



دانشکده مکانیک رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

پایاننامه کارشناسی ارشد

بررسی اثرات تزریق و مکش بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال مستطیلی با انبساط ناگهانی

نگارنده: **محمّد نصیری**

استاد راهنما **دکتر محسن شاهمردان**

استاد مشاور **دکتر محسن نظری**

تیر ۱۳۹۵

شمارہ: تاریخ:	بسمه تعالى	ſÐ
ويرايش:		مديريت تحصيلات تكميلى

فرم شماره ۷: صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانیم-/ آقای محمد نصیری به شماره دانشجویی ۹۲۱۴۴۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی اثرات تزریق و مکش بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال مستطیلی با انبساط **ناگهانی** که در تاریخ ۹۵/۴/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

مردود 🗌	دفاع مجدد 🗌	و بمتياز ٩ ٩٩) كم	قبول (با درجه : حمل
		عملی 🗌	نوع تحقیق: نظری 🗌

۲_ بسیار خوب (۱۸/۹۹ _ ۱۸)	۱_ عالی (۲۰ _ ۱۹)
۴_ قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)	٣_ خوب (١٧/٩٩ _١٢)
	٥- نمره كمتر ا: ١۴ غير قابل قبول

قبول	قابل	غير	14	;1	كمتر	۵- نمره	
	· · ·	-		-	-	1	

امضاء م	مرتبة علمى	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
ف مردان	دانشيار	دکتر محمد محسن شاهمردان	۱_ استادراهنمای اول
			۲ – استادراهنمای دوم
20	دانشيار	دکتر محسن نظری	۳- استاد مشاور
Y	مربى	مهندس احمد مددی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی ۴
H	استاد	دکنر محمد حسن کیهانی	۵- استاد ممتحن اول
A	دانشيار	دکتر محمود نوروزی	۶ استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاهمردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: Ubr.C

۶

ساسكزارى

یدون شک جایگاه و منرلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحات بی شأیه ی او، با زبان قاصرو دس ناتوان، چنړی ښکاريم. امااز آنجایی که تحلیل از معلم، سپاس از انسانی است که مدوف وغایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت مایی راکه به دستش سرده اند، تضمين؛ برحب وظيفه وازماب "من لم يشكر المنعم من المحلوقين لم يشكر التَّه يحرُّو جلَّ": از مدر و ماد عزیزم ، این دو معلم بزر کوارم ، که بمواره بر کوتا ہی و در شتی من ، قلم عفو کشیدہ و کریانہ از کنار غفلت ، یم کذشة اندو در تام عرصه ، ی زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند ؛ وازاماتیدارحمندو ثابیة؛ جناب آ قای **دکترمحن شاه مردان و دکترمحن نظری** که در کال سعه صدر، باحن خلق و فروتنی، از ، پیچ کمی در این عرصه بر من دیغ ننمودند و زحمت را منایی این پایان نامه را بر عهده کرفتند ؛ کحال منگر و قدردانی را دارم باشدکه این خردترین، بخشی از زحات آنان راساس کوید.

تقديم مامه

... تقدیم به عربزترین کا

يررومادرم * به جسران قطره ای از دریای محبشان.

تعهد نامه

اینجانب محمد نصیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه بررسی اثرات تزریق و مکش بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال مستطیلی با انبساط ناگهانی تحت راهنمائی دکتر محسن شاهمردان متعهد می شوم .

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

تا*ر*يخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

امروزه با توجه به رشد سريع استفاده از ميكروكانالها از جمله ميكروكانال انبساطي در صنايع مختلف، بررسی جریان و انتقال حرارت در انها، مسالهی مهمی میباشد. در این تحقیق به بررسی عددی جریان و انتقال حرارت برای نانوسیال مس-آب در میکروکانال انبساط ناگهانی، با استفاده از مدل دوفازی اویلری-اویلری پرداخته شده است. در این مدل بر خلاف مدل های دیگر که اختلاف دما و سرعت فازها را در نظر نمی گیرند، سرعت و دمای نسبی بین فازها و توزیع حجمی نانوذرات در نظر گرفته می شود، که این مدل را نسبت به مدل تکفاز کاراتر می نماید. در این مطالعه تاثیر درصد حجمی ذرات جامد، ضریب انبساط کانال، قطر ذرات و همچنین تزریق و مکش از دیوارهی عمودی، بر پدیدهی شاخهای شدن و همچنین انتقال حرارت در میکروکانال انبساط ناگهانی با دیوارههای ایزوترم بررسی شده است. با حل جریان و انتقال حرارت نانوسیال توسط مدل دو فازی اویلری – اویلری، مشاهده می شود که استفاده از نانوسیال علاوه بر بهبود انتقال حرارت، باعث می شود که تقارن جریان نسبت به آب خالص در رینولدز بالاتری بهم بخورد. به طور مثال افزودن ۳ درصد حجمی از نانوذرات مس به آب، سبب افزایش رینولدز بحرانی از ۱۱۰ به ۲۶۵ می شود. بررسی مسئله در میکروکانال ها با ضریب انبساط های مختلف نشان میدهد که با کاهش ضریب انبساط رینولدز بحرانی افزایش یافته و جریان تقارن خود را دیرتر از دست میدهد. همچنین، با ثابت نگه داشتن پارامتر های مختلف، تاثیر اندازهی ذرات بر جریان بررسی شده است که مزیت این مدل را نسبت به سایر مدلها نشان میدهد. زیرا برای مثال در مدل تکفاز اندازهی ذرات هیچ تاثیری بر جریان نمی گذارد اما در تحقیق حاضر به این نتیجه رسیده شد، که زمانی که درصد حجمی نانوسیال از ۲ درصد بیشتر باشد، اندازهی ذرات بر روی جریان تاثیر گذار میشوند و با افزایش اندازهی ذرات، رینولدز بحرانی افزایش یافته و جریان دیرتر تقارن خود را از دست میدهد.

با در نظر گرفتن نسبت انبساط ۱:۳ و همچنین قطر ذرات برابر با ۱۰۰ نانومتر، جریان و انتقال حرارت تحت تاثیر نفوذ و مکش بررسی شد. این تحقیق نشان داد نفوذ از دیواره با کوچک کردن اندازهی گردابهها و دور کردن فاصلهی تشکیل آنها از دیواره، به پایداری جریان کمک میکند و هر چه سرعت نفوذ بیشتر باشد جریان تقارن خود را دیرتر از دست میدهد. دقیقا بر خلاف نفوذ، مکش از دیواره سبب سرعت تنها ۲٪ سرعت ورودی سبب کاهش رینولدز بحرانی در درصد حجمی ۴ درصد از ۳۳۶ به ۳۰۷ می گردد. همچنین نشان داده شد که نفوذ نانوسیال از دیواره با دمای پایین، در بهبود انتقال حرارت موثر می باشد اما با افزایش دمای نانوسیال این تاثیر کاهش یافته و حتی زمانی که دمای نفوذ نانوسیال، برابر با دمای دیواره باشد، نتیجه معکوس می گردد.

واژگان کلیدی: میکروکانال، نانوسیال، میکروکانال انبساط ناگهانی، شاخهای شدن، رینولدز بحرانی، تزریق و مکش، ناسلت، انتقال حرارت.

۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱–۱– مقدمه
۳	۱-۲- میکروکانالها
۳	۱-۲-۱ چکیده
۳	۱-۲-۲ تاريخچه ميکروکانالها
۴	۱-۲-۳ معرفی میکروکانالها
مینی کانالها۵	۱-۲-۱ طبقهبندی میکروکانالها و
نانالها۶	۱-۲-۵ مزایا و چالشهای میکروک
γ	۱-۲-۶ روشهای ساخت
۱۰	۱-۲-۱ کاربردهای میکروکانالها
11	۱–۳- نانوسیال
11	۱–۳–۱ مفهوم نانوسيالات
۱۴	۱-۳-۲ مزایای نهان نانوسیال
۱۶	۱ – ۳ ۳ تهیه نانوسیال
بالات۱۸	۱-۳-۴ خواص ترموفیزیکی نانوسی
٢۶	۱-۳-۵ فناوری نانو۱
٢٧	۱-۳-۶ تولید نانوذرات
در نانوسيالات۳۰	۱-۳-۲ انتقال حرارت جابهجایی د
٣٧	۱–۳–۸ کاربرد نانوسیالات

۳۹	فصل ۲ مروری بر کارهای گذشته
۴۰	۲-۱- مقدمه
۴۰	۲-۲- مروری بر کار های گذشته
۴۲	۲-۲-۱ هدایت حرارتی نانوسیال۱
44	۲-۲-۲ جریان و انتقال حرارت در نانوسیال
۴۸	۲-۲-۳ جریان در میکروکانالهای انبساطی
۴۹	۲-۳- تعريف مساله
۴۹	۲-۴- اهداف تحقیق
۵۰	۲-۵- جنبه های نوآوری تحقیق
۵۱	۲-۶- طرح کلی پایان نامه
۵۳	فصل ۳ مدلسازی و روش حل عددی
۵۴	۲–۱– مقدمه
۵۴	۲-۲- تشریح مسئله
۵۵	۳-۳- هندسه مسئله
۵۶	۴-۳- معادلات حاکم
۵۶	۳-۴-۲ معادله پيوستگي
۵۷	۳-۵- معادله مومنتوم
۵۸	۳-۵-۱ معادله انرژی۰
۶۰	۳-۶- شرایط مرزی
۶۲	۳-۷- روش گسسته سازی حجم محدود

۶۳	۳-۸- حل معادله جریان
۶۴	۳-۹- الگوی سیمپل
۶۵	۳-۹-۱ الگوريتم حل سيمپلوالگوريتم حل سيمپل
۶۵	۳-۱۰- روش حل عددی
99	۳-۱۱- مطالعهی استقلال حل عددی از شبکهی محاسباتی
۶۷	۳-۱۲ اعتبار سنجی نتایج
۷١	فصل ۴ ارائه و تحلیل نتایج
۲۲	۴-۱- رينولدز بحراني
۷۴	۴–۲– اهمیت ترم های نیرویی معادله مومنتوم بر روی طول گردابهها
۷۵	۴-۲-۱ اثر کسر حجمی نانوذرات
γ٩	۴-۲-۴ تاثیر اندازه ذرات
٨١	۴-۲-۴ تاثیر نسبت انبساط
۸٣	۴–۳– اثرات تزریق و مکش
۸٣	۴–۳–۱ تاثیر نفوذ نانوسیال از دیواره۴
٨۶	۴-۳-۴ مکش از دیوارہ
٨٧	۴-۴- افت فشار بی بعد
٨٨	۴-۵- بهبود انتقال حرارت به کمک تزریق و مکش
٩١	فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها
٩٢	۵-۱- نتیجه گیری
٩٢	۲-۵- پیشنهادها

ابع۹۵	منا
-------	-----

فهرست شكلها

۱٣	ی ۱-۱-ضریب هدایت گرمایی برخی از مواد	شکر
۵۵.	ی ۳-۱- شماتیکی از میکروکانال انبساط ناگهانی	شكر
۶١.	. ۲-۳- شرایط مرزی	شکر
۶٩.	ں ۳−۳- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سانترا [۶۷]	شكر
۷٣.	. ۴-۱- طول گردابهها نسبت به عدد رینولدز برای آب خالص در نسبت انبساطهای مختلف	شکر
۷۵.	ی ۴-۲- تاثیر درصد حجمی نانوذرات بر رینولدز بحرانی	شكر
٧۶.	ی ۴-۳- خطوط جریان برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی ۲ درصد در رینولدز ۱۰۰	شکر
۷۷.	ۍ ۴۰۴- کانتور سرعت در φp = 0/01 و Re = 300 برای الف) آب خالص. ب) سیال پایه	شکر
۷۷.	ی ۴-۵- طول بیبعد گردابهها نسبت به عدد رینولدز در درصد حجمیهای مختلف	شكر
۷۸.	ع ۴-۶- تاثیر درصد حجمی نانوذرات بر ناسلت متوسط	شكر
٧٩.	ع ۲-۴- اثرات قطر ذرات بر رینولدز بحرانی	شکر
٨٠.	ل ۴-۸- تاثیر قطر ذرات بر روی طول گردابهها برای $\phi p = 0/03$ و نسبت انبساط ۱:۳	شکر
۸١.	ع ۴-۹- تاثیر قطر ذرات بر ناسلت میانگین در رینولدز ۱۰۰	شکر
۸۲.	ی ۴−۱۰- تاثیر نسبت انبساط بر طول گردابهها برای درصد حجمی ۳٪	شکر
صد	ل ۴–۱۱- ناسلت میانگین بر حسب رینولدز در نسبت انبساطهای مختلف برای نانوسیال با در	شــک
۸۲.	حجمی ۳ درصد	
۸٣.	ی ۴-۱۲- شماتیکی از مساله تحت تاثیر نفوذ از دیواره	شکر
٨۴.	ی ۴-۱۳- فاصلهی تشکیل گردابه از دیواره عمودی، نسبت به سرعت نفوذ	شكر
٨۵.	ی ۴-۱۴- طول گردابه برحسب سرعت نفوذ در رینولدزهای مختلف	شکر
بت	لل ۴-۱۵- رینولدز بحرانی بر حسب درصـد حجمی برای سـرعت.های نفوذی مختلف در نسـ	شــک
٨۵.	انبساط ۱:۳	

٨۶	رينولدز بحرانى	شکل ۴-۱۶- تاثیر مکش از دیواره بر ر
λΥ	ابه (ER=3 و ¢p = 0/03).	شکل ۴-۱۷- تاثیر مکش بر طول گردا
λΥ	ېر تقارن کانال	شکل ۴-۱۸- افت فشار بیبعد در محو
برای سرعتهای نفوذی مختلف در	ـط بر حسـب درصد حجمی	شـکل ۴-۱۹- نرخ عدد ناسـلت متوس
۸۸		رينولدز ۱۰۰
ای نفوذی مختلف با درصد حجمی	ب عدد رینولدز، برای سرعته	شـكل ۴-۲۰- ناسلت متوسط بر حسم
٨٩		
ماهای مختلف در رینولدز ۲۰۰ (سـب سـرعت نفوذ به ازای د	شـکل ۴-۲۱- ناسـلت میانگین بر ح
۹۰		($\phi p = 0/04$

فهرست جدولها

۷	جدول ۱-۱- روشهای ساخت میکروکانالها
نالها	جدول ۲-۱- خلاصه ای از برخی روشهای ساخت میکروکا
۲۳	جدول ۱-۳- تعیین متغیرβ برای استفاده در رابطه (۱-۱۶)
99	جدول ۳-۱-خواص مکانیکی آب و مس
۶۷	جدول ۳-۲- حساسیت جواب نسبت به شبکه بندی
۶۷	جدول ۳-۳- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۲
۶۸	جدول ۳-۴- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۳
۶۸	جدول ۳-۵- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۴
الص	جدول ۳-۶- درصد افزایش ناسلت میانگین نسبت به آب خ
اهای مختلف با نتایج دیورست و همکاران	جدول ۴-۱- مقایسهی رینولدز بحرانی در نسبت انبسام
٧٣	[\··]
طول گردابهها بر حسب کسرهای حجمی	جدول ۴-۲- اثر ترمهای مختلف معادله ی مومنتوم روی م
٧۴	مختلف نانوذرات با $dp=100nm$ و $Re=100$ و
صلهی تشکیل آنها از دیواره	جدول ۴-۳- تاثیر سرعت نفوذ از دیواره بر طول گردابه و فا

فهرست نشانهها

A	تعریف شده در معادلهی (۳-۲۵)	Т	دما (K)
В	تعریف شده در معادلهی (۳-۲۴)	х , у	جهتهای مختصات (m)
Ср	گرمای ویژه در فشار ثابت (J kg ⁻¹ k ⁻¹)	Χ,Υ	جهتهای بیبعد مختصاتی
Cd	ضریب درگ	Xr	طول گردابه (m)
dp	قطر ذرات جامد (m)	<i>X</i> 1	فاصلهی گردابه از دیواره (m)
d	ارتفاع کانال قبل از انبساط (m)		
D	ارتفاع کانال بعد از انبساط (m)		علائم يونانى
Dh	قطر هیرولیکی کانال (m)	β	ضریب اصطکاک (kg m ⁻³ s ⁻¹)
Fcol	نیروی اندرکنش ذره-ذره (pa m ⁻¹)	Г	تعریف شده در معادلهی
Fd	نیروی درگ (pa m ⁻¹)	θ	دمای بی بعد
Fvm	نیروی جرم مجازی (pa m ⁻¹)	μ	ويسكوزيته (pa s)
G	مدول اندر کنش جامد-جامد (pa)	ρ	چگالی (kg m ⁻³)
h	اختلاف ارتفاع كانال قبل و بعد انبساط	ϕ	درصد حجمی
	(m)		
hv	ضریب انتقال حرارت حجمی(³⁻ W m	ω	تعریف شده در معادلهی
	(K ⁻¹		(79-37)
hp	ضریب انتقال حرارت جامد-مایع (W		
	(m ⁻² K ⁻¹		
k	هدایت حرارتی (W m ⁻¹ K ⁻¹)		
L	طول کانال (m)		اندیسها
Nu	عدد ناسلت (hD _h /k _l)	b	بالک
Nū	عدد ناسلت میانگین	eff	موثر
Р	فشار (pa)	in	ورودى
p	فشار بىبعد	inj	نفوذ (injection)
Pr	عدد پرانتل	l	فاز مايع
q"	شار حرارتی دیوارہ (W m⁻²)	m	میانگین
Re	عدد رينولدز	p	فاز جامد
u,v	سرعت در جهتهای x و y (1-m s)	pw	آب خالص
U,V	سرعت بی بعد در جهتهای x و y	W	ديواره

فصل ۱ مقدمه

۱–۱– مقدمه

از زمانی که بحث افزایش گرمایش جهانی به علت نشر گازهای گلخانهای مطرح شده است و به صدور پیمان کیوتو مبنی بر کاهش تولید گازهای گلخانهای توسط کشورهای توسعهیافته و در حال توسعه منجر شده است، محققان بسیاری در مسیر دستیابی به روشهای جدید برای کاهش مصرف انرژی تلاش کردهاند. بااینحال نیاز روزافزون بشر به انرژی و وجود سیستمهای ناکارآمد، مصرف انرژی را هر روز بیشتر کرده است. یکی از روشهای کاهش مصرف انرژی، افزایش بازده سیستمهای تبدیل انرژی و انتقال حرارت است. انتقال حرارت ازجمله مهمترین فرایندها و دغدغههای موجود در بین صنعتگران و مصرفکنندگان میباشد.

برای مثال در بعضی قطعات و مدارهای الکتریکی، ۵۰٪ از برق مصرفی صرف مدیریت خنک کاری سیستم میشود. برخی از نقاطی که در آنها خنک کاری حیاتی است شامل موضوعات میکروالکترونیک، حملونقل، سیستمهای روشنایی و استفاده از انرژی خورشیدی در تولید برق میشود. علاوه بر این، کاربرد بعضی سیستمها مانند لیزر، اشعهی پر انرژی مانند اشعهی X، سیستمهای میکرو الکترومکانیکی(MEMS)، نانو تکنولوژی و ... چگالی بار حرارتی بسیار بالایی را به سیستم تحمیل میکند. لذا مدیریت حرارتی آنها بسیار مهم میباشد.

این موارد دانشمندان را بر آن میدارد تا برای خنک کاری قطعات مورداستفاده در این سیستمها، کار با سیالات روشهای جدیدی روی بیاورند. برای خنک کاری قطعات مورداستفاده در این سیستمها، کار با سیالات سنتی مشکل به نظر میرسد. نیاز به سیالاتی با خواص انتقال حرارتی بهتر، متخصصین را بر آن داشته تا به سـمت تولید سـیالاتی با ویژگیهای مطلوب بروند. سـاخت مخلوطهای سـیال–جامد از اولین راهکارها بود. این ایده در سـال ۱۸۸۱ به وسـیله پراکنده سـازی ذرات جامد میکرو و میلی متری در سیال عملی شد ولی همواره مشکلات عدم پایداری, ته نشینی، سائیدگی و فرسایش مجاری و مسدود کردن لوله ها درمورد این سـیالات مانع از دسـت یابی به یک محصـول تجاری میشـد. ذراتی که در تحقیقات قدیمی به سیالات افزوده میشد، دارای اندازه های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سـوسـپانسیون را نداشته و به سرعت ته نشین میشدند. همین امر سبب میشود که مجاری عبور پایدارتری داده و پائین بودن سرعت ته نشینی آن ها سبب می گردد که مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد.

۲-۱- میکروکانالها

۱-۲-۱ چکیده

تقاضای رو به رشد برای کوچکسازی محصولات در تمام بخشهای صنعتی، با رقابت جهانی برای اطمینان بیشتر، سرعت بیشتر و محصولات مقرون به صرفه همراه شده است و منجر به چالشهای جدیدی برای طراحی و بهره برداری سیستمهای مدیریت حرارتی شده است. افزایش سریع در تعداد ترانزیستورها بر روی تراشه، با افزایش قابلیت یا قدرت و درنتیجه شار حرارتی بالاتر، یکی از این چالشهای بزرگ در صنعت الکترونیک است. تکنولوژی های مبدل حرارت و مبدل جرم میکرو کانال در حال پیدا کردن کاربردهای جدید در صنایع گوناگون به عنوان یک راه حل امیدوار کننده برای تغییر راه اندازی می کنیم. در این راه ما نسل بعدی سیستمهای مدیریت حرارتی با کارایی بالا را طراحی و راه اندازی می کنیم. در این فصل با اصول میکرو کانال ها برخورد خواهیم کرد. با معرفی تاریخچه، زمینه های فنی، طبقه بندی، مزایا و معایب میکرو کانال ها شروع می کنیم. روش ساخت (تکنولوژی متداول و تکنولوژی مدرن) برای میکرو کانال ها در کنار هم در نظر گرفته می شود. در نهایت، ارتباط افت فشار و ضریب انتقال حرارت برای جریان تک فاز برای انواع شرایط جریان داخلی ارائه خواهد شد.

1-۲-۱ تاریخچه میکروکانالها

کارهای زیادی برای انتقال حرارت تک فاز در میکروکانالها توسط تاکرمن^۱ و پیز^۲ [۱] برای خنکسازی مدارات یکپارچه در مقیاس بسیار بزرگ (VLSI)^۳ انجام شد. در سالهای اول تاکرمن و پیز [۱] 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

[\] Tuckerman

^r Pease

^r Very large-scale integrated

حذف کند. جابهجایی اجباری در کانال و تزریق مایع برای خنک کاری 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 میکروکانال، به پدیدهای محبوب و جالب برای پژوهشگران افت فشار متوسط میباشد. انتقال حرارت میکروکانال، به پدیدهای محبوب و جالب برای پژوهشگران تبدیل شده است. بهعنوان مثال، برای خنک کاری چاه حرارتی میکروکانال باقدرت بالا با آرایش دیود لیزری حذف شار حرارت ۵۰۰ وات بر مترمربع اثبات شده است. در چند دهه گذشته، مطالعات انجام شده روی جریان دو فازی و ویژگیهای انتقال حرارت در جریان میکروکانال، به توسعه سریع میکرودستگاههای مورد استفاده برای کاربردهای مهندسی مختلف مانند دستگاههای پزشکی، مبدلهای حرارتی فشرده با شار حرارت بالا، خنک کاری میکروالکترونیک با چگالی قدرت، ابررایانهها،

1-۲-۳ معرفی میکروکانالها

در اغلب موارد خنککاری موردنیاز بیش از ۱۰۰ وات بر مترمربع است که بهراحتی نمی توان با سیستههای ساده خنککاری هوا و یا خنککاری آب، خنک کاری را انجام داد. در بسیاری از کاربردها، به دلیل دفع شار حرارت بالا از اجزا، چاه حرارتی موردنیاز باید بزرگ تر از اجزای خود باشد. بااین وجود، نقاط داغ معمولا ظاهر می شود و سطوح غیریکنواخت شار حرارت در سطح چاه حرارتی مشاهده می شود. محققان چاه حرارتی جدیدی را توسعه دادند که می تواند به طور مستقیم در پشت منبع می شود. محققان چاه حرارتی جدیدی را توسعه دادند که می تواند به طور مستقیم در پشت منبع می شود. محققان چاه حرارتی جدیدی را توسعه دادند که می تواند به طور مستقیم در پشت منبع اختلاف دما ثابت، شار گرمایه حاصل AA بستگی دارد که در آن A ضریب انتقال حرارت است و A اختلاف دما ثابت، شار گرما به حاصل AA بستگی دارد که در آن A ضریب انتقال حرارت است و A افزایش می یابد و از آنجاکه ضریب انتقال حرارت A به قطر هیدرولیک مرتبط است، افزایش سطح نیز مساحت سطح انتقال حرارت است. بنابراین، در راستای تحقق نیاز به دفع شار حرارت بالا، حاصل AA می گزینه است. سطح انتقال حرارت را می توان با استفاده از میکروکانال ها در بدنه (سطح تراشه)، محصول افزایش داد. رفتار جریان آب در داخل کانال توسط قطر هیدرولیکی کانال و سطح مقطع کانال تعیین می شود. برای دستیابی به انتقال حرارت بالا، قطر هیدرولیکی کوچکتر و سطح انتقال حرارت بزرگ تر کانال ترجیح داده می شود، بنابراین کانال های متعدد تنگ با عمق بالا مناسب می باشد. قطر هیدرولیکی کوچک و سطح مقطع گستردهتر باعث افزایش افت فشار و درنتیجه نیاز قدرت پمپاژ بیشتر است. از سوی دیگر، افزایش سطح مقطع سطح گرم، نرخ انتقال حرارت را افزایش میدهد. این شرایط را میتوان با نسل آینده میکروکانالها که دارای قطر هیدرولیکی بزرگتر، سطح مقطع بزرگتر و همچنین ضریب انتقال حرارت بالاتر است، تنظیم کرد.

۲-۱-۴ طبقهبندی میکروکانالها و مینیکانالها

میکروکانالها را به روشهای مختلف میتوان طبقهبندی کرد. برخی از محققین معیارهای مختلف برای مینیکانالها در مقابل میکروکانالها پیشنهاد کردهاند. ساو^۱ و گریف^۲ [۲] یک معیار برای طبقهبندی میکروکانالها پیشنهاد کردند به شرح زیر است:

باشد که λ ثابت لاپلاس و d_h قطر کانال است. $\lambda{\geq}d_h$

مهندل^۳ و همکاران [۳] از قطر هیدرولیکی برای طبقهبندی میکرو مبدل حرارتی استفاده کردند که به شرح زیر است،

$1 \ \mu m \leq d_h \leq 100 \ \mu m$	مبدل حرارتی مقیاس میکرو:
$100 \ \mu m \leq d_h \leq 1 \ mm$	مبدل حرارتی مقیاس مزو:
$1 mm \le d_h \le 6 mm$	مبدل حرارتی فشردہ:
$d_h > 6 mm$	مبدل حرارتي متداول:

کاندلیکار^۴ [۴] یک طبقهبندی میکروکانال برای تک فاز همانند دو فاز پیشنهاد داد که به صورت زیر است:

 $d_h > 3 mm$ کانالهای متداول:

^r Griffith

* Kandlikar

۱ Suo

[&]quot; Mehendale

$200 \ \mu m \leq d_h \leq 3mm$	مینی کانالها:
$10 \ \mu m \leq d_h \! \leq \! 200 \ \mu m$	ميكروكانالها:

پالم^۱ [۵] یک تعریف کلیتر از میکروکانالها ارائه داد که آنها را بهعنوان المانهای انتقال حرارت را توصیف کرد که در آن تئوریهای کلاسیک بهدرستی نمیتواند ضریب اصطکاک و انتقال حرارت را پیشبینی کند. استفان^۲ 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.

1-1-0 مزایا و چالشهای میکروکانالها

جریان در میکروکانالها، در دو دهه گذشته بهطور گستردهای مورد بررسی بوده است این بررسیها برای خنکسازی مؤثر و سریعتر دستگاههای الکترونیکی با چگالی قدرت بالا بوده است. ضریب انتقال حرارت بالای نهفته در میکروکانالها، توانایی کاهش اندازه مبدلهای حرارتی بهطور قابلتوجه را دارد. از دیگر مزایای میکروکانالها کاهش وزن، حجم کم و کاهش استفاده از مواد میباشد. کاهش قطر میکروکانالها در بیشتر مبدلهای حرارتی فشرده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت بهواسطه سطح وسیعتر در واحد حجم میشود. میکروکانالها کاربردهای گسترده عملی در زمینههای بسیار تخصصی، ازجمله مهندسی زیست و سیستمهای حریانی میکرو ساخت^۳، میکروپمپها و میکرولولههای حرارتی دارند. بهعنوان مثال، تراکم و وزن پایین میکروکانالها، صنعت خودرو را دگرگون کرد. مبدلهای درارتی کوچک و میکروکانالها، امروز جایگزین لولههای مدور در کندانسورهای خودرو و مبدلهای حرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلیمتر شده است. اخیرا، میکروکانالها با موفقیت در حرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلیمتر شده است. اخیرا، میکروکانالها با موفقیت در میرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلیمتر شده است. اخیرا، میکروکانالها با موفقیت در مرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلیمتر شده است. اخیرا، میکروکانالها با موفقیت در مرارتی با قطر هیدرولیک در حدود ۱ میلیمتر شده است. اخیرا، میکروکانالها میدهای اسی میکروکانالها، مشکلات ساخت و فیلتر کردن سیال عامل با درجه بالا، برای آن که از طریق کانالها

۱ Palm

۲ Stefan

³ Microfabricated fluidic systems

۱-۲-۹ روشهای ساخت

میکروکانالها توسط انواع فرآیندها، بسته به ابعاد و مواد استفاده شده در آنها ساخته می شوند. مواد رایج مورد استفاده برای میکروکانالها سیلیکون، سیلیس، پلی کربنات، پلیمیدها، پلاستیک و یا فلز هستند. میکروکانالها، دارای مقاطع مستطیل، نیم دایره، مثلث و یا ذوزنقهای هستند که به طور گسترده در متون گزارش شده و توسط نگوین و ورلی [۶] خلاصه شده است.

جدول ۱-۱- روشهای ساخت میکروکانالها

تکنولوژی متداول تکنول	تكنولوژى مدرن
تغيير شكل ميكرو EMS	۳MEMS
ارہ کردن میکرو ماشین	ماشین کاری میکرو لیزر
فرزكاري ميكرو ماشين	ماشین کاری تخلیه الکتریکی
مدل Dicing	مدلسازی میکرو

هندسههای پیچیده میکروکانالها ممکن است عملکرد جذاب تر 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 به مور این تکنولوژی به مور کرای تخلیه الکتریکی و مدلسازی میکرو میباشد. تکنولوژی به مورد استفاده در آزمایشگاههای تحقیقاتی قرار گرفته است.

[\]Nguyen

^v Werely

^r Micro-Electro-Mechanical Systems

ماشین کاری میکرو لیزر	MEMS	فرزکاری میکرو	تغيير شكل ميكرو	
نامحدود	مستطیل،دایره، مثلثی، ذوزنقه	مستطيل	مستطيل	هندسه
فلز و شیشه	فلز و سیلیکون و شیشه	فلز و سيليكون	فلز و غيرفلز	مادہ
ابعاد نانومتر و میلیمتر	ابعاد نانومتر و میلیمتر	0.1-10 mm	۲۵۰ کانال بر اینچ	ابعاد كانال
توليد پايين	توليد پايين	نسبت ابعاد بالا و یا پایین، ارزان، سریع	هزينه کم و سريع	مزايا
بسيار گران	پروسه کند (۱ روز)	طراحیهای پیچیدہ غیرممکن	بعضی از مواد نیازمند ترمیماند	معايب

جدول ۲-۱- خلاصه ای از برخی روشهای ساخت میکروکانالها

1-7-7 فناوري متداول

۲-۱-۶-۱-۱ تغییر شکل میکرو^۱

همان طور که در جدول ۱-۱ نشان داده، با استفاده از روش تغییر شکل میکرو، میتوان کانالهای مستطیل شکل با هر ماده ای ساخت. در گزارشی که توسط کوکوسکی^۲ [۷] 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 به طور معمول در طیف گسترده ای از مواد تشکیل شده است. کانالها در یک پاس پیوسته و یا با عبور از چند برش بسته به سیستم، مورد استفاده قرار می گیرند. مزایای استفاده از تکنولوژی تغییر شکل میکرو شامل هزینه پایین و سرعت بالاست. بااین حال، با توجه به میزان کرنش و سختی مواد، برخی از مواد پردازش شده پس از پردازش تغییر شکل میکرو ممکن

[\] Micro

^r Kukowski

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 انعطاف پذیر انجام می شود. حرکت ابزار مواد پایه و وابستگی 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.

۲−۹–۲–۲ اره کردن میکرو⁽ (برش کاری میکرو)

روش برش کاری میکرو بهطور گسترده در صنعت استفاده می شود که می توان کانال مستطیلی از فلز یا سـیلیکون با عرض در محدوده ۱۰–۰٫۱ میلی متر سـاخت اسـت. با این تکنولوژی می توان میکروکانال های با نسبت های بالا و یا نسبت های پایین سـاخت. این روش بسیار سریع است و پایین ترین هزینه تولید را در میان همه فن آوری های میکروسـاخت دارد. این تکنولوژی از یک اره منبت کاری^۲ برای ساخت میکروکانال های مستطیلی استفاده می کند.

۱-۲-۶-۲ تکنولوژی مدرن

MEMS (سیستم میکرو الکترومکانیک)

بسیاری از پژوهشهای حاضر در زمینه MEMS در گروه روشهای ساخت مقیاس میکرو، از بخش نیمههادی برخاسته است. بسیاری از تکنولوژیها، شامل روشهای MEMS هستند: حکاکی مرطوب، حکاکی خشک، LIGA و حکاکی یون واکنشهای عمیق (DRIE)^۴. در این بخش در بین فناوریهای MEMS بر روی فنآوری DRIE که بهطور گسترده استفاده میشود تمرکز خواهیم کرد. همانطور که در جدول ۱-۲ نشان داده شده است، کانالهای مستطیل، دایره، مثلث و یا ذوزنقه را با استفاده از روش DRIE میتوان ساخت. این تکنولوژی با فلز، سیلیکون و شیشه با طیف گستردهای از اندازه کانال، از مقیاس نانومتر تا مقیاس میلیمتر قابل اجرا است. علاوه بر این، این فنآوری دارای مزیت

^r fret saw

¹ Micro-Sawing

^r (Lithographie, Galvanoformung, and Abformung)

[†] deep reactive ion etching

تولید کم است. بااین حال، فن آوری DRIE برای استفاده در زمینه های صنعتی به دلیل فر آیند زمان بر بودن آن مناسب نیستند.

۲-۲-۹-۲-۱ ماشین کاری میکرو لیزر^۱

بهتازگی، از تکنولوژی ماشین کاری میکرو لیزر برای ساخت میکرو کانالها استفاده می شود. ماشین کاری میکرو لیزر قابل اجرا برای هر گونه مواد است و طیف گسترده ای از اندازه کانال، از مقیاس نانو تا مقیاس میلی متر و تعداد نامحدودی از هندسه ها را میتواند تولید نماید. علاوه بر این، این فن آوری قابلیت تولید کم را دارا است. تکنولوژی ماشین کاری میکرو لیزر در مقایسه با فن آوری های 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.

۲-۱-۷ کاربردهای میکروکانالها

الف- مبدل های حرارتی میکروکانال

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

ب- لولههای حرارتی میکروکانال

لوله های حرارتی ضربانی^۲ مقیاس میکرو

¹ Laser Micro-Machining

^r Micro-Pulsating Heat Pipes

- لولههای حرارتی میکروکانال تخت
- لولههای حرارتی میکرو جریان نوسانی جریان مخالف

ج – صفحات حرارتی میکروکانال

۱–۳– نانوسیال

افزودن ذرات جامد بهصورت معلق در سیال پایه یکی از روشهای انتقال حرارت میباشد. افزایش ضریب هدایت حرارت، ایده اصلی در بهبود مشخصههای انتقال حرارت سیالات است. از آنجاکه ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد معمولا خیلی بالاتر از سیالات میباشد، انتظار میرود افزودن این ذرات جامد موجب افزایش ضریب هدایت حرارت سیال پایه شود.

افزایش ضریب هدایتی حرارتی مایعات درنتیجه افزودن ذرات با اندازه میلیمتر و میکرومتر بیش از ۱۰۰ سال است که شناخته ده می باشد. اما استفاده از این ذرات به دلیل مشکلات عملی نظیر تهنشین شدن سریع ذرات، ایجاد سایش شدید، افزایش افت فشار و عدم امکان استفاده از آن ها در مجاری بسیار ریز، میسر نیست. پیشرفتهای اخیر در فناوری مواد تولید ذرات با اندازه نانومتر (نانومواد) را که توان فائق آمدن بر این مشکلات را دارند فراهم آورده است. با پخش کردن این نانومواد در سیال، نوع جدیدی از سیال به وجود می آید که نانوسیال نامیده می شوند.

1-۳-1 مفهوم نانوسيالات

در مسئله بازده انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدلهای حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب جابهجایی انتقال حرارت نقش اساسی را بر عهدهدارند. سیالات متداول در انتقال

¹ Microchannel Flat Heat Pipes

^r Counter-Stream-Mode Oscillating Flow Micro Heat Pipe

حرارت و حامل انرژی در صنایع را معمولا سیالاتی نظیر آب، روغنها و اتیلن گلایکول تشکیل میدهند. با افزایش رقابت جهانی در زمینه صنایع مختلف و نقش انرژی در هزینه تولید، این صنایع بهشدت به سمت توسعه سیالات پیشرفته و جدید با شاخصهای حرارتی بالا پیش میروند.

بهخوبی مشخص است که فلزات در شکل جامد خود دارای ضریب هدایت گرمایی بسیار بالایی نسبت به سیالات هستند. به عنوان مثال ضریب هدایت گرمایی مس در دمای محیط حدود ۲۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است. از طرفی ضریب هدایت گرمایی مواد فلزی نیز بسیار بیشتر از هدایت گرمایی مواد غیرفلزی است. به همین دلیل، انتظار میرود که سیالات حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای هدایت گرمایی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند.

در واقع در رابطه با نانوسیالات مطالعات، بررسیها و مدلسازیها به سالها قبل برمی گردد، بهطوری که کار تئوری و نظری ماکسول ⁽ [۸] حدود ۱۰۰ سال پیش منتشر شده است. لیکن تا سالهای اخیر بررسیها برای ذراتی که دارای اندازه میلیمتری یا میکرومتری بودند، صورت گرفته بود. در این اندازهها ذرات با مشکلات جدی تهنشینی سریع روبه رو بودند. به این مشکل باید مسئله ایجاد سایش در مسیر جریان و افزایش افت فشار را نیز اضافه کرد. بهعلاوه برای سیستمهای میکرونی انتقال حرارت، این ذرات بسیار درشت بودند.

فناوری جدید نانوتکنولوژی این امکان را فراهم آورده تا بتوان ذراتی با اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فرآوری کرد. این پیشرفت سبب شد تا در سال ۱۹۹۳ فکر استفاده از نانوذرات فلزی را در داخل سیالات حامل انرژی نظیر آب و اتیلن گلایکول ایجاد و موضوع نانوسیال بهعنوان موضوع جدید انتقال حرارت مطرح گردد. چوی [۹] از بخش تکنولوژی انرژی آزمایشگاه ملی آرگون ^۳ آمریکا، در سال ۱۹۹۵ اولین بار موضوع نانوسیال را بهعنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح کرد. 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

[\] Maxwell

^r Choi

[&]quot; Argonne

مي آيند. پراكندگي نانوذرات درون سـيال مي تواند كاملا يا تقريبا همگن باشـد. متوسـط 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 دامنیه ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر موردمطالعیه قرار می گیرند.با توسعه تحقیقات در زمینه نانوسیالات، امروزه نانوسیال را نه فقط از طریق افزودن نانوذرات فلزی، بلکه از طریق افزودن نانوذرات اکســیدهای فلزی یا نانولولههای کربنی به یک ســیال نظیر آب فقط هدایت گرمایی آن را تحت تاثیر قرار نداده بلکه سایر خواص فیزیکی نظیر ظرفیت گرمایی سیال نیز تحت تاثیر قرار می گیرد. مجموعه تغییرات ایجادشده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می شود تا علاوه بر افزایش هدایت گرمایی در انتقال حرارت جابهجایی نیز شاهد افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت باشیم. امروزه تحقیقات در زمینه نانوسیالات ابعاد بسیار گستردهای پیدا کرده است. از یکسو محققین در رابطه با افزایش هدایت گرمایی سیالات و افزایش انتقال حرارت، پیگیر ساخت و تهیه نانوسـیالات با انواع نانوذرات و نانولولهها با توزیع اندازههای مختلف هسـتند، درحالی که برخی دیگر از ی مسئله پایداری و عدم تهنشینی نانوذرات در طی فرآیند انتقال حرارت و عدم محققين به بررس کلوخه شدن یا مهاجرت آنها می پردازند. ذرات با مواد گوناگون و متعددی برای تهیه نانوسیالات استفاده می شوند. در این بین نانوذرات CuO ،TiO2 ،SiC ، Ag،Au ،Fe و Al₂O3 اغلب در تحقیقات مربوط به نانوسیالات به کار رفتهاند.



ایجاد تغییرات در خواص رئولوژیکی سیال پایه با افزودن نانوذرات، بخشی از تلاشهای 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 بهعبارت دیگر نحوه معلق سازی ذرات جامد در سیال پایه و افزودن نانوذره به سیال پایه نیز یکی از حوزههای تحقیقاتی مهم در زمینه نانوسیالات است.

۱-۳-۲ مزایای نهان نانوسیال

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 نهان نانوسیالات بهقرار زیر است:

الف- بهبود انتقال حرارت و پایداری

کاهش اندازه ذرات یک جامد که توأم با افزایش تعداد آنها در واحد جرم است، منجر به افزایش سطح مخصوص می شود. به طوری که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود بیشتری از سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتر است. با کاهش ذرات به حدود نانومتر، درصد بیشتری از اتم های آن در نزدیکی سطح قرار می گیرد. سطح ذرات در انتقال حرارت مؤثر بوده و استفاده از نانوسیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می شود. نانوذرات به کار گرفته شده یک سطح بسیار زیاد برای موضوع انتقال حرارت ایجاد می کند 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 ته نشینی سریع آنها است که با

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 بهتبع آن عدد ناسلت و درنتیجه ضریب انتقال حرارت جابهجایی است. این افزایش سرعت در درون تجهیزات بهنوبه 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. بهعنوان مثال افزایش انتقال حرارت به میزان دو برابر، با استفاده از سیال پایه، نیازمند افزایش توان پمپاژ به حدود ۱۰ برابر است. درحالی 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 برابر سیال پایه شرین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپها، از دیگر مزایای نانوسیالات

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. لیکن ذراتی که در تحقیقات قدیمی به سیالات افزوده می شد دارای اندازه های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته نشین شدند. همین امر سبب می شد که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود شوند. در حالی که ذرات با اندازه نانو، تشکیل سوسپانسیون های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته نشینی آن ها سبب می شود تا مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد. از طرفی بزرگی ذرات میکرومتری سبب می شود تا نتوان از آن ها در مجاری میکروکانال ها استفاده کرد. در حالی که اندازه نانویی ذرات این امکان را می دهد تا از نانوسیال بتوان در میکروکانال ها نیز استفاده کرد.

د- کاهش اندازه سیستمهای انتقال حرارت

با توجه به قابلیتی که نانوسیال از خود در افزایش انتقال حرارت 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 کوچک تری برخوردار خواهند شد.

هـ- كاهش هزينهها

به دلیل کاهش توان مصرفی پمپهای انتقال سیال از طرفی و کاهش اندازه و وزن تجهیزات انتقال حرارت از طرف دیگر، با به کار گیری نانوسیال صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد می شود.

1-۳-۳ تهیه 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 می گیرد، 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، پایدار بودن سوسپانسیون، تودهای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژهای از راهکارهای مختلف استفاده می شود. به عنوان مثال از تغییر H محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد ذرات و یا ارتعاشات برای رسیدن به ویژگیهای مذکور می توان استفاده از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد ذرات و یا ارتعاشات برای رسیدن به می شوند می مند کور می توان استفاده از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد درات و یا ارتعاشات برای میدن به ویژگیهای مذکور می توان استفاده از مواد پراکنده ساز و ضد انعقاد درات و یا ارتعاشات برای میدن به ویژگیهای مذکور می توان استفاده کرد. تمام این روشها منجر به تغییر خواص سطحی ذرات معلق شده می شوند

- الف- روش تهیه یک مرحلهای
 - ب- روش تهیه دو مرحلهای

در روش یک مرحلهای، ذرات موردنظر بهطور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می شود. به عنوان مثال برای تهیه نانوذرات فلزی درون یک سیال، بخار فلز مستقیم به درون سیال پایه هدایت می شود تا به شکل نانو ذرات کندانس شود. این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا^۱ 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 نمی

^{&#}x27; Bottom-up method

شود. به همین دلیل نانوذرات تهیهشده از این طریق بسیار تمیز است و این مزیت روش یک مرحلهای به دلیل فرمول بندی نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با مقدار 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 گزارش های خود به استفاده از روش دومرحلهای جهت تهیه نانوسیال اشاره کردهاند. این به علت آسان تر بودن فرمول بندی نانوسیال با نانو پودرهای آماده و خریداری شده است.

در روش دو مرحلهای برای تهیه نانوسیال، از انواع پودرها با اندازههای مختلف بهراحتی می توان استفاده کرد، مسئلهای که در روش یک مرحلهای با مشکلات بیشتری همراه است. در این روش، ابتدا نانوذره موردنظر یا نانولوله موردنظر تهیهشده و سپس به سیال پایه افزوده می شود. به نظر می رسد که این روش با توجه به این که می توان نانوذرات و نانولولهها را بیشتر و اغلب آسان تر از روش یک مرحلهای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. در روش دو مرحلهای نیز باید مسئله کلوخه شدن و تودهای شدن و نیز چسبندگی نانوذرات را در نظر گرفت. شکستن وضیعت تودهای 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 مهمترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی بر عهده دارد. روش دو مرحلهای شیوهای مناسب برای تهیه نانوسیالات اکسیدی میباشد. تجهیزات مختلفی را برای پراکندهسازی 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 میباشند. زمان فرآوری نانوسیال و شــدت همزن تـاثیر مهمی بر پراکندگی نانوذرات در درون ســیال پایه دارند. پیوندهای ضــعیف ایجادشده در بین ذرات تودهای شده با اعمال نیرو شکسته می شود بااین حال نانوذرات به شدت متمایل به تودهای شدن مجدد هستند. یکی از دلایل این مسئله نیروی واندروالس میباشد. نانوذراتی که به روش یک مرحلهای و یا به روش دومرحلهای تهیه می سوند باید تا حد ممکن پایدار بوده و ذرات پراکندهشده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و تهنشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایدارسازی تعلیق نانوذرات در سیال موردتوجه قرار بگیرد.

1-۳-۴ خواص ترموفيزيكي نانوسيالات

در تحلیل انتقال حرارت جابهجایی در نانوسیالات، تعیین دقیق خواص ترموفیزیکی مسئلهای کلیدی است. محاسبه چگالی و گرمای ویژه نانوسیالات به صورت مستقیم قابل دستیابی است اما در رابطه با لزجت و ضریب هدایت حرارتی، روابط متعددی ارائه شده است.

1-۳-۴ چگالی

چگالی نانوسیالات بهوسیله تعریف زیر به دست میآید. [۱۰].

$$\rho_{\rm nf} = \varphi \rho_{\rm p} + (1 - \varphi) \rho_{\rm f} \tag{1-1}$$

که در اینجا φ کسر حجمی ذره و اندیس f،nf و p به ترتیب بیانگر نانوسیال، سیال پایه و ذره هستند. پاک و چو^۲ [۱۰] بهطور تجربی نشان دادند که معادله بالا یک تعریف دقیق چگالی نانوسیالات است.

1-۳-۴-۲ گرمای ویژه

دو تعریف زیر برای تعیین گرمای ویژه نانوسیالات وجود دارد. [۱۱].

 $C_{p,nf} = \varphi C_{p,p} + (1 - \varphi) C_{p,f} \tag{(7-1)}$

$$(\rho C_{\rm p})_{nf} = \varphi(\rho C_{\rm p})_p + (1 - \varphi)(\rho C_{\rm p})_f \tag{(7-1)}$$

به نظر میرسد رابطهی (۱-۳) معادله بهتری است چراکه گرمای ویژه، مقدار جرم ویژهای است که تأثیر آن به چگالی اجزای مخلوط بستگی دارد.

۱-۳-۴-۳ لزجت

لزجت نانوسیال متغیری مهم برای عملکردهای کاربردی است چراکه مستقیم بر افت فشار در جابهجایی اجباری تأثیر گذار 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

[\] Pak and Cho

مقایسه با تحقیقات انجامشده 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 می شود.

انیشتین^۱ [۱۲] تعریفی را برای تعیین لزجت دینامیکی در محلولهای معلق حاوی ذرات کروی پیشنهاد داد. در این مدل از اثر متقابل ذرات چشم پوشی شده است. اورت^۲ و همکارانش [۱۳] هم، همین رابطه را برای محاسبه لزجت نانوسیال ارائه کردند. رابطه مذکور به صورت زیر است:

$$\mu_{\rm nf} = (1 + 2.5\phi) \,\mu_{\rm f} \tag{(f-1)}$$

برخی تحقیقات بعدی این حقیقت را موردتوجه قرارداد که لزجت باید تا جایی که کسر حجمی ذرات به بیشترین مقدار خود میرسد افزایش پیدا کند. برای مثال برینکمن^۳ [۱۴] معادله زیر را پیشنهاد داد.

μ_{nf} =
$$\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \mu_f$$

در برخی مطالعات، اثر متقابل بین ذرات در نظر گرفتهشده است. مثالی در این رابطه مربوط به
مطالعات باچلر⁴ [10] است.

$$\mu_{\rm nf} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \,\mu_{\rm f} \tag{8-1}$$

این مدلها که اغلب در تحقیقات نانوسیال استفاده شدهاند، لزجت سیال را کمتر از مقدار واقعی پیشبینی میکند. [۱۶]. یک رابطه توسط نگوین و همکاران^ه [۱۶] برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بهصورت زیر پیشنهاد شد.

$$\mu_{\rm nf} = (1 + 2.5\phi + 150\phi^2) \,\mu_{\rm f} \tag{(Y-1)}$$

- ^{*} Brinkman
- * Batchelor

^{&#}x27; Einstein

² Everett

^a Nguyen et al

۱-۳-۴ ظرفیت گرمایی ویژه ی نانوسیالات

ظرفیت گرمایی ویژه نیز یکی از خواص مهم ترموفیزیکی است که بر عملکرد گرمایی نانوسیالات اثر میگذارد. با استفاده از تئوری اختلاط برای مخلوط گازهای ایدهآل، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات (متوسط حجمی) این گونه محاسبه میشود:

(۸-۱)

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,p} + (1 - \varphi) C_{p,w}$$
که در آن $C_{p,p}$ و $C_{p,p}$ به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، نانوذره پراکندهشده و آب
پایه میباشــند. این رابطه با توجه به مطالعات ژو^۱ [۱۷] تطابق خوبی با داده های تجربی ندارد. در
نتیجه آن ها با فرض تعادل گرمایی میان ذرات و ســیال پایه، عبارت زیر را برای ظرفیت گرمایی یک
مخلوط مایع – جامد پیشنهاد دادند:

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi \rho_p C_{p,p} + (1-\varphi) \rho_w C_{p,w}}{\varphi \rho_p + (1-\varphi) \rho_w}$$
(9-1)

۱–۳–۴–۵ ضریب هدایت گرمایی

به طور کلی بر طبق تحقیقات به عمل آمده، عوامل یا متغیرهای مختلفی بر ضریب هدایت گرمایی نانوس_یالات تأثیر دارند. از جمله این متغیرها به غلظت نانوذرات در محلول، جنس ذرات، س_یال پایه، اندازه ذرات، شکل ذرات، دما، خوشهای شدن ذرات و میزان PH محلول می توان اشاره نمود. جهت تعیین اثر هر یک از این عوامل تحقیقات وسیعی به عمل آمده و به سازو کارهای متعددی در توجیه این تأثیرات اشاره شده است. از جمله مهم ترین سازو کارها می توان حرکت براونی ذرات، پدیده خوشهای شدن^{*} و همچنین لایه بندی مایع^{*} را بر شمرد که محققان بعضاً یکی از این سازو کارها را مهم ترین مکانیزم در توجیه افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات دانسته و بر اساس این فرضیه مدل های تئوریکی را برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات پیشنهاد کرده اند. لذا مهم ترین مدل های

¹ Zhou

^r Clustering

[&]quot; Liquid layering
تئوریک غالباً در سـه دستهبندی اصلی مدلهای بر اساس حرکت براونی، مدلهای بر اساس خوشهای شدن ذرات و مدلهای بر اساس پدیده لایهبندی مایع قرار می گیرند.

به هر حال نتایج تحقیقات نشان می دهند که ناهمخوانی آشکاری در مشاهدات آزمایشگاهی وجود دارد. به عنوان مثال تأثیر اندازه ذره بر ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات هنوز به طور کامل روشن نشده است. انتظار می رود حرکت براونی نانو ذرات، افزایش بیشتر ضریب گرمایی را در اندازه های کوچک تر ذرات نتیجه دهد. با این وجود، برخی آزمایش ها نشان می دهند که ضریب هدایت گرمایی با کاهش اندازه ذرات کاهش می یابد. این تناقض می تواند به سبب خوشه ای شدن کنترل نشده نانو ذرات که ذراتی بزرگتر را تشکیل می دهند، توجیه شود. [۱۸]. نتیجه اینکه هیچ کدام از مدل های تئوریک موجود به تنهایی و به طور کامل قادر به پیش بینی و توصیف افزایش هدایت گرمایی در نانوسیالات نیستند [۱۸]. در زیر به معرفی شناخته شده ترین مدل ها در تعیین ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات

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 [۸].

$$k_{nf} = \frac{k_{p} + 2k_{f} + 2(k_{p} - k_{f})\phi}{k_{p} + 2k_{f} - (k_{p} - k_{f})\phi}k_{f}$$
(1.-1)

 $k_{nf} = \frac{k_{p} + (n-1)k_{f} - (n-1)\phi(k_{f} - k_{p})}{k_{p} + (n-1)k_{f} + \phi(k_{f} - k_{p})}k_{f}$ (1)-1)

¹ Hamilton and Crosser

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

$$n = \frac{3}{\Psi} \tag{17-1}$$

که در رابطه بالا ۷ 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 کروی شکل مساوی ۳ بوده و در این صورت معادله بالا به معادله ماکسول تبدیل می شود. هر دو معادله بالا عملاً برای ذراتی با اندازههای بزرگتر و در مقیاس میلی و میکرو استخراج شدهاند و کاربرد آنها برای نانوسیالات ابهام آمیز بوده و به جوابهای معتبری منجر نخواهد شد.

ب- مدلهای مبتنی بر حرکت براونی

حرکت براونی، حرکت یا جابهجایی تصادفی ذرات معلق در یک محلول است. در بحث نانوسیالات، این حرت 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 تعریفشدهاند که در اینجا بعضی از آنها را معرفی میکنیم. باتاچاریا و همکاران ⁽ [۲۰] با استفاده از شبیهسازی حرکت براونی ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال را بهصورت زیر تعریف کردند:

 $K_{nf} = \varphi k_p + (1 - \varphi) k_f \tag{17-1}$

باید توجه کرد که در معادله (۱۳-۱۱)، kp 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 kp مورد استفاده قرار می گیرد و سپس از آن برای محاسبه knf استفاده می شود.

کو و کلینشتروئر^۲ [۲۱] ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات را به صورت ترکیبی از دو قسمت مجزا موردتوجه قرار دادند:

^{&#}x27; Bhattacharya et al.

^r Koo and Kleinsteuer

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - 2(k_p - k_f)\phi}$$
(12-1)

برای kBrownian، حرکت براونی ذرات همراه با اثر جابهجایی ذرات سیال با نانوذرات اطراف آنها در نظر گرفته شد بهعنوان نتیجه تعریف زیر پیشنهاد شد.

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \,\beta \phi \rho_f C_{p,f} \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f$$
 (۱۶-۱)
در رابطه بالا، $\rho_p e_f$ و ρ_f به ترتیب چگالی نانوذرات و سیال پایه و T دما برحسب کلوین است.

ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال است. در این تحلیل، تقابل بین نانوذرات و حجم سیال در حال حرکت اطراف آنها موردتوجه قرار نگرفته است و یک قسمت اضافی β بهمنظور لحاظ کردن اثر آن معرفی شده است. متغیر β از جدول ۱-۳ قابل استخراج است. [۲۱].

	β	نوع ذرات
φ<1%	0.0137(100\$\$)-0.8229	Au-citrat و Au-citrat
φ>1%	0.0011(100\$\$)-0.7272	CuO
φ>1%	$0.0017(100\phi)^{-0.0841}$	Al ₂ O ₃

جدول ۱-۳- تعیین متغیرβ برای استفاده در رابطه (۱-۱۶)

و همچنین f از رابطه زیر محاسبه میشود:

که

[\] Static

^r Chon et al.

نانوسیال اکسید آلومینیوم پیشنهاد نمودند. آنها از سه نانو پودر مختلف با قطرهای ۱۱، ۴۷، ۱۵۰ نانومتر استفاده کردند. 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 بهصورت زیر است.

$$\frac{k_{nf}}{k_{f}} = 1 + 64.7 \phi^{0.7460} \left(\frac{d_{f}}{d_{p}}\right)^{0.3690} \left(\frac{k_{p}}{k_{f}}\right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321}$$

$$\Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \tag{19-1}$$

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_{f} V_{Br} d_{p}}{\mu_{f}} = \frac{\rho_{f} k_{B} T}{3\pi \, \mu_{f}^{2} \lambda_{f}} \tag{(7.-1)}$$

که a_f ضریب پخش گرمایی سیال پایه است. لزجت دینامیکی سیال پایه نیز بهصورت زیر محاسبه می شود:

$$\mu_{\rm f} = \mathbf{A} \times 10^{\rm B/(T-c)} \tag{(1-1)}$$

140 K و C اعداد ثابت بوده و برای آب به ترتیب برابر با Pas.Sec 5 Pas.Sec و R $^{2.414}$ E 5 Pas.Sec و R 3 R 3 R 3 C 3 R 3

$$V_{\rm Br} = \frac{K_{\rm B}T}{3\pi\mu \,d_{\rm p}\,\lambda_{\rm f}} = \frac{K_{\rm B}}{3\pi\mu d_{\rm p}\,\lambda_{\rm f}} \frac{T}{A.\,10^{\rm B/(T-c)}}$$
(77-1)

که _۸_f پویش آزاد مولکولی^۱ بوده و برای آب در حدود _۱/۱۷ نانومتر در نظر گرفتهشده است. رابطه بالا برای نانوذراتی با ابعاد ۱۱ تا ۱۵۰ نانومتر معتبر بوده و اعتبار آن در بازه دمایی ۱ تا ۷۱ درجه سانتی گراد است.

ج- مدلهای مبتنی بر پدیده خوشهای شدن

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

^{&#}x27; Mean- free Path

اوانز و همکاران^۱ [۲۴] 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 خوشـهای شدن در سهگام و با استفاده از مدل براگمن^۱ [۲۵]، مدل نان و همکاران^۳ [۲۶] و مدل ماکسول- گرانت^۴ [۸ و ۲۷] تحلیل شده است. درنتیجه نسبت ضریب هدایت گرمایی به صورت زیر تعریف شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(k_{cl} + 2k_f) + 2\phi_{cl}(k_{cl} - k_f)}{(k_{cl} + 2k_f) - \phi_{cl}(k_{cl} - k_f)}$$
(177-1)

که در آن k_{cl} ضریب هدایت گرمایی خوشهها و ¢t نسبت حجمی ذرات خوشهها است که در مطالعات تعریف شده است. بهعلاوه ایوانز و همکاران [۲۴] 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^۵ [۲۸] ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات را از طریق توجه بر حرکت براونی و خوشهای شدن نانوذرات موردمطالعه قراردادند و رابطه زیر را برای پیشبینی ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات پیشنهاد کردند:

$$\frac{k_{\rm nf}}{K_{\rm f}} = \frac{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} - 2\phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})}{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} + \phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})} + \frac{\rho_{\rm p}\phi_{\rm p,p}}{2\,k_{\rm f}}\sqrt{\frac{k_{\rm B}T}{3\pi r_{\rm cl}\,\mu_{\rm f}}}$$
(11)

که r_{cl} شعاع ظاهری خوشههای نانوذرات است که از طریق آزمایش تعیین میشود. T دما برحسب کلوین و µf لزجت دینامیکی سیال پایه است که از مطالعات لی و ژوان^{*} [۲۹] میتواند محاسبه شود. بخش اول از سمت راست معادله بالا مدل ماکسول برای هدایت گرمایی محلول معلق حاوی ذرات

- ^r Braggman
- ^r Nan et al.
- ^{*} Maxwel-grant
- ^a Xuan et al.
- ⁹ Li and Xuan

^{&#}x27; Evans et al.

جامد در سـیالات اسـت. بخش دوم اثر حرکت تصـادفی نانوذرات را اضـافه نموده و موردتوجه قرار میدهد.

۱-۳-۵ فناوری نانو

کاربرد وسیع انتقال حرارت در صنایع گوناگون سبب شده است که افزایش راندمان دستگاههای گرمایی در اولویت طراحان واحدهای صنعتی قرار گیرد. تلاشهای زیاد محققان در سالهای گذشته جهت افزایش انتقال حرارت به ابداع روشهای مختلف در این راستا منجر شده است. افزایش راندمان و بهبود عملکرد دستگاههای گرمایی از یکسو سبب صرفهجویی در انرژی شده و از طرف دیگر میتواند کوچک شدن ابعاد دستگاه را به دنبال داشته باشد. متاسفانه بسیاری از روشهای مذکور با ازدیاد سطح در واحد حجم دستگاه امکانپذیر است که این مسئله سبب افزایش افت فشار میشود و با توجه به نیاز به پمپ قوی تر هزینه لازم جهت انتقال سیال بیشتر میشود.

نانوتکنولوژی فعالیت در دنیایی با مقیاس نانومتر است. یکی از زمینههای فعالیت این فناوری جدید تولید ذرات با ابعاد نانومتر (نانوذرات^۱) است. بنا بر برخی تعاریف ابعاد نانوذره در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانوذرات انواع فلزی، اکسیدهای فلزی، عایقها و نیمههادیها و نانوذرات ترکیبی نظیر ساختارهای هسته لایه را در بر می گیرند. باید خاطرنشان ساخت که نانولولههای کربنی را نیز از اعضاء این خانواده می توان به شمار آورد. نانوذرات دارای خواص منحصربهفردی هستند که آنها را از مواد تودهای با ابعاد معمولی و بزرگ متمایز می سازد. این خواص منحصربهفرد موجب پیدایش پتانسیلهای فراوانی برای کاربرد این مواد شده است. از دامنههای کاربرد آنها به سیستمهای بیولوژیکی، پزشکی، توزیع دارو در بدن، کاتالیست، سرامیک، الکترونیک و مغناطیس و محیطزیست و انرژی می توان اشاره کرد. نانوسیال که از مخلوط کردن نانوذرات در یک سیال پایه حاصل می شود، ازجمله کاربردهای مهم نانوذرات است.

پیشرفت در فناوری نانو در دو دهه اخیر و استفاده از نانوسیال بهعنوان محیط جدید و مناسبی برای انتقال حرارت افق جدیدی را فرا روی پژوهشگران ایجاد کرده است. از آنجاکه محیطهای سیال

[\] Nanoparticles

انتقال حرارت در صنایع از قبیل آب، اتیلن گلیکول و روغن از ضریب هدایت گرمایی کمی در مقایسه با فلزات و اکسیدهای فلزی برخوردارند، میتوان با افزودن مواد جامد با مشخصههای گرمایی بهتر عملکرد گرمایی سیالات بالا را بهبود بخشید. بحث افزودن ذرات جامد با اندازه میکرو به سیالات پایه از دهها سال قبل مطرح شده است ولی ازآنجاکه سوسپانسیون حاصل به سرعت تهنشین میشود گرفتگی معابر و لولههای عبوری را در پی دارد. از طرف دیگر وجود ذرات با اندازه میکرو سبب سایش جداره لولهها شده و به پمپها و وسایل انتقال نیز آسیب جدی وارد می کند. در نانوسیالات به دلیل وجود ذرات با اندازه نانو در داخل سیال پایه مشکلات مربوط به تهنشینی، گرفتگی لولهها و سایش کاهش قابل ملاحظهای خواهد داشت. از مزیتهای نانوسیالات افزایش شدید ضریب هدایت گرمایی و

۱-۳-۶ تولید نانوذرات

روشهای بسیاری برای تولید نانوذرات ابداع و توسعهیافتهاند. این روشها را به دو دسته شیمیایی و فیزیکی میتوان تقسیم کرد. هرچند برخی از فرآیندهای تولید را در دسته جداگانهای تحت عنوان فرآیندهای مکانیکی- شیمیایی نیز میتوان جای داد. در یک دستهبندی دیگر روشهای تولید نانوذرات را به فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد نیز میتوان تقسیم بندی کرد. در این بخش به معرفی برخی فرآیندهای متداول اعم از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد پرداخته میشود.

۱-۳-۶-۱ فرآیندهای حالت بخار

فرآيندهاي حالت بخار در توليد نانوذرات را به سه دسته زير مي توان تقسيم كرد.

الف) فرآیندهای رسوب فیزیکی بخار یا PDV

اساس فرآیند رسوب فیزیکی بخار، تولید فاز بخار از ماده موردنظر از طریق فرآیندهای تبخیر، سایش لیزری و یا اعمال پرتوهای یونی است. در این فرآیندها اتم از سطح ماده کنده شده و وارد فاز

¹ Physical deposit vapor

بخار می شوند. با اعمال عملیات سرمایش، چگالش بخار صورت می گیرد. چگالش سریع و ناگهانی یا آرام بخار در اندازه و توزیع اندازه ذرات تشکیل شده مؤثر خواهد بود.

ب) چگالش گاز خنثی

در فرآیند چگالش گاز خنثی، ماده اولیه درون محفظهای که تحت خلا بسیار زیادی قرار دارد در اتمسفر خنثی تبخیر میشود. بخارات تشکیلشده بهطرف نواحی سرد گازهای درون محفظه مهاجرت می کنند. این بخارات به دلیل برخورد با مولکولهای گاز خنثی انرژی خود را از دست میدهند به دلیل محدودیت حرکتی ایجادشده بهواسطه برخورد بخارات ماده و مولکولهای گاز خنثی ناحیه فوق اشباعی حاصل شده و با تجمیع بخارات تعداد زیادی کلاستر ایجاد می شود. در ناحیه سرد این کلاسترها در اثر چگالش تبدیل به نانوذرات می شوند. مهم ترین عوامل مؤثر در اندازه، شکل و سرعت رشد کلاسترها را شدت رسیدن مولکولهای بخار به ناحیه فوق اشباع، شدت اتلاف انرژی مولکولهای بخار داغ و شدت تولید کلاسترها تشکیل می دهند.

ج) فرآیند رسوب شیمیایی فاز بخار یا CVD ⁽

رسوب شیمیایی بخار روشی است که در آن جذب سطحی گاز روی سطح داغ برای تولید ماده موردنظر انجام می گیرد. در این روش ماده موردنظر آنقدر گرم می شود تا به صورت گاز درآید. سپس مولکول های گاز تحت خلا بر روی یک سطح ایجاد ذرات نانومتری جامد می نمایند. این فرآیند را برای تولید انواع نانوذرات فلزی اکسیدی و نیز کاربیدهای فلزات می توان بکار برد. تولید ذرات خالص مزیت مهم این روش است. با توجه به منبع مورد استفاده برای فعال سازی واکنش های شیمیایی، فرآیند CVD به سه دسته فرآیند CVD با فعال ساز حرارتی، CVD با فعال ساز لیزری و فرآیند CVD با فعال ساز پلاسما تقسیم بندی می شود. اگر در فرآیند CVD از فعال ساز حرارتی استفاده شود، دمای بالای لازم برای فرآیند از طریق دیواره های حرارتی راکتور تامین می شود. در حالی که در فرآیند CVD با فعال ساز پلاسما تقسیم بندی می شود. اگر در فرآیند CVD از فعال ساز حرارتی استفاده شود، دمای فعال ساز پلاسما تقسیم بندی می شود. اگر در فرآیند CVD از فعال ساز حرارتی استفاده شود، در حالی که در فرآیند CVD

¹ Chemical vapor deposit

میسازد. فرآیند CVD با فعالساز پلاسما قادر است تا رسوب موردنظر را در دمای پایین تولید نماید. در این فرآیند میتوان از انواع منابع انرژی مانند فرکانس رادیویی، جریان مستقیم یا مایکروویو استفاده کرد.

1-۳-۶-۲ فرآیند حالت مایع و حالت جامد

دسته دیگری از روش های تولید نانوذرات را فرآیندهای حالت جامد تشکیل میدهد. در این روش نانوذرات را از طریق آسیاب کردن و پودر نمودن تهیه میکنند. خواص نانوذرات حاصل از این روش تحت تأثیر نوع گلوله های آسیاب کننده، زمان آسیاب و محیط اتمسفری آن قرار میگیرد. از این فرآیند برای تولید نانوذراتی میتوان استفاده نمود که از طریق فرآیندهای حالت بخار و حالت مایع به آسانی تولید نمی شوند. از موارد استفاده نمود که از طریق فرآیندهای حالت بخار و حالت مایع فرآیندهای شیمیایی - مکانیکی اشاره کرد. آخرین دسته از فرآیندهای تولید نانوذرات را فرآیندهای فرآیندهای شیمیایی - مکانیکی اشاره کرد. آخرین دسته از فرآیندهای تولید نانوذرات را فرآیندهای فرآیندهای شیمیایی - مکانیکی اشاره کرد. آخرین دسته از فرآیندهای تولید نانوذرات را فرآیندهای فرآیندهای شیمیایی - مکانیکی اشاره کرد. آخرین دسته از فرآیندهای تولید نانوذرات را فرآیندهای فرآیندهای میدهد. با توجه به اینکه این روش ها دارای سادگی، تنوع، تطبیق پذیری و قابلیت استفاده برای انواع نانوذرات هستند، موردتوجه بیشتری قرار گرفته اند. مهم ترین روش موجود در فرآیندهای حالت مایع به شرح زیر است:

الف- توليد نانوذرات بهوسيله فرآيند همرسوبي

تولید نانو ذرات بیشتر از طریق همرسوبی در محلولهای آبی و سپس اعمال فرآیند تجزیه حرارتی برای ایجاد محصولات اکسیدی صورت می گیرد. روش همرسوبی شامل فرآیندهای همزمان هستهزایی، رشد و کلوخه شدن است.

ب- فرآیند سل ژل'

فرآیند سل ژل به هیدرولیز و تراکم پیش مواد با پایه آلکوکسید مانند Si(OEt)4 (تترااتیل ارتوسیلیکات یا TEOS) اطلاق می شود. فرآیند سل ژل را می توان به یکسری از مراحل مشخص تقسیم کرد:

^{&#}x27; Sol-Gel

- مرحله اول: تشکیل محلولهای پایدار آلکوکسید
- مرحله دوم: توليد ژلاتين از تشكيل يك شبكه پل دار الكلى يا اكسيدى
 - مرحله سوم: زمان دهی به ژل
 - مرحله چهارم: خشک کردن ژل
 - مرحله پنجم: آب گیری
 - مرحله ششم: متراکم کردن و تجزیه ژل در دماهای بالا

1–۳–۶–۳ تولید نانوذرات با استفاده از روش سیال فوق بحرانی

اخیراً سیالهای فوق بحرانی یا گازهای فشرده بهعنوان یک محیط مناسب برای انجام فرآیند تبلور و تولید نانوپودرها پیشنهادشدهاند. یک سیال فوق بحرانی ترکیبی است که در دما و فشار بالاتر از نقطه بحرانی خود قرار دارد. بهعنوان مثال سیال فوق بحرانی مورد استفاده میتواند کربن دیاکسید باشد که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلوده کنندگی نیز ندارد و متغیرهای بحرانی آن , C³ (Tc= 31.1°) باشد که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلوده کنندگی نیز ندارد و متغیرهای بحرانی آن , C³ (Tc= 31.1°) باشد که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلوده کنندگی نیز ندارد و متغیرهای بحرانی آن , C³ (Tc= 31.1°) باشد که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلوده کنندگی قابل حصول است. استفاده از سیال فوق بحرانی، کنترل دقیق فرآیند تبلور و توانایی تولید ذرات بسیار ریز و یکسان (از نظر اندازه) را فراهم میآورد. همچنین وجود خواصی نظیر نفوذ شبه گازی آن و امکان حذف کامل آن در انتهای فرآیند، باعث جلب توجه زیاد به سمت آن شده است. به طور کلی این سیالها در تکنولوژیهای تولید نانوپودرها، در سه حالت جسم حل شونده، ضد حلال و کمک حلال مصرف میشوند.

۱-۳-۲ انتقال حرارت جابهجایی در نانوسیالات

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 فرآیندهای 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. هدایت حرارتی برخی از جامدات نظیر فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است. بر این اساس ایده بهبود و افزایش هدایت حرارتی مایعات با افزودن ذرات جامد بسیار ریز شکل گرفته است. برخی از ذرات جامد مانند ذرات فلزی، غیرفلزی. پلیمری را میتوان با مایعات مخلوط کرده و از آنها سیال دوغابی شکل تهیه کرد. هرچند اگر سوسپانسیونهای حاصل محتوی ذرات با ابعاد میلیمتر یا میکرومتر باشند مشکلاتی نظیر گرفتگی مجاری حرکت سیال، تهنشینی سریع و افت فشار بیشازحد ظاهر خواهد شد و درصورتیکه ذرات دارای اندازه نانومتری باشیند مشکلات بالا بسیار کمرنگ خواهند گردید.

سیالات حامل انرژی در صنایع اغلب با حرکت در مجاری انتقال نظیر لولهها و مبدلهای حرارتی انرژی را به نقاط موردنظر منتقل مینماید. در این حالت آنچه برای مهندسین اهمیت دارد، برآورد میزان انتقال انرژی به واسط جابهجایی سیال میباشد. برای این منظور باید ضریب انتقال حرارت در فرآیند موردنظر مشخص باشد تا بتوان از طریق آن میزان سطح موردنیاز برای مبادله انرژی حرارتی را محاسبه کرد. برای سیالات متداول حامل انرژی این مسئله تا حدود زیادی حل شده و روابطی برای این منظور تدوین شده است. لیکن با مطرحشدن استفاده از نانوسیالات در انتقال انرژی، بحث تعیین ضریب انتقال حرارت جابهجایی در این سیالات نیز به وجود آمده است.

۱–۳–۷ جابهجایی اجباری در نانوسیالات

مقدار انتقال حرارت جابهجایی اجباری نتیجه حرکت توده سیال میباشد. حرکت سیال میتواند بر اثر اعمال یک نیروی خارجی، نظیر نیروی منتقلشده به سیال توسط پمپ ایجاد شود. بهوسیله جابهجایی اجباری یک سیال روی یک سطح با دمایی متفاوت با دمای سیال میتواند انتقال حرارت صورت گیرد. نرخ انتقال حرارت جابهجایی توسط معادله قانون سرمایش نیوتن قابلمحاسبه میباشد.

 $q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{Ya-1}$

در رابطه بالا r'' شار انتقال حرارت، h ضریب انتقال حرارت جابهجایی، T_s دمای سطح و ∞ دمای سطح و ∞ دمای سیال است. در برآورد میزان حرارت مبادله شده بین سطح و سیال مهم ترین مسئله تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت جابهجایی است.

1-۳-۲ مدلهای ریاضی تعیین ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیالات

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.

ازجمله روابطی که برای انتقال حرارت جابهجایی توسط سیال پایه بکار میرود میتوان به معادلات زیر اشاره کرد. [۳۰]

معادله سیدر و تیت [۳۰] مقدار عدد ناسلت را برای جریان آرام در درون یک لوله به صورت تابعی از اعداد بی بعد رینولدز و پرانتل به شکل زیر ارائه می نماید.

$$Nu = 1.86 Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} (\frac{D}{L}) (\frac{\mu_b}{\mu_s})^{0.14}$$
 (۲۶-۱)
در رابطه بالا Nu عدد ناسـلت، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل و μ لزجت سـيال اسـت. جمله
($\frac{\mu_b}{\mu_s})^{0.14}$ نيز نشاندهنده اثر تغييرات لزجت سيال بر مقدار انتقال حرارت جابهجايي است.

رابطه دیگر مورد استفاده در تعیین عدد ناسلت برای جابهجایی رابطه کیز [۳۰] برای شرط مرزی دمای ثابت سطح است. شکل ریاضی رابطه کیز به صورت زیر است.

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)RePr}{1 + 0.04[(D/L)RePr]^{\frac{2}{3}}}$$
 (۲۷-۱)
همچنین برای تعیین عدد ناسلت به معادله شاه^۳ [۳۰] میتوان اشاره کرد. شکل ریاضی این
معادله بهصورت زیر است:

$$= \begin{cases} 1.953(RePr\frac{D}{x})^{\frac{1}{3}} & (RePr\frac{D}{x}) \ge 33.3 \\ 4.364 + 0.0722RePr\frac{D}{x} & (RePr\frac{D}{x}) \le 33.3 \end{cases}$$
(YA-1)

' Sieder

Mar

" Shah

۲ Tate

برای جریان مغشوش در درون لوله میتوان از معادله دیتوس-بولتر نیز عدد ناسلت را محاسبه کرد این معادله بهصورت زیر است:

(۲۹-۱) 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 لایهمرزی، پراکندگی معکوس نانوذرات معلق، افزایش قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی و نیز ظرفیت حرارتی سیال ربط دهند .[۳1]. 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.

نانوسیالات بیشتر شبیه یک سیال رفتار می کند تا یک مخلوط متداول جامد-مایع که در آن ذرات نسبتا بزرگ با ابعاد میکرومتر یا میلیمتر پراکنده شدهاند. با اینوجود نانوسیال دارای طبیعت یک سیال دو فازی بوده و برخی از مشخصات مخلوطهای جامد-مایع را نیز دارا میباشد. جریان نانوسیال تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند جاذبه حرکت براونی، نیروی اصطکاک بین سیال و ذره، پدیده نفوذ براونی و پراکندگی قرار می گیرد. 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 . [۳۱].

با در نظر گرفتن تفاوت رفتاری نانوسیال با سیال پایه می توان تابعیت عدد ناسلت از پارامترهای مختلف را برای نانوسیالات بهصورت زیر نمایش داد. [۳۱].

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{k_d}{k_f}, \frac{(\rho c_p)_d}{(\rho c_p)_f}, \text{ (Interpreted with the set of t$$

یانگ' و همکاران [۳۲] جهت تعیین عدد ناسلت برای نانوسیالات، معادله سیدر و تیت را مورد بررسی قراردادند. آنها معادله سیدر و تیت را به صورت زیر بازآرایی کردند:

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

[\]Y.Yang

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

$$\Omega = a R e^b$$
 (۳۲-۱)
این معادله با اســـتفاده از دادههای تجربی و پس از پردازش آنها بهصـورت رابطه y=1.86x^{0.3333}
برای تعیین ω در اعداد رینولدز مختلف مورد استفاده قرار گرفت. [۳۲].

ون و دینگ [۳۳] نیز تلاش کردند به صورت تجربی میزان موفقیت معادله شاه 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 قراردادند. آنها برای ضریب هدایت گرمایی از دادههای تجربی و برای لزجت نانوسیال از رابطه زیر استفاده کردند:

ژوان^۳و لی^۴ [۳۴] برای تعیین عدد ناسلت در نانوسیالات روابط زیر را ارائه کردند:

$$Nu_{x} = [1 + C^{*}Pef'(0)]\theta'(0)Re^{m}$$

$$Nu_{x} = [1 + C^{*}Pe^{n}f'(0)]\theta'(0)Re^{m}$$
(76-1)
(76-1)

در این رابطه Pe عدد پکله است. توانهای n و m به نوع جریان، سرعت بدون بعد و دمای بدون بعد بعد بود این رابطه Pe عدد پکله است. توانهای n و m به نوع جریان، سرعت برای تعیین مقدار * P باید از بعد بستگی دارد. $f e ' \theta$ مشتقات سرعت بیبعد و دمای بیبعد هستند. برای تعیین مقدار * P 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. [۳۱].

$$Nu = c_1 (1.0 + c_2 \Phi^{m_1} P e_{nf}^{m_2}) R e_{nf}^{m_3} P r_{nf}^{0.4}$$
((79-1))

D.Wen

۲Y.Ding

- " Y.Xuan
- ۴ Q.Li

تعیین ضرایب c1 و c2 و توانهای m2 dm1 و m3 از طریق برازش اطلاعات تجربی بر معادله مذکور صورت می گیرد.

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. درصورتی که مقدار ثابت c2 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 استفادهشده است از رابطه زیر به دست میآید:

$$Pe_d = \frac{u_m d_p}{\alpha_{nf}} \tag{(YY-1)}$$

عدد رینولدز نانوسیال و عدد پرانتل نیز از روابط زیر محاسبه میشوند:

$$Re_{nf} = \frac{u_m D}{v_{nf}}$$
 (۳۸-۱)
 $Pr_{nf} = \frac{v_{nf}}{\alpha_{nf}}$ (۳۹-۱)
جمله نفوذ گرمایی (۵۰۲) نیز از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_P)_{nf}} = \frac{k_{nf}}{(1 - \Phi)(\rho C_P)_f + \Phi(\rho C_P)_d}$$
^(f-1)

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

لی و ژان [۳۵] 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 تعیینشدهاند.

$$Nu = 0.4328(1.0 + 11.285\Phi^{0.754}Pe^{0.218})Re^{0.333}Pr^{0.4}$$
(f)-1)

مایگا^۱ و همکاران [۳۶] جهت محاسبه عدد ناسلت میانگین برای جریان نانوسیال در درون لوله روابط زیر را ارائه نمودند:

- $Nu = 0.086 Re^{0.55} Pr^{0.5}$ برای شار ثابت دیواره (۲-۱)
- $Nu = 0.28 Re^{0.35} Pr^{0.36}$ برای دمای دیواره ثابت (۲۳-۱)

با توجه به این که نانوســیال میتواند با نانوذرات مختلف، غلظتهای متنوع و یا اندازههای مختلف نـانوذرات تهیـه گردد، یـک معادله جامع باید بتواند اثر پارامترهای مذکور را در خود جای دهد. تلاش محققین برای رسیدن به چنین معادلهای همچنان ادامه دارد.

۱-۳-۷-۳ انتقال حرارت جابهجایی طبیعی

مسئله انتقال حرارت جابهجایی طبیعی را علاوه بر شیوههای آزمایشگاهی میتوان از طریق تئوری و با استفاده از معادلات حاکم بر چنین فرآیندی نیز تجزیه و تحلیل کرد. برای چنین اموری دو دیدگاه وجود دارد. از یک نگاه میتوان سوسپانسیونهای جامد-مایع را دو فازی در نظر گرفت. دیدگاهی که در تجزیه و تحلیل سوسپانسیونهای حاوی ذرات جامد با ابعاد میلیمتر و یا میکرومتر به کار میرود و از دیدگاه دیگری سوسپانسیون میتوان بهعنوان یک سیال تک فازی در نظر گرفت. دیدگاه اول به فهم بهتر انتقال حرارت توسط فازهای جامد-مایع کمک میکند. در دیدگاه دوم ذرات جامد و مایع در نافوسیال باید عواملی نظیر جاذبه، حرکت براونی، تشکیل لایه در سطح مشتر ک جامد-مایع، خوشهای شدن نانوذرات، اصطکاک بین سیال و ذرات جامد مدنظر قرار گیرند. ضمن این که نفوذ براونی، تعادل میان باید عواملی نظیر جاذبه، حرکت براونی، تشکیل لایه در سطح مشتر ک جامد-مایع، خوشهای شدن نانوذرات، اصطکاک بین سیال و ذرات جامد مدنظر قرار گیرند. ضمن این که نفوذ براونی، تعادشینی و پراکندگی نیز به صورت همزمان میتواند وجود داشته باشد. در غیاب دادههای تجربی استفاده از مدل دو فازی برای بررسی نانوسیال ممکن نخواهد بود. درحالی که با اصلاح مدل تک فازی میتوان برخی از عوامل مذکور را در معادلات لحاظ کرد.

[\]S.E.B.Maiga

۱–۳–۸ کاربرد نانوسیالات

امروزه به دلیل گرایش برای کوچک کردن وسایل نظیر وسایل الکترونیکی و افزاش کارایی آن ها، نیاز به خنک سازی موثر این وسایل داریم که این کار نیازمند ارتقای سیستم های حرارتی و خنک کاری است تا بتواند شار حرارتی بالایی را انتقال دهد. نانوسیال ها به دلیل پتانسیل بالا برای افزایش نرخ انتقال حرارت، کاربرد های زیادی دارند، که عبارتند از:

- کاربردهای پزشکی (حرکت نانو-دارو، درمان شناسی سرطان و...)
 - خنک کاری سیستم های الکترونیک
 - خنک کاری سیستم های هسته ای
 - صنایع دفاعی
 - صنايع هوا فضا
 - مبدل های حرارتی
 - صنعت خودروسازى

و بسیاری کاربرد های دیگر نظیر: پیل سوختی، سلول های خورشیدی و ... که سبب شده است در دهه- ی اخیر استفاده از نانوسیال ها برای افزایش انتقال حرارت بسیار مورد توجه قرار گیرد.

فصل ۲ مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

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

جابهجایی اجباری در کانال و تزریق مایع برای خنک کاری 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.

در این بخش مروری بر مطالعات و تحقیقات حائز اهمیت در زمینه جریان و انتقال حرارت نانوسیالات در مقیاس میکرو خواهیم داشت.

۲-۲- مروری بر کار های گذشته

اخیراً استفاده از نانوسیالات که در حقیقت سوسپانسیون پایداری از نانوفیبرها و نانوذرات جامد هستند، به عنوان راهبردی جدید در عملیات انتقال حرارت مطرح شده است. تحقیقات اخیر روی نانوسیالات، افزایش قابل توجهی را در هدایت حرارتی آنها نسبت به سیالات بدون نانوذرات و یا همراه با ذرات بزرگتر (ماکروذرات) نشان میدهد.

از سوی دیگر، پیشرفت در زمینه ی سیستم های میکروفلوئیدیک در دهه اخیر سبب رشد سریع در کاربرد های آن در تحلیل های شیمیایی و زیستی شده است. ظهور این دستگاه ها سبب در اختیار داشتن ابزار قدرتمندی برای کوچک سازی و اتوماسیون (خودکارسازی) سیال و تحلیل آن شده است. به خصوص در کاهش مصرف واکنش گر و کاهش وقت و هزینه در روند تحلیل. بنابراین فهم و درک این پدیده ها و خواص جریان در ساختارهای اولیه نظیر میکروکانال های انبساطی، بسیار ارزشمند باشد.

سیسیتم های خنک کننده، یکی از مهم ترین دغدغه های کارخانه ها و صیایعی مانند میکروالکترونیک و هر جایی است که به نوعی با انتقال گرما رو به رو باشد. با پیشرفت فناوری در صنایعی مانند میکروالکترو- نیک که در مقیاس های زیر صد نانومتر عملیات های سریع و حجیم با سرعت های بسیار بالا (چند گیگا هرتز) اتفاق میافتد و استفاده از موتورهایی با توان و بار حرارتی بالا اهمیت به سزایی پیدا می کند، استفاده از سیستم های خنک کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب ناپذیر است. بهینه سازی سیستمهای انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به وسیله افزایش سطح آن ها صورت می گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه ها می شود؛ لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک کننده های جدید و مؤثر نیاز است و نانوسیالات به عنوان راه کاری جدید در این زمینه مطرح شدهاند [۹].

نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص حرارتی، توجه بسیاری از دانشمندان را در سالهای اخیر به خود جلب کرده است. به عنوان مثال مقدار کمی (حدود یک درصد حجمی) از نانوذرات مس یا نانولولههای کربنی در اتیلن گلیکول یا روغن به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۵۰ درصدی در هدایت حرارتی این سیالات ایجاد می کند [۳۸ و ۳۹]، در حالی که برای رسیدن به چنین افزایشی در سوسپانسیون های معمولی، به غلظتهای بالاتر از ده درصد از ذرات احتیاج است؛ این در حالی است که مشکلات رئولوژیکی و پایداری این سوسپانسیون ها در غلظت های بالا مانع از استفاده گسترده از نها در انتقال حرارت می شود. در برخی از تحقیقات، هدایت حرارتی نانوسیالات، چندین برابر بیشتر آن ها در انتقال حرارت می شود. در برخی از تحقیقات، هدایت حرارتی نانوسیالات، چندین برابر بیشتر از پیش بینی تئوریها است. از دیگر نتایج بسیار جالب، تابعیت شدید هدایت حرارتی نانوسیالات از دما است [۴۲ و ۴۳]. این تغییرات در خواص حرارتی نانوسیالات فقط مورد توجه دانشگاهیان نبوده و در صورت تهیه موفقیت آمیز و تأیید پایداری آن ها، میتواند آیندهای امیدوار کننده در مدیریت حرارتی صنعت را رقم بزند. البته از سوسپانسیون نانوذرات فلزی، در دیگر زمینه ها از جمله صنایع دارویی و صنعت را رقم بزند. البته از سوسپانسیون نانوذرات فلزی، در دیگر زمینه از جمله صنایع داروی و درمان سرطان نیز استفاده شده است [۴۴]. به هر حال تحقیق در زمینه نانوذرات، دارای آیندهای

۲-۲-۱ هدایت حرارتی نانوسیال

هدایت حرارتی نانوسیال بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده است. از آن جا که نانوسیال جزو مواد مرکب و کامپوزیتی محسوب می شود، هدایت حرارتی آن به وسیله تئوری متوسط مؤثر به دست می آید که به وسیله موسوتی، کلازیوس، ماکسول و لورانزا در قرن ۱۹ به دست آمد [۲۵ و ۴۶].

f) اگر از تأثیرات سطح مشترک نانوذرات کروی صرف نظر شود، در مقادیر بسیار اندک نانوذرات fجزء حجمی نانوذرات) همه مدل های منتج از تئوری متوسط مؤثر، حل یکسانی دارند. در مواردی که نانوذرات دارای هدایت حرارتی بالایی باشد، پیش بینی میشود که افزایش هدایت حرارتی نانوسیال $f \times S$ خواهد شد؛ که این پیش بینی، تخمین خوبی برای مواردی است که هدایت ذرات بیشتر از ۲۰ برابر هدایت حرارتی سیال باشد[۴۷].

بسیاری از تحقیقات تطابق خوبی با این پیش بینی دارد، از جمله میتوان به تحقیقات زیر اشاره کرد: نانوسیال کاربید سیلیکون با اندازه ۲۶ نانومتر و نانوسیال آلومینا-آب و آلومینا-اتیلن گلیکول [۴۸]. مقاومت سطح مشترک نانوذرات و سیال اطراف آن پیش بینی این تئوری را کاهش میدهد، البته هر چه ذرات ریزتر باشند این مقاومت کاهش پیدا میکند. در غلظت های بالای نانوذرات. اگر تودههای نانوذره کوچک باشد، تئوری متوسط مؤثر خوب جواب میدهد؛ زیرا توده نانوذرات منفرد است (۴۹].

در تودههای متراکم نانوذرات، دانسیته نسبی تقریباً ۶۰ درصد است و در مواردی که توده ها از نظر وضعیت ساختمانی بازتر باشد، افزایش بیشتری را مشاهده می کنیم، که نتایج آزمایشی نیز همین را نشان می دهد [۵۰]؛ البته هدایت حرارتی نانوذرات توده ای، کوچک تر از ذرات منفرد است که عامل مهمی در مقابل هدایت حرارتی بالای نانوذرات نیست.

بیشترین تحقیقات روی هدایت حرارتی نانوسیالات، در زمینه سیالات حاوی نانوذرات اکسید فلزی انجام شده است. ماسودا^۱ [۵۱] افزایش ۳۰ درصدی هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۴/۳ درصد حجمی آلومینا به آب گزارش کرده است. لی^۲[۴۸] افزایش ۱۵ درصدی را برای همین نوع نانوسیال با همین

¹ Masuda

² Lee

درصد حجمی گزارش کرده است که تفاوت این نتایج را ناشی از تفاوت در اندازه نانوذرات به کار رفته در این دو تحقیق میداند. قطر متوسط ذرات آلومینای به کار رفته در آزمایش اول ۱۳نانومتر و در آزمایش دوم ۳۳ نانومتر بوده است. زای^۱ و همکاران [۵۲–۵۳] افزایش ۲۰ درصدی را برای ۵ درصد حجمی از همین نانوذرات گزارش کردهاند.

گروه مشابهی [۵۰] برای نانوذرات کاربید سیلیکون نیز به نتایج مشابهی رسیدند. لی بهبود نسبتاً کمتری را در هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید مس، نسبت به نانوذرات آلومنیا مشاهده کرد؛ در حالی که ونگ^۲ و همکاران [۵۴] ۱۷ درصد افزایش هدایت حرارتی را برای فقط ۴/۰ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس در آب گزارش کرده است. برای نانوسیال با پایه اتیلن گلیکول، افزایش بالای ۴۰ درصد برای ۳ درصد حجمی مس با متوسط قطر ۱۰ نانومتر گزارش شده است.

پتل^۳ [۴۱] افزایش بالای ۲۱ درصد برای سوسپانسیون ۰٬۰۱۱ درصد حجمی از نانوذرات طلا و نقره که به ترتیب در آب و تولوئن پراکنده شده بودند را مشاهده کرد. در مواردی هم هیچ افزایش قابل توجهی در هدایت مشاهده نشده است [۵۵]. اخیراً تحقیقات دیگری روی وابستگی هدایت به دما برای غلظت های بالای نانوذرات اکسید فلزات و غلظت های پایین نانوذرات فلزی در حال انجام است که در هر دو مورد در محدوده دمای ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد افزایش ۲ تا ۴ برابری در هدایت مشاهده شده است و در صورت تأیید این خواص برای دما های بالاتر میتوان نانوسیال را در سیستم های گرمایشی نیز استفاده کرد. بیشترین افزایش هدایت در سوسپانسیون نانولوله های کربنی گزارش شده است که علاوه بر هدایت حرارتی بالا، نسبت طول به قطر بالایی دارند. از آن جا که نانولوله های کربنی، تشکیل یک شبکه فیبری میدهند، سوسپانسیون آن ها بیشتر شبیه کامپوزیت های پلیمری عمل میکند. بیرکاک^۴ [۵۶] افزایش ۱۲۵ درصدی هدایت را در اپوکسی پلیمر نانولوله حاوی ۱ درصد نانولوله تک دیواره گزارش کرد، همچنین مشاهده کرد که با افزایش دما، هدایت حرارتی افزایش

¹ Xie

- ^v Wang
- ^v Patel

^{*} Biercuk

چوی[۳۹] برای سوسپانسیون یک درصد نانولوله های چند دیواره در روغن ۱۶ درصد افزایش هدایت حرارتی گزارش کرده است. گزارش ها و تحقیقات مختلفی در زمینه افزایش هدایت حرارتی سوسپانسیون نانولوله کربنی ارائه شده است؛ زای [۵۷] افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی هدایت حرارتی را در سوسپانسیون ۱ درصد حجمی با سیال آب گزارش کرده است. ون و دینگ^۱ [۳۳] نیز ۲۵درصد افزایش هدایت را در سوسپانسیون ۸/۰ درصد حجمی در آب گزارش کرده است. اسیل^۲ [۵۵] بیشترین

ون و دینگ افزایش سریع هدایت در غلظت های حدود ۰/۲ درصد حجمی را گزارش کرده و نشان داده است که این افزایش از آن به بعد تقریباً ثابت میماند. در تمامی گزارش ها افزایش هدایت با دما مشاهده شده است؛ هر چند برای دما های بالاتر از ۳۰ درجه سانتی گراد این افزایش تقریباً متوقف می شود.

۲-۲-۲ جریان و انتقال حرارت در نانوسیال

در سالهای اولیهای که محققین با نانوسیال آشنا شدند، تمرکز آن ها بیشتر بر روی مدل سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بود [۲۸–۵۸]. اما در سال های اخیر تمرکز بر روی انتقال حرارت نانوسیال و رفتار جریانی آن می باشد.

اخیراً ضرایب انتقال حرارت نانوسیال در جابهجایی آزاد و اجباری اندازه گیری شده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد علاوه بر این که به هدایت حرارتی بستگی دارد، به خواص دیگری مانند گرمای ویژه، دانسیته و ویسکوزیته دینامیکی نیز وابسته است که البته در این درصدهای حجمی پایین همان طور که انتظار میرفت و مشاهده شد، گرمای ویژه و دانسیته بسیار به سیال پایه نزدیک است [۵۹] . ونگ [۶۰] ویسکوزیته ی آلومینا – آب را اندازه گرفت و نشان داد که هر چه ذرات بهتر و بیشتر پراکنده شوند، ویسکوزیته ی پایینتری را مشاهده می کنیم. وی افزایش ۳۰ درصدی در ویسکوزیته را برای سوسپانسیون سه درصد حجمی گزارش کرد که در مقایسه با نتیجه پک و چو[۱۰]

¹ Wen and Ding

² Assael

، ۳ برابر بیشتر به نظر می رسد که نشان دهنده وابستگی ویکسوزیته به روش تهیه نانوسیال است. ژوان و لی^۱[۲۸] ضریب اصطکاک را برای نانوسیال حاوی ۱ تا ۲ درصد ذرات مس به دست آورد و نشان داد که این ضریب تقریباً مشابه سیال پایه آب است. ایستمن^۲ [۶۱] نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابهجایی اجباری سوسپانسیون ۰/۹ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس، ۱۵ درصد بیشتر از سیال پایه است.

ژوان و لی [۲۸] ضریب انتقال حرارت جابه جایی اجباری در جریان آشفته را نیز اندازه گرفتند و نشان دادند که مقدار کمی از نانوذرات مس در آب دیونیزه شده، ضریب انتقال حرارت را به صورت قابل توجهی افزایش میدهد، به طور مثال افزودن ۲ درصد حجمی از نانوذرات مس به آب، حدود ۳۹ درصد د انتقال حرارت آن را افزایش میدهد. در حالی که در تناقض با نتایج بالا، پک و چو [۱۰] کاهش ۱۲درصدی ضریب انتقال حرارت را در سوسپانسیون حاوی ۳ درصد حجمی از آلومینا و تیتانا در همان شرایط مشاهده کردند. پوترا^۳ [۶۲] با کار روی جابجائی آزاد، بر خلاف هدایت و جابهجایی اجباری، کاهش انتقال حرارت را مشاهده کرد.

خیلی از مطالعات تجربی برای نانوسیال در مقیاس ماکرو و میکرو انجام شده است [۳۳–۶۳–۶۴ و [۶۵]. ون و دینگ [۳۳] در سال ۲۰۰۴ انتقال حرارت نانوسیال water - Al₂O₃ در ناحیه ی ورودی یک لوله ی مسی با قطر ۴/۵ میلی متر و تحت شار حرارتی ثابت را بررسی کردند. اندازه گیری آن ها انتقال حرارت را مخصوصاً در ناحیه ی ورودی لوله، نشان داد. آن ها این رفتار را به اثر مهاجرت ذره نسبت دادند (تمرکز حجمی نانوذره ی غیر یکنواخت) که ضخامت لایه مرزی حرارتی را کاهش می دهد. هریس^۴ و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۰۶ نانوذرات اکسید مس و آلومینیوم در آب را برای لوله ی حلقوی با قطر داخلی ۶ میلی متر و قطر خارجی ۳۲ میلی متر، بررسی کردند. آن ها نتایج تجربی را با نتایج مدل همگن (روابط تک فازی با خواص موثر نانوسیال) بررسی کردند و دریافتند مدل همگن (تک فاز)، بهبود انتقال حرارت مخصوصاً در تمرکز حجمی بالا را، به خوبی حدس نمی زند.

^v Putra

^{&#}x27; Xuan and Li

² Eastman

⁴ Heris

در بررسی تئوری انتقال حرارت و جریان نانوسیال معمولاً از مدل های هموژن (تک فاز) و دو فازی استفاده می شود. در مدل تک فاز سرعت و دما برای ذره و سیال پایه یکسان در نظر گرفته می شود، بنابراین معادلات تک فاز با خواص ترموفیزیکی موثر مناسبی برای نانوسیال، قابل حل است. بیشترین مطالعات تئوری در این زمینه بر اساس روش هموژن است [۲۱-۶۶ و ۶۷].

برخلاف مدل هموژن، در مدل دو فازی نانوذره و سیال پایه به عنوان دو فاز جداگانه و با سرعت و دمای متفاوت در نظر گرفته می شوند. در این روش تعامل بین فازها در معادلات حاکم موثر می باشد. مطالعات اندکی برای بررسی نانوسیال ها به روش دو فازی انجام شده است. بهزاد مهر و همکاران [۸۸] در سال ۲۰۰۷ از مدل دو فازی مخلوط ^۱برای مطالعه ی انتقال حرارت جابجایی آشفته ی نانوسیال در یک کانال مدور، استفاده کرده است. آن ها با مقایسه ی نتایج خود با نتایج تجربی نشان دادند که نتایج مدل دو فازی دقیق تر از نتایج مدل هموژن است. میرمعصومی و بهزاد مهر [۶۹] در سال ۲۰۰۸ از همین روش برای بررسی انتقال حرارت آزاد و اجباری در یک لوله استفاده کردند. میرمعصومی و بهزاد مهر [۰۷] در سال ۲۰۰۸ و اکبری نیا و لائور^۲ [۲۱] در سال ۲۰۰۹، اثر اندازه ی نانو ذرات روی انتقال حرارت آزاد و اجباری در نانوسیال را با استفاده از روش دو فازی مخلوط بررسی کردند. در هر دو مطالعه، افزایش انتقال حرارت با کاهش اندازه ی نانوذرات، گزارش شده است.

کوروفسکی^۳ و همکاران [۷۲] در سال ۲۰۰۹ سه روش متفاوت هموژن، اویلری-لاگرانژی و مخلوط را برای شبیه سازی نانو سیال در یک کانال مینی، به کار بردند. نتایج آن ها در هر سه روش تقریبا رفتار مشابهی را نشان داد. فارد^۴ و همکارانش [۷۳] در سال ۲۰۱۰، روش های تک فاز و دو فاز را برای مطالعه ی انتقال حرارت نانو سیال در یک لوله به کار بردند. برای نانوسیال مس – آب با غلظت %0/2 ، خطای نسبی مدل تک فاز را در مقایسه با نتایج تجربی،۱۶٪ گزارش کردند، در حالی که این خطا برای مدل دو فاز تنها ۸٪ گزارش شده است.

لطفی و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۰ به صورت عددی به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال با دو مدل تک فاز و دو فازی در جریان آرام و آشفته پرداختند. نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم

¹ Mixture

² Laur

³ Kurowski

⁴ Fard

را داخل یک لوله یافقی عبور دادند. نتایج را با روابط موجود مقایسه و اعتبار سنجی کردند. نتایج هر دو مدل را نیز مقایسـه کردند. با مقایسـه نتایج آزمایشـگاهی و مدلها مشـخص شد که مدل مخلوط دقیق تر است.

صفار اول و همکاران [۷۵] در سال ۲۰۱۱ ، انتقال حرارت نانوسیال را در یک میکروکانال مستطیلی و با استفاده از روش دو فازی اویلری – اویلری بررسی کردند. آن ها بیان کردند که نتایج مدل دو فازی در مقایسه با مدل تک فاز، بهبود انتقال حرارت بالاتری را نشان می دهد.

محمد کلاته و همکاران [۷۶] در سال ۲۰۱۰ انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال با چشمه ی حرارتی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. در روش عددی نیز از مدل دو فازی اویلری-اویلری استفاده کردند. آن ها گزارش کردند که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، افزایش می یابد، همین طور کاهش قطر نانوذرات نیز سبب تقویت عدد ناسلت می شود.

کشاورز و محمدی [۷۷] در سال ۲۰۱۳ عملکرد حرارتی نانو سیال آب – آلومینیوم در یک مینی کانال با شار حرارتی ثابت را با مدل های تک فاز و دو فاز بررسی کردند. در این مطالعه مشاهده شده است که مدل های دو فاز نسبت به مدل تک فاز، انطباق بهتری با نتایج تجربی دارند. البته در تراکم حجمی پایین این اختلاف بین مدل تک فاز و دو فاز حس نمی شود، ولی با افزایش تراکم حجمی به بالاتر از ۱٪ و یا در رینولدز های بالا، مدل تک فاز انحراف بیشتری از نتایج تجربی می گیرد. بین سه مدل دو فازی (اویلری– اویلری، مخلوط و کسر حجمی سیال^۱) نیز اختلاف بسیار نا چیزی وجود دارد.

فرهادی و همکاران [۷۸] در سال ۲۰۱۳ ، انتقال حرارت نانوسیال آب – آلومینیوم را در یک لوله ی موج دار مارپیچی و به روش دو فازی مخلوط بررسی کردند. شریعت و همکاران [۷۹] در سال ۲۰۱۴ ، تاثیر قطر نانوذرات را بر روی انتقال حرارت نانوسیال در یک مجرای بیضوی و با مدل دو فازی مخلوط بررسی کردند. آن ها گزارش کردند که در یک عدد رینولدز و ریچاردسون، افزایش قطر نانوذرات، سبب کاهش عدد ناسلت می شود، همچنین افزایش عدد ریچاردسون سبب افزایش عدد ناسلت می شود. در واقع یک رابطه ی غیر خطی بین اندازه نانوذرات و جریان نانوسیال برقرار است.

۲-۲-۳ جریان در میکروکانالهای انبساطی

مطالعات تجربی اخیر نشان داد که ضریب اصطکاک در کانال های مسطح (دوبعدی) در مقیاس میکرو تا حدودی بالاتر از تئوری های قدیمی برای جریان کانال های در مقیاس بزرگتر است. اولیویرا^۱ [۸۸] در سال ۲۰۰۳ و ریولتا^۲ [۸۸] در سال ۲۰۰۵ اشاره کردند که رینولدز بحرانی به شدت به نرخ انبساط کانال بستگی دارد، که این نتایج فقط برای هندسه های دو بعدی ارائه شده است. مدل های عددی دو بعدی و سه بعدی میکروکانال ها، فرضیات متفاوتی را در نظر می گیرند. برای مثال شبیه سازی دو بعدی، عمق هندسه میکروکانال ها، فرضیات متفاوتی را در نظر می گیرند. برای مثال شبیه [۲۸] در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد که مدل شبیه سازی دو بعدی تنها می تواند رفتار جریان را در میکروکانال های انبساط ناگهانی با ضریب انبساط بالا را پیش بینی کند. به علاوه روشین شد که با وجود این که ابزار میکرو سیالی هندسه ی مسطح (دو بعدی) دارند ولی در نزدیکی ناحیه ی انبساط جریان، به طور محلی سه بعدی می شوند.

در میکروکانال های انبساطی، قطر هیدرولیکی موثر میکروکانال به دلیل تشکیل گردابه ها، کاهش می یابد و از این رو مقاومت جریان سیال در آن افزایش می یابد. در واقع از میکروکانال های انبساطی می توان به عنوان یک یکسو کننده ی میکروفلوئیدیک استفاده کرد، مانند: یکسو کننده تسلا، ساختار های نازل – دیفیوزری ساده و یا ساختار های زنجیری نازل – دیفیوزری. این یکسو کننده های جریان بدون هیچ دریچه ی متحرک و تنها با استفاده از اختلاف مقاومت بین جریان سیال جلو رونده و جریان برگشتی، به کار یکسو کنندگی جریان می پردازد.

چن^۴ و همکاران [۸۳] در سـال ۲۰۱۰، با قرار دادن یک بلوک مســـتطیلی در یک میکروکانال انبسـاطی، بهبود یکسو کنندگی جریان سیال را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. ون دینتر^ه و

- ³ Tsai
- ⁴ Chen

¹ Oliveira

² Revuelta

⁵ Van Dinther

همکاران [۸۴] در سال ۲۰۱۲، جریان سوسپانسیون ها را در سیستم های میکروفلوئیدیک بررسی و تکنیک های تجربی که روی گرادیان سرعت و غلظت سوسپانسیون ها تمرکز داشتند را مرور کردند.

چای^۱ و همکاران [۸۵] در سال ۲۰۱۳ ، بهبود انتقال حرارت در یک میکروکانال با انبساط های پریودیک را به صورت عددی بررسی کردند. آن ها نشان دادند که ضریب اصطکاک ظاهری و عدد ناسلت به دست آمده از حل عددی، انطباق خوبی با داده های تجربی دارد. آن ها [۸۶] در سال ۲۰۱۴ ، الگوی جریان دو فازی آب – هوا در میکروکانال ها را به صورت تجربی بررسی کردند و در سال ۲۰۱۵ نیز، الگوی جریان دو فازی آب – هوا و افت فشار اصطکاکی آن در میکروکانال با مقطع انبساطی را به صورت تجربی بررسی کردند [۸۷].

۲-۳- تعريف مساله

موضوع پژوهش حاضر بررسی عددی جریان آرام نانوسیال مس – آب، در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های ایزوترم به منظور بررسی رینولدز بحرانی و انتقال حرارت میباشد. تاثیر پارامترهای مختلف از جمله درصد حجمی نانوذرات، قطر نانوذرات، نسبت انبساط و تزریق و مکش نانوسیال بر رینولدز بحرانی و انتقال حرارت بررسی شده است. بدین منظور از نرم افزار متلب برای کد نویسی و حل عددی استفاده شده است.

۲-۴- اهداف تحقيق

جریانهای فروصوتی در کانالهای انبساطی از جمله مسائل مهم و اساسی در مکانیک سیالات به شمار میآیند که دارای کاربردهای فراوانی هستند. از این رو در چند دههی اخیر بسیاری از محققان به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی این جریانها پرداختهاند. اما از طرفی همانطور که قبلا گفته شد، با توجه به اینکه در سالهای اخیر استفاده از نانوسیال به جای سیالهای سنتی، محبوبیت بیشتری پیدا کرده است بررسی جریان برای نانوسیال حائز اهمیت زیادی میباشد که متاسفانه در تبدیلات واگرا به آن پرداخته نشده است. از سوی دیگر در بررسی نانوسیالها، مدل دوفاز کارایی بیشتری نسبت به مدل تکفاز دارد. بنابراین در این تحقیق، جریان نانوسیال آب – مس در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های ایزوترم را با استفاده از مدل دو فازی اویلری–اویلری، نوشتن معادلات جرم، مومنتوم و انرژی برای هر فاز و حل معادلات از روش عددی حجم محدود، مورد مطالعه قرار می دهیم.

اثرات ضـریـب انبسـاط میکروکـانـال، اندازه ی نانوذرات، تمرکز حجمی آن ها و عدد رینولدز و همچنین تـاثیر تزریق و مکش از دیوارهی عمودی را، هم بر رینولـدز بحرانی و طول گردابهها و هم بر عدد ناسلت بررسی خواهیم کرد.

۲-۵- جنبه های نوآوری تحقیق

با توجه به مطالعات انجام شده در این فصل و در زمینه ی انتقال حرارت در نانوسیالات و اهمیت سیستم های میکروفلئودیک، نظیر میکروکانال انبساطی، بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. از سوی دیگر، مدل دو فازی جایگزین خوبی برای مدل تک فاز می باشد. زیرا نسبت به مدل تکفاز بهبود انتقال حرارت بیشتری را گزارش میکند که به مقادیر تجربی نزدیکتر میباشد. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلری – وایلری از کارایی خوبی برای مدل تک فاز می باشد. زیرا نسبت به مدل تکفاز بهبود انتقال حرارت بیشتری را گزارش میکند که به مقادیر تجربی نزدیکتر میباشد. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلری – اویلری از کارایی خوبی برخوردار است، زیرا بر خلاف مدل های دیگر که اختلاف دما و سرعت فاز ها را گرفته می شود. در این مدل سرعت و دمای نسبی بین فاز ها و توزیع حجمی نانوذرات در نظر نمی گیرند، در این مدل سرعت و دمای نسبی بین فاز ها و توزیع حجمی نانوذرات در نظر استفاده از مدل دو فازی اویلری – اویلری – اویلری، یک تحقیق ارزشمند در مقیاس میکرو و نانو می باشد. در برسی با سنانو میال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی و پر نور این مدل ای ایران می گیرند، در این مدل سی عددی انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی و برامت در پر مینور این در سیکروکانال انبساط ناگهانی و برامت حقیق ارزشمند در مقیاس میکرو و نانو می باشد. در پر سرسی این تریق و مکش از دیوارهی عمودی، بر جریان و انتقال حرارت پرداخته شده و همهی به رسی اثرات تزریق و مکش از دیوارهی عمودی، بر جریان و انتقال حرارت پرداخته شده است. از پررسبی اثرات تزریق و مکش از دیوارهی عمودی، بر جریان و انتقال حرارت پرداخته شده است. از دیگر جنبههای نوآوری این تحقیق، میتوان به طریقهی یافتن توزیع فشار در الگوریتم سیمپل اشاره دیگر جنبه همای نوار می در دیگر میان و انتقال حرارت برامت هر در ایرونو می باشد و سرک در با توجه به اینکه در مدل دوفاز، دو سری معادلات (معادلات فاز مایع و معادلات فاز حامد) وجود

دارد، در این تحقیق برای حل توزیع فشار با ترکیب معادله پیوستگی فاز جامد با مایع، به یک معادله رسیده شد و از آن به عنوان معادله اصلی برای یافتن توزیع فشار استفاده گردید که در فصل بعد به تفضیل توضیح داده شده است.

۲-۶- طرح کلی پایان نامه

همان طور که گفته شد در این پایان نامه جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب – مس را، به صورت عددی بررسی می کنیم. فصل دوم به مرور کارهای انجام شده در این زمینه اختصاص داده شد. در فصل سوم به تشریح مسئله، هندسه ی مورد نظر، شرایط و معادلات حاکم بر آن می پردازیم و الگوریتم و روش حل عددی را بررسی می کنیم. و در فصل چهارم به ارائه و تحلیل نتایج حاصل می پردازیم. در پایان نیز، فصل پنجم را به نتیجه گیری و ارائه چند پیشنهاد برای ادامه ی مطالعات در این زمینه،

فصل ۳ مدلسازی و روش حل عددی

در فصل قبل به بررسی پژوهشهای تجربی و عددی انجام شده در زمینه نانوسیالها و میکروکانال ها پرداخته شد. همچنین روابط مختلفی که برای محاسبه خواص نانوسیالات ارائه شده است، در فصل اول مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل با تشریح کامل مسئله، به ارائه شرایط مرزی و معادلات حاکم بر مسئله می پردازیم و روش حل عددی بررسی میشود و در انتها به اعتبارسنجی نتایج، بررسی حساسیت به شبکه و نحوه همگرایی حل عددی پرداخته میشود.

۳–۱– مقدمه

در طی سال های اخیر به کمک کامپیوتر های سریع، مهندسین قادر به انجام محاسبات عددی قابل توجهی برای پیش بینی پدیده های مهندسی و بهبود فرآیند طراحی شدهاند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) روشی استاندارد برای طراحی و تجزیه و تحلیل مسائل مرتبط مهندسی شامل پدیده های چند فیزیکی شده است. تعداد زیادی از مطالعات برای حل مکانیک سیالات و مسائل انتقال حرارت مایعات معمولی که از قوانین پایه منتشر شده در متون پیروی می کنند، انجام شدهاند و اغلب آن ها با نتایج تجربی همان مساله سازگار هستند. به هر حال با معرفی نانوسیال در حوزه مکانیک سیالات و انتقال حرارت، راه جدیدی همراه با منافع و چالشهای آن ایجاد گردیده است. روشهایی بسیار همانند مورد استفاده در روشهای مرسوم محاسباتی میتواند برای به کارگیری در صنایع

۲-۳- تشریح مسئله

موضوع پژوهش حاضر بررسی عددی جریان آرام نانوسیال مس – آب، در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های ایزوترم به منظور بررسی رینولدز بحرانی میباشد. تمامی متغیرهایی که بر پدیده شاخهای شدن تاثیرگذار هستند بررسی شده و تاثیر آنها بر انتقال حرارت مطالعه گشته است. سپس تاثیر نفوذ و مکش از دیوارهی عمودی، بر جریان و انتقال حرارت مطالعه گردیده است. بدین منظور از

¹ Computational Fluid Dynamics

نرم افزار متلب برای کد نویسی و حل عددی استفاده شده است. در این بخش ابتدا به توضیح هندسه مسئله پرداخته میشود، سپس معادلات حاکم، روابط مورد استفاده و شرایط مرزی مسئله بیان میشود.

۳–۳– هندسه مسئله

لیتوگرافی نرم یکی از مرسـوم ترین روش های سـاخت تراشـه های میکرونی اسـت. برای ایجاد میکروکانالها ابتدا مُهری از جنس پلیمر SU-8 با اسـتفاده از روشهای لیتوگرافی استاندارد، روی یک زیرلایه شـیشـهای ساخته شده، سپس با اعمال فشار و حرارت طی فرآیندی کنترل شده، میکروکانال مورد نظر در بسـتری از جنس پلیمر ایجاد گردیده است. استفاده از مهر U-8 صافی سطح بهتری را در کف کـانـال منجر شـده و بـه ایجـاد جریـان هـای آرام در داخل کانال کمک مینماید. همچنین دیوارههای کانال به طور قابل قبولی عمود بوده و این مسـئله در تصـاویری که با میکروسـکوب روبش الکترونی گرفته شـده، به خوبی نشـان داده شده است. در این پژوهش جریان آرام نانوسیال مورد نظر که مخلوطی از آب و نانوذرات مس میباشـند، با سـرعت و دمای یکنواخت وارد کانال میشـوند و با دیواره هـای ایزوترم میکروکانال، تبادل گرما انجام میدهند. در شــکل ۲، طول و ارتفاع بالا دسـت میکروکانال (L_1,d)، طول و ارتفاع پایین دست آن (L_2,D) و طول گردابه بعد از ناحیه انبساطی، X_r



شکل ۳-۱- شماتیکی از میکروکانال انبساط ناگهانی

۳-۴- معادلات حاکم

همان طور که گفته شد، در بررسی تئوری انتقال حرارت و جریان نانوسیال معمولا از مدل های هموژن (تک فاز) و دو فاز استفاده میشود. در مدل تک فاز سرعت و دما برای ذره و سیال پایه یکسان در نظر گرفته میشود. برخلاف مدل هموژن در مدل دو فازی، نانوذره و سیال پایه به عنوان دو فاز جداگانه و با سرعت و دمای متفاوت در نظر گرفته میشوند. در این روش تعامل بین فازها در معادلات حاکم موثر میباشد.

با توجه به بررسیهای انجام شده در این زمینه، می توان نتیجه گرفت که مدل دو فازی جایگزین خوبی برای مدل تک فاز میباشد. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلرین – اویلرین از کارایی خوبی برخوردار میباشد، زیرا در این مدل بر خلاف مدل های دیگر که اختلاف دما و سرعت فاز ها را در نظر نمی گیرند، در این روش سرعت و دمای نسبی بین فاز ها و توزیع حجمی نانوذرات در نظر گرفته میشود. بنابراین، در این مطالعه از مدل دو فازی اویلرین – اویلرین برای حل جریان نانوسیال استفاده می کنیم. معادل ه بقای جرم، بقای مومنتوم و انرژی در این مدل را برای هر دو فاز جامد و مایع به صورت زیر مینویسیم [۸۷].

۳-۴-۲ معادله پیوستگی

$$\frac{\partial(\varphi_l\rho_l u_l)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_l\rho_l v_l)}{\partial y} = 0 \tag{1-7}$$

$$\frac{\partial(\varphi_p \rho_p u_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p v_p)}{\partial y} = 0 \tag{(7-7)}$$

که Φ در این جا تمرکز حجمی را نشان میدهد و اندیس های l,p به ترتیب بیانگر فاز نانوذرات جامد و سیال پایه میباشند.

$$\varphi_l + \varphi_p = 1 \tag{(r-r)}$$
الف) مومنتوم در جهت x

$$\frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}u_{l}u_{l})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}v_{l}u_{l})}{\partial y} = -\varphi_{l}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{l}\mu_{l}\frac{\partial u_{l}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi_{l}\mu_{l}\frac{\partial u_{l}}{\partial y}\right) + (F_{d})_{x}$$

$$+ (F_{vm})_{x}$$
(*-*)

$$\begin{split} \frac{\partial(\varphi_p\rho_pu_pu_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_p\rho_pv_pu_p)}{\partial y} \\ &= -\varphi_p\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_p\mu_p\frac{\partial u_p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi_p\mu_p\frac{\partial u_p}{\partial y}\right) \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_d)_x - (F_{vm})_x \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_d)_x - (F_{vm})_x \\ &\quad + (F_{col})_x + (F_{col})_x + F_{col})_x + F_{col}(F_{col})_x \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_{d})_x - (F_{col})_x + F_{col})_x \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_{d})_x + F_{col}(F_{col})_x \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_{d})_x - (F_{col})_x \\ &\quad + (F_{col})_x - (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F_{d})_x - (F_{d})_x \\ &\quad + (F$$

ب) مومنتوم در جهت y

معادله مومنتوم در جهت y هم به همین ترتیب نوشـته میشـود که در آن به خاطر سایز کوچک کانال از نیروی گرانش صرف نظر میشود.

$$\frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}u_{l}v_{l})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}v_{l}v_{l})}{\partial y} \\
= -\varphi_{l}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{l}\mu_{l}\frac{\partial v_{l}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi_{l}\mu_{l}\frac{\partial v_{l}}{\partial y}\right) + (F_{d})_{y} \qquad (9-7) \\
+ (F_{vm})_{y}$$

و

$$\frac{\partial(\varphi_{p}\rho_{p}u_{p}v_{p})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{p}\rho_{p}v_{p}v_{p})}{\partial y} = -\varphi_{p}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{p}\mu_{p}\frac{\partial v_{p}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi_{p}\mu_{p}\frac{\partial v_{p}}{\partial y}\right)$$

$$+ (F_{col})_{y} - (F_{d})_{y} - (F_{vm})_{y}$$
(Y-Y)

نیروهای درگ، جرم مجازی [۸۹] و اندرکنش ذره-ذره[۹۰] در معادله ی مومنتوم، از روابط زیر به دست میآیند:

$$F_d = -\beta(\vec{V}_l - \vec{V}_p) \tag{A-T}$$

$$F_{vm} = 0.5\varphi_p \rho_l \frac{D}{Dt} (\vec{V}_l - \vec{V}_p) \tag{9-7}$$

$$F_{col} = G(\varphi_l) \vec{\nabla} \varphi_l \tag{1.-7}$$

که ضریب اصطکاک (β) [۹۱] ، ضریب درگ (C_d)، مدول اندر کنش ذره – ذره (G) و عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\beta = \frac{3}{4} C_{\rm d} \frac{\varphi_l (1 - \varphi_l)}{d_p} \rho_l |\vec{V}_l - \vec{V}_p| \varphi_l^{-2.65}$$
(11-7)

$$C_{d} = \begin{cases} \frac{24}{Re_{p}} \left(1 + 0.15Re_{p}^{0.697}\right), & Re_{p} < 1000\\ 0.44 & , & Re_{p} \ge 1000 \end{cases}$$
(17-7)

$$G = 1.0\exp(-600[\varphi_l - 0.376]) \tag{17-7}$$

$$Re_p = \frac{\varphi_l \rho_l |\vec{V_l} - \vec{V_p}| d_p}{\mu_l} \tag{14-7}$$

البته باید دقت کنیم که رابطه ی β فقط برای جریان های دوفازی با $0/8 < \varphi_1$ معتبر می باشد. همچنین باید توجه داشته باشیم که روابط بالا برای ذرات در مقیاس نانو حاصل نشده اند، ولی چون این گونه روابط برای ذرات نانو وجود ندارند، ما این روابط را برای آن ها قابل قبول فرض می کنیم.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varphi_l \rho_l u_l c_{pl} T_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\varphi_l \rho_l v_l c_{pl} T_l)
= \frac{\partial}{\partial x} (\varphi_l k_{eff,l} \frac{\partial T_l}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varphi_l k_{eff,l} \frac{\partial T_l}{\partial y}) - h_v (T_l - T_p)$$
(10-7)

$$\begin{split} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p \rho_p u_p c_{p_p} T_p \right) &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p \rho_p v_p c_{p_p} T_p \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + h_v (T_l \qquad (19-7) \\ &- T_p) \\ &- \sigma_{L_p} \end{split}$$

$$h_v = \frac{6(1 - \varphi_l)}{d_p} h_p \tag{1V-T}$$

Pr که برای محاسبه ضریب انتقال حرارت ذره-سیال (h_p) از رابطه زیر استفاده می کنیم که در آن Pr مربوط به سیال پایه است [۹۲] :

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{k_l} = 2 + 1/1Re_p^{0/6} P r^{\frac{1}{3}}$$
(1A-T)

و سپس ضریب هدایت گرمایی موثر (k_{eff}) در معادله انرژی را برای فاز های جامد و مایع از روابط زیر به دست میآوریم[۹۳] :

$$k_{eff,l} = \frac{k_{b,l}}{\varphi_l}$$
(19-7)
$$k_{eff,p} = \frac{k_{b,p}}{\varphi_p}$$
(7.-7)

که

و

$$k_{b,l} = (1 - \sqrt{(1 - \varphi_l)})k_l \tag{(1-7)}$$

$$k_{b,p} = \sqrt{(1 - \varphi_l)} (\omega A + [1 - \omega]\Gamma) k_l \tag{(YY-Y)}$$

$$\Gamma = \frac{2}{(1 - \frac{B}{A})} \left\{ \frac{B(A - 1)}{A(1 - \frac{B}{A})^2} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B - 1)}{\left(1 - \frac{B}{A}\right)} - \frac{B + 1}{2} \right\}$$
(177-7)

$$B = 1/25(\frac{[1-\varphi_l]}{\varphi_l})^{\frac{10}{9}}$$
(14-7)

و برای ذرات کروی هم می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$A = \frac{k_p}{k_l} \tag{72-T}$$

$$Nu = \frac{(hD_h)}{k_l} = q''D_h/k_l(T_w - T_m)$$
 (۲۷-۳)
که دمای میانگین سیال دوفازی را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۹۴]:

شار حرارتی جابجایی دیواره را هم می توان از معادلات انرژی(سیال پایه و نانوذره) ، برای جریان دوفازی، به صورت زیر بدست آورد:

$$q'' = (\varphi_l k_{eff,l} \frac{\partial T_l}{\partial y})_w + (\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial y})_w$$
 (۲۹-۳)
و بر اساس ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی، مقدار متوسط آن به صورت زیر محاسبه می شود:
 $\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx$ (۳۰-۳)
حال می توان عدد ناسلت متوسط را با استفاده از ضریب انتقال حرارت متوسط به دست آورد.

۳-۶- شرایط مرزی

در ورودی، هر دو فاز جامد و مایع با سرعت محوری یکنواخت و یکسان وارد کانال می شوند که این توسط عدد رینولدز جریان مشخص می شود. در خروجی، با توجه به زیاد بودن طول کانال نسبت به عرض آن (100 = ^L/_D) شـرایط توسـعه یافتگی سـرعت برای هر دو فاز در نظر گرفته میشود. شرط عدم ل**غ**زش روی دیواره نیز، برای هر دو فاز استفاده میشود.

در خصوص شرایط مرزی دمایی، نانوسیال با دمای T_{in} وارد کانال می شود و دمای دیواره های دما ثابت، T_w می اشد. شرایط مرزی دمایی در خروجی نیز، برای هر دو فاز در نظر گرفته می شود.



شکل ۳-۲- شرایط مرزی

زمانی که از دیوارهی عمودی نفوذ و مکش وجود ندارد برای سـرعتها شرط عدم لغزش و شرایط دمایی هم، همان شرط دما ثابت دمای دیواره در نظر گرفته میشود.

اما هنگامی که مساله تحت تاثیر نفوذ و یا مکش قرار می گیرد، شرط سرعت بر روی دیواره ی عمودی برابر سرعت ثابت *U*_{inj} در نظر گرفته می شود که مقادیر مثبت نشان دهنده ی نفوذ و مقادیر منفی بیانگر مکش می باشند. برای شرایط دمایی هم هنگامی که نفوذ از دیواره بررسی می شود فرض شده است که سیال با دمای ثابت *T*_{inj} تزریق می شود. اما هنگام مکش، فرض شده است که در این مرز، انتقال حرارتی صورت نمی گیرد. بنابراین گرادیان دما برابر صفر در نظر گرفته شده است.

۲-۲- روش گسسته سازی حجم محدود

معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار جریان نانوسیال که در بخش قبل به آن اشاره شد، به طور مستقیم قابل استفاده برای کارهای عددی نمیباشد و باید در ابتدا آن ها را به شکلی گسسته سازی نمود. به طور مثال معادلات ناویر – استوکس دارای ترم های انتقالی و پخش میباشد که هر یک از ترم ها را میتوان به روش های مختلف و با دقت های متفاوتی گسسته سازی نمود. با گسسته سازی مقادیر مجهول سرعت در جهات مختلف و فشار محاسبه می گردد. بنابراین معادلات گسسته شده، رابطه ای جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط میسازد. روش های گسسته سازی عبارتند از: تفاضل محدود، المان محدود، حجم محدود و روش طیفی. روش حجم محدود در واقع نوعی از روش المان محدود است که بیشتر برای سیالات و انتقال حرارت مناسب است.

در حالت کلی روش های تفاضل محدود برای هندسه ها و قلمروهای پیچیده ذاتاً ضعیف هستند و فقط باید از شـبکه های با سازمان برای حل به وسیله آن ها استفاده کرد. اما روش های حجم محدود یا المان محدود دارای چنین ضـعفی نیسـتند و قابلیت حل در دامنه های پیچیده را افزایش میدهند. در ضـمن چون در این روش ها معادله های انتگرالی مستقیماً در قلمروی فیزیکی به کار می روند، لذا نیازی به تبدیل های ریاضی برای تغییر مختصات (تبدیل فضای فیزیکی به محاسباتی) نمیباشد در حالی که برای اسـتفاده از روش تفاضـل محدود به این مسـئله زیاد بر میخوریم. البته در روش حجم محدود هم از شـبکه با سـازمان و هم بی سـازمان اسـتفاده میشـود. در هر حال گفتنی است که اگر بتوانیم دامنه مسئله را به صورت شبکه با سازمان در آوریم، روش تفاضل محدود به علت راندمان بهتر

انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش های CFD متمایز می کند. دیدگاه حجم محدود بقای محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می کند. این رابطه روشن بین الگوریتم عددی و قاعده ی کلی بقای اصل فیزیکی، یکی از جاذبه های اصلی روش حجم محدود را تشکیل می دهد و درک مفاهیم آن را برای مهندسین، خیلی سادهتر از روش های عنصر محدود و طیفی برای بقای یک متغیر جریان Φ مهیا می کند. برای مثال یک مؤلفه سرعت یا آنتالپی در داخل یک حجم کنترل را، میتوان به صورت یک تساوی بین فرآیند های متفاوت که منجر به افزایش یا کاهش آن میشود نشان داد:

نرخ تغییر Φ در حجم کنترل نسبت به زمان = شار خالص Φ به دلیل جابجایی به داخل حجم کنترل + شار خالص Φ به دلیل نفوذ به داخل حجم کنترل + نرخ خالص تولید Φ در داخل حجم کنترل

برنامه های CFD شامل روش های گسسته سازی مناسب، برای حل پدیده های انتقالی مهم، جابجایی(انتقال به دلیل جریان سیال)، نفوذ (انتقال به دلیل تغییرات ¢ از نقطه ای به نقطه دیگر) و همچنین عبارات چشمه (همراه با تولید یا اتلاف ¢) و نرخ تغییر نسبت به زمان میباشد. همچنین پدیده های فیزیکی اساسی، پیچیده و غیر خطی میباشند، بنابراین یک روش حل تکرار مورد نیاز است. در این پروژه نیز، معادلات حاکم بر جریان نانوسیال مس – آب را بر اساس روش حجم محدود گسسته می کنیم.

۳-۸- حل معادله جریان

برای حل جریان نانوسیال از معادلات پیوستگی و مومنتوم استفاده می کنیم. در معادله پیوستگی تنها پارامتر های سرعت میدان وجود دارند، در حالی که در معادلات مومنتوم در جهت x و y ، علاوه بر ترم های سرعت پارامتر فشار نیز حضور دارد که این غیر یکنواختی در حل معادلات، باعث مشکل در کوپل کردن معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حول میدان و استفاده از معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میادلات می شرعت باعث مشکلی مرحل میدان و استفاده از معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میدان و استفاده از معادلات حاکم وجود نخواهد داشت. در یک میدان جریان واقعی به دلیل مجهول بودن فشار در میدان، معادله پیوستگی به طور غیرمستقیم به معادله ی تصحیح فشار تبدیل می شود. استفاده از شبکه ی جا به جا شده در گسسته سازی میدان جریان، سبب از بین رفتن مشکلات اولیه ی حل میدان جریان می شود و از مواج شدن مقادیر میدان جریان جلوگیری می کند. مشکلات بدین ترتیب برای هر پارامتر میدان جریان یعنی n, n, n, یک حجم کنترل مخصوص به خود در نظر بدین تر می میدان جریان جلوگیری می کند.

در حل معادلات غیر خطی حاکم بر میدان جریان، نیاز به حدس اولیه جریان میباشد که با مقادیر u^* , v^* , p^* معین می گردند. با توجه به مقادیر حدسی، حل میدان چنین خواهد بود:

$$(a_e u_e^*)_i = \sum_i a_{nb} u_{nb}^* + b_i + (p_P^* - p_E^*) A_{e_i}$$
(٣)-٣)

$$(a_n v_n^*)_i = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b_i + (p_P^* - p_N^*) A_{ni}$$
(77-7)

منظور از A_e و A_n و A_n سطح عمود بر شار عبوری از وجه سلول مد نظر میباشد و اندیس i نشان دهنده ی فاز جامد و یا مایع میباشد. اگر u , v , p مقادیر واقعی متغیر های میدان باشند، در این صورت اختلاف مقادیر حدسی و واقعی با v' , v' , v' معین می گردد.

$$u'_i = u_i - u^*_i \tag{(TT-T)}$$

$$v'_i = v_i - v^*_i \tag{(Tf-T)}$$

$$p' = p - p^* \tag{(°a-r)}$$

۳-۹- الگوی سیمپل

در کوپل کردن متغیر های p , v , p چنانچه مقادیر حدسی به مقادیر واقعی نزدیک باشند، در این صورت می توان روابط زیر را برای آن نوشت [79] :

$$\begin{cases} \sum (a_{nb}u'_{nb})_{i} = 0 \rightarrow u_{e_{i}} = u^{*}_{e_{i}} + d_{e_{i}}(p'_{P} - p'_{E}) \\ \sum (a_{nb}v'_{nb})_{i} = 0 \rightarrow v_{e_{i}} = v^{*}_{e_{i}} + d_{n_{i}}(p'_{P} - p'_{E}) \end{cases}$$

$$d_{e} = \left[\frac{A_{e}}{a_{e}}\right]$$
(TY-T)

از آنجایی که این مساله به صورت دو فازی بررسی می شود، انتظار می رود که استفاده از یکی از معادلات پیوستگی به تنهایی، برای یافتن توزیع فشار کار درستی نباشد. بنابراین برای غلبه بر این مشکل و یافتن جوابی دقیق تر، با جمع کردن معادلات پیوستگی (۳-۱) و (۳-۲) با هم، معادله یزیر حاصل می گردد:

$$\frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}u_{l})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{l}\rho_{l}v_{l})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{p}\rho_{p}u_{p})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{p}\rho_{p}v_{p})}{\partial y} = 0$$
(77-7)
(77-7) (74-7) $(x - x) = 0$

$$a_{P}p'_{P} = \sum a_{nb}p'_{nb} + b'$$
 (۳۹-۳)
که در آن، b' به صورت زیر تعریف می شود:

$$b' = ([(\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e] + [(\rho v^* A)_s - (\rho v^* A)_n])_l + ([(\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e] + [(\rho v^* A)_s - (\rho v^* A)_n])_p$$
(*--*)

۳–۹–۱ الگوریتم حل سیمیل

۱- میدان فشار و سرعت حدس زده میشوند.
۲- بر اساس معادلات (۳۱-۳) و (۳۲-۳) ، مقادیر اولیه میدان سرعت را برای هر فاز به دست میآوریم.
۳- معادله تصحیح فشار p' حل می گردد.
۳- معادله تصحیح مقادیر فشار بر اساس رابطه ی p' + p' = p' + p'۵- حل معادلات u, v بر اساس روابط (۳۶-۳)
۶- فشار حدسی جدید جایگزین p' شده و مرحله ی ۱ دوباره آغاز می گردد تا جایی که به مقدار همگرایی برسد.

۳-۱۰- روش حل عددی

ابتدا بی بعد سازی معادلات حاکم بر مسئله را توسط پارامتر های بی بعد زیر انجام میدهیم:

$$X = \frac{x}{D_h}, \quad Y = \frac{y}{D_h}, \quad U_i = \frac{u_i}{u_{in}}, \quad V_i = \frac{v_i}{u_{in}}, \quad p = \frac{p - p_{in}}{\rho_l u_{in}^2}, \quad \theta_i$$
$$= \frac{T_i - T_{in}}{T_w - T_{in}}$$
(f1-7)

 $Re_{i} = \frac{u_{in}D_{h}\rho_{i}}{\mu_{i}}, Pr_{i} = \frac{\rho_{i}C_{p_{i}}v_{i}}{k_{i}}, D_{h} = 2d$ حال معادلات بی بعد شـدهی پیوسـتگی، مومنتوم و انرژی را به روش حجم کنترل گسسته سازی می کنیم. برای گسسته سـازی ترم های جابجایی و دیفیوژن از روش upwind مرتبه ی اول استفاده می کنیم. پس از گسسته سـازی، معادلات حاکم به یک دسته معادلات جبری تبدیل می شوند که به صورت تکراری و روش خط به خط حل می شـوند [۹۵ و ۹۶]. برای حل کوپلینگ سرعت – فشار از الگوریتم سـیمپل استفاده می کنیم [۹۶]. برای استفاده از این الگوریتم، معادله ی تصحیح فشار را از ترکیب معادلات پیوسـتگی فاز های مایع و جامد به دست می آوریم و برای سـرعت بخشیدن به روند ممگرایی، از ضرایبی برای ریلکس کردن سرعت و فشار استفاده شده است. در این الگوریتم ترم 'd در معادله ی تصـحیح فشـر (۳۹-۳) را به عنوان معیار همگرایی در نظر می گیریم و تکرار تا زمانی ادامه می یابد که مقدار 'd ، به سـمت صـفر میل کند. در این جا تکرار را تا جایی که مقدار 'd کوچکتر از آس به عنوان سیال پایه، و همچنین مس به عنوان نانوذرات مقادیر عددی خواص مکانیکی هر یک از آب به عنوان سیال پایه، و همچنین مس به عنوان نانوذرات مقادیر عددی خواص مکانیکی هر یک از فازها، در جدول زیر آورده شده است:

آب	مس	خواص مکانیکی
979 (Kg/m ³)	8933 (Kg/m ³)	چگالی (p)
0.001 (Kg.m/s)	0.089 (Kg.m/s)	ویسکوزیته دینامیکی (μ)
4176 (J/KgK)	385 (J/KgK)	ظرفیت گرمایی ویژه (\mathcal{C}_p)
0.613 (W/m.K)	401 (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی (k)

جدول ۳-۱-خواص مکانیکی آب و مس

۳–۱۱– مطالعهی استقلال حل عددی از شبکهی محاسباتی

برای بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول های به کار رفته در این مسئله، مقدار عدد ناسلت متوسط را به ازای تعداد سلول ها و برای ضریب انبساط ۱:۳، کسر حجمی ۳ درصد در رینولدز ۲۵۰ و

در حالتی که نفوذ و مکش از دیواره عمودی وجود ندارد، محاسبه می کنیم. همانطور که در جدول زیر مشهود است، از شبکه بندی نوع ۲ به بعد، جواب از نوع شبکه بندی مستقل میباشد.

شبکه بندی	$N_y \times N_x$)	$N_y imes N_x$ r	$N_y imes N_x$ r	$N_y \times N_x$ f
بخش ۱	15×75	20×100	25×125	30 × 150
بخش ۲	45×225	60 × 300	75×375	90 × 450
تعداد کل سلولھا	11250	20000	31250	45000
ناسلت متوسط	11.9043	10.8603	10.7399	10.7387

جدول ۲-۳- حساسیت جواب نسبت به شبکه بندی

۳-۱۲ اعتبار سنجی نتایج

برای اعتبار بخشیدن به نتایج به دست آمده، هم از طول گردابهها برای آب خالص و هم عدد ناسلت میانگین کانال ساده در حالت تکفاز استفاده شده است.

طول گردابهها در رینولدزهای کمتر از رینولدز بحرانی برای نسبت انبساطهای ۱:۲ و ۱:۳ با نتایج الیویرا و همکاران [۹۸] و برای نسبت انبساط ۱:۴ با نتایج روکا و همکاران [۹۹]مقایسه شده است:

درصد خطای	(مطالعه حاض) (مطالعه حاض	<u>x،</u> (اليويرا و همكاران [۹۸]	Re
نسبى	h h	(ne
-0.7	1.25	1.26	25
+3.03	1.7	1.65	35
+1.7	2.31	2.27	50
+3.52	3.23	3.12	70
+2.93	4.56	4.43	100

جدول ۳-۳- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۲

درصد خطای	$(uitz 4 \cdot IIbs) = \frac{X_r}{x_r}$	(الیویرا و همکاران [۹۸] (۹۸]	Po
نسبى	(Jule Lucus) h	(Re
+1.6	1.17	1.15	20
+2.8	1.42	1.38	25
+0.2	1.875	1.87	35
+2.6	2.71	2.64	50
+1.07	3.75	3.71	70

جدول ۳-۴- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۳

جدول ۳-۵- طول گردابه برای نسبت انبساط ۱:۴

درصد خطای	(مطالعه حاضر) – <u>Xr</u>	(روکا و همکاران [۹۹]) (روکا و همکاران (۱۹۹]	Ro
نسبى	d		Λt
+3.3	2.06	1.994	20
+1.9	3.7	3.631	40
+0.8	5.42	5.374	60
+1.4	6.35	6.262	70

همانگونه که در سـه جدول بالا مشـاهده می شود، انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد و بیشینهی خطا کمتر از ۴ درصد میباشد.

با ایجاد تغیراتی در کد، (حذف معادلات فاز جامد و قرار دادن لزجت و چگالی موثر به جای لزجت و چگالی فاز مایع و …) کد از حالت دوفاز به حالت تکفاز تبدیل می شود. در این حالت با در نظر گرفتن نسبت انبساط ۱۰۱ ، کانال از کانال انبساط ناگهانی به کانال ساده تبدیل شده و میتوانیم نتایج به دست آمده در این حالت را با نتایج سانترا [۶۷] مقایسه کنیم.

در جـدول زیر درصـد افزایش ناسـلت میانگین نسـبت به آب خالص با نتایج سـانترا، برای Re = 100 مقایسه شده است. همانطور که در نمودار هم مشخص است نتایج از دقت بالایی برخوردار هستند.

$\% \ \frac{Nu - Nu_{p.w}}{Nu_{p.w}}$	$\% \frac{Nu - Nu_{p.w}}{Nu_{p.w}} $ [67]	Phi_p (%)
4.48	4.57	1
8.83	8.738	2
12.32	12.53	3
1.72	15.938	4
18.56	19	5

جدول ۳-۶- درصد افزایش ناسلت میانگین نسبت به آب خالص



شکل ۳-۳- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سانترا [۶۷]

فصل ۴ ارائه و تحلیل نتایج

در فصل قبل با تشریح کامل مسئله و حل عددی آن، به اعتبارسنجی نتایج، بررسی حساسیت جواب نسبت به شبکهبندی و نحوه همگرایی حل عددی پرداخته شد. در این فصل اثر پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، غلظت حجمی نانوذرات، قطر نانوذرات و ضریب انبساط میکروکانال و همچنین اثرات تزریق و مکش نانوسیال از دیواره عمودی میکروکانال بر روی اندازه گردابه ها و رینولدز بحرانی و انتقال حرارت، در نمودارها و شکلهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

۴–۱– رینولدز بحرانی

در تبدیلات واگرای متقارن صفحه ای با افزایش سطح مقطع کانال، متوسط سرعت جریان کاهش می یابد و فشار استاتیکی افزایش می یابد. از آنجا که سرعت در مجاورت دیوارههای کانال بسیار کم می باشد، این افزایش فشار بر نیروی اینرسی غلبه کرده و سبب وقوع جدایش و در نتیجه تشکیل گردابه مجاور دیوارهی کانال می گردد. در رینولدزهای پایین میدان جریان پایدار بوده و گردابهها با جهت چرخش متضاد پدید می آیند. با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش فشار انبساطی، نیروهای ویسکوز دیگر قادر به حفظ ساختار گردابهها به صورت متقارن نیستند و به همین دلیل جریان بعد از شاخهای شدن گفته می شود. همانگونه که در فصل دوم آورده شد، الیویرا [۸۰] این پدیده را برای آب خالص بررسی کرد و اثر نسبت انبساط را بر روی رینولدز بحرانی گزارش کرد. برای مثال، برای نسبت انبساط ۱۰۳، رینولدز بحرانی ۸۴ گزارش شده است.

از آنجایی که برای بررسی پدیده ی شاخه ای شدن برای نانوسیال ها مطالعه ای صورت نگرفته است، در این قسمت همه ی عواملی که بر این پدیده تاثیر گذار هستند بررسی شده اند. در ابتدا برای تاکید بر معتبر بودن نتایج، رینولدز بحرانی با در نظر گرفتن نسبت حجمی ذرات جامد برابر با صفر درصد برای نسبت انبساط ۱۰۳ به دست آمده است که در نمودار زیر مشاهده می شود. در این حالت رینولدز بحرانی ۱۱۰ گزارش شده است. تفاوتی که در مقدار عدد رینولدز گزارش شده در این تحقیق، با رینولدز معرفی شده توسط الیویرا مشاهده می شود، صرفا به دلیل تفاوت در تعریف قطر هیدرودینامیکی در تعریف رینولدز می باشد. زیرا در تحقیق الیویرا و همکاران، قطر هیدرودینامیکی برابر با قطر ورودی کانال در نظر گرفته شده است در حالی که در تحقیق حاضر، دو برابر قطر ورودی کانال به عنوان قطر هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به تعریف رینولدز، مشخص است که برای مقایسه این دو تحقیق، نیاز به دو برابر کردن رینولدز معرفی شده توسط الیویرا میباشد. مشاهده میشود که تحقیق حاضر انطباق خوبی با رینولدز بحرانی معرفی شده توسط الیویرا دارد. در جدول زیر مقادیر رینولدز بحرانی در نسبت انبساطهای مختلف با نتایج دیورست و همکاران انبساطهای مختلف آورده شده است.

نسبت انبساط	رينولدز بحراني (تحقيق حاضر)	رینولدز بحرانی (دیورست و همکاران [۱۰۰])
1:2	273	280
1:3	110	108
1:4	73	71.6
1:5	61	57

جدول ۴-۱- مقایسهی رینولدز بحرانی در نسبت انبساطهای مختلف با نتایج دیورست و همکاران [۱۰۰]



شکل ۴-۱- طول گردابهها نسبت به عدد رینولدز برای آب خالص در نسبت انبساطهای مختلف

۲-۴ اهمیت ترم های نیرویی معادله مومنتوم بر روی طول گردابهها

در معادله ی مومنتوم، ۳ نیروی بین فازی وجود دارد (نیروی درگ، اندرکنش ذره – ذره و جرم مجازی).

در این قسـمت قبل از بررسـی عوامل مختلفی که بر رینولدز بحرانی و طول گردابهها تاثیر گذار هستند به بررسی اهمیت این سـه ترم نیرویی پرداخته شـده است. جدول زیر مقادیر طول گردابهها برای این ۳ ترم، بر حسـب کسـر های حجمی مختلف نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر و ر*ینولدز ۱۰۰*، نشـان میدهد. مشـاهده میشود که نیرو های اندرکنش ذره – ذره و جرم مجازی، اثری بر روی طول گردابهها ندارند، که یکی از دلایل آن ریز بودن نانوذرات می باشـد که سـبب می شود نیروی برخورد ذرات به یکدیگر کوچک و قابل اغماض باشـد. از سـوی دیگر می دانیم که اختلاف سـرعت بین فازها کوچک می باشد و که باعث ناچیز شدن مشتق مادی این اختلاف سرعت ها و در نتیجه سبب کوچک

جدول ۴-۲- اثر ترم های مختلف معادله ی مومنتوم روی طول گردابهها بر حسب کسر های حجمی مختلف نانوذرات با $d_p = 100 nm$

صرف نظر از نیروی جرم مجازی	صرف نظر از نیروی اندرکنش ذره – ذره	صرف نظر از نیروی درگ	در نظر گرفتن تمام نیرو ها	کسر حجمی (%)
3.124	3.125	3.343	3.125	1
1.972	1.976	2.283	1.975	3
1.619	1.623	1.898	1.625	5

اما نیروی درگ، تاثیر بهسزایی روی گردابهها دارد که این ترم را به مهمترین ترم نیرویی در معادلات مومنتوم تبدیل می کند. همچنین اثر نیروی درگ بر گردابهها، با افزایش کسر حجمی نانوذرات بیشتر می شود. بنابراین، صرف نظر از نیرو های اندرکنش ذره – ذره و جرم مجازی نانوسیال در مدل ریاضی، امکان پذیر می باشد در حالی که صرف نظر از نیروی درگ به هیچ وجه در مدلسازی دوفازی صحیح نخواهد بود.

۴–۲–۱ اثر کسر حجمی نانوذرات

یکی از عواملی که تاثیر بهسزایی بر روی رینولدز بحرانی میگذارد کسر حجمی نانوذرات میباشد . در نمودار زیر تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر رینولدز بحرانی نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- تاثیر درصد حجمی نانوذرات بر رینولدز بحرانی

همان گونه که در شکل بالا مشخص است، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث می شود که پدیده شاخهای شدن در رینولدزهای بالاتری اتفاق بیفتد. به عبارتی افزایش درصد حجمی نانوذرات این پدیده را به تعویق انداخته و باعث می شود که جریان تقارن خود را دیرتر از دست بدهد. این امر به این خاطر است که برای حل معادلات جریان به صورت دو فازی، از دو رینولدز (رینولدز سیال پایه، رینولدز ذرات جامد) استفاده شده است و زمانی که درصد حجمی ذرات جامد افزایش می یابد تاثیر رینولدز ذرات جامد افزایش یافته و باعث کاهش اینرسی می گردد. همانگونه که گفته شد، قبل از رسیدن به رینولدز بحرانی جریان پایدار می باشد. در شکل زیر خطوط جریان برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی ۲ درصد اورده شده است و همانطور که مشاهده می شود خطوط جریان متقارن متقارن هستند.



الف- آب خالص

ب- نانوسيال (سيال پايه)

شکل ۴-۳- خطوط جریان برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی ۲ درصد در رینولدز ۱۰۰ اما همانطور که پیش تر گفته شد زمانی که رینولدز، از رینولدز بحرانی بیشتر می شود جریان تقارن خود را از دست میدهد. در شکل زیر کانتور سرعت در رینولدز ۳۰۰ برای نانوسیال با درصد حجمی ۱ درصد آورده شده است که با آب خالص مقایسه شده است.



الف- آب خالص



ب- فاز مايع (سيال پايه)

شکل ۴-۴- کانتور سرعت در $\phi_p = 0/01$ و Re = 300 برای الف) آب خالص. ب) سیال پایه.

از طرفی با بررسی گردابهها در نسبت انبساط ۱:۳ مشخص شد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات در یک رینولدز معین، طول گردابهها کاهش مییابد. همچنین در رینولدز بحرانی طول گردابهها برای نانوسیال با درصد حجمی بالاتر، بزرگتر میباشد. شکل ۴-۵ همین مساله را نشان میدهد.



شکل ۴-۵- طول بیبعد گردابهها نسبت به عدد رینولدز در درصد حجمی های مختلف

از طرفی با بررسی این پارامتر مشخص شد که همان گونه که انتظار میرفت، افزایش درصد حجمی نانوذرات افزایش انتقال حرارت را به همراه خواهد داشت. شکل ۴-۶ اثرات عدد رینولدز جریان و کسر حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت متوسط را برای ذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر نشان میدهد. مشاهده می شود که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات و همچنین عدد رینولدز، افزایش می یابد. بنابراین، می توان از نانوسیال، به عنوان یک سیال کاری موثر در سیستم های خنک کاری استفاده کرد.



شکل ۴-۶- تاثیر درصد حجمی نانوذرات بر ناسلت متوسط

این رفتار قابل پیش بینی است، چون تمرکز حجمی بالای نانوذرات سبب افزایش هدایت حرارتی نانوسیال و به تبع آن افزایش نرخ انتقال حرارت میشود. این شکل نشان می دهد که در یک کسر حجمی مشخص، با افزایش عدد رینولدز، نرخ عدد ناسلت متوسط به آرامی افزایش مییابد. افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش انتقال حرارت میشود؛ افزایش رینولدز با بالا بردن اثرات انتقال حرارت جابجایی و افزایش کسر حجمی با بالا بردن نقش نانوذرات و ضریب هدایت حرارتی موثر، سبب بهبود انتقال حرارت میشوند. این رفتار با مطالعه تجربی وو^{۹۸} و همکاران [۱۰۱] و بررسی عددی لی و کلینسترور^{۸۸} [۱۰۲] برای میکروکانال ها، مطابقت دارد.

⁸⁷ Wu

⁸⁸ Li and Kleinstreuer

۲-۲-۴ تاثیر اندازه ذرات

در مدل تکفاز، هنگام مدلسازی جریان، قطر ذرات در نظر گرفته نمی شود. اما در مدلسازی دوفازی این پارامتر در قسمت نیروی درگ لحاظ شده است. بنابراین میتوان تاثیر اندازه ذرات را بر جریان بررسی کرد و این یکی از مزیتهای مدل دوفاز نسبت به مدل تکفاز میباشد.

در این قسمت برای نسبت انبساط ۱:۳، تاثیر قطر ذرات بررسی شده است. بدین منظور رینولدز بحرانی برای ذرات به قطر ۱۰۰ ، ۷۰ و ۵۰ نانومتر، در کسر حجمیهای مختلف مطالعه شد که در شکل ۲-۴ آورده شده است:



شکل ۴-۷- اثرات قطر ذرات بر رینولدز بحرانی

نکته جالب توجه در نمودار بالا این میباشد که هنگامی که کسر حجمی نانوذرات پایین است اندازه نانوذرات تاثیر چندانی بر روی رینولدز بحرانی ندارد. اما با افزایش کسر حجمی اهمیت اندازه ذرات پررنگ تر میشود و همانطور که در شکل هم مشخص است با افزایش اندازهی ذرات، رینولدز بحرانی افزایش مییابد.

از سـوی دیگر افزایش اندازهی نانوذرات به مقدار اندکی باعث افزایش طول گردابهها میشود که در نمودار زیر برای نسبت انبساط ۱:۳ در درصد حجمی ۳٪، این تاثیر نشان داده شده است:



شکل ۴-۸- تاثیر قطر ذرات بر روی طول گردابهها برای $\phi_p = 0/03$ و نسبت انبساط ۱:۳

همانطور که بیان شـد در معادلات جریان، اندازهی ذرات در ترم نیروی درگ لحاظ میشـود که کوچک شـدن قطر ذرات سـبب بزرگ شـدن ترم نیروی درگ در نزدیکی دیوارهها که محل تشـکیل گردابه است میگردد. بزرگ شدن نیروی درگ کاهش اینرسی در نزدیکی دیوارهها را به دنبال خواهد داشت که باعث میشود تعادل نیرویی زودتر از بین برود و پدیدهی شاخه ای شدن در رینولدز کمتری اتفاق بیفتد. با بیشـتر شدن درصد حجمی نانوذرات، این تاثیر بیشتر میشود که در شکل ۴-۷ به وضوح مشخص میباشد.

از طرفی با بررسی این پارامتر، مشاهده شد که کوچکتر کردن ذرات افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹- تاثیر قطر ذرات بر ناسلت میانگین در رینولدز ۱۰۰

برای توجیه این پدیده میتوان اینگونه گفت که در واقع با کاهش قطر نانوذرات و ریز شــدن آن، سـطح تماس نانوذرات و سـیال بیشـتر می شـود که این امر حرکت براونی نانوذرات را تقویت کرده و سبب بهبود در انتقال حرارت می شود.

۴-۲-۴ تاثیر نسبت انبساط

الیویرا نشان داد که برای آب خالص رینولدز بحرانی به شدت تحت تاثیر نسبت انبساط میباشد و با افزایش نسبت انبساط، پدیده شاخهای شدن در رینولدز پایین تری اتفاق میافتد. با بررسی این پارامتر برای نانوسیال نیز نتیجهی مشابه ای به دست آمد. در نمودار زیر تاثیر این پارامتر بر اندازه گردابهها در کسر حجمی ۳ درصد آورده شده است و همانطور که مشخص است، با افزایش نسبت انبساط طول گردابهها افزایش مییابد و جریان زودتر تقارن خود را از دست میدهد.



شکل ۴-۱۰- تاثیر نسبت انبساط بر طول گردابهها برای درصد حجمی ۳٪

از سوی دیگر با بررسی این پارامتر مشاهده شد که کاهش ضریب نسبت انبساط افزایش انتقال حارت را به دنبال خواهد داشت. شکل زیر ناسلت میانگین را بر حسب عدد رینولدز در نسبت انبساطهای مختلف برای نانوسیال با درصد حجمی ۳ درصد نشان میدهد. مشاهده میشود که مطابق انتظار با کاهش ضریب انبساط و افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت افزایش مییابد.



شکل ۴-۱۱- ناسلت میانگین بر حسب رینولدز در نسبت انبساطهای مختلف برای نانوسیال با درصد حجمی ۳ درصد

۴-۳- اثرات تزریق و مکش

از جمله کارهایی که برای افزایش نرخ انتقال حرارت در یک کانال و یا میکروکانال انبساطی میتوان انجام داد، تزریق و یا مکش از دیواره عمودی میباشد. بنابراین در این قسمت ابتدا تاثیر تزریق و مکش بر پایداری جریان بررسی شده است.

۴–۳–۱ تاثیر نفوذ نانوسیال از دیواره

هنگامی که از دیوارهی عمودی میکروکانال، نانوسیال تزریق می شود در اولین گام باعث میشود که گردابه به جلو هدایت شود. در شکل زیر شماتیکی از مساله آورده شده است:



شکل ۴-۱۲- شماتیکی از مساله تحت تاثیر نفوذ از دیواره

با تزریق نانوسیال از دیواره، گردابه ها به اندازهی X₁ از دیواره فاصله میگرند. در جدول زیر تاثیر افزایش سرعت نفوذ هم بر اندازهی گردابهها و هم بر طول X₁ آورده شده است.

Re	15	50	20	00	25	50
U _{inj} V	X ₁ /h	X _r /h	X ₁ /h	X _r /h	X ₁ /h	X _r /h
0.03	0.3989	2.3138	0.3457	3.2447	0.3059	4.1223
0.07	0.4787	1.9947	0.4521	2.7723	0.4257	3.6702
0.1	0.6782	1.5957	0.6531	2.3417	0.6314	3.1250

جدول ۴-۳- تاثیر سرعت نفوذ از دیواره بر طول گردابه و فاصلهی تشکیل آنها از دیواره

مطابق انتظار با افزایش سرعت نفوذ، گردابه در فاصلهی دورتری از دیواره تشکیل می شود اما طول آن کاهش مییابد. از طرفی با افزایش عدد رینولدز، در یک سرعت نفوذی معین، گردابه ها در فاصلهی نزدیک تری تشکیل شده و طول آنها هم افزایش مییابد. در شکل زیر تاثیر سرعت نفوذ از دیواره بر فاصلهی تشکیل گردابه از دیوارهی عمودی برای رینولدزهای متفاوت آورده شده است.



شکل ۴-۱۳- فاصلهی تشکیل گردابه از دیواره عمودی، نسبت به سرعت نفوذ

همچنین در شـکل ۴-۱۴ تاثیری که سـرعتهای نفوذی مختلف بر طول گردابهها میگذارند آورده شـده اسـت. همانگونه که پیشتر توضـیح داده شـد، با افزایش سـرعت نفوذی، طول گردابه کاهش مییابد. اما افزایش عدد رینولدز، مطابق انتظار این طول را افزایش خواهد داد.



شکل ۴-۱۴- طول گردابه برحسب سرعت نفوذ در رینولدزهای مختلف

از طرفی تزریق نانوسیال از دیواره، بر روی رینولدز بحرانی هم تاثیر گذار میباشد. شکل زیر تاثیر تزریق نانوسیال با سرعتهای ۱ و ۳ و ۵ درصد سرعت ورودی را برای نسبت انبساط ۱:۳ نشان میدهد. مطابق شکل، با افزایش سرعت نفوذ از دیواره، پدیدهی شاخهای شدن در رینولدز بالاتری اتفاق میافتد.



شکل ۴-۱۵- رینولدز بحرانی بر حسب درصد حجمی برای سرعتهای نفوذی مختلف در نسبت انبساط ۱:۳ همانطور که در بالا گفته شد، افزایش سرعت نفوذ، فاصلهی گردابه از دیواره را افزایش داده و طول آن را کاهش میدهد. از آنجایی که اختلاف سرعت بین فازها کوچک میباشد و خطوط جریان در هر دو فاز یکسان می شود، بنابراین در شکل زیر خطوط جریان برای سیال پایه به عنوان کانتور سرعت برای نانوسیال در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲ مکش از دیواره

از آنجایی که در این قسمت، فرض شده است که مانند مسالهی نفوذ، از کل دیوارهی عمودی با سرعت معینی مکش صورت می گیرد، لذا باعث می شود که اثرات شدیدی بر روی رینولدز بحرانی مشاهده شود که دلیل آن تشدید تشکیل گردابه ها می باشد. در نمودار زیر تاثیر مکش بر رینولدز بحرانی آورده شده است و همانطور که مشخص است، هنگامی که سرعت مکش، تنها ۱ درصد سرعت ورودی نانوسیال باشد افت شدیدی در رینولدز بحرانی مشاهده می شود. برای مثال، سرعت مکش ۱ درصدی، باعث افت رینولدز بحرانی در کسر حجمی ۳ درصد از ۲۶۵ به ۲۳۶ می شود.



شکل ۴-۱۶- تاثیر مکش از دیواره بر رینولدز بحرانی

نکته جالب توجه در مورد مکش این موضوع است که با اینکه مکش نقش بهسزایی روی رینولدز بحرانی می گذارد، اما تاثیری بر طول موثر گردابه ها ندارد. در شکل زیر برای نسبت انبساط ۱:۳ و همچنین درصد حجمی ۳٪ ، طول موثر گردابه ها از رینولدز ۱۰۰ تا رینولدز بحرانی، در حالتی که مکش وجود ندارد، با حالتی که مکش با سرعت ۱٪ سرعت ورودی وجود دارد، مقایسه ای شده است:



(ER=3 شکل ۴–۱۷– تاثیر مکش بر طول گردابه ($\phi_p = 0/03$ و

۴-۴- افت فشار بی بعد

در شکل ۴-۱۸ تغیرات فشار بی بعد بر حسب عدد رینولدز برای درصد حجمیهای مختلف نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر آورده شده است.



شکل ۴-۱۸- افت فشار بی بعد در محور تقارن کانال

همانطور که مشاهده می شود، افزایش درصد حجمی ذرات جامد، سبب افزایش افت فشار بی بعد در رینولدزهای مختلف میگردد که این مساله با مطالعات قبلی نیز هم خوانی دارد.

۴-۵- بهبود انتقال حرارت به کمک تزریق و مکش

در این قسمت به بررسی تاثیر نفوذ و مکش بر انتقال حرارت در میکروکانال با نسبت انبساط ۱:۳ پرداخته شده است. لازم به ذکر میباشد که قطر ذرات برابر با ۱۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

از آنجایی که برای محاسبه یناسلت میانگین، تقارن جریان موضوع بسیار مهمی است، برای گزارش عدد ناسلت باید توجه شود که بررسی در هر درصد حجمی، در رینولدزی کم تر از رینولدز بحرانی صورت بگیرد. از طرفی هم برای اینکه مقایسهای بین نانوسیال و آب خالص داشته باشیم، در این بخش ابتدا مساله در رینولدز ۱۰۰ بررسی شده است. تاثیر درصد حجمی نانوذرات و همچنین نفوذ و مکش با سرعتهای مختلف بر عدد ناسلت میانگین، در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۴-۱۹- نرخ عدد ناسلت متوسط بر حسب درصد حجمی برای سرعتهای نفوذی مختلف در رینولدز ۱۰۰ مشاهده می شود که نرخ عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. این رفتار قابل پیش بینی است، چون تمرکز حجمی بالای نانوذرات سبب افزایش هدایت حرارتی نانوسیال و به تبع آن افزایش نرخ انتقال حرارت می شود. این شکل نشان میدهد که با تزریق و مکش، انتقال حرارت افزایش مییابد که وابسته به سرعت نفوذ و مکش میباشد. به عبارتی، در یک کسر حجمی مشخص، با افزایش سرعت، نرخ عدد ناسلت متوسط افزایش می یابد که این تاثیر، در درصد حجمیهای بالاتر، بیشتر میباشد.

یکی از پارامترهایی که همواره در مسالهی انتقال حرارت نقش به سزایی دارد، عدد رینولدز میباشد. بنابراین برای بررسی این پارامتر، با در نظر گرفتن نانوسیال با درصد حجمی ۴ درصد، تغیرات ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز بررسی شده است که در شکل ۴-۲۰ مشاهده می شود.



شکل ۴-۲۰- ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز، برای سرعتهای نفوذی مختلف با درصد حجمی ۴٪

شکل بالا نشان میدهد که با افزایش عدد رینولدز، مطابق انتظار، نرخ انتقال حرارت افزایش مییابد که این موضوع با مطالعات پیشین همخوانی دارد.

پارامتر دیگری که انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار میدهد، دمای نانوسیالی میباشد که از دیواره تزریق میشود. نتایج بالا برای حالتی استخراج شده است که دمای تزریق با دمای ورودی برابر باشد (آmj=0in) . در این قسمت تاثیر دمایی که نانوسیال با آن از دیواره تزریق میشود در رینولدز ۲۰۰ برای نانوسیال با درصد حجمی ۴ درصد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴-۲۱).



شکل ۴-۲۱- ناسلت میانگین بر حسب سرعت نفوذ به ازای دماهای مختلف در رینولدز ۲۰۰ ($\phi_p = 0/04$)

مشاهده می شود که نرخ انتقال حرارت به شدت به دمای نانوسیالی که از دیواره تزریق می شود وابسته است و زمانی که دمای سیال به دمای دیواره نزدیک می شود، افزایش سرعت نفوذ باعث کم شدن عدد ناسلت می شود. به عبارتی انتقال حرارت کاهش می یابد. اما در دماهای نزدیک به دمای ورودی و حتی کمتر از آن، افزایش سرعت نفوذ، افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها

۵–۱– نتیجهگیری

در فصل چهارم اثر پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، غلظت حجمی نانوذرات، قطر نانوذرات و ضریب انبساط میکروکانال بر روی تقارن جریان، در نمودار ها و جداول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس تاثیر نفوذ و مکش از دیواره عمودی، بر جریان و انتقال حرارت مطالعه شد. در این فصل نتیجه گیری و جمع بندی نتایج ارائه می شود و در پایان تعدادی پیشنهاد برای پژوهش های بعدی آورده شده است.

با توجه به اهمیت و رشد سریع سیستم های میکروفلوئیدیک، نظیر میکروکانال انبساطی، بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. از سوی دیگر، از تحقیقات اخیر می توان نتیجه گرفت که مدل دو فازی جایگزین خوبی برای مدل تک فاز می باشد. در بین مدل های دو فازی نیز، مدل اویلری– اویلری از کارایی خوبی برخوردار می باشد، زیرا در این مدل بر خلاف مدل های دیگر که اختلاف دما و سرعت فاز ها را در نظر نمی گیرند، در این روش سرعت و دمای نسبی بین فاز ها و توزیع حجمی نانوذرات در نظر گرفته می شود و همچنین، در این روش دیگر نیازی به مدل های ترموفیزیکی موثر برای نانوسیال نداریم.

در این پروژه، جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب – مس در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیوارههای ایزوترم ، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر ضریب انبساط میکروکانال، رینولدز، کسر حجمی و قطر نانوذرات بر پدیدهی شاخهای شدن مشاهده گردید. سپس با اعمال نفوذ و مکش از دیوارهی عمودی، جریان و انتقال حرارت بررسی شد. جریان نانوسیال با روش دو فازی اویلری – اویلری مدل سازی شده است. در این روش، اختلاف بین سرعت ها و دما های هر دو فاز مایع و نانوذرات در نظر گرفته شده است. در این روش، اختلاف بین سرعت ها و دما های هر دو فاز مایع و حجم محدود، حل شده است. مشاهده شد که سرعت و دمای نسبی بین دو فاز سیال پایه و نانوذرات، بسیار کوچک می باشد.

با حل جریان و انتقال حرارت نانوسیال توسط مدل دو فازی اویلری – اویلری، مشاهده می شود که استفاده از نانوسیال علاوه بر بهبود انتقال حرارت، باعث می شود که تقارن جریان نسبت به آب خالص در رینولدز بالاتری بهم بخورد. به عبارتی افزودن نانوذرات به پایداری جریان کمک می کند. به
طور مثال افزودن ۳ درصـد حجمی از نانوذرات مس به آب، سـبب افزایش رینولدز بحرانی از ۱۱۰ به ۲۶۵ میشـود. بررسـی مسـئله در میکروکانال ها با ضـریب انبساط های مختلف نشان می دهد که با کاهش ضـریب انبسـاط رینولدز بحرانی افزایش یافته و جریان تقارن خود را دیرتر از دسـت میدهد. همچنین، با ثابت نگه داشـتن پارامتر های مختلف، تاثیر اندازهی ذرات بر جریان را بررسـی کردیم که مزیت این مدل را نسـبت به سـایر مدلها نشان میدهد. زیرا برای مثال در مدل تکفاز اندازهی ذرات هیچ تاثیری بر جریان نمیگذارد اما در تحقیق حاضـر به این نتیجه رسـیده شـد که زمانی که درصـد حجمی نانوسیال از ۳ درصد بیشتر باشد، اندازهی ذرات بر روی جریان تاثیر گذار میشوند و با افزایش اندازهی ذرات، رینولدز بحرانی افزایش یافته و جریان دیرتر تقارن خود را از دست میدهد.

با در نظر گرفتن نسبت انبساط ۱۰۳ و همچنین قطر ذرات برابر با ۱۰۰ نانومتر، جریان و انتقال حرارت تحت تاثیر نفوذ و مکش بررسی شد. این تحقیق نشان داد نفوذ از دیواره با کوچک کردن اندازه گردابه ها و دور کردن فاصله ی تشکیل آنها از دیواره، به تقارن جریان کمک میکند و هر چه سرعت نفوذ بیشتر باشد جریان تقارن خود را دیرتر از دست می دهد. دقیقا بر خلاف نفوذ، مکش از دیواره سبب تشدید گردابه ها میگردد و تقارن جریان را در رینولدزی بسیار پایین تر از بین میبرد. به عنوان مثال مکش با سرعت تنها ۲٪ سرعت ورودی سبب کاهش رینولدز بحرانی در درصد حجمی ۴ درصد از ۳۳۶ به ۳۰۷ میگردد. همچنین نشان داده شد که نفوذ نانوسیال از دیواره با دمای پایین، در بهبود انتقال حرارت موثر می باشد اما با افزایش دمای نانوسیال این تاثیر کاهش یافته و حتی زمانی که دمای نفوذ نانوسیال،برابر با دمای دیواره باشد، نتیجه معکوس میگردد.

۵-۲- پیشنهادها

در حال حاضر نانوسیال ها کاربرد های مختلفی دارند که در آینده نیز روز به روز بر تعداد کاربرد های آن ها افزوده می شود. زمینه ی اصلی تحقیقات آینده، استفاده از نانوسیال ها، برای رسیدن به روش های موثر در انتقال انرژی می باشد. نرخ انتقال حرارت در نانوسیال ها به طور عمده، به هدایت حرارتی آن ها بستگی دارد. تکنولوژی بهره گیری از نانوسیال روز به روز در حال توسعه است، بنابراین مطالعه و بررسی نانوسیال ها بسیار حائز اهمیت می باشد. در زیر چند مورد پیشنهادی برای ادامه ی مطالعات در زمینه ی خواص و جریان نانوسیال ها، ذکر می کنیم:

- تاثیر شکل و تراکم حجمی نانو ذرات بر روی هدایت حرارتی نانوسیال ها، که باید در مکانیزم
 های انتقال انرژی مورد مطالعه قرار گیرد.
- بررسی پایداری در پراکندگی نانوذرات؛ در واقع پایداری نانوسیال ها سبب بهبود هدایت حرارتی
 و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت می شود.
 - بررسی و بهبود افزایش افت فشار و توان پمپاژ، که در ارتباط با یکدیگر می باشند.
 - بررسی عملکرد حرارتی نانوسیال در جریان آشفته و ناحیه ی توسعه یافته جریان.
 - مطالعه و بررسی نانوسیال ها، جهت استخراج انرژی از هسته ی زمین.
- بررسی و استفاده از نانوسیال ها، جهت بهبود راندمان سیستم های خنک کاری مورد استفاده
 در راکتور های اتمی.
- بررسی نانوسیال ها در حمل دارو به محل مورد نظر در بدن (targeted drug delivery).
 - مطالعه ی نانوذرات غیر سمی و زیست تجزیه پذیر.

نانوسیالات را می توان در زمینه های مختلفی به کاربرد، اما این کار با موانعی رو به رو است، از جمله این که درباره نانوسیال چند نکته باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد:

- تطابق نداشتن نتایج تجربی در آزمایشگاههای مختلف.
 - ضعف در تعیین مشخصات سوسپانسیون نانوذرات.
- نبود مدلها و تئوریهای مناسب برای بررسی تغییر خواص نانوسیال.

- 1- Tuckerman, D.B., Pease, R.F. (1981) High performance heat sinking for VLSI/*IEEE Electron* Dev. Letts. EDL. p 126–129.
- Suo, M., Griffith, P (1964) Two-phase flow in capillary tubes/ J. Basic Eng. p 576–582.
- 3- Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., Ahah, R.K. (2000) Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design/ Appl. Mech.p 175–193.
- 4- Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M.R (2006) Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels/ Elsevier/Amsterdam.
- **5-** Palm,B (2000) Proceedings of Heat Transfer and Transport Phenomena in Microchannel/Heat Transfer in Microchannel, Begell House Inc, Banff/ Canada.
- 6- Nguyen, N.T., Werely, S.T. (2002) Fundamentals and Applications of *Microfluidics*/ Artech House/Boston.
- 7- Kukowski, R., (2003) MDT- Micro deforamation Technology/ ASME IMECE/ Washington D.C.
- Maxwell, J.C. (1973) A Treatise on Electricity and Magnetism; Clarendon Press/ Oxford.
- **9-** Choi, S.U.S. (1995) Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles *Development and applications of non-Newtonian flows;* ASME, FED/MD 66.
- **10-** Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998) Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles; *Exp. Heat Transfer*. p 151-170.
- **11-**Xuan, Y., Roetzel, W. (2000) Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids; *International Journal of Heat and Mass Transfer*. p 3701-3707.
- **12-**Einstein, A. (1906) "A New Determination of the Molecular Dimensions/, *Annals of Physics*. p 289-306.
- **13-** Everett DH (1988) Basic Principles of Colloid Science. London: Royal Society of Chemistry.
- 14-Brinkman, H.C. (1952) The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions/ *Journal of Chemical Physics*. p 571.
- **15-**Batchelor, G.K. (1997) The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles; *Journal of Fluid Mechanics*. pp 97-117.
- 16-Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., and Angue Mintsa, H. (2007) Temperature and Particle-Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluids - Hysteresis Phenomenon; *International Journal of Heat and Fluid Flow.* p 1492-1506.
- 17- Zhou SQ and R. Ni (2008) "Measurement of the specific heat capacity of waterbasednanofluid," Appl. Phys. Lett., no. 9. (92): 093123–093123–3.

- **18-** Ozerinc, S., Kakac, S., Yazicioglu, A.G. (2010) Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-the-Art Review; *Microfluid. Nanofluid.* p 145-170.
- 19- Hamilton, R.L., Crosser, O.K. (1962) Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems/ *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. p 187-191.
- 20- Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E., Prasher, R.S. (2004) Brownian Dynamics Simulation to Determine the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids; *Journal of Applied Physics*. p 6492-6494.
- **21-** Koo, J., Kleinstreuer, C. (2004) A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids; *Journal of Nanoparticle Research*. p 577-588.
- **22-** Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S. (2005) Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement; *Applied Physics Letters*.
- **23-** Einstein, A. (1956) Investigation on the Theory of Brownian Movement/ Dover/ New York.
- 24-Evans, W., Fish, J., Keblinski, P. (2006) Role of Brownian Motion Hydrodynamics on Nanofluid Thermal Conductivity; *Applied Physics Letters*. 093116-3.
- 25-Bruggeman, D.A.G. (1935) The Calculation of Various Physical Constants of Heterogeneous Substances. I, The Dielectric Constants and Conductivities of Mixtures Composed of Isotropic Substances; *Annals of Physics*. p 636-664.
- **26-**Nan, C., Birringer, R., Clarke, D.R., Gleiter, H., (1997) Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with Interfacial Thermal Resistance/ *Journal of Applied Physics*. p 6692-6699.
- 27- Prasher, R., Phelan, P.E., Bhattacharya, P. (2006) Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid);*Nano Letter.* p 1529-1534.
- 28-Xuan, Y., Li, Q., Hu, W. (2003) Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids/ American Institute of Chemical Engineers Journal; pp 1038-1043.
- 29-Li, Q., Xuan, Y. (2000) Experimental Investigation on Transport Properties of Nanofluids/ *Heat Transfer Science and Technology 2000*, B. Wang, ed, Higher Education Press, Beijing. p 757–762.
- **30-** Incropera, F.P., Dewitt, D.P. (1996) *Fundamentals of heat and mass transfer*/John Wiley & sons/ New York.

- **31-**Xuan, Y., Li, Q. (2005) Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids; *J.Heat Transfer*. p 151.
- **32-** Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G. (2005) heat transfer properties of nanoparticle in fluid dospersions (nanofluids) in laminar flow; *Int. J. Heat Mass Transfe*. p 1107.
- **33-**Wen, D., Ding, Y. (2004) Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at entrance region under laminar flow conditions; *Int. J. Heat Mass Transfer*. p 5181.
- **34-**Xuan, Y., Roetzel, W (2000) Conception for heat transfer correlation of nanofluids; *Int. Heat Mass Transfer*. p 3701.
- **35-**Li, Q., Xung, Y (2002) Convective heat transfer and flow characteristics of Cuwater nanoflui. *Scince in China*, Series E. p 408.
- **36-**Maiga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G., Galanis, N. (2005) Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows; *Int.J. Heat Fluid.* p 530.
- **37-** Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M. (2003) Bouyancy-driven heat transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids;*International Journal of Heat and Mass Transfer*. p 3639.
- **38-**Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ (2001) Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. J. Applied Physics letters. (78): 718-720.
- **39-** Choi SUS, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA (2001) Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. J. Applied Physics Letters. (79): 2252-2254.
- **40-**Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W (2003) Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. J. Heat Transfer. (125): 567-574.
- **41-**Patel HE, Das SK, Sundararajan T, Sreekumaran NA, George B, Pradeep T (2003) Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. J. Applied Physics Letters. (83): 2931-2933.
- **42-** You SM, Kim JH, Kim KH (2003) Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. J. Applied Physics Letters. (83): 3374-3376.
- **43-** Vassallo P, Kumar R, D'Amico S (2004) Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids. Int. J. Heat Mass Trans. (47): 407-411.

- **44-** O'Neal DP, Hirschb RL, Halasc JN, Paynea JD, Westb LJ (2004) Photo-thermal tumor ablation in mice using near infrared-absorbing nanoparticles. J. Cancer Letters. (209): 171-176.
- **45-** Ajayan P M, Endo M, Strano SM (2003) Potential Applications of Carbon Nanotubes. J. Applied Physics letters. (111): 13-62.
- **46-**Landauer R (1978) Electrical conductivity in inhomogeneous media. In Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media. (40).
- **47-**Putnam SA, Cahill DG, Ash BJ, Schadler LS (2003) High-precision thermal conductivity measurements as a probe of polymer/nanoparticle interfaces. J. Appl. Phys. (94): 6785-6788.
- **48-** Lee S, Choi SUS, Li S and Eastman JA (1999) Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. J. Heat Transfer. (121): 280-289.
- 49- Keblinski P, Phillpot SR, Choi SUS, Eastman JA (2002) Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). Int. J. Heat Mass Trans. (45): 855-863.
- **50-**Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y (2002) Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles. Int. J. Thermophys. (23): 571-580.
- 51- Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N (1993) Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid By Dispersing Ultra Fine Particles. Netsu Bussei (Japan). (4): 227-233.
- **52-**Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F and Wu Q (2002) Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. J. Appl. Phys. (91): 4568-4572.
- **53-** Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F (2002) Dependence of the thermal conductivity on nanoparticle-fluid mixture on the base fluid. J. Mater. Sci. Lett. (21): 1469-1471.
- **54-** Zhou LP and Wang BX (2002) A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. Int. J. Heat Mass Trans. (46): 2665-2672.
- **55-** Assael MJ, Chen CF, Metaxa I, Wakeham WA (2004) Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water. Int. J. Thermophys. (25): 971-985.
- **56-**Biercuk MJ, Llaguno MC, Radosavljevic M, Hyun JK, Johnson AT, Fischer JE (2002) Carbon nanotube composites for thermal management. J. Appl. Phys. Lett. (80): 2767-2769.

- **57-**Xie H, Lee H, Youn W, Choi M (2003) Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. J. Appl. Phys. (94): 4967-4971
- **58-**Feng Y, Yu B, Xu P, Zou M (2007) The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. J. Phys.D: Appl. Phys. (40): 3164–3171.
- **59-** Yang HS (2002) Thermal conductivity of nano scale colloidal solution. J. Physical Review Letters. (94): 354-357.
- **60-**Wang X, Xu X, Choi SUS (1999) Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. J. Thermophys. Heat Trans. (13): 474-480.
- **61-** Eastman JA, Choi US, Li S, Soyez G, Thompson LJ, Dimelfi RJ (1999) Novel thermal properties of nanostructured materials. J. Mater. Sci. Forum. (312): 629-634.
- **62-** Putra N, Roetzel W, Das SK (2003) Natural convection of nano-fluids. J. Heat Mass Trans. (39): 775-784.
- **63-**Heris SZ, Etemad SGh, Esfahany MN (2006) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. (33): 529–535.
- **64-** Jung JY, Oh HS, Kwak HY (2009) Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. Int J Heat Mass Transfer. (52): 466–472.
- **65-**Wu X, Wu H, Cheng P (2009) Pressure drop and heat transfer of Al2O3–H2O nanofluids through silicon microchannels. J. Micromech. Microeng. (19): 105020.11pp.
- **66-**Li J, Kleinstreuer C (2008) Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. Int J Heat Fluid Flow. (29): 1221–1232.
- **67-**Santra AK, Sen S, Chakraborty N (2009) Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates. Int J Thermal Sci. (48): 391–400.
- **68-** Behzadmehr A, Saffar-Avval M, Galanis N (2007) Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach. Int J Heat Fluid Flow. (28): 211–219.
- **69-** Mirmasoumi S, Behzadmehr A (2008a) Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. J. Appl. Thermal Eng. (28): 717–727.

- **70-** Mirmasoumi S, Behzadmehr A (2008b) Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube. Int J Heat Fluid Flow. (29): 557–566.
- **71-** Akbarinia A, Laur R (2009) Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach. Int J Heat Fluid Flow. (30): 706–714.
- 72- Kurowski L, Chmiel-Kurowska K, Thullie J (2009) Numerical simulation of heat transfer in nanofluids. J. Computer Aided Chemical Engineering. (26): 967–972.
- **73-** Fard MH, Esfahany MN, Talaie MR (2010) Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model. J. Int Commun. Heat Mass Transfer. (37): 91–97.
- **74-** Lotfi R, Saboohi Y, Rashidi AM (2010) Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different approaches. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. (37): 74–78.
- **75-** Saffar-Avval M, Kalteh M, Abbassi A, Harting J (2011) Eulerian–Eulerian twophase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel. J. International Journal of Heat and Fluid Flow. (32): 107–116.
- 76- Kalteh M, Saffar-Avval M, Abbassi A, Frijns A, Darhuber A, Harting J (2012) Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. J. Applied Thermal Engineering. (36): 260-268.
- 77- Keshavarz M, Mohammadi R (2013) CFD modeling (comparing single and twophase approaches) on thermal performance of Al2o3/water nanofluid in minichannel heat sink. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. xxx (2013) xxx–xxx.
- 78- Farhadi M, Darzi AAR, Sedighi K, Aallahyari SH, Aghajani M (2013) Turbulent heat transfer of Al2O3–water nanofluid inside helically corrugated tubes: Numerical study. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. (41): 68–75.
- **79-** Shariat M, Mokhtari R, Akbarinia A, Rafee R, Sajjadi S.M (2014) Impact of nanoparticle mean diameter and the buoyancy force on laminar mixed convection nanofluid flow in an elliptic duct employing two phase mixture model. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. (50): 15-24.
- **80-** Oliveira PJ (2003) Asymmetric flows of viscoelastic fluids in symmetric planar expansion geometries. J Non-Newt Fluid Mech 114:33–63.
- **81-**Revuelta A (2005) On the two-dimensional flow in a sudden expansion with large expansion ratios. Phys Fluids 17:028102.

- 82-Tsai CH, Chen HT, Wang YN, Lin CH, Fu LM (2007) Capabilities and limitations of 2-dimensional and 3-dimensional numerical methods in modeling the fluid flow in sudden expansion microchannels. J. Microfluid Nanofluid. (3):13–18.
- **83-** Chen HC, Tsai CH, Fu LM, Lin CH (2010) High performance microfluidic rectifier utilizing self-induced virtual valves in a sudden expansion channel with a block structure. In: The 23rd IEEE international conference on micro electro mechanical systems (IEEE-MEMS 2010), Hong Kong, 24–28 Jan 2010.
- 84- Van Dinther AMC, Schroen CGPH, Vergeldt FJ, Van der Sman RGM, Boom RM (2012) Suspension flow in microfluidic devices - A review of experimental techniques focussing on concentration and velocity gradients. J. Advances in Colloid and Interface Science. (173): 23-34.
- 85- Chai L, Xia G, Wang L, Zhou M, Cui ZH (2013) Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion–constriction cross-sections. Int J Heat Mass Transfer. (62): 741–751.
- 86- Chai L, Xia G, Wang L, Zhou M (2014) Gas–liquid two-phase flow patterns in microchannels with reentrant cavities in sidewall. J. Experimental Thermal and Fluid Science. (53): 86–92.
- **87-** Chai L, Wang L, Zhou M, Xia G (2015) Two-phase flow pattern and pressure drop in silicon multi-microchannel with expansion–constriction cross-section. J. Experimental Thermal and Fluid Science. (60): 241–251.
- **88-** Hao YL, Tao YX (2004) A numerical model for phase-change suspension flow in microchannels. Numer. Heat Transfer, Part A. (46): 55–77.
- **89-** Drew DA, Lahey RT (1993) Analytical modeling of multiphase flow. in:Roco,M.C.(Ed.), Particulate Two-Phase Flow. Butterworth–Heinemann, Boston.509–566.
- **90-** Bouillard JX, Lyczkowski RW, Gidaspow D (1989) Porosity distributions in afluidized bed with an immersed obstacle. AIChE J. (35): 908–922.
- **91-**Syamlal M, Gidaspow D (1985) Hydrodynamics of fluidization: prediction of wallto bed heat transfer coefficients. AIChE J. (31): 127–134.
- **92-**Wakao N, Kaguei S (1982) Heat and Mass Transfer in Packed Beds. Gordon andBreach, New York.
- **93-** Kuipers JAM, Prins W, van Swaaij WPM (1992) Numerical calculation of wallto-bed heat-transfer coefficients in gas-fluidized beds. AIChE J. (38): 1079–1091.

- **94-**Boulet P, Moissette S (2002) Influence of the particle-turbulence modulationmodeling in the simulation of a non-isothermal gas–solid flow. Int. J. Heat MassTransfer. (45): 4201–4216.
- **95-** Versteeg HK, Malalasekera W (1995) An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method. Longman Scientific and Technical, England.
- **96-**Patankar SV (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington, DC.
- 97- Scott PS, Mirza FA (1986) A Finite Element Analysis of Laminar Flows through Planar and Axisymmetric Abrupt Expansions. J. Computers & Fluids. (14): 423-432.
- **98-** PJ Oliveira, FT Pinho, A Schulte (1998) A general correlation for the local loss coefecient in Newtonian axisymmetric sudden expansions
- **99-** Gerardo N. Rocha, Robert J. Poole , Paulo J. Oliveira (2007) Bifurcation phenomena in viscoelastic flows through a symmetric 1:4 expansion. J. Non-Newtonian Fluid Mech. (141): 1–17
- **100-** Durst F., Pereira J. C. F., Cliffe K. A. (1993) The Plane Symmetric Sudden Expansion Flow at Low Reynolds Number, J. Fluid Mechanics, vol 248, p. 567.
- **101-** Wu X, Wu H, Cheng P (2009) Pressure drop and heat transfer of Al2O3–H2O nanofluids through silicon microchannels. J. Micromech. Microeng. (19): 105020.11pp.
- **102-** Li J, Kleinstreuer C (2008) Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. Int J Heat Fluid Flow. (29): 1221–1232.

Abstract

Today, Due to the rapidly increasing use of microfluidic devices (including sudden expansion micro-channel) in various applications, investigation of the flow and heat transfer in sudden expention micro channel, becomes an important problem. In this study numerical investigation of the flow for the copper-water Nano-fluid inside the sudden expansion micro-channel are developed by using of Eulerian–Eulerian two-phase model. In contrast of other models which do not consider the temperature and velocity difference between phases, in this model relative velocity and temperature between phases and volumetric distributing of nano-particles are participated and hence, this model becomes more efficient than single-phase model. In this study, the influence of volumetric distribution of solid particles, expansion ratio of channel, particle diameter and also the injection and suction of nanofluid from vertical walls on the bifurcation phenomena are studied and the effects of the nano-fluid injection and suction from walls on the heat transfer in sudden expansion micro-channel with isotherm walls are analysed. By solving the flow and heat transfer of nanofluids by the Eulerian-Eulerian two phase model, observed that the use of nanofluids lead zoan increase in the critical Reynolds number in comparison to the pure watter. For example, adding 3 volumetric percentage of the copper nanoparticles in water, the critical Reynolds number is increased from 110 to 265. By reducing the expansion coefficient, the critical Reynolds number is also increased. The effect of particle size on the flow is also investigated to show the advantage of this model over other models. In single-phase model, the effects of particle size is not included in the physic of problem, but in the present two phase model the influences of particle size are added.

The flow and heat transfer under the influence of injection and suction of nano fluid were investigated by considering the expansion ratio 1: 3 as well as particle diameter which equals to 100 nm. This study showed that the injection increases the critical Reynolds and the suction decreases it. For example, suction with 2% of inlet velocity for 4% copper-water nanofluid decreases the critical Reynolds from 336 to 307. Also, it is showed that the injection and the suction improved heat transfer and increased average Nusselt number, but in injection, the results are so dependent on the temperature of nanofluid which is injected. In the other word, heat transfer reduced when injection temperature is the same as the wall temperature.

Keywords: Nano-Fluid, Sudden Expansion Microchannel, Bifurication, Critical Reynolds, Injection and Suction, Nusselt, Heat Transfer



Shahroud University OF Technology Faculty of Mechanical Engineering MSc Thesis in Master of Science in Mechanical Engineering

The analysis of injection and suction effects on the flow and heat transfer of nanofluids through a sudden expansion rectangular microchannel

By: Mohammad Nasiri

Supervisor:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Advisor:

Dr. Mohsen Nazari

July 2016