



دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی دو فازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی

فرهاد عباسی امیری

استاد راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان استاد مشاور:

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۳



شماره: ۲۵۲ ۲۵۲ ۲۵۲ روم تاريخ: ۲۰ ۲۲ ۲۵۲

باسمه تعالى

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای فرهاد عباسی امیری رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان " بررسی دو فازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی "

که در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : معلم منها المتياز دفاع مجدد 🗌 مردود 🗌

۱_ عالی (۲۰ _ ۱۹) ۲_ بسیار خوب (۱۸/۹۹ _ ۱۸)

۳_ خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)
۴_ قابل قبول (۱۷/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء 9	مر تبهٔ علمی	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
(242.2	دانشيار	محمد محسن شاه مردان	۱_استادراهنما
-to	استادیار	محسن نظرى	۲ استاد مشاور
202	استاديار	احمد مددی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
AFE	استاديار	على خالقى	۴_استاد ممتحن
a le	استاديار	مصطفى كاهانى	۴_استاد ممتحن

امضاء رئیس دانشکده : محمد محسن شاه مردان 10

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشكر و قدردانی

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بی کران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

- محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیز ی که در دوران مختلف
 زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.
 - به مهربان یاری که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.
- به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند. استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر شاه مردان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ استاد فاضل و اندیشمند، جناب آقای دکتر نظری که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید.
 - الها به من كمك كن تا بتوانم اداى دين كنم و به خواسته ى آنان جامه ى عمل بپوشانم.
 - پروردگارا حسن عاقبت ، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.
- خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

٥

فرهاد عباسي اميري

بهمن ۱۳۹۳

تعهد نامه

اینجانب **فرهاد عباسی امیری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " **بررسی دو فازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انبساط ناگهانی''**

تحت ر اهنمائي متعهد ميشوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت بر خور دار است .
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایاننامه 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 میباشد 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 بودهاند در مقالات مستخرج
 از پایاننامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شدهاست، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شدهاست.
- در کلیه مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شدهاست اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شدهاست.

تاريخ

امضاي دانشجو

مالکیت نتایج و حق نش*ر*

- 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 نمیباشد.

چکیدہ

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، مدل دو فازی جایگزین خوبی برای مدل تک فاز می باشد. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلرین – اویلرین 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.

در این تحقیق، جریان و انتقال حرارت جابجایی اجباری و آرام نانوسیال ^۱ مس – آب در یک میکروکانال ^۲ انبساط ناگهانی با دیواره های هم دما و ضرایب انبساط مختلف، به صورت عددی بررسی شده است. جریان نانوسیال در میکروکانال با استفاده از مدل دو فازی اویلرین – اویلرین ^۲، حل عددی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای هر فاز و با استفاده از روش حجم محدود، شبیه سازی شده است. با پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای هر فاز و با استفاده از روش حجم محدود، شبیه سازی شده است. با توجه به حل معادلات جریان نانوسیال در میکروکانال با استفاده از روش حجم محدود، شبیه سازی شده است. با توجه به حل معادلات جریان برای هر فاز به صورت جداگانه، الگوریتم سیمپل برای کوپله شدن سرعت و فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت با یوبی برای هر فاز به مورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت برای هر فاز به صورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار در حالت دو فاز اصلاح شده و معادلات پیوستگی برای هر فاز به صورت ترکیبی در تولید معادلات اصلاح فشار استفاده شده است. با حل جریان و انتقال حرارت نانوسیال توسط مدل دو فازی اویلرین – اصلاح فشار استفاده شده است. با حل جریان و انتقال حرارت تا مقدار ۵۰ درصد افزایش انتوال حرارت می شود. به گونه ای که با افزودن ۲ درصد حجمی از نانوذرات مس به آب، نرخ انتقال حرارت تا مقدار ۵۰ درصد افزایش می اید. از طرف دیگر، عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی^۴ نانوذرات ، افزایش ملار می یود در حالی است که افت فشار نانوسیال اندکی بالاتر از آب خالص می باشد. همچنین، کاهش قطر نانوذرات سر به طوری که در کسر حجمی ۲۰ از نانوذرات می شود؛ به طوری که در کسر حجمی ۲۰ از نانوذرات می شود؛ به طوری که در کسر حجمی ۲۰ از نانوذرات می شود؛ به طوری که در کسر حجمی ۲۰ از نانوذرات می شود؛ به طوری که در کسر حجمی ۲۰ از نانوذرات می شود؛ به طور که مرم حجمی ۲۰ از نانو

^{&#}x27; Nanofluid

^v Microchannel

^{*} Eulerian-Eulerian

⁴ Nanoparticle Volume Concentration

۵۰ نانومتر، بهبود انتقال حرارت ۵ درصد بیشتر از نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر است. بررسی مسئله در میکروکانال ها با ضریب انبساط های مختلف نشان می دهد که با کاهش ضریب انبساط و افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت؛ نانوسیال؛ میکروکانال انبساط ناگهانی؛ دو فازی؛ اولرین – اولرین.

فصل اول: مقدمه

۱	۱–۱ مقدمه
۲	۲-۱ نانوسیال
۳	۱-۲-۱ ترکیب نانوسیالات
۳	۱-۲-۱ نانوسیال نیوتنی و غیرنیوتنی
۴	۱-۲-۱ کاربرد نانوسیالات
۵	۱–۳ سیستم های میکروفلوئیدیک

فصل دوم: مروری بر کار های انجام شده

۹	۱-۲ مقدمه
۱۱	۲-۲ خواص ترموفیزیکی نانوسیال
11	۲-۲-۲ چگالی
١٢	۲-۲-۲ ويسكوزيته
۱۲	۲-۲-۳ ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال
۱۳	۲-۲-۴ ضریب هدایت گرمایی
۱۳	۲–۳ تهیه نانوسیالات
۱۴	۲-۴ مدل سازی انتقال حرارت در نانوسیال
۲۲	۲-۵ جریان در میکروکانال های انبساطی

۲۳	۲-۶ اهداف تحقيق
74	۲-۷ جنبه های نوآوری تحقیق
۲۵	۲-۸ طرح کلی پایان نامه

فصل سوم: مدل سازی

۱-۳ مقدمه
۲۸۲۸ تشریح مسئله
۳-۳ هندسه مسئله
۴-۳ معادلات حاکم
۲۹۲۹ معادله پيوستگي
۳۰-۲-۴ معادله مومنتوم
۳-۴-۳ معادله انرژی
۳۵۳۵ شرایط مرزی

فصل چهارم: روش حل عددی

۳۷	۴-۱ روش های گسسته سازی معادلات
۳۹	۴-۲ حل معادله ی جریان
۴۰	۴–۲–۱ الگوی سیمپل۴
۴۱	۴-۲-۲ الگوریتم حل سیمپل

۴۲	۴-۳ روش حل عددی
۴۴	۴-۴ مطالعه ی استقلال حل عددی از شبکه ی محاسباتی
۴۶	۴–۵ اعتبار سنجی نتایج۴

فصل پنجم: ارائه و تحليل نتايج

۵-۱ بررسی تقارن و عدم تقارن گردابه ها۴۹
۵-۲ توزیع های سرعت، دما و کسر حجمی نانوذرات۵۰
۵–۳ اثر عدد رینولدز بر روی میدان سرعت۵۵
۵-۴ ویسکوزیته ی فاز جامد۵۶
۵-۵ اهمیت ترم های نیرویی در معادله مومنتوم۵۷
۵-۶ بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب خالص۵۸
۵-۷ اثر نانوذرات بر روی میدان سرعت و دما۵۹
۵-۸ اثر کسر حجمی نانوذرات بر روی جریان و انتقال حرارت سیال۶۲
۵–۸–۱ افت فشار بی بعد
۵–۸–۲ عدد ناسلت متوسط
۵–۸–۳ نرخ عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به آب خالص۶۴
۵-۸-۴ اثر قطر نانوذرات در بهبود انتقال حرارت۶۵
۵-۹ ضریب عملکرد (Cop)
۵-۱۰ اثر ضریب انبساط میکروکانال بر روی جریان و انتقال حرارت سیال

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷۱	۶-۱ نتیجه گیری
۷۳	۲-۶ پیشنهادات
۷۵	مراجع
۸۱	چکیدہ انگلیسی

فهرست اشكال

های میکروفلوئیدیک۷	شکل ۱–۱ تولید و استفاده از حباب ها در سیستم ه
۲۸	شکل ۳-۱ میکروکانال انبساط ناگهانی
۳۵	شکل ۳-۲ شرایط مرزی در میکروکانال انبساطی

شکل ۴–۱ استقلال از شبکه در $e = 1 \cdot \cdot$ و کسر حجمی ۱۰/۰
شکل ۴-۲ مقایسه طول گردابه های حل عددی با نتایج اسکات و همکاران در اعداد رینولدز۴۶
شکل ۵-۱ مقایسه طول گردابه های بالایی و پایینی در اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۵۰
شکل ۵-۲ توزیع سرعت فاز سیال نسبت به محور Y
شکل ۵-۳ توزیع دمای فاز سیال نسبت به محور ۲
شکل ۵-۴ توزیع کسر حجمی فاز سیال نسبت به محور Y
شکل ۵-۵ خطوط کانتور سرعت در رینولدز های مختلف و کسر حجمی ۰/۰۱۰۰
شکل ۵-۶ درصد افزایش عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات۵۹
شکل ۵-۷ خطوط کانتور سرعت برای آب خالص و نانو سیال(فاز مایع و جامد)۶۰
شکل ۵-۸ خطوط کانتور دما برای آب خالص و نانو سیال(فاز مایع و جامد)۶۱
شکل ۵-۹ افت فشار بی بعد بر حسب عدد رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانوذرات۶۲
شکل ۵–۱۰ ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانوذرات۶۳
شکل ۵–۱۱ نرخ ناسلت متوسط بر حسب رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانوذرات۶۴
شکل ۵–۱۲ درصد افزایش ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات با قطر های مختلف۶۵
شکل ۵–۱۳ ضریب عملکرد گرمایی نانوسیال برای رینولدز ها و کسر حجمی های مختلف۶۶
شکل ۵–۱۴ افت فشار بی بعد بر حسب رینولدز در ضریب انبساط های مختلف۶۷
شکل ۵–۱۵ خطوط کانتور سرعت در ضریب انبساط های مختلف
شکل ۵-۱۶ ناسلت متوسط بر حسب رینولدز در ضریب انبساط های مختلف۷۰
فهرست جداول

۴۵	خواص شبکه بندی های مختلف	جدول ۴-۱
سکات و همکاران در اعداد رینولدز۴۶	مقایسه طول گردابه های حل عددی با نتایج ا	جدول ۴-۲
جامد	حساسيت ناسلت متوسط نسبت به ويسكوزيته	جدول ۵-۱
ت متوسط ۵۸	اثر ترم های مختلف معادله مومنتوم روی ناسله	جدول ۵-۲

فهرست علائم

علائم لاتين

- A تعریف شده در رابطه (۳-۲۵) B تعریف شده در رابطه (۳-۲) $J \, kg^{-1} \, K^{-1}$ ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، C_p
 - ضریب درگ C_d

$$(Cop = rac{(rac{Nu_{nf}}{Nu_{pw}})}{(rac{\Delta p_{nf}}{(rac{\Delta p_{pw}}{p_{pw}})})}$$
 Cop ضریب عملکرد گرمایی

$$Pa \; m^{-1}$$
 نيروى اندر كنش ذره – ذره، F_{col}

 $Pa \ m^{-1}$ نیروی درگ، F_d

$$Pa m^{-1}$$
 نيروى جرم مجازى، F_{vm}

$$M \ m^{-r} \ K^{-1}$$
 ضریب انتقال حرارت در دمای میانگین، h

$$W m^{-r} K^{-1}$$
 ضريب انتقال حرارت حجمي، h_v

$$W \ m^{-r} \ K^{-1}$$
 ضریب انتقال حرارت ذره – سیال، h_p

$$W m^{-1} K^{-1}$$
 هدایت حرارتی، k^{-1}

$$m$$
 طول گردابه، L_r

عدد ناسلت Nu

- عدد ناست میانگین *Nu*
- عدد ناسلت نانوذره Nu_p
 - *pa* فشار، *p*
 - P فشار بی بعد
 - عدد پرانتل سیال *pr*
- $W m^{-r}$ شار حرارتی دیواره، q''
 - عدد رينولدز *Re*
 - عدد رينولدز نانوذره Re_p

$$(Ri = \frac{gE}{u^{*}})$$
 عدد ریچاردسون Ri

- U, V مؤلفه های بی بعد سرعت
 - *t* زمان، *t*
 - *K*دما، *T*
- $(Wi = \lambda \dot{\gamma})$ عدد وايزنبرگ (Wi = Wi
- m مختصات افقی و عمودی، x, y
 - x* طول محوری بی بعد
- X, Y مختصات بی بعد افقی و عمودی

علائم يونانى

- ويسكوزيته، *pa s*
- $kg \; m^{-r}$ دانسیته، ho
 - 🕴 تمرکز حجمی
- ω تعریف شده در رابطه (۳-۲۶)

زيرنويس ها

b حجمی eff مؤثر i اندیس فاز (*l,p*) نانوسیال nf نانوسیال pw

فصل اول : مقدمه

۱–۱– مقدمه

بهبود انتقال حرارت و نیز بررسی سیالات انتقال دهنده حرارت موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است. سیالات انتقال حرارت شرایط را برای تبادل انرژی در یک سیستم مهیا می کنند و اثرات آن ها بستگی به ویژگی های فیزیکی از قبیل هدایت حرارتی، ویسکوزیته، چگالی و ظرفیت گرمایی دارد. هدایت حرارتی پایین، اغلب مهم ترین محدودیت سیالات انتقال حرارت می باشد. با توجه به این که جامدات فلزی و اکسید های آن ها رسانش بالاتری نسبت به سیالات دارند، ایده پراکنده سازی ذرات جامد در سیال برای بالا بردن رسانش سیال به وجود آمد، که این ایده در سال ۱۸۸۱ به وسیله پراکنده-سازی 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 سیالات مانع از دست یابی به یک محصول تجاری می شد. 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 می شوند. همین امر سبب می شود که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود گردد. در حالی که ذرات با اندازه نانو، تشکیل سوسپانسیون های بسیار پایدارتری داده و پائین بودن سرعت ته نشینی آن ها سبب می گردد که مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد.

۲-۱- نانوسیال

با پیشرفت علم، تولید نانوذرات از مواد گوناگون میسر شده است. یکی از خصایص مواد در ابعاد نانو، نسبت سطح به حجم بالای آن هاست که توانایی های خاصی به آن ها بخشیده است. نانوسیالات به عنوان دسته مهیج جدیدی از فناوری نانو پدیدار شدهاند که بر پایه سیالات انتقال حرارت میباشند و در چند سال گذشته به طور فوق العاده ای رشد کرده اند. دانشمندان و مهندسان سعی بر این دارند تا قوانین حاکم بر خواص ترموفیزیکی این سیالات را کشف کنند، لذا ساز وکارهای جدید پیشنهاد کرده و مدلهای غیر معمولی را برای توضیح این رفتارها ارائه داده اند.

نانوسیال عبارتی است که توسط چوی^۱ [۱] به نوع جدیدی از سیال انتقال حرارت که شامل مقدار کمی از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی بود، اطلاق شد. این ذرات به صورت همگن و پایدار در فاز پیوسته ای پراکنده شده بودند.

چوی درسال ۱۹۹۵ میلادی درمؤسسه تحقیقاتی آرگونه^۲ درآمریکا، از لفظ نانوسیال برای سوسپانسیون های نانوذره در مایع استفاده کرد و ادعا کرد که چنین سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از نظر خواص پایداری و انتقالی، در مقایسه با سوسپانسیون های معمولی جامد – مایع و ماکروسیالات تفاوت های فراوانی دارند. ضریب رسانش گرمایی سیالات را به وسیله افزودن مقدار بسیار کمی از نانوذرات فلزی یا نانوذرات اکسیدهای فلزی نظیر مس، اکسید مس، آلومینا و یا نانو لوله های کربنی به سیال افزایش می دهند. روش هایی که برای تهیه نانوسیال استفاده می شوند همه به نوعی روی خواص سطحی سوسپانسیون تاثیر گذاشته تا از تشکیل خوشه جلوگیری کنند و سوسپانسیون پایایی تشکیل شود. روش هایی مانند تغییر اسیدیته، استفاده از مواد فعال سطحی، لرزاننده های مافوق صوت که در مقیاس آزمایشگاهی برای تهیه نانوسیالات مورد استفاده قرار می گیرد.

1-۲-1 تركيب نانوسيالات

نانوسیالات شامل یک سیال پایه و نانوذرات اضافه شده به آن می باشد که در این جا نمونه هایی از نانوذرات و سیال پایه را بیان می کنیم.

الف) نانوذرات:

نانوذرات مورد استفاده در نانوسیالات از مواد مختلفی ساخته می شوند، مانند: اکسیدهای سرامیکی (Au، Au) و TiC و TiC و SiC)، فلزات (Au) و CuO) و Alvor و OuO)، اکسید فلزات (SiC و SiC)، فلزات (SiC و Ag و uO)، اکسید فلزات (آلومینیوم، تیتانیوم و...)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (SiC و TiO)، اکسید فلزات (TiO و SiC)، اکسید فلزات (TiO و Ag و uO)، اکسید فلزات (TiO و Ag و uO)، اکسید فلزات (Jac و Ra)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (Au) و Ag و uO)، اکسید فلزات (Jac و Au)، اکسید فلزات (Jac و Ra)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ag و uO)، اکسید فلزات (Jac و Ag و uO)، اکسید فلزات (Jac و Ra)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ag و uO)، اکسید فلزات (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، اکسید فلزات (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و نیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربید ها و تیترات های فلزات، نیمه رساناها (Jac و Ra)، کاربی (Jac و Ra)، کاربی

ب) سيالات پايه:

انواع مختلفی از مایعات نیز به عنوان سیال میزبان به کار گرفته می شوند، مانند: آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور، سیالات زیستی و محلول های پلیمری.

۱-۲-۲- نانوسیال نیوتنی و غیرنیوتنی

اختلاف نانوسیال نیوتنی و غیرنیوتنی، مربوط به سیال پایه ی آن ها می شود. در گذشته بیشتر از سیال پایه ی نیوتنی استفاده می کردند ولی در دهه ی اخیر به دلیل کاربرد وسیع سیالات غیرنیوتنی در علم و صنعت، ویژگی های این نوع سیالات و همین طور افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه ی نیوتنی، نانوسیال با سیال پایه ی غیرنیوتنی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برخی از کابرد های نانوسیال غیرنیوتنی عبارتند از: مذاب های پلیمری، محلول های بیولوژیکی، رنگ، آسفالت، چسب و ... یکی از کاربرد های مهم سیالات غیرنیوتنی در سیستم های میکروفلوئیدیک^۱ نظیر، یکسوکننده^۲ ی میکروفلوئیدیک می باشد که یک سیال غیرنیوتنی (ویسکوالاستیک) به دلیل خواص الاستیک غیرخطی می تواند عملکرد یکسو سازی را بالا ببرد، که بزرگی این خواص در سیالات غیرنیوتنی به عدد وایزنبرگ^۳ بستگی دارد.

۲-۲-۳ 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
 - صنايع دفاعي
 - صنايع هوا فضا
 - مبدل های حرارتی
 - صنعت خودرو سازی

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.

> Microfluidic devices ' Rectifier ' Weissenberg number '

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

- تطابق نداشتن نتایج تجربی در آزمایشگاه های مختلف.
 - ضعف در تعیین مشخصات سوسپانسیون نانوذرات.
- نبود مدل ها و تئوری های مناسب برای بررسی تغییر خواص نانوسیال.

-۳-۱ سیستم های میکروفلوئیدیک

بررسی سیالات در کانال هایی با ابعاد چندین میکرومتر – میکروفلوئیدیک – به عنوان یک زمینه مجزا ظهور کرده است. میکروفلوئیدیک دانش و فناوری استفاده از سیستم هایی است که مقادیر بسیار کم سیال را با استفاده از کانال هایی با ابعاد ده و یا صد میکرومتر را پردازش و انتقال می دهند. میکروفلوئیدیک می تواند در زمینه های مختلفی نظیر سنتز شیمیایی، آنالیز های بیولوژیکی، فناوری اطلاعات و اپتیک مورد استفاده قرار گیرد.

اولین کاربرد فناوری های میکروفلوئیدیک در آنالیز بوده است که در آن این سیستم ها توانایی های مفیدی از جمله: توانایی استفاده از مقادیر بسیار کمی از نمونه ها و مواد واکنش گر، انجام جداسازی ها و آشکارسازی ها با رزولوشن و حساسیت بالا، هزینه کم، زمان کم آنالیز و اثرات کم بر ابزار های آنالیزی، ارائه می دهند. میکروفلوئیدیک هر دو مشخصه بارز خود شامل، اندازه بسیار کوچک و جریان لایه ای سیال داخل کانال را در بر می گیرد[۲]. سیستم های میکروفلوئیدیک مزایای بسیار کوچک و مریان لایه ای ارائه می دهند. میکروفلوئیدیک هر دو مشخصه بارز خود شامل، اندازه بسیار کوچک و جریان لایه ای سیال داخل کانال را در بر می گیرد[۲]. سیستم های میکروفلوئیدیک مزایای بسیاری دارند و معایب آن سیال داخل کانال را در بر می گیرد[۲]. سیستم های میکروفلوئیدیک مزایای بسیاری دارند و معایب آن در زمینه های میکروفلوئیدیک مزایای بسیاری دارند و معایب آن میال داخل کانال ماروزه به صورت متداول

میکروالکترونیک یک منشأ مهم در حوزه میکروفلوئیدیک است. امید اصلی میکروفلویئدیک این است که لیتوگرافی ^۱ نوری و تکنولوژی های مرتبط که در میکروالکترونیک و سیستمهای میکرو الکترو مکانیکی (MEMS) موفق بودهاند، بتواند به طور مستقیم در میکروفلوئیدیک نیز، به کار رود.

میکروفلوئیدیک شامل تکنیک ها و روش های خوبی برای ساخت میکروکانال ها، دریچه ها، مخلوط کننده ها و پمپ ها می باشد. دستاورد به طور خاص مهم، توسعه لیتوگرافی نرم در PDMS به عنوان یک روش برای ساخت دستگاه های نمونه اولیه و توسعه یک روش ساده برای ساخت دریچه های فعال شده پنوماتیکی ، مخلوط کننده ها و پمپ ها بر اساس روش لیتوگرافی نرم است.

همراه با روش های جدید ساخت، میکروفلوئیدیک ها قادر شده اند تا از تفاوت های اصلی خاصی بین خواص فیزیکی سیالات حرکت کننده در کانال های بزرگ و کانال های با مقیاس میکرومتری استفاده کنند. مهم ترین این تفاوت ها جریان آشفته (turbulence) و یا عدم وجود آن (جریان خطی) است. در مقیاس بزرگ، سیالات به صورت همرفتی مخلوط میشوند، برای مثال مخلوط کردن شیر و کافه با هم زدن و یا دود خارج شده از دودکش ها که وارد هوا میشود. این نوع مخلوط کردن این حقیقت را بیان میدارد که در سیالات به صورت همرفتی مخلوط میشوند، برای مثال مخلوط کردن شیر و کافه با هم میدارد که در سیالات به صورت همرفتی مخلوط میشوند، برای مثال مخلوط کردن این حقیقت را بیان میکرو، با آب به عنوان یک سیال، جهت مخالف این واقعیت صادق است، یعنی سیالات به صورت همرفتی مخلوط نمیشوند. وقتی دو جریان سیال در یک میکروکانال به هم میرسند، بدون ایجاد جریان آشفته، به صورت موازی جریان میابند و فقط مخلوط شدنی که اتفاق میافتد، در اثر نفوذ مولکول ها در سطح اتصال بین دو سیال است. هر چند این نوع از جریان به عنوان جریان خطی شناخته میشود، اما این پدیده می شود. نسبت سکون به نیروی ویسکوز بر سیال توسط عدد رینولدز –یکی از انواع پارامتر های بدون بعد مورد استفاده در مطالعه سیالات- بررسی می شود.

جریان سیالات در میکروسیستم ها خواص مفید و جالب زیاد دیگری نیز دارند که تنها تعدادی از آن ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از خواص مفید و منحصر به فرد آن ها، جریان الکترو – اسمتیک (EOF) میباشد. دومین ویژگی مفید توانایی نانوفلوئیدیک برای انتقال آب در کانال هایی است که ابعاد-شان نزدیک به ابعاد لایه دبای^۱ است. در حقیقت ما خصوصیات سیالات در این مقیاس ها را متوجه نمی شویم و سیستم های نانوفلوئیدیک دروازه های جدیدی به پدیدههایی در فیزیک سیالات میگشاید. یکی از کابرد های سیستم های میکرو سیالی در بررسی جریان های چند فازی می باشد، آن ها قادر به تولید و انتقال حباب ها (شکل ۱–۱) و یا قطرات پراکنده یک فاز گاز یا مایع در جریان مایع مداوم هستند. این پراکندگی مسیر های جدیدی در تولید ذرات پلیمر، امولسیون و اسفنج را نشان می دهد.



شکل ۱-۱- تولید و انتقال حباب ها در سیستم های میکروفلوئیدیک

سیالات در میکروکانال ها اساس سیستم های نوری جدید را تشکیل می دهند. طیف وسیعی از سیستم ها، از موج بر های متشکل از یک مایع با ضریب شکست بالا تا کاربرد های مایعات در لنز ها و آینه های براگ^۱، بر اساس میکروفلوئیدیک ها هستند. همچنین، جریان لایه ای سیال در میکروکانال ها، روش های جدیدی برای مطالعه بیولوژی تکاملی و سلولی ایجاد می نماید.

توسعه میکروفلوئیدیک تازه آغاز شده است. فاکتور های بسیاری نشان می دهد که تعداد زیادی کاربرد های اولیه برای میکروسیستم های حاوی سیال، شامل بررسی اپتیک سیالات و سلول ها، توسعه انواع جدید سنتز های آلی در سیستم های ریزکانال، ساخت سیستم های میکرورباتیک در اغلب سیستم های هیدرولیکی مبتنی بر میکروفلوئیدیک، سایر نسخه های سیالاتی MEMs و کار هایی در زمینه سیستم های زیستی با مؤلفه های میکروفلوئیدیکی، وجود دارد. بیشتر فناوری های جهان به بررسی سیالات و گسترش این بررسی ها به حجم های کوچک و کشف و استخراج پدیده های جدید سیالاتی که در مقیاس

7

فصل دوم : مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱- مقدمه

اخیراً استفاده از نانوسیالات که در حقیقت سوسپانسیون پایداری از نانوفیبر ها 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 آن ها نسبت به سیالات بدون نانوذرات و یا همراه با ذرات بزرگتر (ماکروذرات) نشان می دهد.

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 است. سیستم های خنک کننده، یکی از مهم ترین دغدغه های کارخانه ها و صنایعی 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 موتور هایی 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 سیستم های 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 [۱].

نانوسیالات به دلیل هدایت حرارتی بالایی که دارند، سیالات انتقال حرارت نوید بخشی جهت کاربرد به جای سیالات گرمایی هستند. نانوسیال ها خواص ترموفیزیکی (هدایت حرارتی، پخش حرارتی، ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت جابجایی و…) بهتری نسبت به یک سیال پایه مانند آب دارند. نانوسیالات هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت تک فاز بالاتری نسبت به سیال پایه دارند. چون افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی فراتر از اثر هدایت حرارتی محض است، با روابط متداول سیال خالص قابل پیش -بینی نیست. برای رسیدن به این هدف مهم، محققان بسیاری در مورد عملکرد انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات بحث کرده و آن را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده اند. در تمامی مطالعات انجام شده، به این نتیجه رسیده اند که عدد ناسلت جریان جابجایی به دست آمده به صورت تابعی از عوامل گوناگون می باشد که به صورت زیر میتوان نوشت:

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{k_p}{k_l}, \frac{(\rho C_p)_p}{(\rho C_p)_l},$$
(شكل, ابعاد و كسر حجمى نانوذرات, الگوى جريان,)

تحقیق و توسعه ابتدایی فناوری نانوسیال، پتانسیل بالای نانوسیالات را برای کاربرد در انتقال حرارت نشان داد و منجر به این شد که هم صنعت و هم دانشگاه های سراسر جهان تلاش هایی را در خصوص پژوهش در این راستا انجام دهند. اندازه میانگین ذرات به کار رفته در نانوسیالات ممکن است از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر باشد. فهم کامل رفتار های انبوهشی و رئولوژیکی نانوسیالات برای محققان نانوسیال بسیار مهم است. از این رو در این قسمت به بررسی تحقیقات گذشته در خصوص خواص ترموفیزیکی نانوسیالات و انتقال حرارت در آن ها می پردازیم.

۲-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

هدایت حرارتی نانوسیالات توجه اصلی در نانوسیال را به خود اختصاص داده است. هرچند برای سیالات ساکن این مهم ترین موضوع است ولی با در نظر گرفتن سیالات انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت نانوسیال در جریان مهم ترین موضوع می باشد. دیگر خواص مهم غیر از هدایت حرارتی که بر ضریب انتقال حرارت اثر می گذارد، عبارتند از: چگالی، گرمای ویژه و ویسکوزیته نانوسیال. خواص ترموفیزیکی و کلوییدی نانوسیالات آماده شده جهت اطمینان از تغییرات احتمالی نسبت به آب خالص باید محاسبه شوند. با فرض پراکندگی یکنواخت نانوذرات داخل سیال پایه، خواص حرارتی و فیزیکی نانوسیال به صورت زیر هستند.

چگالی نانوسیالات را معمولاً از رابطه
ی پک و چو
$$[7]$$
 محاسبه می کنند.

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_w$$

تمامی محققان روی استفاده از قانون مخلوط ها برای محاسبه چگالی نانوسیال اجماع نظر دارند. خانافر^۲ و وفایی [۴] براساس اطلاعات آزمایشگاهی هو^۳ و همکاران [۵]، رابطه ای برای محاسبه چگالی نانوسیال آب – اکسید آلومینیوم به صورت زیر ارائه کردند:

 $\rho_{nf} = 1 \cdot \cdot 1 / \cdot \mathfrak{F} - \mathsf{T} \mathsf{Y} \mathsf{T} \mathsf{A} / \mathfrak{F} \mathsf{I} \mathfrak{R} \mathsf{I} \varphi - \cdot / \mathsf{T} \cdot \mathfrak{R} \mathsf{D} T \tag{T-1}$

Pak and Cho Khanafer

Ho "

که غلظت و دما در محدوده $f' \ge \varphi \ge \bullet$ و $f \ge T(^{\circ}C) \ge 0$ است.

۲-۲-۲ ویسکوزیته

ویسکوزیته اندازه ی مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنش های طولی یا تنش های برشی می باشد. به علت ساختار سوسپانسیونی نانوسیالات گرانروی اهمیت ویژه ای در طراحی سیستم های نانوسیالی بازی می کند، به طوری که اثرات مستقیم آن بر افت فشار در جریان های جابجایی بسیار مشهود است. بنابراین برای استفاده از نانوسیالات در کاربرد های عملی، مقدار افزایش گرانروی نانوسیالات نسبت به سیال پایه آن باید به طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

ویسکوزیته نانوسیالات را نیز میتوان با مدل های موجود پیش بینی کرد. رابطه ارائه شده توسط اورت^۱ و همکارانش [۶] یکی از این مدل هاست:

$$\mu_{nf} = \mu_w(1 + \tau/\Delta\varphi) \tag{(-7)}$$

که در آن μ_{nf} و μ_w به ترتیب ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات و آب می باشند.

۲-۲-۳ ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات

ظرفیت گرمایی ویژه نیز یکی از خواص مهم ترموفیزیکی است که بر عملکرد گرمایی نانوسیالات اثر می گذارد. با استفاده از تئوری اختلاط برای مخلوط گاز های ایده آل، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات (متوسط حجمی) این گونه محاسبه می شود:

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,p} + (1 - \varphi) C_{p,w}$$
^(٤-٢)

که در آن $C_{p,p}$ ، $C_{p,nf}$ و $C_{p,w}$ به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، نانوذره پراکنده شده و آب پایه می باشند. این رابطه با توجه به مطالعات ژو^۲ [۷] تطابق خوبی با داده های تجربی ندارد. در نتیجه

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi \rho_p C_{p,p} + (1 - \varphi) \rho_w C_{p,w}}{\varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_w}$$
(°-۲)

۲-۲-۴ ضریب هدایت گرمایی

$$k_{nf} = k_w \left[1 + \frac{1 + r\varphi(k_p/k_w - 1)}{k_p/k_w + r - \varphi(k_p/k_w - 1)} \right]$$
(7-7)

که در آن k_w ، k_{nf} و k_p به ترتیب ضریب هدایت گرمایی نانوسیال، آب مقطر و نانوذره می باشند.

۲–۳– تهیه نانوسیالات

بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون ها دارد تا از ته نشینی و ناپایداری آن ها جلوگیری شود. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جلمه نانوسیال اکسید فلزات، نیتریت ها، کاربید فلزات و غیر فلزات که به وسیله یا بدون استفاده از سورفکتانت^۲، در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیگول و روغن به وجود آمده است. مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه ی نانوذرات و روش های پراکنده سازی آن ها درسیال پایه انجام شده است که در این جا به طور مختصر چند روش متداول که برای تهیه نانوسیال وجود دارد، بیان شده است.

یکی از روش های متداول تهیه نانوسیال، روش دو مرحلهای است [۸]. در این روش ابتدا نانوذره یا نانولوله معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) در فضای گاز بی اثر به صورت پودر های خشک تهیه میشود [۹]، در مرحله بعد نانوذره یا نانولوله در داخل سیال پراکنده می شود. برای این کار

Maxwell-Garnett Surfactant

از روش هایی مانند لرزاننده های مافوق صوت و یا از سورفکتانت ها استفاده می شود تا توده های نانوذره-ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. روش دو مرحله ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده، بسیار مناسب است [۸] و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگین، کمتر موفق بوده است [۱۰]. روش دو مرحله ای دارای مزایای اقتصادی بالقوه ای است؛ زیرا شرکت های زیادی توانایی تهیه نانوپودر ها در مقیاس صنعتی را دارند [۱۱].

روش یک مرحله ای نیز به موازات روش دو مرحله ای پیشرفت کرده است؛ به طور مثال نانوسیالاتی شامل نانوذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم تهیه شده اند [۱۰ و ۱۲]. در این روش، منبع فلزی تحت شرایط خلاء تبخیر می شود [۱۳]. در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل خود می رسد، اما فشار بخار پایین سیال یکی از معایب این فرایند محسوب می شود؛ ولی با این حال روش های شیمیایی تک مرحله ای مختلفی برای تهیه نانوسیال به وجود آمده است که از آن جمله میتوان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلال های مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد [۱۴]. مزیت اصلی روش یک مرحله ای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع اندازه ذرات است.

۲-۴- مدلسازی انتقال حرارت در نانوسیال

انتقال حرارت در نانوسیال ها تاکنون از دو دیدگاه کلی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک دیدگاه سیال پایه و نانوذرات، یک سیال همگن فرض شده و نانوذرات اجازه حرکت نسبت به سیال پایه را ندارند. در این دیدگاه، تاثیر تغییر خواص ترموفیزیکی در اثر وجود نانوذرات بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت معادلات حاکم بر یک سیال معمولی برای نانوسیال نیز کاربرد دارد. در دیدگاه دوم، نانوسیال به عنوان یک سیال دو فازی (مایع و جامد) فرض شده و در این حالت نانوذرات در اثر نیرو-های وارد بر آن ها امکان لغزش نسبت به سیال پایه را دارند [۱۵]. در انتقال حرارت جابجایی نانوسیال -های افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده شده است. برخی محققان تاثیر مکانیزم های انتقال حرارت در اثر انتقال جرم را در نانوسیال ها مهم می دانند. در این راستا، نلد و کوزستو^۱ انتقال حرارت نانوسیال ها را در لایه مرزی بررسی نمودند. آن ها گزارش نمودند که نانوذرات در اثر مهاجرت خود انرژی را در سیال منتقل می نمایند و اثر این نوع انتقال انرژی را در لایه مرزی بسیار تاثیر گذار دانستند [۱۶ و ۱۲]. در پژوهش جدیدی که اخیراً توسط بهسرشت، نقره آبادی و قلم باز [۱۸] انجام شد، اثر مهاجرت نانوذرات که توسط ناد و کوزنستو [۱۶ و ۱۷] و دیگر محققان پیشین مطرح شده بود، مورد بحث قرار گرفت و نشان داده شد که در مطالعه های پیشین محدوده اعداد بی بعد به درستی انتخاب نشده است. با درنظر گرفتن محدوده صحیح اعداد بی بعد، انتقال حرارت در اثر مهاجرت نانوذرات ناچیز است. نقره آبادی، قلمباز و قنبرزاده [۱۹] در پژوهشی دیگر نشان دادند که اگرچه انتقال حرارت منتقل شده در اثر مهاجرت نانوذرات ناچیز است، ولی لغزش نانوذرات در سیال پایه باعث ایجاد ناهمگونی در نانوسیال می گردد. ناهمگونی ایجاد شده باعث تغییر موضعی خواص نانوسیال شده و از این طریق انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات را تحت تاثیر قرار می دهد.

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 نانولوله های کربنی در اتیلن گلیکول یا روغن به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۵۰ درصدی در هدایت حرارتی این سیالات ایجاد میکند [۱۲ و ۲۰]، در حالی که برای رسیدن به چنین افزایشی در سوسپانسیون های معمولی، به غلظت های 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 آن ها در انتقال حرارت می-شود. در برخی از تحقیقات، هدایت حرارتی نانوسیالات، چندین برابر بیشتر از پیش بینی تئوری ها است. از دیگر نتایج بسیار جالب، تابعیت شدید هدایت حرارتی نانوسیالات از دما [۱۲ و ۲۲] و افزایش تقریباً 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 درمان سرطان نیز استفاده شده

است [۲۵]. به هر حال تحقیق در زمینه نانوذرات، دارای آینده ای بسیار گسترده است [۲۶].

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 [۲۷ و ۲۸].

اگر از تأثیرات سطح مشترک نانوذرات کروی صرف نظر شود، در مقادیر بسیار اندک نانوذرات (f, f) حجمی نانوذرات) همه مدل های منتج از تئوری متوسط مؤثر، حل یکسانی دارند. در مواردی که نانوذرات دارای هدایت حرارتی بالایی باشد، پیش بینی می شود که افزایش هدایت حرارتی نانوسیال $f \times \pi$ خواهد شد؛ که این پیش بینی، تخمین خوبی برای مواردی است که هدایت ذرات بیشتر از ۲۰ برابر هدایت حرارتی سیال باشد [۲۹].

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 [۸]. 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 توده های نانوذره کوچک باشد، تئوری متوسط مؤثر خوب جواب می دهد؛ زیرا توده نانوذرات فضای بیشتری نسبت به نانوذرات منفرد اشغال میکند و بنابراین جزء حجمی توده بیشتر از نانوذرات منفرد است [۳۰].

در توده های 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 [۳۱]؛ 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 [۳۲] افزایش ۳۰ درصدی هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۴/۳ درصد حجمی آلومینا به آب گزارش کرده است. لی^۲ [۸] افزایش ۱۵ درصدی را برای همین نوع نانوسیال با همین 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^۳ و همکاران [۳۳ و ۳۴] افزایش ۲۰ درصدی را برای ۵ درصدی را برای ۵ درصد همین نانوذرات گزارش کرده اند.

گروه مشابهی [۳۱] برای نانوذرات کاربید سیلیکون نیز به نتایج مشابهی رسیدند. لی بهبود نسبتا کمتری را در هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید مس، نسبت به نانوذرات آلومنیا مشاهده کرد؛ در حالی که ونگ[†] و همکاران [۳۵] ۱۷ درصد افزایش هدایت حرارتی را برای فقط ۲/۰ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس در آب گزارش کرده است. برای نانوسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول، افزایش بالای ۰۴ درصد برای ۳ درصد حجمی مس با متوسط قطر ۱۰ نانومتر گزارش شده است. پتل^۵ [۲۲] افزایش بالای ۲۱ درصد برای سوسپانسیون ۱۰/۱۰ 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 [۶۳]. 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 اکسید فلزات و غلظت های پایین نانوذرات فلزی در حال انجام است که در هر دو مورد در محدوده دمای اکسید فلزات و غلظت های پایین نانوذرات ا برابری در هدایت مشاهده شده است و در صورت تأیید این خواص برای دما های بالاتر می توان 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

> Masuda ' Lee ' Xie ' Wang ' Patel °

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^۱ [۳۷] 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 می یابد.

چوی [۲۰] 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 [۳۸] افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی هدایت حرارتی را در سوسپانسیون ۱ درصد حجمی با سیال آب گزارش کرده است. ون و دینگ^۲ [۳۹] نیز ۲۵ درصد افزایش هدایت را در سوسپانسیون ۸/۰ درصد حجمی در آب گزارش کرده است. اسیل^۳ [۳۶] بیشترین افزایش را ۳۸ درصد برای سوسپانسیون شش درصد حجمی در آب گزارش کرده است. اسیل^۳ [۳۶]

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 می ماند. 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.

همان طور که در فصل اول بیان شد، نانوسیال در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار توسط چوی [۱] مورد استفاده قرار گرفت و محققان زیادی پس از او، در این زمینه کار کردند که تمرکز آن ها بیشتر بر روی مدل سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بود [۴۰-۴۲]. 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،

Biercuk ' Wen and Ding ' Assael ' دانسیته و ویسکوزیته دینامیکی نیز وابسته است که البته در این درصدهای حجمی پایین همانطور که انتظار میرفت و مشاهده شد، گرمای ویژه و دانسیته بسیار به سیال پایه نزدیک است [۴۳]. ونگ [۴۴] ویسکوزیته ی آلومینا – آب را اندازه گرفت و نشان داد که هر چه ذرات بهتر و بیشتر پراکنده شوند، ویسکوزیته ی پایین تری را مشاهده می کنیم. وی افزایش ۳۰ درصدی در ویسکوزیته را برای سوسپانسیون ۳ درصد حجمی گزارش کرد که در مقایسه با نتیجه پک و چو [۳]، ۳ برابر بیشتر به نظر می رسد که نشان دهنده وابستگی ویکسوزیته به روش تهیه نانوسیال است. ژوان و لی ^۱ [۴۰] 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 [۵۹] نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابهجایی اجباری سوسپانسیون ۹/۰ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس، ۱۵ درصد بیشتر از سیال پایه است.

ژوان و لی [۴۰] ضریب انتقال حرارت جابهجایی 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 می دهد، به طور مثال افزودن ۲ درصد حجمی از نانوذرات مس به آب، حدود ۳۹ درصد انتقال حرارت آن را افزایش می دهد. در حالی که در تناقض با نتایج بالا، پک و چو [۳] کاهش ۱۲درصدی ضریب انتقال حرارت را در سوسپانسیون حاوی ۳ درصد حجمی از آلومینا و تیتانا در همان شرایط مشاهده کردند. پوترا^۳ [۴۶] 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 [۳۹ ، ۴۷، ۴۸ و۴۹]. ون و دینگ [۳۹] در سال ۲۰۰۴ انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب در ناحیه ورودی یک لوله مسی با قطر ۴/۵ mm و تحت شار حرارتی ثابت را بررسی کردند. اندازه گیری آن ها، بهبود انتقال

> ' and Li Xuan ' Eastman ' Putra
حرارت مخصوصاً در ناحیه ی ورودی لوله را، نشان داد. آن ها این رفتار را به اثر مهاجرت ذره نسبت دادند (تمرکز حجمی نانوذره غیر یکنواخت) که ضخامت لایه مرزی حرارتی را کاهش می دهد. هریس^۱ و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۰۶ نانوذرات اکسید مس و آلومینیوم در آب را برای لوله ی حلقوی با قطر داخلی ۳mm ۶ و قطر خارجی ۳mm ۳۲ ، بررسی کردند و نتایج تجربی به دست آمده را با نتایج مدل همگن (روابط تک فازی با خواص موثر نانوسیال) مقایسه کردند و دریافتند مدل همگن (تک فاز)، بهبود انتقال حرارت مخصوصاً در تمرکز حجمی بالا را، به خوبی حدس نمی زند.

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 صورت گرفته است [۴۱، ۵۰ و ۵۱].

برخلاف مدل های رایج تک فاز، 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 [۵۲] در سال ۲۰۰۷ از مدل دو فازی مخلوط ^۲، برای مطالعه انتقال حرارت جابجایی آشفته نانوسیال در یک کانال مدور، استفاده کرده اند و با مقایسه نتایج خود با نتایج تجربی نشان دادند که نتایج مدل دو فازی دقیق تر از نتایج مدل هموژن است. میرمعصومی و بهزاد مهر [۵۳] در سال ۲۰۰۸ از همین روش برای بررسی انتقال حرارت آزاد و اجباری در یک لوله استفاده کردند. میرمعصومی و بهزاد مهر [۹۴] در سال ۲۰۰۸ و اکبری نیا و لائور^۳ [۵۵] در سال ۲۰۰۹، اثر اندازه نانوذرات روی انتقال مهر [۹۴] در سال ۲۰۰۸ و اکبری نیا و لائور^۳ [۵۵] در سال ۲۰۰۹، اثر اندازه نانوذرات روی انتقال حرارت آزاد و اجباری در نانوسیال را با استفاده از روش دو فازی مخلوط بررسی کردند. در هر دو مطالعه،

> Heris ' Mixture ' Laur '

کوروفسکی^۱ و همکاران [۵۶] در سال ۲۰۰۹ سه روش متفاوت هموژن، اویلری-لاگرانژی و مخلوط را برای شبیه سازی نانوسیال در یک ریز کانال، به کار بردند. نتایج آن ها در هر سه روش تقریبا رفتار مشابهی را نشان می داد. فارد^۲ و همکارانش [۵۷] در سال ۲۰۱۰، روش های تک فاز و دو فاز را برای مطالعه انتقال حرارت نانو سیال در یک لوله به کار بردند. برای نانوسیال مس – آب با غلظت ٪۰/۲، 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 [۵۸] 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 – اکسید آلومینیوم را داخل یک لولهی افقی عبور دادند. نتایج به دست آمده را با روابط موجود مقایسه و اعتبار سنجی کردند. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلها مشخص شد که مدل مخلوط دقیقتر است.

صفار اول و همکاران [۵۹] در سال ۲۰۱۱ ، انتقال حرارت نانوسیال را در یک میکروکانال مستطیلی و با استفاده از روش دو فازی اویلرین – اویلرین 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 [۶۰] در سال ۲۰۱۰ انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال با چشمه حرارتی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. در روش عددی نیز از مدل دو فازی اویلرین – اویلرین استفاده و 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 [۶۱] در سال ۲۰۱۳ عملکرد حرارتی نانو سیال آب – آلومینیوم در یک ریز کانال با شار حرارتی ثابت را با مدل های تک فاز و دو فاز بررسی کردند. در این مطالعه مشاهده شده است که مـدل هـای دو فاز نســبت به مدل تک فاز، انطباق بهتری با نتایج تجربی دارند. البته در تراکم حجمی پایین این اختلاف بین مدل تک فاز و دو فاز محسوس نیست، ولی با افزایش تراکم حجمی به بالاتر از ٪۱ و یا در رینولدز های بالا، مدل تک فاز انحراف بیشتری را از نتایج تجربی نشان می دهد. بین سه مدل دو فازی (اویلرین- اویلرین، مخلوط و کسر حجمی سیال^۱) نیز اختلاف بسیار نا چیزی وجود دارد.

فرهادی و همکاران [۶۲] 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 [۶۳] در سال ۲۰۱۴ ، تاثیر قطر نانوذرات را بر روی انتقال حرارت نانوسیال در یک مجرای بیضوی و با مدل دو فازی مخلوط بررسی و 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

۲-۵- جریان در میکروکانال های 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^۲ [۶۴] در سال ۲۰۰۳ و ریولتا^۳ [۶۵] 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 سازی دو بعدی، عمق 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 روشن شد که با وجود این که ابزار میکرو سیالی هندسه مسطح (دو بعدی) دارند ولی در نزدیکی ناحیه ی انبساط جریان، به طور محلی سه بعدی می شوند.

> VOF ' Oliveira ' Revuelta ' Tsai '

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^۱ و همکاران [۶۷] در سال ۲۰۱۰، با قرار دادن یک بلوک مستطیلی در یک میکروکانال انبساطی، بهبود یکسو کنندگی جریان سیال را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. ون دینتر^۲ و همکاران [۶۸] 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^۳ و همکاران [۶۹] 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 [۲۰] 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 [۲۱].

۲-۶- اهداف تحقيق

در این تحقیق، جریان نانوسیال آب – مس در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های هم دما و ضریب انبساط های مختلف، با استفاده از مدل دو فازی اولرین-اولرین، حل عددی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای هر فاز و با استفاده از روش حجم محدود، مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان نانوسیال مورد نظر و انتقال حرارت آن در این میکروکانال انبساط ناگهانی بررسی شده است و اثرات ضریب انبساط میکروکانال، اندازه ی نانوذرات، تمرکز حجمی آن ها و عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت متوسط، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲-۷- 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 دو فازی 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. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلرین – اویلرین 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. در این پروژه، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و برای حل کوپلینگ سرعت – فشار، الگوريتم سيمپل به كار گرفته شده، كه براي معادله تصحيح فشار در اين الگوريتم، از ترکیب معادلات پیوستگی فاز های مایع و جامد استفاده شده است. در واقع، با ترکیب معادلات پیوستگی فاز ها و به دست آوردن معادله تصحيح فشار جديد، به اصلاح الگوريتم سيمپل پرداختيم. همچنين، عدد رینولدز بحرانی و دو شاخگی در نمودار طول گردابه ها بر حسب عدد رینولدز برای جریان دو فازی در میکروکانال انبساط ناگهانی، مورد بررسی قرار گرفت. حل عددی جریان دو فازی نانوسیال در یک ميكروكانال انبساط ناگهاني و با استفاده از مدل اويلرين – اويلرين و الگوريتم سيمپل بهبود يافته، كاري نو و جدید در زمینه انتقال حرارت نانوسیال مس – آب در یک سیستم میکروفلوئیدیک می باشد.

۲-۸- 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 شده است. در فصل سوم به تشریح مسئله، هندسه مورد نظر، شرایط و معادلات حاکم بر آن پرداخته می شود. در فصل چهارم، الگوریتم و روش حل عددی در این مسئله بیان می شود و در فصل پنجم به ارائه و تحلیل نتایج حاصل پرداخته می شود. در پایان نیز، فصل ششم به نتیجه گیری و ارائه چند پیشنهاد برای ادامه مطالعات در این زمینه، اختصاص داده شده است.

Y

فصل سوم : مدل سازی

در فصل قبل به بررسی پژوهشهای تجربی و عددی انجام شده در زمینه نانوسیالات و میکروکانال ها پرداخته شد. همچنین روابط مختلفی که برای محاسبه خواص نانوسیالات ارائه شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل با تشریح کامل مسئله، به ارائه شرایط مرزی و معادلات حاکم بر مسئله پرداخته می شود.

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 شده اند. دینامیک سیالات محاسباتی (وشی 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 میکنند، انجام شده اند 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 چالش های آن ایجاد گردیده است. روش هایی بسیار همانند مورد

['] Computational Fluid Dynamics

استفاده در روش های مرسوم محاسباتی میتواند برای به کارگیری در صنایع مهندسی در ارتباط با نانوسیال اقتباس شود.

۲-۳- تشریح مسئله

موضوع پژوهش حاضر بررسی عددی جریان آرام و انتقال حرارت نانوسیال مس – آب، در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های هم دما و ضریب انبساط های مختلف می باشد. بدین منظور از نرم افزار فرترن برای کد نویسی و حل عددی استفاده شده است. در این بخش ابتدا به توضیح هندسه مسئله پرداخته می شود، سپس معادلات حاکم، روابط مورد استفاده و شرایط مرزی مسئله بیان می شود.

۳–۳– هندسه مسئله

در این پژوهش از یک میکروکانال انبساط ناگهانی با ضریب انبساط های ۲:۱، ۳:۱، ۴:۱ و ۵:۱ استفاده شده است. جریان آرام نانوسیال مورد نظر که مخلوطی از آب و نانوذرات مس می باشند، با سرعت و دمای یکنواخت وارد کانال می شوند و با دیواره های هم دما میکروکانال، تبادل گرما انجام می دهند. در شکل -1، ۹ و ارتفاع بالا دست میکروکانال (L_1, h)، طول و ارتفاع پایین دست آن (L_2, H) و طول گردابه بعد از ناحیه انبساطی، L_7 می باشد. شکل ۳–۱ یک میکروکانال انبساط ناگهانی را نشان می دهد.



شكل ٣-١- ميكروكانال انبساط ناگهاني

۳-۴- معادلات حاکم

همان طور که گفته شد، در بررسی تئوری انتقال حرارت و جریان نانوسیال معمولاً از مدل های هموژن (تک فاز) و دو فاز استفاده می شود. در مدل تک فاز سرعت و دما برای ذره و سیال پایه یکسان در نظر گرفته می شود. 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 فاز ها در معادلات حاکم موثر می باشد.

با توجه به بررسی های انجام شده در این زمینه، می توان نتیجه گرفت که مدل دو فازی جایگزین خوبی برای مدل تک فاز می باشد. در بین مدل های دو فاز نیز، مدل اویلرین – اویلرین 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. بنابراین، در این مطالعه از مدل دو فازی اویلرین – اویلرین برای حل جریان نانوسیال استفاده شده است. در این جا، معادله بقای جرم، مومنتوم و انرژی در این مدل برای هر دو فاز جامد و مایع، بیان شده است [۲۲].

۳-۴-۲ معادله پیوستگی

معادلات بقاء جرم فاز های مایع و جامد در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر می باشد:

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

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

φ در این جا تمرکز حجمی را نشان می دهد و اندیس های I و p به ترتیب بیانگر فاز سیال پایه و نانوذرات جامد می باشند.

$$\varphi_l + \varphi_p = \gamma \tag{(r-r)}$$

۳-۴-۲- معادله مومنتوم

معادلات مومنتوم فاز های مایع و جامد در دستگاه مختصات کارتزین و در راستای محور x و y به صورت زیر می باشند:

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

$$\frac{\partial(\varphi_p \rho_p u_p u_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p v_p u_p)}{\partial y} = -\varphi_p \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p \mu_p \frac{\partial u_p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p \mu_p \frac{\partial u_p}{\partial y}\right) + (F_{col})_x - (F_d)_x - (F_{vm})_x$$
(°-٣)

ب) مومنتوم در جهت y

و

معادله مومنتوم در جهت y هم به همین ترتیب نوشته می شود که در آن به خاطر اندازه کوچک میکروکانال از نیروی گرانش صرف نظر می شود.

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

$$\frac{\partial(\varphi_p \rho_p u_p v_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p v_p v_p)}{\partial y} \\
= -\varphi_p \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p \mu_p \frac{\partial v_p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p \mu_p \frac{\partial v_p}{\partial y}\right) + (F_{col})_y \\
- (F_d)_y - (F_{vm})_y$$
(Y-Y)

نیروهای درگ، جرم مجازی [۷۳] و اندرکنش ذره-ذره [۷۴] در معادله مومنتوم، از روابط زیر به دست می آیند:

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

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

$$F_{col} = G(\varphi_l) \vec{\nabla} \varphi_l \tag{1.17}$$

$$\beta = \frac{\tau}{\varepsilon} C_{\rm d} \frac{\varphi_l(\gamma - \varphi_l)}{d_p} \left| \vec{V}_l - \vec{V}_p \right| \varphi_l^{-\gamma/\gamma}$$
(1)- τ)

$$G = 1/\exp(-1 \cdot \cdot [\varphi_l - \cdot/\tau \vee 1]) \tag{17-7}$$

$$Re_p = \frac{\varphi_l \rho_l |\vec{V}_l - \vec{V}_p| d_p}{\mu_l} \tag{12-7}$$

البته باید دقت گردد که رابطه β فقط برای جریان های دو فازی با ۰/۸ < φ معتبر می باشد. همچنین باید توجه داشت که روابط (۳-۸) - (۲-۱٤) 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[۵۹].

۳-۴-۳- معادله انرژی

با در نظر گرفتن فاز های سیال و ذره به عنوان سیال های غیر قابل تراکم و صرف نظر از اتلاف ویسکوز و تابش، معادلات انرژی در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می شوند:

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p \rho_p u_p c_{p_p} T_p \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p \rho_p v_p c_{p_p} T_p \right) \\
= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + h_v (T_l - T_p) \quad (17.7)$$

ضریب انتقال حرارت حجمی بین فازی (
$$h_v$$
) از رابطه زیر به دست می آید:
$$h_v = \frac{r(1 - \varphi_l)}{d_p} h_p$$
(۱۷-۳)

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{k_l} = (1 + 1)/(Re_p)^{-1/2} Pr^{\frac{1}{7}}$$
(1.4-7)

و سپس ضریب هدایت گرمایی موثر (k_{eff}) در معادله انرژی و برای فاز های جامد و مایع از روابط زیر به دست می آید [۷۷] :

$$k_{eff,l} = \frac{k_{b,l}}{\varphi_l} \tag{19-7}$$

$$k_{eff,p} = \frac{k_{b,p}}{\varphi_p} \tag{(Y-Y)}$$

که

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

$$k_{b,p} = \sqrt{(1 - \varphi_l)} (\omega A + [1 - \omega]\Gamma) k_l$$
^(11-\vec{T})

$$\Gamma = \frac{\tau}{(\tau - \frac{B}{A})} \left\{ \frac{B(A - \tau)}{A(\tau - \frac{B}{A})^{\tau}} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B - \tau)}{(\tau - \frac{B}{A})} - \frac{B + \tau}{\tau} \right\}$$
(277-7)

$$B = 1/2 \circ \left(\frac{[1-\varphi_l]}{\varphi_l}\right)^{\frac{1}{q}}$$
(25.7)

$$A = \frac{k_p}{k_l} \tag{Yo-Y}$$

$$\omega = \sqrt{7.7} \times 1.^{-r}$$

مانند آنچه در مورد روابط مومنتوم گفته شده است، روابط (۳-۱۸) - (۳-۲) برای نانوذرات به دست آوررده نشده اند ولی ما این روابط را برای آن ها قابل قبول فرض می کنیم[۵۹].

عدد ناسلت بر اساس اختلاف بین دمای دیواره میکروکانال و دمای میانگین نانوسیال تعریف می-شود:

$$Nu = \frac{(hD_h)}{k_l} = q^{\prime\prime} D_h / k_l (T_w - T_m)$$
(YV_Y)

که دمای میانگین سیال دو فازی را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۸] :
$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^{p} (\int \rho_i u_i c_{pi} T_i dA)}{\sum_{i=1}^{p} (\int \rho_i u_i c_{pi} dA)}$$
(۲۸-۳)

انتگرال بالا روی سطح مقطع میکروکانال محاسبه می شود.

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

$$q^{\prime\prime} = (\varphi_l k_{eff,l} \frac{\partial T_l}{\partial y})_w + (\varphi_p k_{eff,p} \frac{\partial T_p}{\partial y})_w \tag{19-7}$$

و بر اساس ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی، مقدار متوسط آن به صورت زیر محاسبه می شود:
$$\overline{h} = rac{1}{L} \int_{.}^{L} h dx$$

حال می توان عدد ناسلت متوسط را با استفاده از ضریب انتقال حرارت متوسط به دست آورد.

۳-۵- شرایط مرزی

در ورودی، هر دو فاز جامد و مایع با سرعت محوری یکنواخت و یکسان وارد میکروکانال می شوند که توسط عدد رینولدز جریان مشخص می شود. در خروجی، شرایط مرزی سرعت و شرط عدم لغزش روی دیواره، برای هر دو فاز در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی دمایی روی دیواره ها، دما ثابت و در خروجی برای هر دو فاز به صورت زیر در نظر گرفته شده است: (شکل ۳-۲).



با توجه به این که طول میکروکانال زیاد می باشد، تغییرات سرعت و دمای خروجی در راستای محور x ، صفر فرض شده است.

f

فصل چهارم : روش حل عددی

در این فصل به بررسی روش حل عددی مسئله، نحوه همگرایی حل عددی، اعتبارسنجی نتایج و بررسی حساسیت به شبکه پرداخته میشود.

۴–۱– 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 نمی باشد و باید در ابتدا آن ها را به شکلی گسسته سازی نمود. به طور مثال معادلات ناویر – استوکس دارای ترم های انتقالی و پخش می باشد که هر یک از ترم ها را می توان 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 می سازد. 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 قلمرو های پیچیده ذاتاً ضعیف هستند و فقط باید از شبکه های با سازمان برای حل به وسیله آن ها استفاده کرد. اما روش های حجم محدود یا المان محدود دارای چنین ضعفی نیستند و قابلیت حل در دامنه های پیچیده را افزایش می دهند. در ضمن 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) نمی باشد در حالی که برای استفاده از روش تفاضل محدود به این مسئله زیاد بر می خوریم. البته در روش حجم محدود هم از شبکه با سازمان و هم بی سازمان استفاده می شود. 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 آن در مقایسه با روش

انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش های دینامیک سیالات محاسباتی 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 میدهد 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 می شود 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 دینامیک سیالات محاسباتی 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.

۲-۴- 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 حل میدان و استفاده از معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میدان و استفاده از معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میدان و استفاده از معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار 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 به معادله ی تصحیح فشار تبدیل می شود. استفاده از شبکه ی جا به جا شده در گسسته سازی میدان جریان جلوگیری می کند. بدین ترتیب برای هر پارامتر میدان گسبت از بین رفتن مشکلات اولیه ی حل میدان میدان جریان یعنی و میان می شود. استه میدان جریان جلوگیری می کند. بدین ترتیب برای هر پارامتر میدان جریان یعنی و میان تری می کندر میدان میدان میدان میدان گران می کند. بدین ترتیب برای هر پارامتر میدان جریان یعنی و می بار می می کند. میدان میدان میدان میدان میدان میدان گسته میدان جریان می شود و از مواج شدن مقادیر میدان جریان جلوگیری می کند. بدین ترتیب برای هر پارامتر می میدان جریان یعنی و می بار می گرد.

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

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e$$
(1-5)

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n$$
(Y-2)

منظور از A_e و A_n سطح عمود بر شار عبوری از وجه سلول مد نظر می باشد. اگر u, v, p مقادیر واقعی متغیر های میدان باشند، در این صورت اختلاف مقادیر حدسی و واقعی با v', p', v', v'

$$u' = u - u^* \tag{(7-$)}$$

$$v' = v - v^* \tag{(\xi-\xi)}$$

$$p' = p - p^* \tag{(°-$)}$$

۴-۲-۱ 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 هر دو فاز مایع و جامد نوشت [۲۹] :

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^{n} a_{nb} u'_{lnb} = \cdot \rightarrow u_{le} = u^{*}_{le} + d_{le} (p'_{P} - p'_{E}) \\ \sum_{l=1}^{n} a_{nb} v'_{lnb} = \cdot \rightarrow v_{ln} = v^{*}_{ln} + d_{ln} (p'_{P} - p'_{N}) \end{cases}$$

$$(7-i)$$

$$\begin{cases} \sum_{nb} a_{nb} u'_{p_{nb}} = \cdot \rightarrow u_{p_{e}} = u^{*}_{p_{e}} + d_{p_{e}}(p'_{P} - p'_{E}) \\ \sum_{nb} a_{nb} v'_{p_{nb}} = \cdot \rightarrow v_{p_{n}} = v^{*}_{p_{n}} + d_{p_{n}}(p'_{P} - p'_{N}) \end{cases}$$

$$(Y-\xi)$$

$$d_e = \left[\frac{A_e}{a_e}\right] \tag{A-1}$$

$$\iint \left[\frac{\partial(\varphi_l \rho_l u_l)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_l \rho_l v_l)}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p u_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p v_p)}{\partial y}\right] dx \, dy = \cdot \tag{(9-5)}$$

$$a_P p'_P = \sum a_{nb} p'_{nb} + b' \tag{(1.12)}$$

$$b' = [(\varphi_{l}\rho_{l}u^{*}{}_{l}A)_{w} - (\varphi_{l}\rho_{l}u^{*}{}_{l}A)_{e}] + [(\varphi_{p}\rho_{p}u^{*}{}_{p}A)_{w} - (\varphi_{p}\rho_{p}u^{*}{}_{p}A)_{e}] + [(\varphi_{l}\rho_{l}v^{*}{}_{l}A)_{s} - (\varphi_{l}\rho_{l}v^{*}{}_{l}A)_{n}] + [(\varphi_{p}\rho_{p}v^{*}{}_{p}A)_{s} - (\varphi_{p}\rho_{p}v^{*}{}_{p}A)_{n}]$$

$$(1) - \xi)$$

-Y--Y-- الگوریتم حل سیمپل ۱- میدان فشار و سرعت حدس زده می شوند. ۲- بر اساس معادلات (٤-۱) و (٤-۲) ، مقادیر اولیه میدان سرعت را به دست می آوریم. ۲- معادله تصحیح فشار p' حل می گردد. ۴- معادله تصحیح مقادیر فشار بر اساس رابطه ی p = p' + p۴- تصحیح مقادیر فشار بر اساس روابط (٤-۲) و (٤-۲). ۵- حل معادلات u, v بر اساس روابط (٤-۲) و (٤-۲). ۶- فشار حدسی جدید جایگزین p شده و مرحله ی ۱ دوباره آغاز می گردد تا جایی که به مقدار همگرایی برسد.

۴-۳- روش حل عددی

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

$$X = \frac{x}{D_h}, \quad Y = \frac{y}{D_h}, \quad U_i = \frac{u_i}{u_{in}}, \quad V_i = \frac{v_i}{u_{in}}, \quad P = \frac{p - p_{in}}{\rho_l u_{in}}, \quad \theta_i = \frac{T_i - T_{in}}{T_w - T_{in}}$$
$$Re_i = \frac{u_{in} D_h \rho_i}{\mu_i}, \quad Pr_i = \frac{\rho_i C_{p_i} v_i}{k_i}$$
(17-2)

معادلات حاکم پس از بی بعد سازی، به فرم زیر تبدیل می شوند:

• معادلات پيوستگي:

$$\frac{\partial(\varphi_l\rho_l U_l)}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_l\rho_l V_l)}{\partial Y} = \cdot$$

$$\frac{\partial(\varphi_p \rho_p U_p)}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_p \rho_p V_p)}{\partial Y} = \cdot$$
(15-5)

• معادلات مومنتوم:

الف) مومنتوم در جهت x

$$\frac{\partial(\varphi_{l}U_{l}U_{l})}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_{l}V_{l}U_{l})}{\partial Y} = -\varphi_{l}\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\gamma}{Re_{l}}\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\varphi_{l}\frac{\partial U_{l}}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(\varphi_{l}\frac{\partial U_{l}}{\partial Y}\right)\right] - \beta_{l}^{*}(U_{l}) \\
- U_{p} + \gamma^{\circ}\varphi_{p}\left[\left(\frac{\partial U_{l}}{\partial X}U_{l} + \frac{\partial U_{l}}{\partial Y}V_{l}\right) - \left(\frac{\partial U_{p}}{\partial X}U_{p} + \frac{\partial U_{p}}{\partial Y}V_{p}\right)\right] \qquad (\gamma^{\circ} \cdot \xi)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{p}U_{p}U_{p})}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_{p}V_{p}U_{p})}{\partial Y} \\ &= -\varphi_{l}\frac{\rho_{l}}{\rho_{p}}\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re_{p}}\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\varphi_{p}\frac{\partial U_{p}}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(\varphi_{p}\frac{\partial U_{p}}{\partial Y}\right)\right] \\ &- \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U_{l}}{\partial X}U_{l} + \frac{\partial U_{l}}{\partial Y}V_{l}\right] - \left(\frac{\partial U_{p}}{\partial X}U_{p} + \frac{\partial U_{p}}{\partial Y}V_{p}\right)\right] \\ &+ \beta_{p}^{*}\left(U_{l} - U_{p}\right) + G^{*}\left(\frac{\partial \varphi_{l}}{\partial X} + \frac{\partial \varphi_{l}}{\partial Y}\right) \end{aligned}$$
(17-2)

$$\beta_l^* = \frac{\gamma}{\varepsilon} C_d \frac{\varphi_l (\gamma - \varphi_l)}{d^* \rho_l} \sqrt{\left(U_l - U_p\right)^{\gamma} - \left(V_l - V_p\right)^{\gamma}} \varphi_l^{-\gamma/\gamma}$$
(19-2)

$$G^* = \frac{\exp(-\Im \cdot \cdot [\varphi_l - \cdot / \Im \vee \Im])}{u_{in}^{\Upsilon} \rho_p} \tag{14-2}$$

ب) مومنتوم در جهت y

که

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{l}U_{l}V_{l})}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_{l}V_{l}V_{l})}{\partial Y} \\ &= -\varphi_{l}\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{i}{Re_{l}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\varphi_{l}\frac{\partial V_{l}}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\varphi_{l}\frac{\partial V_{l}}{\partial Y} \right) \right] - \beta_{l}^{*}(V_{l}) \\ &- V_{p}) + \frac{i}{\rho_{p}} \varphi_{p} \left[\left(\frac{\partial V_{l}}{\partial X}U_{l} + \frac{\partial V_{l}}{\partial Y}V_{l} \right) - \left(\frac{\partial V_{p}}{\partial X}U_{p} + \frac{\partial V_{p}}{\partial Y}V_{p} \right) \right] \end{aligned}$$
(19-2)
$$\frac{\partial(\varphi_{p}U_{p}V_{p})}{\partial X} + \frac{\partial(\varphi_{p}V_{p}V_{p})}{\partial Y} \\ &= -\varphi_{l}\frac{\rho_{l}}{\rho_{p}}\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{i}{Re_{p}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\varphi_{p}\frac{\partial V_{p}}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\varphi_{p}\frac{\partial V_{p}}{\partial Y} \right) \right] \end{aligned}$$

$$-\cdot/\circ\varphi_{p}\frac{\rho_{l}}{\rho_{p}}\left[\left(\frac{\partial V_{l}}{\partial X}U_{l}+\frac{\partial V_{l}}{\partial Y}V_{l}\right)-\left(\frac{\partial V_{p}}{\partial X}U_{p}+\frac{\partial V_{p}}{\partial Y}V_{p}\right)\right]$$
$$+\beta_{p}^{*}(V_{l}-V_{p})+G^{*}(\frac{\partial\varphi_{l}}{\partial X}+\frac{\partial\varphi_{l}}{\partial Y}) \qquad (\uparrow\cdot\cdot\cdot)$$

• معادلات انرژي:

$$\frac{\partial}{\partial X}(\varphi_{l}U_{l}\theta_{l}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\varphi_{l}V_{l}\theta_{l}) \\ = \frac{1 - \sqrt{(1 - \varphi_{l})}}{\varphi_{l}} \frac{1}{Re_{l}Pr_{l}} \left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\varphi_{l}\frac{\partial\theta_{l}}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(\varphi_{l}\frac{\partial\theta_{l}}{\partial Y}\right)\right] - h_{v_{l}}^{*}(\theta_{l} - \theta_{p})$$

(۲۱-٤)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} (\varphi_p U_p \theta_p) &+ \frac{\partial}{\partial Y} (\varphi_p V_p \theta_p) \\ &= \frac{\sqrt{(\gamma - \varphi_l)} (\omega A + [\gamma - \omega] \Gamma)}{A \varphi_p} \frac{\gamma}{R e_p P r_p} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\varphi_p \frac{\partial \theta_p}{\partial X} \right) \right. \\ &+ \frac{\partial}{\partial Y} \left(\varphi_p \frac{\partial \theta_p}{\partial Y} \right) \right] + h_{v_p}^* (\theta_l - \theta_p) \end{aligned}$$

$$h_{v_l}^* = \frac{\gamma(\gamma - \varphi_l)}{d^{*\gamma}} (\gamma + \gamma/\gamma Re_p^{\gamma/\gamma} Pr_l^{\gamma}) \frac{\gamma}{Re_l Pr_l}$$
($\gamma \gamma_{-\epsilon}$)

سپس، معادلات بی بعد شده پیوستگی، مومنتوم و آنرژی، به روش حجم کنترل گسسته سازی می شوند. برای گسسته سازی ترم های جابجایی و دیفیوژن از روش آپ ویند ^۲ مرتبه ی اول استفاده می شود. پس از گسسته سازی، معادلات حاکم به یک دسته معادلات جبری تبدیل می شوند که به صورت تکراری و روش خط به خط حل می شوند [۹۹ و ۸۰]. برای حل کوپلینگ سرعت – فشار از الگوریتم سیمپل استفاده می کنیم [۸۰]. برای استفاده از این الگوریتم، معادله ی تصحیح فشار را از ترکیب معادلات پیوستگی فاز های مایع و جامد به دست می آوریم. در واقع، پس از به دست آوردن مولفه های سرعت از معادلات مومنتوم، مشخص نبوده است معادله پیوستگی کدام فاز برای به دست آوردن معادله تصحیح فشار مناسب می باشد، که راه حل ارائه شده در این پروژه، ترکیب معادلات پیوستگی فاز ها و به دست آوردن معادله تصحیح آوردن معادله تصحیح فشار جدید بوده که به اصلاح الگوریتم سیمپل ختم شده است. همچنین، برای سرعت بخشیدن به روند همگرایی، از ضرایب تخفیف برای سرعت و فشار استفاده شده است. در این الگوریتم ترم 'd در معادله تصحیح فشار (٤-۸) را، به عنوان معیار همگرایی در نظر می گیریم و تکرار تا رامانی ادامه می یابد که مقدار 'd ، به سمت صفر میل کند. در این جا تکرار را تا جایی که مقدار 'd در تمامی سلول ها کوچکتر از ^۹ ۱۰ شود، ادامه می دهیم.

۴-۴- مطالعه ی استقلال حل عددی از شبکه ی محاسباتی

برای بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول های به کار رفته در این مسئله، مقدار عدد ناسلت متوسط به ازای تعداد سلول ها و برای ضریب انبساط ۱۰:۳، کسر حجمی ۲۰/۱ و رینولدز های مختلف محاسبه شده است. در جدول ۴–۱ و شکل ۴–۱، عدد ناسلت متوسط برای ۴ نوع شبکه بندی و در یک رینولدز خاص (۲۰۱=Re)، به دست آمده است. با توجه به شکل ۴–۱، مشاهده می شود که عدد ناسلت بین شبکه بندی های ۳ و ۴ دارای اختلاف ناچیزی می باشد، بنابراین، شبکه بندی ۳ برای این مسئله در نظر گرفته می شود.

۴	٣	٢	١	شبکه بندی
$N_y \times N_x$	$N_y \times N_x$	$N_y \times N_x$	$N_y \times N_x$	
40 × 110	$r \cdot \times 1 \cdot \cdot$	$r \cdot \times a \cdot$	$1 \cdot \times 1 \Delta$	بخش ۱
180 × 890	9• × ٣••	8. × 10.	r• × 40	بخش ۲
۴۸۰۰۰	۳۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	10	تعداد کل سلول
٨/•١۴۶۵٧	۷/۹۸۸۷۱۳	V/804171	٧/٢١۴٨٧۵	ناسلت متوسط

جدول ۴-۱- خواص شبکه بندی های مختلف



شکل ۴–۱- استقلال از شبکه در ۱۰۰ e = Reو کسر حجمی ۰/۰۱.

۴–۵– اعتبار سنجی نتایج

برای اعتبار سنجی نتایج حاصل در این مسئله، طول گردابه را برای کسر حجمی صفر ($\phi_p = \phi$) و در ضریب انبساط ۱:۳ و رینولدز های مختلف محاسبه و با نتایج اسکات و همکاران [۸۱] مقایسه شده است. جدول ۴–۲ و شکل ۴–۲ نشان می دهند که انطباق خوبی بین نتایج این دو تحقیق وجود دارد و حد اکثر خطا برابر ٪۴ می باشد.

جدول ۴-۲- مقایسه طول گردابه های حل عددی با نتایج اسکات و همکاران [۸۱] در اعداد رینولدز ۵۰ تا

	• '	
طول گردابه	طول گردابه	رينولدز
$\frac{L_r}{h} [^{\wedge})]$	$\frac{L_r}{h}$	(<i>Re</i>)
۵/۱	۵/٣	۵۰
٩/٧	٩/٣	١٠٠
۱۵	14/8	۱۵۰
۲.	۲.	۲۰۰

. ۲۰۰



شکل ۴-۲- مقایسه طول گردابه های حل عددی با نتایج اسکات و همکاران [۸۱] در اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰.

اکنون پس از اعتبار سنجی کد نویسی و نتایج حاصل، به ارائه و تحلیل نتایج پرداخته می شود که در فصل بعد به تفصیل بیان شده است.

٥

فصل پنجم : ارائه و تحليل نتايج

در فصل سوم و چهارم با تشریح کامل مسئله و حل عددی آن، به اعتبارسنجی نتایج، بررسی حساسیت به شبکه 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 بر روی عدد ناسلت متوسط نانوسیال، در نمودارها و شکلهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش های ۵-۲ تا ۵-۹، نتایج برای میکروکانال با ضریب انبساط ۲۰۲ به دست آورده شده است و در بخش ۵-۱ و ۵-۱۰ اثر ضرایب انبساط مختلف نیز، مورد بررسی قرار گرفته است.

1-۵- بررسی تقارن و عدم تقارن گردابه ها

در شکل ۵–۱ طول گردابه های بالایی و پایینی میکروکانال نسبت به عدد رینولدز و در ضریب انبساط های مختلف (ER=4, ER=4 و ۵=ER) رسم شده است. نتایج نشان می دهد که برای میکروکانال با ضریب انبساط ۲۰۱، عدد رینولدز بحرانی برابر ۲۰۰ می باشد، به عبارت دیگر در رینولدز ۲۰۰ و کمتر از آن، طول گردابه های بالایی و پایینی با هم برابر و تقارن برقرار می باشد ولی در رینولدز های بالاتر از ۲۰۰۰، طول گردابه ها متفاوت از یکدیگر می باشند و تقارن آن ها از بین می رود، که به صورت دو شاخگی در شکل ۵–۱ نشان داده شده است. با توجه به همین امر، نتایج این مسئله در محدوده ی اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفته اند. با توجه به شکل ۵–۱، عدد رینولدز بحرانی برای ضرایب انبساط ۱:۴ و ۱:۵ به ترتیب، برابر ۱۵۰ و ۱۲۰ می باشد. در واقع با افزایش ضریب انبساط میکروکانال، عدد رینولدز بحرانی کاهش می یابد و دو شاخگی در رینولدز های پایین تر اتفاق می افتد.



شکل ۵-۱- مقایسه طول گردابه های بالایی و پایینی در $\phi_p = \cdot/$ و اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۵۰.

۵-۲- توزیع های سرعت، دما و کسر حجمی نانوذرات

در این بخش به طور نمونه، توزیع سرعت، دما و کسر حجمی فاز سیال در نواحی توسعه یافته در بخش $d_p = 1 \cdot \cdot m$ و $Re = 1 \cdot \cdot \phi_p = \cdot / \cdot 1$ و ۲ از میکروکانال انبساطی و ناحیه بعد از انبساط، در $\phi_p = - / \cdot \cdot 1$ و Re است.

الف) توزيع هاي سرعت:



الف) ناحيه توسعه يافته بخش ١



ب) ناحیه بعد از انبساط



ج) ناحیه توسعه یافته بخش ۲

شكل ۵-۲- توزيع سرعت فاز سيال نسبت به محور Y در الف) ناحيه توسعه يافته بخش ۱ ب) ناحيه بعد از انبساط

ج) ناحیه توسعه یافته بخش ۲

ب) توزیع های دما:



الف) ناحيه توسعه يافته بخش ١



ب) ناحيه بعد از انبساط



ج) ناحيه توسعه يافته بخش ٢

شکل ۵-۳- توزیع دمای فاز سیال نسبت به محور Y در الف) ناحیه توسعه یافته بخش ۱ ب) ناحیه بعد از انبساط

ج) ناحيه توسعه يافته بخش ٢

ج) توزیع کسر حجمی:



الف) ناحيه توسعه يافته بخش ١



ب) ناحيه بعد از انبساط



ج) ناحيه توسعه يافته بخش ٢

شکل ۵-۴- توزیع کسر حجمی فاز سیال نسبت به محور Y در الف) ناحیه توسعه یافته بخش ۱ ب) ناحیه بعد از انبساط

ج) ناحيه توسعه يافته بخش ٢

۵-۳- اثر عدد رینولدز بر روی میدان سرعت

در شکل ۵–۵، گردابه ها در رینولدز های مختلف ۵۰ تا ۲۰۰ نشان داده شده اند. مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز گردابه ها بزرگتر شده و طول آن ها افزایش می یابد.



الف) Re=°۰












Re=1۰۰ شکل ۵-۵- خطوط کانتور سرعت در $\phi_p = \cdot / \cdot 1$ و به ازای الف) $e=e^{-\alpha}$ ب) e=1 ج) e=1 ج) Re=1۰۰ د) د)

۵-۴- ویسکوزیته ی فاز جامد

ویسکوزیته ی جامد (μ_p)، یکی از ترم هایی است که در این مسئله دو فازی مورد نیاز است، در واقع ویسکوزیته جامد یک ویسکوزیته ی مجازی است که باید به درستی در این مدل تعریف شود. از آن جایی که، داده های تجربی زیادی برای ویسکوزیته ی جامد در مخلوط دو فازی مایع – جامد در دسترس نیست، باید از روش سعی و خطا مقدار مناسبی برای این ترم به دست آورد. این ویسکوزیته در عدد

جدول ۵–۱- حساسیت عدد ناسلت متوسط نسبت به ویسکوزیته ی جامد در $\phi_p = \cdot/\cdot 1$ و Re

ناسلت متوسط	ویسکوزیته ی جامد
Y/XL9 1 TT	•/•• ١
٧/٩۶۴٧١۴	•/••۵
٧/٨٩٢١١٢	•/••٨
٧/٩٣٨٢۴٣	•/• \
٧/٩۵٣٧١١	۰/۰۳
٧/٩٨١٨٣٨	• / • Y
٧/٩٨٨٧١٣	٠/٠٨٩
۸/۰۰۴۵۵۴	•/1

 $d_p = \cdots nm$

نتایج نشان می دهد که مقدار عدد ناسلت متوسط، حساسیت چندانی نسبت به تغییر ویسکوزیته ی جامد از خود نشان نمی دهد. در نتیجه دانستن مقدار دقیق ویسکوزیته ی جامد، امری خیلی مهم و حساس نمی باشد که صفار اول و همکاران [۵۹] نیز، چنین نتیجه ای را گزارش کرده اند. در این مسئله مقدار ویسکوزیته ی جامد ۰/۰۸۹ Pa.s در نظر گرفته شده است.

۵–۵– اهمیت ترم های نیرویی در معادله مومنتوم

در معادله مومنتوم، ۳ نیروی بین فازی وجود دارد (نیروی درگ، اندر کنش ذره – ذره و جرم مجازی). جدول ۵-۲ مقادیر این ۳ ترم را بر حسب کسر های حجمی مختلف نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر و ۳۰۰=۹۰۰، نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که نیرو های اندر کنش ذره – ذره و جرم مجازی، اثری بر روی عدد ناسلت متوسط ندارند، که یکی از دلایل آن ریز بودن نانوذرات می باشد که سبب می شود نیروی برخورد ذرات به یکدیگر کوچک و قابل اغماض باشد. از سوی دیگر می دانیم که اختلاف سرعت بین فازها کوچک می باشد و با توجه به رابطه ی (۳-۹)، مشاهده می شود که مشتق مادی این اختلاف سرعت ها ناچیز و سبب کوچک شدن نیروی جرم مجازی می شود.

جدول ۵-۲- اثر ترم های مختلف معادله ی مومنتوم روی عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر های حجمی مختلف نانوذرات با $d_n = 1 \cdot \cdot n m$ و ۱۰۰ Re = ...

صرف نظر از نیروی	صرف نظر از نیروی	صرف نظر از نیروی	در نظر گرفتن تمام	کسر حجمی
جرم مجازی	اندرکنش ذرہ – ذرہ	درگ	نيرو ها	(%)
٧/٩٨٨۶۴	٧/٩٨٨۶٢	٨/• ٢٤٨ ١	Y/9,8,8 Y	١
٨/١٩٣۴٩	٨/١٩٣۵٣	٨/٢٨٧١٣	٨/١٩٣۶۴٨	٢
٨/٤١١٩١	٨/٤١١٩٣	٨/۵۴١۶۴	٨/٤١١٩٤١	٣
٨/۶٣٣٩٢	٨/۶٣٣٧٨	٨/٨ ١٣٤ ١	٨/۶٣٣٩٨ ١	۴
٨/٨۵۶۶٨	٨/٨۵۶۵٨	٩/• ٩٧٣٣	٨/٨۵۶۶٩۶	۵

اما، نیروی درگ اثرات اندکی روی عدد ناسلت متوسط می گذارد. همچنین اثر نیروی درگ بر ناسلت متوسط، با افزایش کسر حجمی ۱ درصد، با صرف نظر از نیروی درگ، ناسلت متوسط به اندازه ۲۰/۳ افزایش می یابد در حالی که در کسر حجمی ۵ درصد این افزایش در ناسلت متوسط به اندازه ۲۰/۳ افزایش می یابد در حالی که در کسر حجمی ۵ درصد و درم و و جرم مجازی نانوسیال در مدل ریاضی، امکان پذیر می باشد.

۵-۶- بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب خالص

در شکل ۵-۶، درصد افزایش عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به آب خالص بر حسب کسر حجمی نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر ارائه شده است.



شکل ۵-۶- درصد افزایش عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات با $d_p = 1.00$ نتایج نشان می دهد که بهبود انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات، به صورت غیر خطی افزایش می یابد. این افزایش، از طریق بالا رفتن ضریب هدایت حرارتی سیال توسط نانوذرات مس و نیز حرکت چرخشی نانوذرات و افزایش سطح تماس با سیال پایه صورت می گیرد که سبب بهبود در انتقال حرارت می شود. نتایج نشان می دهد که در کسر حجمی ۲ درصد، عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به آب خالص در ۱۰۰ه به در اینتر از ۵۰ است.

۵–۷– اثر نانوذرات بر روی میدان سرعت و دما

نتایج شبیه سازی دو فازی در رینولدز ها و کسر حجمی های مختلف نشان می دهد که دما و سرعت نسبی بین فاز ها، کوچک می باشند. شکل ۵–۷ اثر نانوذرات بر روی میدان سرعت را، در ۰۱/ و $\phi_p = \phi_p$ و Re = 1.0 نشان می دهد. به دلیل تقارن در میدان جریان، در این بخش نیمه پایینی میکروکانال انبساط ناگهانی آورده شده است.



شکل ۵–۲- خطوط کانتور سرعت در $\phi_p = \cdot/\cdot 1$ و ۱۰۰ e = Re برای الف) سیال پایه. ب) نانوذره. ج) آب خالص.

در شکل ۵–۷ خطوط کانتور های سرعت آب خالص و نانوسیال (سیال پایه و نانوذرات) با هم مقایسه شده است. مشاهده می شود که نانوذرات اثر کمی بر روی توزیع سرعت دارند و طول ورودی هیدرودینامیکی را به مقدار ناچیزی افزایش می دهند، که این رفتار با توجه به اندازه خیلی کوچک و غلظت کم نانوذرات، قابل پیش بینی می باشد. به همین دلیل، افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به آب خالص، اندک می باشد، این رفتار را صفار اول و همکاران [۵۹] نیز، در نتایج خود گزارش کردند. با توجه به شکل ۵-۷، نتیجه می شود که سرعت نسبی بین فاز های سیال پایه و نانوذرات کوچک است.

شکل ۵–۸ اثر نانوذرات بر روی میدان دما را، در $\phi_p = \dots + \phi_p = \dots + e$ نشان می دهد. در این شکل خطوط کانتور های دمای آب خالص و نانوسیال (سیال پایه و نانو ذرات) با هم مقایسه شده است.



الف) فاز مايع (سيال پايه)



ب) فاز جامد (نانوذره)



ج) آب خالص

شکل ۵–۸- خطوط کانتور دما در $\phi_p = \cdot/\cdot 1$ و ۱۰۰ e = Re برای الف) سیال پایه. ب) نانوذره. ج) آب خالص.

شکل ۵–۸ نشان می دهد که نانوذرات گسترش لایه مرزی حرارتی را افزایش می دهند، به طوری که در فاصله $\frac{Y}{q}$ از مقطع انبساط میکروکانال به توسعه یافتگی می رسد. این در حالی است که در آب خالص، در فاصله $\frac{Y^1}{q}$ از مقطع انبساط میکروکانال، لایه مرزی حرارتی توسعه یافته می شود. می توان گفت با افزایش هدایت حرارتی سیال به دلیل وجود نانوذرات، نرخ انتقال حرارت بین نانوسیال و دیواره میکروکانال افزایش می یابد. از شکل ۵–۸ نتیجه می شود که اختلاف اندکی بین توزیع های دمایی سیال پایه و نانوذرات وجود دارد.

۵-۸- اثر کسر حجمی نانوذرات بر روی جریان و انتقال حرارت سیال

۵-۸-۱ افت فشار بی بعد

در شکل ۵–۹ اثر تغییر کسر حجمی نانوذرات بر روی افت فشار، برای ذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر نشان داده شده است.



. $d_p = 1 \cdot \cdot nm$ شکل ۵-۹- افت فشار بی بعد بر حسب عدد رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانو ذرات با

شکل ۵-۹ نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات در رینولدز های مختلف، افت فشار به آرامی افزایش می یابد. مطالعات قبلی نیز این رفتار بر روی افت فشار را، تصدیق می کنند [۴۸ و ۴۹]. این رفتار قابل پیش بینی است، چون نانوذرات اثر بسیار کمی بر روی میدان سرعت دارند.

۵-۸-۲ عدد ناسلت متوسط

شکل ۵–۱۰ اثرات عدد رینولدز جریان و کسر حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت متوسط را برای ذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر نشان می دهد. مشاهده می شود که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات و همچنین عدد رینولدز، افزایش می یابد. بنابرین، می توان از نانوسیال، به عنوان یک سیال کاری موثر در سیستم های خنک کاری استفاده کرد.



شکل ۵-۱۰- عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانو ذرات با d_p = ۱۰۰nm. افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش انتقال حرارت می شود؛ 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 می شوند. این رفتار با مطالعه تجربی وو^۱ و همکاران [۴۹] و بررسی عددی لی و کلینسترور^۲ [۵۰] برای میکروکانال ها، مطابقت دارد.

۵–۸–۳– نرخ عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به آب خالص

شکل ۵–۱۱ اثرات عدد رینولدز جریان و کسر حجمی نانوذرات بر نرخ عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به عدد ناسلت متوسط آب خالص را، برای ذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر نشان می دهد. مشاهده می شود که در هر عدد رینولدز، نرخ عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۱- نرخ عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز و برای کسر حجمی های مختلف نانوذرات با

$$d_p = \cdots nm$$

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. نتایج نشان می دهد که در یک کسر حجمی

> Wu ' Li and Kleinstreuer '

مشخص، با افزایش عدد رینولدز، نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به آب خالص به آرامی کاهش می یابد. به عبارت دیگر، در یک کسر حجمی مشخص از نانوذرات، رینولدز های پایین تر اثر بیشتری بر روی نرخ بهبود انتقال حرارت دارد.

۵-۸-۴ اثر قطر نانوذرات در بهبود انتقال حرارت

شکل ۵–۱۲ اثر اندازه نانوذرات بر روی مقدار بهبود انتقال حرارت نسبت به آب خالص را، در کسر های حجمی مختلف و ۲۰۰ =Re نشان می دهد. مشاهده می شود که افزایش کسر حجمی نانوذرات و همچنین کاهش قطر آن، سبب افزایش انتقال حرارت می شود. . برای نمونه، در کسر حجمی ۲ درصد از نانوذرات مس با قطر ۵۰ نانومتر، بهبود انتقال حرارت ۵ درصد بیشتر از نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر است.



شکل ۵–۱۲- درصد افزایش عدد ناسلت متوسط نسبت به آب خالص بر حسب کسر حجمی نانو ذرات با قطر های مختلف. و ۲۰۰ – *Re*

در واقع با کاهش قطر نانوذرات و ریز شدن آن، سطح تماس نانوذرات و سیال بیشتر می شود که این امر حرکت براونی نانوذرات را تقویت کرده و سبب بهبود در انتقال حرارت می شود.

۹-۵- ضریب عملکرد (Cop)

در این بخش ضریب عملکرد گرمایی نانوسیال برای رینولدز ها و کسر حجمی های مختلف و در میکروکانال با ضریب انبساط ۱:۳، رسم شده است. از شکل ۵–۱۳ نتیجه می شود که ضریب عملکرد نانوسیال در رینولدز های کمتر و کسر حجمی های بیشتر مقدار بزرگتری دارد. همان طور که در بخش ۵–۸–۳ گفته شد، در یک کسر حجمی مشخص از نانوذرات، رینولدز های پایین تر اثر بیشتری بر روی نرخ بهبود انتقال حرارت دارد، در نتیجه ضریب عملکرد افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۳- ضریب عملکرد گرمایی نانوسیال برای رینولدز ها و کسر حجمی های مختلف.

یک نتیجه گیری مهم از این نمودار این است که اگرچه طبق شکل ۵-۹ افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش افت فشار می شود، ولی افزایش نرخ عدد ناسلت نانوسیال با آب خالص افزایش بیشتری دارد و همان طور که در شکل ۵-۱۳ مشاهده می شود، ضریب عملکرد با افزایش کسر حجمی نانوذرات زیاد می شود. این امر نشان می دهد که با وجود افزایش اندک افت فشار نانوسیال نسبت به آب خالص، بهبود انتقال حرارت آن نسبت به خالص بسیار قابل توجه می باشد و سبب می شود تا از نانوسیال به عنوان یک سیال خنک کاری موثر استفاده کرد.

۵-۱۰- اثر ضریب انبساط میکروکانال بر روی جریان و انتقال حرارت سیال

شکل ۵–۱۴ اثرات عدد رینولدز جریان و ضریب انبساط (ER) میکروکانال بر روی افت فشار را برای نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر و کسر حجمی ۱ درصد، نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز و همچنین افزایش ضریب انبساط میکروکانال انبساط ناگهانی، افت فشار کاهش می یابد.



شکل ۵–۱۴– افت فشار بی بعد بر حسب عدد رینولدز در ضریب انبساط های مختلف میکروکانال، $d_p= \cdots nm$ و $\phi_p= \cdot/\cdot 1$

در شکل ۵–۱۵، اثر ضریب انبساط میکروکانال بر میدان سرعت، در ۱۵۰ = Re نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش ضریب انبساط میکروکانال، گردابه بزرگتر شده و طول آن افزایش می یابد.



الف) ضريب انبساط ١:٢



ب) ضريب انبساط ١:٣



ج) ضریب انبساط ۱:۴



د) ضریب انبساط ۱:۵

شکل ۵–۱۵– خطوط کانتور سرعت در ۱۰۱ $\phi_p = \cdot/$ ۰۱ مe = 8e و به ازای الف) ضریب انبساط ۱:۲ ب) ضریب انبساط ۱:۳ ج) ضریب انبساط ۱:۴ د) ضریب انبساط ۱:۵

شکل ۵–۱۵ نشان می دهد که با افزایش ضریب انبساط میکروکانال و در نتیجه کاهش افت فشار، ناحیه چرخش بزرگتر می شود. در حالت کلی، اندازه و طول گردابه در این جریان تابع عدد رینولدز، شرایط ورودی و ضریب انبساط میکروکانال می باشد.

شکل ۵–۱۶ اثرات عدد رینولدز جریان و ضریب انبساط میکروکانال بر عدد ناسلت متوسط را برای نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر و کسر حجمی ۱ درصد، نشان می دهد. مشاهده می شود که با کاهش ضریب انبساط میکروکانال انبساط ناگهانی و افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۶- عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در ضریب انبساط های مختلف میکروکانال،

$$d_p = \cdots nm, \phi_p = \cdot/\cdots$$

9

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در فصل پنجم اثر پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، غلظت حجمی نانوذرات، قطر نانوذرات و ضریب انبساط میکروکانال بر روی عدد ناسلت متوسط نانوسیال، در نمودار ها و جداول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل نتیجه گیری و جمع بندی نتایج ارائه شده و در پایان تعدادی پیشنهاد برای پژوهش های بعدی آورده می شود.

در این پروژه، جریان، افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال آب – مس در یک میکروکانال انبساط ناگهانی با دیواره های ایزوترم، به صورت عددی و به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز، ضریب انبساط میکروکانال، کسر حجمی و قطر نانوذرات بررسی شده است. جریان نانوسیال با روش دو فازی اویلرین – اویلرین مدل سازی و اختلاف بین سرعت ها و دما های هر دو فاز مایع و نانوذرات در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم هر دو فاز به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود، حل شده اند. نتایج نشان می دهد که سرعت و دمای نسبی بین دو فاز سیال پایه و نانوذرات، کوچک می باشد. در این تحقیق، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و برای حل کوپلینگ سرعت – فشار، الگوریتم سیمپل به کار گرفته شده، که برای معادله تصحیح فشار در این الگوریتم، از ترکیب معادلات پیوستگی فاز های مایع و جامد استفاده شده است. در واقع، با ترکیب معادلات پیوستگی فاز ها و به دست آوردن معادله تصحیح فشار جدید، به اصلاح الگوریتم سیمپل پرداختیم.

با حل جریان و انتقال حرارت نانوسیال توسط مدل دو فازی اویلرین – اویلرین، مشاهده می شود که استفاده از نانوسیال سبب بهبود و افزایش انتقال حرارت می شود. به طور مثال افزودن ۲ درصد حجمی از نانوذرات مس به اب، انتقال حرارت ان را حدود ۳۵ درصد افزایش میدهد. از طرف دیگر، افت فشار نانوسیال اندکی بالا تر از آب خالص می باشد و این در حالی است که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، افزایش می یابد. بررسی مسئله در میکروکانال ها با ضریب انبساط های مختلف نشان مي دهد كه با كاهش ضريب انبساط و افزايش عدد رينولدز، عدد ناسلت متوسط افزايش می یابد و همچنین مشاهده می شود که افت فشار با افزایش ضریب انبساط میکروکانال و عدد رینولدز، کاهش می یابد. در یک کسر حجمی یکسان از نانوذرات، نرخ عدد ناسلت متوسط نانوسیال به آب خالص در رینولدز های کمتر، مقدار بیشتری دارد. با ثابت نگه داشتن پارامتر های مختلف، نتیجه می شود که بهبود انتقال حرارت در نانوسیال با نانوذرات ریز تر افزایش می یابد؛ به طوری که در کسر حجمی ٪۲ از نانوذرات مس با قطر ۵۰ نانومتر، بهبود انتقال حرارت ۵ درصد بیشتر از نانوذرات با قطر ۱۰۰ نانومتر است. نتایج نشان می دهد که نیرو های اندرکنش ذره – ذره و جرم مجازی، اثری بر روی عدد ناسلت متوسط ندارند. اما، نیروی درگ اثرات اندکی روی عدد ناسلت متوسط می گذارد. همچنین، اثر نیروی درگ بر ناسلت متوسط، با افزایش کسر حجمی نانوذرات بیشتر می شود.

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 اویلرین – اویلرین 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.

۲-۶- پیشنهادات

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

- تاثیر شکل و تراکم حجمی نانوذرات 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^۱ به محل مورد نظر در بدن.
 - مطالعه ی نانوذرات غیر سمی و زیست تجزیه پذیر.

^{&#}x27; targeted drug delivery

[¹] Choi S.U.S. (1990) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: Siginer, D.A., Wang, H.P. (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED ^{YY1}/MD ^{YY1}. ASME, New York. ^{99–1+0}.

[Υ] George M. Whitesides ($\Upsilon \cdot \cdot \Upsilon$) The origins and the future of Microfluidic. J. Nature. ($\Sigma \Sigma \Upsilon$): $\Upsilon \Upsilon \Lambda_{-} \Gamma \vee \Gamma$.

[^r] Pak BC and Cho YI (۱۹۹۸) "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", Experimental Heat Transfer. (۱۱): ۱۰۱-۱۷۰.

[ξ] Khanafer K and Vafai K ($\gamma \cdot \gamma \gamma$) "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer. ($\circ \xi$): $\xi \xi \gamma \cdot \xi \xi \gamma \wedge$.

[°] Ho CJ, Liu WK, Chang YS, and Lin CC $(\uparrow \cdot \uparrow \cdot)$ "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study", International Journal of Thermal Sciences. $(\xi \uparrow)$: $\uparrow \pi \xi \circ - 1\pi \circ \pi$.

[¹] Everett DH (^{19AA}) Basic Principles of Colloid Science. London: Royal Society of Chemistry.

[^A] Lee S, Choi SUS, Li S and Eastman JA (1999) Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. J. Heat Transfer. (171): 7A+-7A9.

[\P] Granqvist CG and BuhrmanRA ($\P \P \P$) Ultrafine metal particles. J. Applied Physics letters. ($\xi \P$): $\P \P \P \cdots \P \P \P$.

[\cdot] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Thompson LJ, Lee S (\cdot \uparrow \uparrow \vee) Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. In Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II. ($\epsilon \circ \vee$): τ - \cdot .

[11] Romano JM, Parker JC, Ford QB (1997) Application opportunities for nanoparticles made from the condensation of physical vapors. (7): $17-17^{\circ}$.

[17] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ ($7 \cdot 1$) Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. J. Applied Physics letters. (7A): 71A-77.

[$\uparrow "$] Yatsuya S, Tsukasaki Y, Mihama K, Uyeda R ($\uparrow \uparrow \lor \land$) Preparation of extremely fine particles by vacuum evaporation onto a running oil substrate. J. Crystal Growth. ($\xi "$): $\xi \uparrow \cdot \cdot \xi \uparrow \xi$.

[1^{\sharp}] Wilson OM, Hu X, Cahill GD and Braun VP ($7 \cdot 7$) Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids. Physical Review B. (77): $77 \notin 7 \cdot 1$.

[\circ] Zoubida Haddad, Hakan F. Oztop, Eiyad Abu-Nada, Amina Mataoui ($\gamma \cdot \gamma \gamma$) A review on natural convective heat transfer of nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Issue γ . ($\gamma \gamma$): $\circ \gamma \gamma \gamma_{-} \circ \gamma \gamma \Lambda$.

[\uparrow] Kuznetsov AV, Nield DA ($\uparrow \cdot \uparrow \cdot$) Natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate, International Journal of Thermal Sciences, Issue \uparrow . ($\xi \uparrow$): $\gamma \xi \gamma_{-} \gamma \xi \gamma_{-}$

[γ] Nield DA, Kuznetsov AV ($\gamma \cdot \cdot \gamma$) The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, Issue $\gamma \circ \cdot \gamma \gamma$. ($\gamma \gamma : \circ \gamma \circ \gamma \circ \circ \gamma \circ$.

[\uparrow] Behseresht A, Noghrehabadi A, Ghalambaz M ($\uparrow \cdot \uparrow \epsilon$) Natural-convection heat and mass transfer from a vertical cone in porous media filled with nanofluids using the practical ranges of nanofluids thermo-physical properties, Chemical Engineering Research and Design.

[\uparrow] Noghrehabadi A, Ghalambaz M and Ghanbarzadeh A ($\uparrow \cdot \uparrow \epsilon$) Effects of Variable Viscosity and Thermal Conductivity on Natural-Convection of Nanofuids Past a Vertical Plate in Porous Media, Journal of Mechanics, DOI: $\uparrow \cdot , \uparrow \cdot \uparrow \lor / j$ mech. $\uparrow \cdot \uparrow \lor , \uparrow \cdot \uparrow \lor , \uparrow \downarrow \cdot \downarrow \lor / j$

 $[^{\gamma} \cdot]$ Choi SUS, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA $(^{\gamma} \cdot \cdot)$ Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. J. Applied Physics Letters. $(^{\gamma} \circ)$: $\gamma \gamma \circ \gamma_{-} \gamma \gamma \circ \xi_{-}$

 $[\gamma]$ Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W $(\gamma \cdot \cdot \gamma)$ Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. J. Heat Transfer. $(\gamma \circ): \circ \gamma \circ \gamma \varepsilon$.

[Υ] Patel HE, Das SK, Sundararajan T, Sreekumaran NA, George B, Pradeep T ($\Upsilon \cdot \Upsilon$) Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. J. Applied Physics Letters. ($\Lambda \Upsilon$): $\Upsilon \Upsilon \Upsilon \Gamma_{-} \Upsilon \Upsilon \Upsilon$.

[γ ^{γ}] You SM, Kim JH, Kim KH ($\gamma \cdot \cdot \gamma$) Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. J. Applied Physics Letters. ($\Lambda \gamma$): $\gamma \gamma \gamma \xi_{-} \gamma \gamma \gamma \gamma$.

 $[\gamma \xi]$ Vassallo P, Kumar R, D'Amico S $(\gamma \cdot \cdot \xi)$ Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids. Int. J. Heat Mass Trans. $(\xi \gamma)$: $\xi \cdot \gamma - \xi \gamma \gamma$.

 $[\uparrow \circ]$ O'Neal DP, Hirschb RL, Halasc JN, Paynea JD, Westb LJ $(\uparrow \cdot \cdot \cdot)$ Photo-thermal tumor ablation in mice using near infrared-absorbing nanoparticles. J. Cancer Letters. $(\uparrow \cdot \uparrow): 1 \lor 1 - 1 \lor 7$.

[7] Ajayan P M, Endo M, Strano SM ($7 \cdot 7$) Potential Applications of Carbon Nanotubes. J. Applied Physics letters. (1)1): 17-77.

[$\gamma\gamma$] Bruggeman DAG ($\gamma\gamma\gamma$) Calculation of various physical constants of heterogeneous substances and conductivities of the mixed body of isotropic substances. J. Ann. Phys. ($\epsilon\gamma\gamma$): $\gamma\gamma\gamma\gamma\gamma\gamma\epsilon$.

[\uparrow] Landauer R ($\uparrow \uparrow \lor \land$) Electrical conductivity in inhomogeneous media. In Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media. ($\vdots \cdot$).

[${}^{\gamma}{}^{q}$] Putnam SA, Cahill DG, Ash BJ, Schadler LS (${}^{\gamma}{}^{\cdot}{}^{\gamma}$) High-precision thermal conductivity measurements as a probe of polymer/nanoparticle interfaces. J. Appl. Phys. (${}^{\gamma}{}^{\epsilon}$): ${}^{\gamma}{}^{\Lambda}{}^{\circ}{}^{-}{}^{\gamma}{}^{\Lambda}{}^{\Lambda}$.

 $[^{r} \cdot]$ Keblinski P, Phillpot SR, Choi SUS, Eastman JA $(^{r} \cdot \cdot ^{r})$ Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). Int. J. Heat Mass Trans. $(\stackrel{\flat}{} \circ): \stackrel{\land \circ \circ - \stackrel{\land}{} 7^{r}}{}$.

 $[{}^{r}]$ Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y $({}^{r} \cdot \cdot {}^{r})$ Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles. Int. J. Thermophys. $({}^{r}{}^{r}): {}^{\circ}{}^{\circ}{}^{1}-{}^{\circ}{}^{\wedge}{}^{\cdot}$.

[^٣Y] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N (1997) Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid By Dispersing Ultra Fine Particles. Netsu Bussei (Japan). (٤): YYY-YYY.

[$^{\gamma\gamma}$] Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F and Wu Q ($^{\gamma} \cdot \cdot ^{\gamma}$) Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. J. Appl. Phys. ($^{\gamma}$): $\mathfrak{sold}_{\lambda} \mathfrak{sold}_{\gamma}$.

 $[{}^{r_{\xi}}]$ Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F $({}^{r_{\iota}}, {}^{r_{\iota}})$ Dependence of the thermal conductivity on nanoparticle-fluid mixture on the base fluid. J. Mater. Sci. Lett. $({}^{r_{\iota}}): {}^{r_{\iota}}: {}^{r_{\iota}:$

 $[{}^{\circ}\circ]$ Zhou LP and Wang BX $({}^{\circ}\cdot\cdot{}^{\circ})$ A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. Int. J. Heat Mass Trans. $({}^{\sharp}):$

[^{γ}] Assael MJ, Chen CF, Metaxa I, Wakeham WA ($\gamma \cdot \cdot \varepsilon$) Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water. Int. J. Thermophys. ($\gamma \circ$): $\gamma \gamma 1-\gamma \wedge \circ$.

 $[^{\forall \vee}]$ Biercuk MJ, Llaguno MC, Radosavljevic M, Hyun JK, Johnson AT, Fischer JE $(^{\forall \cdot \cdot \vee})$ Carbon nanotube composites for thermal management. J. Appl. Phys. Lett. $(^{\wedge \cdot})$: $^{\vee \vee \vee \vee}$

 $[^{r_{\Lambda}}]$ Xie H, Lee H, Youn W, Choi M $(^{r_{\cdot,r_{\tau}}})$ Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. J. Appl. Phys. $(^{9}\epsilon)$: $\epsilon^{97V}-\epsilon^{9V}$

[^{γ 4}] Wen D, Ding Y ($\gamma \cdot \cdot \dot{z}$) Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. Int J Heat Mass Transfer. ($\dot{z}\gamma$): $\dot{z}\gamma\lambda - \dot{z}\gamma\lambda\lambda$.

 $[\mathfrak{t} \cdot]$ Xuan Y, and Li Q $(\mathfrak{t} \cdot \mathfrak{r})$ Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. J. Heat Trans. $(\mathfrak{t}^{\mathfrak{q}})$: $\mathfrak{t} \cdot \mathfrak{r}^{\Lambda-1} \cdot \mathfrak{t}^{\mathfrak{r}}$.

[\mathfrak{t}] Koo J, Kleinstreuer C ($\mathfrak{t} \cdot \mathfrak{t}$) A new thermal conductivity model for nanofluids. J. Nanoparticles Res. (\mathfrak{t}): $\mathfrak{o} \forall \forall -\mathfrak{o} \wedge \Lambda$.

[\mathfrak{t}] Feng Y, Yu B, Xu P, Zou M ($\mathfrak{t} \cdot \mathfrak{t}$) The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. J. Phys.D: Appl. Phys. (\mathfrak{t}): \mathfrak{t}): \mathfrak{t}

[$\xi^{\mathfrak{r}}$] Yang HS ($\gamma \cdot \gamma$) Thermal conductivity of nano scale colloidal solution. J. Physical Review Letters. ($\gamma \xi$): $\gamma \circ \xi - \gamma \circ \gamma$.

[^{*٤*°}] Eastman JA, Choi US, Li S, Soyez G, Thompson LJ, Dimelfi RJ (¹⁹⁹⁹) Novel thermal properties of nanostructured materials. J. Mater. Sci. Forum. (^{*T*})?: ^{*T*}?^{*9*-7}.

[\mathfrak{s}] Putra N, Roetzel W, Das SK ($\mathfrak{r}, \mathfrak{r}$) Natural convection of nano-fluids. J. Heat Mass Trans. (\mathfrak{r}): $\mathfrak{r}_{\mathfrak{s}}$ - $\mathfrak{r}_{\mathfrak{s}}$.

[\mathfrak{t}^{γ}] Heris SZ, Etemad SGh, Esfahany MN ($\mathfrak{t} \cdot \mathfrak{t}$) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. (\mathfrak{T}^{γ}): $\mathfrak{o}^{\mathfrak{t}}\mathfrak{q}-\mathfrak{o}\mathfrak{r}\mathfrak{o}$.

 $[\mathfrak{L}^{\Lambda}]$ Jung JY, Oh HS, Kwak HY $(\Upsilon \cdot \mathfrak{L}^{\Lambda})$ Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. Int J Heat Mass Transfer. $(\circ\Upsilon)$: $\mathfrak{L}^{\Lambda} - \mathfrak{L}^{\Lambda}$.

[${}^{\varsigma q}$] Wu X, Wu H, Cheng P (${}^{\varsigma \cdot \cdot q}$) Pressure drop and heat transfer of Al ${}^{\varsigma O}$ —H ${}^{\varsigma O}$ nanofluids through silicon microchannels. J. Micromech. Microeng. (${}^{\circ q}$): ${}^{\circ \cdot \tau \cdot , 1}$ pp.

 $[\circ \cdot]$ Li J, Kleinstreuer C $(\uparrow \cdot \cdot \land)$ Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. Int J Heat Fluid Flow. $(\uparrow \uparrow): \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$.

[°] Santra AK, Sen S, Chakraborty N ($\gamma \cdot \gamma$) Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates. Int J Thermal Sci. ($\xi \wedge$): $\gamma \gamma \gamma - \xi \cdot \cdot$.

[°^{γ}] Behzadmehr A, Saffar-Avval M, Galanis N ($\gamma \cdot \cdot \gamma$) 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. ($\gamma \wedge$): $\gamma \gamma \gamma - \gamma \gamma q$.

[°^{γ}] Mirmasoumi S, Behzadmehr A ($\gamma \cdot \cdot \wedge a$) Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. J. Appl. Thermal Eng. ($\gamma \wedge$): $\gamma \gamma \vee - \gamma \gamma \vee$.

[°^{ξ}] Mirmasoumi S, Behzadmehr A ($^{\gamma} \cdot \cdot ^{\Lambda}$ b) Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube. Int J Heat Fluid Flow. ($^{\gamma}$): $^{\circ\circ\gamma}-^{\circ\gamma}$.

[°°] Akbarinia A, Laur R ($\gamma \cdot \gamma$) 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. ($\gamma \cdot \gamma = \gamma \cdot \gamma$.

[°] Kurowski L, Chmiel-Kurowska K, Thullie J ($\gamma \cdot \cdot \gamma$) Numerical simulation of heat transfer in nanofluids. J. Computer Aided Chemical Engineering. ($\gamma \gamma$): $\gamma \gamma \vee - \gamma \vee \gamma$.

[°^{γ}] Fard MH, Esfahany MN, Talaie MR (^{γ}·)·) 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. (^{$\gamma\gamma$}): ^{γ})-^{$\gamma\gamma$}.

 $[\circ^{\Lambda}]$ Lotfi R, Saboohi Y, Rashidi AM $(\uparrow \cdot \uparrow \cdot)$ Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different approaches. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. $(\uparrow \lor): \lor \xi = \lor \land$.

[°⁴] Saffar-Avval M, Kalteh M, Abbassi A, Harting J ($\gamma \cdot \gamma \gamma$) Eulerian–Eulerian twophase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel. J. International Journal of Heat and Fluid Flow. ($\gamma \gamma$): $\gamma \cdot \gamma - \gamma \gamma \gamma$.

 $[1 \cdot]$ Kalteh M, Saffar-Avval M, Abbassi A, Frijns A, Darhuber A, Harting J $(1 \cdot 11)$ Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. J. Applied Thermal Engineering. $(11): 11 \cdot 11$.

[1] Keshavarz M, Mohammadi R (1.1°) CFD modeling (comparing single and twophase approaches) on thermal performance of Al10°/water nanofluid in mini-channel heat sink. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. xxx (1.1°) xxxxxx.

[$\uparrow\uparrow$] Farhadi M, Darzi AAR, Sedighi K, Aallahyari SH, Aghajani M ($\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$) Turbulent heat transfer of Al \uparrow O \degree -water nanofluid inside helically corrugated tubes: Numerical study. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. ($\xi\uparrow$): $\uparrow\land-\lor\circ$.

[$\[\]$] Shariat M, Mokhtari R, Akbarinia A, Rafee R, Sajjadi S.M ($\[\]$) Impact of nanoparticle mean diameter and the buoyancy force on laminar mixed convection nanofluid flow in an elliptic duct employing two phase mixture model. J. International Communications in Heat and Mass Transfer. ($\[$): $\[\]$: $\[\]$: $\[\]$

[1^{ξ}] Oliveira PJ ($7 \cdot 7$) Asymmetric flows of viscoelastic fluids in symmetric planar expansion geometries. J Non-Newt Fluid Mech 11^{ξ} :77-77.

[7] Tsai CH, Chen HT, Wang YN, Lin CH, Fu LM ($7 \cdot 7$) Capabilities and limitations of 7-dimensional and 7-dimensional numerical methods in modeling the fluid flow in sudden expansion microchannels. J. Microfluid Nanofluid. (7):17-1A.

[γ] Chen HC, Tsai CH, Fu LM, Lin CH ($\gamma \cdot \gamma \cdot$) High performance microfluidic rectifier utilizing self-induced virtual valves in a sudden expansion channel with a block structure. In: The $\gamma \gamma rd$ IEEE international conference on micro electro mechanical systems (IEEE-MEMS $\gamma \cdot \gamma \cdot$), Hong Kong, $\gamma \in -\gamma \wedge$ Jan $\gamma \cdot \gamma \cdot$.

[$^{\Lambda}$] Van Dinther AMC, Schroen CGPH, Vergeldt FJ, Van der Sman RGM, Boom RM ($^{\Lambda}$ · $^{\Lambda}$) Suspension flow in microfluidic devices - A review of experimental techniques focussing on concentration and velocity gradients. J. Advances in Colloid and Interface Science. ($^{\Lambda}$): $^{\Gamma}$: $^{\Gamma}$.

[$\$] Chai L, Xia G, Wang L, Zhou M, Cui ZH ($\$) Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion–constriction cross-sections. Int J Heat Mass Transfer. ($\$): $\$): $\$ ($\$)- $\$).

 $[^{\vee}\cdot]$ Chai L, Xia G, Wang L, Zhou M $(^{\vee}\cdot)^{\varepsilon}$) Gas–liquid two-phase flow patterns in microchannels with reentrant cavities in sidewall. J. Experimental Thermal and Fluid Science. $(^{\circ}r)$: $^{1-9r}$.

[1] Chai L, Wang L, Zhou M, Xia G (1) Two-phase flow pattern and pressure drop in silicon multi-microchannel with expansion–constriction cross-section. J. Experimental Thermal and Fluid Science. (1): 1 : 1 .

 $[\forall \gamma]$ Hao YL, Tao YX $(\gamma \cdot \cdot \xi)$ A numerical model for phase-change suspension flow in

microchannels. Numer. Heat Transfer, Part A. (٤٦): °°-VV.

 $[\ensuremath{^{\gamma}}]$ Drew DA, Lahey RT $(\ensuremath{^{\gamma q \, \gamma}})$ Analytical modeling of multiphase flow. In: Roco, M.C.

(Ed.), Particulate Two-Phase Flow. Butterworth–Heinemann, Boston. o. 9–017.

[^Y[£]] Bouillard JX, Lyczkowski RW, Gidaspow D (^Y⁴/⁹) Porosity distributions in a

fluidized bed with an immersed obstacle. AIChE J. ($^{\circ}$): $^{\circ,\Lambda-977}$.

[^{vo}] Syamlal M, Gidaspow D (۱۹۸۵) Hydrodynamics of fluidization: prediction of wall

to bed heat transfer coefficients. AIChE J. ((1)): $(1) \times (1) \times (1)$

[\forall] Wakao N, Kaguei S (19Λ) Heat and Mass Transfer in Packed Beds. Gordon and Breach, New York.

 $[^{\forall \forall}]$ Kuipers JAM, Prins W, van Swaaij WPM ($^{1997})$ Numerical calculation of wallto-

bed heat-transfer coefficients in gas-fluidized beds. AIChE J. ($^{\text{TA}}$): $1 \cdot ^{\text{TA}}$.

 $[\forall A]$ Boulet P, Moissette S $(\forall \cdot \cdot \forall)$ Influence of the particle-turbulence modulation

modeling in the simulation of a non-isothermal gas-solid flow. Int. J. Heat Mass

Transfer. (\mathfrak{so}) : $\mathfrak{sf} \cdot \mathfrak{l} - \mathfrak{sf} \mathfrak{l}$.

[^{\4}] Versteeg HK, Malalasekera W (^{\44}°) An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method. Longman Scientific and Technical, England.

[1] Patankar SV (1) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington, DC.

[^1] Scott PS, Mirza FA (19,) A Finite Element Analysis of Laminar Flows through Planar and Axisymmetric Abrupt Expansions. J. Computers & Fluids. (12): 277-277.

Abstract

The importance and developments of microfluidic devices, like expansion microchannel, has caused that the investigation of the flow and the heat transfer of nanofluid in sudden expansion microchannel to be so important. On the other hand, the two phase models can be used instead of single phase model very well. Among two phase models, Eulerian-Eulerian model is very efficient because of considering the relative velocity and temperature of the phases and the nanoparticle concentration distribution. In this study, laminar forced convection of CuO nanofluid is numerically investigated in sudden expansion microchannel with isotherm walls and different expansion ratios. An Eulerian two-fluid model is considered to simulate the nanofluid flow inside the microchannel and the governing mass, momentum and energy equations for both phases are solved using the finite volume method. In solving the flow equations for both phases, the SIMPLE algorithm is modified for the coupling of the velocity and pressure and the continuity equations for both phases are combined in order to create the pressure correction equations. However, the Eulerian – Eulerian modeling results show higher heat transfer enhancement in comparison to pure water, so that for a $\frac{1}{2}$ copper-water nanofluid, it has been observed a vol increase of the heat transfer. The heat transfer enhancement increases with increase in Reynolds number and nanoparticle volume concentration, while the pressure drop increases only slightly. Also, the heat transfer increases with decrease in the nanoparticle diameter so that a $\frac{1}{2}$ copper-water nanofluid, for $\circ \cdot$ nm particle size, the enhancement in heat transfer is o' more in comparison to ... nm particle size. Investigation of the expansion ratio of microchannel shows that the average Nusselt number increases with decrease in expansion ratio as well as with increase in Reynolds number.

Keywords: Heat transfer; Nanofluid; Sudden expansion microchannel; two-phase; Eulerian-Eulerian.



Faculty of Mechanics

Two Phase flow and heat transfer Analysis of Nanofuid through Sudden expansion Microchannel

Farhad Abbassi Amiri

Supervisors:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan Dr. Mohsen Nazari

February ۲۰۱۰