

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

عنوان پایان نامه ارشد:

بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله با تزریق ماده متخلخل فلزی غیریکنواخت

میلاد ساروزه رستمی

استاد راهنما:

دكتر محمد محسن شاهمردان

استاد مشاور:

دكتر محسن نظرى

شهريور ۱۳۹۴





دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

عنوان پایان نامه ارشد:

بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله با تزریق ماده متخلخل فلزی غیریکنواخت

دانشجو: میلاد ساروزه رستمی

استاد راهنما:

دكتر محمد محسن شاهمردان

استاد مشاور:

دكتر محسن نظرى

پایاننامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهريور ۱۳۹۴

شماره: کر ۲۹۲ رم تاریخ: ۵ مرکم ۲۹ ویرایش:

رانگار ت*ابرد* در نگار تابرد مدیریت تحصیلات تکمیلی فرم شماره (6)

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 میلاد ساروزه رستمی به شماره دانشجویی9103674 رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان : بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله با تزریق ماده متخلخل فلزی غیر یکنواخت

که در تاریخ 1394/6/28 با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردیـد بـه شـرح ذیـل اعلام می گردد:

] مردود	دفاع مجدد	V (14)	درجه : محوف امتياز کم	قبول (با
(ار خوب (18/99 ـ 18	2_ بسي	ـ عالى (20 ـ 19)	.1
(, قبول (15/99 ـ 14	4_ قابل	_ خوب (17/99 _ 16)	3
			- نمرہ کمتر از 14 غیر قابل قبول	5

	امضاء م	مرتبة علمي	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
-	20-20	دانشيار	محمد محسن شاه مردان	1_ استادراهنما
	16	دانشيار	محسن نظرى	2_ استاد مشاور
	A	دانشيار	علی جباری مقدم	3۔ نمایندہ شورای تحصیلات تکمیلی
_	No.	استاديار	علی عباس نژاد	4_ استاد ممتحن
	Å	استادیار	محمد ضامن	5 ـ استاد ممتحن
	001	0		

دانشكده

تقديم به

خدایی که آفرید

جهای رل (نسای رل محفل رل محلح رل معرفت رل محش رل

و به کمانی که محققتای رژور وجود که میر

تقديم به

پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر

پروردگارا ؛

نه می توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته می توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای ده که هر لحظه شکر بسته شان که ثمره تانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

از تمامی عزیزانی که در انجام و تهیه و ارائه این تحقیق، به هر نحوی اینجانب را یاری دادهانـد، تشکر و قدردانی مینمایم.

از استاد راهنما جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان که در پیشبرد تحقیق حاضر زحمات زیادی را متحمل شدهاند، سپاسگزاری مینمایم. از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر محسن نظری که زحمت بسیاری در راستای انجام این پروژه کشیدهاند، قدردانی میکنم. همچنین از داوران گرامی آقای دکتر علی عباس نژاد و آقای دکتر محمد ضامن که زحمت داوری پایاننامه را به عهده گرفتند تشکر میکنم.

از دوستان عزیزم جناب دکتر امین عربی و مهندس نسیبه بابازاده که در طول انجام پایانامه از کمک ها و مساعدتهای ارزنده آنها نیز بهرهمند شدم، تشکر می کنم.

تعهد نامه

اینجانب میلاد ساروزه رستمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله با تزریق ماده متخلخل فلزی غیریکنواخت" تحت راهنمائی دکتر محمد محسن شاه مردان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود
 » و یا « Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیر گذار 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 صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیدہ

در دهههای اخیر نیاز به انرژی روند رو به رشدی داشته است و همچنین منابع سوختی نیز محدود و پایان پذیر می اشند، به همین دلیل در سال های گذشته بهبود فرآیند انتقال حرارت در سیستمهای مختلف مهندسی، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته و مطالعات متعددی در این رابطه انجام شده است. یکی از روشها برای بهبود انتقال حرارت در مبدلها تزریق ماده متخلخل است. در این پژوهش، انتقال حرارت و افت فشار جریان جابجایی اجباری برای یک لوله افقی با تزریق ماده متخلخل فلزی به روش عددی حجم محدود و در حالت دو بعدی متقارن محوری، بررسی شده است. رژیم جریان مورد بررسی آرام و شرط مرزی روی دیواره شار ثابت است. همچنین ماده متخلخـل در این پژوهش به صورت استوانهای متخلخل در آرایشهای مختلف درون لوله قرار داده میشود. تـأثیر پارامترهای مختلف از جمله نفوذپذیری، ضخامت ماده متخلخل و نسبت هدایت حرارتی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان میدهد در حالتی که دبی ورودی لوله ثابت باشد، در اکثر آرایشها، تزریق ماده متخلخل باعث افزایش نرخ انتقال حرارت میشود و در حالتی که جزئی از لوله پر شده باشد در آرایش مرکزی عدد ناسلت متوسط تا ۶ برابر ناسلت متوسط لوله خالی افزایش می یابد. تزریق ماده متخلخل هرچند می تواند باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شود اما افت فشار در طول لوله را نیز افزایش میدهد که نیازمند توان پمپاژ بیشتری است. پس می توان نتیجه گرفت تزریق ماده متخلخل از دید انتقال حرارت مطلوب و از دید افت فشار نامطلوب است. بنابراین تزریق ماده متخلخل از دید کارایی حرارتی نیز در این پژوهش از دو روش بررسی می شود.

كلمات كليدى: جريان آرام، انتقال حرارت جابجايى، افت فشار، محيط متخلخل

فهرست مطالب

- فصل اول : كليات	۱
۱-۱- مقدمه	
۲-۱- در آمدی بر فومهای فلزی	
۱-۲-۱ - تعاریف فومهای فلزی	
۲-۲-۲ انواع فومهای فلزی۳	
۲-۲-۲-۱ فوم فلزی سلول بسته	
۲-۲-۲-۱ فوم فلزی سلول باز٤	
۵_۳-۱ انتقال حرارت در فومهای فلزی	
۱-۳-۱ - هدایت حرارتی	
۲-۳-۲ انتفال حرارت جابجایی	
۲-٤- کاربر دهای محیط متخلخل در انتقال حرارت	
۔ فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته	۲
۱۰_ تعریف مساله	
۲-۲- جنبههای نوآوری	
- فصل سوم: معادلات حاکم و انتقال حرارت در محیط متخلخل ۱۷	٣
۲-۱- جریان سیال در محیط متخلخل	
۱۹۲۱-۱- تخلخل	
۲۰-۱-۲ نفوذپذیری(تراوایی)	
۲-۱-۳ سرعت دارسی و معادله پیوستگی	
۲-۲- فرمهای مختلف معادله مومنتوم در محیط متخلخل	
۲۲-۲-۱- معادله مومنتوم برای حل به روش مستقیم	
۲-۲-۲ معادلات مومنتوم برای حل به روش غیرمستقیم	
۳۰- فرمهای مختلف معادله انرژی در محیط متخلخل	
۲-٤- حل عددی معادلات در نرم افزار فلوئنت	
۳٤-۱-٤- الگوريتم فشار – مبناً	
۳۰_۱-۱-۱ الگوريتم فشار - مبنا جدا شده	
٣٦ ـ ٢ ـ ٢ ـ ٢ ـ ١١ گوريتم فشار - مبنا کوپل	

۳۷	۲-٤-۳ الگوريتم چگالي – مبنا
۳۹	٤ - فصل چهارم : مدل سازی و حل عددی
٤٠	۱-٤ انتخاب آر ایش
٤ •	۱-۱-۲ آرایش مرزی
٤ •	۲-۱-٤ آرایش مرکزی
٤١	۲-۱-٤ آرایش رینگ
٤٢	٤-١-٤- آرایش شیار
٤٣	 ۱-٤ آرایش کاملا پر
٤٣	۲-۲- تولید شبکه
٤٣	٤-٣- شرایط مرزی
٤٣	٤-٤ - تنظيمات حل گر و دقت حل
٤ ٤	٤-٤-١ تنظيمات جريان
٤ ٤	۲-٤-٤ تنظیمات مواد مورد استفاده
٤ ٤	٤-٤-٣- تنظیمات شرایط مرزی
٤٤	۴-۴-۴ تعریف محیط متخلخل
٤٧	٤-٤-٥- تنظيمات روش حل
٤٧	٤-٤-٤ کنترل روش حل
٤٧	٤-٤-٤ تنظيمات دقت حل
٤٧	٤-٥- آزمون حساسیت به شبکه
٤٩	٥-٦- صحه گذارى نتايج
٥١	٥ ـ فصل پنجم: نتایج و بحث ها
٥٢	٥-١- هیدرودینامیک
۲٥	٥-١-١- آرایش مرکزی
٥٤	٥-١-٦- آرایش مرزی
00	٥-١-٣- أرايش رينگ
٥٦	٥-١-٤- آرایش شیار
٥٧	٥-٢- انتقال حرارت جابجایی
٥٧	٥-٢-١ آرایش مرکزی
09	٥-٢-٢- آرایش مرزی
זז	٥-٢-٣- آرایش رینگ
٦٤	٥-٢-٤ آرایش شیار

٧	 مازده حرارتی
٧	۵-۴-۱ بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر
٧٤	٥-٤-٢- ناسلت تعميم يافته
۸۱	۲- نتیجه گیری و پیشنهادات
٨٥	۷ ـ پیوست:فوم های فلزی
۸۷	۲-۱- کاربرد های مواد متخلخل
۸۸	۷-۱-۱- صنعت حمل و نقل
۸۹	۲-۱-۲ جذب کننده ضربه
۸۹	۷-۱-۳ سطح وسيع
۸۹	۷-۱-۴- ذخیره و انتقال مایعات
٩٠	۷-۱-۵- مبدل هاي حرارتي و سردکن ها
۹۰	٧-٢- روش هاي توليد فوم هاي فلزي
۹۱	۷-۲-۱ فوم سازي از طريق تزريق گاز
۹۲	۷-۲-۲ روش عامل فوم ساز
۹۳	۲-۲-۳ روش عامل فضا ساز (ریخته گری)
۹٤	۲-۲-۴- روش عامل خارج شونده (متالوژی پودر)
۹٥	٧-٢-٥- روش رسوب گذاري الکتريکي
٩٦ <u></u>	۷-۳- نمونه هایی از کار های تجربی انجام شده
۹۹	۲-۴- خواص مواد متخلخل
۱۰۰	۷-۵- خواص حرارتی فوم های فلزی
۱۰۲	۷-۵-۱ دماي ذوب
۱۰۲	۷-۵-۲- گرماي ويژه
۱۰۳	٧-٥-٣- ضريب انبساط حرارتي

فهرست جداول

۲۱	جدول ۳-۱ تخلخل و تراوایی برخی مواد متخلخل
۲٩	جدول ۳-۲ ضریب فورچیمر
۳۱	جدول ۳-۳ خلاصهای از معادلات مختلف برای جریان عبوری از ماده متخلخل
۴۷	جدول ۴-۱ ضریب تخفیفهای در نظر گرفته شده برای حل معادله

فهرست شكلها

۴	شکل ۱-۱نمودار عمومی و تقسیم بندی کلی روش های تولید فوم فلزی
۵	شکل ۱-۲نمونه ای از فومهای فلزی الف) فوم فلزی سلول باز ب) فوم فلزی سلول بسته
۱۲	شکل ۲-۱ نمونه محیط متخلخل مورد استفاده
	شکل ۳-۱ نمونههایی از محیطهای متخلخل به ترتیب حروف: شن ساحلی، ماسه سنگی، سنگ آهک، نون گندم، چوب و ریه انسان. شکلهای
	پایین: ماده متخلخل دانهای استفاده شده در ساخت صنعتی (سمت چپ)، سنگ آهک ریز شده در انـدازههای ۱ سـانتیمتری (سـمت راسـت)
۱۹	
٢٢	شکل ۳-۲حجم بنیادی نمونه R.E.V [۴۲]
۲۸	شکل ۳-۳ عبور از ناحیه عبور از ناحیه دارسی به ناحیه فورچیمر برای یک محیط متخلخل ایزوتروپ همگن [۴۷]
۳۶	شكل ٣-۴ الگوريتم فشار - مبنا الف) كوپل ب) جدا شده
۳۸	شکل ۳-۵ شماتیک الگوریتم چگالی- مبنا
۴.	شکل ۴-۱ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با مانده متخلخ ورودی در آرایش مرزی
41	شکل ۴-۲ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با مانده متخلخ ورودی در آرایش مرکزی
47	شکل ۴-۳ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با مانده متخلخ ورودی در آرایش رینگ
47	شکل ۴-۴ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با ماده متخلخ ورودی در آرایش شیار
۴۸	شکل ۴-۵ نمودار عدد ناسلت میانگین به ازای افزایش مش
49	شکل ۴-۶ پروفیل سرعت برای دو مش بندی پنجم و ششم
۵۰	شکل ۴-۷ مقایسه نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج عددی بدست آمده از کار های گذشته
۵٣	شکل ۵-۱ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرکزی 4-^Da=10
۵۴	شکل ۵-۲ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای دارسی های مختلف در آرایش مرکزی Rp=0.6
۵۵	شکل ۵-۳پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرزی 4-^Da=10
۵۵	شکل ۵-۴ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای عدد دارسی های مختلف در آرایش مرزی Rp=0.6
۵۶	شکل ۵-۵پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش رینگ R _c =0.5
۵۶	شکل ۵-۶ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش شیار
۵۷	شکل ۵-۷ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=1.4، Re=200
۵٨	شکل ۵-۸ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k=6، Re=200
۵٩	شکل ۵-۹ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=10، Re=200
۶.	شکل ۵-۱۰ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=1.4 .Re=200

نکل ۵-۱۱نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی Re=200 ،k*=6
نکل ۵-۱۲نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200 ،k*=10
نکل ۵-۱۳ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ k*=1.4، Re=200، Re=200، Rc
نکل ۵-۱۴ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5، Rc=200، Rc=200، Rc
نكل ۵-۱۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به شعاع متوسط رينگ متخلخل ورودی k*=1.4 ، Re=200 ،Rp=0.2 ،k*=1.4
نكل ۵-۱۶ نمودار ناسلت متوسط نسبت به شعاع متوسط رينگ متخلخل ورودی k*=1.4 ، Re=200 ،Rp=0.4 ،k*=1.4
نکل ۵-۱۷ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش شیار ۴*=1.4 .Re=200
نکل ۵-۱۸ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200 .k*=10
نکل ۵-۱۹ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی ۲۵=*Re
نکل ۵-۲۰ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی Re=200
نکل ۲۱-۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200
نکل ۲۵-۲۲ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Re=200 ،Rc=0.5
نکل ۵-۲۳ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش شیار ، Re=200
نکل ۲۴-۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به شعاع متوسط رینگ متخلخل ورودی Rp=0.2، Re=200
نکل ۵-۲۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به شعاع متوسط رینگ متخلخل ورودی Re=200 ،Rp=0.4
نکل ۵-۲۶ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش مرکزی k*=1.4
نکل ۵-۲۷ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش مرکزی k*=6
مکل ۵-۲۸ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش رینگ k*=1.4
نکل ۵-۲۹ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش رینگ k*=6
نکل ۵-۳۰ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به شعاع متوسط ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rp=0.2 ،k*=1.4.
نکل ۵-۳۱ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به شعاع متوسط ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rp=0.2 ،k*=1.4.
نکل ۵-۳۲ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=1.4
نکل ۵-۳۳ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=6
نکل ۵-۳۴ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=10
نکل ۵-۳۵ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزیk*=1.4
نکل ۵-۳۶ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=6
نکل ۵-۳۷ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=10
نکل ۵-۳۸ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5 ،k*=1.4
نکل ۵-۳۹ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=1.4
نکل ۲-۱ شماتیک تولید فوم فلزی با روش تزریق گاز [۱]
نکل ۲-۲ تولید فوم فلزی با روش عامل فوم ساز توسط شرکت Shinko wir [۱]

۹۴	شکل ۷-۳ روش تولید فوم فلزی با عامل فوم ساز [۷۴]
۹۵	شکل ۲-۴ روش متالوژی پودر برای ساخت فوم فلزی [۲۴]
٩۶	شکل ۷-۵ تکنیک رسوب گذاری الکتریکی برای ساخت فوم فلزی سلول باز [۷۴]
۹۷	شکل ۲-۶ فوم فلزی ساخته شده توسط جیانگ [۲۵]
۹۷	شکل ۲-۷ دانه های سرامیکی به عنوان خارج شونده استفاده شده توسط چو [۷۶]
٩٨	شکل ۷-۸ فوم سلول باز ساخته شده توسط چو[۷۶]
٩٨	شکل ۲-۹ تصویر خارج شونده (کربومیاد) استفاده شده [۲۷]
۹۹	شکل ۲-۱۰ تاثیر فشار اعمالی و اندازه خارج شونده بر شکل محیط متخلخل [۷۷]
	شکل ۲-۱۱ فوم فلزی با حفرهها باز که بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است. در اثر عبورسیال از داخل فوم به علت نسبت سطح بـه
۱۰۱	حجم زیاد آن، انتقال حرارت از صفحه رسانا به سیال به خوبی صورت می گیرد [۱]

فهرست علائم

C_P	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت
d_P	قطر سلول متخلخل
D _a	عدد دارسی
h	ضريب انتقال حرارت جابجايي
k (λ)	هدایت حرارتی
k _{eff}	هدایت حرارتی مؤثر
k _f	هدایت حرارتی سیال
k _s	هدایت حرارتی جامد
k*	نسبت هدایت حرارتی مؤثر
K	نفوذپذیری
Nu	عدد ناسلت
Р	فشار
q″	شار حرارتی
R	شعاع لوله
r*	شعاع بی بعد
R _p	ضخامت بىبعد ماده متخلخل
S	ضخامت ماده متخلخل
u	سرعت محورى
u*	سرعت محورى بىبعد
3	تخلخل ماده متخلخل
μ	ويسكوزيته ماده متخلخل
ρ	چگالی سیال

كليات

۱- فصل اول : کلیات

1-1- مقدمه

انرژی یکی از مهمترین موضوعاتی است که بشر در ۵۰ سال آینده با آن مواجه است. تامین انرژی پاک و بدون آلایندههای محیطی اولویت اول اغلب کشورهای توسعه یافته است. در میان انواع مختلف انرژی که امروزه مورد استفاده قرار می گیرد بیش از ۲۰ ٪ آن به صورت حرارت تبادل می شود. در بسیاری از سیستمها و فرایندهای صنعتی حرارت باید به صورت انرژی ورودی به سیستم داده شود و یا حرارات تولید شده در فرایند باید از سیستم خارج گردد. با افزایش سریع نیاز به انـرژی در جهان، تقویت نمودن فرایند انتقال حرارت وکاهش تلفات انـرژی از اهمیت زیادی برخـوردار است. انتقال حرارت و کنترل آن موضوع بسیار مهمی در سیستم هایی با شار حرارتی بالا از جمله واکـنشها و راکتورهای هسته ای، سیستمهای میکروالکترونیک، میکروراکتورهای شیمیایی و بسیاری کاربردهای دیگر است.

روشهای مختلفی که جهت تسریع و بهبود انتقال حرارت در سیستم های مختلف پیشنهاد و ارائه شده است را میتوان به دو دسته عمده تقسیم نمود. در دسته اول انتقال حرارت به روش های خارجی و اغلب مکانیکی مانند همزدن، چرخش، لرزش و یا ایجاد میدان های الکترواستاتیکی و مغناطیسی صورت میپذیرد که روش های موثری جهت افزایش انتقال حرارت و همچنین انتقال جرم هستند. البته اغلب این روشها پرهزینه بوده و برای سیستمهای فشرده نامناسب میباشند. دسته دوم روشهای هستند که از طریق اصلاح و بهبود خواص سیالات، سطح انتقال حرارت، زبری سطوح و یا اتصال اجسام خارجی جهت افزایش سطح و ایجاد آشفتگی سبب افزایش انتقال حرارت میشود. فوم و لیزی متخلخل به دلیل دارا بودن خواص ویژه، گزینهی مناسبی جهت قرار گرفتن در دسته دوم و استفاده برای سیستمهای فشرده میباشد. برای آشنایی بیشتر با فومهای فلزی در ادامه مختصر به آنها پرداخته میشود.

۲-۲- درآمدی بر فومهای فلزی

با پیشرفت تکنولوژی بدست آوردن مواد جدید از اهمیت خاصی برای دانشمندان برخوردار است و میتواند اثر بسیار شگرفی بر زندگی بشر داشته باشد. فومهای فلزی یکی از این مواد هستند که دانشمندان با بوجود آوردن آنها پای در فضای گسترده و جدید صنعتی گذاشته اند.

1-۲-1 تعاریف فومهای فلزی

فلزات متخلخل گروه جدیدی از مواد، با خواص منحصر به فردی از قبیل دانسیته پایین، استحکام به وزن بالا، سطح ویژه زیاد، رسانندگی حرارتی خوب و جذب انرژی عالی هستند [۱]. این خصوصیات این امکان را برای فومهای فلزی به خصوص فومهای آلومینیومی بوجود میآورد که در کاربردهای زیادی مانند خالصسازی و فیلتراسیون، مبدلهای حرارتی، کاتالیزورها، بیومتریالها و همچنین در صنایع خودروسازی، ساختمانسازی و هوافضا مورد استفاده قرار گیرند [۲]. روشهای زیادی برای تولید فومهای فلزی گسترش یافته است، که می توان آنها را در چهار دسته اصلی طبقه بندی کرد: فرایند حالت مایع، فرایندهای حالت جامد، رسوب دهی فاز بخار و رسوب دهی الکتریکی [۱].در یک تقسیم بندی کلی روشهای تولید فوم فلزی بصورت نمودار شکل ۱–۱ قابل ارائه است؛ که در این میان روشهای ذوبی اهمیت بیشتری یافتهاند.

۲-۲-۲ انواع فومهای فلزی

فومهای فلزی را میتوان از لحاظ ساختار قرار گیری حفره ها در کنار یکدیگر به دو دسته کلی تقسیم نمود که هر یک از این دو نوع فوم دارای محاسن و معایبی هستند.



شکل ۱-۱نمودار عمومی و تقسیم بندی کلی روش های تولید فوم فلزی

1-2-2-1- فوم فلزي سلول بسته

در این گونه از مواد متخلخل حفرهها با یکدیگر ارتباطی ندارند. و سیال قابلیت عبور از بین این مواد را ندارد. این نوع فوم ها معمولاً در کاربردهایی همچون جاذب صدا یا افزایش انتقال حرارت هدایت مورد استفاده قرار می گیرند.

1-2-2-2- فوم فلزي سلول باز

در این گونه از مواد متخلخل حفرهها بصورت پیوسته به یکدیگر متصل هستند. سطح تماس بالای این نوع فومها با سیال عبوری میتواند پتانسیل خوبی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی این نوع مواد باشد. البته ساخت این نوع فومها دارای مشکلات فراوانی است. از این رو ساخت این نوع فومها یکی از دغدغههای پژوهشگران می باشد.



شکل ۱-۲نمونه ای از فومهای فلزی الف) فوم فلزی سلول باز ب) فوم فلزی سلول بسته

1-3- انتقال حرارت در فومهای فلزی

۱-۳-۱- هدایت حرارتی

بدیهی است که هدایت حرارتی فوم های فلزی λ مقدار خیلی کمتری در مقایسه با توده فلز خواهد داشت. در مقایسه با هدایت الکتریکی، این خاصیت خیلی پیچیدهتر است. چهار جز در هدایت حرارتی ساختار متخلخل مشارکت دارند: علاوه بر هدایت حرارتی دیوارههای سلول جامد، هدایت حرارتی گازهای محبوس و اثر تابش و همرفت نیز باید در نظر گرفته شود.

(۱-۱)
$$\lambda = \lambda_s + \lambda_G + \lambda_r + \lambda_c$$
 در معدله (۱-۱، زیرنویس S مربوط به هدایت حرارتی دیـوارههای سـلول جامـد، G هـدایت حرارتی گاز درون حفرهها، c همرفت در سلولها و r تابش دیوارههای سلول اسـت. هـمچنـین حضـور اکسیدهای فلزی (که هدایت حرارتی کمی دارند) بر روی سطح دیوارههای سلول هدایت حرارتـی فـوم را تحت تاثیر قرار میدهند.

در فومهای فلزی تنها پارامتر λ_c در معادله نقش مهمی را ایفا می *کند* و سه پارامتر دیگر در دماهای معمول قابل چشم پوشی است. هدایت حرارتی گاز در درون حفرهها λ_G، در مقایسه با هدایت حرارتی فلز، بسیار کم است. پدیده همرفت تنها در فوم با اندازه حفرهها بزرگتر از ۱۰ میلیمتر که در دمای محیط با هوا پر شدهاند، اثر قابل توجهی دارد و از آنجا که اندازه حفرهها فوم های فلزی به طور معمول خیلی کوچکتر از این مقدار است، میتوان از همرفت چشم پوشی کرد. هنگامی که هدایت حرارتی دیواره های سلول بیشتر از ^{۲۰} K^{-۱} W m⁻¹ K بست، میتوان از تاثیر تابش دیواره های سلول در این رابطه صرفنظر کرد. در نهایت میتوان گفت هدایت حرارتی نیز مانند هدایت الکتریکی به دانسیته نسبی فوم بستگی دارد [۲].

1-3-2-1 انتفال حرارت جابجایی

به طور کلی ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم های متشکل از محیط های متخلخل بیشتراست. علت این امر در پژوهش ها و مقالات مختلف بیشتر بودن هدایت حرارتی ماتریس متخلخل در مقایسه با سیالات ذکر شده است. محیط های متخلخل کاربرد های مختلف صنعتی و ژئو فیزیکی زیادی دارند که از مهمترین آنها میتوان به استفاده از این محیطها در سیستمهای انرژی مانند مبدلهای حرارتی فشرده ، لولههای حرارتی ، خنکسازی و سایل الکترونیکی و کلکتورهای خورشیدی اشاره کرد.

در برخی موارد پرکردن سیستم با محیط متخلخل جهت بهبود انتقال حرارت لزومی ندارد. با توجه به این که در سیستمهایی که سیالات جریان دارند، قرار گرفتن محیط متخلخل در مسیر جریان سبب ایجاد افت فشار در حرکت سیال نیز می گردد ، در بسیاری از موارد قرار دادن محیط متخلخل در نیمی از سیستم جهت افزایش انتقال حرارت کفایت مینماید. وجود محیط متخلخل در مسیر جریان سیال، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی موثر جریان را بهبود داده و هم چنینی ماتریس متخلخل جامد سرعت انتقال حرارت تشعشعی را به خصوص در سیستم هایی که گاز جریان دارد، افزایش می-دهد. به طور کلی بهبود انتقال حرارت توسط محیط های متخلخل با سه مکانیزم عمده صورت میگیرد. ۱. توزیع و پخش سیال در سیستم و ایجاد هم زدگی و کاهش ضخامت لایه مرزی ۲. بهبود هدایت حرارتی موثر جریان ۳. افزایش میزان تشعشع محیط

1-4- کاربرد های محیط متخلخل در انتقال حرارت

انتقال حرارت و به طور کلی پدیده های انتقال در محیط های متخلخل فرایندهای مهمی در بسیاری از کاربردی مهندسی به شمار می رود.بسیاری از قوم های رسانای مسی یا آلومینیومی می توانند به عنوان مبادله کننده های حرارتی استفاده شوند. در این مورد ، ساختار های با تخلخل باز نیاز می باشند ، حرارت میتواند در فوم جابجا شده وبه گازها یا مایع هایی اضافه شود و فوم را همزمان گرم یا سرد کند. از مهم ترین کاربرد های این فرایندها میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- مبدل های حرارتی دارای ماتریس متخلخل ۲. کالکتورهای خورشیدی با جاذب های متخلخل ۳. بازیابی انرژی زمین گرمایی ۴. افزایش بهره برداری در مخازن نفتی ۵. لوله های گرمایی متخلخل ۶. راکتور های شیمیایی ۷. بستر های کاتالیستی متخلخل ۸. خنک کردن وسایل و تجهیزات الکترونیکی ۹. خشک نمودن مواد غذایی (انبار ها و مخازن ذخیره دانه های غلات) ۱۰. يېل سوختې ۱۱. پراکندگی آلاینده ها در منابع زیر زمینی
 - ۱۲. جریان خون در شش های بدن

۱۳. کابل های الکتریکی مدفون در زمین

این کاربردهای گوناگون توجه بسیاری از مهندسین و محققین در زمینه های مختلف علوم را به خود جلب کرده است. از اهداف اصلی مدیریت انرژی، ارتقا و بهبود میزان انتقال حرارت در بسیاری از تجهیزات مهندسی و کاربردهای ذکر شده میباشد.

محیط های متخلخل سطح تماس زیادی با سیالات دارند، که این امر سبب افزایش انتقال حرارت می شود.این محیطها علاوه بر این که شرایط هیدرودینامیک جریان سیال را تغییر داده و سبب کم شدن ضخامت لایه مرزی جریان می شوند، می توانند دارای هدایت حرارتی بیش تری نسبت به سیال کاری سیستم باشند. بنابراین با قرار گرفتن یک ماتریس متخلخل در کانال های جریان سیال، عملکرد حرارتی سیستم به طور موثری بهبود می یابد.

۲- فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته

مواد متخلخل موادی هستند با چگالی پایین، سطح ویژه زیاد، رسانندگی حرارتی خوب و قابلیت جذب و ذخیرهی انرژی [۱]. اخیرا ماده متخلخل به دلیل ویژگیهای خاص خود در عبور جریان سیال، مورد توجه زیادی قرار گرفته است و کاربردهای بسیاری در کارهای مهندسی پیدا کرده است. از جمله این کاربردها می توان مبدلهای گرمایی، خنککنها، خشککنها، فیلتراسیون، علم هوا فضا، خودروسازی، ساختمان سازی، صنایع پالایشگاهی و پیلهای سوختی را نام برد [۳, ۴]. در اغلب کارهای انجام شده الگوی جریان، نرخ انتقال حرارت و افت فشار در کانالهای حاوی ماده متخلخل به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده شدهاند [۵

مدل جریان دارسی، روشی برای مـدلسـازی جریـان آرام جابجـایی از محـیط متخلخـل درون کانال است[۱۳–۱۶]. مدل های دارسی برینکمن و دارسی فورچیمر بهبودیافتهی مدل جریـان دارسـی هستند که برای در نظر گرفتن اثرات دیواره واینرسی سیال به آن اضافه شده است[۱۷–۲۱].

جن [۲۲] کانال مستطیلی سه بعدی با محیط متخلخل ورودی را به روش عددی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش برای سیال از معادله ناویر استوکس و برای قسمت متخلخل از معادلات میانگین حجمی ناویر استوکس استفاده شده است. همچنین از روش ورتیسیته- سرعت برای حل عددی استفاده شده است. جن در این پژوهش نتیجه گرفت که محیط متخلخل باعث تغییر پروفیل-های دما و سرعت میشود، و افزایش نسبت محیط متخلخل باعث افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک میشود.

شکوهمند [۳۳] در سال ۲۰۱۱ انتقال حرارت جابجایی و جریان آرام را در کانال با محیط متخلخل ورودی به روش عددی شبکه بولتزمن بررسی کرد. در این پژوهش دو آرایش ماده متخلخل مورد مطالعه قرار گرفت که در یکی ماده متخلخل به دیواره کانال چسبیده است و در دیگری در وسط کانال قرار دارد. همچنین تأثیر پارامترهایی چون عدد دارسی، ضخامت ماده متخلخل و نسبت هدایت گرمایی مؤثر در این پژوهش بررسی شد. نتایج این کار نشان می دهد برای عدد دارسی و نسبت هدایت گرمایی مؤثر بالاتر محیط متخلخل در کنار دیوار مناسبتر است و در حالت جریان با عدد دارسی و نسبت هدایت گرمایی مؤثر پایین محیط متخلخل در مرکز کانال مناسبتر است.

البانکی [۲۴] از روش آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک نمونه از فوم با جنس نیکل پرداخته است. نتایج وی نشاندهنده افزایش افت فشار در نمونه نیکلی نسبت به بقیه نمونهها است. همچنین افزایش انتقال حرارت نیز با همین روند در نمونه با جنس نیکل مشاهده شده است.

نبالی [۲۵] در سال ۲۰۱۱ انتقال حرارت در کانال با بلوکه ای متخلخل را به روش عددی حجم محدود بررسی کرد. او در این تحقیق از سیال غیرنیوتنی استفاده کرده و همچنین در این پژوهش دو آرایش متفاوت را مورد مطالعه قرار داده است، یکی آرایش یکبلوکه و دیگری آرایش دو-بلوکه که بترتیب بر روی دیوار بالایی و پایینی کانال قرار داده شدهاند. تآثیر پارامترهای مختلف از جمله عدد دارسی، عدد رینولدز، ضریب پاورلو و نسبت هدایت حرارتی بر الگوی جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. طبق این پژوهش یافت شد که سیالات شبه پلاستیک برای هر دو آرایش، بالاترین نرخ انتقال حرارت و کمترین افت فشار را دارند. نتایج نشان میدهد که از دید انتقال حرارت

ایاکاوا و مابوچی [۲۶] جریان و انتقال حرارت توسعه یافته سیال را بین دو صفحه تخت شامل یک سیلندر متخلخل را به صورت تجربی مطالعه کردند. مطالعه آنها برای نسبت قطر سیلندر به ارتفاع کانال بین ۲/۴ تا ۸/۸ بود. در این تحقیق اثر نسبت قطر سیلندر به ارتفاع کانال بر روی ضریب انتقال حرارت موضعی بررسی گردیده است و یک رابطه تجربی برای محاسبه انتقال حرارت در کل میدان جریان ارائه شده است.

جیانگ [۲۷] به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی جریان آب در یک کانال متخلخل از جنس برنز پرداخته است. نتایج وی نشانگر افزایش ضریب جابجایی انتقال حرارت با افزایش دبی میباشد. این افزایش با افزایش تعداد ذرات جامد نیز مشاهده شده است.

جیانگ و همکاران [۲۸] به صورت آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی اجباری آب و هوا را در یک کانال متخلخل تحت شار ثابت را بررسی نمودهاند.آنها تاثیر سرعت سیال، اندازه ذرات جامد، نوع ماده متخلخل و نوع سیال را مورد بررسی قرار دادهاند. آرایش مسئله مورد مطالعه در این آزمایش در شکل ۲-۱ دیده می شود.



شکل ۲-۲ نمونه محیط متخلخل مورد استفاده[۲۸]

نیمواری و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۲ کانال که قسمتی از آن با محیط متخلخل پر شده را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادن. آنها رژیم جریان آشفته مطالعه کرده و همچنین از فرض توسعه یافتگی برای ثابتها در خروجی استفاده کردند و بر روی دیوارهها نیز شار ثابت اعمال کردند. در این پژوهش از دو آرایش مرزی و مرکزی برای قرار دادن ماده متخلخل درون کانال استفاده شده است. همچنین از ناسلت مؤثر برای نشان دادن همزمان تغیرات عدد ناسلت و افت فشار با قرار دادن ماده متخلخل درون کانال استفاده شده

کولاد و همکاران [۳۰] حرکت سیال از مسیر بین دو ردیف مجاور از سیلندر های تکرار شونده با اندازههای متفاوت با مقطع مربعی یا مثلثی را با فرض اینکه محیط متخلخل از تعداد زیادی سیلندر در ردیفهایی با ساختار منظم تشکیل شده است، محاسبه کردند. آنها از روش الملان محدود برای گسستهسازی معادلات ناویر استوکس استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که برای اعداد رینولدز کوچکتر از یک، افت فشار در طول محیط متخلخل خطی است و با افزایش رینولدز یک ترم غیرخطی مربعی که توصیف گر اثرات اینرسی است، به معادله دارسی باید اضافه گردد. آنها در تحقیق خود رابطهای برای ثابت این ترم غیرخطی ، براساس تخلخل و دیگر مشخصات هندسی ارائه کردند.

بوگدان و عبدالمجید محمد [۳۱] توانایی ماده متخلخل تزریق شده در یک مبدل حرارتی به صورت یک لوله در افزایش انتقال حرارت را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. آنها در این پژوهش شار حرارتی ثابت بر روی دیواره مبدل اعمال کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت ماده متخلخل ورودی ،کاهش تخلخل ماده و افزایش هدایت گرمایی باعث بهبود انتقال حرارت میشود. همچنین افزایش نسبت ماده متخلخل ورودی و کاهش تخلخل ماده تأثیر منفی بر روی افت فشار و توان پمپاژ می گذارد.

کورتباس و همکاران [۳۲] نیز با روش آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی (اجباری و طبیعی) در کانال مربعی پرشده با فوم آلومینیومی پرداخته است. نتایج نشان گر افزایش ناگهانی عدد ناسلت پس از گذر از عدد رینولدز بحرانی تعریف شده است.

تارگو [۳۳] نیز مبدل دولوله ای با صفحات متخلخل را به روش عددی حجم محدود بررسی کرد. او دو آرایش انتخاب کرد که در یک حالت همه صفحات متخلخل را بر روی دیـواره بیرونـی لولـه داخلی قرار داد و در حالت دوم این صفحات را به صورت متناوب بر روی دیواره خارجی لولـه داخلـی و دیواره داخلی لوله بیرونی قرار داد و نتایج را با هم مقایسه کرد. همچنین در این پژوهش برای به دست آوردن نقطه بهینه هم از دید انتقال حرارت و هم از دید افت فشار، ناسلت تعمیم یافتـه محاسـبه شـده هوانگ و یانگ [۳۴] یک کانال را بررسی کردند که در آن دو بلوک متخلخل در قسمتی از دیوار که شار ثابت بر آن اعمال شده قرار داده شده است. همچنین سرعت جریان در ورودی متناوب در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده استفاده از ماده متخلخل برای خنک کاری نقاط داغ قطعات الکترونیکی، سودمند است.

بالویی و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۲ یک خنک کننده هوا را که در آن محیط متخلخل قرار داده شده و در مرکز آن شار حرارتی ثابت وجود دارد را بررسی کردند.

جرود [۳۶] نیز از بلوک های ذوزنقه ای با مقطع متغیر برای خنک کاری نقاط داغ در کانال استفاده کرد. همانطور که در نتایج این پژوهش مشاهده می شود که ساختار جریان تحت تأثیر این بلوک های متخلخل قرار می گیرد و در پشت بلوک ها جریان های چرخشی بوجود می آید. قدرت و طول این گردابه ها شدیدا وابسته است به شدت نیروی شناوری، عدد رینولدز و مشخصات بلوک های متخلخل (شکل، ارتفاع، نفوذپذیری و نسبت هدایت گرمایی). شکل مثلثی برای مقدارهای پایین عدد دارسی، عدد رینولدز، ارتفاع بلوک های متخلخل و نسبت هدایت گرمایی، بالاترین میزان نرخ انتقال

هیه [۳۷] بوسیله روش آزمایشگاهی مطالعهای بر روی تاثیر تخلخل، سایز حفرهها، سرعت سیال بر روی کارکرد حرارتی فوم فلزی آلومینیوم پرداخته است. نتایج وی نمایانگر افزایش انتقال حرارت با افزایش چگالی حفرهها در ماده متخلخل است. این افزایش میتواند در اثر افزایش سطح حرارتی باشد.

هوانگ و همکاران [۳۸] کانال عمودی با بلوکهای متخلخل در قسمتهای گرم شده را از نظر حرارتی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز، عدد گراشف، نسبت هدایت گرمایی و ارتفاع بی بعد بلوکهای متخلخل افزایش می یابد در صورتیکه عدد دارسی یک مقدار بحرانی دارد که در آن انتقال حرارت بیشترین مقدار را دارد. مارتین و همکاران [۳۹] جریان وانتقال حرارت در مجموعه تکرار شونده از سیلندرها در آرایشی مثلثی و مربعی تحت شرایط جریان مقطعی آرام مطالعه کردند. در این مطالعه تخلخل از ۸/۰ تا ۰/۹۹ و عدد رینولدز از ۳ تا ۱۶۰ متغیر بود و شرط مرزی دما ثابت و شار حرارتی ثابت برای سطح جامد استفاده شده است. آنها در تحقیق خود بر اعتبار حل دارسی برای اعداد رینولدز از مرتبه یک، صحه گذاشتند، اما نشان دادند برای اعداد رینولدز بالاتر ضرایب فورچیمر و ارگان در محیطهای متخلخل با تخلخل بالا (تخلخل بالاتر از ۰/۹) تا ۴۰٪ خطا به همراه دارد.

چن و همکاران [۴۰] نیز خنککاری نقاط داغ توسط مبدل با فوم فلزی متخلخل ورودی به صورت متناوب را انجام دادهاند. اصلیترین نتایجی که در این پژوهش بدست آمده است عبارتند از: مقایسه توزیع دما محلی در طول صفحه گرم شده در حالات با ماده متخلخل و بدون ماده متخلخل نشان میدهد بهبود سرمایش قابل توجهی برای مبدل را نشان میدهد که با قرار دادن فوم فلزی متخلخل بدست میآید.

1-1- تعريف مساله

هدف از این پژوهش بررسی انتقال حرارت در لوله با ماده متخلخل تزریق شده میباشد. متغیرها، فرضهای ساده کننده و شرایط مرزی از جمله عواملی هستند که با تغییر آنها نرخ انتقال حرارت در لوله می تواند تغییر کند.

در این پژوهش آرایش مسئله لولهای است افقی به قطر ۲۰۰ میلیمتر و طول ۲ متر که به صورت دوبعدی متقارن محوری مورد مطالعه قرار گرفته شده است. رژیم جریان آرام و سیال نیوتنی در نظر گرفته شده است. ماده متخلخل به صورت کاملا پر و نیمه پر در آرایشهای مختلف درون لوله قرار داده می شود. برای همه ی آرایش ها میزان تخلخل و عدد رینول دز ثابت و به ترتیب برابر ۹/۰ و ۲۰۰ است. ۲۰ میزان نفوذ پذیری سیال در ماده متخلخل است که با عدد دارسی جریان رابطه مستقیم دارد. بنابراین برای بررسی تأثیر نفوذ پذیری که یک خاصیت ماده متخلخل است جریان سیال را برای سه عدد دارسی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ بررسی میشود. همچنین پارامتر مهم دیگر که تأثیر عمدهای بر نرخ انتقال حرارت درون لوله دارد، هدایت گرمایی ماده متخلخل میباشد. به منظور این کار ^{*}لمرا تعریف میشود که نسبت هدایت گرمایی مؤثر k_{eff} به هدایت گرمایی سیال k_f است. این پژوهش را در سه ^{*} مختلف ۱/۴، ۶ و ۱۰ بررسی میشود. بر روی دیواره ی لوله شار حرارتی ثابت اعمال شده است. همچنین در ورودی لوله سرعت و دما بصورت یکنواخت اعمال شده است.

۲-۲- جنبههای نوآوری

در این تحقیق لوله با ماده متخلخل وروردی با جریان جابجایی اجباری بررسی می شود که بر خلاف کارهای متداول انجام شده در لوله که یک آرایش خاص را به صورت عددی یا آزمایشگاهی بررسی کردهاند، بررسی و مقایسه آرایش های مختلف ماده متخلخل وروردی در رژیم جریان آرام و با شرط شار حرارتی ثابت روی دیوار، انجام گرفته است.

- ✓ این پروژه برای سه نسبت هدایت حرارتی مختلف برای حالت جریان آرام درون لوله با شار
 حرارتی ثابت بررسی شده است.
- ✓ دو آرایش جدید ماده متخلخل به صورت رینگ و شیار در این تحقیق مدلسازی و بررسی
 شده است که نتایج آن با آرایشهای مرزی و مرکزی متداول مقایسه شده است.
- ✓ در این پژوهش برای بررسی همزمان انتقال حرارت و افت فشار ایجاد شده، عـلاوه بـر ناسـلت تعمیم یافته استفاده شده در کارهای گذشته، میزان نرخ انتقال حرارت در توان پمپاژ برابر نیـز بررسی شده که نوآوری اصلی این پژوهش محسوب میشود.

۳-فصل سوم: معادلات حاکم و انتقال حرارت در محیط متخلخل

۳-۱- جریان سیال در محیط متخلخل

جریان جابجایی اجباری در ماده متخلخل درون لوله، یک مسئله کلاسیک و با اهمیت در سیالات میباشد که در بسیاری از مراجع به آن توجه شده و مقالات، کتابها و پایاننامههای بسیاری در این رابطه به چاپ رسیده است [۳, ۴].

به دلیل کاربردهایی که این موضوع در بیومکانیک و مسائل نظامی دارد، در این صنایع نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با این همه به نظر میرسد در رابطه با مسائل کاربردی ولی پیچیده این مبحث و با توجه به تأثیر وابستگی ویسکوزیته به دما در تحلیل این جریان، هنوز اطلاعات کمی در این مورد در دسترس است.

مقصود از ماده متخلخل، مادهای است که از یک قالب جامد، با حفرههای خالی تشکیل شده است. در این حالت فرض می شود که قالب جامد ساختار محکمی داشته و تغیر شکل اندکی را تحمل می کند. حفرههای خالی که از داخل به هم متصل شدهاند مسیر حرکت عبور جریان یک یا چند جریان را از داخل ماده متخلخل بوجود می آورند. در ساده ترین حالت (جریان تک فازی) فضای خالی فقط توسط یک سیال اشباع می شود. در جریان دوفازی یک گاز و یک مایع در فضای خالی با هم جریان می یابند.

در یک محیط متخلخل طبیعی توزیع حفرهها از لحاظ شکل و اندازه نامنظم میباشد. مثال-هایی از محیطهای متخلخل طبیعی در طبیعت شنهای ساحلی، سنگهای شنی، سنگهای آهکی، چوب و در مسایل بیو مکانیکی ریه انسان میباشد. (شکل ۳-۱)


شکل ۳-۱ نمونههایی از محیطهای متخلخل به ترتیب حروف: شن ساحلی، ماسه سنگی، سنگ آهک، نون گندم، چوب و ریه انسان. شکلهای پایین: ماده متخلخل دانهای استفاده شده در ساخت صنعتی (سمت چپ)، سنگ آهک ریز شده در اندازههای ۱ سانتیمتری (سمت راست) [۴۱].

۳-1-1- تخلخل

تخلخل ^۱ در واقع نسبت فضای خالی به کل فضای ماده متخلخل است که هر چه به صفر نزدیک شود ماده به حالت جامد نزدیک می شود. برای یک ماده همگن، تخلخل سطحی(یعنی نسبت سطح حفرهها به سطح کل بخش برش خورده نمونه) به صورت معمول برابر ٤ خواهد بود. با تعریف ٤

¹ Porosity

به صورت بالا، فضاهای خالی به هم متصل فرض می شوند. هنگامی که در واقعیت با مادهای سروکار داشته باشید که مقداری از فضای خالی با سایر فضاهای خالی اش به هم پیوسته نباشد ، باید یک ضریب اثر تخلخل به صورت فضاهای خالی به هم متصل، به کل فضاهای خالی معرفی شود. برای یک محیط طبیعی ع به صورت معمول از ۲/۰ تجاوز نمی کند. برای بستری از ذرات کروی جامد با قطر ثابت، ع می تواند در محدوده ۵۲۰/۰ تا ۲۹۶۴/۰ تغییر کند. یکسان نبودن اندازه ذرات باعث ایجاد تخلخلهای کوچکتر نسبت به ذرات یکسان می شود زیرا ذرات کوچکتر فضای خالی ایجاد شده توسط ذرات بزرگتر را پر می کنند. برای مواد ساخته دست انسان مانند اسفنجهای فلزی ع می تواند به مقدار یک نیز نزدیک شود[۴۱].

۳-۱-۲- نفوذپذیری(تراوایی)

نفوذپذیری^۱ (K) یک ماده مقداری است که توانایی ماده برای عبور سیال از درون خود را نشان میدهد. در جدول ۳-۱، تخلخل و تراوایی برخی محیطهای متخلخل متداول آورده شده است. همچنین نفوذپذیری رابطه مستقیم با عدد دارسی دارد که از رابطه زیر به دست میآید:

$$Da = \frac{K}{D^2} \tag{1-7}$$

در مقیاس میکروسکوپیک مقادیر جریان (سرعت ، فشار و …)کاملا نامنظم هستند. اما در آزمایشهای عملی معمولا از مقادیر میانگین گرفته شده بر روی سطحی که شامل فضاهای خالی زیادی است، استفاده میشود. این مقادیر ماکروسکوپیک نسبت به مکان و زمان، منظم تغییر میکنند ومیتوانند در معادلات نظری به کار برده شوند.

¹ Permeability

تراوایی	تخلخل ٤	مادہ
4.9×1	۰.۶۶ – ۰.۵۷	آجر
	•.۴۹ -•.۱۷	فيلتر سيگار
	•.17 -•.•7	ذغال سنگ
) ×) • ⁻⁹ –) .	• .1	بتون
	۰.۳۴ –۰.۰۹	پودر مس
$Y.Y \times 1 \cdot ^{-Y} - \Delta.1 \times 1 \cdot ^{-Y}$		چوب پنبه
	۸۸. ۰۰ – ۳۴. ۰	پشم شيشه
	۵۹.۰۹ – ۹۹.۰	مو
$9.\Delta \times 1 \cdot \cdot \cdot \cdot - 1.7 \times 1 \cdot \cdot ^{-9}$	۰.۵۹ - ۹۵. •	چرم
$\mathbf{Y} \times \mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^{-1} - \mathbf{F} \cdot 0 \times \mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^{-1}$	•.1 -•.•4	سنگ آهک
$Y \times I \cdot V - I \cdot \Lambda \times I \cdot V$	۳۷. • – ۵. •	ماسه
$\Delta \times 1 \cdot 1^{-17} - 7 \times 1 \cdot 1^{-\lambda}$	۰.۳۸ – ۰.۰۸	سنگ ماسه (ماسه نفتی)
$1. \mathbf{r} \times 1 \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{-} \Delta \cdot 1 \times 1 \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot$	۲۲. ۰ – ۴۹. ۰	پودر سيليكا
۲.9×۱۰ ^{-۹} -۱.۴×۱۰ ^{-۷}	۳۴. ۰ – ۴۵. ۰	خاک
Υ . $\Lambda \times I \cdot {}^{-\Delta} - I \times I \cdot {}^{-F}$	• .YF -• .FA	سيم پيچ

جدول ۲-۳ تخلخل و تراوایی برخی مواد متخلخل

اینکه جریان داخل یک ساختار متخلخل را چگونه بررسی شود بستگی مستقیم به فاصله ی مشاهده گر وساختار جریان دارد. هنگامی که فاصله کم است، مشاهده گر فقط یک یا دو کانال یا حفره ی باز یا بسته را میبیند، در این مورد میتوان از معادلات متداول مکانیک سیالات وانتقال حرارت ، برای توضیح اینکه چه پدیده ای در هر نقطه رخ میدهد، بهره برد. این روش حل را مستقیم مینامیم.

هنگامی که فاصله زیاد است، مشاهده گر تعداد زیادی کانال وحفره میبیند که توضیح آن با استفاده از معادلات متداول، مشکلات زیادی به همراه دارد. در این حالت استفاده از متوسط گیری های



حجمی و اندازه گیری کلی می تواند به ساده سازی حل کمک نماید [۴۲].

شکل ۳-۲حجم بنیادی نمونه R.E.V [۴۲]

دو روش برای میانگین گیری وجود دارد: فضایی(سه بعدی) و آماری. در روش فضایی یک متغیر ماکروسکوپی، به صورت میانگین مناسب در سراسر یک حجم بنیادی نمونه ^۱ (R.E.V) که به اندازه کافی بزرگ باشد و در مرکز ثقل این حجم بیان میشود. مقیاس طولی R.E.V خیلی بزرگتر از مقیاس میکروسکوپی است، اما به طور قابل ملاحظهای کوچکتر از مقیاس طولی محدوده جریان ماکروسکوپی است.(شکل ۳-۲)

روش آماری میانگین گیری در سراسر یک مجموعه یک مجموعه از ساختارهای دقیق ممکن که به صورت ماکروسکوپی معادل میباشند انجام میشود. مسئله اینجاست که معمولا اطلاعات آماری درباره یک مجموعه باید بر اساس یک مثال منفرد باشد و این تنها در صورتی ممکن است که یکسان سازی آماری شده باشد.

اگر فقط به دست آوردن رابطه ای بین کمیت های فضایی مد نظر باشد و نوسانات آنها مهم

¹ Representative elementary volume

نباشد، نتایج به دست آمده از هر دو روش در واقع یکسان می باشد، بنابر این میتوان از روش ساده تر استفاده کرد، یعنی روشی که بر پایه R.E.V میباشد. در سالهای اخیر مسائل زیادی پیش آمدهاند که نیاز به روشهای آماری دارند.

۳-۱-۳- سرعت دارسی و معادله پیوستگی

همانطور که بیان شد برای محیط متخلخل یک مدل پیوسته بر اساس R.E.V طرح ریزی گردید. حال با معرفی یک دستگاه مرجع و توجه به مولفههای حجم که در مقایسه با حجمهای دقیق (میکروسکوپی) به مقدار کافی بزرگ هستند، میانگینهای حجمی معتبری به دست میآید، که یک برتری آشکار بین میانگین گرفته شده با توجه به عنصر حجمی mV از ماده (تلفیق بخش جامد و سیال ماده) نسبت به میانگین به دست آمده با توجه به عامل حجم Vf (تشکیل شده از سیال تنها) وجود دارد. میانگین سرعت سیال در سراسر mV با بردار (u,v,w)=V نشان داده می شود. این کمیت توسط افراد مختلف نامهای متفاوتی گرفته است مانند سرعت نفوذ، سرعت ظاهری، سرعت دارسی^۲ و س، که در اینجا از سرعت دارسی استفاده می شود. برای گرفتن میانگین سرعت سیال در سراسر حجم Vf سرعت میانگین وابسته به (u,v,w)=V با رابطه دویویت-فورچیمر به دست میآید. [۴۲]

$$\vec{v} = \varepsilon \vec{V} \tag{(Y-T)}$$

$$\varepsilon \, \frac{\partial y}{\partial x} + \nabla . (\rho_f \vec{v}) = 0 \tag{7-7}$$

¹ Darcy velocity

معادلات حاکم برای جریان سیال از سه اصل بقا و معادلات مشتق شده از آنها به دست می-آید این سه اصل به شرح زیر است:

- بقا جرم (معادله پیوستگی)
- بقا مومنتوم (معادله مومنتوم)
 - بقا انرژی (معادله انرژی)

۲-۳ فرمهای مختلف معادله مومنتوم در محیط متخلخل

3-2-1-1 معادله مومنتوم برای حل به روش مستقیم

معادله مومنتوم برای حل به روش مستقیم همان معادله ناویر –استوکس ^۱ میباشد که برای حل شدن، نیاز است همزمان معادلهی پیوستگی نیز حل شود. از آنجا که سیال مورد استفاده در این پژوهش سیال غیر قابل تراکم در نظر گرفته میشود، صورت تانسوری معادلات پیوستگی وناویر – استوکس به صورت زیر در میآیند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$
(f-r)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + \rho b_i$$

که معادله ((۳-۴) معادله پیوستگی ومعادله (۵-۳) معادله مومنتوم برای سرعت جهت i ام میباشد. همچنین p چگالی، bi نیروی حجمی در جهت xi و من تنسور تنش میباشد. به طور کلی تانسور تنش را میتوان به دو بخش همگن (فشار) و ناهمگن (تنشهای انحرافی) به صورت زیر تقسیم کرد :

¹ Navier-Stokes

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \tau_{ij} \tag{(9-7)}$$

که σ_{ij} تانسور یکه ، P فشار و τ_{ij} تنش انحرافی هستند. برای سیال نیوتنی تنشهای انحرافی به صورت زیر بیان می شود.

$$\tau_{ij} = \mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$$
(Y-T)

همانطور که از مجموعه معادلات ((۳-۴) و (۳-۵) پیداست، معادله پیوستگی تنها یک قید ریاضی برای حل جریان محسوب میشود و بیان می کند اگر از میدان فشار درستی در حل معادلات مومنتوم استفاده شود، میدان سرعت بدست آمده فاقد دیورژانس خواهد بود. بنابراین برای حل دستگاه معادلات ((۳-۴) و (۳-۵) نیاز به معادلهای برای تکامل فشار وجود دارد. روشهای مختلفی برای غلبه بر این مشکل بوجود آمده است که روشهای پرتابی، جز روشهای بسیار پرکاربرد و متداول در میان آنهاست. در این روشها در ابتدا میدان سرعت تشکیل میشود (البته این میدان سرعت معادله

2-3-4 معادلات مومنتوم برای حل به روش غیرمستقیم

در اینجا فرمهای مختلفی از معادله مومنتوم که در حقیقت مشابه معادلات ناویر - استوکس در محیط متخلخل است ذکر می شود. ابتدا از نیرو های حجمی از قبیل گرانش صرف نظر کرده سپس، در مرحله بعد می توان آن ها را به معادلات اضافه کرد.

هنری دارسی مطالعاتی را برروی جریان پایدار در یک محیط یکنواخت انجام داد وبه این نتیجه رسید که بین اختلاف فشار اعمال شده و نرخ جریان ، نسبتی وجود دارد.این نسبت با رابطه زیر نشان داده میشود:

$$u = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \tag{A-m}$$

 $\frac{\partial P}{\partial x}$ ، گرادیان فشار در جهت جریان است و μ لزجت مکانیکی سیال است. ضریب K مستقل از جریان بوده و به آرایش محیط بستگی دارد. این ضریب دارای بعد (طول) است و نفوذپذیری نامیده می شود.

در مسائل سه بعدی معادله بالا به فرم زیر در میآید:

 $\vec{v} = -\mu^{-1}K.\nabla P$ (۹-۳) بنابراین در حالت کلی K یه تانسور مرتبه دو است؛ اما در حالتی که محیط همسانگرد['] باشد،

نفوذپدیری کمیتی اسکالر بوده و معادله بالا به صورت زیر ساده می شود:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{v} \tag{1.-7}$$

مقدار K برای موارد گوناگون بسیار متفاوت است که به عنوان نمونه در جدول ۳-۱ برای برخی موارد مقدار آن آورده شده است.

وودینگ [۴۳] بسط معادله ((۱۰-۳)) را به صورت زیر نوشت : $\rho_{f} \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{V} \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$ (۱۱-۳)
با جایگذاری معادله ((۲-۳))داریم :

 $\frac{\rho_{f}}{\varepsilon} \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$ Istimute of the state of the state

¹ Isotropic

² Drag

خطی ناشی از اثرات اینرسی نیست. هم چنین بچلر [۴۵] نشان داد ترم باقی مانده نیز بطور کامل معرف جریان سیال نیست و معادله خود را به فرم زیر نشان داد:

$$ho_f c_a \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$$
 (۱۳-۳)
که C_a تانسور ثابتی است که شدیدا به آرایش محیط متخلخل بستگی دارد.

معادله دارسی ((۳-۹) با سرعت تراوش خطی است .این فرض همگامی که سرعت تراوش به اندازه کافی کوچک باشد برقرار است.در عمل "به اندازه کافی کوچک" یعنی عدد رینولدز جریان Rep، براساس قطر ذرات یا حفرهها، ازمرتبه یک یا کوچکتر باشد. با افزایش انتقال ملایمی به سـمت پسـای غیر خطی داریم، درحالیکه جریان هنوز آرام است. این تغییر در خطی بودن به ایـن علـت اسـت کـه پسای شکلی حاصل از موانع جامد با پسای سطحی ناشی از اصطکاک قابل قیاس می شود(شکل ۳-۳)

جوزف و همکاران [۴۶] معادله دارسی اصلاح شده را به صورت زیر پیشنهاد دادند:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{v} - \frac{\rho_f c_F}{\sqrt{K}} |\vec{v}| \vec{v}$$
⁽¹⁴⁻⁷⁾

که C_f ضریب بی بعد پسای شکلی و تابع ضریب تخلخل است.



شکل ۳-۳ عبور از ناحیه عبور از ناحیه دارسی به ناحیه فورچیمر برای یک محیط متخلخل ایزوتروپ همگن [۴۷] شکل ۳-۳ عبور از ناحیه دارسی به ناحیه فورچیمر^۱ را نشان میدهد. دادهها برای جریان یک بعدی (۷ در جهت ۲) همدما است. ضریب اصطکاک f_k وعدد رینولدز بر حسب $K^{0.5}$ به عنوان مقیاس طول نوشته شدهاند. شکل ۳-۳ نشان میدهد که انتقال^۲ در ناحیه رینولدز ۱ الی ۱۰رخ میدهد. برای رینولدزهای بالاتر پسای شکلی غالب است. هنگامی که جریان در مقیاس حفرهها میشود، ضریب C_f

وارد [۴۷] تصور می کرد، این یک ضریب جهانی است و دارای مقدار تقریبی ۵۵/۰ میباشد. این ضریب توسط ارگان [۴۸] به صورت زیر محاسبه شده است :

$$c_F = \frac{1.75}{\sqrt{150}} \varepsilon^{-3/2} \tag{12-7}$$

در جدول زیر مقادیر ضریب فورچیمر توسط محققین مختلف ارائه شده است :

¹ Forchheimer

² Transition

C _f	محققين
•/۵۵	وارد [۴۷]
$c_F = \frac{1.75}{\sqrt{150}} \varepsilon^{-3/2}$	ارگان [۴۸]
$c_F = 0.55(1 - 0.55\frac{d}{D_e})$	بیورز و همکاران[۴۹]
$D_e = \frac{2wh}{w+h}$	

جدول ۳-۲ ضريب فورچيمر

که d قطر ذرات (ذرات جامد را به صورت کره فرض کردند) ؛ w و h به ترتیب عرض و ارتفاع کانال می باشد.

معادلهی جایگزین دیگری برای معادله دارسی، معمولا معادله برینکمن نامیده میشود. با حذف ترمهای اینرسی معادله برینکمن به صورت زیر نوشته میشود :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{v} + \tilde{\mu}\nabla^2\vec{v} \tag{19-7}$$

در این معادله دو ترم لزجتی ظاهر شده است. اولی تـرم دارسـی متـداول اسـت و دومـی تـرم لاپلاسینی که در معادله ناویر-استوکس ظاهر میشود. آ ضریب لزجت موثر است که در حالت کلی بـا م متفاوت است. براسـاس نتـایج دورلوفسـکی و بـردی [۵۰] و همچنـین رابـین اسـتن [۵۱] ، جملـه برینکمن برای مواد متخلخل با ضریب تخلخل بالای ۸/۰ مورد استفاده قرار می گیرد. جمله دارسـی در همه ی مواد متخلخل در سرعتهای کم مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیـرد؛ در رینولـدزهای بـالاتر از ۱۰ بایستی از جمله فورچیمر به همراه دارسی استفاده کرد .

۳-۳- فرمهای مختلف معادله انرژی در محیط متخلخل

در این قسمت ما بر روی معادله ای که قانون اول ترمودینامیک را در محیط متخلخل نشان دهد، تمرکز میشود. همچنین برای سادگی فرض میشود، محیط همسانگرد باشد و اثرات تشعشع، پراکندگی لزجی و کار انجام شده توسط تغییرات فشار، قابل صرف نظر باشد. در ابتدا فرض می شود، تعادل ترمودینامیکی موضعی وجود داشته باشد؛ یعنی، که T_s و T_s دما در فاز جامد و سیال است (این فرض زمانی که ذرات جامد کوچک ودارای ضریب هدایت بالا باشند، معتبر است).در اینجا فرض می -شود هدایت حرارتی در فاز سیال و جامد به صورت موازی انجام می شود و انتقال حرارت خالصی بین دو فاز وجود ندارد .

با متوسط گیری روی المانی از محیط، برای فاز جامد داریم:

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_{s} \frac{\partial T_{s}}{\partial t} = (1-\varepsilon)\nabla (k_{s}\nabla T_{s}) + (1-\varepsilon)q_{s}^{"}$$
⁽¹⁾⁽¹⁾

و برای فاز سیال :

$$\varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \varepsilon q_s^{"}$$

در اینجا c، حرارت مخصوص جسم جامد و C_p حرارت مخصوص سیال در فشار ثابت است، k
هدایت حرارتی و " p حرارت تولیدی در واحد حجم است. با قرار دادن و جمع کردن دو معادله اخیـر داریم :

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{v} \cdot \nabla T = \varepsilon \nabla \cdot (k_m \nabla T) + q_m^{"}$$
^(19-T)

که :

$$(\rho c)_m = (1 - \varepsilon)(\rho c)_s + \varepsilon (\rho c_p)_f \tag{(7.-7)}$$

$$k_m = k_{eff} = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_f \tag{(1-7)}$$

$$q_m^{"'} = (1 - \varepsilon)q_s^{"'} + \varepsilon q_f^{"'}$$
(YY-Y)

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon)\nabla (k_s \nabla T_s) + (1-\varepsilon)q_s'' + h(T_f - T_s)$$
(177-7)

$$\varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \varepsilon q_s^{"} + h(T_s - T_f)$$

$$(76-7)$$

$$CF-7$$

$$h = h_{sf} a_{sf} \tag{Ya-Y}$$

روش متوسط گیری	
	روش متوسط گیری

بان عبوری از ماده متخلخل	معادلات مختلف برای ج	۳-۳ خلاصهای از	جدول
--------------------------	----------------------	----------------	------

$\rho_f \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{V} \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$	روش مستقيم	معادله مومنتوم
$\vec{v} = -\mu K.\nabla P$	دارسی	
$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$	وودينگ [۴۳]	
$\rho_f c_a \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{v}$	بچلر [۴۵]	
$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{v} - \frac{\rho_f c_F}{\sqrt{K}} \vec{v} \vec{v}$	جوزف و همکاران [۴۶]	
$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{v} + \tilde{\mu}\nabla^2\vec{v}$	برينكمن	
$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] =$	حالت کلی	
$-\frac{1}{\varepsilon}\nabla(\varepsilon P) - \frac{\mu}{\varepsilon}\nabla^2 \vec{v} - \frac{\mu}{K}\vec{v} - \frac{c_F \rho_f}{\sqrt{K}} \vec{v} \vec{v}$		
	روش مستقيم	معادله انرژي
$\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T_f = \alpha_f \nabla^2 T_f$	فاز سیال	
$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \nabla^2 T_s$	فاز جامد	
$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T)$	با تعادل ترموديناميک موضعی	
$\varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \varepsilon q_s''$		
$+h(T_s-T_f)$	بدون تعادل ترموديناميک	
$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon)\nabla (k_s \nabla T_s) + (1-\varepsilon)q_s^{"}$ $+h(T_f - T_s)$	موضعی	

با توجه به مطالب ارائه شده از آنجائیکه معادلات متوسط گیری شده، جریان میکروسکوپی بین

ذرات جامد را نمی تواند توضیح دهد و همچنین در این مدلها به علت خاصیت متوسط گیری، شرط عدم لغزش بر روی ذرات جامد ارضا نمی شود؛ روش حل مستقیم در پژوهش حاضر استفاده شده است. برای این کار نیز از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است.

برای بررسی نرخ انتقال حرارت جابجایی بین دیوار و سیال از عدد ناسلت متوسط استفاده می-شود. برای محاسبه عدد ناسلت متوسط ابتدا عدد ناسلت محلی از رابطه (۳-۲۶ بدست میآید سپس با معادله ۳-۲۷ ناسلت متوسط محاسبه می شود:

$$Nu = \frac{hD}{k_f} = \frac{2R}{k_f} \cdot \frac{q_w}{T_w - T_m}$$
(YF-W)

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nudz \tag{(Y-T)}$$

در معادلات بالا T_m دمای میانگین مقطع لوله، T_w دمای دیواره و L طول لوله است. همچنـین از رابطهی (۳-۲۸ دمای میانگین محاسبه میشود:

$$T_m = \frac{1}{U_m R^2} \int_0^R u T r dr \tag{YA-W}$$

در رابطه بالا Um سرعت متوسط مقطع لوله است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$U_m = \frac{1}{R^2} \int_0^R ur dr \tag{19-T}$$

3-4- حل عددی معادلات در نرم افزار فلوئنت

به طور کلی نرم افزار فلوئنت دارای دو حل گر کاملا متفاوت بـرای حـل مسـائل مـی باشـد کـه دارای الگوریتم های متفاوتی میباشند:

¹ Pressure Based

۲) چگالی مبنا ٔ

در هر دو روش میدان سرعت از حل معادلات مومنتوم بدست میآید. در روش چگالی مبنا، معادله بقای جرم محاسبه میدان چگالی استفاده می شود در حالیکه توزیع فشار در تمامی نقاط با استفاده از معادله حالت محاسبه می شود. در روش های فشار مبنا، توزیع فشار با حل یک معادله اصلاح شده فشار که از ادغام معادلات بقای جرم و مومنتوم بدست آمده، محاسبه می شود. در هر دو روش فرم انتگرالی معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی و سایر مقادیر اسکالر نظیر توربولانس و ...حل خواهد شد. در هر دو روش از تکنیک حجم محدود استفاده میشود که شامل مراحل زیر است:

- . تقسیم بندی ناحیه حل به حجم های کوچکتر با استفاده از شبکه بندی ناحیه محاسباتی
- ۲. انتگرال گیری معادلات بقا روی هر سلول به منظور دست یابی به رابطه ای جبری برای متغیر های وابسته نظیر سرعت، فشار و دما
- ۳. خطی سازی معادلات گسسته شده و حل سیستم معادلات خطی بدست آمده برای محاسبه مقادیر به روز شده ی متغیر های وابسته نظیر سرعت، فشار ، دما و توربولانس و ...
- ۴. هر دو روش فوق فرایند های یکسانی برای گسسته سازی انجام میدهند اما روند حل معادلات گسسته شده و خطی سازی آنها در هر یک متفاوت است.

3-4-1- الگوريتم فشار - مبنا

روش فشار – مبنا از یک الگوریتم استفاده می کند که متعلق به روش پروجکشن می باشد. در روش پروجکشن با استفاده از حل یک معادله برای فشار، تضمین میکند که قانون بقای جرم در سراسر ناحیه حل ارضا شود. این معادله برای فشار از ادغام معادلات بقای جرم و مومنتوم حاصل می شود. از آنجا که قوانین بقا به صورت غیر خطی می باشند و به یکدگیر کوپل می باشند لذا فرآیند حل به صورت تکراری میباشد.

¹ Density Based

روشهای فشار – مبنا نیز به نوبه خود به دو نوع تقسیم بندی می شوند: الگوریتم جدا شده ^۱ الگوریتم کویل^۲

3-4-1-1-1 الگوريتم فشار- مبنا جدا شده

در الگوریتم جدا شده، معادلات بقای هر سلول برای محاسبه متغیر های u,v,w و… بـه صـورت گام به گام حل میشود.هر معادله ای که حل میشود به صورت مجزا از سایر معادلات می باشـد و لـذا نیاز به نگه داری تمامی متغیرها در حافظه نمـیباشـد ولـی از طرفـی دارای سـرعت همگرایـی بسـیار پایینی است. به طور کلی در این روش معادلات به صورت مجزا تا همگرایی کامل حل میشوند.

با توجه به مطالب گفته شده، الگوریتم فوق دارای مراحل زیر است :

- به روز رسانی پارامتر های سیال بر اساس حل موجود
- ۲. حل معادلات مومنتوم یکی پس از دیگری با استفاده از مقادیری که اخیرا به روز شده اند.
- ۳. با استفاده از مقادیر بد ست آمده از میدان سرعت و فشار و شار جرمی سطوح، معادله فشار تصحیح شده حل می شود.
- ۴. تصحیح شار جرمی سطوح ، فشار و میدان و سرعت با استفاده از فشار تصحیح شده بدست
 ۴. آمده از قسمت ۳
 - ۵. حل سایر معادلات برای یافتن متغیر های اسکالر نظری توربولانس، انرژی و ...
- ۶. به روز رسانی ترم های منبع از طریق بر هم کنش میان فازهای مختلف (در مسائل دوفازی کاربرد دارد)
 - ۷. چک کردن همگرایی مسئله

¹ Segregated algorithm

² Coupled algorithm



Pressure-Based Segregated Algorithm

شكل ٣-٣ الكوريتم فشار - مبنا الف) كويل ب) جدا شده

3-4-1-1-1 الگوريتم فشار - مبنا كويل

برخلاف الگوریتم جدا شده که در قسمت قبلی توضیح داده شد، در این روش یک سیستم کویل از معادلات که شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم است، حل میشود.بنابراین در این روش گام های ۲و۳ در روش قبلی با یک مرحله دیگر جایگزین می شود. در ایـن مرحلـه سیسـتم معـادلات بـه صورت کویل حل میشود. سایر مراحل نیز همانند قبل تکرار میشوند. در این روش با توجه بـه آن کـه معادلات بقای جرم و مومنتوم به صورت همزمان حل می شوند ، بنابراین نرخ همگرایی نسبت به روش قبلی به شکل قابل توجهی افزایش می یابد. اما حافظه مورد نیاز برای حل افزایش می یابد زیرا در ایـن روش برای محاسبه میدان فشار و سرعت می بایست تمام متغیر ها و پارامترهای معادلات مومنتوم و بقای جرم در حافظه نگهداری شود، چون تمام انها به صورت کوپل حل میشوند و برخلاف روش قبلی به صورت گام به گام نیستند.

3-4-4- الگوريتم چگالي - مبنا

در روش های چگالی مبنا معادلات بقا شامل بقای جرم، مومنتوم و انرژی (در صورت نیاز انتقال ذرات و …)به صورت یکپارچه ودر یک دستگاه معادلات دیفرانسیل حل می شوند و قوانین بقای سایر متغیرهای اسکالر نیز بلافاصله بعد از آن حل میشود. با توجه به آن که معادلات به صورت کوپل و هم چنین غیرخطی هستند بنابراین می بایست از روشهای تکراری تا رسیدن به مرحله همگرایی استفاده شود. الگوریتم این روش به شرح زیر است:

- به روز رسانی پارامترهای سیال براساس حل فعلی (در تکرار اول از مقادیر اولیه محاسبات شروع می شود)
 - ۲. حل معادلات جرم ،مومنتوم ودر صورت لزوم انرژی و انتقال ذرات و… به صورت همزمان
 - ۳. محاسبه متغیر های اسکالر نظیر توربولانس و...
 - ۴. چک کردن همگرایی حل



شکل ۳-۵ شماتیک الگوریتم چگالی- مبنا

۴- فصل چهارم : مدل سازی و حل عددی

4-1- انتخاب آرایش

آرایش مبدل حرارتی مد نظر در این پژوهش یک لوله با جریان افقی است بنابراین بـرای قـرار دادن ماده متخلخل درون لوله آرایش استوانهای انتخاب می شود. از آن جا که لوله و ماده متخلخل حول محور طولی متقارن فرض شدهاند بنابراین هندسه به صورت دو بعدی متقارن محوری حل می شود. ماده متخلخل در این پژوهش در چند آرایش مختلف وارد می شود. که در زیر به تعریف هر کدام یرداخته شده است.

۴-۱-۱- آرایش مرزی

در آرایش مرزی ماده متخلخل به صورت استوانه ای تو خالی است که به دیـوار لولـه چسـبانده می شود. در این آرایش شعاع خارجی استوانه متخلخل برابر شعاع لوله و شعاع داخلی آن متغیر است. ضخامت های بی بعد ۰/۱ تا ۰/۹ برای ماده متخلخل ورودی در این آرایش بررسی شده است.



شکل ۴-۱ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با مانده متخلخ ورودی در آرایش مرزی

در این آرایش s ضخامت استوانه متخلخل و R شعاع لوله است. همچنین ضخامت بی بعد ماده متخلخل به صورت $R_p = rac{s}{p}$ تعريف می شود.

۴-۱-۲- آرایش مرکزی

این آرایش را میتوان پرتکرارترین آرایش برای قرار دادن ماده متخلخل درون لوله نامید که در

پژوهشهای بسیاری به روشهای مختلف بررسی شده است [۵۶–۶۰]. در این آرایش ماده متخلخل به صورت استوانه ی توپر که خط مرکز آن روی خط مرکز لوله منطبق است، درون لوله قرار میگیرد. در این آرایش نیز ضخامت بی بعد استوانه متخلخل از ۰/۱ تا ۰/۹ تغییر میکند.



شکل ۴-۲ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با مانده متخلخ ورودی در آرایش مرکزی

۴-۱-۳- آرایش رینگ

آرایش رینگ در واقع از شباهت مقطع استوانه متخلخل به حلقه یا همان رینگ به این نام انتخاب شده است. در این آرایش ماده متخخل به صورت استوانه ای تو خالی درون لوله قرار داده می-شود که شعاع خارجی آن نیز کمتر از شعاع لوله است. در این آرایش ri شعاع داخلی و ro شعاع خارجی استوانه متخلخل است. همچنین شعاع متوسط بیبعد استوانه متخلخل برای این حالت بصورت خارجی استوانه متخلخل است. همچنین شعاع متوسط بیبعد متوانه متخلخل برای این حالت بصورت بررسی میشود و برای ضخامت بی بعد ثابت ۲/۰ و ۴/۰ شعاع بیبعد متوسط را تغییر داده و آرایش رینگ در مقاطع مختلف لوله مدل میشود.





۴-۱-۴- آرایش شیار

آرایش شیار ترکیب دو آرایش مرزی و مرکزی است و ازآنجا که در این آرایش بین استوانه متخلخل توپر در مرکز و استوانه تو خالی قرار گرفته روی مرز فضای خالی مانند یک شیار برای عبور آزاد سیال وجود دارد این آرایش به آرایش شیار نامگذاری شده است. شکل ۴-۴ آرایش شیار ماده متخلخل درون لوله را نشان میدهد. در این آرایش ضخامت استوانههای متخلخل روی مرز و مرکز لوله با یکدیگر یکسان و برابر ۶ در نظر گرفته شدهاند. همچنین برای نشان دادن مشخصات ماده متخلخل مانند عدد دارسی و نسبت هدایت حرارتی مؤثر، از اندیسهای c و که بترتیب نشان دهندهی ماده متخلخل در مرکز و روی مرز میباشند، استفاده شده است.



شکل ۴-۴ آرایش مسئله ، شماتیک لوله با ماده متخلخ ورودی در آرایش شیار

۴-1-6- آرایش کاملا پر

در این حالت کل لوله از ماده متخلخل پر می شود که برای مقایسه با حالات جزئی در آرایش-های مختلف طراحی می شود.

۲-۴- تولید شبکه

برای تولید شبکه از نرم افزار گمبیت استفاده شده است. برای این مسئله مدل دو بعدی با مـش چهار وجهی مدلسازی شده است.



شکل ۴-۵ شبکهبندی استفاده شده در این پژوهش

۴-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده برای این مسئله به صورت زیر است:

- مقطع ورودی: سرعت و دمای یکنواخت
 - مقطع خروجی : فشار ثابت
- دیوار: شرط عدم لغزش و شار حرارتی ثابت

4-4- تنظیمات حل گر و دقت حل

همانطور که ذکر شد برای حل این مساله ازنرم افزار فلوئنت استفاده شده است. در این قسمت

تنظیمات، فرضهای در نظر گرفته شده و میزان دقت حل در این نرم افزار آورده شده است.

4-4-1- تنظيمات جريان

در گام نخست در قسمت Models در نرم افزار فلوئنت، ویژگی های سیال تعریف می شود. از آنجا که این پژوهش تک فاز بوده گزینهی Multiphase در حالت خاموش تنظیم می شود. برای انتقال حرارت و تعریف شروط مرزی حرارتی باید گزینه ی Energy فعال گردد. بعد از این مرحله نوع رژیم جریان که در این پژوهش لزج و آرام می باشد انتخاب می شود.

4-4-4 تنظیمات مواد مورد استفاده

بعد از تعریف ویژگی های سیال نوبت به معرفی مواد مورد استفاده برای سیال و قسمت جامد پژوهش مذکور میرسد. همانطور که ذکر شد سیال استفاده شده هوا میباشد و برای قسمت جامد، هدایت حرارتی فلز به گونهای انتخاب میشود که نسبتهای هدایت حرارتی مؤثر فرض شده برای بررسی بدست آید.

4-4-3- تنظيمات شرايط مرزي

شرط مرزی شار ثابت ۱۰۰ وات بر متر مربع بر روی دیوار لوله اعمال شده است. بـرای ورودی شرط مرزی Velocity inlet با سرعت یکنواخت و دمـای یکنواخـت اعمـال شـده است. همچنـین در خروجی شرط presser outlet اعمال شده است که با توجه به سرعت در ورودی افت فشار مورد نیاز را ایجاد میکند.

4-4-4 تنظيم محيط متخلخل

برای تعریف ماده متخلخل در نرمافزار فلوئنت ابتدا در قسمت متریال جنس قسمت فلزی ماده متخلخل تعریف می شود. سپس در قسمت شرط مرزی برای محیط متخلخل نام متریال سیال عبوری از میان ماده متخلخل انتخاب می شود. تیک Porous zone نیز زده می شود تا انتخاب شود. در سربرگ

Fluid
Zone Name
fluid_10
Material Name air Edit
Source Terms
Fixed Values
✓ Porous Zone
Reaction
Motion Source Terms Fixed Values Porous Zone Reaction
Update From Line Tool
Direction-1 Vector
X
Y 0
OK Cancel Help

مربوط به محيط متخلخل ضرايب مربوط به خواص محيط متخلخل وارد مى شود.

شکل ۴-۶ ضرایب ورودی به نرم افزار برای تعیین جهت عبور سیال از محیط متخلخل

طبق شکل ۴-۶ ضرایب بردار مسیر نشان دهندهی مسیر عبور سیال از محیط متخلخل است که به دلیل اینکه این مسئله بصورت دو بعدی حل می شود تنها دو جهت x و y دارد که ۱ نشان دهنده عبور مسیر از این جهت و صفر نشان دهنده عدم عبور سیال از این راستا است.

ضرایب مورد نیاز برای مدل کردن مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت سیال به دو صورت تجربی و یا از خواص ماده متخلخل تعریف می شود. مقاومت ویسکوز و مقاومت اینرسی ضرایبی هستند که از خواص ماده متخلخل مورد استفاده بدست می آیند. مقاومت ویسکوز یا Viscous Resistanc که از خواص ماده متخلخل مورد استفاده بدست می آیند. مقاومت ویسکوز یا Inertial بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل $(\frac{1}{K})$ تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی یا Resistanc بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی در صورت در دست بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی یا Resistanc بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی یا Inertial بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی یا در ست بصورت در حسورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) تعریف می شود. همچنین مقاوت اینرسی یا در سورت در دست بصورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ($\frac{1}{K}$) در می شود. همچنین مقاوت اینرسی در صورت در دست بی در صورت در دست می آیند، می در ماده متخلخل، می توان از ضرایب 0 و 1 که از داده های آزمایشگاهی بدست می آیند، استفاده کرد.

Fluid 🔤
Zone Name
fluid_10
Material Name air 🗾 Edit
C Source Terms
Fixed Values
✓ Porous Zone
Reaction
Motion Source Terms Fixed Values Porous Zone Reaction
Viscous Resistance
Direction-1 (1/m2) 😝 constant
Direction-2 (1/m2) Ø constant
Inertial Resistance
Direction-1 (1/m) a
OK Cancel Help

شکل ۴-۷ ضرایب ورودی به نرم افزار برای مشخص کردن مقاوت محیط متخلخل در برابر حرکت سیال همچنین ضرایب نشان داده شده در شکل ۴-۸ بترتیب میزان تخلخل ماده متخلخل و جنس قسمت جامد ماده متخلخل را تعریف می کند.

Fluid
Zone Name
fluid_10
Material Name air Edit
Source Terms
Fixed Values
V Porous Zone
Reaction
Motion Source Terms Fixed Values Porous Zone Reaction
Power Law Model
Fluid Porosity
Porosity
OK Cancel Help

شکل ۴-۸ ضرایب ورودی به نرم افزار جهت تعیین میزان تخخل و جنس محیط متخلخل

4-4-5- تنظيمات روش حل

الگوریتم حل برای معادلات کوپل شده فشارو سرعت الگوریتم SIMPLE می باشد. گسسته سازی معادله فشار به روش استاندارد وگسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی به روش آپویند مرتبه دو انجام شده است.

4-4-6- کنترل روش حل

ضریب تخفیف های در نظر گرفته شده برای حل معادلات به شرح جدول ۴-۱ می باشد.

 انرژی	مومنتوم	چگالی	فشار	
 ١	• /Y	١	۰ /٣	ضريب تخفيف

جدول ۴-اضریب تخفیفهای در نظر گرفته شده برای حل معادله

4-4-7 تنظيمات دقت حل

در حل معادلات به روش عددی برای پایان یافتن حل باید دقت حل از مقدار مشخص شده برای نرم افزار کمتر شود. دقت حل در نظر گرفته شده برای معادله پیوستگی^{۵-۱}۰۰ است ، هنگامی که دقت حل برای معادله مومنتوم ^۶-۱۰ و برای معادله انرژی ^۲-۱۰ در نظر گرفته شده است.

4-6- آزمون حساسیت به شبکه

آزمون حساسیت به شبکه جهت بررسی استقلال جواب های بدست آمده از اندازه شبکه تولید شده می باشد؛ برای انجام این آزمون شش شبکه مختلف با اندازه سلول های متفاوت را بررسی می-شود. برای مقایسه جوابهای بدست آمده از هر شبکهبندی، عدد ناسلت را برای هر کدام از شبکه-بندیها محاسبه میشود که میزان وابستگی دقت جواب به شبکهبندی را نشان میدهد. زمانی که با زیادتر شدن سلولها و یا به عبارتی دیگر ریزتر شدن اندازه سلولها برای یک آرایش خاص، جواب مدل سازی تغییر نکند یا تغییرات آن قابل چشم پوشی باشد دیگر مدل سازی از شبکه استقلال یافته است و نیازی به ریزتر کردن سلولها نیست. همانطور که در شکل ۴-۹ مشاهده میشود منحنی ناسلت با افزایش مش ابتدا با شیب تند افزایش مییابد و سپس شیب آن با دقت بسیار خوبه به سمت صفر می رود که نشان دهندهی استقلال جواب از تعداد مش در شبکهبندی پنجم و ششم است. بنابراین برای تمام مدلسازیها از شبکهبندی پنجم استفاده میشود. ریز کردن بیش از حد سلولها برای مدلسازی نیاز به صرف زمان بسیار بیشتری برای انجام محاسبات میباشد. شکل ۴-۱۰ نیز نشان میدهد که با ریزتر کردن مش از شبکهبندی پنجم به ششم، پروفیل سرعت تغییری نمی کند و کاملا بر هم منطبق میشود که استقلال از شبکه را نشان میدهد.



شکل ۴-۴ نمودار عدد ناسلت میانگین به ازای افزایش مش



شکل ۴-۱۰ پروفیل سرعت برای دو مش بندی پنجم و ششم

۴-6- صحه گذاری نتایج

در تحلیلهای عددی بدلیل استفاده از فرضیات ساده کننده در روال شبیه سازی و همچنین خطاهای ناشی از گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان و روش حل عددی مورد استفاده نتایج بدست آمده نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای خطا می باشد. هر چه این فرضیات وروش های عددی مورد استفاده از دقت بیشتری برخوردار باشند، نتایج حاصل به واقعیت نزدیک تر شده و بالعکس. بنابراین برای مشخص شدن دقت روش عددی باید نتایج حاصل از حل عددی را با نتایج آزمایشگاهی و یا تحلیل بدست آمده برای مساله مشابه مقایسه کرد. اما برای این مسئله حلهای تحلیلی دارای فرضیات ساده سازی زیاد میباشند بنابراین نزدیک ترین نتایج موجود به مساله مورد نظر جمع آوری

بدین منظور لوله با ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی را در ضخامت های مختلف برای صحت سنجی روش حل در نظر می گیریم. برای بررسی صحت نتایج بدست آمده عدد ناسلت محلی در قسمت توسعه یافته به ازای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در لوله با شار ثابت را با نتایج بدست آمده از روش عددی بوگدان و همکاران [۳۱] در آرایش مشابه، مقایسه میشود. برای بدست آوردن ناسلت محلی در آرایش این مسئله از معادله زیر استفاده می شود.

$$Nu = \frac{hD}{k_f} = \frac{2R}{k_f} \cdot \frac{q_w}{T_w - T_m}$$

همانطور که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می شود نتایج بدست آمده از این روش با دقت بسیار خوبی با کارهای گذشته هم خوانی دارد بنابراین می توان از این روش حل با اطمینان استفاده کرد.



شکل ۴-۱۱ مقایسه نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج عددی بدست آمده از کار های گذشته

۵- فصل پنجم: نتایج و بحث ها

بعد از مدل سازی آرایش مسئله و بدست آوردن نتایج از حل عددی، این نتایج را از دید هیدرودینامیک، انتقال حرارت و افت فشار بررسی خواهیم کرد.

۵-۱-۵ هیدرودینامیک

قرار دادن ماده متخلخل درون لوله باعث تغییر پروفیل های سرعت میشود که این تغییر پروفیل با توجه به آرایش ماده متخلخل درون لوله متفاوت است. هنگامی که ماده متخلخل بصورت جزئی از حجم لوله مورد استفاده قرار می گیرد میتوان سطح مقطع لوله را به دو بخش سیال آزاد و ماده متخلخل تقسیم کرد. در قسمت متخلخل بدلیل وجود بخش جامد مقاومتی در برابر حرکت سیال ازاد و ایجاد میشود. و از آنجا که سیال دوست دارد از قسمت با مقاومت کمتر در برابر جریان عبور کند، مقدار سیال مقدار سیال مقدار سیال مقاومتی در برابر حرکت سیال ایجاد میشود. و از آنجا که سیال دوست دارد از قسمت با مقاومت کمتر در برابر جریان عبور کند، مقدار سیال بیشتری از ناحیه آزاد جریان میابد. با توجه به اینکه سرعت سیال در قسمت متخلخل دوله به دلیل مقاومت کمتر در برابر جریان عبور کند، مقدار سیال بیشتری از ناحیه آزاد جریان میابد و برای ارضای معادله پیوستگی، سرعت سیال در قسمت آزاد افزایش مییابد. این برهمزدن پروفیل سرعت جریان اگر باعث تشدید گرادیانهای سرعت شود میتواند منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت جابحایی شود. بنابر این هر کدام از آرایشها از دید

۵-۱-۱- آرایش مرکزی

در این آرایش ماده متخلخل در مرکز لوله قرار داده می شود که مقاومت در برابر حرکت سیال در مرکز لوله را افزایش می دهد که منجر به افزایش عبور سیال از نزدیک دیوار و همچنین کاهش ضخامت لایه مرزی می شود در نتیجه گرادیان های سرعت روی دیوار افزایش مییابد که انتقال حرارت جابجایی را بهبود می دهد. همانطور که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود با افزایش ضخامت ماده متخلخل این گرادیان های سرعت روی دیوار افزایش پیدا می کنند و در یک ضخامت بحرانی به حداکثر مقدار خود می رسند.



شکل ۵-۱ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرکزی . Da=10^-4

ماده متخلخل با نفوذپذیری پایین تر مقاومت بیشتری در برابر جریان سیال دارد که باعث کاهش عبور سیال از ناحیه متخلخل و افزایش سرعت سیال در ناحیه آزاذ با مقاوت کمتر می شود. بنابراین با توجه به تعاریف گفته شده انتظار می رود با کاهش نفوذپذیری ماده متخلخل برای آرایش مرکزی، گرادیانهای سرعت روی دیواره افزایش یابد که این موضوع در شکل ۵-۲ دیده می شود.



شکل ۵-۲پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای دارسی های مختلف در آرایش مرکزی Rp=0.6

۵-۱-۲- آرایش مرزی

در این آرایش برخلاف آرایش مرکزی، ماده متخلخل به دیواره های لوله چسبانده می شوند. این عمل باعث می شود که مقدار سیال عبوری از مرکز لوله افزایش یابد و گرادیان های سرعت روی دیوار کاهش یابد. کاهش گرادیان های سرعت روی دیوار تأثیر منفی روی انتقال حرارت جابجایی می گذارد. همانطور که در شکل ۵-۳ مشاهده می شود نحوه تغییر ساختار جریان با وارد کردن ماده متخلخل در ضخامت های مختلف برای آرایش مرزی نشان داده شده است. همچنین شکل ۵-۴ نشان دهنده این است که با کاهش نفوذپذیری ماده متخلخل مقدار سیال عبوری از کنار دیوار کاهش مییابد که نتیجه منفی بر روی نرخ انتقال می گذارد.


شکل ۵-۳پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرزی Da=10^-4



شکل ۵-۴ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای عدد دارسی های مختلف در آرایش مرزی Rp=0.6

۵-۱-۳- آرایش رینگ

در این آرایش ماده متخلخل نه در مرکز لوله قرار دارد و نه روی مرز چسبانده شده است بلکه بصورت رینگ در حد فاصل مرز و مرکز قرار داده می شود. همانطور که از شکل ۵-۵ پیداست در این آرایش نیز سرعت در ناحیه متخلخل کم می شود و در نواحی آزاد نزدیک دیوار و مرکز لوله سرعت افزایش می یابد که می تواند منجر به افزایش گرادیان سرعت و یا کاهش آن شود.



شکل ۵-۵پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش رینگ $m R_c=0.5$

۵-۱-۴- آرایش شیار

شکل ۵-۶ نشان دهندهی تغیرات ساختار سرعت با افزودن ماده متخلخل در آرایش شیار است. در این آرایش که تقریبا عکس آرایش رینگ است، سرعت روی دیوار و مرکز کاهش مییابد.



شکل ۵-۶ پروفیل سرعت توسعه یافته در مقطع عرضی لوله برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل در آرایش شیار

۲-۵- انتقال حرارت جابجایی

بعد از بررسی جریان سیال در محیط متخلخل در آرایش های مختلف در این بخش به بررسی تأثیر ماده متخلخل در لوله از دید انتقال حرارت می پردازیم.

۵-۲-۱- آرایش مرکزی

شکل ۵-۷ نمودار تغیرات ناسلت متوسط به ازای تغییرات ضخامت ماده متخلخل را برای آرایش مرزی نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، برای k=1.4 با افزایش ضخامت ماده متخلخل ورودی، ناسلت متوسط افزایش می یابد و در ضخامت بحرانی که به نفوذ پذیری ماده متخلخل وابسته است به مقدار بیشینه می رسد.



شکل ۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی k*=1.4 Re=200 ه م کنی ۷-۵ نسبی در ضحامت جزئی شکل ۵-۸، k*=6 را نشان میدهد که در این نمودار نیز یک بیشینه نسبی در ضحامت جزئی

مشاهده می شود و در حالت کاملا پر به حد اکثر مقدار خود می رسد که مقدار آن اندکی بیشتر از بیشینهی با ضخامت جزئی است.

شکل ۵-۹ نمودار ناسلت متوسط به ازای ضخامت بی بعد ماده متخلخل را برای 10=*k نشان میدهد. طبق این نمودار انتقال حرارت در حالت جزئی آرایش مرکزی بسیار کمتر از لوله کاملا پر از ماده متخلخل است.



شکل ۵-۸ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی 6=*k هدایت گرمایی مؤثر از این سه شکل برای آرایش مرکزی میتوان نتیجه گرفت که اگر نسبت هدایت گرمایی مؤثر نزدیک به ۱ باشد، تزریق ماده متخلخل بصورت جزئی از دید انتقال حرارت جابجایی بهینه تر است نسبت به حالت کاملا پر. همچنین با افزایش این نسبت نرخ انتقال حرارت برای حالت کاملا پر بشدت افزایش می یابد در حالیکه برای حالت جزئی تغییر چندانی ندارد.



شکل ۵-۹ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200 .k*=10

۵-۲-۲- آرایش مرزی

این آرایش نیز برای هر یک از سه نسبت هدایت حرارتی نمودار ناسلت متوسط متفاوتی دارد. در شکل ۵-۱۰ با افزایش ضخامت ماده متخلخل، ناسلت متوسط ابتدا کاهش میابد و بعد از ضخامت بحرانی که کمترین مقدار را دارد دوباره افزایش مییابد و حالت کاملا پر بیشترین ناسلت متوسط را دارد.

در شکل ۵-۱۱ افزایش ماده متخلخل تا یک ضخامت بحرانی تأثیر ناچیزی بر روی ناسلت متوسط لوله دارد ولی بعد از این ضخامت بحرانی ناسلت متوسط ناگهان افزایش چشمگیری پیدا می کند.

شکل ۵-۱۲ نیز نشان میدهد با افزایش ماده متخلخل ناسلت متوسط افزایش مییابد که میزان افزایش ناسلت به ازای ضخامت بی بعد ماده متخلخل در ضخامت های نزدیک به حالت کاملا پر بیشتر است.

همانطور که در سه نمودار ناسلت این آرایش مشخص است، افزایش نسبت هدایت حرارتی

تأثیر قابل توجهی بر افزایش نرخ انتقال حرارت می گذارد. دلیل این موضوع در این آرایش را می توان افزایش سطح تماس سیال با دیوار که شار ثابت بر آن اعمال شده است بیان کرد. هر چه ماده متخلخل هدایت حرارتی بهتری داشته باشد شار حرارتی اعمال شده روی دیوار را بهتر می کند و باعث بهبود انتقال حرارت بین سیال و دیوار می شود.



شکل ۵-۱۰ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=1.4





شکل ۵-۱۱نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی k*=6، Re=200 ه

شکل ۵-۱۲نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200 ،k*=10 شکل ۵-۱۲نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت مرزی بر خلاف آرایش مرکزی در یک ضخامت ثابت با کاهش نفوذپذیری ، ناسلت متوسط نیز کاهش مییابد.

۵-۲-۳- آرایش رینگ

برای آرایش رینگ Rc نشان دهندهی متوسط شعاع خارجی و داخلی رینگ متخلخل است که با تغیر آن آرایش رینگ می تواند به آرایش مرزی یا مرکزی نزدیک شود. ابتدا در شکل ۵-۱۳وشکل ۵-۱۴ نتایج تغیر پارامتر های ضخامت، نفوذپذیری و نسبت هدایت حرارتی مؤثر برای Rc=0.5 بررسی شده است. همانطور که از این شکل ها برای سه نسبت هدایت حرارتی مشاهده می شود رفتار ناسلت متوسط برای آرایش رینگ شباهت بیشتری به آرایش مرکزی دارد با این تفاوت که ضخامت بحرانی برای حالت رینگ در ضخامت کمتری اتفاق می افتد.



شکل ۲۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5، k*=1.4، Rc=200، Re=200



شکل ۲۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5، k*=6، Rc=200، Re=200

اما حالت دیگر در نظر گرفته شده برای آرایش رینگ بررسی تأثیر تغیرات شعاع متوسط رینگ

متخلخل(Rc) بر ناسلت متوسط کل لوله است. همانطور که در شکل ۵-۱۵شـکل ۵-۱۶ مشـاهده مـی شود هنگامی که رینگ متخلخل در یک ضخامت ثابت شعاعش افزایش پیدا می کند و از مرکز لوله بـه سمت مرز لوله جابجا میشود، ناسلت متوسط ابتدا افزایش میابد و در یک شـعاع بحرانـی بـه حـداکثر مقدار خود می رسد و در نزدیک مرز به شدت کاهش مییابد.



شکل ۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به شعاع متوسط رینگ متخلخل ورودی k*=1.4 ، Re=200 ، Rp=0.2 ، k*=1.4



شکل ۵-۱۶ نمودار ناسلت متوسط نسبت به شعاع متوسط رینگ متخلخل ورودی k*=1.4 ، k*=1.4 شکل ۵-۵

۵-۲-۴- آرایش شیار

بعد از بررسی دو آرایش مرزی و مرکزی و نتایج بدست آمده آرایش جدیدی به نام شیار را بررسی میشود که میتوان گفت ترکیبی است از این دو آرایش. در آرایش شیار در واقع ماده متخلخل هم بصورت مرزی و هم بصورت مرکزی درون لوله قرار داده میشود که فضای بین ماده متخلخل روی مرز و مرکز مانند شیاری برای عبور آزاد سیال است.

در این آرایش ضخامت ماده متخلخل روی مرز و مرکز را یکسان میگیریم. شـکل ۵-۱۷ نشـان می دهد برای k*=1.4 با افزایش ضخامت برای دارسی های مختلف ناسلت تغییر چندانی نمیکند.



شکل ۲۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش شیار k*=1.4 شکل ۲۰۵

شاید از نتایج بالا اینگونه به نظر آید که آرایش شیار، آرایش کاملا نامطلوبی برای حالات مختلف باشد. به دلیل اینکه ماده متخلخل روی مرز و مرکز با تغییر دادن پارامتر های مختلف رفتار معکوس در بهبود انتقال حرارت را نشان میدهند. برای مثال آرایش مرکزی به دلیل تغیر ساختار جریان سیال و مجبورکردن حجم بیشتر سیال برای عبور از نزدیک دیوار از این نظر مطلوب است و آرایش مرزی به دلیل در تماس بودن با دیوار لوله که شار ثابت بر آن اعمال شده، در نسبتهای هدایت گرمایی مؤثر بالاتر بهینه تر است. بنابراین این آرایش را می توان با تغییر دادن جداگانه پارامترهای ماده متخلخل روی مرز و مرکز بررسی کرد. شکل ۵-۱۸و شکل ۵-۱۹ نتایج بدست آمده از تغیر پارامترهای هدایت حرارتی و نفوذپذیری به صورت جداگانه برای ماده متخلخل روی مرز و مرکز را نشان میدهد. این نتایج نشان میدهد افزایش یا کاهش رسانایی ماده متخلخل در مرکز لوله، تاثیری بر نرخ انتقال حرارت ندارد و تغیر این ضریب برای ماده متخلخل کنار دیوار تأثیر زیادی بر نرخ انتقال حرارت میگذارد. علاوه بر این نتایج نشان میدهد که با افزایش نفوذپذیری کنار دیوار و کاهش نفوذپذیری روی مرکز، نرخ انتقال حرارت بالاتری را بدست آورد.



شکل ۵-۱۸ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200 ،k*=10



شکل ۵-۵ نمودار ناسلت متوسط نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی 10**Re=200 ه

5-3- افت فشار

$$f = -\frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \frac{2R}{\rho U_m^2}$$



شکل ۵-۲۰ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی Re=200



شکل ۲۱-۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی Re=200



شکل ۲۲-۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5، Rc=200، Rc



شکل ۵-۲۳ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش شیار ، Re=200 همانطور که در شکل ۵-۲۰ تا شکل ۵-۲۳ مشاهده میشود افزایش ماده متخلخل در تمام آرایشها افت فشار را افزایش میدهد و تأثیر نامطلوبی بر روی توان پمپاژ دارد. همچنین برای ضخامت ثابت ماده متخلخل نوع آرایش در میزان افت فشار تأثیر گذار است بطوریکه برای آرایش مرزی افت فشار بیشتر از حالت مرکزی و آرایش رینگ با شعاع متوسط تقریبا برابر نصف شعاع لوله بیشترین افت

فشار را ایجاد می کند. برای مقایسه این حالات در شکلهای شکل ۵-۲۴ شکل ۵-۲۵ افت فشار در آرایش رینگ در شعاعهای متوسط متغیر به ازای ضخامتهای بی بعد ثابت ۰/۲ و ۰/۴ نشان داده شده است که نشان می دهد با افزایش ضخامت بی بعد متوسط افت فشار ابتدا افزایش می یابد و بعد از یک ضخامت بحرانی دوباره کاهش پیدا کرده و در کنار دیوار به کمترین میزان می رسد.



شكل ۵-۲۴ نمودار ضريب اصطكاك نسبت به شعاع متوسط رينگ متخلخل ورودي Rp=0.2، Re=200 شكل



شکل ۵-۲۵ نمودار ضریب اصطکاک نسبت به شعاع متوسط رینگ متخلخل ورودی Rp=0.4، Re=200 شکل

4-4- بازده حرارتی

همانطور که در بخشهای قبل مشاهده شد افزودن ماده متخلخل درون لوله از دید انتقال حرارت میتواند سودمند و مطلوب باشد ولی از دید افت فشار نامطلوب است. بنابر این در این قسمت با معرفی بازده حرارتی برای لوله به بررسی انتقال حرارت درون لوله با توجه به افت فشار ایجاد شده میپردازیم. برای اینکار از دو روش زیر استفاده میشود.

6-4-1- بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر

توان پمپاژ پمپ به صورت ضرب افت فشار ایجاد شده در، دبی خروجی پمپ تعریف میشود. برای مقایسه آرایش های مختلف در این حالت، لوله خالی بدون ماده متخلخل را در نظر می گیریم توان پمپاژ و ناسلت متوسط کل آن را حساب میشود. سپس برای هر یک از آرایش های با ماده متخلخل ورودی دبی را جوری تنظیم میشود که توان پمپاژ با توان پمپاژ لوله خالی برابر شود، آنگاه ناسلت متوسط را برای لوله با ماده متخلخل محاسبه کرده و بر ناسلت متوسط لوله خالی تقسیم می-شود که میزان افزایش انتقال حرارت را با افزودن ماده متخلخل نشان میدهد. معادله ۵-۲ نشان دهده بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر است:

$$\eta = \frac{h}{h_o} \Big|_{pp}$$



 $k^{*}=1.4$ شکل ۵-۲۶ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش مرکزی



شکل ۵-۲۷ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش مرکزی ٤=* k با توجه به شکلهای شکل ۵-۲۶شکل ۵-۲۷، برای ۱.4=* k میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله با ماده متخلخل نسبت به ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله خالی دارای بیشینه مقدار در ضخامت بیبعد ۰/۸ استو برای ٤=* k با افزایش ضخامت این نسبت افزایش مییابد و

در حالت کاملا پر به حداکثر مقدار خود میرسد.

مشابه همین نمودارها برای آرایش رینگ نیز در R_c=0.5 وجود یک نقط ه بهینه در ضخامت جزئی برای نسبت هدایت حرارتیهای نزدیک به ۱ و برای نسبت هدایت حرارتیهای بالاتر رفتار کاملا صعودی را نشان میدهد.



 $k^{*}=1.4$ شکل ۵-۲۸ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش رینگ



 $k^{*=6}$ شکل ۵-۲۹ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی آرایش رینگ

شکلهای شکل ۵-۳۰شکل ۵-۳۱ نشان میدهند برای ضخامت ثابت در آرایش رینگ با تغییر R_c R_c تا شعاع بیبعد ۵/۰، تأثیر کم بر نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی دارد بطوریکه در بیشترین حالت حدود ۵ درصد ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و در کمترین حالت ۵ درصد کاهش یافته است. همچنین نسبتهای کمتر از یک نشان میدهند که تزریق ماده متخلخل در این حالت باعث کاهش انتقال حرارت میشود که نشان دهنده نامطلوب بودن آن است. همانطور که از نمودارهای گذشته میتوان گرفت در شعاع بیبعد بیشتر از ۵/۰ با افزایش افتا ها از ۵ می در از ۵ می در از ۵ می تمان می دهند که تزریق ماده متخلخل در این حالت باعث کاهش انتقال حرارت میشود که نشان دهنده نامطلوب بودن آن است. همانطور که از نمودارهای گذشته میتوان گرفت در شعاع بیبعد بیشتر از ۵/۰ با افزایش افت فشار و کاهش نرخ انتقال حرارت این نسبت نیز کاهش خواهد یافت به همین دلیل نتایج تنها برای شعاعهای کمتر از ۵/۰ بررسی شده این این نسبت نیز کاهش خواهد یافت به همین دلیل نتایج تنها برای شعاعهای کمتر از ۵/۰ بررسی شده



شکل ۵-۳۰ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به شعاع متوسط ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rp=0.2 ،k*=1.4



شکل ۵-۳۱ نمودار بازده حرارتی در توان پمپاژ برابر نسبت به شعاع متوسط ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rp=0.2 .k*=1.4

۵-۴-۲ ناسلت تعمیم یافته

در این قسمت ناسلت تعمیم یافته را که در کارهای بسیاری برای نشان دادن بازده حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است تعریف میشود [۲۹, ۶۱–۶۵]. ناسلت تعمیم یافته در واقع نسبت افزایش نرخ انتقال حرارت نسبت به لوله خالی تقسیم بر نسبت افت فشار های متناظر است که از رابطه بدست میآید.

 $Nu^* = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$



 $k^{*}=1.4$ شکل ۵-۳۲ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی $k^{*}=1.4$

در شکلهایشکل ۵-۳۳شکل ۵-۳۳شکل ۵-۳۳ مشاهده می شود که برای آرایش مرزی، ناسلت تعمیم برای هر سه نفوذپذیری بررسی شده، با افزایش ضخامت ماده متخلخل ابتدا که ش می یابد و پس از یک ضخامت بحرانی دوباره افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود برای ضریب هدایت حرارتی بالاتر نرخ افزایش برای ضخامتهای نزدیک به حالت کاملا پر بیشتر است. همچنین این سه نمودار نشان می دهد برای آرایش مرزی، ماده متخلخل با نفوذپذیری بیشتر یا به عبارتی عدد دارسی بالاتر، در تمام ضخامتها و نسبتهای هدایت حرارتی ناسلت تعمیم یافته بیشتری دارد. همچنین می-توان نتیجه گرفت که تزریق ماده متخلخل با هدایت حرارتی پایین بصورت آرایش مرزی نسبت به لوله خالی کاملا نامطلوب است اما برای نسبت هدایت حرارتی بالاتر با توجه به نفوذپذیری و ضخامت ماده متخلخل می تواند انتقال حرارت را بهبود دهد.



 $k^{*=6}$ شکل ۵-۳۳ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی



 $k^{*}=10$ شکل ۵-۳۴ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرزی

شکلهایشکل ۵-۳۵شکل ۵-۳۶شکل ۵-۳۷ ناسلت تعمیم یافته برای آرایـش مرکـزی را نشـان میدهد. برای این آرایش رفتار نمودار ناسلت تعمیم یافته بسیار متفـاوت تـر اسـت نسـبت بـه آرایـش مرزی. همچنین عدد دارسیهای مختلف نیز تغیرات ناسلت متفاوت را نشان میدهند.



 $k^{*=1.4}$ شکل ۵-۵ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی



 $k^{*=6}$ شکل ۵-۳۶ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی



شکل ۵-۳۷ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی 10=*k در آرایش مرکزی برای هر سه دارسی بررسی شده، و برای تمام نسبتهای هدایت حرارتی یک ضخامت جزئی بحرانی وجود دارد که نمودار ناسلت تعمیم یافته در آن نقطه ماکزیمم نسبی دارد که برای نسبت هدایت حرارتی پایین مقدار آن از ناسلت تعمیم یافته حالت کاملا پر نیز بیشتر است، ولی با افزایش نسبت هدایت حرارتی ناسلت تعمیم یافته برای ضخامتهای جزئی تقریبا ثابت میماند و برای حالت کاملا پر به تدریج افزایش میابد.

در شکلهایشکل ۵-۳۸شکل ۵-۳۹ ناسلت تعمیم یافته برای آرایشهای رینگ و شیار تنها برای نسبت هدایت حرارتی ۱/۴ نشان داده شده است. آرایش رینگ رفتاری شبیه نمودار آرایش مرکزی نشان میدهد و همچنین برای تمام حالات جزئی ناسلت تعمیم یافته کمتر از یک است.

آرایش شیار در حالتی که خواص ماده متخلخل روی مرز و مرکز یکسان باشد، کاهش ناسلت تعمیم یافته را با افزایش ضخامت نشان میدهد.



شکل ۵-۵ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش رینگ Rc=0.5 ،k*=1.4



 $k^{*}=1.4$ شکل ۵-۳۹ نمودار ناسلت تعمیم یافته نسبت به ضخامت ماده متخلخل ورودی در آرایش مرکزی

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش جریان آرام جابجایی اجباری درون لوله با قرار دادن ماده متخلخل بـه صـورت عددی بررسی شدهاست. ماده متخلخل در حالت کاملا پر و آرایش های جزئی مرکزی، مرزی، رینـگ و شیار مورد بررسی قرار گرفتهاند. تأثیر پارامترهای نفوذپذیری، ضخامت ماده متخلخل و نسـب هـدایت حرارتی مؤثر بر الگوی جریان، نرخ انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده است. برای این مسئله شـار حرارتی ثابت روی دیوار لوله اعمال شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش را در چند دسته مـی-توان بررسی کرد:

- η برای آرایش مرکزی و رینگ در توان پمپاژ برابر نشان می دهد برای نسبت هدایت حرارتی ۱/۴ ضریب انتقال حرارت جابجایی بترتیب تا ۲/۵ و ۳ برابر نسبت به ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله خالی افزایش یافته است. همچین این نسبت برای این دو آرایش در نسبت هدایت حرارتی ۶ در حالت کاملا پر به حداکثر مقدار می رسد که در این حالت ضریب انتقال حرارت جابجایی تا ۲/۵ برابر برای حالت کاملا پر افزایش می یابد.
- ماده متخلخل با عدد دارسی بالاتر در کنار دیوار مناسب تر است و در حالت جریان با عدد
 دارسی پایین محیط متخلخل در مرکز لوله مناسب تر است.
- ناسلت تعمیم یافته نشان می دهد که برای هندسه مرکزی تقریبا برای تمام حالت ها تزریق ماده متخلخل از دید کارایی حرارتی نامطلوب و برای آرایش مرزی برای نسبت هدایت حرارتی بالا و ضخامت های بیشتر از ۰/۵ این نسبت بیشتر از یک است و برای حالت کاملا پر به ۳/۵ نیز می رسد.
- برای آرایش شیار با یک ضخامت ثابت ماده متخلخل و نسبت هدایت حرارتی ۱/۴، با تغیر شعاع میانگین بی بعد از مرکز تا مرز لوله، ناسلت متوسط تا حدود ۲۰٪ افزایش یافته و در نزدیک دیوار ناسلت کاهش می یابد

- برای تمام آرایش ها تزریق ماده متخلخل باعث افزایش افت فشار کل در لوله می شود که این افزایش با افزایش ضخامت ماده متخلخل بصورت تصاعدی افزایش می یابد. و در یک ضخامت ثابت ماده متخلخل هندسه مرکزی کمترین میزان افت فشار و آرایش رینگ بیشترین میزان افت فشار را دارد.
 - برای نسبت های هدایت حرارتی بالا آرایش کاملا پر و آرایش مرزی توصیه می شوند
- برای نسبت هدایت حرارتی ۱/۴ آرایش مرکزی و رینگ توصیه می شوند در این حالات
 ناسلت متوسط تا ۶ برابر ناسلت متوسط لوله خالی افزایش می یابد

پیشنهادات برای کار های آینده:

- بررسی جریان آشفته به جای جریان آرام برای تمام آرایش ها
 بررسی آزمایشگاهی هندسه این مسئله و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج این کار
- الله مدل سازی سه بعدی مسئله و تزریق ماده متخلخل استوانه ای بصورت غیر هم محور با لوله 🛠
 - تزریق ماده متخلخل بصورت متناوب برای تمام حالت ها
- بررسی و استفاده از آرایش لایه ای با خواص ماده متخلخل متفاوت بجای حالت کاملا پر با ماده متخلخل با خواص ثابت.

۷- پیوست:فوم های فلزی

در دهه اخیر، یک دسته از فلزات سلولی، به نام فوم فلزی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی جدید با چگالی کم و در عین حال سفتی بالا و عایق بودن صوتی و حرارتی در عین نفوذ پذیری گاز بالا، مطرح شده اند و جذابیت بسیاری یافته اند. این مواد برای ساختارهای سبک، برای جذب انرژی و برای مدیریت حرارتی و یا حداقل برای بعضی از آنها پیشنهاد میشود. از جمله کاربردهای عمده فوم های فلزی در صنایع خودرو و هوافضا می باشد که علت اصلی آن خاصیت جذب انـرژی بسیار بالا در تنش های فشاری در این گروه مواد است [۶۶, ۶۷].

توجه به فوم های فلزی به دهه ۱۹۴۰، هنگامی که سوسنیک اختراعی را در زمینه ساخت فومهای فلزی ثبت کرد، بازمی گردد. او در روش ابداعی خود عناصری را با هم مخلوط کرد که اختلاف دمای ذوب و جوش بسیار زیادی داشتند. در نتیجه در دمای ذوب یکی از آنها، دیگری بخار می شد (برای مثال آلومینیوم و جیوه). با این روش او توانست فلز متخلخل تولیدکند [۸۸]. پس از آن در خلال سالهای متمادی روشهای متنوع دیگری نیز برای ساخت این چنین ساختارهایی، ابداع گردید که البته تمامی آنها در مقیاس آزمایشگاهی بودند. این تحقیقات ادامه داشت تا اینکه در دهه ۱۹۹۰، این محصولات مورد توجه ویژه قرار گرفتند و استفاده از آنها در مقیاس های صنعتی آغاز گردید. از آن به بعد اصلاح خواص آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت و ساخت انواع فوم های فلزی با توجه به خواص مورد نظر، گسترش یافت[۲].

فوم های فلزی در رقابت با فومهای پلیمری و سرامیکی دارای مزایا و معایبی بودند. مزیت عمده آنها نسبت به فومهای پلیمری استحکام بالاتر، تحمل دمای بیشتر و همچنین مقاومت در برابر برخی محلولهای آلی بود. از طرفی قابلیت ارتجاع پذیری آنها، مزیت اصلی در برابر فوم های سرامیکی بود. همچنین قابلیت انتقال حرارت و الکتریسیته نیز خاصیتی بود که تنها در فومهای فلزی یافت می شد [7].

عیب عمده فوم های فلزی، قیمت بالای روش تولید و عدم مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی

میباشد. این موضوع نیز با استفاده از ابداع روش های جدید تولید و همچنین بدست آوردن خواص منحصر به فرد از فوم های فلزی با توجه به نیاز و شرایط دهه های اخیر توجیه گردید. برای مثال استفاده از فوم های فلزی آلومینیوم در وسایل حمل و نقل، علاوه بر کاهش وزن خودرو و کم کردن مصرف سوخت منجر به افزایش ایمنی به علت داشتن خواص جذب ضربه نیز می شود که این مسئله با توجه به وجود بحران انرژی در دهههای اخیر، عیب بالای روش تولید فومهای فلری را توجیه میکند.

در سال های اخیر، تحقیقات گسترده ای بر روی این محصول صورت می گیرد و شرکت های زیادی در این زمینه فعالیت می کنند و اطلاعات مربوط به روش های جدید تولید و همچنین کاربردهای تازه در مقالات علمی و وب سایت های آنها منعکس می شود.

1-7- کاربرد های مواد متخلخل

فوم های فلزی دارای کاربردهای بسیار وسیع و متنوعی بوده و بسته به خصوصیات و ویژگی های مختلف آنها و نیز شرایط کاری متفاوت، که در ادامه به آن اشاره می شود، از آنها می توان در کاربردهای مختلف استفاده نمود:

الف) شکل هندسی: نوع باز یا بسته و مقدار تخلخل مورد نیاز، اندازه مطلوب حفرهها و سطح داخلی مورد نیاز؛

ب) متالورژی: فلز یا آلیاژ و حالت ساختاری مورد نیاز؛

پ) فرآیند تولید: امکان شکل دادن فوم یا جامد حفره دار یا امکان ساخت کامپوزیت هایی بـین فـوم و ورقه ها یا پروفیل های متداول؛

ت) اقتصاد: هزينه تمام شده و امكان توليد انبوه.

در اینجا فهرست وار خلاصه ای از کاربردهای بالقوه فومهای فلزی را ذکر می شود [۶۹] :

- ورقه های محکم و بسیار سبک برای ساخت و ساز و حمل و نقل؛
- جذب انرژی ذرهای در ماشین ها، آسانسورها و سیستم های جابجایی؛
 - ورقه های سقفی و دیواره ای ضد حریق با عایق گرمایی و صوتی؛
 - جداره های کمپرسور؛
 - تبادلگر گرمایی، فیلترها و کاتالیزورها؛
 - مبدلهای صوتی؛
 - محفظه گیربکس؛
 - بخشهای ساختاری فضاپیما؛
 - جاذب صوتی برای شرایط سخت؛
 - افزایش انتقال حرارت در سیستم های مختلف.

در ادامه بصورت خلاصه برخی از کاربردهای فوم های فلزی را تشریح می شود [۶۹]:

٧-1-1- صنعت حمل و نقل

بصورت تیتروار فواید استفاده از فوم های فلزی در صنعت حمل و نقل را می توان به این صورت خلاصه کرد:کاهش وزن، کاهش مصرف سوخت، افزایش ایمنی، کاهش آلودگی های محیطی و کاهش هزینه تولید. استفاده از فوم های آلومینیومی، به علت سهولت در ساخت و نصب، باعث شده که ساخت بدنه خودروها و قطارها ساده و آسان شده و هزینه تولید به میزان چشمگیری کاهش یابد. فوم های فلزی به کار رفته در بدنه وسایل حمل و نقل زمینی نسبت به قطعات تولید شده فولادی مشابه، نسبت استحکام به وزن بیشتری داشته و از طرفی به اندازه ۵۰٪ نیز سبکتر می باشد. امروزه می توان ۲۰٪ بدنه خودرو را با استفاده از فوم های آلومینیومی تولید کرد. به این ترتیب بر طبق آمارهای شرکت BMW آلمان، در حدود ۶۰ کیلوگرم از وزن خودرو کاهش یافته و در نتیجه میزان مصرف سوخت نیز کاهش می یابد، به طوریکه می توان گفت به ازای هر گالن بنزین حدودا ۲/۶ مایل بیشتر مسافت پیموده می شود.

۲-1-۲- جذب کننده ضربه

این خاصیت کارآیی فوم را به عنوان ماده ای سبک، ارزان، جاذب تکانهای ناگهانی در بدنه جلویی اتومبیل ها یا قطارها برای محافظت از سرنشینان در هنگام تصادفات افزایش میدهد . این ویژگی سبب شده است تا فوم های فلزی به صورت تجاری استفاده شوندو می توانند در دربهای ضد ضربه نیز به کار روند. به خاطر اینکه دیواره سلولی آن طبیعتاً از شکست ساختاری پیش از موقع به عنوان واحدهای جاذب انرژی جلوگیری می کنند و از سرنشینان اتومبیل در هنگام مواجه با مواد سوختنی و انفجاری و تصادفات محافظت و یا به عبارتی دیگر مقاوم در برابر دما و حرارت می باشد.

۷-۱-۷- سطح وسیع

ترکیب رسانایی الکتریکی بالا و سطح وسیع فومهای سلول باز آن ها را برای استفاده به جای الکترود مناسب ممکن ساخته است. به عنوان مثال: در باطریهای اسید _ سرب ساختارهای سلول باز میتوانند حامی های کاتالیزوری بسیار خوبی باشند.

4-1-4- ذخیره و انتقال مایعات

یکی از قدیمی ترین کاربردهای مواد متخلخل متالورژی پودر، روانسازها می باشند. روغن در روزنه های بین ذرات ذخیره شده و کم کم خارج می شود، که این مورد جایگزین استفاده از روغن شده است. این کاربرد محدود به روغن نمی شود مثلاً آب می تواند ذخیره شده و کم کم برای کنترل رطوبت بصورت اتوماتیک آزاد شود یا عطر می تواند ذخیره شده و کم کم بخار شود و یا می توان از غلتک های متخلخل استفاده کرد تا آب یا چسب بر روی سطحشان پخش شود. انتقال مایع می تواند بوسیله واکنش مویینگی به تنهایی و یا با فشار اضافی مثلاً در غلتک ها صورت گیرد. در نهایت، ساختارهای فلزی خیلی باز می توانند برای ذخیره مایعات در دمای ثابت و در شرایطی که نیاز به سرمازایی است، استفاده شوند.

۷-۱-۵- مبدلهای حرارتی و سردکنها

بسیاری از فوم های رسانای مسی یا آلومینیومی میتوانند بعنوان مبادله کننده های حرارتی استفاده شوند. در این مورد، ساختارهای با تخلخل باز نیاز می باشند. حرارت میتواند در فوم جابه جا شده و به گازها یا مایع هایی اضافه شود و فوم را همزمان گرم یا سرد کند. در تخلخلهای باز، فشار درون حفره ها کمترین می شود. یک مثال از چنین کاربردهایی سینک های حرارتی فشرده برای سرد کردن ابزارآلات میکروالکترونیک مثل چیپ های کامپیوتری یا Power وسایل الکترونیکی می باشد.

زمینه کاربردی دیگر برای مواد با تخلخل باز نشر سرمایی می باشد. مساحت سطح زیاد، مقاومت حرارتی کم و هدایت حرارتی خوب موجب ایجاد شرایط ایده آل برای رسیدن به چنین اهدافی می شود.

۲-۷- روش های تولید فوم های فلزی

روش های زیادی برای تولید فوم های فلزی سلول باز وجوددارد. بعضی روش ها به تکنیک هایی که در آنها به صورت مایع یا با مذاب پلیمرها عمل فوم سازی صورت می گیرد، شبیه هستند در حالی که بعضی روش های دیگر به صورت مخصوص و ویژه طراحی شده اند، که در این روشها از مزایا و برتری خواص فلزات مانند توانایی رسوب دهی توسط جریان برق، استفاده شده است [۶۹].
4-4-1- فوم سازی از طریق تزریق گاز

این روش یکی از روش های تولید در حالت مذاب شناخته می شود، این فرایندها یکی از آسان ترین روش ها برای بکارگیری در مورد آلیاژهای آلومینیوم است زیرا این آلیاژها چگالی کمی دارند و هنگامی که مذاب این آلیاژها در معرض هوا یا دیگر گازهای حاوی اکسیژن قرار می گیرند، بیش از حد اکسید نمیشوند. روش های مختلفی برای این آلیاژها وجود دارد که یکی از بهترین آن ها در شکل ۸ ۱نشان داده شده است. ابتدا آلومینیوم خالص یا آلیاژی از آلومینیم ذوب می شود و ۵ تا ۱۵ درصد وزنی ذرات پایدار کننده ی سرامیکی به مذاب مذکور اضافه می شود. این ذرات، با قطر ۲۵ در ۲۵ می میکرون، را می توان از آلومینا، زیر کونیا یا کاربید سیلیسیم انتخاب کرد.



شکل ۲-۱ شماتیک تولید فوم فلزی با روش تزریق گاز [۱]

با استفاده از نازلهای ارتعاشی مخصوص به داخل مذاب، گاز تزریق می شود و فومسازی صورت می گیرد. کاربرد و کارکرد نازل ها، تولید ذرات و حباب های گازی ریز در مذاب و توزیع یکنواخت آن ها می اشد. برای تولید حباب ها داخل مذاب آلومینیوم، می توان از گازهای مختلفی استفاده کرد. در اکثر موارد از هوا استفاده می شود اما دی اکسیدکربن، اکسیژن، گازهای خنثی و حتی می توان آب هم برای تولید حباب، داخل مذاب آلومینیوم تزریق نمود. حباب هایی که با این فرایند تولید می شوند، روی سطح مذاب شناور می شوند و سپس شروع به انجماد می کنند [۱].

۲-۲-۲ روش عامل فوم ساز

این روش نیز یکی از روش های حالت جامد است. اساس این روش بر مبنای، افزودن یک عامل فومساز به داخل مذاب به جای دمیدن گاز است. عامل فوم ساز تحت تاثیر حرارت تجزیه می شود و گاز آزاد می کند که موجب ادامه یافتن فرایند فومسازی می شود. مراحل این روش (مراحل آلپوراس) که توسط شرکت Shinko wire ژاپن تولید می شود در شکل ۲۸ امده است.در این تکنیک، برای تولید فوم آلومینیومی ابتدا فلز کلسیم به مذاب آلومینیوم در دمای ۹۸۰ درجه سانتی گراد افزوده شده سپس برای چند دقیقه مذاب بهم زده می شود. زمانی که ویسکوزیته ی مذاب به صورت پیوسته زیاد می شود، به علت تشکیل اکسیدکلسیم (CaO)،اکسید کلسیم آلومینیوم (Aol2O4)و یا شاید حتی ویسکوزیته مذاب به مقدار معلوب رسید، هیدرید تیتانیوم (CaAl2O4)و یا شاید حتی ویسکوزیته مذاب به مقدار معلوب رسید، هیدرید تیتانیوم (TiH2) افزوده می شود. بعد از این که وزنی).هیدرید تیتانیوم، بعنوان یک عامل فوم ساز عمل می کند و گاز هیدروژن در مذاب ویسکوز داغ، آزاد می شود. بلافاصله مذاب شروع به انبساط می کند و به تـدریج مخـزن و ظـرف فـوم سـازی را پـر می کند. پس از خنک کاری فوم فلزی مورد نظر تولید می شود [۱].



شکل ۲-۷ تولید فوم فلزی با روش عامل فوم ساز توسط شرکت Shinko wir [۱]

۷-۲-۳ روش عامل فضا ساز(ریخته گری)

می توان فلزات متخلخل سبک را با ریختن مذاب فلز در اطراف ذرات ریز معدنی گرانولی یا کره های توخالی با چگالی پایین تولید کرد. این ذرات ریز گرانولی درون محصول فلزی بعد از ریخته گری باقی می مانند (محصول حاصل را فوم ترکیبی می نامند) یا این ذرات گرانول را می توان با لیچ کردن در یک حلال مناسب، اسید و یا حتی با عملیات حرارتی از ساختار حاصل خارج کرد (شکل ۸ ۳) [۶۶].



شکل ۲-۳ روش تولید فوم فلزی با عامل فوم ساز [۶۹]

۷-۲-۴ روش عامل خارج شونده (متالوژی پودر)

در این روش فوم فلزی با استفاده از مواد پرکننده و پودرهای فلزی تولید می شوند. از ذرات یا کره های تو خالی سرامیکی و یا پلیمری، نمک ها و یا حتی فلزات را می توان بعنوان پرکننده استفاده کرد. مخلوط خارج شونده (نمک یا کربومیاد) به همراه پودر فلزی پایه با نسبت حجمی مشخص با یک دیگر مخلوط می شوند. معمولاً برای بهتر مخلوط شدن پودر پایه با خارج شونده، خارج شونده به ماده ای نظیر اتانول آغشته می شود. سپس مخلوط آماده شده تحت فشار مشخص قرار گرفته و فشرده می شود. میزان فشار وارد شده یکی از عوامل مهم در استحکام و میزان سلول باز بودن فوم است. اگر درصد فلز محتوی به میزان کافی کم باشد، این امکان وجود دارد که تقریباً تمام مواد پرکننده در مرحله بعدی از بین بروند، چرا که مواد پرکننده که با هم در تماس هستند، شبکه ای مرتبط را تشکیل می دهند. این کار را می توان با عملیات حرارتی، شستشو و یا با استفاده از یک حلال آبی انجام داد. در نهایت برای استحکام بیشتر فوم تا دمای بالا (قبل از نقطه جوش پودر فلزی) برای چند



شکل ۲-۴ روش متالوژی پودر برای ساخت فوم فلزی [۶۹]

۲-۷-۵- روش رسوب گذاری الکتریکی

تکنیک رسوب گذاری از حالت یونی فلزات آغاز می شود، یعنی محلولی از یونها در یک الکترولیت. به صورت الکتریکی فلز روی یک فوم پلیمری با تخلخلهای باز رسوب داده می شود که این فوم پلیمری بعداً از بین می رود (شکل ۸ ۵). این فرایند و فرایند ریخته گری دقیق که در بخش های قبلی توضیح داده شده است، این موضوع را بیان می کنند که، فوم سازی واقعی در حالت فلزی صورت نمی گیرد. در حین فرایند یک فوم پلیمری انتخاب می شود که در این فرایند فاز جای فوم پلیمری را می گیرد. برای روی یک فوم پلیمری را می گیرد. بعد از بین می رود (شکل ۸ ۵). این فرایند که، فوم سازی واقعی در حالت فلزی صورت نمی گیرد. در حین فرایند یک فوم پلیمری انتخاب می شود که در این فرایند فلز جای فوم پلیمری را می گیرد. برای رسوب گذاری الکتریکی روی یک فوم پلیمری، در ابت دا لازم است که فوم پلیمری هدایت الکتریکی فرو الکتریکی داشته باشد. برای این کار می توان فوم پلیمری را درون یک دوغاب رسانای الکتریکی فرو برده که این دوغاب بر پایه گرافیت یا کربن می باشد. بنابراین رسانا کردن پلیمر با غوطه وری فوم در دوم در در محلول آبکاری الکترولیزو یا با ایجاد یک لایه نازک رسانا روی پلیمر به کمک کاتد کاته دوم در این می محلول آبکاری الکترولیزو یا با ایجاد یک لایه نازک رسانا روی پلیمر به کمک کاتد کاته دوم در این می محلول آبکاری الکترولیزو یا با ایجاد یک لایه نازک رسانا روی پلیمر به کمک کاتد

sputtering صورت می گیرد. در نتیجه مشکل نارسانا بودن پلیمر را در ابتدای کار به این صورت می توان برطرف کرد. بعد از اینکه آبکاری الکتریکی تمام شد، پلیمر ذکر شده را می توان با عملیات حرارتی، از کامپوزیت پلیمر/ فلز از بین برد [۶۹].



شکل ۲-۵ تکنیک رسوب گذاری الکتریکی برای ساخت فوم فلزی سلول باز [۶۹]

۷-۳- نمونه هایی از کارهای تجربی انجام شده

جیانگ [۷۰] با استفاده از عامل خارج شونده کربومیاد فوم های فلزی با تخلخلی بین ۵۰ تا ۸۰ درصـد را تولید کرد. نمونه ای از فوم ساخته شده به روش وی در شکل ۶۸ دیده می شود.



شکل ۲-۶ فوم فلزی ساخته شده توسط جیانگ [۲۰]

چو [۷۱] نیز فوم آلمینیومی را با روش متالوژی پودر و با خارج کننده های سرامیکی ساخت. فوم فلزی وی با تخلخل بالای ۹۰ درصد و بصورت سلول باز ساخته شد. نمونه دانه های سرامیکی در شکل ۸ ۷و فوم ساخته شده در شکل ۸ ۸ دیده میشود.



شکل ۷-۷ دانه های سرامیکی به عنوان خارج شونده استفاده شده توسط چو [۷۱]



شکل ۲-۸ فوم سلول باز ساخته شده توسط چو[۲۱]

بافتی [۷۲] نیز تحقیق جامعی بر روی تاثیر اندازه خارج شونده بر مشخصات فوم فلزی سلول باز را انجام داد. وی از روش متالوژی پودر استفاده و از کربوماید در اندازه های مختلف (شکل ۹۸) بهعنوان جایگذارنده بهره برد. کربوماید آغشته با اتانول را با پودر فلزی بصورت کامل مخلوط و زیر فشار ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال بصورت محوری قرار گرفته، و پس از فشرده شدن از قالب خارج می شوند. خارج شونده ها در نمونه آماده شده بوسیله قرار دادن نمونه در آب در حال جوش خارج می شوند. در نهایت برای بالا بردن استحکام، نمونه در کوره با دمای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده می شود.



شکل ۷-۹ تصویر خارج شونده (کربومیاد) استفاده شده [۷۲] تخلخل بدست آمده در این روش بسته به انـدازه جایگذارنـده و فشـار اعمـالی بـین ۴۰ تـا ۸۵ درصـد حجمی متفاوت است. شکل ۸ ۱۰ فوم ساخته شده توسط این روش را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۰ تاثیر فشار اعمالی و اندازه خارج شونده بر شکل محیط متخلخل [۲۲] تحقیقات زیادی از جمله [۲۳–۷۶] نیز بر روی روش های متفاوت ساخت فوم های فلزی انجام گرفته است.

4-4- خواص مواد متخلخل

فوم ها محدوده خواص فلزات را توسعه می بخشند. این خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی معمولاً با همان روش هایی اندازه گیری می شوند، که برای مواد جامد متراکم به کار می رود. مشخص است که تمام خواص به یک میزان تغییر نمی کنند. به عنوان مثال خواصی مانند ساختار کریستالی، ضریب انبساط حرارتی و دمای ذوب برای هر فلز در حالت فوم و جامد متراکم یکسان است .

سایر خواص فیزیکی مانند ظرفیت حرارتی معمولاً تابعی خطی از دانسیته هستند. به طور دقیق تر ظرفیت حرارتی هر ماده مجموع ظرفیت حرارتی فازهای مختلف آن ماده است و برای بدست آوردن ظرفیت حرارتی هر فاز، میزان آن در درصد وزنی آن فاز ضرب می شود. در فوم های فلزی با دانسیته پایین درصد وزنی فاز گازی کم است، بنابراین ظرفیت حرارتی کل ساختار سلولی تقریبا برابر با ظرفیت حرارتی فلز پایه است. در نهایت بسیاری از خواص به دانسیته (میزان تخلخل) بستگی دارند به عنوان مثال صلبیت، استحکام مکانیکی، هدایت حرارتی و الکتریکی و خواص صوتی .

پارامترهایی که خواص وابسته به ساختار مواد فومی را تحت تاثیر قرار می دهند، به ترتیب اهمیت عبارتند از:

- خواص ذاتی ماده تشکیل دهنده
 - دانسیته نسبی
- نوع ساختار فوم (سلول های باز یا بسته)
- در فوم با سلول های بسته، میزان جامدی که در گوشه ها، یال ها و دیواره ها قرار می گیرد
 - ناهمگنی یا شیب در توزیع جرم
 - اندازه سلول ها و توزيع اندازه آنها
 - شکل سلول ها
 - نحوه اتصال يال هاى سلول
 - عيوب مانند شكستن ديواره سلول ها .

بدلیل اینکه ذکر تمامی خواص فوم های فلزی در حوصله این بحث نمی گنجد در ادامه فقط به خواص حرارتی این مواد اشاره می شود.

۷-۵- خواص حرارتی فومهای فلزی

شکل ۲-۱۱ انتقال حرارت یک فوم فلزی با حفرهها باز را بررسی میکند. در شکل فوم با حفرهها باز ۱۰۰ بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است که در آن ضخامت لایه فومی b و طول آن l است. سیالی با سرعت Vf و دمای اولیه To وارد فوم شده و با دمای Te از آن خارج می شود. در حین عبور سیال از داخل فوم حرارت از فوم به سیال منتقل می شود. تصور شماتیک ساختار فوم در شکل ۱۰-۱۱ آورده شده است، که در آن b قطر یال سلول ها، h ضریب انتقال حرارت موضعی در سطح یال سلول ها و q شار حرارتی در واحد سطح می باشد [۱].



شکل ۲-۱۱ فوم فلزی با حفرهها باز که بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است. در اثر عبورسیال از داخل فوم به علت نسبت سطح به حجم زیاد آن، انتقال حرارت از صفحه رسانا به سیال به خوبی صورت می گیرد [۱]

سه اصل مهم را در طراحی برای افزایش سرعت انتقال حرارت از فوم به سیال باید در نظر گرفت:

الف) پیوند های حرارتی زیادی برای انتقال حرارت به سیال نیاز است. در نتیجه فلزاتی مانند آلومینیوم و مس ترجیح داده می شوند؛

ب) به وجود آمدن جریان آشفته در سیال مناسب است به این دلیل که انتقال حرارت از سطح جامد به سیال را سرعت می بخشد؛

پ) وجود افت فشار کم بین ورود و خروج سیال، تا با استفاده از پمپ کردن سیال با یک سیستم مناسب بتوان آن را از درون فوم عبور داد. انتقال حرارت به سیال با کاهش d و یا افزایش دانسیته نسبی افزایش می یابد به این دلیل که مساحت سطح داخلی نسبت عکس با d دارد، و با کاهش قطر یال سلول ها (d) مساحت سطحی که در انتقال حرارت نقش دارد افزایش می یابد و همچنین با افزایش دانسیته نسبی سطح مقطع هدایت حرارتی افزایش می یابد که این عامل نیز موجب افزایش انتقال حرارت می شود. درحالت کلی با افزاش نسبت سطح به حجم در فوم فلزی، سطح تماس فوم با سیال افزایش می یابد و باعث افزایش انتقال حرارت بین ای دارد. و باعث مواد یا کاهش قطر یال سلول ها (d) مساحت سطحی که در انتقال حرارت نقش دارد افزایش می یابد و همچنین با افزایش دانسیته نسبی سطح مقطع هدایت انتقال حرارت نقش دارد افزایش می یابد و موجب افزایش انتقال حرارت می شود. درحالت کلی با افزاش نسبت سطح به حجم در فوم فلزی، سطح تماس فوم با سیال افزایش می یابد و باعث افزایش انتقال حرارت بین این دو می شود [1].

۷-۵-۱- دمای ذوب

دمای ذوب فوم های فلزی دقیقاً مشابه با ماده ای است که از آن ساخته می شوند. در صورتی که سطح با یک لایه اکسید پیوسته پوشانده شده باشد، دمای ذوب افزایش کمی خواهد داشت به عنوان مثال در مورد فوم های آلومینیومی، ناحیه ای از سطح که با لایه ای از اکسید پوشانده شده است، با افزایش تخلخل و کاهش اندازه حفرهها، افزایش می یابد. هنگامی که لایه اکسید به اندازه کافی ضخیم باشد می تواند از ساختار متخلخل در بالاتر از دمای ذوب آلیاژ نیز محافظت کند.

۷-5-۲- گرمای ویژه

انرژی مورد نیازبرای افزایش دمای ساختارهای سلولی به میزان واحد درجه حرارت اغلب اوقات مشابه مقدار آن برای مواد جامد است، هنگامی که جرم مساوی از دو ماده در نظر گرفته می شود. در صورت وجود اکسیدهای نازک سطحی و هوای محبوس شده در حفرهها تفاوت خیلی کمی بین مقدار این انرژی بین دو ماده وجود خواهد داشت. در هر صورت در حالت کلی ،گرمای ویژه بر واحد حجم (CV)ساختارهای سلولی کمتر است و این امر آنها را برای کاربردهایی که ظرفیت حرارتی کم مورد نیاز است، مانند سیستم هایی که سریعا سرد و گرم می شوند، مناسب می سازد .

7-5-3 ضريب انبساط حرارتي

ضریب انبساط حرارتی (۵) فوم های فلزی نیز تفاوت چندانی با توده فلز ندارد، در حالیکه هدایت حرارتی فوم های فلزی λ بسیار کمتر است. در حقیقت اعوجاج حرارتی بیشتری از فوم های فلزی انتظار می رود که با افزایش نسبت λ/α افزایش مییابد. برای جلوگیری از این پدیده، تغییرات دمایی در ساختارهای سلولی باید به حداقل میزان خود برسد.

- 1. Ashby, M.F., et al., *Metal Foams: A Design Guide: A Design Guide*. 2000: Elsevier.
- 2. Degischer, H.-P. and B. Kriszt, *Handbook of cellular metals*. 2002: Wiley-vch Weinheim.
- 3. Mancin, S., et al., *Experimental air heat transfer and pressure drop through copper foams*. Experimental thermal and fluid science, 2012. **36**: p. 224-232.
- 4. Azzi, W., W. Roberts, and A. Rabiei, *A study on pressure drop and heat transfer in open cell metal foams for jet engine applications*. Materials & design, 2007. **28**(2): p. 569-574.
- 5. Calmidi, V. and R. Mahajan, *Forced convection in high porosity metal foams*. Journal of Heat Transfer, 2000. **122**(3): p. 557-565.
- 6. Zhao, C., et al., *Thermal transport phenomena in Porvair metal foams and sintered beds*. Final Report, August, 2001.
- 7. Lu, W., C. Zhao, and S. Tassou, *Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(15): p. 2751-2761.
- 8. Zhao, C., W. Lu, and S. Tassou, *Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers*. *Part II: Tube heat exchangers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(15): p. 2762-2770.
- 9. Dukhan, N. and K.-C. Chen, *Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. **32**(2): p. 624-631.
- 10. DeGroot, C.T., A.G. Straatman, and L.J. Betchen, *Modeling forced convection in finned metal foam heat sinks*. Journal of Electronic Packaging, 2009. **131**(2): p. 021001.
- 11. Du, Y., et al., *Numerical study of conjugated heat transfer in metal foam filled doublepipe.* International journal of heat and mass transfer, 2010. **53**(21): p. 4899-4907.
- Mahjoob, S. and K. Vafai, A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. 51(15): p. 3701-3711.
- 13. Daniels, P., A numerical solution of the vertical boundary-layer equations in a horizontally heated porous cavity. Journal of engineering mathematics, 1983. **17**(4): p. 285-300.
- 14. Hickox, C. and D. Gartling, *A numerical study of natural convection in a horizontal porous layer subjected to an end-to-end temperature difference*. Journal of Heat Transfer, 1981. **103**(4): p. 797-802.
- 15. Simpkins, P. and P. Blythe, *Convection in a porous layer*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1980. **23**(6): p. 881-887.
- 16. Walker, K.L. and G.M. Homsy, *Convection in a porous cavity*. Journal of Fluid Mechanics, 1978. **87**(03): p. 449-474.
- 17. Beckermann, C., R. Viskanta, and S. Ramadhyani, *A numerical study of non-Darcian natural convection in a vertical enclosure filled with a porous medium*. Numerical heat transfer, 1986. **10**(6): p. 557-570.
- Vasseur, P., C. Wang, and M. Sen, Natural convection in an inclined rectangular porous slot: the Brinkman-extended Darcy model. Journal of heat transfer, 1990. 112(2): p. 507-511.
- 19. Tong, T. and E. Subramanian, *A boundary-layer analysis for natural convection in vertical porous enclosures—use of the Brinkman-extended Darcy model.* International journal of heat and mass transfer, 1985. **28**(3): p. 563-571.
- 20. Lauriat, G. and V. Prasad, *Natural convection in a vertical porous cavity: a numerical study for Brinkman-extended Darcy formulation.* Journal of heat transfer, 1987. **109**(3): p. 688-696.
- 21. Mharzi, M., M. Daguenet, and S. Daoudi, *Thermosolutal natural convection in a vertically layered fluid-porous medium heated from the side*. Energy conversion and

management, 2000. 41(10): p. 1065-1090.

- 22. Jen, T.-C. and T. Yan, *Developing fluid flow and heat transfer in a channel partially filled with porous medium*. International journal of heat and mass transfer, 2005. **48**(19): p. 3995-4009.
- 23. Shokouhmand, H., F. Jam, and M. Salimpour, *The effect of porous insert position on the enhanced heat transfer in partially filled channels*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011. **38**(8): p. 1162-1167.
- 24. Albanakis, C., et al., *Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2009. **33**(2): p. 246-252.
- 25. Nebbali, R. and K. Bouhadef, *Non-Newtonian fluid flow in plane channels: Heat transfer enhancement using porous blocks*. International Journal of Thermal Sciences, 2011. **50**(10): p. 1984-1995.
- 26. OYAKAWA, K. and I. MABUCHI, *Fluid flow and heat transfer in a parallel plate duct containing a cylinder*. Bulletin of JSME, 1981. **24**(196): p. 1795-1802.
- 27. Jiang, P.-X. and X.-C. Lu, *Numerical simulation of fluid flow and convection heat transfer in sintered porous plate channels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(9): p. 1685-1695.
- 28. Jiang, P.-X., et al., *Experimental research on convection heat transfer in sintered porous plate channels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. **47**(10): p. 2085-2096.
- 29. Nimvari, M., M. Maerefat, and M. El-Hossaini, *Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel partially filled with a porous media*. International Journal of Thermal Sciences, 2012. **60**: p. 131-141.
- 30. Coulaud, O., P. Morel, and J. Caltagirone, *Numerical modelling of nonlinear effects in laminar flow through a porous medium*. Journal of Fluid Mechanics, 1988. **190**: p. 393-407.
- 31. Pavel, B.I. and A.A. Mohamad, *An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers fitted with porous media.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. **47**(23): p. 4939-4952.
- 32. Kurtbas, I. and N. Celik, *Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(5): p. 1313-1325.
- Targui, N. and H. Kahalerras, Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures. Energy Conversion and Management, 2008. 49(11): p. 3217-3229.
- 34. Huang, P.-C. and C.-F. Yang, *Analysis of pulsating convection from two heat sources mounted with porous blocks*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. **51**(25): p. 6294-6311.
- 35. Baloyi, J., T. Bello-Ochende, and J.P. Meyer, *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, 2012. **39**(7): p. 966-970.
- 36. Guerroudj, N. and H. Kahalerras, *Mixed convection in a channel provided with heated porous blocks of various shapes*. Energy conversion and management, 2010. **51**(3): p. 505-517.
- Hsieh, W., et al., *Experimental investigation of heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. 47(23): p. 5149-5157.
- 38. Huang, P.-C. and C.-C. Chen, *Simulation of mixed convection in a vertical channel containing discrete porous-covering heat blocks*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**(11): p. 3147-3159.
- 39. Martin, A., C. Saltiel, and W. Shyy, *Frictional losses and convective heat transfer in sparse, periodic cylinder arrays in cross flow.* International journal of heat and mass transfer, 1998. **41**(15): p. 2383-2397.

- 40. Chen, C.-C., P.-C. Huang, and H.-Y. Hwang, *Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **58**(1): p. 356-373.
- 41. Bejan, A. and A.D. Kraus, *Heat transfer handbook*. Vol. 1. 2003: John Wiley & Sons.
- 42. Nield, D.A. and A. Bejan, *Mechanics of Fluid Flow Through a Porous Medium*. 2013: Springer.
- 43. Wooding, R., *Steady state free thermal convection of liquid in a saturated permeable medium.* Journal of Fluid Mechanics, 1957. **2**(03): p. 273-285.
- 44. Beck, J.L., *Convection in a box of porous material saturated with fluid.* Physics of Fluids (1958-1988), 1972. **15**(8): p. 1377-1383.
- 45. Batchelor, G.K., *An introduction to fluid dynamics*. 2000: Cambridge university press.
- 46. Joseph, D., D. Nield, and G. Papanicolaou, *Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium*. Water Resources Research, 1982. **18**(4): p. 1049-1052.
- 47. Ward, J., *Turbulent flow in porous media*. Journal of the Hydraulics Division, 1964. **90**(5): p. 1-12.
- 48. Ergun, S., *Fluid flow through packed columns*. Chemical engineering progress, 1952.
 48.
- 49. Beavers, G., E. Sparrow, and D. Rodenz, *Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of spheres*. Journal of Applied Mechanics, 1973. **40**(3): p. 655-660.
- 50. Durlofsky, L. and J. Brady, *Analysis of the Brinkman equation as a model for flow in porous media.* Physics of Fluids, 1987. **30**(11): p. 3329-3341.
- 51. Rubinstein, J., *Effective equations for flow in random porous media with a large number of scales.* Journal of Fluid Mechanics, 1986. **170**: p. 379-383.
- 52. Wakao, N. and S. Kagei, *Heat and mass transfer in packed beds*. Vol. 1. 1982: Taylor & Francis.
- 53. Hwang, G., C. Wu, and C. Chao, *Investigation of non-Darcian forced convection in an asymmetrically heated sintered porous channel.* Journal of heat transfer, 1995. **117**(3): p. 725-732.
- 54. Dixon, A.G. and D.L. Cresswell, *Theoretical prediction of effective heat transfer parameters in packed beds*. AIChE Journal, 1979. **25**(4): p. 663-676.
- 55. Rees, D.A.S., *Microscopic modeling of the two-temperature model for conduction in heterogeneous media.* Journal of Porous Media, 2010. **13**(2).
- 56. Mahdavi, M., et al., *Entropy generation and heat transfer numerical analysis in pipes partially filled with porous medium.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **79**: p. 496-506.
- 57. Mahmoudi, Y. and N. Karimi, *Numerical investigation of heat transfer enhancement in a pipe partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **68**: p. 161-173.
- 58. Rong, F., et al., *Numerical study of heat transfer enhancement in a pipe filled with porous media by axisymmetric TLB model based on GPU*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **70**: p. 1040-1049.
- 59. Mahmoudi, Y. and M. Maerefat, *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, 2011. **50**(12): p. 2386-2401.
- 60. Morosuk, T., *Entropy generation in conduits filled with porous medium totally and partially*. International journal of heat and mass transfer, 2005. **48**(12): p. 2548-2560.
- 61. Eiamsa-Ard, S. and P. Promvonge, *Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape.* Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(13): p. 1673-1682.
- 62. Hasanpour, A., M. Farhadi, and K. Sedighi, *A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **55**: p. 53-62.
- 63. Eiamsa-Ard, S., K. Wongcharee, and S. Sripattanapipat, *3-D Numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-*

fit twisted tapes. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009. **36**(9): p. 947-955.

- 64. Ghadirijafarbeigloo, S., A. Zamzamian, and M. Yaghoubi, 3-d numerical simulation of heat transfer and turbulent flow in a receiver tube of solar parabolic trough concentrator with louvered twisted-tape inserts. Energy Procedia, 2014. **49**: p. 373-380.
- 65. Ko, K.-H. and N. Anand, *Use of porous baffles to enhance heat transfer in a rectangular channel.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(22): p. 4191-4199.
- 66. Lee, G.-J., et al., *Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method.* Thermochimica Acta, 2012. **542**: p. 24-27.
- 67. Xuan, Y. and Q. Li, *Heat transfer enhancement of nanofluids*. International Journal of heat and fluid flow, 2000. **21**(1): p. 58-64.
- 68. Sosnick, B., Process for making foamlike mass of metal. 1948, Google Patents.
- 69. Banhart, J., *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams.* Progress in materials science, 2001. **46**(6): p. 559-632.
- 70. Jiang, B., et al., *A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process.* Materials Letters, 2005. **59**(26): p. 3333-3336.
- 71. Chou, K.-S. and M.-A. Song, *A novel method for making open-cell aluminum foams with soft ceramic balls.* Scripta Materialia, 2002. **46**(5): p. 379-382.
- 72. Bafti, H. and A. Habibolahzadeh, *Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters*. Materials & Design, 2010. **31**(9): p. 4122-4129.
- 73. Hassani, A., A. Habibolahzadeh, and H. Bafti, *Production of graded aluminum foams via powder space holder technique*. Materials & Design, 2012. **40**: p. 510-515.
- 74. Vaidyanathan, R., et al., *Aluminum foams processed by rapid prototyping for lightweight structures*. 2004, DTIC Document.
- 75. Proa-Flores, P.M. and R.A. Drew, *Production of Aluminum Foams with Ni-coated TiH2 Powder*. Advanced Engineering Materials, 2008. **10**(9): p. 830-834.
- 76. Jamshidi-Alashti, R. and G. Roudini, *Producing replicated open-cell aluminum foams* by a novel method of melt squeezing procedure. Materials Letters, 2012. **76**: p. 233-236.

Abstract

Needs for energy has been growing in recent decades and at the other hand fuel resources are limited and finite, which is why in recent years enhancing heat transfer in various engineering systems has been noticed by many researchers and several studies about this have been made. One of the most common way to improve heat transfer in heat exchangers is inserting porous media. In this study, heat transfer and pressure drop in a horizontal pipe with forced convection flow by inserting porous media, is numerically investigated in two-dimensional axisymmetric case. Flow considered is laminar and boundary condition on the wall is constant heat flux. Effect of different parameters such as permeability, thickness of porous media and thermal conductivity ratio on the rate of heat transfer and pressure drop is studied. The results shows that when the velocity at the inlet of pipe is constant for the most arrangements, inserting porous media increases the heat transfer rate and for example for the case partially filled in central arrangement, the average Nusselt number increases up to six times of the free pipe average Nusselt number. Although inserting porous media increases the heat transfer rate but also increases the pressure drop along the pipe which requires more pumping power. Thus inserting porous media is suitable from the heat transfer point of view and undesirable form the pressure drop point of view. So inserting porous media in the pipe is investigated from the heat performance point of view.

Keywords: laminar flow, conductive heat transfer, pressure drop, porous media



Shahrood University of Technology

Faculity: Mechanic

Investigation of heat transfer and pressure drop in a pipe with inserting non-uniform metal foam

Milad Sarouzeh Rostami

Supervisors:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Dr. Mohsen nazari

Date: Summer 2015