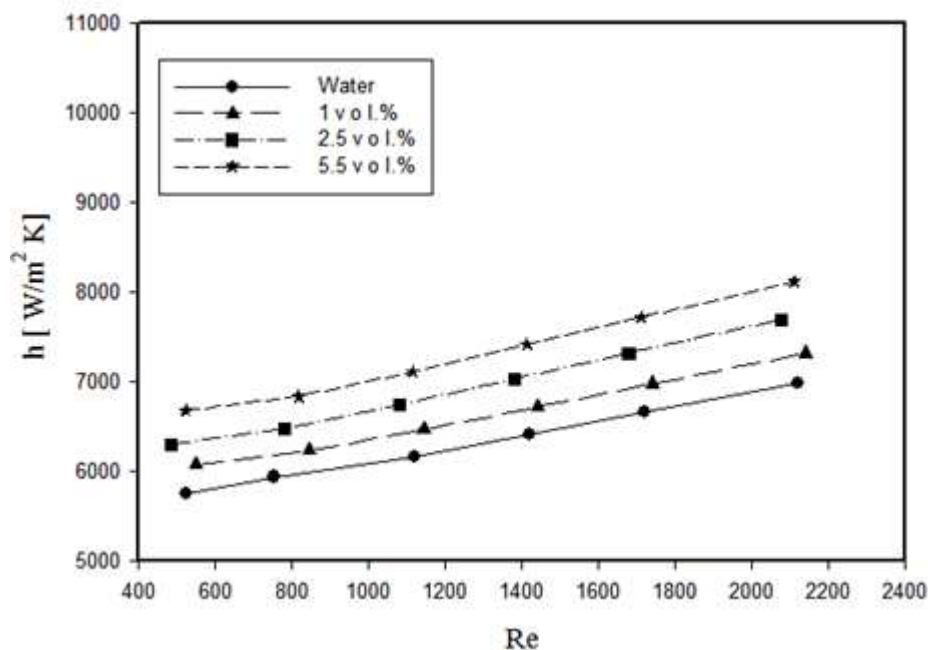


(الف)



(ب)





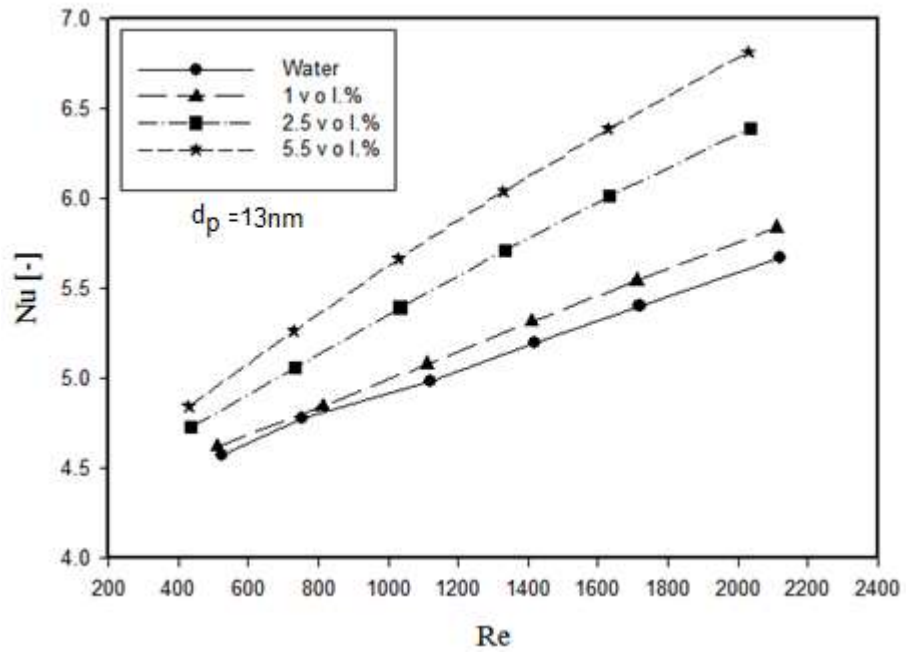
(ج)

شکل ۵-۱۹- تاثیر عدد رینولدز روی ضریب انتقال حرارت آب و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف و قطر نانوذره (الف) ۱۳ نانومتر (ب) ۴۰ نانومتر (ج) ۹۰ نانومتر

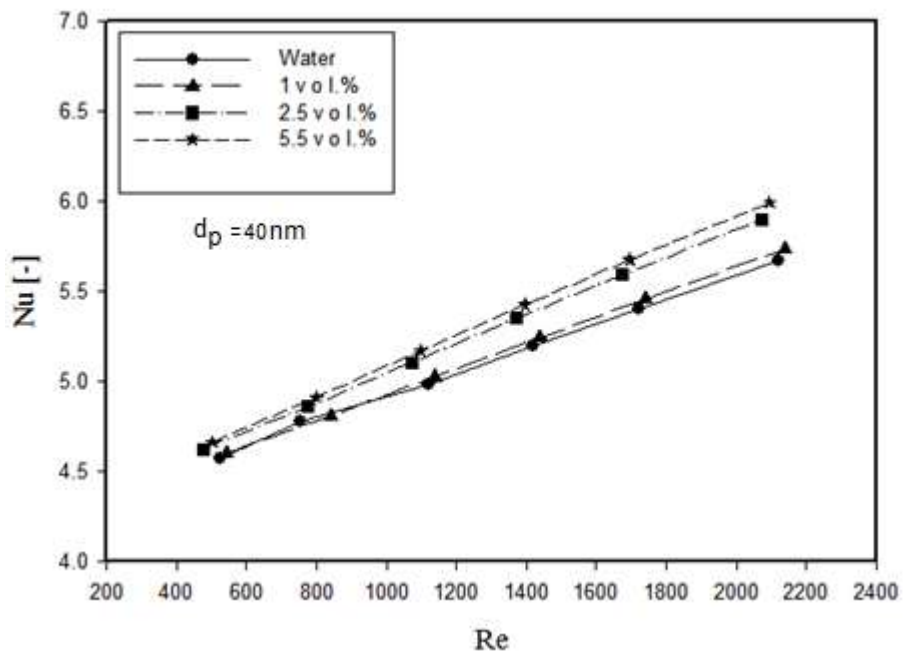
همانطور که مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذره جامد، میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط افزایش می یابد. برای مثال در شکل ۵-۱۹ (الف) بین عدد رینولدز ۵۰۰ تا ۲۱۰۰، ضریب انتقال حرارت متوسط در حدود ۱/۲ برابر برای تمام کسر حجمی ها افزایش یافته است. بطور مشابه در عدد رینولدز ثابت ۱۱۰۰ بر ای غلظت ۵/۵ درصد ضریب انتقال حرارت ۲۰٪ بزرگتر از ضریب انتقال حرارت سیال پایه (آب) می باشد. این افزایش در ضریب انتقال حرارت، به هدایت حرارتی بالای نانوذرات اکسید آلومینیوم نسبت داده می شود.

شکل ۵-۲۰ عدد ناسلت میانگین محاسبه شده برای آب و نانوسیال حاوی نانوذرات ۱۳، ۴۰ و ۹۰ نانومتری اکسید آلومینیوم با غلظت های حجمی ۱، ۲/۵ و ۵/۵ درصد، در رینولدزهای مختلف را نشان می-

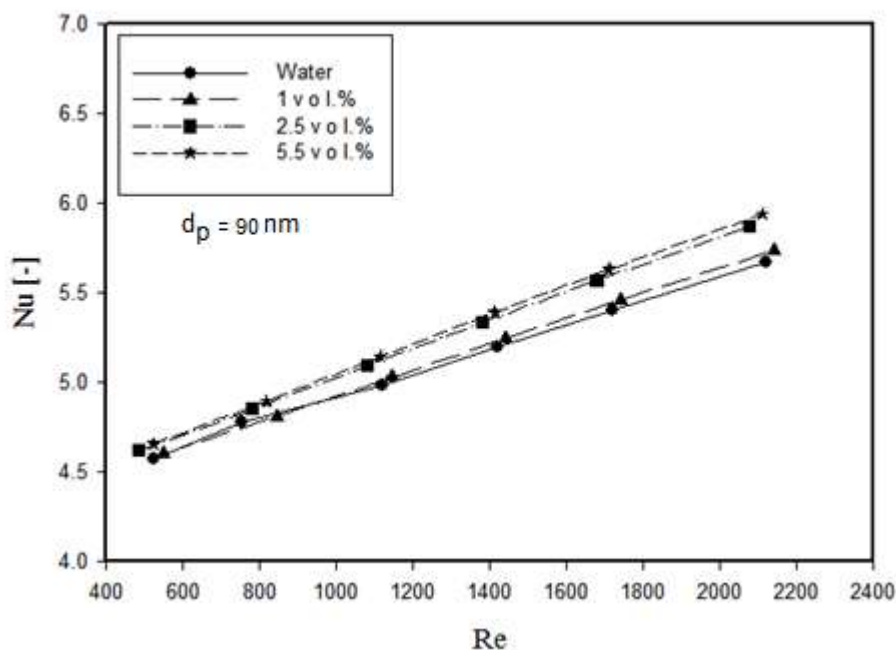
دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۲۰- تاثیر عدد رینولدز روی عدد ناسلت برای سیال آب و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف و قطر نانوذره  
 الف) ۱۳ نانومتر ب) ۴۰ نانومتر ج) ۹۰ نانومتر

با افزایش غلظت نانوذرات با اندازه ذره ۱۳، ۴۰ و ۹۰ نانومتر، از ۱ درصد به ۵/۵ درصد در رینولدز های ثابت، عدد ناسلت میانگین افزایش می یابد. در غلظت ثابت ۱ درصد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین افزایش می یابد.

همان گونه که انتظار می رفت و از شکل های ۵-۲۰ پیداست، با افزایش غلظت و عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می یابد.

علت افزایش عدد ناسلت در کسر حجمی های بالاتر نانوذره در مقایسه با سیال آب خالص وجود نانوذرات در سیال پایه است که باعث افزایش هدایت حرارتی نانوسیال و تقویت مکانیزم های انتقال حرارت می شود.

با توجه به شکل های ۵-۱۹ و ۵-۲۰ با کاهش قطر نانوذرات سطح ویژه<sup>۱</sup> افزایش یافته و این باعث افزایش حرکت براونی می شود در نتیجه فرایند تبادل انرژی بهبود می یابد، از طرفی نانوذرات با سطح ویژه بزرگتر، در تماس بیشتر با مولکولهای سیال پایه بوده که باعث افزایش هدایت حرارتی نانوسیال می شود و می تواند فرایند تبادل انرژی را بهبود ببخشد و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت شود.

عمده ترین دلیل اختلاف بین نتایج تحقیقات عددی و شبیه سازیها در نانوسیالات با نتایج آزمایشگاهی، مربوط به اختلاف در محاسبه خواص ترموفیزیکی و از جمله مهم ترین این خواص ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات است؛ زیرا هیچ کدام از روابط موجود برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به تنهایی قادر به پیش بینی دقیق این خاصیت در شرایط واقعی مختلف نیستند.

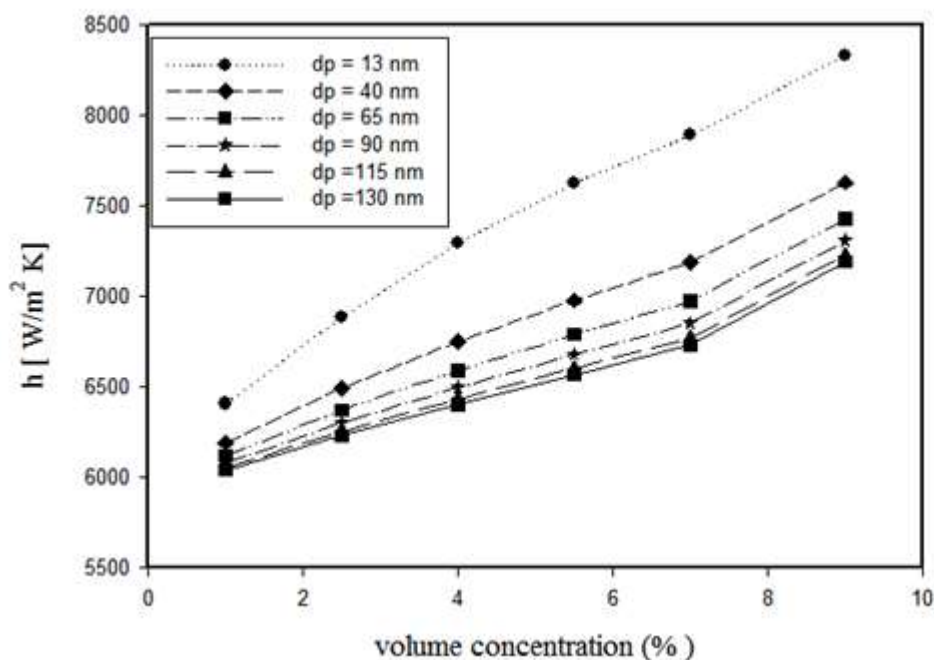
به طور کلی از مقایسه شکل های ۵-۱۹ و ۵-۲۰ می توان گفت که اثر افزایش غلظت نانوذرات با افزایش اندازه ذرات رو به کاهش است؛ به عبارت دیگر با افزایش اندازه ذرات تأثیر استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال کاهش می یابد؛ بنابراین می توان پیش بینی کرد که در استفاده از ذراتی با اندازه های بزرگتر، این روند نزولی چشمگیرتر خواهد بود. این موضوع در شکل ۵-۱۹ (ج) و ۵-۲۰ (ج) به روشنی قابل مشاهده است. نکته دیگری که از شکل ۵-۱۹ (ب) قابل استنتاج است این است که با افزایش عدد رینولدز در اندازه های ثابت برای نانوذرات، برای رسیدن به ضریب انتقال حرارت بالاتر نیاز به غلظتهای بالاتری از نانوذرات است اما در رینولدزهای پایین تر، استفاده از غلظتهای پایینی از نانوذرات هم اثری مطلوبی بر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی دارد

شکل ۵-۲۱ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین نانوسیال مورد بحث را نسبت به تغییر غلظت نانوسیال و تغییر اندازه ذرات نشان می دهد. نمودار مذکور برای ذراتی با اندازه های ۱۳، ۴۰، ۶۵، ۹۰، ۱۱۵، و ۱۳۰ نانومتر و غلظت های ۱، ۲/۵، ۴، ۵/۵، ۷، ۹ درصد حجمی تنظیم شده است. با افزایش

---

1. Specific area

غلظت حجمی، حضور نانوذرات در سیال پایه افزایش یافته که این باعث افزایش هدایت حرارتی نانوسیال می شود از طرفی در یک غلظت ثابت با افزایش ذرات به دلیل کاهش حرکت براونی و کاهش سطح ویژه ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد.

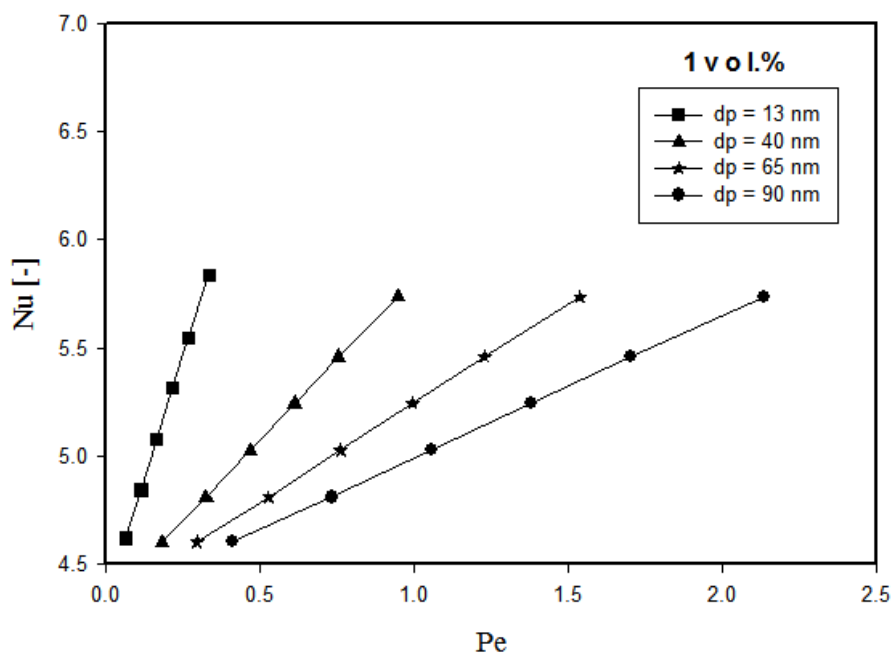


شکل ۵-۲۱- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین نسبت به تغییر غلظت حجمی در اندازه نانوذرات مختلف

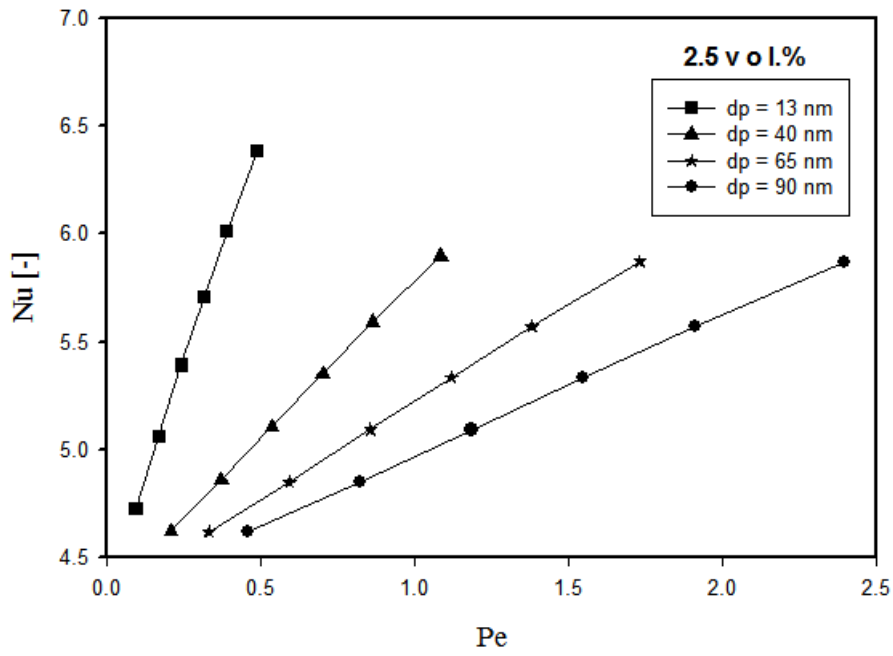
برای ارزیابی تاثیر اندازه نانوذرات روی عدد ناسلت متوسط، تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد پکلت برای قطرهای مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم در شکل ۵-۲۲ نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که در غلظت های حجمی یکسان عدد ناسلت متوسط با کاهش اندازه نانوذرات، افزایش می یابد. عدد پکله بیانگر اثر پراکندگی حرارتی ناشی از میکرو جابه‌جایی و میکرو نفوذ نانوذرات معلق است. با کاهش اندازه نانوذرات حرکت براونی افزایش یافته و سبب افزایش حرکت اتفاقی نانوذرات در سیال می شود و فرایند تبادل انرژی بهبود می بخشد. افزایش عدد ناسلت متوسط با کاهش اندازه ذرات بخصوص در غلظت های

حجمی بالا بیشتر مشهود می باشد. برای مثال با توجه به شکل ۵-۲۲ (الف) با افزایش اندازه نانوذرات از ۱۳ به ۶۵ نانومتر در ۱ درصد غلظت حجمی در عدد پکلت ۰/۳ عدد ناسلت متوسط از ۵/۸۴ به ۴/۶۰ کاهش می یابد همچنین در شکل ۵-۲۲ (ب) با افزایش اندازه نانوذرات از ۱۳ به ۹۰ نانومتر در ۲/۵ درصد غلظت حجمی و در عدد پکلت ۰/۴۶ عدد ناسلت متوسط از ۶/۳۸ به ۴/۶۲ کاهش می یابد.

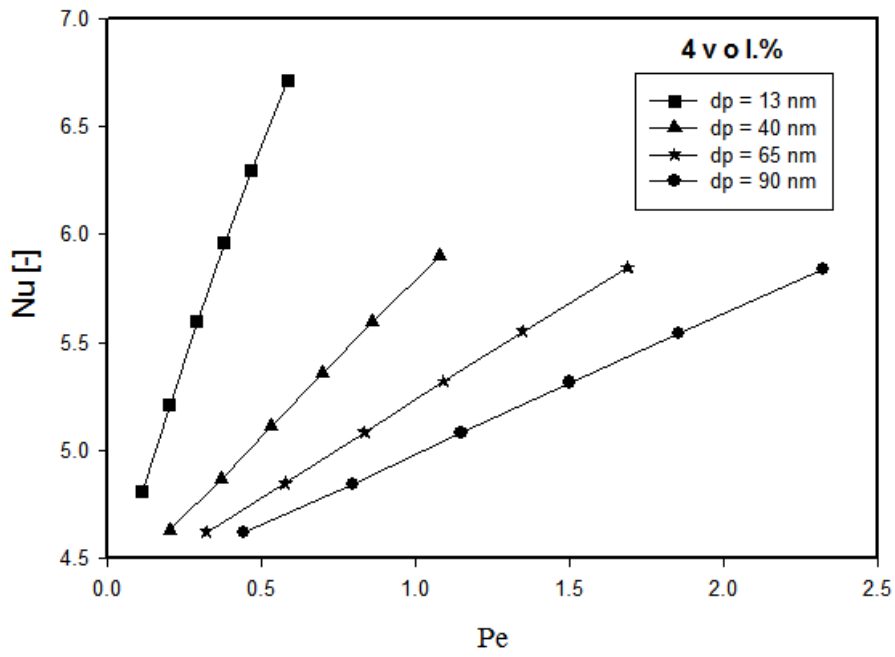
و در عدد پکلت ۱/۱۴ در ۴ درصد کسی حجمی، افزایش ذرات از ۴۰ به ۹۰ نانومتر سبب می شود عدد ناسلت از ۵/۹ به ۵ کاهش یابد (۵-۲۲ ج).



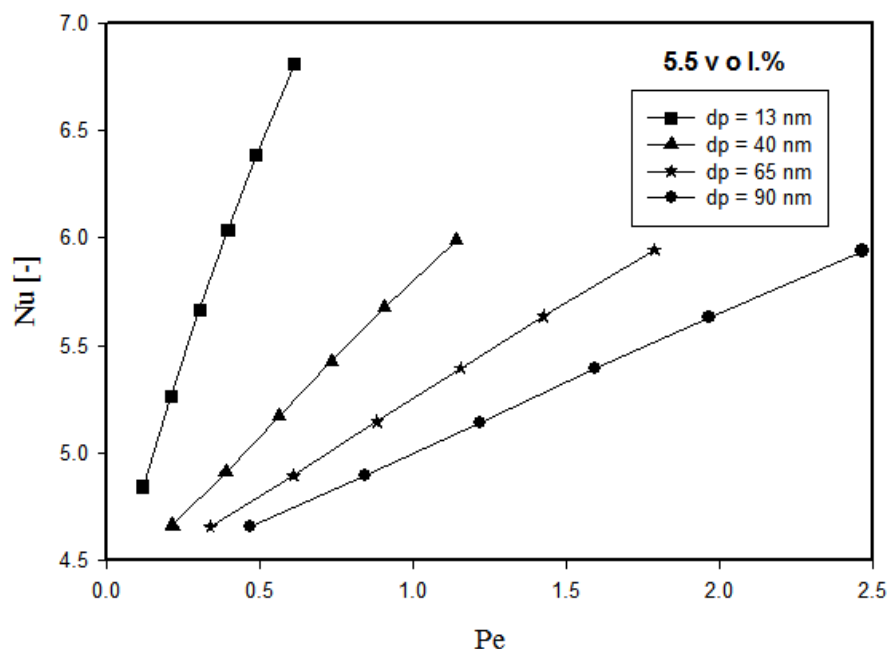
(الف)



(b)



(c)



(د)

شکل ۵-۲۲- عدد ناسلت متوسط نسبت به عدد پکلت برای نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر های مختلف الف) با ۱ درصد غلظت حجمی ب) ۲/۵ درصد غلظت حجمی ج) ۴ درصد غلظت حجمی د) ۵/۵ درصد غلظت حجمی

مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین، همزمان با کاهش اندازه ذرات افزایش یافته است. آزمایش‌های تجربی نشان داده‌اند که با افزودن نانوذرات به سیال پایه مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. دلایل این افزایش را در نانوسیالات به کوچک شدن ضخامت لایه مرزی، پراکندگی معکوس نانوذرات معلق، افزایش قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی و نیز ظرفیت حرارتی سیال ربط می‌دهند. [۹۲]. به همین دلایل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات را تابعی از خواص، ابعاد و جز حجمی نانوذرات معلق و سرعت جریان می‌توان در نظر گرفت.

جریان نانوسیال تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند جاذبه حرکت براونی، نیروی اصطکاک بین سیال و ذره، پدیده نفوذ براونی و پراکندگی قرار می‌گیرد. حرکت اتفاقی نانوذرات معلق نرخ تبادل انرژی در سیال را افزایش می‌دهد.



پراکندگی موجب تخت شدن توزیع دما گشته و گرادیان دمای بین دیواره و سیال را افزایش داده و سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. همانطور که از شکل ۵-۲۱ مشاهده می‌شود ضریب انتقال حرارت با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. با مشاهده فاصله بین نقاط در شکل در می‌یابیم که این فاصله هر چه اندازه ذرات کوچکتر می‌شود، بیشتر می‌شود. به عبارتی دیگر تأثیر اندازه ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال در تحقیق حاضر، در اندازه‌های کوچکتر بیشتر است؛ بنابراین کاهش اندازه ذرات اثر بهتری بر افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال نشان می‌دهد.

عملکرد گرمایی و هیدرولیکی نانوسیال با غلظت‌های ۱، ۲/۵، ۴ و ۵/۵ درصد با اندازه نانوذرات ۱۳ و ۶۵ نانومتر در شرایط یکسان مورد ارزیابی قرار گرفته است. افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به قدرت پمپاژ با استفاده از رابطه (۵-۱۰) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از این ارزیابی در شکل ۲۳-۵ ارائه شده است.

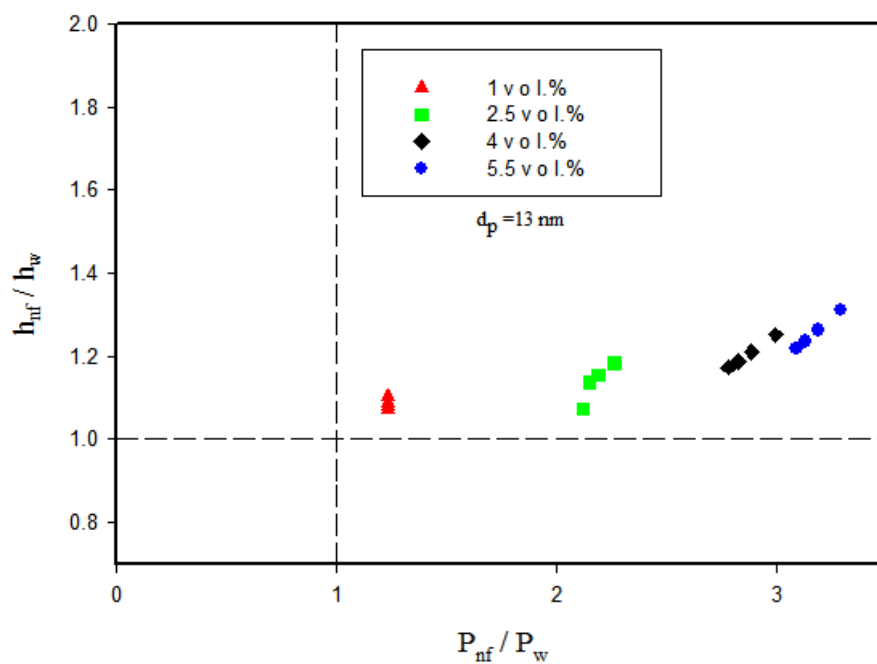
$$P_{nf} = \frac{\dot{m}_{nf} \Delta p}{\rho_{nf}} \quad (۵-۱۰)$$

در هر یک از شکل‌ها چهار قسمت وجود دارد که می‌توان عملکرد حرارتی و هیدرولیکی نانوسیال را بررسی کرد. مختصات (۱،۱) مربوط به سیال پایه می‌باشد. بخش اول ( $x > 1, y > 1$ ) که ناحیه مورد انتظار برای عملکرد گرمایی و هیدرولیکی نانوسیال می‌باشد، جایی است که با افزایش ضریب انتقال حرارت، قدرت پمپاژ نیز افزایش می‌یابد. قسمت دوم ( $x < 1, y > 1$ ) و قسمت سوم ( $x < 1, y < 1$ ) قسمت‌های هستند که برای عملکرد گرمایی و هیدرولیکی نانوسیال انتظار نمی‌رود به این دلیل که قدرت پمپاژ به افت فشار بستگی دارد که مقدار آن برای نانوسیال زیاد می‌باشد. در نهایت قسمت چهارم ( $x > 1, y < 1$ ) نشاندهنده

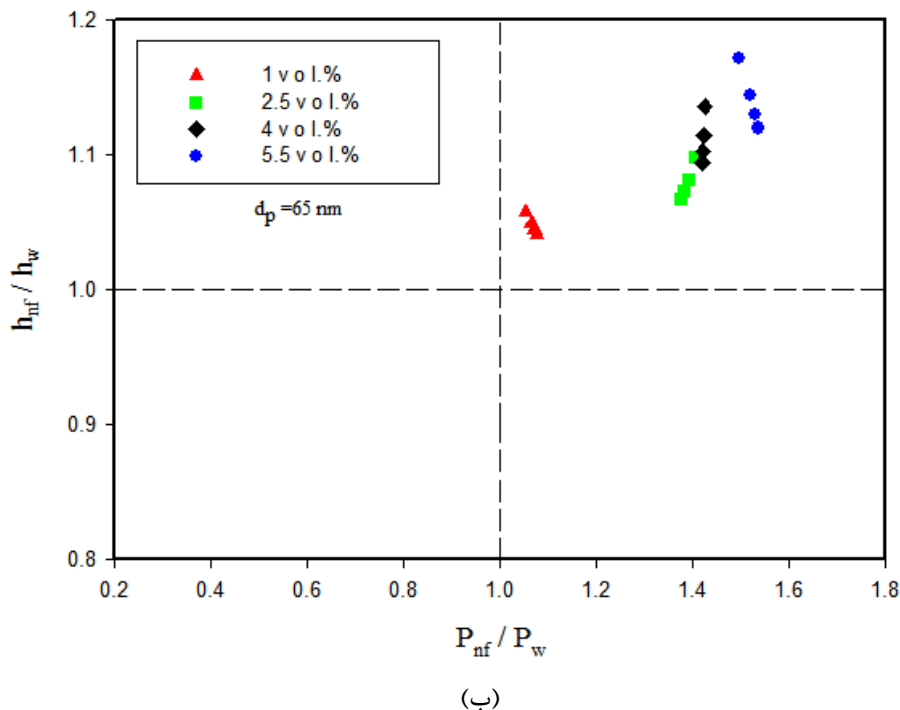
این است که استفاده نانو سیال هیچ مزیتی ندارد علت آن این است که الی رغم افزایش قدرت پمپاژ، ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه کاهش می یابد.

همانطور که قبلا اشاره شد در شکل ۵-۲۳ نانو سیال اکسید آلومینیوم برای غلظت های مختلف در نظر گرفته شده است و تمام نتایج بدست آمده در بخش اول قرار می گیرد و به عبارتی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مطلوبی نشان داده شده است.

همانطور که انتظار می رود برای هر کدام از اندازه نانوذرات با افزایش غلظت ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و در مقابل قدرت پمپاژ نیز افزایش می یابد.



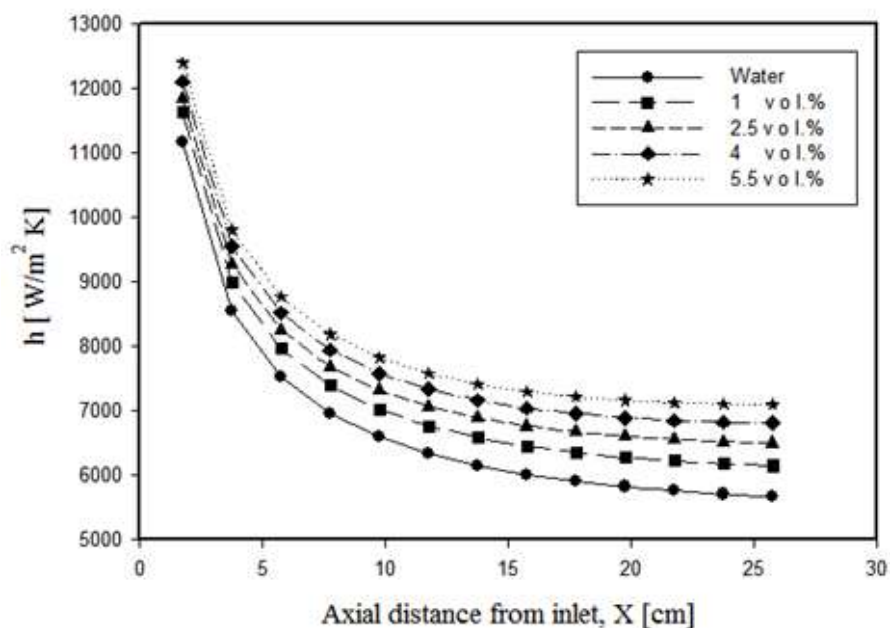
(الف)



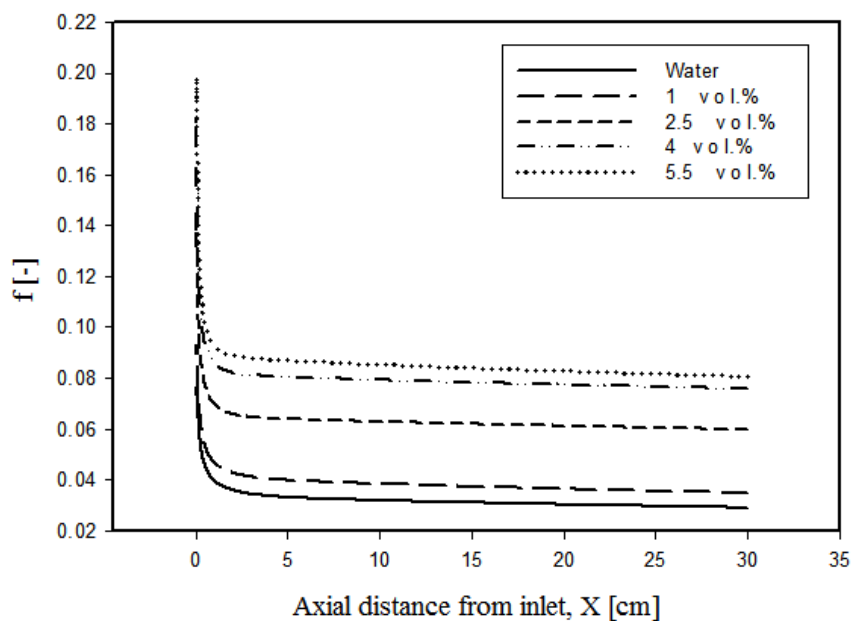
شکل ۵-۲۳- نتایج عددی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی برای نانوذره الف) ۱۳ نانومتر ب) ۶۵ نانومتر

## ۵-۶- توسعه رابطه برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک

مشاهده شده است که عدد ناسلت، عدد رینولدز، عدد پکلت و عدد پرائنتل تابعی از خواص ترموفیزیکی  $(\mu, k, C_p, \rho)$  هستند که بطور قایل توجهی با غلظت نانوذرات تغییر می کند و همچنین ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت نیز تحت تاثیر آنها می باشند. شکل های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ و همچنین شکل های بخش قبل نشان می دهند که هم ضریب انتقال حرارت و هم ضریب اصطکاک با کسر حجمی نانوذرات و اندازه ذرات تغییر می کنند. بنابراین عدد ناسلت باید تابعی از غلظت حجمی نانوذرات و اندازه ذرات باشد. با توجه به موارد ذکر شده یک رابطه جدید برای عدد ناسلت بصورت تابعی از عدد رینولدز، عدد پرائنتل، عدد پکلت و غلظت حجمی نانوذرات توسعه داده می شود.



شکل ۵-۲۴- تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی در طول لوله برای غلظت های حجمی مختلف و قطر ۱۳ نانومتر



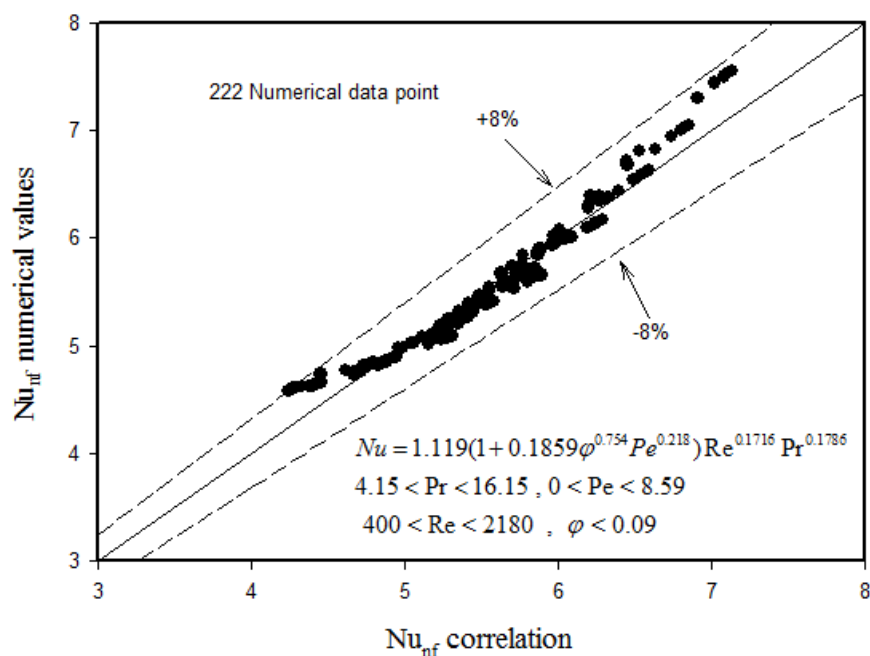
شکل ۵-۲۵- تغییرات ضریب اصطکاک در طول لوله برای غلظت های حجمی مختلف و قطر ۱۳ نانومتر

با استفاده از ۲۲۲ داده که از شبیه سازی عددی در ناحیه توسعه یافتگی هیدرولیکی و در حال توسعه گرمایی بدست آمده است معادله جدید (۹-۵) با کمک برنامه آماری مینی تب<sup>۱</sup> [۱۴۹] توسعه داده شده است. این رابطه بهینه شده رابطه ی پیشنهادی توسط کیانگ و یمین<sup>۲</sup> [۹۲] می باشد که برای تعیین عدد ناسلت نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در میکرو لوله برای محدوده غلظتهای کمتر از ۹٪، اعداد رینولدز بین ۲۱۸۰ و ۴۰۰، اعداد پکلت کوچکتر از ۸/۵۹ و اعداد پرانتل بین ۱۶/۱۵ و ۴/۱۵ معتبر می باشد. در حالتی که غلظت نانوسیال صفر باشد نتایج مربوط به سیال خالص بدست می آید. این معادله تطابق خوبی با داده های عددی دارد و ماکزیمم انحراف آن  $\pm 8\%$  در مقایسه با داده های عددی می باشد که در شکل (۲۶-۵) نشان داده شده است.

$$Nu = 1.119(1 + 0.1859\phi^{0.754} Pe^{0.218}) Re^{0.1716} Pr^{0.1786} \quad (11-5)$$

---

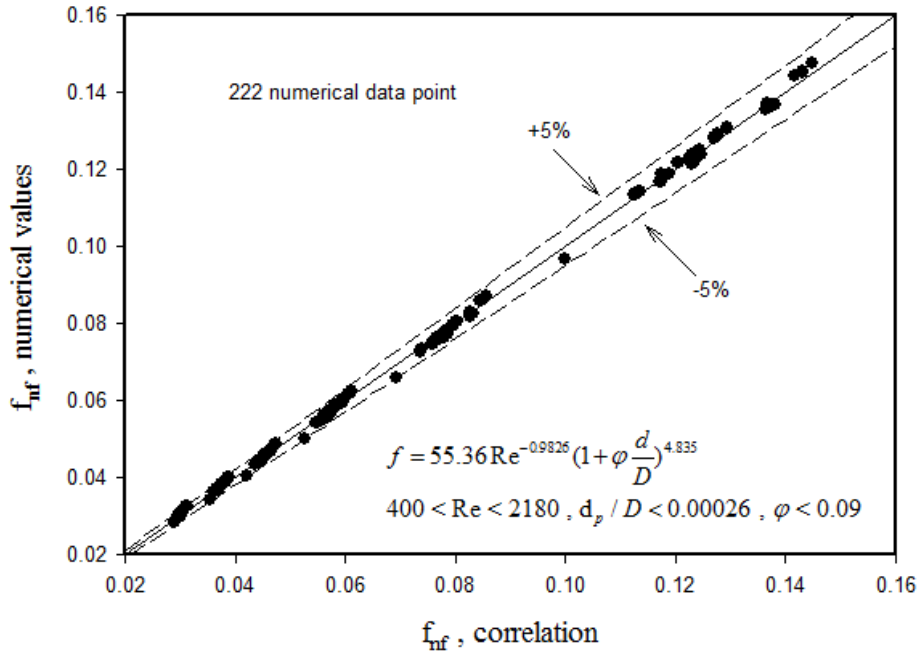
1.Minitab  
2.Qiang & Yimin



شکل ۵-۲۶- مقایسه مقادیر عدد ناسلت حساب شده از رابطه حاضر (معادله ۹-۵) با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی عددی

بطور مشابه رابطه ای برای ضریب اصطکاک در ناحیه توسعه یافته هیدرولیکی، توسعه داده می شود. در این رابطه تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز، کسر حجمی و اندازه نانوذرات در نظر گرفته شده است. در حالتی که غلظت نانوذرات در سیال صفر باشد نتایج مربوط به سیال خالص بدست می آید. این رابطه در معادله (۱۰-۵) ارائه شده است. همچنین بیشترین انحراف نتایج رابطه (۱۰-۵) با داده های عددی  $\pm 5\%$  می باشد که در شکل ۵-۲۷ گزارش شده است. این رابطه برای شرایط  $400 < Re < 2180, d_p / D < 0.0026, \phi < 0.09$  معتبر می باشد.

$$f = 55.36 Re^{-0.9826} \left(1 + \phi \frac{d}{D}\right)^{4.835} \quad (12-5)$$



شکل ۵-۲۷- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حساب شده از رابطه حاضر، معادله (۱۰-۵) با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی عددی

## ۵-۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در میکرو لوله متقارن محوری تحت جریان آرام و بصورت جریان تکفاز مورد مطالعه قرار گرفته است. تمام خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک، حداکثر تا ۹٪ غلظت حجمی و اندازه نانوذرات در محدوده ۱۳ تا ۱۳۰ نانومتر محاسبه شده اند. در این فصل، نتایج حاصل از حل میدان جریان و دما شامل افت فشار، دما، ضریب اصطکاک، ضریب انتقال حرارت، ناسلت موضعی دیواره و ... برای سیال پایه و نانوسیال ارائه شده است. طبق نتایج عددی دو رابطه برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در محدوده غلظت و اندازه نانوذرات ذکر شده، پیشنهاد شده است. در ذیل به گزیده‌های از نتایج حاصل از این حل عددی اشاره شده است.

- پراکندگی نانوذرات در سیال پایه هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال افزایش می دهند. با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و کاهش اندازه ذرات، هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال افزایش می یابد.
- عدد رینولدز، اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال داشته و افزایش عدد رینولدز این ضریب را افزایش می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز که منجر به افزایش انرژی جنبشی جریان میشود، زمان تماس و تبادل حرارت سیال با دیواره کاهش یافته و دمای سیال در مجاورت دیواره نسبت به اعداد رینولدز کمتر در ناحیه در حال توسعه حرارتی کاهش می یابد. با کاهش دمای سیال مجاور دیواره، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یافته و عدد ناسلت در ناحیه در حال توسعه حرارتی افزایش می یابد.
- در یک عدد رینولدز ثابت، عدد ناسلت نانوسیال بیشتر از سیال پایه است. جریان نانوسیال به دلیل بیشتر بودن ویسکوزیته آن نسبت به جریان سیال پایه، دارای انرژی جنبشی بیشتری میباشد که این امر باعث میشود دمای نانوسیال در مجاورت دیواره نسبت به جریان سیال پایه کمتر شده و ضریب انتقال حرارت جابجایی در جریان نانوسیال بیشتر از جریان سیال پایه شود. با بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان نانوسیال نسبت به جریان سیال پایه، عدد ناسلت در جریان نانوسیال بیشتر از جریان سیال پایه می شود.
- افزایش غلظت و کاهش اندازه نانو ذرات موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت نانوسیال می‌شود. عدد ناسلت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برای غلظت ۵/۵ درصد با کاهش اندازه نانوذره از ۹۰ به ۱۳ نانومتر در حدود ۴۸٪ افزایش می یابد.
- افت فشار جریان نانوسیال بیشتر از جریان سیال پایه می باشد. به دلیل بیشتر بودن ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه، در یک عدد رینولدز ثابت سرعت جریان نانوسیال در ورودی لوله



بیشتر از جریان سیال پایه می باشد. در نتیجه افت فشار جریان سیال پایه کمتر از جریان نانوسیال می باشد. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات افت فشار در نانوسیال افزایش می یابد.

- عملکرد حرارتی - هیدرولیکی نانوسیال نسبت به ضریب انتقال حرارت و قدرت پمپاژ در شریط یکسان ارزیابی شده است. با افزایش غلظت حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت و قدرت پمپاژ نانوسیال افزایش می یابد.

## ۵-۸- پیشنهادات

- در حال حاضر تفاوت‌های چشمگیری در نتایج آزمایش‌های مربوط به ضریب هدایت گرمایی در نانوسیالات وجود دارد. در نتیجه، این تفاوت‌ها در مطالعات تئوریک نیز مشاهده می‌شود و نتایج حاصل از روابط و مدل‌های مختلف پیشنهادی برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات دارای تفاوت‌های آشکاری با یکدیگر هستند. برای کاربردی شدن نانوسیالات و میکروکانال‌ها در تجهیزات و صنایع حرارتی و برودتی، نیاز به تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی وسیع‌تر و دقیق‌تر است.

- بسط و توسعه مدل‌های تئوریک جدیدی که بتواند ترکیبی از اثرات پارامترهای مختلف (نظیر هندسه جریان، اندازه نانوذرات، سیال مورد استفاده و ...) که بر ضریب هدایت گرمایی، ضریب جابه‌جایی گرمایی و عدد ناسلت برای مواد مختلف نانوذره اثر می‌گذارد را در کنار یکدیگر در نظر بگیرد و تطابق نزدیکی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

- بسط و توسعه مدل‌های تئوریک جدید در جریان آشفته که بتواند ترکیبی از اثرات پارامترهای مختلف (نظیر هندسه جریان، اندازه نانوذرات، سیال مورد استفاده و ...) که بر ضریب هدایت

گرمایی، ضریب جابه‌جایی گرمایی و عدد ناسلت برای مواد مختلف نانوذره اثر می‌گذارد را در کنار

یکدیگر در نظر بگیرد و تطابق نزدیکی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

● حل عددی نانوسیال بصورت دوفازی و مقایسه نتایج آن با نتایج حل تک فاز و نتایج آزمایشگاهی.

- [1] Bergles A. E., "The implication and challenges of enhanced heat transfer for the chemical process industries", *ICHEME*, Vol 79, 2001, pp 437-444.
- [2] Mitrofanova, O. V., "Hydrodynamics and Heat Transfer in Swirling Flows in Channels with Swirlers (Analytical Review)", *High Temp*, Vol 41, 2003, pp 518-559.
- [3] J. C. Maxwell, "Treatise on Electricity and Magnetism", 2th edition Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
- [4] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles)", *Netsu Bussei (Japan)*, Vol. 4, No.4, pp. 227-33, 1993.
- [5] S. U. S. Choi, Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, D. A. Siginer, and H. P. Wang, eds., *The American Society of Mechanical Engineers, New York*, FED-Vol. 231 / MD-Vol.66, pp. 99-105, 1995.
- [6] Prakash, M., Giannelis, E. P., Mechanism of Heat Transport in Nanofluids, *Journal of Computer-Aided Material Design* 14 (2007) 109-117.
- [7] Karthikeyan, N. R., Philip, J., Raj, B., Effect of Clustering on the Thermal Conductivity of Nanofluids, *Materials Chemistry and Physics* 109 ( 2008 ) 50-55.
- [8] Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (1999) 474-480.
- [9] Changwei Pang, Jae Won Lee, Yong Tae Kang , Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 87 (2015) 49e67.
- [10] Jang, S. P., Choi, S. U. S., Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity, *ASME Journal of Heat Transfer* 129 (2007) 617-623.
- [11] Jang, S. P., Choi, S. U. S., Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal conductivity of Nanofluids, *Applied Physics Letters*. 84 (2004) 4316-4318.
- [12] Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. S., Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Conductivity Enhancement, *Applied Physics Letters* 87 (2005) 153107.
- [13] Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model or the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids, *ASME Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 588-595.
- [14] Jang, S.P. and Choi, S.U.S., Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, *Applied Physics Letters*, Vol. 84, pp. 4316-4318, 2004.

- [15] Xie, H., Wang, J., Xi, T., and Ai, F., Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles, *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 4568–4572, 2002.
- [16] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., Anomalously Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, vol. 78, pp. 718–720, 2001.
- [17] Hong, T.-K., Yang, H.-S., and Choi, C. J., Study of the Enhanced Thermal Conductivity of Fe Nanofluids, *Journal of Applied Physics*, vol. 97, Paper 064311, 4 pp., 2005.
- [18] Hong, K. S., Hong, T.-K., and Yang, H.-S., Thermal Conductivity of Fe Nanofluids Depending on the Cluster Size of Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, vol. 88, Paper 031901, 3 pp., 2006.
- [19] Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. S., Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Conductivity Enhancement, *Applied Physics Letters* 87 (2005) 153107.
- [20] Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model or the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids, *ASME Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 588-595.
- [21] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *J. Heat Transfer* 125 (2003) 567–574.
- [22] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *ASME J. Heat Transfer* 121 (1999) 280–289.
- [23] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), *Netsu Bussei* 4 (1993) 227–233.
- [24] X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticles–fluid mixture, *J. Thermophys. Heat Transfer* 13 (1999) 474–480.
- [25] H.A. Minsta, G. Roy, C.T. Nguyen, D. Doucet, New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.* 48 (2009) 363–371.
- [26] G. Roy, C.T. Nguyen, P.-R. Lajoie, Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids, *Superlatt. Microstruct.* 35 (2004) 497–511.
- [27] L.S. Sundar, K.V. Sharma, Experimental determination of thermal conductivity of fluid containing oxide nanoparticles, *Int. J. Dynam. Fluids* 4 (2008) 57–69.
- [28] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer* 11 (1999) 151–170.
- [29] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.* 47 (2008) 560–568.

- [30] Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements, *Heat Transfer Engineering* 29 (2008) 432-460.
- [31] Xie, H., Wang, J., Xi, T., and Liu, Y., Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles, *International Journal of Thermophysics*, vol. 23, pp. 571–580, 2002.
- [32] Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., and Ai, F., Dependence of the Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture on the Base Fluid, *Journal of Materials Science Letters*, vol. 21, pp. 1469–1471, 2002.
- [33] Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K., Dutta, P., Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity, *Physical Review Letters* 82 (1999) 2326-2329.
- [34] Ren, Y., Xie, H., Cai, A., Effective Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles, *Journal of Physics D: Applied Physics* 38 (2005) 3958-3961.
- [35] Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., and Eastman, J. A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 855–863.
- [36] Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. S., Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Conductivity Enhancement, *Applied Physics Letters* 87 (2005) 153107.
- [37] Tuckerman, D.B., Pease, R.F./ High performance heat sinking for VLSI/*IEEE Electron Dev. Letts. EDL/* 1981/ p 126–129.
- [38] Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., Ahah, R.K./ Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design/ *Appl. Mech/* 2000,p 175–193.
- [39] Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M.R./ *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels/* Elsevier/Amsterdam, 2006.
- [40] Palm, B./ Proceedings of Heat Transfer and Transport Phenomena in Microchannel/Heat Transfer in Microchannel, Begell House Inc, Banff/ Canada, 2000.
- [41] Nguyen, N.T., Wereley, S.T./ *Fundamentals and Applications of Microfluidics/* Artech House/Boston/ 2002.
- [42] Kukowski, R., /*MDT- Micro deformation Technology/* ASME IMECE/ Washington D.C/ 2003.
- [43] A. Ramiar, “Flow and heat transfer simulation of nanofluids in microchannel”, PhD Thesis, Babol University of Technology, June 2011.
- [44] G. L. Morini, “Scaling Effects for Liquid Flows in Microchannels”, *Taylor and Francis* 27(2006) 64-73.

- [45] Akbarinia A., Abdolzadeh M., Laur R., “Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in micro channels with slip and non-slip flow regimes”, *Applied Therm. En*, Vol 31, 2011, pp 556-565.
- [46] Wang L., Liu F., “Forced convection in slightly curved microchannels”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 50, 2007, pp 881–896.
- [47] Tuckerman, D.B., Pease, R.F./High performance heat sinking for VLSI/ *IEEE Electron. Dev.Letts.* EDL-2/1981/p 126–129.
- [48] Wu, P.Y., Little, W.A. /Measurement of friction factor for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule Thompson refrigerators/ *Cryogenics*/ 1983/ p 273–277.
- [49] R.K. Shah, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*, Academic Press, New York, 1978.
- [50] R.K. Shah, Thermal entry length solutions for the circular tube and parallel plates, in: Proc. Third Natl. Heat Mass Transfer Conf. 1: HMT-11-75, 1975.
- [51] Adams, T.M., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, M., Qureshi, Z.H./An experimental investigation of singlephase forced convection in microchannels /*Int. J. Heat Mass Transf*/1997 /p 851–857.
- [52] Gnielinski, V./New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow/*Int.Chem. Eng*/1976/p 359–368.
- [53] Ozerinc, S., Kakac, S., Yazicioglu, A.G./ Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-the-Art Review/ *Microfluid. Nanofluid*/ 2010/ p 145-170.
- [54] Maxwell, J.C./ *A Treatise on Electricity and Magnetism*/ Clarendon Press/ Oxford/ 1873.
- [55] Hamilton, R.L., Crosser, O.K. /Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems/ *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*/ 1962/p 187-191.
- [56] Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E., Prasher, R.S. /Brownian Dynamics Simulation to Determine the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids/ *Journal of Applied Physics*/ 2004/p 6492-6494.
- [57] Koo, J., Kleinstreuer, C. /A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids/ *Journal of Nanoparticle Research*/ 2004/ p 577-588.
- [58] Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S. /Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Conductivity Enhancement/ *Applied Physics Letters*/2005.
- [59] Evans, W., Fish, J., Keblinski, P. /Role of Brownian Motion Hydrodynamics on Nanofluid Thermal Conductivity/ *Applied Physics Letters*/ 2006/ 093116-3.
- [60] Bruggeman, D.A.G. /The Calculation of Various Physical Constants of Heterogeneous Substances. I, The Dielectric Constants and Conductivities of Mixtures Composed of Isotropic Substances/ *Annals of Physics*/ 1935/ p 636-664.

- [61] Nan, C., Birringer, R., Clarke, D.R., Gleiter, H., /Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with Interfacial Thermal Resistance/ *Journal of Applied Physics*/ 1997/p 6692-6699.
- [62] Prasher, R., Phelan, P.E., Bhattacharya, P. /Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid)/ *Nano Letters*/ 2006/ p 1529-1534.
- [63] Xuan, Y., Li, Q., Hu, W. /Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids/ *American Institute of Chemical Engineers Journal*/2003/ pp 1038-1043.
- [64] Li, Q., Xuan, Y. /Experimental Investigation on Transport Properties of Nanofluids/ *Heat Transfer Science and Technology* 2000, B. Wang, ed, Higher Education Press, Beijing/ 2000/ p 757–762.
- [65] Li, Y., Qu, W., Feng, J. /Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids/ *Chinese Physics Letters*/2008/ p 3319-3322.
- [66] Einstein, A., "A New Determination of the Molecular Dimensions/, *Annals of Physics*/ 1906/ p 289-306.
- [67] Brinkman, H.C./ The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions/ *Journal of Chemical Physics*/ 1952/ p 571.
- [68] Batchelor, G.K. /The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles/ *Journal of Fluid Mechanics*/ 1977/ pp 97-117.
- [69] Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., and Angue Mintsa, H. /Temperature and Particle-Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluids - Hysteresis Phenomenon/ *International Journal of Heat and Fluid Flow*/ 2007/ p 1492-1506.
- [70] Tseng, W.J., Lin, K./ Rheology and Colloidal Structure of Aqueous TiO<sub>2</sub>Nanoparticle Suspensions/ *Materials Science and Engineering*/2003/ p 186-192.
- [71] Maiga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G. /Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube/ *Superlattices and Microstructures*/2004/ p 543-557.
- [72] Kulkarni, D.P., Das, D.K., Chukwu, G.A. /Temperature Dependent Rheological Property of Copper Oxide Nanoparticles Suspension (Nanofluid)/ *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*/ 2006/ p 1150-1154.
- [73] Masoumi, N., Sohrabi, N., and Behzadmehr, A., A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 5, pp. 0555011–0555016, 2009.
- [74] Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 789–793, 2011.

- [75] C. P. Tso, S. P. Mahulikar, “The use of the Brinkman number for single phase forced convective heat transfer in microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 12, pp. 1759–1769, 1998.
- [76] C. P. Tso and S. P. Mahulikar, “Experimental verification of the role of Brinkman number in microchannels using local parameters”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1837–1849, 2000.
- [77] J. Koo, C. Kleinstreuer, “Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3159–3169, 2004.
- [78] J. Koo, Computational Nanofluid Flow and Heat Transfer Analyses Applied to Micro-systems, PhD thesis, North Carolina State University, 2005.
- [79] G. L. Morini and M. Spiga, “The Role of the Viscous Dissipation in Heated Microchannels”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 308–318, 2007.
- [80] Y. M. Hung, “Viscous Dissipation Effect on Entropy Generation for Non-Newtonian Fluids in Microchannels”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 1125–1129, 2008.
- [81] Y. M. Hung, “A Comparative Study of Viscous Dissipation Effect on Entropy Generation in Single-phase Liquid Flow in Microchannels”, *International Journal of Thermal Science*, vol. 48, pp. 1026–1035, 2009.
- [82] B. Cetin, A. G. Yazicioglu and S. Kakac, “Slip-flow heat transfer in microtubes with axial conduction and viscous dissipation – An extended Graetz problem”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1673–1678, 2009.
- [83] O. Mokrani, B. Bourouga, C. Castelain and H. Peerhossaini, “Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1337–1352, 2009.
- [84] J. Koo and C. Kleinstreuer, “Liquid flow in microchannels: experimental observations and computational analyses of microfluidics effects”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 568–579, 2003.
- [85] C. Kleinstreuer, Two-phase Flow—Theory and Applications, New York: Taylor and Francis, 2003.
- [86] G. L. Morini, “Single-phase convective heat transfer in micro-channels: overview of experimental results”, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 43, pp. 631–651, 2004.
- [87] T. Harirchian, S.V. Garimella, “Flow regime-based modeling of heat transfer and pressure drop in microchannel flow boiling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 1246–1260, 2012.
- [88] A. Rezanian, L.A. Rosendahl, “Thermal effect of a thermoelectric generator on parallel microchannel heat sink”, *Energy*, Vol. 37, pp. 220–227, 2012.
- [89] A. Sur, D. Liu, “Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 53, pp. 18–34, 2012.



- [90] Y. Xuan, W. Roetzel, “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701–7, 2000.
- [91] Y. Xuan and Q. Li, “Heat Transfer Enhancement of Nanofluids”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [92] Y. Xuan and Q. Li, “Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids”, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [93] C. T. Nguyen, G. Roy, S. E. B. Maiga, P. R. Lajoie, “Heat transfer enhancement by using nanofluids for cooling of high output microprocessor”, 2004. [http://www.electronics-cooling.com/html/2004\\_nov\\_techbrief.html](http://www.electronics-cooling.com/html/2004_nov_techbrief.html).
- [94] D. Wen, Y. and Ding, “Effect of particle migration on heat transfer in suspensions of nanoparticles flowing through minichannels”, *Microfluid Nanofluid*, Vol. 1, pp. 183–189, 2005.
- [95] Y. Ding, H. Chen, Y. He, A. Lapkin, M. Yeganeh, L. Silver and Y. V. Butenko, “Forced convective heat transfer of nanofluids”, *Advanced Powder Technol.*, Vol. 18, No. 6, pp. 813–824, 2007.
- [96] S. Z. Heris, M. N. Esfahany, and G. Etemad, “Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube”, *Numerical Heat Transfer: Part A*, Vol. 52, pp. 1043–1058, 2007.
- [97] S. Mirmasoumi and A. Behzadmehr, “Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 717–727, 2008.
- [98] R. S. Vajjha, D. K. Das and P. K. Namburu, “Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, pp. 613–621, 2010.
- [99] S. Z. Heris, S. H. Noie, E. Talaii and J. Sargolzaei, “Numerical investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid laminar convective heat transfer through triangular ducts”, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp.179, 2011.
- [100] M. Akbari, N. Galanis and A. Behzadmehr, “Comparative analysis of single and two-phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 8, pp. 1343-1354, 2011.
- [101] V. Bianco, S. Nardini and O. Manca, “Enhancement of heat transfer and entropy generation analysis of nanofluids turbulent convection flow in square section tubes”, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, Article No. 252, 2011.
- [102] S. P. Jang and S. U. S. choi, “Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids, applied thermal engineering”, Vol. 26, pp. 2457-2463, 2006.
- [103] J. Koo and C. Kleinstreuer, “Laminar Nanofluid Flow in Microheat-Sinks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 2652-2661, 2005.

- [104] R. Chein and G. Huang, “Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25 , pp. 3104–3114, 2005.
- [105] T. H. Tsai and R. Chein, “Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1013–1026, 2007.
- [106] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, J. Harting, “Eulerian–Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 1, pp. 107-116, 2011.
- [107] A. Raisi, B. Ghasemi, S. M. Aminossadati, “A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 59, No. 2, pp. 114 – 129, 2011.
- [108] H. Aminfar and R. Maroofiazar , “A numerical study of the hydro-thermal behaviour of nanofluids in rectangular microchannels using a mixture model, Part C: *Journal of Mechanical Engineers*”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Science, Proc. IMechE Vol. 225 Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 791-798, 2011.
- [109] D. Lelea, “The performance evaluation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 17-18, pp. 3891-3899, 2011.
- [110] T. C. Hung, W.M. Yan, X.D. Wang, C.Y. Chang, “Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 2559–2570, 2012.
- [111] Behi, M., & Mirmohammadi, S. A. (2012). Investigation on Thermal Conductivity, Viscosity and Stability of Nanofluids.
- [112] E. Mat Tokit, H.A. Mohammed, M.Z. Yusoff, “Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1595–1604, 2012.
- [113] Li J., Kleinstreuer C., “Thermal Performance of Nanofluid Flow in Microchannels”, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, no. 4, pp. 1221–1232, 2008.
- [114] Chein R., Chuang J., “Experimental Microchannel Heat Sink Performance Studies using Nanofluids”, *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 46, no. 1, pp. 57–66, 2007.
- [115] Jung, J. Y., Oh, H. S., Kwak, H. Y., “Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in Microchannels”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, nos. 1–2, pp. 466–472, 2009.
- [116] Ho, C. J., Wei, L. C., Li, Z. W., “An Experimental Investigation of Forced Convective Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluid”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 30, nos. 2–3, pp. 96–103, 2010.

- [117] Bhattacharya P., Samanta, A. N., Chakraborty S., “Numerical Study of Conjugate Heat Transfer in Rectangular Microchannel Heat Sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Nanofluid”, *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, no. 10, pp. 1323–1333, 2009.
- [118] Sheikhzadeh, G. A., Ebrahim Qomi, M., Hajialigol N., Fattahi A., “Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid on heat transfer and pressure drop in a three-dimensional microchannel”, *Int. J. Nano Dimens*, Vol 3(4), 2013, pp 281-288, Spring 2013.
- [119] Jung, J. -Y., Oh, H. S., Kwak, H. Y., “Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 52, 2009, pp 466-472.
- [120] Lelea D., “The performance evaluation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 54, 2011, pp 3891–3899.
- [121] Incropera, F.P., Dewitt, D.P./ *Fundamentals of heat and mass transfer*/ John Wiley & sons/ New York/ 1996.
- [122] Tam LM, Ghajar AJ. Transitional heat transfer in plain horizontal tubes. *Heat Transfer Engineering* 2006;27:23–38.
- [123] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International Chemical Engineering* 1976;16:359–68.
- [124] Moody LF. Friction factors for pipe flow. *Transactions on ASME* 1944;66: 671–84.
- [125] Blasius H. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung (German). *Z.Math. Phys* 1908;56:1–37.
- [126] Petukhov BS. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. In: Hartnett JP, Irvine TF, editors. *Advances in Heat Transfer*. New York: Academic Press; 1970. p. 504–64.
- [127] Filonenko GK. Hydraulic resistance in pipes. *Teploenergetika* 1954;1:40–4 (Russia).
- [128] Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G./heat transfer properties of nanoparticle in fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow/ *Int. J. Heat Mass Transfer*/ 2005/p 1107.
- [129] Wen, D., Ding, Y./Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at entrance region under laminar flow conditions/*Int. J. Heat Mass Transfer*/ 2004/p 5181.
- [130] Li, Q., Xung, Y./Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid/*Science in China, Series E*/ 2002/ p 408.
- [131] Maiga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G., Galanis, N./Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows/ *Int.J. Heat Fluid*/ 2005/ p 530.
- [132] Zhang H, Shao S, Xu H, Tian C. Heat transfer and flow features of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids flowing through a circular microchannel – experimental results and correlations, *Appl Therm Eng* 61 (2013) 86-92.

- [133] Azizi, Z, Alamdari, A., Malayeri, M.R., Thermal performance and friction factor of a cylindrical microchannel heat sink cooled by Cu-water nanofluid, *Appl Therm Eng* 99 (2016) 970-978.
- [134] Yang Y, Zhang ZG, Grulke EA, Anderson WB, Wu G. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005;48:1107–16.
- [135] Suresh S, Venkitaraj KP, Selvakumar P, Chandrasekar M. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2012;38:54–60.
- [136] Rea U, McKrell T, Hu LW, Buongiorno J. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009;52:2042–8.
- [137] Duangthongsuk W, Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010;53:334–44.
- [138] Maiga SEB, Nguyen CT, Galanis N, Roy G, Mare ´ T, Coqueux M. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle suspension. *International Journal Numerical Methods Heat Fluid Flow* 2006;16:275–92.
- [139] Sajadi AR, Kazemi MH. Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO<sub>2</sub>/water nanofluid in circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2011;38:1474–8.
- [140] Sundar LS, Naik MT, Sharma KV, Singh MK, Siva Reddy TCh. Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2012;37:65–71.
- [141] Vajjha RS, Das DK, Kulkarni DP. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010;53:4607–18.
- [142] Suresh S, Chandrasekar M, Sekhar SC. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under turbulent flow in a helically dimpled tube. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2011;35:542–9.
- [143] Sundar LS, Manoj KS. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 23–35.
- [144] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, A. Frijns, A. Darhuber, J. Harting, “Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 36, pp. 260-268, 2012.
- [145] Savithiri S, Pattamatta A, Das SK. Scaling analysis for the investigation of slip mechanisms in nanofluids. *Nanoscale Research Letters* 2011, 6:471.

- [146] Pak, B.C., Cho, Y.I./ Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles/ *Exp. Heat Transfer*/ 1998/ p 151-170.
- [147] Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 789–793, 2011.
- [148] Khanafer, K., Vafai, K./ A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids/ *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 4410–4428.
- [149] Minitab 16 Statistical Software, [Computer software], Minitab, Inc. (www.minitab.com), State College, PA, 2013.
- [150] G.S. McNab, A. Meisen, Thermophoresis in liquids, *J. Colloid Interface Sci.* 44 (1973) 339–346.



## **Abstract**

Increases in heat transfer and energy efficiency due to limited natural resources and reduction in the costs of them, always has been one of the most fundamental concerns for Engineers and Scientists. This case, particularly in fluids because of their low thermal conductivity, has great importance. In recent years, one of the main ways to achieve that attention has been paid to adding solid particles with high thermal conductivity at the nanoscale.

Research in the heat transfer of fluid suspensions of solid particles in the nanometer dimensions of the base fluid in recent decades has begun. Recent research in nanofluids has shown that nanoparticles cause a significant increase in suspension heat transfer. Another way to improve the thermal performance of conventional devices is the usage of milli and micro channels.

Fluids have low thermal conductivity rather than solids, so by adding solid particles the thermal conductivity increases. On the other hand, by adding nanoparticles the dynamic viscosity of the fluid increases, and this is followed by higher power and energy consumption for our pumps. In this survey, the flow and heat transfer of nanofluids (water - aluminum oxide) in micro-tube axial symmetrical laminar flow is numerically studied. Aluminum oxide spherical particles with diameters of 13, 40, 65, 90, 115 and 130 nm are suspended in liquid water. Nanofluids with volumetric concentrations of 1, 5.2, 4, 5.5, 7, 9% are used to investigate the effect of volume fraction on the thermal conductivity and dynamic viscosity.

The relations used for density, viscosity, specific heat and heat transfer coefficient of nanofluids have been considered as a function of the volume concentration, particle size and temperature in this study. First, the numerical results with experimental results for friction coefficient and Nusselt number in micro tubes have been validated.

With increasing temperature and decreasing volume fraction, nano-fluid dynamic viscosity is reduced. Also, with increasing temperature and volume fraction of nano-fluid, thermal conductivity is increased compared with the base fluid. Increasing thermal conductivity is higher in low volume fractions. As temperatures rise, the link between molecular and thermal capability becomes more complex, while also viscosity decreases.

For same Reynolds, nanofluid results have been shown that with increasing nano particle volume concentration , the heat transfer and friction coefficient increased. Also under the same pumping power nanofluids heat transfer coefficient higher than the base fluid. Finally, two new relations to determine heat transfer coefficient and the friction coefficient for the nanofluids in micro tubes are obtained. In all studies of numerical analysis, software package FLUENT finite volume was used.

**Key words:** numerical simulation, laminar flow, nano-fluid, friction coefficient, Nusselt number





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**Development of correlations to calculate the  
Nusselt number and friction factor under  
laminar flow condition for Nanofluids  
in a microtube**

**By: Mohammad shakorian poor**

Supervisor:

**Dr. Mahmood Farzaneh-Gord**

Advisor:

**Dr. Mohammadreza Behi**

**June 2017**