



دانشکده مهندسی مکانیک گروه سیالات پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی عددی انتقال حرارت و جریان نانوسیال در کانال حاوی موانع متخلخل

نریمان کامرانی

اساتيد راهنما :

دکتر محسن نظری

دكتر پوريا اكبرزاده

شهريور ۱۳۹۴



شماره O o Y a S , Y a O , C ) تاریخ: ویرایش: O / A / S A

#### فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

باسمه تعالى

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **نریمان کامرانی** به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۵۲۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی عددی انتقال حرارت و جریان نانوسیال در کانال حاوی موانع متخلخل که در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

مردود 🗌	دفاع مجدد 🗌	قبول ( با درجه : میا خر امتیاز ۱۸، ۲۸ )

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

٣\_ خوب (١٧/٩٩ \_١٤ ) ۴ \_ قابل قبول ( ١٥/٩٩ \_ ١٢ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبة علمي	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
	دانشيار	دکتر محسن نظری	۱_استادراهنما
H	استاديار	دكتر پوريا اكبرزاده	۲- استاد راهنما
			۲_استاد مشاور
Re	مربى	مهندس احمد مددی	۳۔ نمایندہ شورای تحصیلات تکمیلی
	استاديار	دکتر علی خالقی	۴_ استاد ممتحن
1 th	استاديار	دکتر علی سررشتهداری	۵ ـ استاد ممتحن

رئیس دانشکده: امضاء 9

212-4

با سپاس از دو وجود مقدس: آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم؛ و آنان که موهایشان سپید شد تا ماروسفید شویم؛

پدرانمان

و مادرانمان

تقدیم به همسرم:

که سایهی مهربانیاش سایهسار زندگیم میباشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را

برايم تسهيل نمود.

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمتهای او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بیشائبهی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانتهایی را که به دستش سپردهاند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ: "

جناب آقایان دکتر محسن نظری و دکتر پوریا اکبرزاده اساتید راهنما شما روشناییبخش تاریکی جان هستید و ظلمت اندیشه را نور میبخشید. چگونه سپاس گویم مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم آموزی شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبهی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه عظمت و شکوه شما، مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف.

### تعهد نامه

اینجانب نریمان کامرانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی عددی انتقال حرارت و جریان نانوسیال در کانال حاوی موانع متخلخل" تحت راهنمائی دکتر محسن نظری و دکتر یوریا اکبرزاده متعهد می شوم.

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

تاريخ

امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

#### چکیدہ

در این پایان نامه افزایش انتقال حرارت با استفاده از روشهای عـددی در یـک کانـال دوبعـدی مـورد مطالعه قرار می گیرد. این مطالعه با استفاده از روش عددی و در حوزهی جریان آرام انجام می شود. دیوارهی کانال تحت شرط مرزی دما ثابت قرار دارد. سیال عامل مساله، نانوسیال است که با استفاده از مدل مخلوط دوفازی، مدل شدهاست. نواوری خاص این پایان نامه تلفیق نانوسیال تحت مدل مخلـوط دوفاز با محيط متخلخل است كه باعث افزايش چشمگير انتقال حرارت مي شود. اين اتفاق براي اولين بار رخ داده است و معادلات نهایی نانوسیال تحت مدل مخلوط دوفاز به عنوان سیال عامل برای محیط متخلخل، برای اولین بار تحلیل شده است. از کاربردهای نانوسیال می توان به خنک کاری دستگاههای مبدل حرارتی، بهبود راندمان ژنراتورهای خنککاری دستگاههای مبدل حرارت، بهبود راندمان انتقال حرارت برای دستگاههای خنککنندهی هوا، در یخچال فریزهای خانگی، خنککاری در صنعت ماشین کاری، در راکتورهای هستهای و صنایع دفاع و هوافضا، جداسازی گاز از نفت توسط نانوسیالات، جداسازی مولکولی با نانوسیال، خالصسازی شیمیایی با نانوسیالات، جداسازی نانوذرات بـا اسـتفاده از نانوسیالات و بسیاری موارد دیگر اشاره داشت. مشاهده می شود با کاربرد نانوسیال به عنوان سیال عامل، عدد ناسلت میانگین کانال افزایش پیدا می کند که این افـزایش بـرای مـدل دوفـاز و در درصـد حجمی ۵ درصد برای نانوذرات، ۳۵ درصد و برای مدل تکفاز ۲۰ درصد گزارش شده است. در نهایت برای افزایش هرچه بیشتر عدد ناسلت از محیط متخلخل در کانال استفاده می شود. مشاهده می شود با کاربرد محیط متخلخل با اپسیلون ۵/۰ و دارسی ۰/۰۰۱ و نانوسیال با مدل مخلوط دوفاز با درصد حجمی ۵ درصد برای نانوذرات، عدد ناسلت میانگین کانال افزایش ۷۷/۶۸ درصدی دارد که این مقدار برای نانوسیال دوفاز در درصد حجمی ۵ درصد برای نانوذرات در کانال بدون محیط متخلخال ۳۵ درصد بود. همچنین برای نانوسیال دوفاز با درصد حجمی ۵ درصد برای نانوذرات، افت فشـار متوسـط بی بعد در کانال در بیشترین مقدار خود نسبت به کانال بدون محیط متخلخان، افزایش ۵۸/۲۸ درصدی دارد که با کاربرد محیط متخلخل با اپسیلون ۰/۵ و دارسی ۰/۰۰۰۱ برای همین نانوسیال، این افزایش افت فشار متوسط کانال نسبت به کانال بدون محیط متخلخل، ۷۸/۶۳ درصد میباشد. واژههای کلیدی: روشهای عددی، کانال دوبعدی با صفحات موازی، جریان آرام، شرط مرزی دما ثابت، نانوسیال، مدل مخلوط دوفازی، محیط متخلخل

۱–مقدمه۱
۱-۱-تاریخچهی کارهای انجام شده۳
۲-۱-ار تباط موضوع تحقیق با کارهای قبلی
۱–۳–اهداف پایاننامه
۱–۴-تعیین چهارچوب کلی فصول پایاننامه۶۸
۲-روشهای عددی۲
۲-۱-مقدمهای برای دینامیک سیالات محاسباتی یا سیافدی۷۰
۳-نانوسیال۳
۲-۱-معرفی و تاریخچهی پیدایش
۲-۳-کاربردهای نانوسیالات۸۱
۳-۳-ویژگیها، مزایا و معایب نانوسیالات [۵۶]۸۲
۳-۴-مکانیزمهای افزایش انتقال حرارت توسط نانوسیالات[۵۷]۸۳
۳–۵-روش های تولید نانوسیالات [۵۸]۸۴
۳–۶–مدل های حل عددی نانوسیال۹
۳-۷-معرفی نانوسیال بکار رفته در پایاننامه۹۷
۴-محیط متخلخل۴
۱-۴-معرفی محیط متخلخل
۲-۴-ویژگیهای یک محیط متخلخل۱۰۱
۴-۳-رویکردها و معادلات حاکم در محیط متخلخل

لاسيون و معادلات حاکم	۵-فرموا
مندسه و شرایط مرزی	۵-۱-۵
ش.بندی	۵-۲-۵
ستخراج فرم بیبعد معادلات سیال خالص، نانوسیال و محیط متخلخل	۵-۳-۵
ستخراج معادلهی کلی برای نانوسیال در کانال کاملا پرشده با محیط متخلخل	J−4-0
ئسستهسازی معادلات بیبعد برای نانوسیال در کانال پرشده با محیط متخلخل	5-0-0
عرفی الگوریتم سیمپل برای حل معادلات مومنتوم	۵-۶-م
ئسستهسازی و حل معادلهی انرژی	5−۷−۵
حوهی محاسبهی ناسلت	۵–۸–ن
و گزارشات	۶-نتايج
حث استقلال حل عددی از مشبندی	۹-۱-۶ ب
عتبر سازی نتایج پایاننامه ۱۳۵	r−7-9
تایج نانوسیال در برابر آب خالص و در کانال بدون محیط متخلخل۱۴۱	۶–۳–ن
تایج حالت حدی برای نانوسیال ۱۴۷	۴-۶-ن
تایج آب خالص در کانال پر از محیط متخلخل نسبت به کانال بدون محیط متخلخل ۱۴۹	۵-۶-۲
تایج کانال حاوی محیط متخلخل برای نانوسیال دوفاز	۶_۶_ن
معبندی	۶−۷-۶
پیشنهادات	-\-6
تھا	۷-پيوس
نسستهسازی و محاسبهی فرم بیبعد معادلات برای نانوسیال دوفاز در کانال متخلخل ۱۶۰	5-1-7
عرفی الگوریتم سیمپل برای حل معادلات مومنتوم	۲-۲-۵

وط دوفاز در کانال فاقد و دارای محیط	۷-۳-استخراج معادلهی انرژی برای نانوسیال با مدل مخا
181	متخلخل
۱۷۱	۸ – منابع

### فهرست شكلها

شکل ۱-۱ کار وفایی و العظمی [۵] نمونهای از چیدمان نوع اول۴
شکل ۲-۱ کار ککمر و همکارانش [۶] نمونهای از حالت حدی چیدمان نوع اول
شکل ۱-۳ کار نبالی و بوهادف [۷] نمونهای از چیدمان نوع دوم۵
شکل ۱-۴ کار ژن و یان [۸] نمونهای از چیدمان نوع دوم۵
شکل ۱-۵ کار گرودژ و کاهالراس [۹] نمونهای از چیدمان نوع سوم
شکل ۱-۶ کار زهفروش و حسین پور [۱۰] و حالت حدی برای چیدمان نوع سوم
شکل ۱-۷ کار لی و همکارانش [۱۱] نمونهای از چیدمان نوع ۴۷
شکل ۱-۸ هندسهی کار تیاماه و همکارانش [۱۲] با محیط متخلخل در مرکز۷
شکل ۱-۹ نتایج کار تیاماه و همکارانش [۱۲] تغییرات عدد ناسلت بر حسب شعاع بیبعد خارجی
محیط متخلخل، برای حالت سوم از سه پیکر بندی مساله۹
شکل ۱۰-۱ نتایج کار ککمر و همکارانش [۶] تغییرات مربوط بـه بـازدهی حرارتـی بـه ازای تغییـرات
شعاع بی بعد محیط متخلخل برای اعداد دارسی مختلف
شکل ۱۱-۱ نتایج ککمر و همکارانش [۶] تغییرات بازدهی کل به ازای تغییر ضخامت بیبعد محیط
متخلخل.
شکل ۱-۱۲ پیکربندی کار محمد [۱۳]
شکل ۱-۱۳ نتایج محمد [۱۳] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات شعاع بیبعد محیط متخلخل۱۴
شکل ۱-۱۴ نتایج محمد [۱۳] تغییرات میزان افت فشار به ازای شعاعهای بیبعد مختلف۱۴
شکل ۱-۱۵ پیکربندی کار شکوهمند و همکارانش [۱۴]
شکل ۱-۱۶ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات افتفشار به ازای تغییرات ضخامت بیبعد
محيط متخلخل
شکل ۱-۱۷ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد

لایهی متخلخل و برای اعداد دارسی مختلف
شکل ۱-۱۸ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بـی.بعـد
لايەي متخلخل
شکل ۱۹-۱ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد
لایه یمتخلخل برای ضریب هدایت حرارتی ۱ و ۱۰ و عدد دارسی ۰/۰۰۰۱
شکل ۱-۲۰ پیکربندی کار نیموری و همکارانش [۱۵]
شکل ۱-۲۱ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات عدد ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بی-
بعد لایهی متخلخل
شکل ۱-۲۲ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] الگوی کاهشی ناسلت در پیکربندی مجاور دیـواره-
های کانال
شکل ۱-۲۳ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات ناسلت موثر به ازای تغییرات ضخامت بی-
بعد و برای اعداد دارسی مختلف و رینولدز ۲۰۰۰۰ و تخلخل به میزان ۰/۸
شکل ۱-۲۴ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات ناسلت موثر به ازای تغییرات ضخامت بی-
بعد و برای اعداد دارسی مختلف و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و تخلخل به میزان ۰/۸
شکل ۱-۲۵ هندسهی کار محمودی و معرفت [۱۶]
شکل ۱-۲۶ نتایج کار محمودی و معرفت [۱۶] تغییرات ناسلت در برابر تغییرات ضخامت بیبعد برای
اعداد دارسی مختلف و در k برابر با ۰/۱۰ و در Bi برابر با ۱
شکل ۱-۲۷ هندسهی کار یانگ و همکارانش [۱۷]
شکل ۱-۲۸ هندسهی کار زحمتکش و یعقوبی [۱۸]
شکل ۱-۲۹ هندسهی کار پاول و محمد [۱۹]
شکل ۱-۳۰ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تاثیر تخلخل و Rp بر روی عدد ناسلت که بـرای ۳ نمونـه
تخلخل نشان داده شدهاند

شکل ۱-۳۱ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تاثیر تخلخل و Rp بر روی افـتفشـار کـه بـرای ۳ نمونـه
نخلخل نشان داده شده اند۲۷
شکل ۱-۳۲ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تغییرات افتفشار به ازای تغییرات Rp برای اعداد دارسی
مختلف در رینولدز معین
شکل ۱-۳۳ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تغییرات ناسلت به ازای تغییـرات Rp بـرای اعـداد دارسـی
مختلف در رینولدز معین
شکل ۱-۳۴ هندسهی کار بالویی و همکارانش [۲۰]
شکل ۱-۳۵ هندسهی کار لی و همکارانش [۲۱]۳۰
شکل ۱-۳۶ هندسهی کار هانگ و همکارانش [۲۲]۳۱
شکل ۱-۳۷ نتایج کار هانگ و همکارانش [۲۲]
شکل ۱-۳۸ نتایج کار هانگ و همکارانش [۲۲]
شکل ۱-۳۹ هندسهی کار یانگ و هوانگ [۲۳]
شکل ۲-۴۰ نتایج کار یانگ و هوانگ [۲۳] تغییرات ناسلت در راستای مختصات محوری لوله به ازای
نغییرات مولفهی بیبعد مختصات محوری و برای مقادیر مختلف e ۳۴
شکل ۱-۴۱ طرح شماتیک مدار آزمایش در کار السالم و همکارانش [۲۴]. نمونهی لولـهی آزمـایش و
مونهای از تصاویر ورقهای متخلخل که به دور لوله پیچیده میشوند۳۵
شکل ۱-۴۲ هندسهی کار میزانوزامان و همکارانش [۲۵]۳۶
شکل ۱-۴۳ هندسهی کار سایتو و لموس [۲۶]۳۷
شکل ۱-۴۴ هندسهی کار یانگ و لیو و ناکایاما [۲۷]۳۸
شکل ۱-۴۵ هندسهی کار شکوهمند و همکارانش [۲۸]
شکل ۱-۴۶ هندسهی کار وی و کان [۲۹]
شکل ۱-۴۷ هندسهی کار سنکر و همکارانش [۳۰]

47	-۴۸ هندسهی کار ژو و همکارانش [۳۱]	شکل ۱
44	-۴۹ هندسهی کار الکام و همکارانش [۳۲]	شکل ۱
40	-۵۰ هندسهی کار لئونگ و لای [۳۳]	شکل ۱
49	۵۱- هندسهی کار بدرالدین و همکارانش [۳۴]	شکل ۱
41	-۵۲ هندسهی کار حاجیپور و دهکردی [۳۵]	شکل ۱
۴۸	-۵۳ هندسهی کار و گرید محاسباتی در کار هوانگ و وفایی [۳۶]	شکل ۱
49	-۵۴ هندسهی کار شیم و ژائو [۳۷]	شکل ۱
۵١	-۵۵ هندسهی کار تارگویی و کاهالراس [۳۸]	شکل ۱
۵۲	-۵۶ کار گرودژ و کاهالراس [۹]	شکل ۱
۵۳	-۵۷ هندسهی کار فو و همکارانش [۳۹]	شکل ۱
54	-۵۸ هندسهی کار نبالی و بوهادف [۴۰]	شکل ۱
۵۵	-۵۹ هندسهی کار صدیق و همکارانش [۴۱]	شکل ۱
۵۶	-۶۰ هندسهی کار بنکافادا و همکارانش [۴۲]	شکل ۱
۵۸	-۶۱ هندسهی کار یانگ و وفایی [۴۳]	شکل ۱
۶.	-۶۲ شماتیک مدار آزمایش و هندسهی کانال آزمایش در کار چین و همکارانش <b>[۴</b> ۵]	شکل ۱
۶۱	-۶۳ هندسهی کار لی و همکارانش [۴۶]	شکل ۱
۶۲	-۶۴ هندسهی کار هوانگ و یانگ [۴۷]	شکل ۱
۶٣	-۶۵ هندسهی کار چیخ و همکارانش [۴۸]	شکل ۱
۶۴	-۶۶ هندسهی کار یوسل و گوون [۴۹]	شکل ۱
۶۵	-۶۷ هندسهی و پیکربندی کار شاعری و همکارانش [۵۰]	شکل ۱
١٠	۱-۱ هندسهی کار، ابعاد کانال و شرایط مرزی ۶	شکل ۵
١٠	-۲ مشبندی برای هندسهی کار۷	شکل ۵

شکل ۵-۳ گرید بندی محدودهی حل و استفاده از روش گرید جابجا شده برای گسستهسازی ۱۱۹
شكل ۵-۴فلوچارت الگوريتم سيمپل
شکل ۵-۵ گرید یکجا در حل حرارتی و گرههای مجاور مورد نیاز در گسستهسازی و سطوح مهم در
گسستەسازى
شکل ۶-۱ نمودار استقلال ناسلت از تراکم مشبندی
شکل ۶-۲ بررسی تاثیر نسبت ابعادی روی ناسلت میانگین برای دو نسبت ۴ و ۸
شکل ۶-۳ نرخ همگرایی برای ناسلت توسعه یافته از کد عددی
شکل ۶-۴ نمودار معتبر سازی ناسلت میانگین کانال بدون محیط متخلخل سیال آب خـالص (درصـد
حجمی صفر) به ازای رینولدزهای متفاوت محدودهی جریان آرام با کارهای و کالته و همکارانش [۶۹]
و عبادیان و دانگ [۷۰]
شکل ۶-۵ معتبر سازی با استفاده از نتایج کار سانترا و همکارانش [۶۲]
شکل ۶-۶ سرعت محور مرکزی کانال برای معتبرسازی با استفاده از فرمول طول ورودی
شکل ۶-۷ درصد افزایش ناسلت نانوسیال دوفاز در کانال بدون محیط متخلخل به ازای درصد حجمی-
های مختلف
شکل ۶-۸ تغییرات ناسلت محلی آب خالص و نانوسیال دوفاز به ازای درصد حجمی ذرات جامد . ۱۴۲
شکل ۶-۹ سرعت افقی محور مرکزی کانال به ازای تغییرات درصد حجمی نانوذرات۱۴۲
شکل ۶-۱۰ پروفیل سرعت توسعه یافته در یک مقطع عمودی از کانال به ازای تغییرات درصد حجمی
نانوذرات
شکل ۶-۱۱ توزیع فشار متوسط بی بعد در کانال حاوی نانوسیال دوفاز به ازای تغییرات درصد حجمی
144
شکل ۶-۱۲ سرعت رانش برای ذرات در راستای طولی کانال فاقد محیط متخلخال و باری محور
مرکزی

شکل ۶-۱۳ سرعت رانش برای فاز سیال پایـه (آب خـالص) در مخلـوط نانوسـیال ۱ درصـد و بـرای
رينولدز ۱۰۰
شکل ۶-۱۴ سرعت لغزش یا تفاضل سرعت فاز ذرات و فاز سیال پایه بـرای درصـد حجمـی ۱ درصـد
۱۴۷
شکل ۶-۱۵ سرعت محور مرکزی برای سیال خالص و نانوسـیال بـه ازای درصـد حجمـی صـفر بـرای
نانوذرات در رینولدز ۱۰۰
شکل ۶-۱۶ توزیع فشار نرمال برای آب خالص و نانوسیال به ازای درصد حجمی صفر بـرای نـانوذرات
برای رینولدز ۱۰۰
شکل ۶-۱۷توزیع ناسلت محلی برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی صفر برای نانوذرات ۱۴۹
شکل ۶-۱۸ سرعت محور مرکزی برای آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و پرشده بـا محـیط
متخلخل با اپسیلون ثابت ۵/۰ و دارسی های متفاوت
شکل ۶-۱۹ پروفیل سرعت در یک مقطع توسعه یافته بـه ازای اپسـیلون ثابـت و بـرای دارسـیهـای
مختلف
شکل ۶-۲۰ فشار متوسط بی بعد کانال برای آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و کانال پرشده
با محیط متخلخل به ازای اپسیلون ۵/۰ و دارسیهای متفاوت
شکل ۶-۲۱ ناسلت محلی آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و کانال پرشده با محیط متخلخل
با اپسیلون ۵/۰ و دارسی های مختلف ۱۵۲
شکل ۶-۲۲ توزیع فشار متوسط بی بعد برای نانوسیال در محیط متخلخل
شکل ۶-۲۳ نانوسیال ۵ درصد در کانال بدون محیط متخلخل و پر با محیط متخلخل با اپسیلون ۰/۵
و دارسیهای متفاوت نسبت به آب خالص ۱۵۴
شکل ۶-۲۴ درصد افزایش ناسلت نسبت به آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل بـرای درصـد
حجمیهای مختلف

محيط متخلخل بـه	فاز و دوفاز در	ک فاز و دو	نانوسيال ت	کانال برای	ميانگين	ِ ناسلت	مقدار	20-8	شكل
۱۵۵		•••••		•••••	ختلف	م ای م	حجمح	درصد	ازای ا

#### فهرست جداول:

جدول ۳-۱ جدول خواص سیال پایه و نانوذرات ۹۷
جدول ۶-۱ افزایش تراکم مش در یک نسبت ابعادی ثابت برای مطالعهی استقلال حل عددی از تراکم
مش برای رینولدز ۱۰۰
جدول ۶-۲معتبرسازی نتایج برای سیال آب خالص و کانال بدون محیط متخلخل و فرمـول.نـدی اول
برای ناسلت
جدول ۶-۳ معتبرسازی نتایج پایاننامه با کار سانترا و همکارانش[۶۲]
جدول ۶-۴معتبر سازی نتایج از طریق محاسبهی طول ورودی برای سیال خالص (یـا درصـد حجمـی
صفر برای نانوذرات) در کانال بدون محیط متخلخل

# علائم و نشانهها

$a\left(\frac{m}{s^2}\right)$	شتاب
$C_p\left(\frac{j}{kg.K}\right)$	گرمای ویژه
$DA = \frac{K}{H^2}$	عدد دارسی
$D_{hy} = 2H$	قطر هیدرولیکی کانال
${f}_{drag}$	نیروی درگ
h	عرض کانال
Н	عرض بیبعد کانال
$h = \frac{Nu * k}{D_{hy}}$	ضريب انتقال حرارت همرفتي
i	اندیس شمارنده در راستای سطرهای کانال
j	اندیس شمارنده در امتداد ستونهای کانال
$k\left(\frac{w}{m.\mathrm{K}}\right)$	ضریب هدایت حرارتی
k <sub>e</sub>	ضريب هدايت حرارتى موثر براى محيط متخلخل
$k_{\it final}$	ضـریب هـدایت حرارتـی مـوثر نانوسـیال در محـیط
	متخلخل
$K\left(m^{2}\right)$	نفوذپذیری
l	طول کانال
L	طول بیبعد کانال
М	تعداد گرهها در راستای افقی در شبکهبندی کانال

تعداد گرهها در راستای عمودی در شبکهبندی کانال

Nu = 
$$2 \frac{\partial \theta}{1 - \theta_b}$$
acc itult auliXu cloud li éqoelvage ledNu =  $2 \frac{\partial \theta}{\partial y^*}$ cost itult of equelvage cloudacc itult auliXu cloudcost itult of equelvage cloud $P\left(\frac{N}{m^2}\right)$ cost itult of equelvage cloudPr =  $\frac{C_{p,f} H_f}{k_f}$ cost itult of equelvagePr =  $\frac{C_{p,f} H_f}{k_f}$ cost itult of equelvagePr =  $\frac{C_{p,f} H_f}{k_f}$ cost itult of equelvagePr =  $\frac{C_{p,f} U_m H}{k_f}$ cost itult of equelvagePr =  $\frac{P_f U_m H}{\mu_f}$ cost itult of equelvageIf  $\mu$ cost itult of equelvage

N

ش

$x^* = \frac{x}{H}$	مختصات بیبعد افقی کانال
$\Delta X = \frac{L}{M}$	طول بیبعد هر سلول از شبکهبندی کانال
у	مختصات عمودى كانال
$y^* = \frac{y}{H}$	مختصات بیبعد عمودی کانال
$\Delta Y = \frac{H}{N}$	عرض بیبعد هر سلول از شبکهبندی کانال
	علائم يونانى
ε	تخلخل
φ	درصد حجمی نانوذرات
$\mu\left(\frac{Ns}{m^2}\right)$	ضریب گرانروی
$ \rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) $	چگالی
$\theta = \frac{\left(T - T_{in}\right)}{\left(T_{w} - T_{in}\right)}$	دمای بیبعد
$\beta = \frac{k}{mal} \cdot \frac{1}{P\rho}$	ضریب جملات پخش یا دیفیوژن برای معادلهی ہی-
f f	بعد انرژی
τ	تانسور تنش برشی

## زيرنويسها

average	میانگین
bulk	کپهای یا بالک
ſ	سيال
in	ورودى
local	محلى
m	مخلوط
nf	نانوسيال
p	ذرات
и	مولفهی افقی سرعت
v	مولفهى عمودى سرعت

۱-مقدمه

بهبود انتقال حرارت (انتقال انرژی از محیط گرم به سرد) همواره به عنوان یکی از چالشهای اساسی برای مهندسین در صنعت مطرح بودهاست. بهبود انتقال حرارت در دستگاههای حرارتی همانند مبدل-های حرارتی و تجهیزات الکتریکی، یک فاکتور مهم محسوب می شود. بدین منظور روش های گوناگونی همانند كاربرد انواع جایگذار ( مانند سطوح گسترشیافته (پرهها) ، تیغهها و بلوکها پیشنهاد شده-است و همچنین مطالعات زیادی در خصوص بهینهسازی اندازه، چیدمان و شکل این جایگذارها انجام شدهاست. یک روش دیگر برای بهبود در مولفههای انتقال حرارت کاربرد محیطهای متخلخل و همچنین کاربرد سیالات نانو میباشد. این روش توجه بسیاری از محققین و پژوهشگران را معطوف خود کردهاست و علت اولیه ی این توجهات ورود ساختارهای متخلخل به بسیاری از کاربردهای مهندسی همانند فرآیندهای خشک کردن<sup>6</sup> ، تصفیه<sup>6</sup> ، عایقکاری حرارتی<sup>۷</sup> ، سیستمهای زمین گرمایی <sup>^</sup>، جریان زمینی آب و نفت و همینطور انواع مبدلهای حرارتی می اشد. جریانات در محیطهای متخلخل، در ایستگاههای قدرت در کاربردهای مهندسی هنگامیکه گرم و سرد کردن رخ میدهد. مورد نیاز خواهد بود [۱]. در مورد کاربرد سیالات نانو می توان گفت یکی از روشهای افـزایش تبـادل حرارت سیالات متداول حرارتی، پخش ذرات یا اکسیدهای فلزی با هدایت حرارتی بالا در سیال پایه است. این ایده اولین بار توسط ماکسول [7] مطرح شده است. البته ذراتی که ماکسول از آنها استفاده نمود، درشت بودند و مشکلاتی نظیر افت فشار بسیار زیاد، تهنشینی ذرات و انسداد و گرفتگی لولهها را در پی داشتند. با پیشرفت در فناوری نانو، چـوی ٔ [۳] اسـتفاده از نـانوذرات را بـرای ایـن منظـور ییشنهادکرد که سیال بدستآمده را نانوسیال<sup>۱۱</sup> نامید. بهبود انتقال حرارت جابجایی در اثـر افـزودن

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Insert

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Fin

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Baffles <sup>4</sup> Blocks

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Drying process

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Filtration

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Thermal insulation

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Geothermal systems

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Maxwell, J.C. 1873

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Choi, S.U.S. and Eastman, J.A. 1995

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Nano-fluid

نانوذرات سبب شد تا از آن پس، محققان بسیاری به تحلیل استفاده از نانوسیالات در طیف وسیعی از مسایل مهندسی بپردازند. برخی از این مطالعات توسط داس و همکاران<sup>(</sup> [۴] گردآوری شدهاست. در این پایاننامه که یک کار عددی محسوب می شود از مدل مخلوط دوفازی برای مدلسازی نانوسیال و برای حل معادلات کوپلهی سرعت فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شدهاست.

#### ۱-۱-تاریخچهی کارهای انجام شده

در فصل اول پایاننامه به بررسی و بازنگری مقالاتی که در راستای اهداف پایاننامه هستند پرداخته می شود. از آنجاییکه هدف این پایاننامه، بررسی افزایش انتقال حرارت و افت فشار متوسط در کانال می باشد، ابتدا به مرور مقالاتی که در این زمینه پژوهشهایی انجام دادهاند می بردازیم. لازم به ذکر است که از جمله تمهیداتی که در این پایاننامه برای افزایش انتقال حرارت اندیشیده شده است، کاربرد محیط متخلخل است که در کنار این محیطهای متخلخل، از نانوسیال برای دستابی به بهترین به بهترین به به به به به می باشد، این با به مرور مقالاتی که در این پایاننامه برای افزایش انتقال حرارت و افت فشار متوسط در کانال می باشد، ابتدا به مرور مقالاتی که در این زمینه پژوهشهایی انجام دادهاند می بردازیم. لازم به ذکر است که از جمله تمهیداتی که در این پایاننامه برای افزایش انتقال حرارت اندیشیده شده است، بهترین نتیجه استان به می بهترین نتیجه استفاده می شود.

#### ۱–۱–۱–چیدمانهای کلی

برای مرور بهتر مقالات جمع آوری شده، دستهبندیهایی بر اساس هندسهی محیط متخلخل در مساله ارائه می شود که برای دستهبندیها ۴ چیدمان کلی در نظر گرفته می شود و ۴ چیدمان کلی هندسی به قرار زیر هستند:

۱- هندسههایی که شامل ماده متخلخل در مرکز جریان هستند. در حالت حدی این چیدمان،
 مسائلی جای می گیرند که کل کانال یا لوله توسط مادهی متخلخل پر شدهباشد. نمونهای از
 این هندسه را در شکل ۱-۱ از کار وفایی و العظمی<sup>۲</sup>[۵] وشکل ۱-۲ از کار ککمر<sup>۳</sup> و

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Das, S.K., Choi, S.U.S. and Patel, H.E. 2006

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Alazmi and Vafai 2002

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Cekmer 2012

همکارانش [۶] می توان مشاهده کرد.



۲-این نوع چیدمان شامل مسائلی می شود که در آنها مادهی متخلخل در مجاورت دیواره های کانال، دیوارهی بالایی یا پایینی یا هر دو دیواره، قرار دارد. در این نوع چیدمان مقطع کانال به-صورت چهار گوش یا دایروی و ... می تواند باشد. در شکل ۱-۳ از کار نبالی و بوهادف ( [۷] و شکل ۱-۴ از کار ژن و یان [۸] نمونه ای برای این نوع

چیدمان آورده شدهاست.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nebbali and Bouhadef 2006
<sup>2</sup> Jen and Yan 2005



شکل ۱-۳ کار نبالی و بوهادف [۷] نمونهای از چیدمان نوع دوم



شکل ۱-۴ کار ژن و یان [۸] نمونهای از چیدمان نوع دوم

۳- این نوع چیدمان در برگیرنده یهندسههایی است که در آنها محیط متخلخل به صورت موانعی ظاهر می شوند که فقط در بالای کانال و یا فقط در پایین کانال، قرار گرفتهاند. این نوع چیدمان در برگیرنده ی کانالهایی که درآنها موانع متخلخل به طور همزمان در بالا و پایین کانال قرار گرفتهاند نمی باشد. برای این گروه از پیکربندی ها می توان حالت حدی را به این صورت بیان نمود که ارتفاع موانع افزایش پیدا کنند تا با عرض ثابت به دیواره ی مقابل خود برسند. نمونهای از این چیدمان در شکل ۱-۵ از کار گرودژ و کاهالراس [۹] و نمونه ای از حالت حدی در شکل ۱-۶ از کار زهفروش و حسین پور [۱۰] این مساله در آورده شدهاست.



شکل ۱-۵ کار گرودژ و کاهالراس [۹] نمونه ای از چیدمان نوع سوم



شکل ۱-۶ کار زهفروش و حسین پور [۱۰] و حالت حدی برای چیدمان نوع سوم

۴- این نوع پیکربندی هندسههایی را شامل می شود که در آنها محیط متخلخل در قالب موانعی هستند که به صورت چیدمان دو ردیفه در پایین و بالای کانال، توامان قرار گرفتهاند. نمونه-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Guerroudj and Kahalerras 2010 <sup>2</sup> Zehforoosh and Hossainpour 2010



ای از این نوع چیدمان در شکل ۱-۷ از کار لی و همکارانش ( [۱۱] آورده شدهاست.

شکل ۱-۷ کار لی و همکارانش [۱۱] نمونه ای از چیدمان نوع ۴

در ادامهی کار به ارائهی تاریخچهی کارهای انجام شده در راستای موضوع پایاننامه با استفاده از ۴ نوع چیدمان کلی ذکر شده میپردازیم. ارائهی تاریخچه به ترتیب چیدمان های اول تا چهارم میباشد. در سال ۲۰۱۱ در یک کار عددی تیاماه و همکارانش<sup>۲</sup> [۱۲] درصدد افزایش انتقال حرارت با استفاده از جایگذار متخلخل در هستهی جریان در یک لوله بر آمدند. شکل ۱-۸ هندسهی کارشان را نشان میدهد.



شکل ۱-۸ هندسهی کار تیاماه و همکارانش [۱۲] با محیط متخلخل در مرکز

آنها با در نظر گرفتن این غالب کلی برای کارشان، سه حالت خاص برای هندسهی کار در نظر گرفتند و نتایج را در غالب این سه حالت ارائه دادند. قبل از بیان قالبها لازم است که پارامترهایی که در

<sup>1</sup> Li 2010

<sup>2</sup> Teamah 2011

ادامهی معرفی کار تیاماه و همکارانش، مورد نیاز است را تعریف کنیم.  $r_{pi}$ : شعاع داخلی محیط متخلخل میباشد که اگر این مقدار صفر باشد بدین معنی است که محیط متخلخل، دیگر به صورت حلقهی با ضخامت  $r_{pe} - r_{pi}$  نمیباشد و به صورت یک استوانهی یکپارچه میباشد؛

 $r_{pe}$ : شعاع خارجی محیط متخلخل میباشد؛  $r_0$ : شعاع کانال میباشد؛  $r_0$ : فاصلهی قرارگیری محیط متخلخل از ابتدای کانال میباشد که اگر این مقدار صفر باشد بدین معنی است که محیط متخلخل از ابتدای کانال (ورودی کانال) در هستهی جریان قرار گرفته است؛ معنی است که محیط متخلخل از ابتدای کانال (ورودی کانال) در مستهی جریان قرار گرفته است؛ معنی است که محیط متخلخل از ابتدای کانال (ورودی کانال) در مسته می جریان قرار گرفته است؛ معنی است که محیط متخلخل از ابتدای کانال (ورودی کانال) در مسته محیات قرار گرفته است است؛ معنی است که محیط متخلخل از ابتدای کانال (ورودی کانال) در مسته محیان قرار گرفته است است؛ معنی است که محیات می مینان می مینان (ورودی کانال) میبان در مسته محیان قرار محیان می می است که از تقسیم می در است که از مسته محیان می می در این پارامتر را

شعاع داخلی بی بعد محیط متخلخل است که از تقسیم  $r_{pi}$  بر  $r_{0}$  حاصل می شود. این پارامتر را  $R_{pi}$ 

L : طول کانال میباشد؛

این سه حالت به شرح زیر است:

- حالت ۱: مادهی متخلخل به شکل استوانه، در خط مرکز لوله واقع شدهاست؛
   حالت ۱: ماده می متخلخل به صورت  $r_{pi} < r_{pi}$  تغییر می کند؛
  - حالت ۲: محیط متخلخل دارای یک شکل حلقوی میباشد؛
  - $0.1 * r_0 < r_{oe} < r_0$  &  $z_i = 0$  &  $r_{pi} = 0.1 * r_0$

در حالت دو، سه ناحیه وجود دارد که در هنگام ارائهی نتایج روی شکل نشان داده شدهاند. ناحیهی ۱ مربوط به سیال که داخل محیط حلقوی متخلخل جریان دارد، ناحیهی ۲ مربوط به خود محیط متخلخل که به صورت حلقوی میباشد و ناحیهی ۳ مربوط به سیال خارج از محیط متخلخل حلقوی که در حدفاصل محیط متخلخل حلقوی و دیوارهی کانال جریان دارد.

- حالت ۳: مادهی متخلخل استوانه شکل بوده و دارای ابعاد و مختصات به صورت زیر است؛
  - $0 < r_{pe} < r_0$  &  $z_i = 0.05 * L$  &  $r_{pi} = 0$

آنها نتایج کارشان را به شرح زیر گزارش دادند:

مقدار بهینهی شعاع بیبعد خارجی یا  $R_{pe}=r_{pe}/r_{o}$  برای اینکه بیشترین مقدار ناسلت را داشته باشیم، میباشد و از نتایج عدد ناسلت میانگین و افت فشار در هر مورد، به آسانی دیده میشود که هرگونه افزایش در شعاع مادهی متخلخل در حدود شعاع بحرانی یک اثر منفی بر روی عملکرد حرارتی و قدرت پمپاژ دارد. در شکل ۱-۹ این مورد مشاهده میشود. باید دقت کرد که این مقدار بهینه برای شعاع بیعد خارجی تابعی از عدد دارسی میباشد. در شکل ۱-۹ این مورد مشاهده میشود. باید دقت کرد که این مقدار بهینه برای شعاع بیعد خارجی تابعی از عدد دارسی میباشد. در شکل ۱-۹ این مورد مشاهده میشود. باید دقت کرد که این مقدار بهینه برای شعاع بیعد خارجی تابعی از عدد دارسی میباشد. در شکل ۱-۹ این مورد مشاهده میشود. برای مورد ۱۰ بیشترین نرخ انتقال حرارت را همراه با بیشترین میزان افت فشار دارد. عدد ناسلت میانگین در مورد ۲ و ۳ به مورد ۱ نزدیک است. کوچکترین افت فشار مربوط به مورد ۳ و مخصوصا برای نفوذپذیری اندک یا 0.9 - 2E = D و برای شعاع بیبعد خارجی در محدودهی ۲/۰ تا ۸/۰ است، در مورد ۲ و ۳ به مورد ۳ نزدیک است. کوچکترین افت فشار مربوط به مورد ۳ و مخصوصا برای نفوذپذیری اندک یا که یک کاهش قابل ملاحظه در افت فشار در مقایسه با مورد ۱ وجود دارد. همچنین وزن ماده یا میت میزان افت فشار مارد. میرای است میانگین نفوذپذیری اندک یا که مورد ۳ نزدیک است. کوچکترین افت فشار مربوط به مورد ۳ و مخصوصا برای نفوذپذیری اندک یا که در از در مقایسه با مورد ۱ وجود دارد. همچنین وزن ماده یا مود یا ماین ماده در افت فشار در مقایسه با مورد ۱ وجود دارد. همچنین وزن ماده یا مین ماده در ای مورد ۱ کاهش می بابد.



شکل ۱-۹ نتایج کار تیاماه و همکارانش [۱۲] تغییرات عدد ناسلت بر حسب شعاع بیبعد خارجی محیط متخلخل، برای حالت سوم از سه پیکر بندی مساله

در این شکل مقدار بهینه برای شعاع بی بعد خارجی محیط متخلخل و اثر منفی افزایش آن برای مقدار بیشتر از مقدار بهینه بر روی ناسلت، به خوبی قابل رویت است.

ککمر و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۲ مقالهای تحلیلی و عددی منتشر کردند و پارامترهای افزایش جایجایی اجباری را با استفاده از جایگذار متخلخل بررسی کردند. این جایگذار متخلخل به صورت جزئی کانال را پر می کند و همچنین دیوارههای کانال در معرض شار حرارتی یکنواخت قرار گرفتهاند. شکل ۲-۱ هندسه یکارشان را نشان می دهد. در این شکل پارامتر کخ ضخامت بی بعد محیط متخلخل است. ویژگی مثبت کار ککمر و همکارانش این بود که آنها دو پارامتر مهم یعنی افزایش مقدار انتقال حرارت جابجایی اجباری را همراه با کاهش میزان افت فشار در نظر گرفتند و در همین راستا یک بازده ی حرارت جابجایی اجباری را همراه با کاهش میزان افت فشار در نظر گرفتند و در همین راستا یک بازده ی حرارت ای با عنوان  $Nu_c = Mu_p / Nu_c$ بازده ی حرارت ی با عنوان ای به صورت  $g_{ch} = g_{ch} / g_{ch}$  مقال در مقال می آنها این بود که بازده یکلی به صورت  $g_{ch} = g_{ch}$  و بازده ی هیدرودینامیکی به صورت آنها این بود که بازده یکلی بزرگتر باشد یعنی بازده ی حرارتی بیشتر و بازده ی هیدرودینامیکی کمتر باشد (یعنی افت فشار کمتر در حالت وجود محیط متخلخل) . آنها برای بررسی اثر جایگذار متخلخل

یک ضریب هدایت حرارتی به صورت  $\frac{k_{eff}}{k_{f}}$  تعریف کردند.

نتایج کار ککمر و همکارانش را در قالب موارد زیر میتوان مختصرا بیان کرد: بازده ی حرارتی با کاهش عدد دارسی لایه ی متخلخل، افزایش مییابد. برای  $0.1 = k_r = 0.1$  و همینطور  $k_r = 1$  یک ضخامت لایه ی متخلخل وجود دارد که ماکزیمم انتقال حرارت درآن رخ می دهد. این مقدار برای دارسی های مختلف متفاوت است اما در حالت کلی در ضخامت بی بعد ۲۰۱۸ ماکزیمم انتقال حرارت اتفاق می افتد. برای  $k_r = 100$  و  $k_r = 1E + 04$  ، ماکزیمم افزایش انتقال حرارت هنگامی بدست می آید که لایه ی متخلخل تمام کانال را پر کرده باشد. این مطلب در مجموعه شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است.

برای مقادیر پایین ضریب هدایت حرارتی (  $k_r < 100$ )، افزایش این کمیت، بازدهی حرارتی را افزایش

میدهد، اما برای مقادیر ( 100 < *k*<sub>r</sub> )، بازدهی حرارتی تاثیر زیادی از ضریب هـدایت حرارتـی نمـی-پذیرد. برای کانال که به صورت جزئی با مادهی متخلخل پر شدهاست، مقدار عملکرد کلی کمتر از یک میباشد که نشاندهندهی این مطلب است که افزایش افت فشار از افزایش انتقال حرارت، بیشتر است.



k<sub>r</sub>=k<sub>eff</sub>/k<sub>f</sub>

شکل ۱۰-۱ نتایج کار ککمر و همکارانش [۶] تغییرات مربوط به بازدهی حرارتی به ازای تغییرات شعاع بیبعد محیط متخلخل برای اعداد دارسی مختلف.

شکل (۱) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۰۱، شکل (۲) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱، شکل (۳) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱۰۰۰ می-(۳) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱۰۰ و شکل (۴) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱۰۰۰ می-باشد. برای کانال کاملا پر شده با مادهی متخلخال که ضریب هدایت حرارتی بالایی دارد (۱۰۵ – ۲۰۰) و مقدار عدد دارسی بالا ( 100 – 200) ، مقدار عملکرد کلی بزرگتر از واحد است زیار مادهی متخلخل با هدایت بالا در تماس با دیوارهی کانال است. در شکل ۱۰۰ این مطلب نشان داده شده است.  $k_r\!\!=\!\!k_{eff}\!/k_f$ 



شکل ۱۱-۱ نتایج ککمر و همکارانش [۶] تغییرات بازدهی کل به ازای تغییر ضخامت بیبعد محیط متخلخل.

شکل (۱) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۰/۱، شکل (۲) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱، شکل (۳) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱۰۰ و شکل (۴) مربوط به ضریب هدایت حرارتی ۱۰۰۰ می-باشد.

العظمی و وفایی [۵] در سال ۲۰۰۲ مقالهای چاپ کردند و در آن به بررسی شرایط مرزی برای دیوارهی شارثابت در شرایط عدم تعادل حرارتی محلی پرداختند. همچنین تاثیر تغییرات تخلخل و پخش حرارتی را نیز مورد آنالیز قرار دادند. هندسهی کار آنها در قالب شکل ۱-۱ نشان دادهشد. آنها شرایط مرزی مختلف را در خلال مدلهای مختلفی بیان کردند و تاثیر پارامترهایی چون تخلخل، عدد دارسی، ضریب هدایت حرارتی جامد به سیال، عدد رینولدز، پارامتر اینرسی و قطر ذرات را گزارش کردند.
محمد<sup>۱</sup> [۱۳] در سال ۲۰۰۳ مقالهای منتشر کرد که در آن هدف افزایش انتقال حرارت برای یک لوله که به صورت جزئی یا کاملا با مادهی متخلخل پر شدهاست، میباشد. او دامنهی تغییرات دارسی را بین <sup>۶</sup>-۱۰ تا ۱۰ در نظر گرفت. او فرضیات زیر را در نظر گرفت:

- ۱) حالت یایا
- ۲) دوبعدی
- ۳) جریان آرام و تراکمناپذیر
- ۴) صرف نظر از نیروهای شناوری
- ۵) جریان سیال داخل کانال یکنواخت و با سرعت ثابت

۶) دمای دیوارهی کانال T<sub>w</sub> است که مقدارش بیشتر از دمای ورودی میباشد، ثابت شدهاست. پیکربندی کار او را میتوان در شکل ۱-۱۲ مشاهده کرد.



شکل ۱۲-۱ پیکربندی کار محمد [۱۳]

در این کار،  $R_r$  شعاع بی بعد محیط متخلخل است که از تقسیم شعاع محیط متخلخل  $r_p$  به شعاع  $R_r$  ، در این کار،  $R_r$  محیط متخلخل می آید.

او نتایج کارش را به صورت زیر گزارش کرد:

ترم اینرسی تأثیر مهمی بر عدد ناسلت دارد. پر کردن کانال به صورت جزئی با مادهی متخلخل، به اندازهی ۵۰ درصد یا بیشتر باعث کاهش طول توسعه یافتگی حرارتی میشود. نرخ انتقال حرارت با افزودن مادهی متخلخل در هستهی کانال، افزایش مییابد. به دلیل اهمیت افت فشار، ضخامت بهینهی مادهی متخلخل تقریباً بین ۰/۶ تا ۰/۸ است، که انتقال حرارت در عین یک افت فشار منطقی، افزایش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mohamad 2003

می یابد. این مطلب در شکل ۱-۱۳نشان داده شده است. تغییرات افت فشار هم در شکل ۱-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۳ نتایج محمد [۱۳] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات شعاع بیبعد محیط متخلخل برای اعداد دارسی متخلف



شکل ۱-۱۴ نتایج محمد [۱۳] تغییرات میزان افت فشار به ازای شعاعهای بی بعد مختلف برای اعداد دارسی متفاوت

وابستگی افت فشار به عدد دارسی در این شکل به خوبی دیده می شود. شکوهمند و همکارانش<sup>۱</sup> [۱۴] در سال ۲۰۱۱ مقالهای عددی چاپ کردند که هدف کارشان بررسی تاثیر مکان جایگذاری متخلخل بر روی افزایش انتقال حرارت جابجایی در یک کانال با صفحات موازی بود. آنها جریان کاملا توسعه یافته و لایهای درون کانال را، با استفاده از روش شبکه بولتزمن مدلسازی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Shokouhmand 2011

کردند. آنها دو پیکربندی مهم را مورد مطالعه قرار دادند. در پیکربندی اول محیط متخلخل در مجاورت دیواره قرار گرفت (که این پیکربندی در چیدمان نوع ۲ قرار می گیرد) و در دومی محیط متخلخل در هستهی جریان و در میان کانال قرار می گیرد (که این پیکربندی در چیدمان نوع ۱ جای دارد.) این پیکر بندیها درشکل ۱-۱۵ نشان داده شدهاست.



شکل ۱۵-۱ پیکربندی کار شکوهمند و همکارانش [۱۴]

شکوهمند و همکارانش فرضیات زیر را برای کارشان در نظر گرفتند:

- ۱) حالت پایا
- ۲) جریان دو بعدی، آرام و تراکمناپذیر
- ۳) جریان از منظر هیدرودینامیکی کاملا توسعهیافته
  - ۴) جریان از منظر حرارتی در حال توسعه
    - $T_{
      m w}$  ) دمای دیوارهی کانال (۵

آنها تاثیرات پارامترهای مهمی چون عدد دارسی، ضخامت محیط متخلخل و غیره را بر روی عملکرد حرارتی کانال در نظر گرفته و بررسی کردند که نتایج حاکی از تاثیر بسیار مهم موقعیت محیط متخلخل بر روی عملکرد حرارتی کانال، میباشد. شکوهمند و همکارانش ضخامت بیبعد لایهی متخلخل بر روی عملکرد حرارتی کانال، میباشد. شکوهمند که  $y_p = 2 * \left( \frac{y_p}{H} \right) * 2 = 2 * \left( \frac{y_p}{H} \right)$  متخلخل را به صورت (H) میباشد و H ارتفاع کانال میباشد. ضریب هدایت حرارتی بیبعد هم به صورت  $k_a$  در نظر گرفته شده که از تقسیم ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل بر ضریب هم به صورت  $k_a$  در نظر گرفته شده که از تقسیم ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل بر ضریب هم به صورت  $k_a$  در نظر میاند. که آنها نتایج را به صورت  $k_a$  در نظر گرفته شده که از تقسیم ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل بر ضریب هدایت حرارتی سیال خالص بدست میآید. آنها نتایج را به صورت زیر گزارش کردند.

محیط متخلخل در وسط کانال قرار می گیرد بیشتر از حالتی است که محیط متخلخل روی دیـوارههـا است. این مهم در شکل ۱-۱۶ نشان داده شدهاست.



شکل ۱-۱۶ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات افتفشار به ازای تغییرات ضخامت بیبعد محیط متخلخل

وقتی ضریب هدایت حرارتی و عدد دارسی لایه متخلخل زیاد است، قرار دادن محیط متخلخل نزدیک دیوارهها بهتر است. اما در عدد دارسی پایین، قرار دادن محیط متخلخل در مرکز کانال موجب افزایش بیشتر ناسلت می گردد. در شکل ۱-۱۷ و شکل ۱-۱۸ و شکل ۱۹-۱ تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد لایهی متخلخل و برای دارسیهای مختلف و ضریب هدایت حرارتیهای مختلف نشان داده شدهاست.



شکل ۱-۱۷ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد لایهی متخلخل و برای اعداد دارسی مختلف. سه نمودار خط چین مربوط به پیکربندی هستهی جریان که برای دارسیهای به ترتیب از خط چین پایین به بالا ۱۰/۰۰ ۱۰ و ۱۰۰۰۰ میباشد.



شکل ۱-۱۸ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد لایهی متخلخل برای ضریب هدایت حرارتی ۱ و ۱۰ و عدد دارسی ۰/۰۱.



شکل ۱-۱۹ نتایج کار شکوهمند و همکارانش [۱۴] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد لایهی متخلخل برای ضریب هدایت حرارتی ۱ و ۱۰ و عدد دارسی ۰/۰۰۰۱.

لازم به ذکر است که قدرت پمپاژ مورد نیاز با کاهش عدد دارسی افزایش مییابد. بنابراین شکل محیط متخلخل که درون کانال قرار می گیرد باید بهینه شود.

نیموری و همکارانش<sup>۱</sup> [1۵] در سال ۲۰۱۲ مقالهای عددی منتشر ساختند که در آن جریان مغشوش و انتقال حرارت در یک کانال با صفحات موازی که به صورت جزئی با مادهی متخلخل پر شده، مورد بررسی قرار گرفتهاست. آنها هم همانند شکوهمند و همکارانش [۱۴] دو پیکربندی در نظر گرفتند، در مورد اول مادهی متخلخل را در مرکز کانال و در مورد دوم مادهی متخلخل را در مجاورت دیوارهی کانال از دو سمت قرار دادند. مورد تفاوت کار نیموری و همکارانش و کار شکوهمند و همکارانش در ایرانش در مجاورت دیواره ی مورد اول مادهی متخلخل را در مرکز کانال و در مورد دوم مادهی متخلخل را در مجاورت دیواره کانال از دو سمت قرار دادند. مورد تفاوت کار نیموری و همکارانش و کار شکوهمند و همکارانش در این در محاورت دیواره ی این است که در کار نیموری و همکارانش و کار شکوهمند و همکارانش در این سات که در کار نیموری و همکارانش و کار نیموری و همکارانش در این موازی ولی هندسه ی کار شکوهمند و همکارانش نسبت به کار شدیموری و همکارانش و کار نیموری و همکارانش در این موری و می موازی ولی هندسه ی کار شکوهمند و همکارانش در این است که در کار نیموری و همکارانش و کار نیموری و همکارانش در این موازی ولی همکارانش در ای معوری و همکارانش در ایر دیوری و همکارانش در یموری و همکارانش در ایران موازی و لی همدسه ی می در کار نیموری و همکارانش نسبت به کار شدیموری و همکارانش نسبت به کار شدیموری و همکارانش در این است که آنها دو پیارامتر بری و از  $(P^*/P^*)/(P^*/P)/(P^*/P)$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nimvari 2012

افت فشار را در نظر می گیرد و بهترین و بهینه ترین حالت را با توجه به پارامترهای مورد کاوش ارائه می دهد. در این فرمول ها اندیس 0 به حالت کانال عاری از محیط متخلخل مربوط می شود. هندسه ی کار نیموری و همکاراش را در شکل ۲-۰۱ می توان مشاهده کرد. در هندسه ی کار آن ها، ۶ نصف کل ضخامت محیط متخلخل است و H نصف ارتفاع کانال است که از تقسیم ۶ بر H ضخامت بی بعد محیط متخلخل یا S=s/H یا می ایدکه در ارائه ینتایج استفاده شده است.



شکل ۱-۲۰ پیکربندی کار نیموری و همکارانش [۱۵]

آنها نتایج کارشان را به صورت زیر گزارش دادند:

افزایش عدد ناسلت در حضور محیط متخلخل ده برابر کانال بدون محیط متخلخل است. در هر دو آرایش یک مقدار خاص برای ضخامت وجود دارد که عدد ناسلت به حداکثر میرسد. بیشترین مقدار افزایش برای عدد ناسلت در آرایش مرکزی در S برابر ۰۱/۹، ۸۸/۸ و ۸۲/۳ به ترتیب برای دارسی های برابر با <sup>۴</sup>-۱۰، <sup>۳</sup>-۱۰ و <sup>۲</sup>-۱۰ رخ میدهد. در شکل ۱-۲۱ این موضوع به خوبی نشان داده شدهاست. همانطور که در این شکل مشاهده میشود مقدار ناسلت به ازای دارسیهای مختلف متفاوت است.



شکل ۱-۲۱ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات عدد ناسلت به ازای تغییرات ضخامت بیبعد لایهی متخلخل

شکل ۱-۲۲ تاثیر ضخامت بیبعد محیط متخلخل بر روی عدد ناسلت، برای چیدمان مجاور دیواره نشان داده شدهاست. در این نوع پیکربندی هرچه ضخامت بیبعد افزایش پیدا کند یک الگوی کاهشی در ناسلت مشاهده میشود که گویی لایهی متخلخل نقش عایق کردن را ایفا می کند، حداقل مقدار عدد ناسلت با افزایش در ضخامت بیبعد در S برابر ۱۶۵۰، ۱۶۴۰ و ۶/۶ و به ترتیب برای اعداد دارسی برابر با <sup>۴</sup>-۱۰، <sup>۳</sup>-۱۰ و <sup>۲</sup>-۱۰ رخ میدهد.



شکل ۱-۲۲ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] الگوی کاهشی ناسلت در پیکربندی مجاور دیوارههای کانال برای لایهی متخلخل به ازای تغییرات ضخامت بیبعد و برای اعداد دارسی مختلف.

با در نظر گرفتن افتفشار منطقی، یک عدد ناسلت موثر، که در آن اثرات انتقال حرارت و افت فشار به طور همزمان در نظر گرفته می شود، ارائه شده است. بر اساس این عدد ناسلت موثر، ضخامت بهینه ی لایه می متخلخل یا همان S برای آرایش مرکزی ۸/۰ و مرزی ۶/۰ می باشد. این دو مورد در شکل ۱-۲۳ و شکل ۱-۲۳



شکل ۱-۲۳ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات ناسلت موثر به ازای تغییرات ضخامت بیبعد و برای اعداد دارسی مختلف و رینولدز ۲۰۰۰۰ و تخلخل به میزان ۰/۸.



شکل ۱-۲۴ نتایج کار نیموری و همکارانش [۱۵] تغییرات ناسلت موثر به ازای تغییرات ضخامت بیبعد و برای اعداد دارسی مختلف و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و تخلخل به میزان ۰/۸.

محمودی و معرفت<sup>۱</sup> [۱۶] در سال ۲۰۱۱ مقالهای تحلیلی در راستای کاوش در افزایش انتقال حرارت با استفاده از جایگذار متخلخل، انجام دادند. فرضیات آنها به صورت شرایط توسعهیافتـهی گرمـایی بـه همراه مدل عدم تعادل حرارتی محلی، بود. آنها برای بدست آوردن ضخامت بیبعد لایـهی متخلخل، نصف ضخامت محیط متخلخل  $h_p$  را بر نصف ارتفاع کانال  $h_0$  تقسیم کردند تا ضخامت بیبعـد یـا نصف ضخامت محیط متخلخل  $h_p$  را بر نصف ارتفاع کانال  $h_0$  تقسیم کردند تا ضخامت بیبعـد یـا سیال است که به صورت  $\frac{1}{\varepsilon k_f}$  عرار محمودی و معرفت k به عنوان ضریب هدایت حرارتی موثر جامد بـه سیال است که به صورت  $\frac{1}{\varepsilon k_f}$  عرارتی معاون می شود که  $k_s$  ضریب هدایت حرارتی جامـد و  $h_r$  سیال است که به صورت  $k_f$  معاون سیال است که به صورت  $k_f$  معاون است. در کـار آنهـا Bi همـان عـدد بـو اسـت کـه بـه صورت ضریب هـدایت حرارتـی سـیال است. در کـار آنها Bi همـان عـدد بـو اسـت کـه بـه صورت Bi  $\frac{1}{(1-\varepsilon)k_s}$ مخریب انتقال حرارت سیال به جامد و  $h_0$  ارتفاع کانال و ها ضریب هدایت حرارتی جامد میباشـد. هدندسه. کار آنها را در شکل ۱-۲۵ هندسه. کار محمودی و معرفت [۱۶] میتوان مشاهده کرد.



شکل ۱-۲۵ هندسهی کار محمودی و معرفت [۱۶]

محمودی و همکارش در کار خود هم تاثیر افزایش ناسلت و هم رفتار افتفشار را تحت نظر قرار دادند و در نهایت تاثیر توامان این دو پارامتر مهم را درنظر گرفتند که از این مورد میتوان به عنوان نقطهی قوت کارشان یاد کرد. آنها به عنوان نتیجهی کار خود این موارد را ارائه کردند:

با افزایش ضخامت محیط متخلخل، مقدار عدد ناسلت تا قبل از رسیدن به مقدار بیشینه دائما افزایش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mahmoudi and Maerefat 2011

دارد. این اثر برای مقادیر S کمتر از ۸/۰، ۹/۰، ۹/۰، ۹/۰، ۹/۰ و ۹/۰ به ترتیب برای عدد دارسی <sup>۳</sup>-۱۰، <sup>۴</sup>-۱۰، <sup>۵-</sup>۱۰، <sup>۶</sup>-۱۰ و <sup>۲</sup>-۱۰ و <sup>۲</sup>-۱۰ رخ می دهد. با افزایش S بعد از مقدار متناظرش در ناسلت بیشینه، عدد ناسلت رو به کاهش می گذارد. بیشینهی ناسلت در k برابر با ۱۰/۰ و Bi برابر با ۱ ایجاد می شود. با توجه به اهمیت افت فشار، ضریب ضخامت بهینه متخلخل برای افزایش انتقال، مقدار ۸/۰ است. در شکل ۱-۲۶ می توان رفتار ناسلت در برابر تغییرات ضخامت بی بعد را مشاهده کرد.



شکل ۱-۲۶ نتایج کار محمودی و معرفت [۱۶] تغییرات ناسلت در برابر تغییرات ضخامت بیبعد برای اعداد دارسی مختلف و در k برابر با ۱/۰۰ و در Bi برابر با ۱

نتایج نشان میدهد که با افزایش ضخامت متخلخل، خطای استفاده از مدل تعادل حرارتی محلی افزایش مییابد و کانال کاملا پر شده با محیط متخلخل، خطا را بیشینه میکند. در حالت کلی برای کانال که به صورت جزئی پرشدهاست برای حالت ماده ی متخلخل با ضخامت کمتر از ۰/۶ دارای خطای کمتر است و نشان میدهد که مدل تعادل حرارتی محلی معتبر است.

یانگ و همکارانش<sup>۱</sup> [۱۷] در سال ۲۰۱۲ مقالهای منتشر کردند که به مقایسه و کاوش در مورد مدل-های تعادل و عدم تعادل حرارتی محلی میپردازد. هندسهی کار همانطور که در شکل ۱-۲۷ مشاهده میگردد یک تیوب است که دارای دو پیکر بندی میباشد که در اولی محیط متخلخل در هستهی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yang 2012

تیوب جای داده شدهاست و در دومی در مجاورت دیوارهی تیوب جای داده شدهاست. در هر دو مـورد دیوارهی تیوب گرم میشود.



شکل ۱-۲۷ هندسهی کاریانگ و همکارانش [۱۷]

در کار یانگ و همکارانش، A سطح مقطع لوله،  $A_p$  سطح مقطع محیط متخلخل،  $k_{stag}$  هدایت حرارتی P.P.( $\lambda_f$ <sup>1/3</sup> Re) و  $k_{disyy}$  ایستا،  $k_{disyy}$  ضریب اصطکاک و  $k_f$  ( $\lambda_f$ <sup>1/3</sup> Re) قدرت پمپاژ میباشد.

یانگ و همکارانش [۱۷] نتایج را به صورت زیر گزارش کردند:

پی برده شد که مدل عدم تعادل حرارتی محلی برای موردی که جابجایی اجباری در یک تیوب با سطح دیواره یگرم شده که با یک لایه ماده ی متخلخل پوشیده شده است، ضروری می باشد. در حالیکه مدل تعادل حرارتی محلی برای ثبت پدیده ی انتقال برای مورد جابجایی در یک تیوب با هسته ی ماده ی متخلخل کافیست. ضریب اصطکاک برای پیکربندی مرکزی محیط متخلخل بیشتر از پیکربندی مجاور دیواره است و با افزایش ضریب سطح افزایش می یابد. دو پیکربندی مختلف مساله روی تغییرات ناسلت تاثیر چشمگیری دارند. مشاهده می شود که هرچه کانال پرتر شود ناسلت و ضریب اصطکاک، هر دو افزایش پیدا می کنند. در محدوده ی پایین قدرت پمپاژ، عملکرد انتقال حرارت پوشیده شدهاست. گرچه در رنج بالای قدرت پمپاژ، عملکرد دومی از اولی بیشتر است. زحمتکش و یعقوبی<sup>۱</sup> [۱۸] در سال ۲۰۰۶ مقالهای عددی در مورد عملکرد گرمکنهای الکتریکی با استفاده از مواد متخلخل منتشر کردند. هندسهی کار آنها را در شکل ۱-۲۸ میتوان مشاهده کرد. آنها فرضیات کار خود را بدین صورت بیان کردند:

جریان متقارن محوری؛ جریان آرام؛ مدل دارسی برای پیش بینی جریان داخل محیط متخلخ ل؛ عدم وجود تلفات ویسکوز؛ وجود تعادل محلی بین محیط متلخل و سیال؛ محیط متخلخل کاملا اشباع با سیال؛ محیط متخلخل دارای تخلخل و نفوذپذیری کاملا یکنواخت و ویژگی های فیزیکی کاملا ثابت فرض شدهاند.



شکل ۱-۲۸ هندسهی کار زحمتکش و یعقوبی [۱۸]

نتایج آنها در خلال نمودارهای توزیع و تغییر دما نشان داده شدهاند که این نشان میدهد مواردی چون ناسلت و افت فشار و اثر توامان این دو پارامتر برای آنها مدنظر نبوده است. آنها نتایج کار خود را به صورت زیر گزارش دادند.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Zahmatkesh and Yaghoubi 2006

المنتهای گرمایی در هیتر با محیط متخلخل به کمترین دما میرسند و کمترین افت فشار را ایجاد میکنند. برای افت فشار متوسط در هیتر با محیط متخلخل در مقایسه با طراحیهای دیگر امکان تحمل بالاترین دما وجود دارد. تغییر در میزان تخلخل محیط متخلخل منجر به رسیدن به بالاترین دما در هیتر با محیط متخلخل میشود و افزایش میزان تخلخل باعث افزایش افت فشار میشود. پاول و محمد<sup>۱</sup> [۱۹] در سال ۲۰۰۴ یک مقالهی تجربی و عددی منتشر ساختند که هدف از ایس مقاله بررسی اثر فوم فلزی که در یک لوله جایگذاری شده، بر روی نرخ انتقال حرارت میباشد. اثرات تخلخل، قطر مواد متخلخل، هدایت حرارتی و عدد رینولدز بر روی نرخ انتقال حرارت میباشد. اثرات بررسی شدهاست. نتایج با حالتی که مادهی متخلخل وجو نداشته باشد مقایسه شدهاست. هندسه ی



شکل ۱-۲۹ هندسه ی کار پاول و محمد [۱۹]

پاول و محمد از مدل عدم تعادل محلی برای حل مسله استفاده کردند. در این کار ضخامت بیبعد محیط متخلخل با  $r_p = r_p / r_0$  نشان داده شدهاست که  $r_p$ شعاع استوانهی متخلخل و  $r_0$  شعاع لوله-ی آزمایش است. Z در این کار طول بی بعد در راستای محوری است که از تقسیم مولفهی طول محوری بر شعاع کانال بدست میآید به عبارتی دیگر میتوان گفت که  $Z=z/r_0$  و 3 نیز همان تخلخل محیط متخلخل است. آنها نتایج کارشان را به صورت زیر ارائه دادند:

هنگامی که شعاع پرس با شعاع لوله یکی شود بهبود انتقال حرارت حاصل شده و کاهش میزان

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Pavel and Mohamad 2004

تخلخل و افزایش ضریب هدایت حرارتی نیز برای بهبود انتقال حرارت لازم میباشند. R<sub>p</sub> و ع هر دو اثر مثبتی روی انتقال حرارت و اثر منفی روی قدرت پمپاژ مثبتی روی انتقال حرارت و اثر منفی روی قدرت پمپاژ دارد. در شکل ۱-۳۰ اثر منفی روی افت فشار ملاحظه میشود.



شکل ۱-۳۰ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تاثیر تخلخل و Rp بر روی عدد ناسلت که برای ۳ نمونه تخلخل نشان داده شدهاند



شکل ۱-۳۱ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تاثیر تخلخل و Rp بر روی افت فشار که برای ۳ نمونه تخلخل نشان داده شده اند.

به ازای R<sub>p</sub> بین ۶/۰ تا ۸/۸ بیشترین مقدار ناسلت را داریم. هرچه به ۸/۸ نزدیک تر شود افزایش ناسلت و افزایش افت فشار بیشتر است و هرچه به ۶/۰ نزدیک تر باشد افت فشار کمتر و نیز ناسلت کمتر خواهد بود. این نتیجه را از شکل ۱-۳۲ و شکل ۱-۳۳ می توان مشاهده نمود.



شکل ۱-۳۲ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تغییرات افتفشار به ازای تغییرات Rp برای اعداد دارسی مختلف در رینولدز معین



شکل ۱-۳۳ نتایج کار پاول و محمد [۱۹] تغییرات ناسلت به ازای تغییرات Rp برای اعداد دارسی مختلف در رینولدز معین

بالویی و همکارانش<sup>۱</sup> [۲۰] در سال ۲۰۱۲ مقالهای منتشر کردند که در آن یک مدل تحلیلی را برای کمینهسازی مقاومت حرارتی یک شبکهی متخلخل که از ساچمههای جامد با تولید حرارت داخلی، که با هوا خنک سازی میشود، را توسعه دادند. آنها یک حل تحلیلی برای قطر ساچمهی بهینه یافتند که از نرخ تولید گرما مستقل بوده ولی به افت فشار و ویژگیهای سیال وابسته بود. در کار بالویی و

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Baloyi 2012

همکارانش D قطر ساچمه و 🗌 تخلخل محسوب میشود. هندسه ی کار بالویی و همکارانش را در شکل ۱-۳۴ می توان مشاهده کرد.



شکل ۱-۳۴ هندسهی کار بالویی و همکارانش [۲۰]

نتایج کار آنها به صورت زیر میباشد:

مدل تعادل حرارتی محلی در محدودهی تخلخل کوچکتر مساوی ۰/۹ و بزرگتر مساوی ۰/۱، معتبر میباشد. میتواند نتیجه گرفتهشود که جایی که مدل تعادل حرارتی محلی معتبر است، قطر بهینهی کرههای جامد و مینیمم مقاومت حرارتی هر بزرگ هستند.

لی و همکارانش<sup>۱</sup> [۲۱] در سال ۲۰۱۰ مقالهای عددی منتشر کردند که هدف از آن مطالعه ی رفتار گذرای جریان دوفاز و انتقال حرارت در یک کانال پرشده با محیط متخلخل بود. آنها برای حل از روشهای حجم محدود، روش میانگین هارمونیک و روش کرشهف اصلاح شده، استفاده کردند. آنها در سه حالت روی هندسه ی خود کار کردند که طی این سه حالت روی مکان شار حرارتی تفاوت قائل شدند. هندسه ی کار آنها را درشکل ۱-۳۵ می توان مشاهده نمود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Li 2010



شکل ۱-۳۵ هندسهی کار لی و همکارانش [۲۱]

مهم ترین نتیجه یکار آنها این بود که مکان شار حرارتی تأثیر مهمی بر جریان سیال و انتقال حرارت در کانال پر شده با محیط متخلخل دارد. هم مقدار و هم نرخ تولید بخار در حالت اول بیشتر از دو حالت دیگر است.

در سال ۲۰۱۰ هانگ و همکارانش<sup>۱</sup> [۲۲] مقالهای عددی منتشر ساختند که هدف از آن بررسی افزایش انتقال حرارت و میزان افت فشار بر اساس جایگذاری یک محیط متخلخل در مرکز جریان است. قطر محیط متخلخل اندکی کمتر از قطر کانال جریان میباشد. شرایط شار حرارتی ثابت و یکنواخت به مساله اعمال میشود. جریان، تمام محدودهی آرام تا کاملا لایهای را در بر می گیرد. تخلخل جایگذار هستهی جریان دارای سه مقدار ۱۹۵۱، ۱۹۶۶ و ۱۹۷۵ میباشد. هندسهی کار را میتوان در شکل ۱-۳۶ مشاهده کرد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Huang 2010



شکل ۱-۳۶ هندسهی کار هانگ و همکارانش [۲۲]

نکتهی مثبت کار هانگ و همکارانش در این بود که آنها اثر افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش افت-فشار را توامان بررسی کردند و این بررسیها بر اساس قطر بیبعد محیط متخلخل بوده و در نهایت نیز یک مقدار بهینه برای آن ارائه شد. در کار هانگ و همکارانش R<sub>rad</sub> ضریب شعاع بیبعد متخلخل است که از تقسیم شعاع محیط متخلخل م که از تقسیم شعاع محیط متخلخل و بر شعاع داخلی تیوب R<sub>i</sub> بدست میآید، f ضریب اصطکاک و اندیس s دلالت بر حالت تیوب بدون محیط متخلخل دارد و PEC معیار ارزیابی عملکرد است که به صورت  $\frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{\frac{1}{5}}}$ 

در جریان آرام، مقدار PEC برای همهی مقادیر تخلخل بزرگتر از ۱ است، که بدین معنی است که افزایش انتقال حرارت میتواند خسارت ناشی از افزایش مقاومت جریان را پوشش بدهد و این یک نشانه از عملکرد خوب انتقال حرارت است. در شکل ۱-۳۷ تغییرات معیار ارزیابی را به ازای تغییرات رینولدز میتوان مشاهده کرد. مقدار PEC با افزایش Re کاهش مییابد. این مطلب نیز در شکل ۱-۳۷ قابل مشاهده است.



تغییرات معیار ارزیابی عملکرد به ازای تغییرات رینولدز برای تخلخلهای مختلف.

نرخ انتقال حرارت تیوب (ناسلت کلی به ناسلت تیوب فاقد محیط متخلخل یا «Nu/Nu ) با جایگذاری محیط متخلخل که قطر آن با قطر تیوب برابر باشد، در محدوده یحریان آرام تا درهم، با اینکه سبب افزایش مقاومت جریان میشود، حدود ۱/۶ تا ۵/۵ برابر بزرگتر از تیوب فاقد محیط متخلخل است. کاربرد جایگذار متخلخل به طور موثری پروفیل دمای جریان سیال را در مرکز تیوب یکنواخت می-کند، که نقش بسیار مهمی در افزایش انتقال حرارت دارد. نسبت شعاع تخلخل باید به اندازه یکافی بزرگ باشد (ولی از ۱ کوچکتر) تا به یک عملکرد مجموع خوب با استفاده از جایگذار متخلخل برای افزایش انتقال حرارت برای در مرکز تیوب یک روش موثر برای افزایش انتقال حرارت است. تاثیر افزایش نرخ انتقال حرارت برای جریان آشفته ناچیز است. در رینولدز انتقال حرارت است. تاثیر افزایش نرخ انتقال حرارت برای عریان میکرد بزرگتر از ۱ است، شامل معدوده ی بین ۱۹۶۶، ضریب قطر متخلخل که در آن میزان عملکرد بزرگتر از ۱ است، شامل



شکل ۱-۳۸ نتایج کار هانگ و همکارانش [۲۲] تغییرات PEC به ازای تغییرات شعاع بیبعد متخلخل

یانگ و هوآنگ<sup>۱</sup> [۲۳] در سال ۲۰۰۹ مقالهای عددی منتشر ساختند که هدف از آن کاوش در افزایش انتقال حرارت مغشوش در یک لولهی پرشده با محیط متخلخل بود. آنها در حل خود فرضیاتی چون شرایط متقارن محوری و دوبعدی داشتند و نیز از مدل  $\varepsilon = k$  برای جریان مغشوش استفاده کردند. پارامترهایی چون عدد رینولدز در بازهی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ عدد دارسی در محدودهی <sup>1-</sup> ۲۰ تا <sup>۶</sup> ۱۰۰ و پارامترهایی چون عدد رینولدز در بازهی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ عدد دارسی در محدودهی <sup>1-</sup> ۲۰ تا <sup>۶</sup> ۱۰۰ و پارامترهایی چون عدد رینولدز در بازهی محمد تا تا ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ میزاد مخشوش استفاده کردند. پارامترهایی چون عدد رینولدز در بازهی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ عدد دارسی در محدودهی <sup>1-</sup> ۲۰ تا ۲۰۰۰ و پارامترهایی جون عدد رینولدز در بازه محمد تا تا ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ مدد دارسی در محدوده دارسی در محدوده دارس در بازه معنی محمد محمد متخلخل بخش بر شعاع لوله یعنی (e=r<sub>p</sub>/r<sub>o</sub> بین ۰۰ تا ۱۰ در این کاوش مورد بررسی قرار گرفتند. هندسه *ی ک*ار آنها در شکل ۱۰-۳۹ نشان داده شدهاست. در این شکل Z=z/r0 بیمد است که به صورت Z=z/r0 بدست میآید.



نتایج کار یانگ و هوانگ به صورت ذیل قابل بیان هستند: نرخ انتقال حرارت با استفاده از محیط متخلخل در هستهی جریان، میتواند به طرز قابل ملاحظهای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yang and Hwang 2009

افزایش داشته باشد. این مطلب در شکل ۲-۰۰ نشان داده شده است. ولی افزایش افت فشار که از کاربرد محیط متخلخل در هستهی جریان ناشی می شود، محدودیت بزرگی است. هنگامیکه هم افت-فشار و هم نرخ انتقال حرارت را در نظر بگیریم، قرار دادن رابط متخلخل به صورت جزئی بهت ر است. برای این مساله دو نوع شرایط مرزی، دما ثابت و دیگری شار ثابت، در نظر گرفته شده است. ناسلت با شرط مرزی شار ثابت افزایش بیشتری دارد. مقدار بهینهی ضریب شعاع محیط متخلخل بر اساس شبیه سازی ها ۸/۰ می باشد. تحت این شرایط، انتقال حرارت می تواند به مقدار قابل ملاحظهای افزایش پیدا کند و در عین حال مقدار افت فشار نیز در حد قابل ملاحظهای می تواند کنترل شود. برای ضریب شعاع متخلخل کمتر از حدود ۶/۰ تاثیر عدد دارسی روی افت فشار قابل ملاحظه نیست.



شکل ۱-۴۰ نتایج کار یانگ و هوانگ [۲۳] تغییرات ناسلت در راستای مختصات محوری لوله به ازای تغییرات مولفهی بیبعد مختصات محوری و برای مقادیر مختلف e.

در سال ۲۰۱۱ السالم و همکارانش<sup>۱</sup> [۲۴] مقالهای منتشر کردند، یک کار کاملا تجربی میباشد و هدف از آن کاوش در مورد تاثیر حرارتی پیچیدن یک ورق آلومینیومی متخلخل حول یک تیوب استوانهای در یک پیکربندی حرارت جابجایی میباشد. شار حرارتی ثابت به نمونه ی آزمایش اعمال

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Al-Salem, Oztop and Kiwan 2011

می شود. سه نمونه ی ورق متخلخل برای انجام آزمایش در نظر گرفته شده است. در مجموعه شکل ۴۱-۱ ابتدا دستگاه آزمایش و بعد لوله ی آزمایش که ورق پیچ شده است و دو نمونه از ورق های متخلخل آلومینیومی نشان داده شده است.



Schematic configuration of experimental apparatus, 1) voltage selector, (35 V/70 V), 2) fuse, 3) main switch, 4) 4-35 V power and t1 (H351B), 5) 5-70 V power and t1 (H351A), (H351C), (H351D), 6) pressure connection, 7) duct air t2 socket, 8) heather voltage control, 9) intake depletion tapping, 10) manometer 0 to 100 mm H<sub>2</sub>O, 11) heat exchanger carrier position, 12) manometer 0 to 20 mm H<sub>2</sub>O, 13) fan speed control, 14) sensor and temperature input.





شکل ۱-۴۱ طرح شماتیک مدار آزمایش در کار السالم و همکارانش [۲۴]. نمونهی لولهی آزمایش و نمونهای از تصاویر ورقهای متخلخل که به دور لوله پیچیده میشوند.

سه نمونه ورق متخلخل برای آزمایش با ویژگیهای زیر انتخاب شدند:

- ۱) نمونه اول (تخلخل پایین، ۱میلیمتر در ضخامت)
- ۲) نمونهی دوم (تخلخل بالا، ۱ میلیمتر در ضخامت)
- ۳) نمونهی سوم (تخلخل پایین، ۲ میلیمتر در ضخامت)

از نتایج کار السالم و همکارانش می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

ناسلت برای نمونه یدوم، سپس برای نمونه ی اول و سپس هم در نمونه ی سوم به ترتیب دارای مقادیر بیشینه است. افت فشار برای نمونه ی دوم حدودا کمتر است. پژوهش میزانوزامان و همکارانش<sup>۱</sup> [۲۵] در سال ۲۰۱۳ منتشر شده است که یک کار تجربی با هندسه ی کاملا متفاوت نسبت به سایر کارها است. در این پژوهش از یک جایگذار متخلخل با مقطع ضربدری شکل استفاده شده است که تخلخل آن از طریق سوراخهایی که روی آن ایجاد می شود قابل بررسی و تغییر است. آزمایش در یک لوله و برای جریان مغشوش انجام شده است. درصد سوراخ شدگی برای این جایگذار درصد یا بدون سوراخ، ۵/۷ درصد، ۱۰/۱۵ درصد و ۱۸/۵ درصد در نظر گرفته



شکل ۱-۴۲ هندسهی کار میزانوزامان و همکارانش [۲۵]

نتایج کارشان عبارتند از:

ضرایب انتقال حرارت به طور میانگین ۲ تا ۴ برابر و تاثیر انتقال حرارت از ۱/۴ برابر تا ۲/۹ برابر قابل بهبود است. این مقادیر نسبت به لولهی بدون جایگذار و لوله با جایگذار بدون سوراخ گزارش شدهاند. یک رابطه برای ضرایب انتقال حرارت و عدد ناسلت در جریان مغشوش برای لولهی با اینزرت ضربدری نیز استخراج شدهاست.

پژوهش سایتو و لموس<sup>۲</sup> [۲۶] که در سال ۲۰۰۹ منتشر شد، یک مطالعهی عددی دربارهی انتقال حرارت جابجایی اجباری با دمای دیوارهی ثابت در یک کانال که توسط مادهی متخلخل پر شدهاست،

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mizanuzzaman 2013

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Saito and de Lemos 2009

میباشد. تاثیر عدد رینولدز، تخلخل، سایز ذرات و ضریب هدایت حرارتی جامد به سیال بـر روی عـدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفتهاست. شکل ۱-۴۳ هندسهی کار را نشان میدهد. Constant wall temperature T<sub>w</sub>



شکل ۱-۴۳ هندسهی کار سایتو و لموس [۲۶]

مهمترین نتیجه یاین کار را بدین صورت می توان بیان کرد که عدد رینولدز بالا، تخلخل کم، قطر ذرات اندک و ضریب هدایت حرارتی پایین منجر به عدد ناسلت بیشتر می شود. در سال ۲۰۰۹ یک کار تحلیلی به همراه مدلسازی عددی توسط یانگ و لیو و ناکایاما<sup>۱</sup> [۲۷] منتشر

شد که در آن به بررسی جابجایی اجباری در یک تیوب که در هستهی خود، به صورت جزئی با ماده ی متخلخل پر شدهبود پرداختند و هدفشان پیدا کردن عملکرد حرارتی بالاتر بود. این پژوهش برای یک جریان توسعه یافته که در معرض شار حرارتی ثابت قرار دارد، می باشد. در این کار، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به صورت تابعی از عدد رینولدز، عدد دارسی و ضریب قطر هسته یمتخلخل ارائه شده است. هندسه یکار یانگ و همکارانش در شکل ۱-۴۴ قابل مشاهده است. در این کار اثر توامان افت فشار و رشد ناسلت در نظر گرفته نشده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yang, Liu and Nakayama 2009



شکل ۱-۴۴ هندسهی کار یانگ و لیو و ناکایاما [۲۷]

نتایج کار یانگ و لیو و ناکایاما [۲۷] به صورت زیر قابل بیان می باشد: یک قطر بیبعد بهینه برای افزایش ناسلت وجود دارد که از ۰/۸ تا ۰/۹ تغییر میکند و هرچه دارسی کوچکتر باشد این مقدار به سمت ۰/۹ میل میکند. ضریب اصطکاک با افزایش قطر بیبعد افزایش یافته و هرچه دارسی کمتر باشد این مقدار بیشتر می شود.

یژوهش دیگری از شکوهمند و همکارانش ( [۲۸] در سال ۲۰۰۹ انجام شد که یک کار عددی بود که در آن جریان و جابجایی آرام بین کانال با صفحات موازی توسط روش شبکه بولتزمن مدل شدهاست. هستهی کانال توسط محیط متخلخل به صورت جزئی و کامل پر شدهاست. تاثیر مقاومت جریان اینرسی و ویسکوز برای محیط متخلخل به صورت ترم نیرو در معادله ی بولتزمن آورده شدهاست. برای مدلسازی میدان حرارتی، یک مدل ساده شدهی شبکهی حرارتی<sup>۲</sup> با روش مقدار دو برابر، استفاده شدهاست. جواب نهایی این روش با جواب تحلیلی آن کاملا انطباق دارد. هندسه یاین کار در شکل ۱-۴۵ قابل مشاهده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Shokouhmand 2009 <sup>2</sup> BGK



شکل ۱-۴۵ هندسهی کار شکوهمند و همکارانش [۲۸]

نتایج این پژوهش را میتوان به این صورت بیان نمود: با کاهش دارسی، ناسلت افزایش مییابد و در ضخامت بیبعد ۸/۰ و دارسی ۰/۰۰۰۱ مقدار ناسلت بیشینهاست. با افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر، عدد ناسلت افزایش مییابد و در ضخامت بیبعد ۸/۰ مقدار ناسلت بیشینه میشود.

پژوهش دیگری توسط وی و کان<sup>۱</sup> [۲۹] جهت معرفی قوانین انتقال حرارت افزایشیافته، در هستهی جریان برای تشکیل یک لایهی مرزی حرارتی در یک جریان توسعه یافته و آرام در تیوب، انجام شده-است که منجر به افزایش گرادیان دمای سیال نزدیک دیوارهی تیوب میشود. هندسهی کار در شکل ۱-۴۶ نشان داده شدهاست.



شکل ۱-۴۶ هندسهی کار وی و کان [۲۹]

نتایج کار وی و کان [۲۹] را میتوان به این صورت بیان نمود:

عدد ناسلت و افت فشار برای سیال آب با افزایش شعاع بیبعد متخلخل، افزایش مییابد. در سیال هـوا

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Wei and Kun 2008

هر چه تخلخل کمتر باشد ناسلت، ضریب ناسلت کلی به ناسلت بدون متخلخل و همینطور افت فشار افزایش مییابد. عملکرد حرارتی به هیدرودینامیکی، با افزایش تخلخل برای سیال هوا و آب افزایش پیدا می کند. این افزایش در شعاع بیبعد ۰/۸ تا ۱/۰ بیشتر است. عملکرد یا بازده برای هوا بیشتر از آب است.

پژوهش سنکر و همکارانش<sup>۱</sup> [۳۰] یک کار عددی است که در آن به بررسی جریانات جابجایی آزاد (طبیعی) در یک ساختمان حلقوی با یک محیط متخلخل اشباع شده با مایع، پرداخته شده است. دیواره یداخلی در معرض گرمایش گسسته قرار دارد. دیواره ی بیرونی در یک دمای پایین به صورت همدما باقی میماند، در حالیکه دیواره های بالایی و پایینی و قسمت گرمنشده ی دیواره ی داخلی، عایق گرما نگه داشته می شوند. هندسه ی کار سنکر و همکارانش [۳۰] در شکل ۱-۴۷ قابل مشاهده می-باشد.



شکل ۱-۴۷ هندسه ی کار سنکر و همکارانش [۳۰]

نتایج کارسنکر و همکارانش بدین گونه است:

مشاهده می شود که قرار دادن گرمکن در نیمهی پایینی دیوارهی داخلی نسبت به قرا دادن گرمکن در نزدیکی قسمت بالایی یا پایینی دیوارهی داخلی، بیشترین انتقال حرارت را تولید می کند. نتایج مبین این مسالهاند که یک افزایش در ضریب شعاع، عدد رایلی بهبود یافته و عـدد دارسـی موجـب افـزایش

<sup>1</sup> Sankar 2011

انتقال حرارت میشوند، در حالیکه انتقال حرارت با افزایش طول گرمکن، کاهش مییابد. بیشینهی دمای سطح گرمکن با افزایش طول گرمکن افزایش مییابد، درحالیکه با افزایش عدد رایلی بهبود یافته و عدد دارسی، این دمای بیشینه کاهش مییابد. اندازه و موقعیت گرمکن، چگالی جریان و نرخ انتقال حرارت در حفرهی حلقوی را تحت تاثیر قرار میدهد.

در بررسی اولین مورد از چیدمانهای نوع دوم کار نبالی و بوهادف [۷] بررسی میشود. آنها در سال ۲۰۰۶ مقالهای عددی منتشر ساختند که در آن به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری برای جریان آرام توسعهیافتهی هیدرودینامیکی و حرارتی، پرداخته شدهاست. آنها در کار خود از اثرات اینرسی در محیط متخلخل چشمپوشی کردند. آنها از مدل بهبود یافتهی برینکمن-فورچیمر تعمیم یافتهی دارسی<sup>۱</sup> برای حل بهره جستند. وجه تمایز کار آنها این بود که در کارشان از سیال غیرنیوتونی با مدل پاورلو استفاده کردند و با تغییر اندیس پاورلو مدلسازی را برای محدودهی وسیعی از سیالات غیرنیوتنی و نیوتونی تعمیم دادند. آنها مدلسازی را برای هندسهی کانال با مقطع مستطیلی و سه-بعدی که در مجاورت دیوارهی کانال مادهی متخلخل جای گرفته بود انجام دادند. هندسهی کار نبالی و بوهادف در شکل ۱-۳ قابل مشاهدهاست. این دو در اعلام نتایج از پارمتر بیبعد 9 برای ضخامت بی-بعد لایهی متخلخل و از ۲ برای نسبت ابعادی کانال که برابر با d/b بود، استفاده کردند. آنها نتایج کار خود را به صورت ذیل بیان کردند:

هنگامیکه کانال کاملا پر از مادهی متخلخل باشد، شاهد افزایش در انتقال حرارت خواهیم بود که این افزایش در نفوذپذیری کم، بیشترین مقدار را داراست. سیالات غیرنیوتونی باریکشونده و ضخیم-شونده، بر اساس ویژگیهای حرارتی محیط متخلخل، امکان دسترسی به بالاترین مقدار ناسلت را فراهم مینمایند. سیالات ضخیم شونده افت فشار بیشتری را نسبت به سیال نیوتونی و سیال باریک شونده ایجاد مینمایند حتی برای کانالی که به صورت جزئی با محیط متخلخل پرشده باشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Modified Brinkmann-Forchheimer extended Darcy

پژوهش ژو و همکارانش<sup>۱</sup> [۳۱] که در سال ۲۰۱۱ انجام شد، یک پژوهش تحلیلی در مورد انتقال حرارت جابجایی اجباری برای جریان کاملا توسعهیافته در یک کانال که به صورت جزئی با فوم فلزی سلول باز پر شده است، انجام شد. آنها برای حل از رویکرد عدم تعادل حرارتی محلی برای نشاندادن تبادل انرژی بین سیال و جامد و از مدل جریان برینکمن برای توصیف انتقال سیال در ناحیهی فوم، بهره جستند. هندسهی کار آنها در شکل ۱-۴۸نشان داده شدهاست.



شکل ۱-۴۸ هندسهی کار ژو و همکارانش [۳۱]

نتایج کار ژو و همکارانش [۳۱] به صورت زیر قابل بیان است: عدد ناسلت در تخلخل ۲۹۵۵ و برای چگالی تخلخل 10 ppi بیشینه است. در مقدار R مساوی با ۰/۲ ناسلت نسبتا بیشتر و افت فشار کمتری داریم. ضریب اصطکاک با افزایش تخلخل، کاهش مییابد و یک تخلخل بهینه که بتواند عدد ناسلت را بیشینه کند وجود دارد. از طرفی دیگر، ضریب اصطکاک با افزایش چگالی خلل و فرجها، افزایش مییابد. علاوه بر این، عدد ناسلت برای مقادیر اندک چگالی خلل و فرجها، با شیب زیادی کاهش مییابد و به تدریج در یک مقدار مشخص از چگالی خلل فرجها، کاهش مییابد. با افزایش شعاع بی بعد سطح مشترک، ضریب اصکاک تیوب که به صورت جزئی با فوم فلزی پرشده است، به طور یکنواخت از مقدار خودش در حالت تیوب کاملا پر به تیوب کاملا بدون محیط متخلخل تغییر میکند. اگر تنها انتقال حرارت اهمیت داشته باشد شعاع بی بعد سطح مشترک

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Xu, Qu and Tao 2011

با اندازهی  $R_i < 0.35$  ج می گردد. در این شرایط عدد ناسلت از شرایط تیوب بدون محیط متخلخل بزرگتر است. فاکتور  $\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}}$  هم برای ارزیابی و هم خسارت ناشی از عملکرد کلی انتقال حرارت f  $\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}}$  هم برای ارزیابی و هم خسارت ناشی از عملکرد کلی انتقال حرارت واقت فشار استفاده می شود. شعاع بی بعد سطح مشترک با مقدار  $R_i < 0.2$  برای تیوب که به صورت جزئی با فوم فلزی پر شده است، توصیه می گردد و ضریب عملکرد کلی از لوله ی بدون محیط متخلخل، برای رای ارزیابی و هم خسارت ناشی از عملکرد کلی انتقال حرارت می افت فشار استفاده می شود. شعاع بی بعد سطح مشترک با مقدار  $R_i < 0.2$  برای تیوب که به صورت برای فوم فلزی پر شده است، توصیه می گردد و ضریب عملکرد کلی از لوله ی بدون محیط متخلخل، برای رنج وسیعی از ضریب هدایت حرارتی سیال به جامد  $R_i < 0.2$  با مقدار است.

در یک پژوهش دیگر که توسط یان و ژن<sup>۱</sup> [۸] انجام شد، یک مدل محاسباتی سه بعدی برای آنالیز جریان سیال در یک کانال که به صورت جزئی با یک لایهی متخلخل پر شده است، بسط و گسترش داده شد. برای جریان سیال توسعهیافته و مکانیزم انتقال حرارت درون کانال که به صورت جزئی با یک لایهی متخلخل پر شده است، معادلات ناویراستوکس معمولی برای کانال گاز و معادلات میانگیریشده ی حجمی<sup>۲</sup> ناویراستوکس برای لایهی محیط متخلخل به صورت شخصی و انحصاری برای این مطالعه تنظیم شده است. روش عددی گردابه-سرعت<sup>۳</sup> برای سیال سهموی سه بعدی به همراه روش پاورلو برای این مطالعه اعمال شده است. در بیان فرضیات مساله این موارد را می توان بیان کرد:

حالت پایا، سه بعدی، جریان آرام، تراکم ناپذیر و جریان توسعه یافته با خواص ثابت در داکت مربعی، $T_{
m w}$  جریان سیال درون کانال در سرعت یکنواخت  $U_{
m i}$  و دمای ثابت  $T_{
m 0}$ ، دمای ثابت دیوارهی کانال در  $T_{
m w}$ هندسهی مساله در شکل ۱-۴ قابل مشاهدهاست.

نتایج به اجمال به صورت زیر می باشند:

یک زوج جریان ثانویهی چرخشی در سطح مقطع کانال در منطقه ورودی مشاهده می شود. این

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yan and Jen 2005

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> volume-averaged

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> vorticity–velocity method

چرخشها به شدت، پروفیلهای سرعت محوری و توزیع دمایی در کانال مربعی مرکب را دگرگون میکند. با افزایش نسبت ضخامت لایهی متخلخل به عرض مقطع مربعی، سرعت جریان در سال افزایش می یابد ، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت نیز افزایش می یابند. (در نسبت  $\frac{5}{6}$  برای ضخامت لایه-

ی متخلخل به عرض مقطع مربعی، بیشترین ناسلت و بیشترین افت فشار را شاهد هستیم.) الکام و همکارانش<sup>(</sup> [۳۳] در سال ۲۰۰۱ مقالهای عددی منتشر ساختند که در آن جابجایی اجباری گذرا در ناحیهی در حال توسعهیافته در یک کانال با صفحات موازی مورد کاوش قرار گرفت. برای حل این مساله از اختلاف محدود و مدل دارسی-برینکمن-فورچیمر استفاده شدهاست. اثرات ضخامت لایه-ی متخلخل، عدد دارسی، ضریب هدایت حرارتی و ضریب اینرسی میکروسکوپیک بر روی عملکرد حرارتی جریان گزارش شدهاست. هندسه یکار الکام و همکارانش در شکل ۱-۴۹ نشان داده شده-است.



شکل ۱-۴۹ هندسهی کار الکام و همکارانش [۳۲]

نتایج کار آنها را به اجمال به صورت زیر میتوان بیان کرد: عدد ناسلت برای ضخامت بیبعد ناحیهی فاقد تخلخل برابر با ۰/۱ و در ضریب درگ A=10<sup>4</sup> بیشینه میگردد. انتقال حرارت میتواند با استفاده ازضریب انتقال حرارت هدایتی بیشتر، کاهش عدد دارسی و افزایش ضریب اینرسی میکروسکوپیک، افزایش پیدا کند. هدایت گرمایی بالاتر اجازهی جریان یافتن حرارت به سیال را می دهد. اعداد دارسی انـدک یا مقـادیر بـزرگ ضـریب اینرسـی میکروسکوپیک،

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Alkam, Al-Nimr and Hamdan 2001

ضخامت لایهی مرزی هیدرودینامیکی را کاهش میدهد. به طور کلی، جابجایی اجباری میتواند به مقدار قابل توجهی با تغییر مکان لایهی متخلخل بر روی دیوارهای گرم شدهی نفوذ ناپذیر، افزایش یابد.

لئونگ و لای<sup>۱</sup> [۳۳] در سال ۲۰۰۶ یک کار ریاضیاتی را به انجام رسانیدند که در این کار اثر عدد رایلی، ضخامت غلاف (روکش) متخلخل، عدد دارسی و ضریب هدایت حرارتی موثر بر روی میدان جریان و دما در حلقهی هممرکز با روکش متخلخل بررسی شد. هندسهی کار را در شکل ۱-۵۰ می-توان مشاهده کرد.



شکل ۱-۵۰ هندسهی کار لئونگ و لای [۳۳]

غلاف یا روکش متخلخل به صورت فشاری روی سطح داخلی استوانهی بیرونی یا بزرگتر جازده شده-است. هر دو استوانهی بیرونی و درونی در دمای ثابت نگهداشته میشوند که البته سطح درونی مقداری دمای بیشتری نسبت به بیرونی دارد. در میان پارامترهایی که در نظر گرفته شده است، عدد رایلی بر شناوری حرارت القاء شده توسط اختلاف حرارت بین استوانههای داخلی و خارجی، دلالت دارد. نتایج بدین صورت میباشند:

کاهش ضریب هدایت حرارتی منجر به کاهش انتقال حرارت می شود. ضخامت کمتر جایگذار متخلخل منجر به انتقال حرارت بیشتر می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Leong and Lai 2006

بدرالدین و همکارانش<sup>۱</sup> [۳۴] در سال ۲۰۱۲ پژوهشی انجام دادند که تمرکز این مقاله بر روی آنایز مشخصههای انتقال حرارت جابجایی در یک کانال با مقطع مربعی و دیوارههای پوشیده شده با مادهی متخلخل، میباشد. دیوارهی بیرونی کانال داغ و دیوارهی داخلی خنک میباشد. تاکید پژوهش بر روی بررسی در مورد اثر ضریب عرض کانال بر روی مشخصههای انتقال حرارت و میدان جریان میباشد. هندسهی کار در شکل ۱-۵۱ نشان داده شدهاست.



شکل ۱-۵۱ هندسهی کار بدرالدین و همکارانش [۳۴]

بدرالدین و همکارانش [۳۴] به عنوان نتیجه نشان دادند که عدد ناسلت با افزایش در ارتفاع در طول دیوارهی عمودی کانال، افزایش می یابد.

حاجی پور و دهکردی<sup>۲</sup> [۳۵] در سال ۲۰۱۲ مقالهای منتشر کردند که در این مقالهی عددی تحلیلی انتقال حرارت جابجایی مخلوط برای یک نانوسیال در یک کانال عمودی که به صورت جزئی با محیط متخلخل پر شدهاست، مورد مطالعه قرار گرفتهاست. جریان در کانال عمودی توسعهیافته است. هندسهی کارحاجی پور و دهکردی در شکل ۱-۵۲ نشان داده شدهاست.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Badruddin, et al. 2012

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Hajipour and Molaei Dehkordi 2012



شکل ۱-۵۲ هندسهی کار حاجی پور و دهکردی [۳۵]

نتایج کارآنها را می توان به این صورت بیان نمود: حضور نانوذرات در سیال پایه موجب یک افزایش قابل ذکر در سرعت و دما، مخصوصا در درصدهای بالای حجمی نانوذرات، میشود. نرخ انتقال حرارت در دیوارهی سرد با افزایش شار جرمی نانوذرات افزایش مییابد. سرعت ودمای نانو ذرات با افزایش تلفات ویسکوز و نیروی شناوری، افزایش مییابد. با افزایش در تلفات ویسکوز و نیروی شناوری، نرخ انتقال حرارت از نانوسیال به دیوار خنک، افزایش می-یابد. گرچه نرخ انتقال از دیوارهی داغ به نانو سیال کاهش مییابد تا اینکه جهت انتقال حرارت، از نانو سیال به دیوارهی داغ تغییر میکند.

در ادامهی بررسیها به چیدمان نوع سوم میرسیم. در سال ۱۹۹۴ هوانگ و وفایی<sup>۱</sup> [۳۶] مقالهای عددی منتشر ساختند که هدف از آن بررسی افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری در یک کانال بود. این کانال با موانع متخلخل که با فاصله از هم و بر روی دیوارهی پایینی چیده شده بودند، پر شده بود. مدل توسعهیافته دارسی-برینکمن-فورچیمر برای ویژگیهای جریان در محیط متخلخل استفاده شدهاست. هندسهی مساله و نمونهای از یک سلول محاسباتی در شکل ۱-۵۳ آمدهاست.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Huang and Vafai 1994

عدد ناسلت محلی با گذاشتن بلوکهای متخلخل به طور قابل ملاحظهای افزایش مییابد. افتفشار در محل بلوکهای متخلخل افزایش جهشی دارد. عدد ناسلت با کاهش دارسی، افزایش رینولدز، افزایش پارامتر اینرسی و افزایش پرانتل افزایش مییابد.



شکل ۱-۵۳ هندسهی کار و گرید محاسباتی در کار هوانگ و وفایی [۳۶]

شیم و ژائو<sup>۱</sup> [۳۷] در سال ۲۰۰۴ مقالهای منتشر کردند که یک انتقال حرارت جابجایی اجباری را شامل می شد. آنها برای حل این مساله از تکنیک حجم محدود مرتبهی بالا برای گرید غیر سازمان-یافته استفاده کردند. آنها همچنین از مدل بسط داده شدهی برینکمن-فورچیمیر-دارسی و نیز الگوریتم سیمپل آر<sup>۲</sup> برای حل معادلات کوپله ی سرعت و فشار استفاده کردند. هندسه یکار که حکایت از چیدمان سوم برای موانع متخلخل دارد در شکل ۱-۵۴ نشان داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Chiem and Zhao 2004

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> SIMPLER


شکل ۱-۵۴ هندسهی کار شیم و ژائو [۳۷]

آنها برای کارشان شرایط مرزی زیر را در نظر گرفتند:

شرط مرزی عدم لغزش و شرط مرزی عدم نفوذ در دیوارههای جامد وجود دارد، سیال ورودی دارای دمای یکنواخت، جریان لایهای و کاملا توسعهیافته با پروفیل سرعت یکنواخت است. در پایین دست-جریان، در انتهای ناحیهی محاسباتی، فشار بیبعد صفر در نظر گرفته شدهاست.

نتایج کار شیم و ژائو را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

استفاده از بلوکهای متخلخل سبب افزایش ناسلت تا حدود ۵ برابر میشود. هرچه دارسی بیشتر باشد، افتفشار کمتر خواهد بود. در ابتدای کانال قبل از موانع ناسلت بیشتر متعلق به دارسی کمتر و در محل موانع و بعد از آن مربوط به دارسی بیشتر است.

تارگویی و کاهالراس<sup>۱</sup> [۳۸] در یک پژوهش در سال ۲۰۰۸، که یک مدلسازی عددی بود، به دنبال مشخصات جریان و انتقال حرارت ،در یک مبدل حرارتی دو لولهای که ساختارهای متخلخلی در فاصلهی بین دو لولهی مبدل قرار گرفته بود، بودند. آنها دو پیکربندی را با توجه به نحوهی جایگذاری ساختارهای متخلخل در نظر گرفتند. پیکربندی اول این بود که ساختارهای متخلخل بر روی سیلندر داخلی قرار بگیرد و دومین پیکربندی قرارگیری ساختارهای متخلخل بر روی هر دو سیلندر به صورت یکی در میان بود. آنها میدان جریان را، در ناحیهی متخلخل توسط مدل دارسی-برینکمن-فورچیمیر و روش حجم محدود، حل کردند. آنها اثر چندین پارامتر مانند عدد دارسی، ضخامت هر بلوک، فاصله-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Targui and Kahalerras 2008

گذاری بین هر دو بلوک و ضریب هدایت حرارتی را در نظر گرفتند تا بهترین و بهینهترین حالت برای ساختارهای متخلخل را بیابند که در آن انتقال حرارت افزایش داشتهباشد. هندسهی کار آنها به صورت شکل ۱-۵۵ میباشد.

نکتهی مثبت کار آنها در این بود که آنها یک پارامتر را به عنوان بازده در نظر گرفتند که اثر توامان ناسلت و افتفشار در آن لحاظ شدهبود. در کار آنها S فاصلهی بیبعد بین بلوکها و H ارتفاع بیبعد بلوکها است. نتایج کار آنها به شرح ذیل میباشند:

بیشترین نرخ انتقال حرارت در پیکربندی نوع دوم برای ساختارهای متخلخل، مخصوصا در ضخامت بالا و فواصل اندک بین بلوکها بدست میآید. برای پیکربندی A یک فاصله گذاری بهینه، وابسته به مقدار آن و ضخامت بلوکها، وجود دارد که منجر به بیشترین نرخ انتقال حرارت می شود. بیشترین مقدار آن و ضخامت بلوکها، وجود دارد که منجر به بیشترین نرخ انتقال حرارت می شود. بیشترین ضریب ضریب عدد ناسلت میانگین در نفوذپذیری اندک و ضخامت بالا برای ساختارهای متخلخل در مورد ضریب عدد ناسلت میانگین در نفوذپذیری اندک و ضخامت بالا برای ساختارهای متخلخل در مورد ضریب عدد ناسلت میانگین در نفوذپذیری اندک و ضخامت بالا برای ساختارهای متخلخل در مورد ضریب هدایت حرارتی پایین بدست میآید. چیدمان B به طور کلی منجر به بیشترین مقدار ضریب ناسلت متوسط (که حاصل ناسلت متوسط با هندسه کخاص مساله به ناسلت متوسط در حالت سیال بدون محیط متخلخل یا  $\frac{Nu_m}{Nu_{mf}}$ 

(5، ضخامت بالا (Hp=0/8) و نفوذپذیری اندک (Da=10<sup>-6</sup>) آشکارتر می شود.



شکل ۱-۵۵ هندسهی کار تارگویی و کاهالراس [۳۸]

افزایش ضریب هدایت حرارتی مخصوصا در نفوذپذیری و ضخامت بالا در ساختارهای متخلخل، مفید است. معرفی ضریب هدایت حرارتی مخصوصا در نفوذپذیری و ضخامت بالا در ساختارهای متخلخل، مفید است. معرفی ضریب عملکرد امکان یافتن مقادیر بهینه برای  $H_p$  می Da,  $H_p$  و R و امکان یافتن مقادیر بهینه برای جهت ساختارهای متخلخل یک تکنیک کارآمد محسوب می شوند. ( در این مورد 1< $\Box$ ). بالاترین جهت ساختارهای متخلخل یک تکنیک کارآمد محسوب می شوند. ( در این مورد 1< $\Box$ ). بالاترین ضریب عملکرد یا بازده در این مطالعه، در ضریب هدایت حرارتی برابر با ۱ و برای چیدمان B و به ازای ضریب عملکرد یا بازده در این مطالعه، در ضریب هدایت حرارتی برابر با ۱ و برای چیدمان B و به ازای از در این مقدار برای بازده Da = 1E - 06 و  $H_p = 0.4$  ( S = 0.5

گرودژ و کاهالراس<sup>۱</sup> [۹] در سال ۲۰۱۰ در یک مقاله با بهره گیری از روش حجم محدود و تقریب بوسینسک<sup>۲</sup> به مدلسازی عددی جابجایی ترکیبی آرام در یک کانال دو بعدی با صفحات موازی پرداختند. این کانال دوبعدی توسط بلوکهای متخلخل با شکلهای مختلف بر روی دیوارهی پایین پرشدهبود. گرودژ و کاهالراس [۹] از مدل برینکمن-فورچیمیر-دارسی بسطداده شده به همرا تقریب بوسینسک که برای محیط متخلخل تنظیم شدهبود، برای حل جریان در این محیط استفاده کردند. پارامترهایی چون شدت نیروهای شناوری، شکل بلوکهای متخلخل از مستطیلی گرفته تا مثلثی، ارتفاع آنها، نفوذپذیری محیط متخلخل، عدد رینولدز و ضریب هدایت حرارتی مورد آنالیز قرار گرفتند.



شکل ۱-۵۶ کار گرودژ و کاهالراس [۹]

گرودژ و کاهالراس نتایج کارشان را به صورت زیر بیان کردند: شکل مثلثی بلوکها به ازای مقادیر اندک عدد دارسی، رینولدز، ارتفاع بلوکها و ضریب هدایت حرارتی، منجر به بیشترین نرخ انتقال حرارت میشود. در مقادیر زیاد این پارامترها، شکل مثلثی حالت بهینه میباشد. جایگذاری این بلوکهای متخلخل باعث افزایش افت فشار، مخصوصا در عدد دارسی اندک و نیز برای ارتفاع زیاد بلوکهای مستطیلی شکل میگردد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Guerroudj and Kahalerras 2010

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Boussinesq

در یک کار عددی که در سال ۱۹۹۶ توسط فو و همکارانش <sup>۱</sup> [۳۹] انجام شد، افزایش نرخ انتقال حرارت جابجایی در جریان آرام که توسط تعبیه بلوکهای متخلخل بر روی دیوار گرم شده، مورد کاوش و مدلسازی قرار گرفت. برای حل معادلات حاکم و همینطور معادلات انرژی از الگوریتم سیمپل سی<sup>۲</sup> استفاده شد. پارامترهایی شامل تخلخل، قطر ذرات، عدد رینولدز و نسبت بلوک HP (ارتفاع بلوک به ارتفاع کانال) مورد مطالعه قرار گرفت. هندسه کار را در شکل ۱-۵۷ میتوان مشاهده کرد.



شکل ۱-۵۷ هندسهی کار فو و همکارانش [۳۹]

نتایج فو و همکارانش [۳۷] را میتوان به اجمال به صورت زیر بیان کرد: افزایش انتقال حرارت میتواند با نصب یک بلوک متخلخل مسی در ناحیهی با دمای بالا رخ بدهد. یک بلوک متخلخل با تخلخل بالا در یک کانال با 0.5 = HP میتواند انتقال حرارت را افزایش دهد. در کانال با 0.5 = HP، انتقال حرارت با یک بلوک متخلخل با قطر ذرات بالاتر، میتواند افزایش پیدا کند.

در سال ۲۰۱۱ یک مقالهی عددی توسط نبالی و بوهادف [۴۰] منتشر گشت که هدف از آن کاوش در موردافزایش انتقال حرارت در کانال با صفحات موازی بود که این کانال توسط بلوکهای متخلخل با دو آرایش متنوع پرشده و یک سیال پاورلو از آن عبور میکند. در آرایش نخست کانال با یک تک بلوک متخلخل و در آرایش دوم کانال با دو بلوک متخلخل که به طور مشابه بر کف و دیگری بر دیوارهی بالایی کانال سوار شدهبودند، به صورت جزئی پر شدهبود. در مدلسازی آنها، هم پارامترهای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> FU, HUANG and LIOU 1996

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> SIMPLEC

سیال پاورلو و هم بلوکهای متخلخل بر جریان سیال و انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. در هندسهی مساله، دیوارهی پایینی، همانطور که در شکل هندسهی کانال در شکل ۱-۵۸ نمایان است، به اندازهی عرض بلوکهای متخلخل مورد گرمایش قرار می گیرد.



شکل ۱-۵۸ هندسهی کار نبالی و بوهادف [۴۰]

نتایج کار آنها را میتوان به صورت زیر بیان کرد: دیده میشود ماده شبه پلاستیک بیشترین انتقال حرارت را با کمترین افت فشار، در هر دو هندسه تولید میکند. نتایج نشان میدهد از دیدگاه گرمایی نوع A سودمندتر است و از دیدگاه دینامیکی نوع B بهتر است. در سراسر این بررسیها، چند نتیجهی جالب وجود دارد و آن این است که پی برده شد که بازده گرمایی نوع B میتواند با چند روش افزایش یابد: ۱- در نوع B میتوان از سیال شبه پلاستیک به جای سیال نیوتنی استفاده کرد. ۲-چون افت فشار در این حالت کم است میتوان رینولدز را زیاد کرد تا انتقال حرارت بهبود یابد البته تا جاییکه توان پمپاژ در یک سطح منطقی بماند. ۳-با استفاده از محیط متخلخل با ضریب هدایت بالا، انتقال حرارت بدون افزایش افت فشار، افزایش ا

صدیق و همکارانش (۴۱] در سال ۲۰۱۴ یک کار عددی چاپ کردند. آنها در این کار در مورد بهبود و ویژگیهای حرارتی روش شبکه بولتزمن در انتقال حرارت بین سطح مشترک جامد سیال صحبت

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Seddiq, Maerefat and Mirzaei 2014

کردهاند. آنها در مقالهی خود یک مدل برای آنالیز انتقال حرارت آمیخته <sup>۱</sup> ارائه کردند و مدلشان را توسط دو مساله معتبر سازی کردند: ۱) جریان سیال و انتقال حرارت کانال از روی پله به سمت عقب با یک دیوار گرم شدهی ضخیم ۲) جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال با تعداد موانع بینهایت که بر دیواره ی کانال نصب شده اند. هندسهی هر یک از کارها را در مجموعه شکل ۱-۵۹ می توان

مشاهده کرد.



نتایج کار صدیق و همکارانش را میتوان به صورت زیر به اجمال بیان کرد، لازم به ذکر است که k, نسبت ضریب هدایت حرارتی جامد به سیال است: نتایج از معتبر بودن مدل ارائه شده توسط صدیق و همکارانش خبر میدهد. آنالیز مسالهی یک نشان میدهد که موقعیت ماکزیمم نرخ انتقال حرارت در محل بازاتصال قرار دارد و با ویژگیهای حرارتی سیال و جامد تغییر نمی کند. در مساله ی دوم، عدد ناسلت یا نرخ انتقال حرارت بر روی سطوح موانع

<sup>1</sup> Conjugate

به طور کلی در گوشهها بیشینه می گردد. ولی برای  $k_r = 1$  در گوشههای پایین اتصال، به طور نسبی عدد ناسلت از گوشههای بالا بیشتر است.

در سال ۲۰۰۸ بنکافادا و همکارانش <sup>۱</sup> [۴۲] مقالهای به چاپ رسانیدند که این مقاله یک مدلسازی عددی دوبعدی است که برای بررسی جابجایی اجباری آرام هوا برای خنککاری ۶ بلوک انجام شده-است. این بلوکها بر روی دیوارهی پایینی کانال صفحات موازی قرار دارد که این کانال در دو حالت پرشده با محیط متخلخل و یا بدون محیط متخلخل بررسی می گردد. بلوکها با فواصل یکسان از یکدیگر قرار گرفتهاند و با تولید حرارت حجمی یکسان گرم می شوند. هدف این پژوهش تعیین افزایش خنککاری بلوکها هنگامی که کانال با یک محیط متخلخل پر شدهاست، می باشد. معادلات توسط روش حجم محدود با دقت مرتبه ی دوم حل می شوند. شکل هندسه ی مساله در شکل ۲۰۰۹ نشان داده شدهاست.



نتایج این پژوهش به صورت زیر گزارش شدهاست:

اگر کانال با محیط متخلخل پر شدهباشد، میدان جریان در فضای بین بلوکها شامل گردابه نمی شود. افت فشار محوری کانال هنگامیکه با مادهی متخلخل با دارسی اندک پر شده باشد بالاتر از کانال بدون محیط متخلخل است. سرمایش در محیط متخلخل بسیار بهتر از موارد مشابهی است که خنک کاری تنها با هوا انجام می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Benkafada, Talbi and Afrid 2008

یانگ و وفایی<sup>۱</sup> [۴۳] در سال ۱۹۹۸ مقالهای در مورد جزئیات مدلسازی عددی برای جابجایی اجباری جریان تراکمناپذیر در یک کانال چاپ کردند که این کانال دارای یک آرایش از موانع گرم شده می-جریان تراکمناپذیر در یک کانال چاپ کردند که این کانال دارای یک آرایش از موانع گرم شده می-باشد که روی یک دیوار نصب شده است. سه مورد از توزیع عدد ناسلت در این آنالیز سیستماتیک مدنظر بوده است: ۱)توزیع محلی در راستای سطوح بیرونی موانع، ۲)مقدار میانگین برای سطوح منفرد از موانع، ۳)مقادیر میانگین کلی موانع.

در این مطالعه اثر تغییرات در ارتفاع، عرض، تعداد و فواصل بین موانع برای بررسی هدایت حرارتی موانع، نرخ جریان سیال و روشهای گرمایش بررسی شدهاست. هندسهی کار و حالات مختلف مدلسازی در شکل ۱-۶۱ نشان داده شدهاست.

موارد موجود در شکل ۱-۶۱ نشان دهندهی انواع پیکربندی مدلسازی است و اینکه کدام پارامتر برای موانع مورد نظر بودهاست. تغییر هر پارامتر در مقدار عدد ناسلت تاثیر مثبت یا منفی خود را آشکار میسازد. نتایج کار یانگ و وفایی را میتوان به صورت زیر به اجمال آورد: در مورد مطالعهی آثار تغییر عرض موانع که شامل موارد مدلسازی ۲تا ۷ میباشد، نمودارهای ناسلت

ر رز که مورد ۲ اثر بهتری بر روی ناسلت دارد. در مورد مطالعه ی آثار ارتفاع موانع که بین نشان می دهد که مورد ۲ اثر بهتری بر روی ناسلت دارد. در مورد مطالعه ی آثار ارتفاع موانع که بین موارد ۷ تا ۱۰ است نتایج نشان می دهد که موارد ۸ و ۱۰ تاثیر بهتری روی ناسلت دارد و تقریبا با هم مشابه هستند. در مورد مطالعه ی آثار تغییر فواصل بین موانع که بین موارد ۳ و ۷ و ۱۱ تا ۱۴ است نتایج نشان می دهد که مورد ۱۲ تاثیر بهتری روی ناسلت کلی دارد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Young and Vafai 1998



شکل ۱-۶۱ هندسهی کار یانگ و وفایی [۴۳]

در مورد مطالعه ی آثار تغییر سایز موانع که بین موارد ۸ و ۱ است نتایج نشان می دهد که موارد ۸ تاثیر بهتری روی ناسلت دارد. در مورد مطالعه ی آثار تغییر شکل موانع که بین موارد ۱۵ و ۵ است نتایج نشان می دهد که مورد ۱۵ تاثیر بهتری روی ناسلت دارد. در یک بررسی کلی موارد ۱۲ و ۲ نتایج نشان می دهد که مورد ۱۵ تاثیر بهتری روی ناسلت دارد. در یک بررسی کلی موارد ۱۷ و ۲ اسلت بزرگتری نسبت به سایر موارد دارند. در یک بررسی دقیقتر متوجه می شویم که ابعاد بهینه باسلت دارد. در یک بررسی کلی موارد ۱۷ و ۲ باسلت بزرگتری نسبت به سایر موارد دارند. در یک بررسی دقیقتر متوجه می شویم که ابعاد بهینه برای مانع به فرم مقابل می باشد، 2015 (h/H) = (h/H) و  $(k/H) = 2 \cdot (w/R)$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Zehforoosh and Hossainpour 2010

یک بررسی برای انتقال حرارت جابجایی اجباری آرام در یک کانال است که به صورت جزئی با چهار بلوک متخلخل غیر مشابه پرشده است، و در زیر آنها منبع گرمایی وجو دارد. در شکل ۱-۶ مے توان هندسهی کار زهفروش و حسین یور را مشاهده کرد. تاثیر تغییر پارامترهای متخلف مانند عدد دارسی بلوکهای متخلخل، چیدمان بلوکهای غیرمشابه، ضریب فورچیمیر، عدد رینولدز، ضریب هدایت حرارتی و عدد پرانتل بزرگتر است. به عنوان نتیجهی این کار می توان گفت: هنگامیکه بلوکها از عدد دارسی کم به زیاد چیده شوند، عدد ناسلت به مانند حالت بلوکهای مشابه حدود ۹۲ درصد افزایش ییدا می کند، در حالیکه افزایش افتفشار به طور قابل ملاحظهای کمتر است. (حدود ۲۸ درصد) چین و همکارانش [۴۵] پروژهی تجربی و عددی با استفاده از پینفینهای سوراخ شده که به صورت یکی در میان یا شطرنجی چیدہ شدہ، برای افزایش انتقال حرارت انجام دادند. آنہا اثـر تعـداد و قطـر سوراخها را بر روی هر پین مورد مطالعه قـرار دادنـد. هندسـهی کـار و اجـزای دسـتگاه آزمـایش در مجموعه شکل ۱-۶۲ نشان داده شدهاست.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Chin 2013 <sup>2</sup> perforated pin fins



شکل ۱-۶۲ شماتیک مدار آزمایش و هندسهی کانال آزمایش در کار چین و همکارانش [۴۵]

نتایج کار چین و همکارانش عبارتند از:

استفاده از پین فینهای سوراخ شده باعث کاهش افت فشار گردید. عدد ناسلت با افزایش قطر و تعداد سوراخها افزایش داشت. ایجاد سوراخ همچنین باعث کاهش تلفات حرارتی گردید. عدد ناسلت برای فینهای سوراخ شده نسبت به پینهای جامد بدون سوراخ ۴۵ درصد افزایش داشت. افت فشار برای پین سوراخ شده نسبت به پین بدون سوراخ ۱۸ درصد کاهش داشت. هنگامیکه نسبت قطر پین به قطر سوراخ از ۰/۳۷۵ تجاوز کند، تلفات حرارتی کاهش مییابد. ماکزیمم بازده برای سیستم برای تعداد سوراخ ۵ عدد برای هر فین و قطر ۳ میلیمتر برای هر سوراخ ایجاد میشود.

در یک پژوهش که توسط لی و همکارانش <sup>(</sup> [۴۶] انجام شد، هدف آن یافتن شکل و آرایش بهینه ی پینها در یک کانال مبدل حرارتی صفحه ای، می باشد. چهار پارامتر بی بعد که در طراحی پینها مهم اند به این ترتیب می باشند: L فاصله، V حجم، β زاویه و G گام پینها می باشد. افت فشار و مشخصه ی انتقال حرارت در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفتند و یک بهینه سازی برای کمینه سازی تابع هدف اصلی که در بر گیرنده ی رابطه ی بین عدد ناسلت و افت فشار می باشد، انجام گرفت. هندسه ی کار لی همکارانش در شکل پایین نشان داده شده است. در این کار جنس پین ها متخلخل

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lee, Kim and Si 2001



شکل ۱-۶۳ هندسه ی کار لی و همکارانش [۴۶]

نتایج کار لی و همکارانش عبارتند از:

نیست.

هندسهی بهینه به این صورت میباشد: L=0.272, V=0.106, β=0.44, G=0.195؛ هندسـهی بهینـه در عدد رینولدز ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ موثر واقع میشود.

هوانگ و یانگ<sup>۱</sup> [۴۷] در سال ۲۰۰۸ یک مدلسازی عددی در رابطه با انتقال حرارت جابجایی ضربان دار<sup>۲</sup> اجباری در یک کانال با صفحات موازی، با دو بلوک متخلخل که با فاصله از هم در کف کانال قرار گرفته اند و زیر آنها منبع دمایی قرار دارد، انجام دادند. این آنالیز بر اساس معادلات ناویر استوکس ناپایا در محدوده سیال و مدل جریان ناپایای دارسی-برینکمن-فورچیمر در محدوده متخلخل و معادلات انرژی برای میدان دمایی، انجام گرفته است. در این مقاله به جزئیات درباره اثر تغییرات در عدد دارسی، فرکانس و دامنه تپش، ضریب ابعادی بلوکهای متخلخل، برای نشان دادن نتایج

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yang and Huang

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> pulsating convection



کاربردی و اساسی، صحبت شدهاست. هندسهی کار را در شکل ۱-۶۴ میتوان مشاهده کرد.

نتایج کار هوانگ و یانگ عبار تند از:

تغییر تناوبی در ساختار جریان گردابی، که به موجب جریان تناوبی و بلوکهای متخلخل ایجاد می-شود، تاثیر مستقیم بر روی جریان و مشخصههای حرارتی در نزدیکی ناحیهی منبع حرارتی دارد. عدد ناسلت برای جریان پایا نسبت به جریان تپشی مقدار بیشتری دارد. با کاهش دارسی این مقدار بیشتر میشود. عدد ناسلت با افزایش دامنهی نوسان جریان، بیشتر میشود. عدد ناسلت با افزایش فرکانس بیبعد نوسان، عدد استروهال<sup>(</sup>، تغییرات دارد. عدد ناسلت با افزایش ارتفاع بیبعد بلوکهای متخلخل افزایش مییابد.

چیخ و همکاران<sup>۲</sup> [۴۸] در پژوهش خود یک آنالیز عددی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی در یک کانال که با بلوکهای متخلخل گرم شده و به صورت نوسانی چیده شده، انجام دادند. استفاده از بلوکهای متخلخل که بر روی قسمت گرم شدهی کانال سوار شدهاند، بای بهبود عملکرد حرارتی توسط آنها مورد کاوش قرار گرفت. تاثیرات عدد دارسی، ابعاد بلوکها، تعداد بلوکها و ضریب هدایت حرارتی مورد کاوش و بررسی قرار گرفتهاند. هندسهی کار در شکل ۱-۶۵ نشان داده شدهاست.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Strouhal number

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Chikh 1998



شکل ۱-۶۵ هندسهی کار چیخ و همکارانش [۴۸]

نتايج كار آنها عبارتند از:

بلوکهای متخلخل الگوی جریان را میتوانند به طور قابل ملاحظهای تغییر دهند که این تغییر می-تواند بر اساس نفوذپذیری باشد و نیز میتواند انتقال حرارت را بهبود ببخشد. ناسلت محلی برای هندسهی مساله نسبت به کانال عاری از بلوک متخلخل افزایش دارد و در دارسی بزرگتر این افزایش بیشتر است. با افزایش دارسی و نیز با افزایش رینولدز، افت فشار کاهش دارد. هرچه نسبت ارتفاع کانال به ارتفاع بلوک بیشتر شود افت فشار در رینولدز ثابت کاهش دارد. هر چه نسبت ارتفاع بلوک به ارتفاع کانال بیشتر باشد ناسلت بیشتر میشود.

در سال ۲۰۰۹ یوسل و گوون<sup>۱</sup> [۴۹] برای آنالیز جابجایی آرام اجباری پایا در یک کانال پژوهشی را انجام دادند. در این کانال منابع گرمایی به صورت بلوکهایی با پوشش متخلخل در کف کانال تعبیه کردند. تاثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، عدد پرانتل، ضریب اینرسی و ضریب هدایت حرارتی در نظر گرفته شدهاند. هندسهی کار آنها در شکل ۱-۶۶ مشاهده می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Yucel and Guven 2009



شکل ۱-۶۶ هندسهی کار یوسل و گوون [۴۹]

نتایج کار آنها عبارتند از:

پوشش متخلخل با هدایت حرارتی بالا، انتقال حرارت از بلوک جامد را به مقدار قابل ملاحظهای افزایش میدهد و ماکزیمم دمای بلوکهای جامد گرم شده کاهش مییابند، عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد رینولدز و عدد پرانتل و کاهش ضریب اینرسی، افزایش مییابد، افتفشار در طول کانال با افزایش عدد رینولدز به سرعت افزایش مییابد و با افزایش تعداد بلوکها عدد ناسلت میانگین کاهش مییابد.

شاعری و همکارانش<sup>۱</sup> [۵۰] در سال ۲۰۰۹ در یک پژوهش انتقال حرارت دوگانه هدایت-جابجایی در یک آرایش سهبعدی فینهای مستطیلی که حفرههای مربعی در سطوح جانبی آنها وجود دارد، را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش معادلات ناویر-استوکس بر اساس مدل اغتشاش 3-k استفاده شدهاست. روش حجم محدود به همراه الگوریتم سیمپل استفاده شدهاست. محاسبات در عدد رینولدز محدودهی ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ بر اساس پرانتل برابر با ۲۱/۱ و ضخامت فینها انجام شده-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Shaeri, Yaghoubi and Jafarpur 2009



شکل ۱-۶۷ هندسهی و پیکربندی کار شاعری و همکارانش [۵۰]

نتايج كار آنها عبارتند از:

با افزایش سوراخها جریان پیچیدهتر می شود، ضریب اصطکاک میانگین کاهش پیدا می کند و فینهای جامد بیشترین مقدار برای ضریب اصطکاک میانگین را دارند، برای فینهای سوراخ شده، نیروی درگ کاهش پیدا می کند. همچنین ضریب درگ با افزایش رینولدز کوچکتر می شود. ناسلت میانگین با افزایش تعداد سوراخها کاهش پیدا می کند. فینهای جامد بیشترین ناسلت را برای هر عدد رینولدزی دارند. فینها با تخلخل یکسان اما سایز حفرههای بزرگتر عدد ناسلت بالاتری دارند. بـرای فـینهای سوراخ شدهی نوع ۲ تا ۷، با افزایش عدد رینولدز، درصد افزایش انتقال حرارت با نسبت به فـینهای جامد، کوچکتر میشوند اما برای فینهای سوراخ شدهی نوع ۸ تا ۱۰ روندی مخالف مشاهده میشود. لی و همکارانش <sup>۱</sup> [۵۱] در سال ۲۰۱۰ یک پژوهش عددی منتشر کردند که در این مقاله پارمترهای جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال که با بلوکهای متخلخل به صورت یکی در میان چیده شده، بررسی میشود. آنها از معادلات ناویر استوکس برای ناحیه سیال خالص و از محل کنان که با بلوکهای متخلخل به صورت یکی در میان چیده شده، بررسی میشود. آنها از معادلات ناویر استوکس برای ناحیه سیال خالص و از مـدل فورچیمیر برینکمن برای ناحیهی متخلخل استفاده کردند و از الگوریتم سیمپل آر برای حـل معادلات کوپلـهی سرعت و فشار و از مدل تعادل حرارتی محلی برای معادلهی انرژی و برای ارزیابی دمای بـین سـیال و معادلات کوپلـهی مرعت و فشار و از مدل تعادل حرارتی محلی برای معادلهی انرژی و برای ارزیابی دمای بـین سیال و معادلات کوپلـهی مرعت و فشار و از مدل تعادل حرارتی محلی برای معادلهی انرژی و برای ارزیابی دمای بـین سـیال و معادلات کوپلـهی مرعت و فشار و از مدل تعادل حرارتی محلی برای معادلهی انرژی و برای ارزیابی دمای بـین سـیال و معادلات کوپلـهی محلی برای معادلهی انرژی و برای ارزیابی دمای بـین سـیال و معاد به می مـدان مـدان مـرعت و مـدل معادلات کوپلـهی مال مـدان مـدان مـدان مـدان و مـدان مـدان مـدان مـدان و مـدان مـدان و مـدان و مـدان و مـدان مـدان و و مـدان و و مـدان و و مـدان و مـدان و مـدان و مـدان و مـدان و مـدان

نتايج كار آنها عبارتند از:

انتقال حرارت با کاهش عدد دارسی و صرف افت فشار زیاد، به طور قابل ملاحظهای افزایش مییابد، با افزایش عدد رینولدز، گردابه ها به طور ناگهانی کوچک میشوند و نهایتا بین دو بلوک متخلخل متوالی ناپدید میشوند و یک گردابه ی بزرگتر در خروجی ساختار متخلخل ایجاد میشود. انتقال حرارت به طور قابل توجهی تحت تاثیر گردابه ها می باشد، ارتفاع و عرض بلوک های متخلخل می تواند برای رسیدن به انتقال حرارت بالا، بهینه شوند. افزایش ارتفاع و عرض بلوک ها باعث افت فشار زیاد می شود. با افزایش ضریب هدایت حرارتی بین بلوکهای متخلخل و سیال، انتقال حرارت در موقعیت بلوکهای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Li ۲۰۱۰

متخلخل مى تواند به طور زيادى، افزايش پيدا كند.

# ۱-۲-ارتباط موضوع تحقيق با كارهاى قبلى

در این پایان نامه به بررسی در مورد افزایش انتقال حرارت اجباری در جریان آرام برای کانال با صفحات موازی پرداخته می شود و همانطور که در تاریخچه یکار آورده شد استفاده از محیط متخلخل در داخل کانال برای افزایش انتقال حرارت در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، که دلیل این توجه هم در مقدمه یکار ذکر شد، به همین دلیل در این پایان نامه نیز این تکنیک (کاربرد محیط متخلخل) علاوه بر اینکه استفاده شده، سعی شده تا با ترکیب آن با تکنیک کاربرد نانوسیال انتقال حرارت بیش از پیش افزایش داشته باشد. به طور کلی ار تباط این پژوه ش با کارهای قبلی در سعی برای افزایش انتقال حرارت با تکنیک کاربرد محیط متخلخل می باشد. مهم ترین جنبه ی این کار که نماد نوآوری و تمایز این کار با سایر کارها می باشد، استخراج و تحلیل یک معادله ی جدید است. این معادله ی جدید، نانوسیال با مدل مخلوط دوفاز را در محیط متخلخل

تحلیل می کند و در نهایت میدان سرعت و فشار و نیز توزیع دمای را برای آن ارائه مینماید.

#### ۱-۳-اهداف پایاننامه

در این پایاننامه سعی شده تا برای افزایش انتقال حرارت گامهای جدیدتر و محکمتری برداشته شود و راه جدیدی برای پژوهشهای بیشتر در آینده ایجاد نماید. هـدف اصـلی ایـن پـژوهش بررسـی اثـر ترکیب دو تکنیک مهم در افزایش انتقال حرارت میباشد. دو تکنیکی که برای ترکیبشان باید معادلات کاربردی آن نیز دستخوش ترکیب و دگرگونی بشوند و این مهم نیز یکی دیگر از اهداف این پایاننامه میباشد. یکی دیگر از اهداف این پایاننامه بررسی اثر مدل مخلوط دوفاز برای کاربرد نانوسـیال می-باشد تکنیکی که کمتر مورد توجه و کاربرد بوده است و در اکثر موارد مـدل تـکفاز بـرای نانوسـیال استفاده شدهاست. هدف اصلی پایاننامه تحلیل معادلهایست که برای اولین بار در این کار ارائه شـده و نانوسیال تحت مدل مخلوط دوفاز را در محیط متخلخل مدل میکند.

# ۱-۴-تعیین چهارچوب کلی فصول پایاننامه

در فصل بعدی روش عددی مورد استفاده در کار معرفی و بررسی میشود. سپس توضیحاتی در مورد نانوسیال و مدلهای مورد استفاده برای مدلسازی عددی آن ارائه شده و در نهایت مدل استفاده شده برای این پژوهش معرفی میشود. در فصل بعدی به ارائهی توضیحات در مورد محیط متخلخل پرداخته میشود. در فصل بعد معادلات کاربردی در این کار و نیز روند استخراج و بیبعد سازی آنها و الگوریتمهای استفاده شده در این پژوهش ارائه شده و در نهایت در فصل آخر به ارائهی نتایج و گزارشات و پیشنهادات برای کارهای آینده پرداخته میشود. لذا عناوین فصول آینده به شرح ذیل

- 🛠 روشهای عددی
- انوسیال و مدل مخلوط دوفازی 🛠
  - الله محيط متخلخل
- فرمولاسیون و معادلات حاکم ( شامل معادلات و مدلهای مورد استفاده و آمادهسازی آنها برای گسستهسازی)
  - الشات، نتیجه گیری و پیشنهادات

# ۲–روشهای عددی

۲-۱-مقدمهای برای دینامیک سیالات محاسباتی یا سیافدی <sup>۱</sup>

### ۲-۱-۱-تاریخچه و کاربرد [۵۲]

دینامیک سیالات محاسباتی یکی از بزرگترین زمینههایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندیهای نوین محاسباتی آن در نیمهی دوّم قرن بیستم و در سدهی جدید میلادی متصل میکند. سرگذشت پیدایش و گسترش دینامیک سیّالات محاسباتی را نمیتوان جدای از تاریخ اختراع، رواج و تکامل کامپیوترهای عددی نقل کرد. تا حدود انتهای جنگ جهانی دوّم، بیشتر شیوههای مربوط به حلّ مسائل دینامیک سیالات از طبیعتی تحلیلی یا تجربی برخوردار بود. همچون تمامی نوآوریهای برجستهی علمی، در این مورد هم اشاره به زمان دقیق آغاز دینامیک سیّالات محاسباتی ممکن نیست. در اغلب موارد، نخستین کار بااهمیت در این رشته را به ریچاردسون<sup>۲</sup> نسبت می دهند، که در سال ۱۹۱۰ میلادی محاسبات مربوط به نحوهی توزیع تنش<sup>۳</sup> در یک سد ساختهشده از مصالح بنّایی را انجام داد.

در این کار ریچاردسون از روشی تازه موسوم به رهاسازی<sup>†</sup> برای حلّ معادلهی لاپلاس استفاده نمود. او در این شیوهی حلّ عددی، دادههای فراهمآمده از مرحلهی پیشین تکرار<sup>6</sup> را برای تازهسازی تمامی مقادیر مجهول در گام جدید به کار می *گ*رفت.

امروزه دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یکی از مهمترین زمینه های مهندسی میباشد که از کاربردهای آن می توان به مواردی همچون:

- ۲) تحلیل آیرودینامیکی خوردو و انواع هواپیماها
  - ۲) تحلیلی هیدرودینامیکی کشتیها

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Computational fluid dynamics Or CFD

<sup>2</sup> Lewis Fry Richardson

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Stress distribution

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Relaxation

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Iteration

۳) در نیروگاهها یا تاسیسات جریان قوی برای تحلیلی احتراق در موتوره ای احتراق داخلی و توربینهای گاز
۹) در توربوماشین <sup>۱</sup>ها برای تحلیل جریان داخل قطعات دوار، دیفیوزر <sup>۲</sup>ها و غیره
۵) در مهندسی برق و الکترونیک برای خنککاری تجهیزات دارای مدارهای میکروالکترونیکی
۶) در مهندسی فرآیندهای شیمیایی در ترکیب و جداسازی و قالب گیری پلیمرها
۷) در مهندسی دریا برای محاسبه در ترکیب و جداسازی و قالب گیری پلیمرها
۸) در مهندسی دریا برای محاسبه در ترکیب و برای محاسبه دریای و تهویه
۹) در مهندسی دریا برای محاسبه در ترکیب و برای محاسبه دریایی
۹) در مهندسی دریا برای محاسبه در ای محاسبه دریایی
۸) در مهندسی دریا برای محاسبه در ای محاسبه دریایی
۸) در مهندسی دریا برای محاسبه دریا توزیع آلاینده های هوا و آب
۹) در مهندسی پزشکی و تحلیل جریان خون در رگها و شریانها

اشاره داشت که مختصری از کاربردهای عظیم این زمینه از علم میباشد. در ادامه به توضیحاتی در مورد ماهیت این روش پرداخته می شود.

## ۲-۱-۲-ماهیت عددی و توضیحات بیشتر [۵۳]

در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم میشود. با تقسیم ناحیه مورد نظر به المانهای کوچکتر برای تحلیل و اعمال شرایط مرزی برای گرههای مرزی و نیز با اعمال تقریبهایی یک دستگاه معادلات خطی بدست میآید که با حل این دستگاه معادلات، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیهی مورد نظر بدست میآید. با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادلات میتوان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضریب برا<sup>۳</sup> و ضریب پسا<sup>۴</sup> و ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Turbo machinery

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Diffusers

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Lift coefficient

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Drag coefficient

در دینامیک سیالات محاسباتی از روشها و الگوریتمهای مختلفی جهت رسیدن به جواب بهره میبرند، ولی در تمامی موارد، دامنه مسئله را به تعداد زیادی اجزاء کوچک تقسیم میکنند و برای هر یک از این اجزاء مسئله را حل میکنند. در سیاف دی هر اتفاق در یکی از چهار قالب زیر رخ می دهد: ۱) جملات جابجایی<sup>۱</sup> ۲) جملات پخش یا دیفیوژن<sup>۲</sup>

- ۳) جملات منبع<sup>۳</sup>
- ۴) جملات گذرا<sup>†</sup>

که این چهار قالب به صورت یک معادله با هم رابطه دارند:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \nabla . (\rho V \varphi) = \nabla . (\mu_{\varphi} \nabla \varphi) + \dot{\varphi}$$
(1-7)

که در سمت چپ معادله، جمله ی دارای مشتق جزئی زمان (جمله ی اول) همان جمله ی گذرا، جمله ی که در سمت چپ معادله همان جمله ی جابجایی، جمله ی اول از سمت راست معادل ه که دارای گرادیان و دیورژانس می باشد جمله ی پخش یا دیفیوژن و جمله ی باقی مانده در سمت راست همان جمله ی جمله ی منبع می باشد. این معادله ی کلی با تغییر ضرایب  $\varphi$ ،  $\varphi$  و  $\phi$  به مواردی دیگر همچون معادله ی پیوستگی و مومنتوم، ثابل تبدیل خواهد بود.

# ۲-۱-۳-مراحل و روشهای حل یک مسأله با استفاده از روشهای سی-افدی [53]

هر حل در سیافدی شامل سه بخش اصلی میباشد: ۱) پیشپردازش<sup>۱</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Convection terms

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Diffusion terms

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Source terms

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Transient terms

- ۲) پردازش<sup>۲</sup>
- ۳) پس از پردازش<sup>۳</sup>

در مرحلهی پیش پردازش مدلسازی فیزیکی، مدلسازی ریاضی و گسستهسازی میدان حل<sup><sup>†</sup></sup> انجام می-شود. در مرحلهی پردازش، از روشهای عددی<sup>۵</sup> متفاوت و نیز از حلگر<sup>2</sup>ها استفاده میشود. در استفاده از روشهای عددی باید معادلات حاکم بر مساله را با تکنیکهایی که وجود دارد گسستهسازی کنیم (در این پایاننامه این مهم در فصل فرمولاسیون و معادلات حاکم انجام میشود.) که غالبا باید یک سری از جملات غیرخطی نیز خطیسازی شوند. درمرحلهی آخر از حل مساله با استفاده از سیاف دی نیز به تحلیلخطا (اعتبارسنجی)، مشاهدهی نتایج ( اصطلاحا مرئیسازی)<sup>۷</sup>، تحلیل حساسیت حل مسأله که باعث صحهگذاری بر نتایج میشود، پرداخته میشود.

از معایب رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی نیز میتوان به مواردی از قبیل دشواری و پیچیدگی حل معادلاتی غیرخطی نظیر ناویر -استوکس<sup>^</sup>، حل معادلاتی که کوپله هستند، حل مسائلی که هندسههای پیچیده دارند، حل مسائلی که شرایط مرزی دشوار دارند و نیز مدلسازی پدیدههایی مانند اغتشاش<sup>۹</sup> و مرز متحرک اشاره کرد.

در یک حل سیافدی در مرحلهی پردازش یکی از مهمترین موارد گسستهسازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر مساله است. این گسستهسازی روشهای مختلفی دارد که عبارتند از:

- روش اجزا محدود ''
- روش حجم محدود

- <sup>3</sup> Post-processing
- <sup>4</sup> Grid generation
- <sup>5</sup> Numerical methods
- <sup>6</sup> Solver
- <sup>7</sup> Visualization Or Data reduction
- <sup>8</sup> Navier-Stokes
- <sup>9</sup> Turbulence

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Pre-processing

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Processing

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Finite Element Method Or FEM

- روش تفاضل محدود<sup>۱</sup>
  - روشهای طیفی<sup>۲</sup>

ابتدا هریک از این روشها به اجمال معرفی و سپس به بحث اصلی در خصوص روش مورد استفاده در این پایاننامه که همان روش حجم محدود است، پرداخته میشود.

# ۲-۱-۴-روش اجزاء محدود یا روش المان محدود

در مورد تاریخچهی این روش میتوان گفت پیدایش روش اجزاء محدود به حل مسائل پیچیدهی الاستیسیته و تحلیل سازه ها در مهندسی عمران و هوا فضا برمی گردد. این روش حاصل کارالکساندرهرنیکوف (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت (۱۹۴۲) میباشد. با این که روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت بود، اما یک ویژگی مشترک داشت: تقسیم یک دامنهی پیوسته (ماده) به یک سری زیردامنه (قطعات کوچکتر ماده) به نام المان (اجزاء).

روش المان محدود روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادلههای انتگرالی (کاربرد عملی اجزای محدود معمولا با نام تحلیل اجزا محدود خوانده می شود) اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا سادهسازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روشهای عددی مثل اویلر حل می شوند، می باشد. این روش درحل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه های پیچیده (مانند وسائل نقلیه و لوله های انتقال نفت)، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید می باشد. به عنوان مثال در شبیه سازی یک تصادف در قسمت جلوی ماشین، نیازی به دقت بالای نتایج در عقب ماشین نیست، همچنین در شبیه سازی و پیش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Finite Difference Method Or FDM

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Spectral methods

افزارهایی که برپایه یروش المان محدود هستند می توان به انسیس و اباکوس و کامسول " اشاره کنیم.

#### ۲-۱-۵-روش تفاضل محدود

یکی از روشهای عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آنها تقریب زده میشود. اساس این روش برای حل معادلات، استفاده از تقریب تابع با روش تیلور (سری تیلور<sup>†</sup>) است.

## ۲-۱-۶-روشهای طیفی

این روش از جملهی دقیق ترین شیوه های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی<sup>6</sup> میباشد. شیوه های عددی طیفی را می توان بر طبق فضاهای مورد استفاده در آن ها تقسیم بندی کرد:

#### روشهای طیفی فوریه

روشهای طیفی فوریه که برای حل دقیق معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی تحت دامنههای تناوبی در بعد مکان مورد استفاده قرار می گیرد، در واقع از تبدیل فوریه<sup><sup>2</sup> در این کار استفاده می کند.</sup>

#### روشهای طیفی چبیشف

روشهای طیفی چبیشف برای حل دقیقتر معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی تحت دامنههای غیر تناوبی مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع این روش با استفاده از چندجملهای های چبیشف<sup>۷</sup> عمل می کند.

<sup>1</sup> Ansys

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Abaqus

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Comsol

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Taylor series

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Partial Differential Equation Or PDE

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Fast Fourier transform Or FFT

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Chebyshev polynomials

## ۲-۱-۲-روش حجم محدود

روش حجم محدود در زمینهی دینامیک سیالات محاسباتی توسط مکدونالد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۱ و توسط مککورماک و پااولای<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۲ معرفی شد. از دیدگاه فیزیکی روش حجم محدود بر اساس برقراری تعادل بین شارها در حجم کنترل عمل میکند. از دیدگاه عددی روش حجم کنترل، تعمیم-یافتهی روش تفاضل محدود است. روش تفاضل محدود بر اساس روابط نقطهای بین معادلات دیفرانسیل عمل میکند در حالیکه روش حجم محدود یک گسستهسازی از معادلات حاکم در فرم انتگرالی میباشد. روش حجم محدود میتواند به خوبی به عنوان یک روش زیردامنهای خاص در نظر گرفته شود.

قدم اول از گسسته سازی یعنی انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش-های دینامیک سیالات محاسباتی متمایز می کند. دیدگاه حجم محدود بقاء محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می کند. این رابطه مستقیم بین الگوریتم عددی و قاعده کلی بقاء اصل فیزیکی، یکی از جاذبه های اصلی روش حجم محدود را تشکیل می دهد و درک مفاهیم آن را برای مهندسین، خیلی ساده تر از روش های عنصر محدود و طیفی برای بقاء یک متغیر، می کند. برای مثال یک مؤلفه سرعت یا آنتالپی در داخل یک حجم کنترل را، می توان بصورت یک تساوی بین فرآیندهای متفاوت که منجر به افزایش یا کاهش آن می شود نشان داد:

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

روش حجم محدود دارای دو مزیت میباشد: ۱) همانطور که در بالا هم اشاره شد، بقای کمیتها را در مراحل گسستهسازی حفظ می کند مانند اینکه جرم، مومنتوم و انرژی حتی در یک مقیاس محلی هم

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> McDonald 1971

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> MacCormack and Paullay 1972

پایستار خواهندبود. شارها نیز بین حجم کنترلهای مجاور هم بهطور مستقیم بالانس میشوند. ۲) روش حجم محدود دارای نقاط قوت فراوانی در خصوص مشبندی اختیاری برای تخمین هندسه ای پیچیدهاست. آزمایشات نشان میدهند که روشهای ناپایستار عموما دارای دقت کمتر در مقایسه با روشهای پایستار همانند حجم محدود میباشند. این موضوع وقتی مهمتر میشود که گرادیانهای شدید داشته باشیم. روش حجم محدود در واقع نوعی از روش اجزاء محدود است که در آن روش تقریب این انتگرال ها با روش اجزاء محدود متفاوت است. این روش بیشتر برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال حرارت مناسب است. نرمافزار فلوئنت از این روش پیروی می کند.

# ۲-۱-۸-مقایسهی اجمالی بین روشهای حل دینامیک سیالات محاسباتی

در حالت کلی روشهای تفاضل محدود برای هندسهها و قلمروهای پیچیده ذاتا ضعیف هستند و فقط باید از شبکههای با سازمان برای حل به وسیله آنها استفاده کرد. اما روشهای حجم محدود یا المان محدود دارای چنین ضعفی نیستند و قابلیت حل در دامنههای پیچیده را افزایش میدهند. در ضمن چون در این روشها معادلههای انتگرالی مستقیما در قلمروی فیزیکی بکار میروند، لذا نیازی به تبدیلهای ریاضی برای تغییر مختصات (تبدیل فضای فیزیکی به محاسباتی) نمیباشد در حالیکه برای استفاده از روش تفاضل محدود به این مساله زیاد بر میخوریم.

۳–نانوسیال

# ۳-۱- معرفی و تاریخچهی پیدایش

نانو سیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاردبرهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون مس، نقره و یا اکسید فلزی همچون آلومینیوم اکسید<sup>۱</sup>، اکسید مس<sup>۲</sup> و غیره هستند. سیالات متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می شوند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو به دلیل داشتن ضریب هدایتی حرارت ایر با تو به دلیل داشتن ضریب هدایتی حرارت استفاده می از پارامترهای اساسی ایر و نیزه می باند. اندومتر می باشد این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون مس، نقره و یا اکسید ملزی همچون آلومینیوم اکسید<sup>۱</sup>، اکسید مس<sup>۲</sup> و غیره هستند. سیالات متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می شوند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو به دلیل داشتن ضریب هدایتی بالا و با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می شود، می گردند [۵]. لازم به ذکر است مکانیزمهای افزایش انتقال حرارت توسط نانوسیالات در قسمت ۳–۴ آورده خواهد شد.

اولین جرقه فناوری نانو در سال ۱۹۵۹ توسط ریچارد فلیپس فینمن<sup>۳</sup> زده شد. ریچارد فینمن در سال ۱۹۵۹ در انجمن فیزیک آمریکا در سخنرانی مشهور خود به بررسی بعد رشد نیافتهی علم مواد پرداخت و توجه دانشمندان را به توانایی بشر برای دست کاری مواد در مقیاس اتمی جلب نمود. سخنرانی که می توان آنرا اولین بحث در زمینه فناوری نانو دانست [۵۵].

در مورد کاربرد سیالات نانو می توان گفت یکی از روش های افزایش تبادل حرارت سیالات متداول حرارتی بار حرارتی، پخش ذرات یا اکسیدهای فلزی با هدایت حرارتی بالا در سیال پایه است. این ایده اولین بار توسط ماکسول<sup>4</sup> [۲] مطرح شده است. البته ذراتی که ماکسول از آنها استفاده نمود، درشت بودند و مشکلاتی نظیر افت فشار بسیار زیاد، تهنشینی ذرات و انسداد و گرفتگی لوله ارا در پی داشتند. با پیشرفت در فناوری نانو، چوی و ایستمن<sup>۵</sup> [۳] استفاده از نانوذرات را برای این منظور کرد که

 $<sup>^{1}</sup>$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> CuO

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Richard Phillips Feynman

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Maxwell, J.C.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Choi, S.U.S. and Eastman, J.A.

سیال بدست آمده را نانوسیال<sup>۱</sup> نامید. بهبود انتقال حرارت جابجایی در اثر افزودن نانوذرات سبب شد تا از آن پس، محققان بسیاری به تحلیل استفاده از نانوسیالات در طیف وسیعی از مسایل مهندسی بپردازند. برخی از این مطالعات توسط داس و همکاران<sup>۲</sup> [۴] گردآوری شدهاست. از نانوسیالات متداول می توان به مس در سیال پایهی اتیلن گلیکول و اکسید مس در سیال پایهی آب اشاره کرد.

### ۲-۲-کاربردهای نانوسیالات

از کاربردهای مخصوص نانوسیالات میتوان به مواردی همچون:

- خنککاری موتورها؛
- ۲) گرمایش خورشیدی آب؛
- ۳) خنککاری در صنعت الکترونیک؛
- ۴) خنککاری روغن ترانسفورماتور؛
- ۵) بهبود راندمان ژنراتورهای دیزلی؛
- ۶) خنککاری دستگاههای مبدل حرارت؛
- ۷) بهبود راندمان انتقال حرارت برای دستگاههای خنک کنندهی هوا؛
  - ۸) در یخچال فریزهای خانگی؛
  - ۹) خنککاری در صنعت ماشینکاری؛
  - ۱۰) در راکتورهای هستهای و صنایع دفاع و هوافضا
    - ۱۱) جداسازی گاز از نفت توسط نانوسیالات
      - ۱۲) جداسازی مولکولی با نانوسیال
      - ۱۳)خالصسازی شیمیایی با نانوسیالات

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nano-fluid

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Das 7..9

۱۴) جداسازی نانوذرات با استفاده از نانوسیالات

اشاره کرد.

# ۳-۳-ویژگیها، مزایا و معایب نانوسیالات [۵۶]

از ویژگیهای کلیدی نانوسیالات که تاکنون کشف شدهاند می توان به:

- هدایتهای گرمایی بسیار بالاتر از آنچه که سوسپانسیونهای مرسوم از خود نشان داده بودند؛
  - وجود نسبت غیر خطی میان هدایت گرمایی و غلظت نانولولههای کربنی در نانوسیالات؛
    - وابستگی شدید هدایت گرمایی به دما و افزایش چشمگیر در شار حرارتی بحرانی

را نام برد. هر کدام از این ویژگیها در جای خود برای سیستمهای حرارتی بسیار مطلوب میباشند و در کنار هم، نانوسیالات را بهترین کاندیدا برای تولید سردکنندههای مبتنی بر مایع مینمایند. مزایای نانوسیالات نسبت به سیالات رایج و معمول که در صنایع برای خنککاری یا انتقال حرارت استفاده می شوند یک امر کاملا بدیهی و واضح است، اما این سیالات خاص (نانوسیالات) در مقابل سوسپانسیونهای معمولی جامد-مایع که برای افزایش انتقال حرارت استفاده می شوند نیز برتریهای به شرح زیر دارند:

- مساحت سطح مخصوص بالاتر و لذا سطح بیشتری برای انتقال حرارت بین ذرات جامد و سیال (طبق فرمول انتقال Q = hA T سطح بیشتر برای انتقال حرارت به انتقال حرارت بیشتری منجر خواهد شد.)
  - پایداری بیشتر مخلوط با توجه به اثرات غالب حرکت براونی<sup>۱</sup>
- نیاز به قدرت پمپاژ کمتر در قیاس با سیال عاری از نانوذرات برای رسیدن به یک سطح انتقال
   حرارت مشخص
- کاهش گرفتگی ناشی از استفاده از مخلوطهای معمولی جامد-مایع که سبب ارتقاء سیستم به

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Brownian motion

یک مجموعه با سایز کمتر خواهد شد.

ویژگیهای قابل تنظیم این سیالات خاص، شامل هدایت حرارتی و ترشوندگی' توسط تغییر
 غلظت نانوذرات موجود در آن، موجب انطباق این سیالات با کاربردهای مختلف می شود.

از معایب این سیالات می توان به:

- ناپايدارى تمامى سوسپانسيونھا
- شکست و تخریب شدید که در خروجی کانالها، به علت ایجاد قالبهای رسوبی از نانوذرات در خروجی کانالها ایجاد می گردند، که این قالبهای رسوبی به دلیل تبخیر محلی سیال پایه در اثر جوشش ایجاد شده به دلیل حرارت جذب شدهی بالا در قسمتهای انتهایی کانالها و مسیرها رخ می دهد.
  - هزینهی تهیهی این نانوسیالات

# ۳-۴-مکانیزمهای افزایش انتقال حرارت توسط نانوسیالات[۵۷]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Wettability

نانوذرات به جذب حرارت، تغییرات چشمگیری پیدا می کند که برای یک سیال در معرض حرارت، این موارد باعث کاهش ویسکوزیته می شود و در نهایت این کاهش ویسکوزیته سبب افزایش انتقال حرارت جابجایی می شود. دلیل دیگر را می توان به خاصیت پخش براونی بدین صورت نسبت داد که این خاصیت باعث ایجاد مومنتوم بین ذرات با هم و نیز بین ذرات و سیال می گردد بدین گونه که با گرم شدن هر ذره و به دلیل وجود حرکت براونی بین ذرات، این ذرهی گرم شده جای خود را به ذرهی دیگری می دهد و این جابجایی یا پراکندگی نامنظم ذرات باعث جذب و انتقال حرارت بیشتر می گردد.

# ۳-۵-روشهای تولید نانوسیالات [۵۸]

بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیونها دارد تا از تهنشینی و ناپایداری آنها جلوگیری شود. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله نانوسیال اکسید فلزات، نیتریت ها، کاربید فلزات و غیرفلزات که به وسیله یا بدون استفاده از سورفکتانت<sup>۱</sup> در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیگول و روغن به وجود آمدهاست. مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه نانوذرات و روشهای پراکندهسازی آنها درسیال پایه انجام شدهاست که در اینجا به طور مختصر چند روش متداول را که برای تهیه نانوسیال وجود دارد ذکر میکنیم. به طور عمده ۲ روش برای تولید نانو سیالات متصور است:

# ۳-۵-۱-روش دو مرحلهای<sup>۲</sup>

در این روش ابتدا نانوذره یا نانولوله معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی<sup>۳</sup> در فضای گاز بیا<sup>ث</sup>ـر به صورت پودرهای خشک تهیه می شود، در مرحله بعد نانوذره یـا نانولولـه در داخـل سـیال پراکنـده می شود. برای این کار از روش هایی مانند لرزاننده های مـافوق صـوت و یـا از سـورفکتانت.هـا اسـتفاده

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Surfactant or Surface activators

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Two-step process

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> CVD
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 و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگینی، کمتر موفق بوده است. روش دو مرحله ای دارای مزایای اقتصادی بالقوه ای است، زیرا شرکته ای زیادی توانایی تهیه نانوپودرها در مقیاس صنعتی را دارند.

# ۳-۵-۲- روش تک مرحلهای<sup>۱</sup>

روش یک مرحلهای نیز به موازات روش دو مرحلهای پیشرفت کردهاست. به طور مثال نانوسیالاتی شامل نانوذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم تهیه شدهاند و در این روش، منبع فلزی تحت شرایط خلاء تبخیر میشود در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل خود میرسد، اما فشار بخار پایین سیال یکی از معایب این فرآیند محسوب میشود. ولی با این حال روشهای شیمیایی تک مرحلهای مختلفی برای تهیه نانوسیال به وجود آمده است که از آن جمله می توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلالهای مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد. مزیت اصلی روش یک مرحلهای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع اندازه ذرات است.

همچنین یک نکته اساسی در روشهای تولید نانو سیالات ایجاد پایداری برای ذرات معلق جامد، با بهره گیری از خواص سطحی ذرات معلق و نیز پیشگیری از ایجاد خوشهای ذرات است. در این راستا سه روش عمده وجود دارد:

- تغيير ميزان اسيديته<sup>٢</sup>
- استفاده از سورفكتانتها
- استفاده از ارتعاشات مافوق صوت<sup>®</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Single-step process

 $<sup>^{2}</sup>$  PH

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ultrasonic vibration

# ۳-۶-مدل های حل عددی نانوسیال

مدلهای حل عددی نانوسیال به دو بخش عمده تقسیم می شوند: ۱) مدلهای تکفاز ۲) مدله ای دوفاز، که اکثر کارهای انجام شده در حوزهی انتقال حرارت نانوسیال با دسته اول انجام شده است. این مدل معمولا به دلیل راحتی پیاده سازی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. در ادمه به معرفی این مدلها پرداخته می شود.

#### ۳–۶–۱–مدلهای تکفاز

در این مدل نانوسیال به عنوان یک سیال همگن شناخته میشود که دارای خواص موثر میباشد و از معادلات دیفرانسیلی برای بقای جرم، مومنتوم و انرژی استفاده می کند. در این مدل فرض میشود که سیال پایه و نانوذرات در یک تعادل حرارتی همراه با سرعت نسبی صفر بین ذرات و سیال پایه قرار دارند که البته این فرض هنگامیکه سیال پایه به راحتی جریان دارد، منطقی به نظر میرسد. پیاده-سازی و کاربرد مدل تکفاز از مدلهای دوفاز راحتر است و به زمان محاسباتی کمتری نیز نیاز دارد و شاید هم به همین دلیل باشد که این مدل بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. با این وجود نت ایج ایس مدل با نتایج تجربی تطابق خوبی ندارد و شاید دلیل عمدهی این مطلب هم این باشد که خواص موثر نانوسیال که باید در مدل تکفاز استفاده شود هنوز به خوبی شناخته نشده است. به دلایل مختلفی چون جاذبه، پدیدهی پخش براونی، تهنشینی یا رسوب و پراکندگی ذرات، ممکن است سرعت نسبی بین سیال پایه و نانوذرات که درمدل تکفاز صفر در نظر گرفته شده، واقعا صفر نباشد و لذا استفاده از مدل های دوفاز به نظر بهتر است. [59]

برای اینکه با استفاده از این مدل بتوان به نتایج دقیقی دست پیدا کرد ضروری است که از روابط مناسب برای بدست آوردن خواص موثر نانوسیال بهره ببریم. با این وجود هنوز یک رابطهی رسمی و جهانی که این خواص موثر را، برای هر ترکیبی از پارامترهای مستقل نانوسیال همانند ویژگی ذاتی ذرات، قطر ذرات و ...، به طور دقیق به دست بیاورد، وجود ندارد. با این وجود در اکثر منابع تاکید شده که ویژگیهای نانوسیال همانطور که به ویژگیهای نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد به درصد حجمی نانوذرات موجود در آن نیز وابسته است. لذا همانطور که ویژگیهای سیال پایه وابسته به دما است، ویژگیهای نانوسیال نیز وابسته به دما است. [۵۹]

#### ۳–۶–۲–مدلهای دوفاز

مدلهای دوفاز انواع مختلفی دارند که دو نوع از پرکاربردترین آنها میتوان به :

- مدل مخلوط دوفازی ا
  - اويلرى-اويلرى

اشاره کرد. مدل اویلری اویلری را به اختصار مدل اویلری مینامیم.

مدل مخلوط دوفازی، که از این به بعد برای اختصار آن را مدل مخلوط مینامیم، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی و نیز معادلهی کسر حجمی<sup>۲</sup>، که تنها برای فاز ذرات میباشد، را حل میکند. و سپس با استفاده از یک رابطه، که در قسمتهای آینده از همین فصل بیان خواهدشد، سرعت نسبی بین دوفاز را محاسبه میکند.

مدل اویلری اویلری کوپلینگهای متفاوتی بین فازها در نظر می گیرد. فشار با تمام فازها در اشتراک قرار دارد درحالیکه معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای فازهای مختلف، به طور جداگانه به کار میروند. به عبارت دیگر برای هریک از فاز اولیه و ثانویه معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی خواهیم داشت. حجم هر فاز را با انتگرال گیری از معادلهی کسر حجمی آن فاز در کل محدوده بدست می-آوریم درحالیکه مجموع تمام کسر حجمیها برابر با واحد خواهند شد.

در کل می توان گفت که مدل های دوفاز دقیق تر هستند و انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارند

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Two phase mixture model

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Volume fraction equation

# ۳-۶-۳–معادلات و فرمولاسیون مدل مخلوط دوفاز

گرمای ویژهی موثر از مرجع [۶۲] و به صورت معادلهی زیر قابل بیان است:
$$C_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}}$$
(۲-۳)

برای محاسبهی لزجت موثر نانوسیالات روابط نسبتا پیچیدهای ارائه شدهاست که البته با توجه به اینکه نانوذراتی که در نانوسیال این پژوهش به کار رفته اند، نانو ذرات مس هستند میتوان از رابطهی زیر که در کار سانترا و همکارانش<sup>۱</sup> [۶۲] آمدهاست استفاده کرد:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}}$$
 (۳-۳)  
ضریب هدایت حرارتی موثر برای نانوسیالات با ذرات کروی شکل نیز به صورت فرمول زیر که در کار  
لطفی و همکارانش<sup>۲</sup> [۶۳] آمده است میتوان استفاده کرد:

 $<sup>\</sup>frac{1}{2}$  Santra and et al.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Lotfi and et al.

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 4.97\varphi^2 + 2.72\varphi + 1 \tag{(f-r)}$$

معادلات حاکم بر مدل مخلوط دوفازی با فرض جریان آرام، حالت پایدار به این شرح است (لازم به د ذکر است که تمامی روابطی که در ادامه میآیند به صورت برداری و ابعادی هستند و پارامترهای بی-بعد و معادلات در فرم بیبعد در فصل فرمولاسیون و معادلات حاکم مطرح میگردد.) : معادلهی پیوستگی برای مدل مخلوط دوفاز از مرجع [۶۱] قابل استخراج است: (۵-۳)

معادلهی اندازه حرکت (مومنتوم) را از مرجع [۶۱] و به صورت زیر می توان بدست آورد:

$$\nabla \cdot \left(\rho_m V_m V_m\right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu_m \nabla V_m\right) + \rho_m g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k}\right)$$
(8-7)

معادلهی انرژی از مرجع [۶۴] گرفته شده است:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \rho_{k} \left(C_{p}\right)_{k} \varphi_{k} V_{k} T\right) = \nabla \cdot \left(k_{m} \nabla T\right)$$

$$(Y-T)$$

در الگوریتم مخلوط دوفازی برای نانوسیال معادلاتی وجود دارند که مختص این روش و مدل هستند که به آنها اشاره میکنیم. ابتدا از معادلهی کسر حجمی نانوذرات شروع میکنیم. معادلهی کسر حجمی نانو ذرات بیشتر به عنوان یک رابطهی کمکی برای ساده سازی روابط سرعتهای رانش و لغزش استفاده میشود. این رابطه از مرجع [۶۱] گرفته شده و به صورت زیر میباشد:

$$\nabla (\varphi_p \rho_p \mathbf{V}_m) = -\nabla (\varphi_p \rho_p \mathbf{V}_{dr,p})$$
(A- $\mathfrak{V}$ )

که 
$$V_m$$
 سرعت متوسط جرمی میباشد و از رابطهی زیر، که از همان مرجع [۶۱] گرفته شده است،  
بدست میآید:

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \varphi_k \rho_k V_k}{\rho_m}$$
(9-٣)

$$V_{pf} = V_p - V_f \tag{11-T}$$

سرعت رانش با سرعت لغزش از طریق معادلهی زیر مرتبط است که این رابطه هم مستقیما از مرجع [۶۱] گرفته شده است:

(۱۲-۳)  
$$V_{dr,p} = V_{pf} - \frac{\sum_{k=1}^{n} \varphi_k \rho_k V_{kf}}{\rho_m}$$
  
که اگر رابطهی (۱۳-۳) ساده شود به رابطهی دیگری بین سرعت رانش و لغزش میرسیم کـه ایـن

که اگر رابطهی (۳-۱۲) ساده شود به رابطهی دیکری بین سرعت رانش و لعزش میرسیم که ایس رابطه در این پایاننامه حاصل شده است و از مرجع دیگری گرفته نشده است:

$$V_{dr,p} = V_{pf} \left(1 - \frac{\rho_p \varphi_p}{\rho_m}\right) \tag{17-7}$$

در اینجا برای سرعت لغزش رابطهای مستقل وجود دارد که در مرجع [۶۱] آورده شده و بسیار مفید و پرکاربرد میباشد و آن را میتوان به صورت زیر بدست آورد:

$$V_{pf} = \frac{\rho_{p}d_{p}^{2}}{18\mu_{f}f_{drag}} \frac{(\rho_{p} - \rho_{m})}{\rho_{p}} a$$
(14-7)
  
28 Solved (14-7)
  
29 Solved (14-7)
  
29 Solved (14-7)
  
20 So

<sup>1</sup> Drift velocity

$$a = g - (\mathbf{V}_m \cdot \nabla) \mathbf{V}_m \tag{12-T}$$

$$\begin{split} f_{drag} &= \begin{cases} 1{+}0.15\,\mathrm{Re}_p^{0.687} & , \mathrm{Re}_p \leq 1000 \\ 0.0183\,\mathrm{Re}_p & , \mathrm{Re}_p > 1000 \end{cases} \end{split}$$

رابطهی کمکی دیگر که در آینده مورد نیاز میباشد را استخراج کنیم که در مرجع دیگری نیامده است. با جایگذاری معادلهی سرعت مخلوط در پیوستگی به رابطهی زیر میرسیم:

$$\rho_p \varphi_p \left(\frac{\partial u_p}{\partial x} + \frac{\partial v_p}{\partial y}\right) + \rho_f \varphi_f \left(\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y}\right) = 0 \tag{1A-W}$$

حالا نوبت باز کردن رابطهی کسر حجمی و ساده سازی آن است تا به رابطهی زیر برسیم:  $\frac{\partial u_p}{\partial x} + \frac{\partial v_p}{\partial y} = 0$ (19-37)

حالا با ترکیب دو رابطه اخیر به رابطه زیر می سیم:  

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} = 0$$
(۲۰-۳)

 $\partial x$ 

این دو رابطهی اخیر نشان میدهد که رابطهی پیوستگی برای هر فاز معتبر است.

# ۳-۶-۴-الگوريتم مدل مخلوط دوفازی

در حل الگوریتم مخلوط دوفاز در اولین قدم نیاز به یک سری حدس اولیههایی داریم که تحت عنوان

سرعتاولیه نیز میتوان از آنها یاد کرد که عبارتند از سرعت اولیه های افقی و عمودی برای مخلوط و ذرات و نیز یک حدس اولیه برای یک سری از ضرایب که در الگوریتم سیمپل مورد نیاز هستند (در فصل پنجم الگوریتم سیمپل ارائه خواهدشد.) در مرحلهی بعدی الگوریتم سیمپل حل میشود که خروجی این قسمت سرعتهای عمودی و افقی جدید برای مخلوط میباشد. در مرحلهی بعد با استفاده از سرعتهای جدید مخلوط و ویژگی های ذرات و سیال و با استفاده از معادلهی (۳-۱۴) سرعت لغزش بدست میآید. در مرحلهی بعدی با استفاده از رابطهی (۳-۱۳) سرعت رانیش بدست میآید. در گام بعد با جمع سرعت رانش و سرعت مخلوط، سرعت ذرات بدست میآید و سپس با کم میآید. در گام بعد با جمع سرعت رانش و سرعت مخلوط، سرعت ذرات بدست میآید و سپس با کم میآید. در گام بعد با جمع سرعت رانش و سرعت مخلوط، سرعت ذرات بدست میآید و سپس با کم اسیده از سرعت لغزش از سرعت ذرات، سرعت سیال پایه بدست میآید. در این مرحله نوبت چک کردن معیار همگرایی است تا بدانیم که حل ادامه یابد و الگوریتم تکرار شود یا دیگر جواب ها به دقت لازم رسیدهاند. معیار همگرایی که برای الگوریتم مخلوط دوفاز درنظر گرفته شده به این ترتیب است که اختلاف بین اندازهی سرعت مخلوط در دو تکرار پی درپی برای هر نقطه از کل شبکهی محاسباتی به صورت یک ماتریس بدست آید، آنگاه بزرگترین درایه از این ماتریس اختلافات، از یک میزان خطا که از پیش درنظر گرفته شده است، کوچکتر باشد.

در ادامه فلوچارت الگوریتم مخلوط دوفازی استفاده شده در این کار خواهد آمد.



# ۳-۶-۵-استخراج معادلهی مومنتوم در مدل مخلوط دوفاز

اینکه معادلهی مومنتوم در مدل مخلوط دوفازی چگونه بدست آمده است و اینکه ترم آخر در سمت راست معادلهی مومنتوم که مختص الگوریتم دوفاز است چگونه به این معادله اضافه شده است، قابل اثبات و استخراج میباشد [۶۵] .

رابطهی پیوستگی و مومنتوم برای هر فاز با اندیس k به صورت زیر میباشد:

$$\nabla \cdot \left( \alpha_k \, \rho_k V_k \right) = 0 \tag{(1-7)}$$

$$\nabla (\alpha_k \rho_k V_k V_k) = -\alpha_k \nabla P_k + \nabla (\alpha_k \tau_k) + \alpha_k \rho_k g \qquad (\Upsilon \Upsilon - \Upsilon)$$

$$V_{m} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{k})}{\rho_{m}}$$
(YW-W)

برای بدست آوردن معادلهی پیوستگی مخلوط، باید از معادلهی پیوستگی مربوط به هر فاز سیگما بگیریم که اگر با توجه به معادلهی (۳–۲۲) از معادلهی (۳–۲۱) سیگما بگیریم معادلهی (۳–۵) بدست

$$\nabla \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{k}) = \nabla (\rho_{m} V_{m})$$
(14-7)

و حالا مشابه معادلهی پیوستگی، برای بدست آوردن معادلهی مونتوم مخلوط باید از معادلهی مومنتوم

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{k} V_{k}) = -\sum_{k=1}^{n} \alpha_{k} \nabla P_{k} + \nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \tau_{k}) + \sum_{k=1}^{n} \alpha_{k} \rho_{k} g$$

$$(\Upsilon \Delta - \Upsilon)$$

و:

میآید:

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{k} V_{k}) = \nabla \cdot (\rho_{m} V_{m} V_{m}) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{mk} V_{mk})$$

$$(\gamma \not \gamma - \gamma)$$

$$-\sum_{k=1}^{n} \alpha_{k} \nabla P_{k} = -\nabla P \qquad \nabla \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \tau_{k}) = \nabla \tau_{m} \qquad \sum_{k=1}^{n} \alpha_{k} \rho_{k} g = \rho_{m} g \qquad (\Upsilon \Psi - \Upsilon)$$

#### ۳–۶–۵–۱–اثبات ترم اضافهشده به مومنتوم در مدل مخلوط دوفاز

تاحالا معادلهی مومنتوم برای نانوسیال در مدل مخلوط دوفاز به اثبات رسیده است و در ادامه هدف اثبات رابطهی (۳-۲۶) خواهد بود که برای سهولت به شکل اندیسی این مهم انجام میشود. به عنوان نکتهی مهم باید توجه کرد که عبارت  $V_k V_k$  یک ضرب برداری یا دیادیک است به صورت  $V_i V_j$  نوشته میشود و نیز گرادیان یک کمیت مثلا سرعت در فرم اندیسی به شکل i(V) = (V) = (V). نوشته می-شود. لازم به ذکر است این اثبات کاملا منحصر به این پایاننامه بوده و با راهنمایی موثر اساتید راهنما بدست آمده است:

$$\nabla \cdot \left(\alpha_k \rho_k V_k\right) = \alpha_k \rho_k V_{j,j}^k = 0 \tag{7A-T}$$

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{k} V_{k}) = A \qquad \nabla \cdot (\rho_{m} V_{m} V_{m}) = B \qquad \nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} V_{mk} V_{mk}) = C \qquad (\Upsilon - \Upsilon)$$

$$LHS = A \qquad RHS = B + C$$

در این قسمت اندیس فازها به صورت بالانویس خواهد آمد و عدد ۱ بر فاز سیال و عدد ۲ بر فاز ذرات دلالت خواهد داشت و با توان نباید اشتباه گرفته شود. معادلهی (۳-۳۰) فرم گسستهی فازی معادله پیوستگی است.

$$\alpha^{1} \rho^{1} V_{j,j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{j,j}^{2} = 0$$
 (\(\mathcal{T}\cdot - \mathcal{T}\))

و طبق آن عبارات A، B و C به صورت سادهتر و در فرم فازها نوشته می شوند.

$$A = \alpha^{1} \rho^{1} V_{i,j}^{1} V_{j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{i,j}^{2} V_{j}^{2}$$

$$B = (\alpha^{1} \rho^{1} + \alpha^{2} \rho^{2}) V_{i,j}^{m} V_{j}^{m}$$

$$C = \alpha^{1} \rho^{1} V_{i,j}^{m} V_{j}^{m1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{i,j}^{m2} V_{j}^{m2}$$

$$V^{1} = V^{m1} + V^{m} \quad V^{2} = V^{m2} + V^{m}$$
(\mathbf{T}\mathbf{T}\mathbf{T}\mathbf{T}) (\mathbf{T}\mathbf{T}\mathbf{T}\mathbf{T})   
(\mathbf{T}\mathbf{T}\mathbf{T}) = V^{m1} + V^{m} \quad V^{2} = V^{m2} + V^{m}

اثبات را از سمت چپ یا همان ترم A یا همان LHS آغاز می *ک*نیم. بـرای ایـن منظـور بـا اسـتفاده از

معادلهی (۳۲-۳)، عبارت A را باز میکنیم.

سپس جملات را در یکدیگر ضرب می کنیم:

$$A = \alpha^{1} \rho^{1} \left( V_{i,j}^{m1} + V_{i,j}^{m} \right) \left( V_{j}^{m1} + V_{j}^{m} \right) + \alpha^{2} \rho^{2} \left( V_{i,j}^{m2} + V_{i,j}^{m} \right) \left( V_{j}^{m2} + V_{j}^{m} \right)$$
(°°°-°)

$$= \alpha^{1} \rho^{1} \left( V_{i,j}^{m} V_{j}^{m1} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m1} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} \right)$$

$$+ \alpha^{2} \rho^{2} \left( V_{i,j}^{m2} V_{j}^{m2} + V_{i,j}^{m2} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m2} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} \right)$$
(\mathcal{Y}-\mathcal{Y})

Α

اکنون در معادلهی (۳۴-۳۳) عبارات A، B و C را که در معادلهی (۳۱-۳۱) بیان شده است را ایجاد می-کنیم، به عبارت دیگر طرف راست معادلهی (۳۴-۳۳) را بر حسب حاصل جمع عبارات B و C مینویسیم و جملات باقیمانده در قالب نماد E مینویسیم.

$$A = B + C + E$$

$$E = \alpha^{1} \rho^{1} \left( V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m1} \right) + \alpha^{2} \rho^{2} \left( V_{i,j}^{m2} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{m} V_{j}^{m2} \right)$$

$$V^{m1} = V^{1} - V^{m} \quad V^{m2} = V^{2} - V^{m}$$
(\mathcal{T}\mathcal\{T}\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{

حالا با استفاده از معادلهی (۳۶-۳۳)، عبارت E در معادلهی (۳-۳۵) را باز میکنیم:

$$E = \alpha^{1} \rho^{1} \left( V_{i,j}^{m} V_{j}^{1} - V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{1} V_{j}^{m} - V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} \right)$$

$$+ \alpha^{2} \rho^{2} \left( V_{i,j}^{m} V_{j}^{2} - V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} + V_{i,j}^{2} V_{j}^{m} - V_{i,j}^{m} V_{j}^{m} \right)$$
(\mathcal{Y}-\mathcal{Y})

اینک تعریف سرعت متوسط در مدل مخلوط دوفاز را به فرم اندیسی مینوسیم:

$$V_{j}^{m} = \frac{\alpha^{1} \rho^{W}_{j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{j}^{2}}{\rho^{m}} \rightarrow \rho^{m} V_{j}^{m} = \alpha^{1} \rho^{W}_{j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{j}^{2}$$

$$V_{i,j}^{m} = \frac{\alpha^{1} \rho^{W}_{i,j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{i,j}^{2}}{\rho^{m}} \rightarrow \rho^{m} V_{i,j}^{m} = \alpha^{1} \rho^{W}_{i,j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{i,j}^{2}$$
(\mathcal{Y}-\mathcal{Y})

اینک برای راحت تر شدن قسمت آخر اثبات دو پارامتر جدید به نامهای D و F تعریف می کنیم و E را در قالب آنها مینویسیم:

$$D = V_{i,j}^{m} \left( \alpha^{1} \rho^{1} V_{j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{j}^{2} \right) = \rho_{m} V_{i,j}^{m} V_{j}^{m}$$

$$F = V_{j}^{m} \left( \alpha^{1} \rho^{1} V_{i,j}^{1} + \alpha^{2} \rho^{2} V_{i,j}^{2} \right) = \rho_{m} V_{j}^{m} V_{i,j}^{m}$$

$$E = D + F - D - F \rightarrow E = 0 \rightarrow A = B + C$$

$$(\mathfrak{f} \cdot - \mathfrak{f})$$

اینک اثبات شد که E برابر با صفر بوده است و لذا با صفر شدن این پارامتر رابطهی هـدف کـه همـان معادلهی (۳-۲۶) است، اثبات شد.

# ۳-۷-معرفی نانوسیال بکار رفته در پایاننامه

نانوسیال این پایاننامه از سیال پایهی آب و نانوذرات مس تشکیل شده است که خواص هرفاز از این نانوسیال در قالب جدول زیر آمدهاست. لازم به ذکر است این خواص در دمای محیط یا ۲۵ درجهی سانتیگراد میباشد. لازم به ذکر است که در جدول زیر پارمتر D نشاندهندهی مقادیر قطر نانوذرات و مولکول آب میباشد.

فاز ذرات (مس)	سیال پایه (آب)	خواص
8954.0	1000.52	$ ho\left(rac{kg}{m^3} ight)$
	4.665E - 04	$\mu\!\left(\frac{N}{m^2}\right)$
100.0E - 09	0.29E - 09	D(m)
383.1	4179.0	$C_p\left(rac{\mathbf{j}}{\mathbf{kg.k}} ight)$
386.0	0.613	$\mathbf{k}\left(\frac{\mathbf{w}}{\mathbf{m.K}}\right)$

جدول ۳-۱ جدول خواص سیال پایه و نانوذرات

۴-محيط متخلخل

# ۴-۱-معرفی محیط متخلخل

محیط متخلخل به یک محیط جامد دارای تخلخل گفته می شود. بسته به اینکه محیط متخلخل تحت اثر نیروی های بیرونی بتواند سیالات را از خود عبور دهد یا نه، به آن محیط متخلخل تراوا (نفوذپذیر) یا محیط متخلخل ناتراوا (غیر نفوذپذیر) می گویند. محیطهای متخلخل ممکن است همگن یا ناهمگن باشند. بسیاری از محیطهای متخلخلی که در زیستفناوری استفاده می شوند شکل پذیر و تراکم پذیر هستند. بیشتر محیطهای متخلخل زیستی، در شرایط بدون فشار کشسان هستند. اگر محیط متخلخل کشسان و تراکم پذیر باشد، پس از تراکم به شکل و حالت اولیه ی خود بازمی گردد. تفاوت اصلی محیطهای متخلخلی که از اجزا و بافت زنده تشکل شدهاند نسبت به محیط متخلخل دیگر این است که علاوه بر واکنش مکانیکی به فشار (که ابر اثر ذات محیط متخلخل پدید می آید) واکنشهای فیزیولوژیک نیز نشان می دهند. از کاربردهای محیط متخلخل می توان به مواردی همچون:

- پیلھای سوختی
- فرآیندهای جداسازی یا فیلترینگ
  - استخراج منابع زیرزمینی
    - پالایشگاهها
  - مبدلهای حرارتی فشرده
  - سیستمهای زمین گرمایی

#### اشاره کرد.

اولین مدارک مربوط به پژوهش در مورد جریان درون محیطهای متخلخل مربوط به مهندس فرانسوی به نام هنری دارسی <sup>(</sup> میباشد که قانون دارسی را نیز ارائه داد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Henry Philibert Gaspard Darcy

## ۴-۲-ویژگیهای یک محیط متخلخل

# ۴-۲-۱-تعريف تخلخل

تخلخل یکی از خصوصیات سنگها و خاکها است که با ٤ نمایش داده می شود. تخلخل نسبت فضای حفرهای یک سنگ (خاک) است به فضای کلی آن:

$$\mathcal{E} = \frac{V_v}{V_T} \tag{1-f}$$

بنابراین تخلخل عددی بین صفر تا یک است.

لازم به ذکر است که دو نوع تخلخل وجود دارد:

- ۱) تخلخل مطلق: حجم کل خلل و فرجهای یک محیط به حجم کل محیط
- ۲) تخلخل موثر: حجم تمام خلل و فرجهای به هم پیوسته در یک محیط به حجم کل یک محیط محیط به حجم کل یک محیط

همچنین با ضرب کردن این میزان در ۱۰۰ میتوان آن را بصورت درصد نیز بیان کرد. تخلخل به عنوان یکی از ویژگیهای سنگ نقش مهمی را در مطالعات زمین شناسی و همچنین شناسایی مخازن مواد آلی و آبی ایفا میکند. برای نمونه در یک مخزن آبی، تخلخل نشان دهنده حداکثر میزان آبی است که سنگ آن مخزن میتواند در خود نگه دارد.

بعضی سنگها همچون ماسه سنگ، پلمه سنگ و سنگ خارا به علت چینش مناسب ریزدانهها تخلخل پایینی دارند. به این نوع سنگها به اصطلاح سنگهای بههمفشرده گویند. سنگهایی مانندسنگ آهک نیز معمولاً دارای تخلخل بالا میباشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Porosity

#### ۴-۲-۲-نفوذپذیری

به توانایی یک محیط متخلخل در عبور یک سیال از درونش را نفوذپذیری می گویند. لـذا نفوذپـذیری بالا به معنای عبور راحت تر سیال و مقادیر اندک آن به معنی سخت عبور کردن سیال میباشد. واحـد نفوذپذیری مترمربع میباشد و نیز میزان نفوذپذیری توسط عدد بیبعد دارسی اندازه گیری و بیان می-شود.

# ۴–۳– رویکردها و معادلات حاکم در محیط متخلخل

برای حل معادله انرژی در محیط متخلخل دو رویکرد :

- تک معادله یا تعادل حرارتی محلی<sup>۱</sup>
- دو معادله یا عدم تعادل حرارتی محلی<sup>۲</sup>

وجود دارد. در رویکرد تکمعادله، فاز سیال و فاز جامد در محیط متخلخل را در یک تعادل حرارتی محلی در نظر می گیرند و لذا در حل انرژی فقط یک معادله وجود دارد ولی در رویکرد دو معادله این تعادل در نظر گرفته نمی شود و برای هر فاز یک معادله ی انرژی جداگانه نوشته می شود. در سالهای اخیر مسائل با مدل عدم تعادل محلی بیشتر مورد توجه قرار گرفتهاند که این مهم می-تواند به دلیل کاربردهای مهندسی این مدل، همانند خنک کاری در زمینه ی الکترونیک، لولههای انتفال حرارت، راکتورهای هسته ای، تکنولوژی خشک کردن، راکتورهای کاتالیزی چندفاز و غیره، باشد.

در حل هیدرودینامیکی محیط متخلخل تفاوتی که بین مسائل عادی و مسائل محیط متخلخل وجود دارد، یک جملهی تحت عنوان منبع نیروی حجمی در محیط متخلخل میباشد که در معادلهی مومنتوم وارد میشود. در ادامه به ارائهی معادلات مربوط به محیط متخلخل میپردازیم.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Local thermal equilibriul or LTE

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Local thermal non-equilibrium or LTNE

معادلهی مومنتوم [۵]:

$$(\frac{\rho_f}{\varepsilon}) \nabla . (VV) = -\nabla P + (\frac{\mu_f}{\varepsilon}) \nabla . (\nabla V) + \rho_f g + S_p$$

$$S_p = -\frac{\mu_f}{K} V - \frac{\rho \varepsilon}{\sqrt{K}} \left( \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \right) (|V|) V$$

$$(7-4)$$

ترم دوم از جملهی منبع برای متخلخل که دارای سرعت مرتبهی دوم است را ترم فورچیمر مینامند. معادلهی انرژی [۶۶]:

$$\rho_f C_f V \nabla T = \frac{k_{porous}}{\varepsilon} \nabla^2 T$$
(٣-۴)

لازم به ذکر است که تمامی روابط ارائه شده تا به اینجای کار به فرم ابعادی بوده و این روابط در فصل ششم به صورت بیبعد ارائه می گردند. محیط متخلخلی که برای این پایاننامه و در مدل سازی عددی انتخاب شده است متال فوم آلومینیوم است که دارای هدایت حرارتی برابر با  $\frac{w}{m.k}$  237 و چگالی  $\frac{kg}{m^3}$  2700 میباشد. برای بدست آوردن نسبت هدایت حرارتی این محیط متخلخل (فوم فلزی آلومینیوم) از رابطهی ۴–۴ استفاده شده است که در این معادلات اندیس s به فاز جامد محیط متخلخل، که در اینجا آلومینیوم است، و اندیس f مربوط به سیال داخل محیط متخلخل دلالت دارد:  $k_{portus} = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s$ 

۵-فرمولاسیون و معادلات

حاكم

## ۵–۱–هندسه و شرایط مرزی

در هر نوع پژوهشی پیکربندی مسأله بسیار حائز اهمیت میباشد. در این پایاننامه هم هندسه یکار از نوع کانال دوبعدی با صفحات موازی و با عمق نامحدود میباشد.طول ابعادی کانال ۱ متر و عرض ابعادی کانال هم ۱ سانتیمتر میباشد یعنی طول کانال ۱۰۰ برابر عرض آن بوده و اگر عرض بیبعد کانال ۱ باشد لذا طول بیبعد آن ۱۰۰ خواهد بود. دیوارههای این کانال دارای شرط مرزی دما ثابت بوده و پروفیل سرعت ورودی یکنواخت و دارای مقدار ثابت بوده و سیال با دمای مشخص و ثابت وارد کانال میشود. هندسه کار در شکل ۵-۱ آورده شدهاست. لازم به ذکر است که جهت شتاب جاذب ه عمود بر کانال، یعنی در جهت مولفه ی Z دستگاه مختصات قرار دارد و لذا در معادلات حاکم بر کار لحاظ نمی شود.



شکل ۵-۱ هندسه ی کار، ابعاد کانال و شرایط مرزی

### ۵-۲- مشبندی

مش بندی در هر مساله ای از اهمیت خاصی بر خوردار است بطوریکه بعضی مسائل دارای مش غیریکنواخت و برخی دیگر دارای مش یکنواخت می باشند. نکته یمهم دیگری که در مورد مش بندی وجود دارد این است که جواب حل و مساله نباید وابسته به مش بندی باشد و با تغییر مش بندی جواب تغییر زیادی داشته باشد. لذا در هر کاری یک مطالعه و اثبات برای نشان دادن استقلال جواب از مش-بندی وجود دارد. جواب هم باید از نسبت ابعاد هر مش و هم از تراکم مشبنـدی مسـتقل باشـد. ایـن مطالعه برای موضوع پایاننامه در فصل نتایج و گزارشات میآید. اکنون فقط ابعاد مش معرفی میشود. لازم به ذکر است در این مقدار تراکم مش (۵۰۰۰) و این نسبت ابعادی برای هـر مـش (۸) اسـتقلال جواب با خطای کمتر از ۱ درصد به اثبات رسیده است، لذا تعداد مشهـای افقـی 250 = M عـدد و تعداد مشهای عمودی 20 = N عدد میباشد که با توجه به ابعاد بیبعد کانال یعنی عرض 1 = H و طول 100 = L، ابعاد افقی و عمودی مش به ترتیب برابر با ۲۰۴ و ۲۰۰۵ میباشد یا به عبارت دیگر:

 $\Delta X = \frac{L}{M} = \frac{100}{250} = 0.4$  $\Delta Y = \frac{H}{N} = \frac{1}{20} = 0.05$ 

مشاهده است:	دی قابل	۵-۲ مشبنا	در شکل
-------------	---------	-----------	--------



شکل ۵-۲ مشبندی برای هندسهی کار

# ۵–۳-استخراج فرم بیبعد معادلات سیال خالص، نانوسیال و محیط متخلخل

## ۵-۳-۱-معرفی پارامترهای بیبعد

بیبعد سازی معالات یک امر ضروری در حل با استفاده از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی می-باشد و انجام آن قبل از گسستهسازی ضروری است. لذا در هر مساله که با این رویکرد حل میشود یک سری پارامترها به عنوان مرجع برای بیبعد سازی در نظر گرفته و توسط آنها کل معادلات حاکم بر مساله بیبعد میشود. لذا در اینجا به معرفی پارامترهای بیبعد میپردازیم و سپس با استفاده از آنها معادلات حاکم را بیبعد میکنیم:

$$(x^*, y^*) = \frac{(x, y)}{H}$$

$$(u^*, v^*) = \frac{(u, v)}{U_{in}}$$

$$p^* = \frac{p}{\rho_f U_{in}^2}$$

$$\theta = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}$$
(1- $\Delta$ )

و همچنین اعداد بیبعدی که در معادلات ظاهر خواهند شد عبارتند از:

 $\begin{aligned} \operatorname{Re} &= \frac{\rho_{f} U_{in} H}{\mu_{f}} \end{aligned} \tag{(٢-\Delta)} \\ Pr &= \frac{C_{p,f} \mu_{f}}{k_{f}} \\ Da &= \frac{K}{H^{2}} \\ Pe &= \operatorname{Re}^{*} Pr \end{aligned}$ 

متخلخل آورده میشوند و در ادامه نیز فرم بیبعد آنها ارائه خواهدشد و سپس نحوهی ترکیب آنها بیان میشود.

۵–۳–۲–فرم ابعادی معادلات سیال خالص در کانال بدون محیط متخلخل

فرم اولیه و ابعادی برای معادلات حاکم بر سیال خالص و در کانال بدون محیط متخلخل به شرح زیـر میباشد: معادلهی پیوستگی در فرم برداری: (۳-۵)  $(-6, V_f V_f) = 0$  (۳-۵) معادلهی اندازه حرکت (مومنتوم) در فرم برداری: (۴-۵)  $(-6, V_f V_f V_f) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_f \nabla V_f)$ معادلهی انرژی در فرم برداری: (۵-۵)  $\nabla \cdot (\nabla T) = \nabla \cdot (\alpha_f \nabla T)$ 

#### ۵–۳–۳–فرم بیبعد معادلات برای سیال خالص در کانال بـدون محـیط

متخلخل

با استفاده از پارامترهای بیبعد و انجام عملیات بیبعد سازی، فرم بیبعد معادلات بدست میآیند. لازم به ذکر است تمام سرعت های معادلات (۵-۶) تا (۵-۸) همگی سرعتهای سیال خالص است. معادلهی پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x^*} + \frac{\partial v}{\partial y^*} = 0 \tag{(F-\Delta)}$$

معادلهی اندازه حرکت (مومنتوم) برای دو راستای افقی و عمودی:

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{u}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{u}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial x^*}$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{v}^*) = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial y^*}$$
(Y- $\Delta$ )

معادلەي انرژى:

$$u^* \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta}{\partial y^*} = \frac{1}{Pe} \nabla^2 \theta \tag{A-\Delta}$$

# ۵–۳–۴–فرم ابعادی معادلات حاکم برای نانوسیال در کانال بدون محیط متخلخل [۶۱]

صورت ابعادی معادلات حاکم بر نانوسیال در کانال بدون محیط متخلخل طبق مرجع [۶۱] مطابق زیر است.

$$\nabla . \left( \rho_m V_m \right) = 0 \tag{9-a}$$

معادلهی اندازه حرکت (مومنتوم) در فرم برداری:

$$\nabla \cdot \left(\rho_m V_m V_m\right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu_m \nabla V_m\right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k}\right)$$
(1.- $\Delta$ )

معادلهی انرژی در فرم برداری طبق مرجع [۶۴]:

$$\nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^{n} \rho_k (C_p)_k \varphi_k V_k T \right) = \nabla \cdot \left( k_m \nabla T \right)$$
(1)- $\Delta$ )

۵-۳-۵-فرم بیبعد معادلات حاکم برای نانوسیال در کانال بدون محیط

#### متخلخل

قبل از نوشتن فرم بیبعد معادلات نانوسیال، لازم است از چند معادله ی کمکی که در فصل چهارم

استخراج شد ( معادلات (۳-۱۹) و (۳-۲۰) ) کمک بگیریم و معادلهی انرژی را سادهتر کنیم. لازم به  
ذکر است در کلیهی معادلات نانوسیال با قرار دادن مقدار صفر برای درصد حجمی، معادلات مربوط به  
سیال خـالص بدسـت مـیآیـد. ابتـدا بـرای سـادهسـازی فـرض مـیکنـیم: 
$$A_p = \left(\rho C_p \varphi\right)_p$$
 و

:نابراین خواهیم داشت $A_{f}=\left(
ho C_{p}arphi
ight)_{f}$ 

$$(\mathbf{A}_{p}\mathbf{u}_{p} + \mathbf{A}_{f}\mathbf{u}_{f})\frac{\partial T}{\partial x} + (\mathbf{A}_{p}v_{p} + \mathbf{A}_{f}v_{f})\frac{\partial T}{\partial y} = k_{m}(\frac{\partial^{2}T}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2}T}{\partial x^{2}})$$
(17- $\Delta$ )

باز هم برای ساده تر شدن فرض می کنیم  $A_p v_p + A_f u_f = N_m$  و  $A_p u_p + A_f u_f = M_m$  لازم به ذکر است کلیهی پارامترهایی که برای ساده تر شدن در نظر گرفته شده است و همچنین بی بعدسازی های انجام شده، کاملا منحصرا مخصوص این پایان نامه می باشد.

بنابراین معادلهی ابعادی ساده شدهی انرژی به صورت زیر حاصل میشود:

$$M_{m} \frac{\partial T}{\partial x} + N_{m} \frac{\partial T}{\partial y} = k_{m} \left( \frac{\partial^{2} T}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T}{\partial y^{2}} \right)$$

$$M_{m} = \left( \rho C_{p} \varphi \right)_{p} u_{p} + \left( \rho C_{p} \varphi \right)_{f} u_{f}$$

$$N_{m} = \left( \rho C_{p} \varphi \right)_{p} v_{p} + \left( \rho C_{p} \varphi \right)_{f} v_{f}$$
(17- $\Delta$ )

فرم بیبعد دوپارامتری که جدید تعریف شدند عبارتند از:

$$M_{m}^{*} = \frac{M_{m}}{U_{in}} \quad \& \quad N_{m}^{*} = \frac{N_{m}}{U_{in}}$$
 (14- $\Delta$ )

معادلەي پيوستگى:

$$\frac{\partial u_m^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v_m^*}{\partial y^*} = 0 \tag{12-2}$$

معادلهی اندازه حرکت (مومنتوم) برای دو راستای افقی و عمودی:

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (u^* u^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (v^* u^*) = \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right] - \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} u^*_{dr,k} u^*_{dr,k} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (v^* u^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (v^* v^*) = \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right] - \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} v^*_{dr,k} v^*_{dr,k} \right)$$

$$(19-\Delta)$$

معادلەي انرژى:

$$\frac{M_m^*}{\rho_f C_{p,f}} \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + \frac{N_m^*}{\rho_f C_{p,f}} \frac{\partial \theta}{\partial y^*} = \frac{k_m}{k_f} \frac{1}{Pe} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{*2}} \right)$$
(1Y- $\Delta$ )

۵-۳-۶-فرم ابعادی معادلات حاکم برای سیال خالص در کانال پرشـده

با محيط متخلخل [۵]

طبق مرجع [۵] برای سیال خالص در محیط متخلخل معادلات حاکم به صورت زیر است: پیوستگی:  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$  = 0

معادلەي مومنتوم:

$$\left(\frac{\rho_f}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(VV\right) = -\nabla P + \left(\frac{\mu_f}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(\nabla V\right) - \frac{\mu_f}{K}V \tag{19-2}$$

از ترم دوم از جملهی منبع برای متخلخل که دارای سرعت مرتبهی دوم است و ترم فورچیمر نامیده می شود به دلیل حل در ناحیهی جریان آرام، صرف نظر شدهاست.

معادلەي انرژى:

$$\rho_{f}C_{f}V \nabla T = \frac{k_{porous}}{\varepsilon} \nabla^{2}T$$

$$k_{porous} = \varepsilon k_{f} + (1-\varepsilon)k_{s}$$
(Y -  $\Delta$ )

### ۵-۳-۷-فرم بیبعد معادلات حاکم برای سیال خالص در کانال پرشده با

محيط متخلخل

با استفاده از پارامترهای بیبعد معرفی شده، صورت بیبعد معادلات حاکم برای سیال خالص در محیط متخلخل به شکل زیر بدست میآید: پیوستگی:  $\frac{\partial u_m^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v_m^*}{\partial y^*} = 0$ 

معادلهي مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{u}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) = \frac{1}{\mathrm{Re}} \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{u}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right] - \varepsilon \frac{\partial p^*}{\partial x^*} - \frac{\varepsilon}{Da^* \mathrm{Re}} u^*$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{v}^*) = \frac{1}{\mathrm{Re}} \left[ \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right] - \varepsilon \frac{\partial p^*}{\partial y^*} - \frac{\varepsilon}{Da^* \mathrm{Re}} v^*$$
(YY- $\Delta$ )

معادلەي انرژى:

$$u^* \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{k_{porous}}{k_f} \frac{1}{Pe} \nabla^2 \theta$$
(YT- $\Delta$ )

همانطور که در معادلهی انرژی دیده میشود یک ضریب به صورت نسبت هدایت حرارتی موثر برای سیال در محیط متخلخل به هدایت حرارتی سیال آمده است که هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشـد نشان میدهد محیط متخلخل ضریب هدایت حرارتی را بیشتر افزایش میدهد.

4-4-استخراج معادلهی کلی برای نانوسیال در کانال کاملا پرشده

#### با محيط متخلخل

ابتدا باید ذکر شود که معادلهی پیوستگی تغییری ندارد و به همان شکل معادلهی پیوستگی نانوسیال یا سیال خالص یا متخلخل خواهد بود. برای استخراج این معادلهی کلی حرکت ابتدا باید به این نکتـه توجه کرد که دومعادله که یکی متوسط گیری شده و دیگری نشده، را نمی توان با هـم ترکیـب کـرد. معادله ای که برای فاز سیال در کانـال پرشـده بـا محـیط متخلخـل معرفی شـد ((۵-۱۸)، (۵-۱۹) و (۵-۲۰)) متوسط گیری حجمی شده بودند. لـذا بـرای ترکیـب ایـن معـادلات بـا معـادلات فـاز ذرات نانوسیال و حصول معادلهی نهایی باید معادلهی فاز ذرات هم متوسط گیـری شـود تـا بتـوان هـر دو معادله را با هم ترکیب کرد. برای بدست آوردن معادلهی نانوسیال، معادلهی فاز سیال و ذرات در کانال بدون محیط متخلخل با هم ترکیب شده بودند ولی در روند استخراج معادلهی کلی، معادله ی فـاز سیال و هردو معادله غیرمتوسط گیری شده یودند ولی در روند استخراج معادلهی کلی، معادلهی فـاز سـیال متوسط گیری شدهی حجمی در محیط متخلخل میباشد، لذا باید فاز ذرات هم متوسط گیری شـوند و طبق فرآیند ترکیب (قسمت ۰) با هم ترکیب شوند. ولی قبل از این کار، معادلهی حرکت برای سیال و طبق فرآیند ترکیب (قسمت ۰) با هم ترکیب شوند. ولی قبل از این کار، معادلهی حرکت برای سیال نیوتونی تراکم ناپذیر را از ابتدا مینویسیم تا نشان دهیم که معادلات بکار رفتـه بـرای حرکـت سـیال خالص در محیط عادی، که اساس تمام معـادلات ما تـا بـه حـالا بـوده است، بـه درسـتی و صحت درنظرگرفته شدهاست.

# ۵-۴-۱-معادلهی حرکت در فرم تانسور تــنش بـرای ســیال نیوتـونی تراکمناپذیر [۶۷]:

برای اثبات صحت معادلات بکار رفته برای سیال خالص در کانال بدون محیط متخلخل که اساس تمام روابط بودهاست، روابطی از مباحث کانتینیوم ارائه می شود که این معادلات به فرم اندیسی آورده شده-اند.

$$\rho \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial t} + v_{j} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \right) = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_{j}} + \rho B_{i} \qquad B : body force \qquad (\Upsilon f - \Delta)$$

$$T_{ij} = -P \delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \qquad D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{i}} \right) \rightarrow T_{ij} = -P \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{i}} \right)$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{j}} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial x_{j} \partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{j}} \right) \right)$$

$$\frac{\partial v_{j}}{\partial x_{j}} = 0$$

$$(\Upsilon f - \Delta)$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{j}} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial x_{j} \partial x_{j}} \longrightarrow \qquad ((79-\Delta))$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial t} + v_{j} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_{j}} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial x_{j} \partial x_{j}} + \rho B_{i} \qquad B : body force$$

$$y = \int \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} u}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2} u}{\partial z^{2}} \right) + \rho B_{x} \qquad ((\gamma-\Delta))$$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \partial P \qquad (\partial^{2} v - \partial^{2} v - \partial$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho B_y$$
$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho B_z$$

و برای حالت پایدار این معادلات معادل فرمول زیر هستند:

لذا در ادامه خواهیم داشت:

$$\nabla . \left( \rho_f V_f V_f \right) = -\nabla P + \nabla . \left( \mu_f \nabla V_f \right)$$
(YA- $\Delta$ )

که با همان معادلهی مومنتوم سیال خالص در کانال عادی برابر است که با متوسط گیری حجمی برای محیط متخلخل به صورت معادلهی زیر بدست میآید.

$$\left(\frac{\rho_{f}}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(\stackrel{f}{V}\stackrel{f}{V}\right) = -\nabla \stackrel{f}{P} + \left(\frac{\stackrel{f}{\mu}}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(\nabla \stackrel{f}{V}\right) - \frac{\stackrel{f}{\mu}\stackrel{f}{K}V$$
(۲۹-۵)

حالا گفته می شود که چون معادله ی بالا برای سیال بدست آمده پس اگر برای فاز ذرات هم همین روند طی و از معادله ی مومنتوم ذرات برای محیط متخلخل متوسط گیری شود معادله ای مشابه بالایی برای فاز ذرات نیز حاصل خواهد شد که بصورت زیر است:

$$\left(\frac{\rho_p}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(V V\right) = -\nabla P + \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)\nabla \cdot \left(\nabla V\right) - \frac{\mu}{K} V$$
(\vec{v} - \Delta)

اگر در معادلهی اخیر در قالب فاز کلی یا n نوشته شود و طرفین معادلهی در فاز کلی در  $arphi^k$  ضـرب شود و سپس از طرفین سیگما گرفته شود:

$$\nabla \cdot \sum_{n=1}^{2} \left( \stackrel{n}{\varphi} \stackrel{n}{\rho} \stackrel{n}{V} \stackrel{n}{V} \right) = -\varepsilon \sum_{n=1}^{2} \stackrel{n}{\varphi} \nabla \stackrel{n}{P} + \sum_{n=1}^{2} \stackrel{n}{\varphi} \stackrel{n}{\mu} \nabla^{2} \stackrel{n}{V} - \varepsilon \sum_{n=1}^{2} \left( \stackrel{n}{\varphi} \stackrel{n}{\mu} \stackrel{n}{V} \middle/ K \right)$$
(<sup>(Y)-Δ)</sup>

و در نهایت مشابه قسمت ۰ بدست میآید:

و نیز معادلهی انرژی به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot \left(\rho_m V_m V_m\right) = -\varepsilon \nabla P_m + \mu_m \nabla^2 V_m - \varepsilon \frac{\mu_m}{K} V_m + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,mk} V_{dr,mk}\right)$$
(°Y- $\Delta$ )

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \rho_k C_{p,k} \varphi_k V_k T\right) = k_{find} \nabla \cdot (\nabla T)$$
 $k_{find} = \frac{k_{porous}^m}{\varepsilon} \qquad k_{porous}^m = \int_{\rho}^{f} \rho_k f_{porous}^f + \frac{\rho}{\rho} \rho_k p_{porous}^p$ 
 $k_{forous}^f = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \varepsilon k_p + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \varepsilon k_p + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s \qquad k_{porous}^p = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_p$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s$ 
 $k_{porous}^f = \kappa_f + (1-\varepsilon) k_s$ 

#### ۵-۴-۲-فرم بیبعد معادلات برای نانوسیال در محیط متخلخل

در این قسمت معادلات بدست آمده برای نانوسیال در محیط متخلخل با استفاده از پارامترهای گفت. شده برای بیبعد سازی، به فرم بیبعد تبدیل می شود. فرم بیبعد پیوستگی که مشابه قبل است. بیبعد سازی و گسسته سازی معادلات کاملا انحصاری می باشد.

- فرم بىبعد مومنتوم:
  - (۳۴-۵)

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{u}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) = \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{u}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right] - \varepsilon \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \\ - \frac{\varepsilon}{Da^* \text{Re}} \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} u^* + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} u^*_{dr,k} u^*_{dr,k} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x^*} (\mathbf{v}^* \mathbf{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\mathbf{v}^* v^*) = \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right] - \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \\ - \frac{\varepsilon}{Da^* \text{Re}} \frac{\mu_m}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_m} v^* + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} v^*_{dr,k} v^*_{dr,k} \right)$$

فرم بيبعد انرژي:

$$\frac{M_{m}^{*}}{\rho_{f}C_{p,f}}\frac{\partial\theta}{\partial x^{*}} + \frac{N_{m}^{*}}{\rho_{f}C_{p,f}}\frac{\partial\theta}{\partial y^{*}} = \frac{k_{final}}{k_{f}}\frac{1}{Pe}\left(\frac{\partial^{2}\theta}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^{2}\theta}{\partial y^{*2}}\right)$$

$$k_{final} = \frac{k_{porous}^{m}}{\varepsilon} \qquad k_{porous}^{m} = \stackrel{f}{\varphi}k_{porous}^{f} + \stackrel{p}{\varphi}k_{porous}^{p}$$

$$k_{porous}^{f} = \varepsilon k_{f} + (1-\varepsilon)k_{s} \qquad k_{porous}^{p} = \varepsilon k_{p} + (1-\varepsilon)k_{p}$$
(\mathcal{T}\Delta\Delt

۵-۵-گسستهسازی معادلات بیبعد برای نانوسیال در کانال پرشده

یک دیدگاهی که در مورد مسائل دینامیک سیالات محاسباتی در تقسیم بندی روش حل مسائل به

شیوهی حجم محدود وجود دارد، تقسیم بندی حل مساله از لحاظ گره حل میباشد. در ایـن تقسـیم بندی دو روش برای حل مسائل وجود دارد:

- گرید جابجا شده
  - ۲) گرید یکجا<sup>۲</sup>



در هر یک روش از روش های ذکر شده اعمال شرایط مرزی متفاوت است و هر روش ارضای شرایط مرزی خاص خود را می طلبد. مستطیل خطچین محدوده ی حل برای هر نقطه است. در روش اول به دلیل اینکه روی سطح مشترک دو مش سرعت وجود دارد و برای هر نقطه نیز فشار تعریف می شود، لذا با توجه به محدوده ی خطچین، در این روش حل، سرعت و فشار کوپل می شوند که با الگوریتم سیمپل این معادلات کوپله حل خواهند شد و در روش دوم از یک سری توابع برای کوپل ه کردن سرعت و فشار استفاده می شود.

در این پایاننامه روش گرید جابجا شده برای گسسته سازی معادلات موجود استفاده می شود. در شکل زیر به صورت بهتری گرید حل معادلات برای راستای افقی (محدودهی سمت راست و پایین) و برای راستای عمودی (محدودهی سمت چپ و بالا) نشان داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Staggered grid

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Collocated grid



شکل ۵-۳ گرید بندی محدوده یحل و استفاده از روش گرید جابجا شده برای گسستهسازی

روش کار به این صورت است که از معادلات بیبعد شدهی مومنتوم برای راستای افقی و عمودی، به ترتیب در محدودهی آبی و قرمز انتگرال دوگانه گرفتهمی شود. ابتدا برای سازی در سهولت فرمول-نویسی تعاریف زیر ارائه می شوند. لازم به ذکر است کلیه ی پارامترهای این قسمت و گسسته سازی ها منحصر به این پایان نامه می باشد.

$$\operatorname{Re}_{final} = \operatorname{Re} \frac{\mu_f}{\mu_m} \frac{\rho_m}{\rho_f}$$
 (۳۶-۵)  
لازم به ذکر است که برای سادهسازی روند حل، جمله یغیرخطی سرعت که دارای مولفه ی توان دوم  
سرعت است را به یک مولفه با ضریبی از سرعت تعریف می کنیم. یعنی  $F = u$  &  $G = v$  و لذا  
 $Fu = uu$  &  $Gu = vu$  &  $Fv = uv$  &  $Gv = vv$ 

۵-۵-۱-گسستهسازی مومنتوم برای راستای افقی

برای شروع معادلهی مومنتوم بیبعد دوباره نوشته میشود.

 $({}^{\tt WV-\Delta})$ 

$$\frac{\partial}{\partial x^{*}} \left( F^{*}u^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial x^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial y^{*}} \left( G^{*}u^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial y^{*}} \right) = -\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \frac{\partial p^{*}}{\partial x^{*}} \\ - \frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{final}} u^{*} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} u^{*}_{dr,k} u^{*}_{dr,k} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x^{*}} \left( F^{*}v^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial v^{*}}{\partial x^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial y^{*}} \left( G^{*}v^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial v^{*}}{\partial y^{*}} \right) = -\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \frac{\partial p^{*}}{\partial y^{*}} \\ - \frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{final}} v^{*} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} v^{*}_{dr,k} v^{*}_{dr,k} \right)$$

حالا معادلات مومنتوم آمادهی انتگرال گیری میباشند که برای جلوگیری از زیادهنویسی ادامه ی محاسبات تا استخراج فرمول ها، در بخش پیوست قابل مشاهده هستند و در اینجا تنها قسمت آخر محاسبات و فرمول بیبعد نهایی آورده می شود. معادله ی گسسته شده ی مومنتوم افقی در فرم ضرایب به صورت زیر است و در ادامه ی آن نیز ضرایب آورده شده اند.

 $(^{\intercal}\Lambda\text{-}\Delta)$ 

$$\begin{aligned} a_{U}(i, j+1)u^{*}(i, j+1) &= \\ a_{U}(i, j+3)u^{*}(i, j+3) + a_{U}(i, j-1)u^{*}(i, j-1) \\ &+ a_{U}(i+2, j+1)u^{*}(i+2, j+1) \\ &+ a_{U}(i-2, j+1)u^{*}(i-2, j+1) \\ &- \varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \left\{ p^{*}(i, j+2) - p^{*}(i, j) \right\} \Delta Y \\ &+ \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m} \right)_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{e^{*}}{\rho_{r,k}}(i, j+1) \right) \quad \Delta X \Delta Y \end{aligned}$$

که ضرایب عبارتند از:

(۳۹-۵)
$$\begin{split} \mathbf{a}_{U}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) &= \left[ max \left( 0, \left( \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) + \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3) \right) / 2 \right) \right] \Delta Y \\ \left[ max \left( 0, - \left( \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) + \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1) \right) / 2 \right) + 2 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta X \right) \right] \Delta Y \\ &+ \left[ \left( \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) + \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}+2) - \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}) - \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}+2) \right) / 4 \right] \Delta X \\ &+ \left( 2 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta Y \right) \right) \Delta X + \frac{\varepsilon}{Da * \operatorname{Re}_{final}} \Delta X \Delta Y \\ \mathbf{a}_{U}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3) &= \left[ \left( \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) + \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}+2) - \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}) - \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}+2) \right) / 4 \right] \Delta X \\ &+ \left( 2 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta Y \right) \right) \Delta X \\ \mathbf{a}_{U}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1) &= \left[ max \left( 0, \left( \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) + \overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3) \right) / 2 \right) + 1 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta X \right) \right] \Delta Y \\ \mathbf{a}_{U}(\mathbf{i}+2,\mathbf{j}+1) &= \left[ - \left( \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) + \overset{*}{G}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}+2) \right) / 4 + 1 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta Y \right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{U}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+1) &= \left[ \left( \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}) + \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}+2) \right) / 4 + 1 / \left( \underset{final}{\operatorname{Re}} \Delta Y \right) \right] \Delta X \end{split}$$

## ۵-۵-۲-گسستهسازی مومنتوم برای راستای عمودی

اینک در اتمام گسستهسازی برای راستای افقی به سراغ راستای عمودی میرویم، لازم به ذکر است برای راستای عمودی به جهت جلوگیری از زیادهنویسی معادلهی نهایی مومنتوم در راستای عمودی نوشته می شود و روش کار مشابه راستای افقی می باشد. (۴۰-۵)

$$\begin{aligned} &a_{V}(i+1,j)v^{*}(i+1,j) = \\ &a_{V}(i+1,j+2)v^{*}(i+1,j+2) + a_{V}(i+1,j-2)v^{*}(i+1,j-2) \\ &+ a_{V}(i+3j)v^{*}(i+3,j) + a_{V}(i-1,j)v^{*}(i-1,j) \\ &- \varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \left\{ p^{*}(i+2,j) - p^{*}(i,j) \right\} \Delta X \\ &+ \nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} v_{dr,k}^{*}(i+1,j) v_{dr,k}^{*}(i+1,j) \right) \Delta X \Delta Y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{V}(i+1,j) &= \left[ \frac{F^{*}(i+2,j+1) + F^{*}(i,j+1) - F^{*}(i+2,j-1) - F^{*}(i,j-1)}{4} \right] \Delta Y \\ &+ \frac{2}{\operatorname{Re}\Delta X} \Delta Y \\ &+ \left[ \max\left(0, \frac{G^{*}(i+3,j) + G^{*}(i+1,j)}{2}\right) + \max\left(0, -\frac{G^{*}(i-1,j) + G^{*}(i+1,j)}{2}\right) \right] \Delta X \\ &+ \frac{2}{\operatorname{Re}\Delta Y} \Delta X + \frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{jind}} \Delta X \Delta Y \\ a_{V}(i+1,j+2) &= \left[ -\frac{F^{*}(i+2,j+1) + F^{*}(i,j+1)}{4} + \frac{1}{\operatorname{Re}\Delta X} \right] \Delta Y \\ a_{V}(i+1,j-2) &= \left[ \frac{F^{*}(i-2,j-1) + F^{*}(i,j-1)}{4} + \frac{1}{\operatorname{Re}\Delta X} \right] \Delta Y \\ a_{V}(i+3,j) &= \left[ \max\left(0, -\frac{G^{*}(i+3,j) + G^{*}(i+1,j)}{2}\right) + \frac{1}{\operatorname{Re}\Delta Y} \right] \Delta X \end{aligned}$$

$$(f \ 1-\Delta) \\ a_{V}(i-1,j) &= \left[ \max\left(0, \frac{G^{*}(i-1,j) + G^{*}(i+1,j)}{2}\right) + \frac{1}{\operatorname{Re}\Delta Y} \right] \Delta X \end{aligned}$$

نکتهای که برای حل معادلات سرعت وجود دارد این است که این معادلات تا ستون ماقبل آخر یعنی یک ستون قبل از خروجی حل می شود و برای ستون آخر از بالانس جرمی استفاده می کنیم. اگر کانال

$$u(:,M) = u(:,M-1) * \frac{\dot{M}_{in}}{\dot{M}_{out}}$$
 استون داشته باشد رابطهی بالانس جرمی بدین صورت است: M ستون داشته ا

۵-۶-معرفی الگوریتم سیمپل برای حل معادلات مومنتوم

در الگوریتم سیمپل از سرعتهای بدست آمده از معادلات مومنتوم استفاده میکنیم:

$$u^{*}(i, j+1) = \frac{\sum_{n}^{u} u_{n}^{*}}{a_{U}(i, j+1)} - \frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta Y}{a_{U}(i, j+1)} \Delta P^{*} + \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \left(\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}\right)_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{u}{dr,k}(i, j+1)\right)}{a_{U}(i, j+1)} \Delta X \Delta Y$$

$$v^{*}(i+1,j) = \frac{\sum_{n=n}^{V} \Delta X}{a_{U}(i+1,j)} - \frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta X}{a_{V}(i+1,j)} \Delta P^{*} + \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j) \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j)\right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i+1,j)}$$

در الگوریتم سیمپل اولین جمله از طرف راست معادله حذف می شود و نیز سرعتهای بی بعد را به صورت حاصلجمع سرعت اولیه و تصحیح سرعت در نظر می گیریم یعنی  $u^* = u'^* + u_0^*$  و نیز روابط  $u'^*$  هم دقیقا مشابه معادلات (۵–۴۲) و (۴۳–۵) هستند. لذا داریم:

$$u^{*}(i, j+1) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta Y}{a_{U}(i, j+1)} \left( P^{r^{*}}(i, j) - P^{r^{*}}(i, j+2) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m} \right)_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{1}{a_{r,k}}(i, j+1) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{U}(i, j+1)} + u_{0}^{*}(i, j+1)$$

$$(ff-\Delta)$$

$$v^{*}(i+1,j) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta X}{a_{V}(i+1,j)} \left( P^{*}(i,j) - P^{*}(i+2,j) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j) \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i+1,j)} + v_{0}^{*}(i+1,j)$$

اینک نوبت گسستهسازی معادلهی پیوستگی میباشد:

(۴۶-۵) 
$$\iint_{\partial x} \left\{ \frac{\partial \left(\rho_m u_m^*\right)}{\partial x^*} + \frac{\partial \left(\rho_m v_m^*\right)}{\partial y^*} \right\} dx dy = 0$$

$$\begin{bmatrix} u_m^*(\mathbf{i}, \mathbf{j}+\mathbf{1}) - u_m^*(\mathbf{i}, \mathbf{j}-\mathbf{1}) \right] \Delta Y + \begin{bmatrix} v_m^*(\mathbf{i}+\mathbf{1}, \mathbf{j}) - u_m^*(\mathbf{i}-\mathbf{1}, \mathbf{j}) \right] \Delta X = 0$$
(۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-۵) (۴۷-1) (۲0-1) (10-1)

$$\begin{split} & A_{p}^{A}(i, j) P'(i, j) = \stackrel{A}{P}(i, j) P'(i + 2, j) + \stackrel{A}{P}(i, j) P'(i - 2, j) + \\ & \stackrel{A}{P}(i, j) P'(i, j + 2) + \stackrel{A}{P}(i, j) P'(i, j - 2) + B_{p}(i, j) \\ & A_{p}(i, j) = \stackrel{N}{\frac{Da}{p}(i, j) + \stackrel{A}{p}(i, j) + \stackrel{E}{A}(i, j) + \stackrel{K}{P}(i, j) + \stackrel{M}{P}(i, j) \\ & A_{p}(i, j) = \frac{Da}{\frac{Da}{p}(i, j) + \stackrel{A}{p}(i, j) + \stackrel{K}{A}(i, j) + \stackrel{K}{P}(i, j) \\ & A_{p}^{N}(i, j) = \frac{Da}{\frac{Da}{q} + Re_{final}} \frac{\Delta X^{2}}{a_{V}(i + 1, j)} & A_{p}^{S}(i, j) = \frac{Da^{*} Re_{final}}{a_{V}(i - 1, j)} \frac{\Delta X^{2}}{a_{V}(i, j - 1)} \\ & A_{p}^{N}(2N; i) = 0 & A_{p}^{S}(2; i) = 0 \\ & A_{p}^{N}(2N; i) = 0 & A_{p}^{S}(2; i) = 0 \\ & A_{p}^{P}(i, j) = \left[ \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i, j - 1) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i, j - 1) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{U}(i, j - 1)} \right] \Delta Y \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i, j + 1) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i, j + 1) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{U}(i, j + 1)} \right] \Delta Y \\ & + \left[ \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i - 1, j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i, j + 1)} \right] \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \stackrel{u}{d}_{d',k}(i - 1, j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i - 1, j)} \right] \Delta X \\ & + \left[ \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \stackrel{u}{d}_{d',k}(i + 1, j) \stackrel{v}{d}_{d',k}(i + 1, j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i - 1, j)} \right] \Delta X \\ & + \left[ \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \stackrel{u}{d}_{d',k}(i + 1, j) \stackrel{v}{d}_{d',k}(i + 1, j)} \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i - 1, j) - v_{0}^{*}(i + 1, j)} \right] \Delta X \end{aligned} \right]$$

(۴۸-۵)

نکتهی مهمی که در حل این معادلات وجود دارد این است که در مجاورت دیـوارهی بـالای، پـایینی، ورودی و خروجی باید ضریب جملهای که تصحیح فشار خارج کانال را درگیر میکند صفر شود که این نکته در معادلات (۵-۴۸) آورده شده است.

با حل این معادلهی بسیار مهم، ماتریس تصحیح فشار بدست می آید، سپس با ضرب کردن ضریبی به

نام آرامش یا ریلکسیشن<sup>۱</sup> این مقدار حاصل شده با مقادیر حدس اولیهای که برای فشار درنظر گرفته شده جمع می شود و ماتریس مقادیر اصلی فشار بدست می آید:

$$P(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = P^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}) + rf_{p'}P'(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \qquad rf_{p'}: relaxation \quad factor \qquad (\$9-\Delta)$$
$$0 < rf_{p'} < 1$$

با بدست آمدن این مقادیر و استفاده از معادلهی (۵-۴۹) و (۵-۴۵) مقادیر سرعتها نیز بدست میآید. در این قسمت، با استفاده از سرعتهای این مرحله و سرعتهای تکرار قبل میتوانیم سرعتهای متعادل شده و نهایی را بدست آوریم که به عنوان حدس اولیه برای تکرار بعد استفاده میشود. لازم به ذکر است که اگر در تکرار اول الگوریتم باشیم با استفاده از حدس اولیههای درنظر گرفته شده (به جای مقادیر تکرار قبل) از این فرمول استفاده می کنیم. در ادامه این فرمول آمده است:

$$u(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1) = rf_{u}u^{<}(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1) + (1 - rf_{u})u^{<}(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1)$$

$$rf_{u} : relaxation \quad factor \quad for \quad u \quad 0 < rf_{u} < 1$$

$$(\Delta \cdot -\Delta)$$

$$v(i+1, j) = rf_v v^{\langle n \rangle \rangle}(i+1, j) + (1 - rf_v) v^{\langle n-1 \rangle \rangle}(i+1, j)$$

$$rf_v : relaxation \quad factor \quad for \quad v \quad 0 < rf_v < 1$$

$$(\Delta 1 - \Delta)$$

حالا نوبت چک کردن معیار همگرایی است. اگر این معیار ارضاء شد الگوریتم تمام میشود در غیر اینصورت تا ارضای آن، حلقهی الگوریتم سیمپل، که خروجی آن توزیع سرعت و فشار است، ادامه مییابد. معیار همگرایی این حلقه کوچک شدن بزرگترین درایه از ماتریس تصحیح فشار است. هر چقدر بزرگترین مقدار تصحیح کوچک شود یعنی اینکه سرعتها به مقدار درست خود نزدیک شدهاند و جوابها همگرایی لازم را پیدا کرده اند. فلوچارت الگوریتم سیمپل را در زیر مشاهده می شود:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Relaxation



شكل ۵-۴فلوچارت الگوريتم سيمپل

# ۵-۷-گسستهسازی و حل معادلهی انرژی

در قسمتهای قبل فرم بیبعد معادلهی انرژی برای نانوسیال در محیط متخلخل بدست آمد و به دلیل اهمیت این معادلات در گسستهسازی، دوباره این فرم بیبعد انرژی آورده می شود و کار دنبال می شود.

$$\frac{M_{m}^{*}}{\rho_{f}C_{p,f}}\frac{\partial\theta}{\partial x^{*}} + \frac{N_{m}^{*}}{\rho_{f}C_{p,f}}\frac{\partial\theta}{\partial y^{*}} = \beta \left(\frac{\partial^{2}\theta}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^{2}T}{\partial y^{*2}}\right) \qquad (\Delta \Upsilon - \Delta)$$

$$\beta = \frac{k_{final}}{k_{f}}\frac{1}{Pe}$$

$$k_{final} = \frac{k_{porous}^{m}}{\varepsilon} \qquad k_{porous}^{m} = \frac{f}{\varphi}k_{porous}^{f} + \frac{\rho}{\varphi}k_{porous}^{p}$$

$$k_{forous}^{f} = \varepsilon k_{f} + (1 - \varepsilon) k_{s} \qquad k_{porous}^{p} = \varepsilon k_{p} + (1 - \varepsilon) k_{p}$$

$$M_{m} = \left(\rho C_{p}\varphi\right)_{p} u_{p} + \left(\rho C_{p}\varphi\right)_{f} u_{f}$$

$$N_{m} = \left(\rho C_{p}\varphi\right)_{p} v_{p} + \left(\rho C_{p}\varphi\right)_{f} v_{f}$$

$$M_{m}^{*} = \frac{M_{m}^{m}}{U_{in}} \qquad \& \qquad N_{m}^{*} = \frac{N_{m}^{*}}{\rho_{f}C_{p,f}}$$

برای سادگی و با توجه به روابطی که داشتیم خواهیم داشت:

فرم بيبعد انرژي:

$$\frac{\partial}{\partial x^{*}} \left( M_{m}^{\prime *} \cdot \theta - \beta \frac{\partial \theta}{\partial x^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial y^{*}} \left( N_{m}^{\prime *} \cdot \theta - \beta \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y^{*}} \right) = 0$$
 ( $\Delta \Upsilon - \Delta$ )

در مورد معادلهی انرژی از گرید یکجا استفاده می شود و از فرم بی بعد در محدودهی مشخص شده در شکل زیر انتگرال گیری می شود و در نهایت پس از ساده سازی های مرسوم معادله ی انرژی در فرم گسسته شده ی ضرایب به صورت زیر نوشته می شود:



شکل ۵-۵ گرید یکجا در حل حرارتی و گرههای مجاور مورد نیاز در گسستهسازی و سطوح مهم در گسستهسازی

در معادلهی زیر دماهای بیبعد بر اساس شکل ۵-۵ نامگذاری شده است و پارمترهای R که با اندیس-های متناظر با دماهای بیبعد نامگذاری شدهاند در واقع ضرایب این دماهای بیبعد هستند که از گسستهسازی بدست آمدهاند و صرفا جهت سادهسازی و مرتبنویسی نوشته شده اند.

$$\begin{aligned} R_{P}\theta_{P} &= R_{W}\theta_{W} + R_{N}\theta_{N} + R_{S}\theta_{S} + R_{E}\theta_{E} \qquad (\Delta \$ - \Delta) \\ R_{P} &= \left( \max(0, M_{m}^{\prime *}|_{x2}) + \max(0, -M_{m}^{\prime *}|_{x1}) + \frac{2\beta}{\Delta X} \right) \Delta Y + \\ &\left( \max(0, N_{m}^{\prime *}|_{y4}) + \max(0, -N_{m}^{\prime *}|_{y3}) + \frac{2\beta}{\Delta Y} \right) \Delta X \\ R_{E} &= \left( \max(0, -M_{m}^{\prime *}|_{x2}) + \frac{\beta}{\Delta X} \right) \Delta Y \\ R_{W} &= \left( \max(0, M_{m}^{\prime *}|_{x1}) + \frac{\beta}{\Delta X} \right) \Delta Y \\ R_{N} &= \left( \max(0, -N_{m}^{\prime *}|_{y4}) + \frac{\beta}{\Delta Y} \right) \Delta X \\ R_{S} &= \left( \max(0, N_{m}^{\prime *}|_{y3}) + \frac{\beta}{\Delta Y} \right) \Delta X \end{aligned}$$

#### ۵-۸-نحوهی محاسبهی ناسلت

برای استخراج فرمول ناسلت از دو رویکرد می توان استفاده کرد: ۱) نوشتن فرمول انتقال حرارت جابجایی بر اساس اختلاف دمای دیواره با دمای بالک<sup>۱</sup> ۲) نوشتن فرمول انتقال حرارت جابجایی بر اساس اختلاف دمای دیواره با دمای ورودی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Bulk temperature

بر اساس هر دو رویکرد فرمول ناسلت استخراج میشود. لازم بـه ذکـر اسـت قطـر هیـدرولیک کانـال صفحات موازی با عمق نامحدود برابر با دو برابر عرض کانال است یعنی D<sub>hy</sub> =2H

$$q_{convection}^{"} = h(T_{w} - T_{bulk}) \qquad \& \qquad q_{conduction}^{"} = -k \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{convection}^{"} = q_{conduction}^{"}$$

$$Nu = \frac{h}{k} D_{hy} = -\frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{(T_{w} - T_{bulk})} \cdot 2H$$

$$Nu_{local} = -2\frac{(\partial \theta / \partial y^{*})}{(1 - \theta_{bulk})}$$

و اگر رویکرد دوم مدنظر باشد :

$$q_{convection}^{"} = h(T_{w} - T_{in}) \quad \& \quad q_{conduction}^{"} = -k \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{convection}^{"} = q_{conduction}^{"}$$

$$Nu = \frac{h}{k} D_{hy} = -\frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{(T_{w} - T_{in})} 2H$$

$$Nu_{local} = -2(\partial \theta / \partial y^{*})$$

$$(\Delta F - \Delta)$$

برای دمای بالک هم فرمول زیر استفاده شدهاست:

$$T_{bulk} = \frac{\iint TudA}{\iint udA}$$
( $\Delta Y-\Delta$ )

و برای ناسلت میانگین، ضریب جابجایی محلی و میانگین داریم :

$$Nu_{average} = \frac{\int Nu_{local} dx^{*}}{\int dx^{*}}$$
 ( $\Delta \Lambda - \Delta$ )

$$h_{local} = \frac{Nu_{local}k}{D_{hy}} \qquad h_{average} = \frac{Nu_{average}k}{D_{hy}}$$
(29-2)

# ۶-نتایج و گزارشات

# ۶-۱- بحث استقلال حل عددی از مشبندی

در هر حل عددی یک وجه از معتبر بودن کد نوشته شده این است که اطمینان حاصل شود که حل وابسته به تراکم مشبندی نیست. در مورد کد حل عددی این پایاننامه هم این مطلب صادق است و در قالب نمودار زیر این اطمینان از صحت کد نوشته حاصل می گردد. عدد ناسلت بر اساس رویکرد اول گزارش شدهاست:



نمودار استقلال ناسلت محلی از تراکم مش بندی

شکل ۶-۴ نمودار استقلال ناسلت از تراکم مش بندی

عدد ناسلت	تراکم مش	تعداد مش	تعداد مش افقی
ميانگين		عمودى	
٨/٢۴٨	۱۲۰۰	١٢	۱۵۰
٨/١٩٧	240.	١۴	١٧۵
٨/٠٩٣	۳۲۰۰	18	۲۰۰
٧/٩٧٣	۴۰۵۰	١٨	222
٧/٩٣۶	۵۰۰۰	۲.	۲۵۰
۷/۹۲۸	٨٤٥٠	۲۶	۳۲۵
٧/٩٢۶	1170.	٣.	۳۷۵
٧/٩٢۵۴	۵۱۲۰۰	54	٨٠٠
V/97۵88	۶۴۸۰۰	۷۲	٩٠٠
٧/٩٢۵٢٨	٨	٨٠	۱۰۰۰
٧/٩٢۵١٩	٩۶٨٠٠	٨٨	))
٧/٩٢۵١١	1107	٩ <i>۶</i>	17

جدول ۶-۱ افزایش تراکم مش در یک نسبت ابعادی ثابت برای مطالعهی استقلال حل عددی از تراکم مش برای رینولدز ۱۰۰

با توجه به نمودار قبل از تراکم مش ۱۱۲۵۰ و به بعد ناسلت دارای کمترین خطا و از تراکم ۵۰۰۰ و به بعد درصد خطا کمتر از ۱ درصد میباشد.

به عنوان پارامتر مهم دیگری که در مطالعهی مش وجود دارد از نسبت ابعادی مش میتوان نام برد که بهترین نسبت ابعادی برای مشها در یک حل عددی نسبت ۱ (یا مش مربعی) تا ۴ است که گاهی به دلیل ابعادی هندسهی کار (دراینجا برای کانال از نسبت طول به عرض از نسبت ۱۰۰ به ۱ استفاده شده است) استفاده از بهترین نسبت مش مستلزم ایجاد تراکمهای خیلی بالا و به طبع آن حل طولانی است. در این قسمت با ترسیم نمودار ناسلت میانگین برای دو نسبت ۴ و ۸ نشان داده میشود که خطای استفاده از نسبت ۸ با توجه به کاهش تراکم مشبندی و کوتاهتر شدن حل خطای معقولی است و لذا از نسبت ۸ در این پایان نامه استفاده شده است.



ناسلت میانگین بر حسب تراکم مش برای دونسبت ابعادی مختلف

شکل ۶-۲ بررسی تاثیر نسبت ابعادی روی ناسلت میانگین برای دو نسبت ۴ و ۸

همانطور که در شکل ۶-۲ مشاهده می گردد اختلاف نتایج برای دو نسبت عددی ۴ و ۸ اندک می باشد که با افزایش اندکی در تراکم مش این مقدار اندک، کمتر نیز خواهد شد. در نمودار بعدی که به نمودار نرخ همگرایی معروف است روی تاثیر تراکم مش تحقیق شده است. این نمودار در واقع نشان دهنده یمرتبه یه مگرایی است. محور افقی این نمودار لگاریتم در مبنی ۱۰ از تراکم مش است و محور عمودی آن لگاریتم در مبنای ۱۰ از خطای ناسلت میانگین است. این خطا در واقع اختلاف مقادیر بدست آمده ی عددی برای ناسلت توسعه یافته یکانال از مقدار دقیقی است که در مرجع [۸۶] ذکر شده است که مقدار آن ۲/۵۴ می باشد.



شکل ۶-۳ نرخ همگرایی برای ناسلت توسعه یافته از کد عددی

همانطور که در نمودار شکل ۶-۳ مشاهده می شود با افزایش تراکم مش مرتبهی بزرگی خطا کاهش پیدا می کند.

#### ۶–۲–معتبر سازی نتایج پایاننامه

در این قسمت هر دو کد پایاننامه که با رویکرد اول و نیز دوم نوشته شدهاست معتبر سازی خواهدشد. برای رویکرد اول معتبر سازی برای کانال بدون محیط متخلخل و سیال آب خالص و با استفاده از نتیجهی کارهای عددی کالته و همکارانش<sup>۱</sup> [۶۹] و عبادیان و دانگ<sup>۲</sup> [۷۰] و نیز مقدار دقیق در کتاب کیز<sup>۳</sup> [۷۱] انجام شدهاست و برای رویکرد دوم، معتبرسازی با استفاده از نتایج کار سانترا و همکارانش [۶۲] انجام شدهاست. لازم به ذکر است همه جا عدد رینولدز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است مگر مقدار دیگری برای آن ذکر شده باشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Kalteh 2011

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ebadian and Dong 1998

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kays and Crawford 1993

### ۶-۲-۱-معتبرسازی نتایج با فرمول رویکرد اول برای ناسلت

جدول زیر با فرضیات آب خالص (درصد حجمی صفر) در کانال بدون محیط متخلخل میباشد و ناسلت تحت این شرایط با ناسلت کارهای کالته و همکارانش [۶۹] و عبادیان و دانگ [۷۰] و کیز [۷۱] مقایسه شده و درصد خطای نسبی برای هر مقایسه ارائه می گردد.

جدول ۶-۲معتبرسازی نتایج برای سیال آب خالص و کانال بدون محیط متخلخل و فرمول بندی اول برای ناسلت

درصد	درصد	درصد	ناسلت	ناسلت کار	ناسلت کار	ناسلت	عدد
خطای	خطای	خطای	دقیق در	عباديان و	كالته و	پاياننامە	رينولدز
نسبى	نسبی کار	نسبی کار	كتاب	دانگ	همكارانش		
پايان-	عباديان و	كالته و	كيز	[ү.]	[۶٩]		
نامه با	دانگ	همكارانش	[٧١]				
مقادير	[۲۰] با	[۶۹] با					
دقيق	مقادير	مقادير					
كتاب	دقيق	دقيق					
کيز							
•/٣٩	•/7۶	•/۴٨	۷/۷۲	४/४٣٩	٧/٧۵۶	४/४۴٩	۵۰
•/10	•/١٣	•	V/97F	٧/٩٣۴	٧/٩٢۴	٧/٩٣۶	۱۰۰
•/•٧۴	١/٩٢	١/٨١	٩/۴٧	٩/٢٨٨	९/४९९	٩/۴٧٧	۵۰۰
4/99	4/18	۲/۳۲	11/1	۱۰/۶۳۸	۱۰/۸۴۳	11/817	۱۰۰۰

نمودار این نتایج در شکل ۶-۴ مشاهده می شود.



شکل ۶-۴ نمودار معتبر سازی ناسلت میانگین کانال بدون محیط متخلخل سیال آب خالص (درصد حجمی صفر) به ازای رینولدزهای متفاوت محدودهی جریان آرام با کارهای و کالته و همکارانش [۶۹] و عبادیان و دانگ [۷۰]

#### ۲-۶-۲-۲-معتبر سازی نتایج بافرمول رویکرد دوم برای ناسلت

عدد ناسلت میانگین کانال با رویکرد دوم برابر با ۲/۴۱ بوده است و کلیهی افزایشها نسبت به این مقدار گزارش شدهاست.

درصد حجمی	ناسلت میانگین کانال با	درصد افزایش ناسلت	درصد افزایش ناسلت
	رويکرد دوم	در پایان نامه	گزارش شده توسط
			سانترا و همکارانش
			[87]
•/۵	۲/7۴	٣/٣٢	۲/۳۴
١	۲/۵3	$\Delta/\Lambda \Upsilon$	۴/۵۷
۱/۵	۲/۵7	٧/۴٧	۶/۷۱
٢	۲/82	٩/١٣	٨/٧۴
۲/۵	۲/86	11/29	۱۰/۶۸
٣	۲/۷1	۱۳/۲۸	17/87
٣/۵	۲/۷5	10/•7	14/20
¢	۲/79	18/8.	10/94
۴/۵	۲/٨3	۱۸/۲۶	۱۷/۵۲
۵	۲/۸7	19/97	۱٩/٠٢

جدول ۶-۳ معتبرسازی نتایج پایاننامه با کار سانترا و همکارانش[۶۲]

در زیر این نتایج در قالب نمودار آمدهاست.



شکل ۶-۵ معتبر سازی با استفاده از نتایج کار سانترا و همکارانش [۶۲]

#### ۶–۲–۳–معتبرسازی نتایج پایاننامه با استفاده از طول ورودی

طول ورودی، طولی است که سرعت جریان به مقدار بیشینهی خود برسد که طبق فصل ۸ از مرجع [۲۲] یا کتاب سیالات فاکس برای کانال با صفحات موازی و ساکن این مقدار ۱/۵ برابر سرعت متوسط است و طبق حل عددی بدست آمده سرعت متوسط بیبعد در هر مقطع دارای مقدار ۱ است لذا مقدار سرعت بی بعد بیشینه ۱/۵ خواهد بود. برای محاسبهی طول از ابتدای ورودی جریان تا ابتدای توسعه یافتگی از رابطهی زیر که از مرجع [۷۳] گرفته شده استفاده می شود:

$$\frac{x}{D_{hydrolic}} = 0.063 \operatorname{Re}$$
  $D_{hydrolic} = 2H \rightarrow \frac{x}{H} = x^* = 0.126 \operatorname{Re}$  (۱-۶)  
رابطهی بالا بیبعد بوده و برای ارتباط بین طول و شمارهی گره خواهیم داشت:  
 $x^* = m\Delta x^*$  (۲-۶)  
که m شمارهی گره است که توسعه یافتگی در آن رخ میدهد.با توجه به مقدار \*  $\Delta x$  شـمارهی گـره  
توسعه یافته از رابطهی زیر قابل محاسبه خواهد بود:  
 $n = 0.315 \operatorname{Re}$  (۳-۶)

در جدول زیر شماره گره توسعه یافته از فرمول با شماره نود توسعه یافته از حل عددی با هم مقایسه شده اند.

شمارهی نود توسعه یافته	شمارهی نود توسعه یافته	عدد رينولدز			
حاصل از حل عددی	حاصل از فرمول	Re			
٣٢	٣١/۵	١			
87	۶۳	۲۰۰			
٩۵	٩۴/۵	۳			
١٢٢	178	۴			
۱۵۸	۱۵۷/۵	۵۰۰			

جدول ۶-۴معتبر سازی نتایج از طریق محاسبهی طول ورودی برای سیال خالص (یا درصد حجمی صفر برای نانوذرات) در کانال بدون محیط متخلخل

در شکل ۶-۶ سرعتهای افقی محور مرکزی به ازای اعداد رینولدز مختلف آورده شدهاست.



شکل ۶-۶ سرعت محور مرکزی کانال برای معتبرسازی با استفاده از فرمول طول ورودی

# ۶–۳-نتایج نانوسیال در برابر آب خالص و در کانــال بــدون محــیط متخلخل

در این قسمت کانال بدون محیط متخلخل با نانوسیال پر شده و تاثیر آن بر روی ناسلت و توزیع سرعت و فشار بیبعد در کانال بررسی می شود. لازم به ذکر است که در ارائه ی نتایج حرارتی برای ناسلت از دیدگاه دوم استفاده شده است.



شکل ۶-۲ درصد افزایش ناسلت نانوسیال دوفاز در کانال بدون محیط متخلخل به ازای درصد حجمیهای مختلف

در شکل ۶-۷ درصد افزایش ناسلت در عدد رینولدز ۱۰۰ و به ازای تغییرات درصدحجمی از ۸/۰٪ تا ۵٪ گزارش شدهاست. ملاحظه میشود که افزایش درصد حجمی، از یک سو موجب افزایش ناسلت شده و از سوی دیگر درصد افزایش ناسلت محلی نسبت به آب خالص برای مدل دوفاز بیشتر از مدل تکفاز میباشد نسبت به آب خالص نیز افزایش مییابد. این افزایش به دلیل این است که با افزایش درصد حجمی نانوذرات جامد که از جنس مس میباشد خواص حرارتی مخلوط بیش از پیش بهبود مییابد که این مطلب از روی فرمولهای خواص حرارتی نانوسیال قابل تشخیص میباشد.



شکل ۶-۸ تغییرات ناسلت محلی آب خالص و نانوسیال دوفاز به ازای درصد حجمی ذرات جامد

در شکل ۶-۸ تغییرات ناسلت محلی در راستای افقی کانال، برای عدد رینولدز ۱۰۰ و به ازای تغییرات درصد حجمی نانوذرات و نسبت به ناسلت محلی آب خالص نشان داده شدهاست. مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی نانوذرات با بهبود خواص حرارتی مخلوط نانوسیال موجب افزایش ناسلت محلی می شود که بیشترین افزایش به ازای درصد حجمی ۵٪ رخ داده است. هدف از این نمودار نشان دادن تاثیر مثبت افزایش درصد حجمی نانوذرات بر روی ناسلت محلی می باشد.



شماره ی نود افقی

شکل ۶-۹ سرعت افقی محور مرکزی کانال به ازای تغییرات درصد حجمی نانوذرات

در شکل ۶-۹ نمودار سرعت افقی محور مرکزی در راستای طولی کانال و برای درصد حجمی های مختلف نسبت به آب خالص نشان داده شده است. مشاهده میشود که افزایش درصد حجمی نانوذرات باعث کاهش در سرعت محور مرکزی کانال شدهاست که از لحاظ فرمولی دلیل این امر وجود ترم منبع در سمت راست معادلهی مومنتوم میباشد. برای توضیح بیشتر میتوان گفت دلیل این امر مقدار منفی این ترم میباشد که دلیل آن را اینگونه میتوان بیان کرد که مقادیر سرعت مخلوط نسبت به مقادیر سرعت ذرات اندکی کمترند که هرچه درصدحجمی نانوذرات بیشتر باشد این اختلاف بیشتر میشود (سرعت سیال پایه با سرعت مخلوط تقریبا در اکثر نقاط برابر است.) که این نکته سبب منفی شدن سرعت رانش مخلوط نانوسیال میگردد لذا مقدار منفی ترم منبع سبب کاهش سرعت به ازای افزایش درصد حجمی میگردد. البته لازم به ذکر است این کاهش در سرعت مرکزی همانند کاهش این پروفیل به ازای حضور محیط متخلخل نیست و نسبت به آن خفیفتر میباشد. حتی برای نم ودار پروفیل سرعت مقطعی هم با افزایش درصد حجمی نانوذرات کاهش اندکی اتفاق میافتد ولی این کاهش همانند کاهش در بیشینهی پروفیل سرعت مقطعی (شکل ۶–۱۹) برای محیط متخلخل نمی-باشد و به طور محسوسی کمتر است و هم اینکه شکل کلی پروفیل تحت تاثیر قرار نمیگیرد.



شکل ۶-۱۰ پروفیل سرعت توسعه یافته در یک مقطع عمودی از کانال به ازای تغییرات درصد حجمی نانوذرات

در شکل ۶-۱۰ پروفیل سرعت در یک مقطع دارای جریان توسعه و به ازای عدد رینولدز ۱۰۰ و برای درصد حجمیهای ۱٪، ۳٪ و ۵٪ نشان داده شده است. هدف از این شکل نشان دادن تاثیر وجود نانوذرات و نیز تاثیر افزایش مقدار آنها نسبت به سیال خالص میباشد. همانطور که قبلا هم گفته شد وجود نانوذرات باعث کاهش جزئی در مقادیر سرعت میگردد. با افزایش درصد حجمی نانوذرات، مقادیر بیشینهی سرعت نسبت به سیال خالص دچار افت میشود.



شکل ۶-۱۱ توزیع فشار متوسط بی بعد در کانال حاوی نانوسیال دوفاز به ازای تغییرات درصد حجمی

در شکل ۶-۱۱ مطلب مهم دیگری با عنوان توزیع فشار متوسط برای کانال نشان داده شده است. مقادیر توزیع فشار برای راستای طولی کانال و به ازای تغییرات درصد حجمی گزارش شده است. مشاهده می گردد با افزایش درصد حجمی نانوذرات، توزیع فشار متوسط کانال کاهش مییابد که نشان دهندهی ایجاد افت فشار میباشد. در واقع هدف از این شکل این است نشان دادن این مطلب است که افزایش درصد حجمی نانوذرات سبب کاهش توزیع فشار و افزایش بیشتر افت فشار می گردد. در ایس حالت کانال به ازای درصد حجمیهای ۱ و ۳ و ۵ درصد برای نانوذرات به ترتیب مقادیر ۲۱/۶۶ ۳۴/۴۵ و ۴۸/۶۱ درصد افت فشار را نسبت به سیال خالص تجربه می کند.

در این قسمت به عنوان نمونه و برای مقایسهی بیشتر، برای یک مخلوط نانوسیال با درصد حجمیی ۱

درصد برای نانوذرات، سرعتهای رانش برای سیال پایه و ذرات و نیز سرعت لغزش آورده می شود تا مقادیر این سرعتها آشکار شود. ابتدا از نمودار سرعت رانش برای ذرات آغاز می کنیم.



سرعت رانش ذرات برای درصد حجمی ۱ درصد و رینولدز ۱۰۰

شکل ۶-۱۲ سرعت رانش برای ذرات در راستای طولی کانال فاقد محیط متخلخل و برای محور مرکزی

همانطور که در شکل ۶-۱۲ مشاهده می گردد مقادیر سرعت رانش برای ذرات منفی گزارش شده و مرتبهی بزرگی آنها از E-02 تجاوز نمی کند. منفی بودن این سرعت رانش نشان دهندهی آن است که در ورودی کانال سرعت ذرات کمتر از سرعت مخلوط است که در امتداد جریان و با توسعه یافتگی و با توجه به اینکه ذرات فاقد بار الکتریکی هستند، سرعت ذرات با مخلوط یکسان می شود. با اینکه مقادیر این سرعت لغزش اندک است اما مخالف صفر است که وجود همین اختلاف اندک بین سرعت نانوذرات و مخلوط که به دلایلی همچون خاصیت پخش براونی ذرات می باشد منجر به تبادل مومنتوم که با تبادل حرارت همراه است در لایهی مرزی می شود. این خاصیت به همراه تمایل نانوذرات به جذب گرما منجر به کاهش ویسکوزیتهی سیال در لایهی مرزی می گردد که این موضوع دلیل اصلی افزایش ضرایب انتقال حرارت برای نانوسیال می باشد. در نمودار بعدی سرعت رانش سیال پایه که



شکل ۶-۱۳ سرعت رانش برای فاز سیال پایه (آب خالص) در مخلوط نانوسیال ۱ درصد و برای رینولدز ۱۰۰

همانطور که در شکل ۶-۱۳ مشاهده می گردد مقادیر سرعت رانش برای سیال پایه مثبت است که با توجه به این مطلب که سرعت ذرات در ورودی کمتر از سیال مخلوط گزارش شد، انتظار می فت که سرعت سیال پایه بیشتر از سرعت مخلوط باشد. همانطور که مشاهده می گردد مرتبه یبزرگی سرعت-ها برای سرعت رانش از E-02 تجاوز نمی کند که باز هم نشان دهنده ی وجود اختلاف هرچند اندک بین سرعت سیال و مخلوط است. در نمودار بعدی اختلاف سرعت بین هر یک از فازها یا همان سرعت لغزش که اختلاف سرعت بین فاز ذرات و سیال پایه می باشد، گزارش شده است.



شکل ۶-۴ سرعت لغزش یا تفاضل سرعت فاز ذرات و فاز سیال پایه برای درصد حجمی ۱ درصد

همانطور که در شکل ۶-۱۴ مشاهده می گردد سرعت لغزش منفی است و دلیل این مطلب هـم کـم بودن سرعت ذرات از سرعت سیال پایه در ابتدای جریان است. همانطور که مشاهده می گردد مرتبه ی بزرگی این سرعت 20-E می باشد. درانتهای بررسی سرعتهای لغزش و رانش، لازم به ذکر است کـه سرعت ذرات و سیال در ابتدای جریان دارای اختلاف با هم و با سرعت مخلوط نانوسیال هستند اما بـا ایجاد توسعه یافتگی این اختلافات بسیار اندک شده و به صفر میل می کند. وجود اختلاف سرعت بین فازها نشان دهنده ی این موضوع است که کاربرد مدل دوفاز برای نانوسیال به جـای مـدل تکفاز، کـه سرعت فازها با مخلوط را در کل محدوده یکسان در نظر می گیرد، درست بوده است.

### ۶-۴-نتایج حالت حدی برای نانوسیال

در این قسمت نتایج برای حالت حدی نانوسیال نشان داده میشود. در حالت حدی مقدار درصد حجمی نانوذرات صفر در نظر گرفته میشود و نشان داده میشود که نتایج نانوسیال با درصد حجمی صفر برای نانوذرات، با نتایج آب خالص تطابق خوبی دارد.



شکل ۶-۱۵ سرعت محور مرکزی برای سیال خالص و نانوسیال به ازای درصد حجمی صفر برای نانوذرات در رینولدز ۱۰۰

در شکل ۶-۱۵ تطابق سرعت محور مرکزی برای نانوسیال با درصد حجمی صفر بـرای نـانوذرات و آب خالص نشان دهندهی این است که حالت حدی در کد عددی پایاننامه به خوبی با نتایج مورد انتظار از معادلات نانوسیال تطابق دارد. در شکل بعدی نتایج برای توزیع فشار متوسط کانال و ناسلت محلی گزارش می شود.



شکل ۶-۶ توزیع فشار نرمال برای آب خالص و نانوسیال به ازای درصد حجمی صفر برای نانوذرات برای رینولدز ۱۰۰

همانطور که در شکل ۶-۱۶ مشاهده می شود نتایج برای توزیع فشار نرمال در حالت حدی هم تط ابق خوب و مورد نظر را باتوجه به معادلات نشان می دهد.



شکل ۶-۱۷ توزیع ناسلت محلی برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی صفر برای نانوذرات

در شکل ۶-۱۷ تطابق ناسلت محلی آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی صفر به خوبی دیـده مـی-شود که این نتایج حالت حدی به نوبهی خود بر صحت کد عددی پایاننامه صحه میگذارند.

#### ۶–۵–نتایج آب خالص در کانال پر از محیط متخلخل نسبت به کانال

#### بدون محيط متخلخل

در این قسمت کانال با محیط متخلخل با تخلخل ثابت و دارسی های مختلف پر میشود و تاثیر آن بر روی سرعت و توزیع فشار نرمال کانال و ناسلت محلی سنجیده میشود.



شکل ۶-۱۸ سرعت محور مرکزی برای آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و پرشده با محیط متخلخل با ایسیلون ثابت ۵/۰ و دارسی های متفاوت

در شکل ۶-۱۸ نمودار سرعت افقی محور مرکزی در رینولدز ۱۰۰ و به ازای دارسیهای مختلف و در تخلخل ثابت ۵/۰ نشان داده شدهاست. هدف از این شکل نشان دادن تاثیر زیاد کاهش تخلخل بر روی سرعت است. مشاهده می گردد با کاهش دارسی که به معنای کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل است سرعتهای بیبعد کاهش چشم گیری پیدا کردهاند و دلیل این موضوع هم این است که با کاهش نفوذپذیری، محیط متخلخل در برابر عبور جریان از خود مقاومت بیشتری نشان میدهد.



عرض بی بعد کانال از صفر یا کف کانال تا ۱ یا دیواره ی بالایی کانال

شکل ۶-۱۹ پروفیل سرعت در یک مقطع توسعه یافته به ازای اپسیلون ثابت و برای دارسیهای مختلف

در شکل ۶-۱۹ پروفیل سرعت در یک مقطع با جریان توسعه یافته برای رینولدز ۱۰۰ و به ازای دارسیهای متفاوت و تخلخل ثابت ۰/۵ نشان داده شده است. هدف از این شکل نشان دادن تاثیر مقاومت محیط در عبور دادن جریان است. هر چه نفوذپذیری کمتر شود، سرعت جریان کمتر میشود. مشاهده می گردد پروفیل سرعت به شدت تحت تأثیر محیط متخلخل قرار گرفته است.



شکل ۶-۲۰ فشار متوسط بی بعد کانال برای آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و کانال پرشده با محیط متخلخل به ازای اپسیلون ۰/۵ و دارسیهای متفاوت

در شکل ۶-۲۰ توزیع فشار متوسط برای کانال بدون محیط متخلخل و پرشده با محیط متخلخل با تخلخل ثابت ۱/۵ و دارسی های متفاوت ۱/۱ تا ۰/۱۰۰۱ نشان داده شده است. نمودار برای رینولـدز ۱۰۰ است. مشاهده می گردد وجود محیط متخلخل در کانال سبب کاهش مقادیر نرمال فشار و افزایش افت فشار می گردد و هرچه محیط متخلخل نفوذناپذیرتر باشد یا دارسی کمتر شود افت فشار بیشتر می شود. به ازای دارسی های ۱/۱، ۱/۱، ۱/۱۰ و ۱۰۰/۱ افت فشاری به مقادیر، به ترتیب، ۱۳۸۲، ۴۵/۸۵ و ۸۸/۸۸ درصد در کانال نسبت به کانال بدون محیط متخلخل و سیال خالص ایجاد می گردد.



۰/۵ شکل ۲۱-۶ ناسلت محلی آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل و کانال پرشده با محیط متخلخل با اپسیلون و دارسی های مختلف

در شکل ۶-۲۱ ناسلت محلی کانال در عدد رینولدز ۱۰۰ و برای کانال بدون محیط متخلخل و پرشده با محیط متخلخل با تخلخل ثابت ۵/۰ و دارسیهای متفاوت در محدودهی ۱/۰ تا ۲۰۰۰/ نشان داده شده است. هدف از این شکل نشان دادن تاثیر مثبت محیط متخلخل روی افزایش انتقال حرارت می-باشد که این تاثیر مثبت ناشی از بهبود انتقال حرارت به محیط دریافت کننده یحرارت یا همان کانال است که باعث میشود حرارت بیشتری را از منبع جذب کند و در نتیجه ناسلت محلی و به تبع آن ناسلت میانگین کانال افزایش داشته باشد. مشاهده میشود که با کاهش دارسی یا به عبارت دیگر کاهش نفوذپذیری کانال، این تاثیر مثبت بیشتر بوده و ناسلت محلی افزایش مییابد

#### 8-8-نتایج کانال حاوی محیط متخلخل برای نانوسیال دوفاز

در این قسمت تاثیرات کاربرد نانوسیال و محیط متخلخل بر روی افت فشار و ناسلت سنجیده میشود و نتیجه گیری نهایی که در مورد ترکیب این دو تکنیک میباشد ارائه می گردد.



شکل ۶-۲۲ توزیع فشار متوسط بی بعد برای نانوسیال در محیط متخلخل

در شکل ۶-۲۲ توزیع فشار متوسط بیبعد در کانال برای نانوسیال دوفاز در محیط متخلخل نسبت به آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل، آب خالص در کانال متخلخل و نانوسیال در کانال بدون محیط متخلخل نشان داده شده است. این نمودار برای عدد رینولدز ۱۰۰ بوده و محیط متخلخل در این نمودار دارای تخلخل ۵/۰ و دارسی ۲۰۰۰۱ میباشد. همانطور که نشان داده شده است محیط متخلخل در ایجاد کاهش در توزیع فشار نرمال کانال، قویتر از حضور نانوذرات در نانوسیال عمل می-کند. در حضور نانوسیال ۵ درصد در کانال بدون محیط متخلخل افت فشار ۴۳/۵۶ درصد، برای سیال خالص در محیط متخلخل افت فشار ۸/۲۸ درصدی و برای نانوسیال ۵ درصد در محیط متخلخل با تخلخل ۵/۰ و دارسی ۲۰۰۰۱ افت فشار ۲۸/۶۳ درصدی و برای نانوسیال ۵ درصد در محیط متخلخل با زیاد تخلخل ۵/۰ و دارسی ۲۰۰۰۱ افت فشار ۳۵/۶۲ درصدی و برای نانوسیال ۵ درصد در محیط متخلخل با زیاد در که نشان میدهد حضور توامان نانوسیال و محیط متخلخل با هم در کانال در عین افزایش زیاد انتقال حرارت، باعث کاهش توزیع فشار نرمال یا افزایش افت فشار نیز میگردد.



شکل ۶-۲۳ نانوسیال ۵ درصد در کانال بدون محیط متخلخل و پر با محیط متخلخل با اپسیلون ۵/۰ و دارسیهای متکل ۶-۶ نانوسیال

در شکل ۶-۲۳ تاثیر ترکیب محیط متخلخل و نانوسیال را نشان میدهد. این نمودار به ازای رینولـدز ۱۰۰ و درصد حجمی ثابت ۵٪ میباشد تا تاثیر کاهش دارسی به خوبی نمایان شود. ملاحظه میشود استفاده از نانوسیال به تنهایی باعث افزایش ناسلت میشود ولـی کـاربرد محـیط متخلخـل بـه دلیـل افزایش توان حرارتی محیط هدف انتقال حرارت، باعث افزایش شار جذب شده میشـود و لـذا ناسـلت که یک معیار برای سنجش میزان تبادل حرارت است، را افزایش میدهد.



شکل ۶-۴۴ درصد افزایش ناسلت نسبت به آب خالص در کانال بدون محیط متخلخل برای درصد حجمیهای مختلف



شکل ۶-۲۵ مقدار ناسلت میانگین کانال برای نانوسیال تک فاز و دوفاز و دوفاز در محیط متخلخل به ازای درصد حجمیهای مختلف

در شکل ۶-۲۴ و شکل ۶-۲۵ یک مقایسه بین درصد افزایش ناسلت و نیز ناسلت میانگین برای نانوسیال تکفاز و دوفاز در کانال بدون محیط متخلخل و نیز برای نانوسیال دوفاز در کانال با تخلخل ۸/۰ و دارسی ۰/۰۱ انجام شده است. این مقایسه در عدد رینولدز ۱۰۰ انجام شده است. مشاهده میشود با افزایش درصد حجمی نانوذرات، مقادیر ناسلت میانگین و درصد افزایش ناسلت میانگین نسبت به سیال خالص در کانال بدون محیط متخلخل افزایش دارد که دلیل هر یک از افزایشها، هم برای نانوسیال و هم برای محیط متخلخل در شکلهای مربوط به استفادهی تکی از این تکنیکها بیان شده است.

#### ۶-۷-جمعبندی

در این پایان نامه یک کانال دوبعدی با صفحات موازی و عمق نامحدود تحت مدلسازی عددی قرار گرفت. رژیم جریان آرام و حالت پایدار فرض شده است. سیال با شرط مرزی ورودی دما ثابت و پروفیل سرعت یکنواخت وارد کانال می شود و کانال دارای شرایط مرزی دیواره ی دما ثابت است. سیال عامل در ابتدا آب خالص و سپس نانوسیال در نظر گرفته شد که این نانوسیال با مدل مخلوط دوفاز تحت مدلسازی عددی قراگرفت محیط کانال در دوحالت بدون محیط متخلخل و پر شده با محیط متخلخل بود. برای محیط متخلخل از معادله ی دارسی-برینکمن استفاده شد. تمرکز اصلی این کار بر روی نشان افزایش انتقال حرارت با استفاده از تکنیکهای به کار رفته (نانوسیال و محیط متخلخل) مشخص افزایش انتقال حرارت با استفاده از تکنیکهای به کار رفته (نانوسیال و محیط متخلخل) مشخص افزایش انتقال حرارت با استفاده از تکنیکهای به کار رفته (نانوسیال و محیط متخلخل) مشخص شده برای کانال معتبرسازی شد. معتبرسازی با ۳ روش انجام شد. در روش اول با رویکرد اول برای شده برای کانال معتبرسازی شد. معتبرسازی با ۳ روش انجام شد. در روش اول با رویکرد اول برای ناسلت، نتایج برای سیال خالص و کانال بدون محیط متخلخل با کارهای کالته و همکارانش [۶۹] و
برای نانوسیال تکفاز و کانال بدون محیط متخلخل با کار سانترا و همکارانش [۶۲] معتبرسازی شد و در نهایت هم برای معتبرسازی بیشتر حل عددی و نیز حل هیدرودینامیکی کار که مهمترین بخش حل و اساس نتایج است با استفاده از فرمول طول ورودی سیالات در کانال و محاسبه و مقایسهی آن با فرمول، معتبرسازی شد. مشاهده شد که:

- با افزایش عدد رینولدز برای سیال آب خالص و کانال بدون محیط متخلخل، عدد ناسلت میانگین کانال زیاد می شود. (شکل ۶-۵) و جدول ۶-۲))
- با کاربرد نانوسیال، ناسلت میانگین کانال افزایش پیدا می کند و این میزان افزایش به نوع مدلسازی نانوسیال بستگی دارد که این افزایش در بیشترین حالت برای هر دو مدل نانوسیال در درصد حجمی ۵٪ برای نانوذرات و به میزان ۳۵٪ برای مدل دوفاز و میزان کمتر از ۲۰٪ برای مدل تکفاز میباشد.
- مدل مخلوط دوفاز، انتقال حرارت بیشتری را نسبت به مدل تکفاز نشان میدهد که در بشترین مقدار در درصد حجمی ۵٪ به میزان ۱۵٪ افزایش بیشتری را برای ناسلت در نظر گرفته است.
- با کاربرد نانوسیال، مقدار سرعت افقی در محور مرکزی کانال و نیز بیشینهی سرعت در هرمقطع از کانال دچار کاهشی جزئی می گردند و از طرف دیگر فشار متوسط کانال کاهش و افت فشار متوسط در کانال زیاد می شود که بیشترین افزایش در افت فشار متوسط بیبعد نسبت به سیال خالص و کانال بدون محیط متخلخل در درصد حجمی ۵ و به میزان ۴۸/۶۱ برای مدل دوفاز درصد بود.
- با افزایش درصد حجمی نانوذرات، افزایش در انتقال حرارت اتفاق میافتد که این افزایش با
   کاهش اندک در سرعت و افزایش افت فشار همراه است.
- تکنیک کاربرد محیط متخلخل، به تنهایی انتقال حرارت بیشتری را نسبت به تکنیک کاربرد
   سیال عامل نانو ایجاد می کند ولی از طرفی دیگر هم افت فشار به مراتب بیشتر و کاهش

بیشتر برای سرعت در کانال را هم سبب می شود.

- با کاهش عدد دارسی میزان انتقال حرارت افزایش چشم گیری را در بر دارد بطوریکه برای نانوسیال ۵٪ در تخلخل ۵/۰ و دارسی ۲۰۰۱ و رینولدز ۱۰۰ ناسلت نسبت به ناسلت آب خالص و کانال بدون محیط متخلخل حدود ۷۸٪ درصد افزایش داشت و ضمن اینکه سرعت سیال عامل را نیز به شدت تحت تاثیر خود قرار میدهد و باعث کاهش آن می شود و همچنین نسبت به سیال خالص و کانال بدون محیط متخلخل افت فشاری به میزان ۷۸/۶۳ درصد ایجاد می کند.
- به عنوان تکنیک هدف پایاننامه ترکیب محیط متخلخل و سیال عامل نانو با مدل دوفاز تاثیر بسیار خوبی روی افزایش ناسلت دارد. (شکل ۶-۲۴ و شکل ۶-۲۵).

#### ۸-۶-پیشنهادات

این پایاننامه راه خوبی در راستای هدف افزایش انتقال حرارت طی کردهاست اما این مسیر و چالش-های آن همواره جای تلاش بیشتر را دارد. این پایان نامه میتواند دست مایه ی تمامی پژوهشگرانی باشد که علاقهمند به افزایش انتقال حرارت در یک هندسه با استفاده از نانوسیال و محیط متخلخل هستند. به عنوان بهترین کارهایی که میتوان براساس این پژوهش انجام شود باید به بهینه سازی این پژوهش اشاره کرد. باتوجه به اینکه کاربرد محیط متخلخل در عین افزایش انتقال حرارت باعث افزایش افت فشار در هندسهی کار میگردد میتوان شکل هندسه ی محیط متخلخل را تغییر داد و با امتحان انواع چیدمانها بهینه ترین حالت افزایش انتقال حرارت را پیدا کرد. به عنوان یکی دیگر از کارهایی که میتوان در ادامهی این کار انجام داد، میتوان به مدلسازی سیال عامل با استفاده از مدل اویلری اشاره کرد و تاثیر این مدل را در انتقال حرارت بررسی کرد و نیز میتوان با تغییر شرایط مرزی

۷-پيوستها

## ۷-۱-گسستهسازی و محاسبهی فرم بیبعد معادلات برای نانوسیال

## دوفاز در کانال متخلخل

برای بیان این موضوع به ارائهی روابط برای راستای افقی که مهم تر است بسنده می کنیم. در راستای عمودی مشابه راستای افقی عمل می شود.

### ۷-۱-۱-گسستهسازی مومنتوم افقی

گسستهسازی از فرم بیبعد معادلهی مومنتوم افقی شروع میشود و لذا داریم:

(1-7)

$$\begin{split} &\iint \left[ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( F^* u^* - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial x^*} \right) \right] dx \, dy = \left( F^* u^* - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial x^*} \right)_{x^{(i,j+2)}}^{x^{(i,j+2)}} \Delta Y \\ &= F^*(i, j+2) u^*(i, j+2) - F^*(i, j) u^*(i, j) - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \left( \frac{\partial}{\partial x^*} \right)_{x^{(i,j)}}^{x^{(i,j+2)}} - \frac{\partial}{\partial x^*} \left|_{(i,j)} \right) \\ &= \left\{ u^*(i, j+1) \max \left( 0, \frac{F^*(i, j+1) + F^*(i, j+3)}{2} \right) \right\} \Delta Y \\ &- \left\{ u^*(i, j+3) \max \left( 0, -\frac{F^*(i, j+1) + F^*(i, j+3)}{2} \right) \right\} \Delta Y \\ &- \left\{ u^*(i, j-1) \max \left( 0, \frac{F^*(i, j-1) + F^*(i, j+1)}{2} \right) \right\} \Delta Y \\ &+ \left\{ u^*(i, j+1) \max \left( 0, -\frac{F^*(i, j+1) + F^*(i, j-1)}{2} \right) \right\} \Delta Y \\ &- \left\{ \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \left( \frac{u^*(i, j+3) - 2u^*(i, j+1) + u^*(i, j-1)}{\Delta X} \right) \right\} \Delta Y \end{split}$$

$$\begin{split} &\iint \left[ \frac{\partial}{\partial y^*} \left( G^* u^* - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial y^*} \right) \right] dx^* dy^* \\ &= \left( G^* u^* - \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \frac{\partial}{\partial y^*} \right)_{y(i-1,j+1)}^{y(i+1,j+1)} \Delta X \\ &= G^*(i+1,j+1)u^*(i+1,j+1) - G^*(i-1,j+1)u^*(i-1,j+1) \\ &- \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \left( \frac{\partial}{\partial y^*} |_{(i+1,j+1)} - \frac{\partial}{\partial y^*} |_{(i-1,j+1)} \right) \\ &= \left\{ \frac{G^*(i+1,j) + G^*(i+1,j+2)}{2} * \frac{u^*(i+2,j+1) + u^*(i,j+1)}{2} \right\} \quad \Delta X \\ &- \left\{ \frac{G^*(i-1,j) + G^*(i-1,j+2)}{2} * \frac{u^*(i-2,j+1) + u^*(i,j+1)}{2} \right\} \quad \Delta X \\ &- \left\{ \frac{1}{\operatorname{Re}_{final}} \left( \frac{u^*(i+2,j+1) - 2u^*(i,j+1) + u^*(i-2,j+1)}{\Delta Y} \right) \right\} \quad \Delta X \end{split}$$

اکنون جملهی اول سمت راست یا همان گرادیان فشار گسسته میشود:

$$\begin{split} \iint \left[ -\varepsilon \frac{\rho_f}{\rho_m} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right] dx dy &= \left( -\varepsilon \frac{\rho_f}{\rho_m} p^* \right)_{x(i,j)}^{x(i,j+2)} \Delta Y \\ &= -\varepsilon \frac{\rho_f}{\rho_m} \left\{ p^*(\mathbf{i}, \mathbf{j}+2) - p^*(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \right\} \Delta Y \\ e \leftarrow (\mathbf{i}, \mathbf{c}, \mathbf{j}) \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= \varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left( \mathbf{j} \right)_{x(i,j)} \left\{ \mathbf{j} \right\} \\ &= -\varepsilon \left($$

$$\begin{aligned} \iint S_{u}dx^{*}dy^{*} &= \left(-\frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{final}}u^{*}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1)\right)\Delta X \ \Delta Y \ + \\ \left(\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n}\frac{\varphi_{k} \ \rho_{k}}{\rho_{m}}u_{dr,k}^{*}\left(\mathbf{i},\mathbf{j}+1\right)u_{dr,k}^{*}\left(\mathbf{i},\mathbf{j}+1\right)\right)\right)\Delta X \ \Delta Y \\ &= -\frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{final}}u^{*}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n}\frac{\varphi_{k} \ \rho_{k}}{\rho_{m}}u_{dr,k}^{*}\left(\mathbf{i},\mathbf{j}+1\right)u_{dr,k}^{*}\left(\mathbf{i},\mathbf{j}+1\right)\right)\Delta X \ \Delta Y \\ &\quad \text{ all the set of the$$

$$a_{U}(i, j+1)u^{*}(i, j+1) =$$

$$a_{U}(i, j+3)u^{*}(i, j+3) + a_{U}(i, j-1)u^{*}(i, j-1) + a_{U}(i+2, j+1)u^{*}(i+2, j+1) + a_{U}(i-2, j+1)u^{*}(i-2, j+1) - \varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \{p^{*}(i, j+2) - p^{*}(i, j)\} \Delta Y + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m})_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{u}{dr,k}(i, j+1)\right) \quad \Delta X \Delta Y$$

(Y-Y)

$$\begin{split} \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i},\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ \max\left(\mathbf{0}, \left(\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+\mathbf{l})+\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3)\right)/2\right) \right] \Delta Y \\ \left[ \max\left(\mathbf{0}, -\left(\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+\mathbf{l})+\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}-\mathbf{l})\right)/2\right) + 2/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta X\right) \right] \Delta Y \\ &+ \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}+\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}+\mathbf{l},\mathbf{j}+2)-\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})-\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 \right] \Delta X \\ &+ \left(2/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right)\right) \Delta X + \varepsilon \frac{\mathcal{P}_{f}}{\mathcal{P}_{m}} \Delta X \Delta Y \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3) &= \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}+\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}+\mathbf{l},\mathbf{j}+2)-\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})-\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 \right] \Delta X \\ &+ \left(2/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right)\right) \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i},\mathbf{j}-\mathbf{l}) &= \left[ \max\left(\mathbf{0}, \left(\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+\mathbf{l})+\overset{*}{F}(\mathbf{i},\mathbf{j}+3)\right)/2\right) + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta X\right) \right] \Delta Y \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}+2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ -\left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}+\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) &= \left[ \left(\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{a}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) = \left[ \overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) = \left[ \overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right)/4 + 1/\left(\underset{final}{\operatorname{Re}}\Delta Y\right) \right] \Delta X \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+\mathbf{l}) = \left[ \overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-\mathbf{l},\mathbf{j}+2)\right] + 1 \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}) + 1 \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}+2,\mathbf{j}) \right] \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}) \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}) = \left[ \overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j})+\overset{*}{G}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}) + 1 \\ \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}) \right] \mathbf{i}_{\mathrm{U}}(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{j}-2,\mathbf{$$

## ۲-۷-معرفی الگوریتم سیمپل برای حل معادلات مومنتوم

برای معرفی این الگوریتم بسیار مهم ابتدا سرعتهای بدست آمده از معادلات مومنتوم را مینویسیم و سپس در ادامه الگوریتم را بیان می کنیم:

$$u^{*}(i, j+1) = \frac{\sum_{n}^{U} u_{n}^{*}}{a_{U}(i, j+1)} - \frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta Y}{a_{U}(i, j+1)} \Delta P^{*}$$

$$+ \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \left(\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}\right)_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{u}{dr,k}(i, j+1)\right)}{a_{U}(i, j+1)} \Delta X \Delta Y$$

$$+ \frac{U(i, j+1)}{a_{U}(i, j+1)} \Delta X \Delta Y$$

$$v^{*}(i+1,j) = \frac{\sum_{n=n}^{N} \Delta X}{a_{v}(i+1,j)} - \frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta X}{a_{v}(i+1,j)} \Delta P^{*} + \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} v^{*}(i+1,j) v_{dr,k}^{*}(i+1,j)\right) \Delta X \Delta Y}{a_{v}(i+1,j)}$$
(9-Y)

در الگوریتم سیمپل اولین جمله از طرف راست معادله حذف می شود و نیز سرعتهای بی بعد را به صورت حاصلجمع سرعت اولیه و تصحیح سرعت در نظر می گیریم یعنی  $u^* = u'^* + u_o^*$  و نیز روابط  $u'^*$  هم دقیقا مشابه معادلات (۸-۷) و (۸-۷) هستند. لذا داریم:

$$u^{*}(i, j+1) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta Y}{a_{U}(i, j+1)} \left( P^{\prime*}(i, j) - P^{\prime*}(i, j+2) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m} \right)_{dr,k}^{*}(i, j+1) \frac{u}{dr,k}(i, j+1) \right)}{a_{U}(i, j+1)} \Delta X \Delta Y + \frac{u_{0}^{*}(i, j+1)}{u_{0}(i, j+1)}$$

$$v^{*}(i+1,j) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta X}{a_{V}(i+1,j)} \left( P^{*}(i,j) - P^{*}(i+2,j) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j) \sum_{dr,k}^{*} (i+1,j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i+1,j)} + v_{0}^{*}(i+1,j)$$
(117-Y)

$$u^{*}(i, j-1) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta Y}{a_{U}(i, j-1)} \left( P^{r^{*}}(i, j-2) - P^{r^{*}}(i, j) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m} \right) u_{dr,k}^{*}(i, j-1) u_{dr,k}^{*}(i, j-1) \right)}{a_{U}(i, j-1)} \Delta X \Delta Y + u_{0}^{*}(i, j-1)$$

(12-7)

$$v^{*}(i-1,j) = -\frac{\varepsilon \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} \Delta X}{a_{V}(i-1,j)} \left( P^{t^{*}}(i-2,j) - P^{t^{*}}(i,j) \right) + \frac{\nabla \left( \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} v_{dr,k}^{*}(i-1,j) v_{dr,k}^{*}(i-1,j) \right) \Delta X \Delta Y}{a_{V}(i-1,j)} + v_{0}^{*}(i-1,j)$$

()	۴-	٧	)	

$$a_{U}(\mathbf{i}, \mathbf{j}-1) = \left[ \max\left(0, \frac{F^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}-1) + F^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1)}{2}\right) \right] \Delta Y$$
$$+ \left[ \max\left(0, -\frac{F^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}-1) + F^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}-3)}{2}\right) + \frac{2}{\operatorname{Re}\Delta X} \right] \Delta Y$$
$$+ \left[ \frac{G^{*}(\mathbf{i}+1, \mathbf{j}-2) + G^{*}(\mathbf{i}+1, \mathbf{j}) - G^{*}(\mathbf{i}-1, \mathbf{j}-2) - G^{*}(\mathbf{i}-1, \mathbf{j})}{4} \right] \Delta X$$
$$+ \frac{2}{\operatorname{Re}\Delta Y} \Delta X + \frac{\varepsilon}{Da^{*}\operatorname{Re}_{final}} \Delta X \Delta Y$$

(10-7)

$$a_{V}(i-1,j) = \left(\frac{F^{*}(i,j+1) + F^{*}(i-2,j+1) - F^{*}(i,j-1) - F^{*}(i-2,j-1)}{4}\right) \Delta Y$$
$$+ \frac{2}{\operatorname{Re} \Delta X} \Delta Y$$
$$\left(\max\left(0, \frac{G^{*}(i+1,j) + G^{*}(i-1,j)}{2}\right) + \max\left(0, -\frac{G^{*}(i-3,j) + G^{*}(i-1,j)}{2}\right)\right) \Delta X$$
$$+ \frac{2}{\operatorname{Re} \Delta Y} \Delta X + \frac{\varepsilon}{Da^{*} \operatorname{Re}_{final}} \Delta X \Delta Y$$

اینک نوبت گسستهسازی معادلهی پیوستگی میباشد:

$$\iint \left[ \frac{\partial \left( \rho_m u_m^* \right)}{\partial x^*} + \frac{\partial \left( \rho_m v_m^* \right)}{\partial y^*} \right] dx \, dy = 0 \tag{19-Y}$$

$$\left[u_{m}^{*}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1)-u_{m}^{*}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)\right]\Delta Y + \left[v_{m}^{*}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})-u_{m}^{*}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j})\right]\Delta X = 0$$

$$(\mathbf{Y}-\mathbf{Y})$$

$$\begin{split} & A_{p}^{A}(\mathbf{i},\mathbf{j})P'(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \sum_{p}^{N}(\mathbf{i},\mathbf{j})P'(\mathbf{i}+2,\mathbf{j}) + \sum_{p}^{S}(\mathbf{i},\mathbf{j})P'(\mathbf{i}-2,\mathbf{j}) + \\ & E_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j})P'(\mathbf{i},\mathbf{j}+2) + \sum_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j})P'(\mathbf{i},\mathbf{j}-2) + B_{p}(\mathbf{i},\mathbf{j}) \\ & A_{p}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \sum_{p}^{N}(\mathbf{i},\mathbf{j}) + \sum_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) + \sum_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) + \sum_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) + \sum_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) \\ & A_{p}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{p}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})} & A_{p}^{2}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{v}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})} \\ & A_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1)} & A_{p}^{S}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)} \\ & A_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1)} & A_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \frac{\nabla a^{2} \operatorname{Re}_{find}}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)} \\ & A_{p}^{K}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = 0 & A_{p}^{S}(\mathbf{2},\mathbf{i}) = 0 \\ & A_{p}^{E}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = 0 & A_{p}^{S}(\mathbf{2},\mathbf{i}) = 0 \\ & B_{p}^{E}(\mathbf{i},\mathbf{j}) = \left[ \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \frac{u}{dr,k}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1) \frac{u}{dr,k}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)\right) \Delta X \Delta Y}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)} \right] \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} / \rho_{m}) \frac{u}{dr,k}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1) \frac{u}{dr,k}(\mathbf{i},\mathbf{j}+1)\right) \Delta X \Delta Y}{A_{v}(\mathbf{i},\mathbf{j}-1)} \right] \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} (\varphi_{k} \rho_{k} \frac{v}{\rho_{m}} \frac{u}{dr,k}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j})\right) \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j})}{A_{v}} \right] \\ & \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}{A_{v}} \right] \\ & \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}{A_{v}} \right] \\ & \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}{A_{v}} \right] \\ & \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{m}} \frac{v}{dr,k}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \right] \Delta X \\ & + \left[ v_{0}^{*}(\mathbf{i}-1,\mathbf{j}) - v_{0}^{*}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \right] \Delta X \\ & + \left[ - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{k}} \frac{v}{\rho_{k}}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}{\rho_{k}} \right] \\ & - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k} \rho_{k}}{\rho_{k}} \frac{v}{\rho_{k}}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j}) \frac{v}{\sigma_{k}}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}{\rho_{k}} \right] \\ & - \frac{\nabla \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_{k}}{\rho_{k}} \frac{v}{\rho_{k}}(\mathbf{i}+1,\mathbf{j})}$$

 $(\Lambda - \Lambda)$ 

نکتهی مهمی که در حل این معادلات وجود دارد این است که در مجاورت دیـوارهی بـالای، پـایینی، ورودی و خروجی باید ضریب جملهای که تصحیح فشار خارج کانال را درگیر میکند صفر شود که این نکته در معادلات (۲–۱۸) آورده شده است.

با حل این معادلهی بسیار مهم، ماتریس تصحیح فشار بدست می آید، سپس با ضرب کردن ضریبی به

نام آرامش یا ریلکسیشن<sup>۱</sup> این مقدار حاصل شده با مقادیر حدس اولیهای که برای فشار درنظر گرفته شده جمع میشود و ماتریس مقادیر اصلی فشار بدست میآید:

$$P(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = P^{*}(\mathbf{i}, \mathbf{j}) + rf_{p'}P'(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \qquad rf_{p'}: relaxation \quad factor \tag{19-Y}$$
$$0 < rf_{p'} < 1$$

با بدست آمدن این مقادیر و استفاده از معادلهی (۲-۸) و (۲-۹) مقادیر سرعتها نیز بدست میآید. در این قسمت، با استفاده از سرعتهای این مرحله و سرعتهای تکرار قبل میتوانیم سرعتهای متعادل شده و نهایی را بدست آوریم که به عنوان حدس اولیه برای تکرار بعد استفاده میشود. لازم به ذکر است که اگر در تکرار اول الگوریتم باشیم با استفاده از حدس اولیههای درنظر گرفته شده (به جای مقادیر تکرار قبل) از این فرمول استفاده می کنیم. در ادامه این فرمول آمده است:

$$u(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1) = rf_{u}u^{<}(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1) + (1 - rf_{u})u^{<}(\mathbf{i}, \mathbf{j}+1)$$

$$rf_{u} : relaxation \quad factor \quad for \quad u \quad 0 < rf_{u} < 1$$

$$(\Upsilon \cdot -\Upsilon)$$

$$v(i+1, j) = rf_{v}v^{<}(i+1, j) + (1 - rf_{v})v^{<}(i+1, j)$$

$$rf_{v} : relaxation \quad factor \quad for \quad v \quad 0 < rf_{v} < 1$$

$$(Y - Y)$$

حالا نوبت چک کردن معیار همگرایی است. اگر این معیار ارضاء شد الگوریتم تمام میشود در غیر اینصورت تا ارضای آن، حلقهی الگوریتم سیمپل، که خروجی آن توزیع سرعت و فشار است، ادامه می ابد. معیار همگرایی این حلقه کوچک شدن بزرگترین درایه از ماتریس تصحیح فشار است. هر چقدر بزرگترین مقدار تصحیح کوچک شود یعنی اینکه سرعتها به مقدار درست خود نزدیک شدهاند و جوابها همگرایی لازم را پیدا کرده اند. فلوچارت الگوریتم سیمپل در قسمت ۵-۶- آمدهاست.

## ۷–۳–استخراج معادلهی انرژی برای نانوسیال با مدل مخلوط دوفاز

## در کانال فاقد و دارای محیط متخلخل

در این قسمت نحوهی معادلات انرزی که برای نانوسیال استفاده شده است نشان داده می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Relaxation

$$\nabla \cdot \left( \varphi_k \, \rho_k \, \mathbf{C}_{p,k} \, \mathbf{V}_k \, \mathbf{T} \right) = \nabla \cdot \left( \varphi_k \, k_k \, \nabla T \right) \tag{YT-Y}$$

در این مرحله حول فازها سیگماگیری میکنیم:

$$\nabla \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} C_{p,k} V_{k} T \right) = \nabla \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} k_{k} \nabla T \right)$$

$$(\Upsilon - \Upsilon)$$

و نیز برای سیگما حول فاز برای ضریب هدایت حرارتی موثر برای نانوسیال در کانال فاقد محیط متخلخل داریم:

$$\sum_{k=1}^{n} (\varphi_k k_k) = k_m \tag{YF-Y}$$

لذا معادلهی انرژی نانوسیال به صورت زیر بدست میآید:

$$\nabla \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \rho_{k} C_{p,k} V_{k} T \right) = \nabla \left( k_{m} \nabla T \right)$$
(Y\Delta-Y)

در این مرحله سراغ معادلهی انرژی برای سیال خالص در کانال متخلخل میرویم و آن را در فرم فاز نوشته و روندی که در بالا برای کانال فاقد محیط متخلخل انجام شده اینبار برای کانال متخلخل پیادهسازی می شود:

$$\nabla \cdot \left( \stackrel{k}{\varphi} \stackrel{k}{\rho} \stackrel{k}{\mathbf{C}}_{p} \stackrel{k}{\mathbf{V}} \mathbf{T} \right) = \nabla \cdot \left( \stackrel{k}{\varphi} \stackrel{k}{\underline{k}}_{porous} \nabla T \right)$$
(Y۶-Y)

با سیگما گیری حول فازها برای معادلهی انرژی بدست میآید:  $\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} \left( \stackrel{k}{\varphi} \stackrel{k}{\rho} \stackrel{k}{\mathbf{C}}_{p} \stackrel{k}{\mathbf{VT}} \right) = \nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} \left( \stackrel{k}{\varphi} \stackrel{k}{k}_{porous} \nabla T \right)$ (۲۷-۷)

و نیز برای سیگما حول فاز برای ضریب هدایت حرارتی موثر در محیط متخلخل داریم:  

$$\sum_{k=1}^{n} \left(\frac{1}{\varepsilon} \overset{k}{\varphi} \overset{k}{k}_{porous}\right) = \frac{1}{\varepsilon} \left(\overset{f}{\varphi} \overset{f}{k}_{porous} + \overset{p}{\varphi} \overset{p}{k}_{porous}\right) = \frac{1}{\varepsilon} \overset{m}{k}_{porous}$$
(۲۸-۷)

و لذا معادلهی نهایی انرژی برای نانوسیال در محیط متخلخل به صورت زیر بدست میآید:

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} \left( \varphi_{k} \, \rho_{k} \, \mathbf{C}_{p,k} \, \mathbf{V}_{k} \, \mathbf{T} \right) = \nabla \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \overset{m}{k}_{porous} \, \nabla T \right)$$

$$\overset{m}{k}_{porous} = \overset{f}{\varphi} \overset{f}{k}_{porous} + \overset{p}{\varphi} \overset{p}{k}_{porous}$$

$$\overset{f}{k}_{porous} = \varepsilon k_{f} + (1 - \varepsilon) k_{s}$$

$$\overset{p}{k}_{porous} = \varepsilon k_{p} + (1 - \varepsilon) k_{s}$$

$$(\Upsilon 9 - \Upsilon)$$

۸-منابع

- [1] Mahdi, R. A., Mohammed H A., and Munisamy K. M. 2013. "Improvement of Convection Heat Transfer by Using Porous Media and Nanofluid: Review." International Journal of Science and Research (IJSR) Volume 2 Issue 8.
- [2] Maxwell, A. 1873. "A treatise on electricity and magnetism." Clarendon Press, Oxford, Vol. II.
- [3] Choi, S.U.S., and Eastman, J.A. 1995. "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles." International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, U.S.A.
- [4] Das, S.K., Choi, S.U.S., and Patel, H.E. 2006. "Heat transfer in nanofluids-a review." Heat Transfer Engineering, Vol. 27, No. 10, pp. 3-19 3-19.
- [5] Alazmi, B., and Vafai K. 2002. "Constant wall heat flux boundary conditions in porous media under local thermal non-equilibrium conditions." International Journal of Heat and Mass Transfer 45 3071-3087.
- [6] Cekmer, O., Mobedi, M. Ozerdem, B. and Pop, I. 2012. "Fully Developed Forced Convection in a Parallel Plate Channel with a Centered Porous Layer." Transp Porous Med 93 179–201.
- [7] Nebbali, R., and Bouhadef, K. 2006. "Numerical study of forced convection in a 3D flow of a non-Newtonian fluid through a porous duct." International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow Vol. 16 Iss: 8 pp. 870 - 889.
- [8] Jen, T.C., and Yan, T. Z. 2005. "Developing fluid flow and heat transfer in a channel partially filled with porous medium." International Journal of Heat and Mass Transfer 48 3995–4009.
- [9] Guerroudj, N., and Kahalerras, H. 2010. "Mixed convection in a channel provided with heated porous blocks of various shapes." Energy Conversion and Management 51 505–517.
- [10] Zehforoosh, A., and Hossainpour, S. 2010. "Numerical investigation of pressure drop reduction without surrendering heat transfer enhancement in partially porous channel." International Journal of Thermal Sciences, Volume 49, Issue 9, 1649-1662.
- [11] Li, H. Y., Leong, K. C. Jin, L. W. and Chai. J. C. 2010. "Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with staggered porous blocks." nternational

Journal of Thermal Sciences 49 950-962.

- [12] Teamah, Mohamed A., El-Maghlany W.M., and Mohamed M. Khairat D. 2011. "Numerical simulation of laminar forced convection in horizontal pipe partially or completely filled with porous material." International Journal of Thermal Sciences 50 1512-1522.
- [13] Mohamad, A. A. 2003. "Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media Part I: constant wall temperature." International Journal of Thermal Sciences 42 385-395.
- [14] Shokouhmand, H., Jam F., and Salimpour M. R.. 2011. "The effect of porous insert position on the enhanced heat transfer in partially filled channels." International Communications in Heat and Mass Transfer 38 1162-1167.
- [15] Nimvari, M. E., Maerefat M., and El-Hossaini M. K. 2012. "Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel partially filled with a porous media." International Journal of Thermal Sciences 60 131-141.
- [16] Mahmoudi, Y., and Maerefat M. 2011. "Analytical investigation of heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition." International Journal of Thermal Sciences 50 2386-2401.
- [17] Yang, C., Nakayama A., and Liu W., 2012. "Heat transfer performance assessment for forced convection in a tube partially filled with a porous medium." International Journal of Thermal Sciences 54 98-108.
- [18] Zahmatkesh, I., and Yaghoubi M. 2006. "Studies on thermal performance of electrical heaters by using porous materials." International Communications in Heat and Mass Transfer 33 259-267.
- [19] Pavel, B. I., and Mohamad A. A. 2004. "An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers fitted with porous media." International Journal of Heat and Mass Transfer 47 4939-4952.
- [20] Baloyi, J., Bello-Ochende T., and Meyer J. P., 2012. "Minimization of thermal resistance in an air cooled porous matrix made up of solid spheres with heat generation." International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 39, Issue 7, 966-970.
- [21] Li, H. Y., Leong, K. C., Jin, L. W., and Chai., J. C., 2010. "Transient twophase flow and heat transfer with localized heating in porous media."

International Journal of Thermal Sciences 49 1115-1127.

- [22] Huang, Z. F., Nakayama, A., Yang, K., Yang, C., and Liu, W., 2010."Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube." International Journal of Heat and Mass Transfer 53 1164-1174.
- [23] Yang, Yue-Tzu, and Ming-Lu Hwang. 2009. "Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics in heat exchangers fitted with porous media." International Journal of Heat and Mass Transfer 52 2956-2965.
- [24] Al-Salem, Khaled, Hakan F. Oztop, and Suhil Kiwan. 2011. "Effects of porosity and thickness of porous sheets on heat transfer enhancement in a cross flow over heated cylinder." International Communications in Heat and Mass Transfer 38 1279-1282.
- [25] Mizanuzzaman, Md., Nusrat Jahan, Md. Almostasim Mahmud, and Salma Noor Jahan. 2013. "Enhancement and Analysis of Heat Transfer Rate in Turbulent Flow through Tubes with Longitudinal Perforated X-Shaped Inserts." International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 4, Issue3.
- [26] Saito, Marcelo B., and Marcelo J.S. de Lemos. 2009. "Laminar heat transfer in a porous channel simulated with a two-energy equation model." International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 36, Issue 10 1002-1007.
- [27] Yang, C., Liu, W., and Nakayama, A., 2009. "Forced Convective Heat Transfer Enhancement in a Tube with its Core Partially Filled with a Porous Medium." The Open Transport Phenomena Journal 1-6.
- [28] Shokouhmand, H., Jam, F., and Salimpour, M. R., 2009. "Simulation of laminar flow and convective heat transfer in conduits filled with porous media using Lattice Boltzmann Method." International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 36, Issue 4 378-384.
- [29] Wei, LIU, and Yang Kun. 2008. "Mechanism and numerical analysis of heat transfer enhancement in the core flow along a tube." Science in China Series E: Technological Sciences vol. 51, no. 8, 1195-1202.
- [30] Sankar, M., Youngyong Park, Lopez, J. M. and Younghae Do. 2011. "Numerical study of natural convection in a vertical porous annulus with discrete heating." International Journal of Heat and Mass Transfer 54 1493-1505.

- [31] Xu, H. J., Qu, Z. G., and Tao, W. Q., 2011. "Analytical solution of forced convective heat transfer in tubes partially filled with metallic foam using the two-equation model." International Journal of Heat and Mass Transfer 54 3846– 3855.
- [32] Alkam, M. K., Al-Nimr, M. A., and Hamdan, M. O. 2001. "Enhancing heat transfer in parallel-plate channels by using porous inserts." International Journal of Heat and Mass Transfer 44 931-938.
- [33] Leong, J. C., and Lai, F. C. 2006. "Natural convection in a concentric annulus with a porous sleeve." International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 49, Issues 17–18, 3016-3027.
- [34] Badruddin, I. A., Al-Rashed, Abdullah A.A.A., Salman Ahmed N.J., and Kamangar, S.. 2012. "Investigation of heat transfer in square porous-annulus." International Journal of Heat and Mass Transfer 55 2184-2192.
- [35] Hajipour, M., and Dehkordi, A.M. 2012. "Analysis of nanofluid heat transfer in parallel-plate vertical channels partially filled with porous medium." International Journal of Thermal Sciences 55 103-113.
- [36] Huang, P. C., and Vafai K. 1994. "Analysis of Forced Convection Enhancement in a Channel Using Porous Blocks." JOURNAL OF THERMOPHYSICS AND HEAT TRANSFER Vol. 8, No. 3, 563-573.
- [37] Chiem, K. S., and Zhao Y. 2004. "Numerical study of steady/unsteady flow and heat transfer in porous media using a characteristics-based matrix-free implicit FV method on unstructured grids." International Journal of Heat and Fluid Flow 25 1015-1033.
- [38] Targui, N., and Kahalerras, H.. 2008. "Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures." Energy Conversion and Management 49 3217-3229.
- [39] FU, WU-SHUNG, HUANG, H.C. and LIOU, Y.W. 1996. "Thermal enhancement in laminar channel flow with a porous block." International Journal of Heat Mass Transfer. Vol. 39, No. 10, 2165-2175.
- [40] Nebbali, R., and Bouhadef, K. 2011. "Non-Newtonian fluid flow in plane channels: Heat transfer enhancement using porous blocks." International Journal of Thermal Sciences 50 1984-1995.
- [41] Seddiq, M., Maerefat, M. and Mirzaei, M. 2014. "Modeling of heat transfer at

the fluidesolid interface by lattice Boltzmann method." International Journal of Thermal Sciences 75 28-35.

- [42] Benkafada, F., Talbi, K. and Afrid, M. 2008. "The enhanced cooling of heated blocks mounted on the wall of a plane channel filled with a porous medium ." Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 197-206.
- [43] Young, T. J., and Vafai, K. 1998. "Convective flow and heat transfer in a channel containing multiple heated obstacles." International Journal of Heat and Mass Transfer 41 3279-3298.
- [44] Zehforoosh, A., and Hossainpour, S. 2010. "Numerical investigation of pressure drop reduction without surrendering heat transfer enhancement in partially porous channel." International Journal of Thermal Sciences, Volume 49, Issue 9, 1649-1662.
- [45] Chin, S.B., Foo, J.J., Lai, Y.L. and Yong, T. K.K. 2013. "Forced convective heat transfer enhancement with perforated pin fins." Heat Mass Transfer 49 1447-1458.
- [46] Lee, K.S., Kim, W.S. and Si, J.M. 2001. "Optimal shape and arrangement of staggered pins in the channel of a plate heat exchanger." International Journal of Heat and Mass Transfer 4 3223-3231.
- [47] Huang, P.C., and Yang, C.F. 2008. "Analysis of pulsating convection from two heat sources mounted with porous blocks." International Journal of Heat and Mass Transfer 51 6294-6311.
- [48] Chikh, S., Boumedien, A., Bouhadef, K. and Lauriat, G. 1998. "Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with intermittent heated porous blocks." Heat and Mass Transfer 33 405-413.
- [49] Yucel, N., and Guven, R. T. 2009. "Numerical Study of Heat Transfer in a Rectangular Channel with Porous Covering Obstacles." Transport Porous Media 77 41-58.
- [50] Shaeri, M. R, Yaghoubi, M. and Jafarpur, K. 2009. "Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks." Applied Energy 86 2019-2029.
- [51] Li, H. Y., Leong, K. C., Jin, L. W. and Chai, J. C. 2010. "Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with staggered porous blocks." international Journal of Thermal Sciences 49 950-962.

. August. https://fa.wikipedia.org/wiki. ديناميک سيالات محاسباتی[۵۲]

- [53] Nazari, M. 2013. "Booklet lesson of CFD." Shahrood, January.
- [54] Nanofluid. 2015. August. https://en.wikipedia.org.

[۵۵] ریچارد فاینمن. https://fa.wikipedia.org/wiki/ریچارد-فاینمن.

- [56] Saidur, R., Leong, K. Y. and Mohammad, H. A. 2011. "A review on applications and challenges of nanofluids." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 1646–1668.
- [57] Buongiorno, J., 2005. "convective transport in nanofluids." Journal of Heat Transfer 128 240-250
- [58] Nayeb-Zadeh, M. 2015. nanofluid. August. http://www.tebyan.net/newmobile.aspx/8/newindex.aspx?pid=260878.
- [59] Kurowski, L., Chmiel-Kurowska, K. and Thullie, J. 2009. "Numerical simulation of heat transfer in nanofluids ." 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE19 967-972.
- [60] Haghshenas Fard, M., Nasr Esfahany, M. and Talaie, M. R. 2010. "Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model." International Communications in Heat and Mass Transfer 37 91-97.
- [61] Akbari, M., Galanis, N. and Behzadmehr, A. 2011. "Comparative analysis of single and two-phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer." International Journal of Thermal Sciences 50 1343-1354.
- [62] Santra, A. K., Sen, S. and Chakraborty, N. 2009. "Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates." International Journal of Thermal Sciences 48 391-400.
- [63] Lotfi, R., Saboohi, Y. and Rashidi, A. M. 2010. "Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches." International Communications in Heat and Mass Transfer 37 74-78.
- [64] Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A., 2008. "Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube." International Journal of Heat and Fluid Flow 29 557–566
- [65] Manninen, M., and Taivassalo, V. 1996. "On the mixture model for multiphase flow." Vation Teknillinen Tutkimuskeskus.
- [66] Vafai, K., and Tien, C. L. 1981. "BOUNDARY AND INERTIA EFFECTS ON

FLOW AND HEAT TRANSFER IN POROUS MEDIA ." Intertnational Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 24, 195-203.

- [67] Lai, M., Krempl, E. and Ruben, D. 2010. Intoduction to continuum mechanics, 4th edition.
- [68] Bergman, T., L., Lavine, A., S., Incropera, F., P., Dewitt, D., P., 2011.
   "Fundamentals of heat and mass transfer. 7<sup>th</sup> edition."
- [69] Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M. and Harting, J. 2011. "Eulerian– Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel." International Journal of Heat and Fluid Flow 32 107-116.
- [70] Ebadian, M. A., and Dong, Z. F. 1998. "Forced convection, internal flow in ducts." In Handbook of Heat Transfer 5.
- [71] Kays, W., M., Crawford, M., E. 1993. "Convective heat and mass transfer. 3<sup>rd</sup> edition."
- [72] Fox, R., W., McDonald, A., T., Pritchard, P., J., 1934. "Introduction to fluid mechanics. 6<sup>th</sup> edition."
- [73] Lautrup, B. 2013. "Channel entrnce flow." Physics of continuous matter 1-6

Abstract: in this thesis, enhancement of Heat transfer in a two dimensional channel with infinite depth is investigate numerically. Two symmetric and isothermal parallel plates are considered as heat sources of the channel. Nano fluid, as the operating fluid, enters the channel with uniform velocity profile and specific temperature. The governing continuity, momentum and energy equations for laminar flow are derived and districted using a Finite Volume (FV) Method, applying First order Upwind Difference Skip (FUDS), and solved with SIMPLE algorithm. Nano fluid is assumed to be at two phase mixture model. A detailed study is conducted to highlight the influence of DA number and Nano particles' volume fraction. The results indicate that using Nano fluid conclude Nu number enhancement by pressure gradient as well as Nano particles' volume fraction increments simultaneously. Also channel is fully filled with the Aluminum's metal foam as the porous medium in order to enhance Nu number. Darcy-Brinkman equation is employed for porous medium. results reveal that also presence of porous medium modify Nu but unfavorably conducted to noticeably higher pressure gradient. Result addressing the increasing Nu and pressure gradient are conclude to reduction of Da number. Finally combination of Nano fluid and porous medium is recommended to optimize Nu and pressure gradient.it can be concluded that to achieve optimum results and avoiding higher pressure gradient, it is necessary to set select appropriate DA number

Keywords: numerical study, two dimensional channel, laminar flow, isothermal parallel plates channel, Nano fluid, two phase mixture model, porous medium.



University of Shahrood Faculty of Mechanic

# Numerical study of heat transfer and Nano fluid flow in channel with porous medium

Nariman Kamrani

Supervisors: Dr. Mohsen Nazari Dr. Pooriya Akbarzadeh

September 2015