

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی مواد

## شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در محیط‌های متخلخل فلزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- استخراج فلزات

محمد ظفیری

اساتید راهنما

دکتر محمود مرآتیان اصفهانی

دکتر مسعود پنجه پور

استاد مشاور

دکتر محسن دوازده امامی

بهمن ماه ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد - استخراج فلزات آقای محمد ظفری  
تحت عنوان

## شبیه سازی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در محیط های متخلخل فلزی

در تاریخ ۹۲/۱۱/۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- |                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| دکتر مسعود پنجه پور        | ۱- استاد راهنمای پایان نامه   |
| دکتر محمود مرآتیان اصفهانی | ۲- استاد راهنمای پایان نامه   |
| دکتر مهدی احمدیان          | ۳- استاد داور                 |
| دکتر محمد رضا سلیم پور     | ۴- استاد داور                 |
| دکتر محسن دوازده امامی     | ۵- استاد مشاور                |
| دکتر کیوان رئیسی           | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

## شکر و قدرانی

در ابتدا خدای مهربان و بزرگ خود را به خاطر تمامی نعمت‌هایش شکر می‌گویم، نعمت‌هایی که حتی توان جبران یکی از آن‌ها را خود نمی‌بینم. با قلبی سرشار از سرور و شادی به خاطر کسب علم و سپری شدن مرحله دیگری از زندگی خود به خدای خویش می‌بالم. بعد از شکر خدا لازم است از زحمات پدر و مادر عزیزم کمال قدر دانی را کنم که بسیار برای بالیدن من شقت‌ها کشیدند. از راه‌نمایی‌ها و زحمات استاد گرامی و محترم جناب آقای دکتر پنجه‌پور که همواره هم در درس مسائل علمی و هم در زندگی، بسیار از ایشان آموختم کمال تقدیر و شکر را می‌نمایم. از زحمات دکتر مرآتیان نیز تقدیر و شکر می‌نمایم. از آقای دکتر دوازده‌امامی که همواره با راهنمایی‌های خود مسیر این تحقیق را هموار کردند نیز شکر می‌کنم. از دوستان دانشکده مکانیک به خصوص مهندس ذهب صنّعی، مهندس اعضضادی و مهندس ابویان که سهم بسیاری در پیشرفت اینجانب ایفا نمودند کمال سپاسگزاری را دارم.

از کلیه دوستان مواد گروه دانه‌ای به ویژه مهندس مختاری، مهندس نصیری، مهندس سلیمانی، مهندس ضیایی، مهندس علینزاده، مهندس شاه‌زیدی و مهندس قحمان‌پور که محظّات پر از خاطره و شیرینی را با یکدیگر سپری کردیم نیز شکر می‌کنم.

کلیه ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
(رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر مهربان  
و خواهر دلسوزم

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
۵۵	فهرست تصاویر
سیزده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۴	فصل دوم: مرور مطالعاتی
۴	۱-۲ فرایندهای تولید فوم فلزی
۶	۱-۱-۲ روش پودری
۹	۱-۲-۲ رسوب الکتروشیمیایی
۹	۱-۲-۳ رسوب بخار
۱۱	۲-۲ نفوذ پذیری مواد متخلخل
۱۶	۳-۲ ساختار هندسی فوم
۱۶	۱-۳-۲ ساختار هندسی کلومین و ویر فلن
۱۸	۲-۳-۲ تصاویر میکروتوموگرافی
۲۰	۴-۲ مدل دینامیک سیالات محاسباتی
۲۱	۱-۴-۲ محاسبه افت فشار به وسیله روش دینامیک سیالات محاسباتی
۲۲	۲-۴-۲ انتقال حرارت
۲۴	فصل سوم: تئوری و روش محاسبات
۲۴	۱-۳ دینامیک سیالات محاسباتی
۲۴	۱-۱-۳ تئوری دینامیک سیالات محاسباتی
۲۵	۲-۱-۳ تولید شبکه
۲۵	۲-۳ نرم افزار مورد استفاده
۲۶	۱-۲-۳ روش حل معادلات حاکم
۲۷	۲-۲-۳ نحوه‌ی خطی‌سازی
۲۷	۳-۲-۳ تعریف مانده‌ها (به عنوان معیاری برای همگرایی)
۲۷	۴-۲-۳ روش عددی سیمپل
۲۸	۳-۳ تعیین پارامترهای شبیه‌سازی
۲۸	۱-۳-۳ تعریف هندسه
۲۸	۲-۳-۳ تولید شبکه
۳۲	فصل چهارم: نتایج و بحث
۳۲	۱-۴ عبور جریان از داخل فوم بدون اعمال گرادیان حرارتی
۳۲	۱-۱-۴ تغییرات فشار استاتیکی در طول بستر

۳۴	۲-۱-۴ نوسانات سرعت در داخل فوم.....
۳۸	۳-۱-۴ محاسبه ترم داری و غیر خطی جریان.....
۴۵	۴-۱-۴ فاکتور اصطکاک.....
۴۷	۲-۴ عبور جریان از داخل فوم با اعمال گرادیان حرارتی.....
۴۷	۱-۲-۴ هدایت حرارتی موثر.....
۵۱	۲-۲-۴ اثر گرادیان دمایی بر فشار استاتیکی.....
۵۲	۳-۲-۴ تغییرات سرعت در داخل فوم در اثر دما.....
۵۵	۴-۲-۴ افت فشار در اثر گرادیان دمایی.....
۵۸	۵-۲-۴ ضریب انتقال حرارت.....
۶۶	۶-۲-۴ رابطه‌ی پیشنهادی برای محاسبه عدد ناسلت.....
۶۶	۷-۲-۴ پیچیدگی مسیر.....
۷۱	<b>فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b> .....
۷۱	۱-۵ نتیجه‌گیری.....
۷۳	۲-۵ پیشنهادها.....
۷۴	منابع و مراجع.....



## فهرست تصاویر

صفحه	عنوان
۶.....	شکل ۲-۱. روش تولید فوم از طریق متالورژی پودر.....
۷.....	شکل ۲-۲. روش تولید فوم از طریق تزریق در داخل قالب.....
۸.....	شکل ۲-۳. روش به دام انداختن گاز.....
۹.....	شکل ۲-۴. روش ساخت کره‌های توخالی.....
۱۰.....	شکل ۲-۵. تولید فوم به وسیله رسوب الکتروشیمیایی.....
۱۰.....	شکل ۲-۶. تصاویر SEM از فوم تولید شده به وسیله تولید بخار سمت راست ۲۰ppi و سمت چپ ۱۱۰ppi.....
۱۵.....	شکل ۲-۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از یک فوم سلول باز.....
۱۷.....	شکل ۲-۸. مدل کلونین به صورت متناوب برای شبیه‌سازی با ۸۹ درصد تخلخل.....
۱۷.....	شکل ۲-۹. سلول ویر فلن.....
۱۸.....	شکل ۲-۱۰. (الف) سلول ویر فلن (ب) سلول کلونین قبل از رسیدن به تعادل.....
۱۹.....	شکل ۲-۱۱. (الف) نمونه‌ای از تصاویر میکرو توموگرافی با درصد تخلخل بیش از ۹۰ درصد (ب) سطح مقطع مش زده.....
۲۰.....	شکل ۲-۱۲. شماتیکی از دستگاه میکرو توموگرافی.....
۲۸.....	شکل ۳-۱. فوم ساخته شده به وسیله نرم افزار Geodict با ۸۵ درصد تخلخل.....
۲۹.....	شکل ۳-۲. فوم‌های ساخته شده به وسیله نرم افزار Geodict با الف: ۸۵ ب: ۹۰ ج: ۹۵ د: ۹۸ درصد تخلخل.....
۳۰.....	شکل ۳-۳. سطح مقطعی از شبکه با سازمان مورد استفاده شده.....
۳۳.....	شکل ۴-۱. نمودار تغییرات فشاراستاتیکی در طول فوم با درصد های مختلف تخلخل.....
۳۳.....	شکل ۴-۲. نمودار تغییرات فشاراستاتیکی در طول فوم فلزی.....
۳۵.....	شکل ۴-۳. تغییرات سرعت در طول فوم فلزی برای سرعت ورودی ۳ m/s در درصدهای مختلف تخلخل.....
۳۵.....	شکل ۴-۴. تغییرات سرعت در طول فوم فلزی برای سرعت ورودی ۵ m/s در درصدهای مختلف تخلخل.....
۳۶.....	شکل ۴-۵. نمودار سطح ویژه فوم بر حسب درصد تخلخل.....
۳۷.....	شکل ۴-۶. کانتورهای سرعت بر روی صفحه عمود بر جریان در جهت Z برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف تخلخل.....
۳۸.....	شکل ۴-۷. نمودار تغییرات افت فشار بر حسب سرعت ورودی برای شرایط مرزی لغزش در دیواره‌ها.....
۴۰.....	شکل ۴-۸. نمودار تغییرات افت فشار بر حسب سرعت ورودی برای شرایط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها.....
۴۱.....	شکل ۴-۹. نمودار اختلاف گرادیان افت فشار بر حسب سرعت ورودی برای شرایط مرزی عدم لغزش و لغزش.....
۴۲.....	شکل ۴-۱۰. کانتورهای سرعت محوری برای شرایط مرزی لغزش در سرعت ورودی ۲ m/s و ۸۵ درصد تخلخل.....
۴۲.....	شکل ۴-۱۱. بردارهای سرعت محوری برای شرایط مرزی لغزش در سرعت ورودی ۲ m/s و ۸۵ درصد تخلخل.....
۴۳.....	شکل ۴-۱۲. کانتورهای سرعت محوری برای شرایط مرزی عدم لغزش در سرعت ورودی ۲ m/s و ۸۵ درصد تخلخل.....
۴۳.....	شکل ۴-۱۳. بردارهای سرعت محوری برای شرایط مرزی عدم لغزش در سرعت ورودی ۲ m/s و ۸۵ درصد تخلخل.....
۴۴.....	شکل ۴-۱۴. کانتورهای سرعت محوری در فوم فلزی با سرعت ورودی ۲ m/s و ۹۸ درصد تخلخل.....
۴۵.....	شکل ۴-۱۵. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای نمونه‌ی فوم با ۹۰ درصد.....
۴۶.....	شکل ۴-۱۶. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای درصدهای مختلف تخلخل.....
۴۸.....	شکل ۴-۱۷. نمودار ضریب هدایت حرارتی موثر بر حسب تخلخل.....

- شکل ۴-۱۸. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه مسی در جهت X برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۴۸
- شکل ۴-۱۹. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه مسی در جهت Y برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۴۹
- شکل ۴-۲۰. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه مسی در جهت Z برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۴۹
- شکل ۴-۲۱. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه آلومینیمی در جهت X برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۵۰
- شکل ۴-۲۲. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه آلومینیمی در جهت Y برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۵۰
- شکل ۴-۲۳. کانتور دمای استاتیکی برای زمینه آلومینیمی در جهت Z برای فوم فلزی ۸۵ درصد تخلخل..... ۵۱
- شکل ۴-۲۴. نمودار فشار استاتیکی در طول فوم فلزی برای درصدهای مختلف تخلخل و سرعت ورودی ۱ m/s..... ۵۲
- شکل ۴-۲۵. نمودار تغییرات سرعت جریان در طول فوم فلزی برای نمونه ۸۵ درصد تخلخل..... ۵۳
- شکل ۴-۲۶. نمودار تغییرات سرعت جریان در طول فوم فلزی برای نمونه ۹۰ درصد تخلخل..... ۵۳
- شکل ۴-۲۷. کانتور سرعت محوری برای فوم فلزی با ۸۵ درصد تخلخل برای سرعت ورودی ۳ m/s..... ۵۴
- شکل ۴-۲۸. کانتور سرعت محوری برای فوم فلزی با ۹۰ درصد تخلخل برای سرعت ورودی ۳ m/s..... ۵۴
- شکل ۴-۲۹. نمودار افت فشار در طول فوم فلزی بر حسب سرعت ورودی برای درصدهای مختلف تخلخل..... ۵۵
- شکل ۴-۳۰. نمودار افت فشار بین صفحات داخلی فوم برای ۸۵ درصد تخلخل در سرعت‌های ورودی مختلف..... ۵۶
- شکل ۴-۳۱. نمودار افت فشار بین صفحات داخلی فوم برای ۹۰ درصد تخلخل در سرعت‌های ورودی مختلف..... ۵۶
- شکل ۴-۳۲. نمودار افت فشار بین صفحات داخلی فوم برای درصدهای مختلف تخلخل..... ۵۸
- شکل ۴-۳۳. نمودار تغییرات دمای بدون بعد در طول فوم فلزی برای نمونه ۸۵ درصد تخلخل..... ۵۹
- شکل ۴-۳۴. نمودار تغییرات دمای بدون بعد در طول فوم فلزی برای نمونه ۹۰ درصد تخلخل..... ۵۹
- شکل ۴-۳۵. نمودار تغییرات دمای موضعی در طول فوم فلزی در درصدهای مختلف تخلخل..... ۶۰
- شکل ۴-۳۶. نمودار تغییرات دمای میانگین در طول فوم فلزی در درصدهای مختلف تخلخل..... ۶۰
- شکل ۴-۳۷. کانتور تغییرات دما در طول فوم فلزی برای ۸۵ درصد تخلخل و سرعت ورودی ۳ m/s..... ۶۱
- شکل ۴-۳۸. کانتور تغییرات دما در طول فوم فلزی برای ۹۰ درصد تخلخل و سرعت ورودی ۳ m/s..... ۶۱
- شکل ۴-۳۹. کانتور تغییرات دما در طول فوم فلزی برای ۹۵ درصد تخلخل و سرعت ورودی ۳ m/s..... ۶۲
- شکل ۴-۴۰. ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی برای نمونه ۹۰ درصد تخلخل در سرعت‌های ورودی مختلف..... ۶۳
- شکل ۴-۴۱. ضریب انتقال حرارت موضعی در طول بستر برای درصدهای مختلف تخلخل برای سرعت ورودی ۵ m/s..... ۶۳
- شکل ۴-۴۲. نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای درصدهای مختلف تخلخل..... ۶۵
- شکل ۴-۴۳. نمودار فاکتور اصطکاک بر حسب عدد رینولدز..... ۶۵
- شکل ۴-۴۴. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی ۱/۵ m/s..... ۶۷
- شکل ۴-۴۵. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی ۰/۵ m/s..... ۶۷
- شکل ۴-۴۶. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی ۰/۵ m/s..... ۶۸

- شکل ۴-۴۷. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی  $0.3 \text{ m/s}$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۴۸. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی  $2/5 \text{ m/s}$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۴۹. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی  $4 \text{ m/s}$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۵۰. پیچیدگی مسیر فوم فلزی با سرعت ورودی  $4 \text{ m/s}$  ..... ۷۰

## فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵.....	جدول ۱-۲. روش‌های تولید فوم فلزی .....
۱۴.....	جدول ۲-۲. روابط اصلاحی ارائه شده افت فشار بر اساس معادله ارگان .....
۳۹.....	جدول ۱-۴. ضرایب نفوذپذیری، اینرسی، دارسی و غیر دارسی به دست آمده از شبیه‌سازی .....
۴۷.....	جدول ۲-۴. هدایت حرارتی موثر در جهات مختلف .....
۵۷.....	جدول ۳-۴. ضرایب نفوذپذیری و اینرسی به دست آمده از شبیه‌سازی .....

## چکیده

در حال حاضر یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در رابطه با ساخت فوم‌ها، طراحی بر اساس ویژگی‌های کاربردی آن‌ها می‌باشد. بنابراین اولین قدم در زمینه طراحی آن‌ها، می‌تواند مشتمل بر انجام فرایند شبیه‌سازی و یا به عبارتی حل دقیق معادلات انتقال باشد که در واقع به دلیل پیچیدگی ساختار هندسی فوم‌ها، با دشواری‌های فراوانی همراه می‌باشد. از اینرو اغلب بررسی‌های عددی روی هندسه‌های ایده‌آل و غیر واقعی فوم، از جمله مدل کلونین صورت گرفته است. دلایل این امر را می‌توان در مشکل بودن ساخت هندسه واقعی فوم و نحوه مش زدن آن اشاره کرد. لذا در تحقیق حاضر شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی سیال در فوم‌های فلزی با هندسه واقعی و با استفاده از شبکه محاسباتی هگزاهدراال صورت پذیرفته است. بدین منظور معادلات پیوستگی، انتقال مومنتم و حرارت برای سیال داخل محیط متخلخل فوم (با درصد تخلخل‌های ۸۵، ۹۰، ۹۵ و ۹۸) به وسیله الگوریتم حجم محدود، حل گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ضرایب ترم خطی و غیر خطی معادله افت فشار  $(-\frac{dp}{dx} = \alpha u + \beta u^2)$  به ترتیب در محدوده  $2.31 \times 10^{-4} < \alpha < 1.21 \times 10^{-3}$  و  $228 < \beta < 3733$  قرار دارد. همچنین گرمای انتقال یافته در جابجایی اجباری، در طول کمی از بستر انجام می‌شود و بعد از آن تعادل دمایی بین جامد و سیال برقرار می‌شود. اما از طرفی نمودار فاکتور اصطکاک بر حسب عدد رینولدز نشان داد که در دامنه‌ی  $Re < 1$  جریان آرام و در دامنه  $Re > 1$  جریان وارد ناحیه گذرا می‌شود. در ضمن بایستی به این نکته اشاره نمود که با اعمال گرادیان حرارتی، عدد رینولدز گذرا متناسب با میزان تخلخل تغییر می‌کند. همچنین در کار حاضر رابطه‌ی جدیدی برای عدد ناسلت براساس مشخصات هندسی فوم توسعه داده شده که برای ارائه آن از دیدگاه میکروسکوپی استفاده شده است. با استفاده از این دیدگاه، محدودیت‌های مدل‌های پیشین از جمله عدم توجه به ساختار هندسی فوم، رفع شده است. از طرفی برای به دست آوردن پیچیدگی مسیر عبور جریان سیال، از روش تزریق ذره در داخل محیط متخلخل و رصد مسیر عبور ذره، استفاده شده است. مطابق با نتایج حاصل، فاکتور پیچیدگی با افزایش درصد تخلخل کاهش می‌یابد. همچنین این فاکتور میانگینی از طول مسیر پیموده شده به وسیله جریان می‌باشد و مقدار آن در جهات گوناگون به دلیل غیر یکنواختی توزیع تخلخل‌ها، متفاوت می‌باشد. در نهایت با اتکا به نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان بستری هر چند کوچک را در راستای توسعه‌ی طراحی فوم‌ها با کاربردهای مختلف، فراهم نمود.

## کلمات کلیدی

فوم، شبیه‌سازی، هگزاهدراال، افت فشار، عدد ناسلت، پیچیدگی مسیر

## فصل اول

### مقدمه

فوم‌ها گروهی از مواد نو و پیشرفته به شمار می‌آیند که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آن در سال‌های اخیر گسترش روزافزونی یافته‌اند. به طور کلی فوم‌ها از لحاظ جنس به سه دسته اصلی شامل فوم‌های فلزی، فوم‌های سرامیکی و فوم‌های پلیمری تقسیم‌بندی می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا اوایل دهه ۱۹۷۰ تعداد تحقیقات صورت گرفته بر روی فوم‌های فلزی بسیار ناچیز بود. پس از آن با شیب کمی شروع به افزایش کرد، اما از اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ با آشنایی بیشتر محققین در خصوص فوم‌های فلزی، تحقیقات در این زمینه یک مرتبه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. محیط‌های متخلخل دارای خواصی همانند سطح ویژه بالا هستند که در مقایسه با مواد متراکم همانند فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرها، منحصر به فرد می‌باشد. از طرفی خواصی مانند استحکام مکانیکی و جذب صدا در فوم‌های فلزی در مقایسه با فوم‌های پلیمری، بیشتر است. همچنین فوم‌های فلزی دارای پایداری بیشتری نسبت به پلیمرها در دمای بالا و در محیط‌های خورنده می‌باشند و در مقایسه با فوم‌های سرامیکی از قابلیت شکل‌پذیری بهتری برخوردارند.

از اینرو به لحاظ کاربردی می‌توان فوم‌های فلزی را از سایر فوم‌ها متمایز کرد. در این خصوص می‌توان فوم‌های فلزی را به سه دسته‌ی فوم‌های سلول باز، سلول بسته و ترکیبی از این دو نوع، تقسیم‌بندی نمود. تفاوت بین فوم‌های سلول باز و بسته در نوع ساختار هندسی است، به طوریکه در فوم‌های سلول باز سلول‌های مجاور به یکدیگر متصل هستند، بدین معنی که جریان سیال می‌تواند از یک سلول وارد، و از سلول دیگر خارج شود. این در حالی است که در فوم‌های بسته بیشتر دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، مورد نظر است. فوم‌های فلزی و مواد متخلخل با درصد تخلخل بالا به دلیل داشتن ساختار سلولی باز، دارای ترکیبی از خواص منحصر به فردی از جمله خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، همانند نفوذپذیری بالا همراه با ضریب هدایت حرارتی بالا یا سفتی بالا همراه با استحکام به وزن مناسب

هستند. در این میان فوم‌های سلول باز دارای خواص بی‌نظیری از جمله سطح به حجم بالا، استحکام به وزن بالا، تخلخل مطلوب و توانایی جذب صدا در محدوده‌ی فرکانسی ۵۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز هستند. بنابراین به دلیل دارا بودن این خواص، فوم‌های فلزی جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. به عنوان مثال در بسترهای فشرده به دلیل سطح تماس کم ذرات با یکدیگر، انتقال حرارت پایین است. این درحالی است که فوم‌های فلزی به دلیل داشتن سطح ویژه منحصر به فرد که به طور معمول در محدوده‌ی  $1000-3000 \text{ m}^{-1}$  قرار دارد، همزمان سبب افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار به دلیل تخلخل بالا، می‌شوند. لازم به ذکر است در صورت استفاده از آلومینیم و یا مس به عنوان زمینه، ضریب انتقال حرارت می‌تواند چندین برابر شود. در کاربرد دیگر صنعتی می‌توان به نقش آنها در ساخت مبدل‌های حرارتی در صناعی چون خودروسازی و هوافضا اشاره کرد. از جمله مزایای این مبدل‌های حرارتی می‌توان به سطح انتقال حرارت زیاد، تولید (ازران و ساده) و استحکام مکانیکی بالا اشاره کرد.

بنابراین برای طراحی دقیق سیستم‌های مهندسی و بازده بالا، نیاز به بررسی و شناخت رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی سیال در مقیاس میکرو احساس می‌شود، بدین منظور می‌توان از روش‌های عددی با کمترین هزینه استفاده کرد. یکی از بهترین روش‌های آنالیز خصوصا در ناحیه غیر آرام، روش حجم محدود می‌باشد، اما هندسه بسیار پیچیده فوم، از جمله موانع در سر راه این روش می‌باشد. این هندسه سبب دشواری مش زدن ساختار، خصوصا در درصد تخلخل‌های پایین و روی آوردن به سمت روش‌های شبکه‌ای، از جمله روش بولتزن می‌شود. از اینرو محققین به سمت هندسه‌های ساده تر برای فرار از این مشکل، رو آورده‌اند. اما از جمله معایب این روش، می‌توان به عدم نتایج قابل اعتماد و کیفیت پایین شبکه محاسباتی (معمولا تتراهدرال) اشاره کرد. بنابراین برای رفع این مشکل، در این تحقیق از هندسه واقعی فوم با شبکه محاسباتی هگزاهدرال استفاده شده است. لذا هدف از این تحقیق، ارائه یک مدل ریاضی برای پیش بینی افت فشار و انتقال حرارت در محدوده ۹۸-۸۵ درصد تخلخل می‌باشد که از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار باشد.

وجه تمایز این تحقیق نسبت به کارهای قبلی، تمرکز بر روی ارائه جزئیات موضعی از رفتار جریان در داخل فوم در دو حالت تعادل دمایی و اعمال گرادیان دمایی می‌باشد. پارامترهای موضعی مختلف از جمله سرعت، فشار، دما و ضریب انتقال حرارت در داخل فوم به دست خواهد آمد. این پارامترهای موضعی برای تحلیل نتایج در مقیاس واقعی، ارائه روش ساخت فوم و طراحی ساختار هندسی فوم، کمک شایان توجه‌ای می‌کند.

بنابراین در این پایان‌نامه، در فصل دوم مختصری از روش تولید و مروری از کارهای تحقیقاتی سایر محققین ارائه شده است. فصل سوم شامل تئوری و روش شبیه‌سازی عددی می‌باشد و در فصل آخر نتایج این پژوهش ارائه شده است.

## فصل دوم مرور مطالعاتی

### ۱-۲ فرایندهای تولید فوم فلزی

فوم توزیع فاز گازی در درون یک فاز مایع یا جامد نامیده می‌شود. اما منظور از فوم، در واقع همان مواد جامد دارای ساختار سلولی می‌باشد که برای مواد دارای تخلخل بالا، معمولاً واژه‌ی اسفنج نیز به کار برده می‌شود [۱]. تاکنون روش‌های متنوعی برای تولید فوم فلزی ابداع شده است که برخی از این روش‌ها بر اساس ویژگی‌های منحصر به فرد فلزات همچون قابلیت تف جوشی و رسوب دهی الکتروشیمیایی ابداع شده است و مختص تولید فوم‌های فلزی می‌باشد. تقسیم بندی روش‌های تولید فوم می‌تواند به صورت‌های گوناگون باشد. یکی از مهم‌ترین تقسیم بندی‌هایی که در روش‌های تولید فوم فلزی انجام گرفته است، تقسیم بندی بر اساس حالت فیزیکی فلز پایه فوم می‌باشد. بر این اساس روش‌های تولید فوم فلزی را می‌توان به چهار دسته کلی روش‌های ذوبی، روش‌های پودری، روش‌های رسوب دهی الکتروشیمیایی و روش‌های رسوب دهی از حالت بخار دسته بندی کرد [۲]. در جدول ۱-۲ مهم‌ترین روش‌های ساخت فوم فلزی همراه با نام تجاری هر کدام، موارد استفاده، درصد و اندازه تخلخل فوم نهایی ارائه شده است. لازم به ذکر می‌باشد روش‌های پودری یکی از پرکاربردترین روش‌ها، برای ساخت فوم می‌باشد. از جمله مزایای این روش، می‌توان به قابلیت کنترل اندازه حفرات، تخلخل باز، تولید ساده و ارزان اشاره کرد. اما با توجه به نبود امکانات پیشرفته (دستگاه میکرو توموگرافی) برای به دست آوردن محیط هندسی فوم ساخته شده برای شبیه‌سازی، استفاده از نرم افزار می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. از اینرو در تحقیق حاضر از نرم افزار جه او دیکت<sup>۱</sup> و روش تف جوشی برای ساخت مجازی فوم‌ها استفاده شده است.

---

<sup>1</sup> Geodict



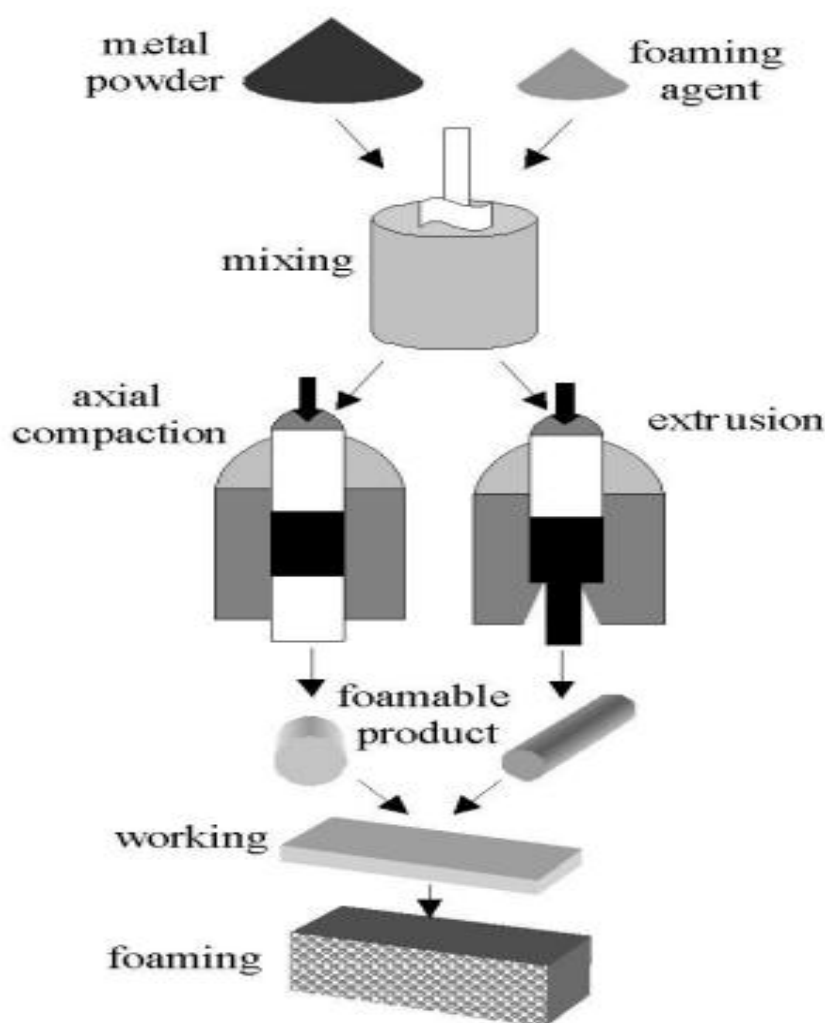
جدول ۱-۲. روش های تولید فوم های فلزی.

تکنیک فرایند	اسم یا نام تجاری	درصد تخلخل	ترکیب فاز جامد	اندازه / نوع تخلخل	مراجع
<b>روش های ذوبی</b>					
تزریق گاز در مذاب	ALCAN	٪ ۸۰-۹۸	آلیاژهای Al همراه با ذرات سرامیکی	۳-۲۵ میلی متر / بسته	[۳-۷]
اکسیداسیون درجا	ALPORAS	٪ ۸۹-۹۳	آلومینیوم خالص تجاری همراه با ذرات اکسیدی	متوسط ۴/۸ میلی متر / بسته	[۹و۸]
واکنش یوتکتیک-گاز	GASAR	٪ ۵-۷۵	Al، Cu، Mg، Ni و آلیاژهای دیگر	۵ میکرون تا ۱۰ میلی متر / بسته و باز	[۱۰و۵]
رخنه دهی و ریخته گری	DUOCEL	٪ ۸۸-۹۲	آلیاژهای Al	۰/۵-۴/۳ میلی متر / باز	[۱۱و۱۰]
<b>روش های پودری</b>					
تف جوشی	پودرهای تف جوشی شده	٪ ۴۰-۸۵	پودر فلزات مختلف	شبکه تخلخل های متصل به هم	[۱۲]
	تکنیک به دام انداختن گاز	٪ ۲۰-۴۰	پودر فلزات مختلف	بسته	[۱۱]
	کره های توخالی	٪ ۶۵-۸۷	مس، نیکل، تیتانیم	۰/۵-۶ میلی متر / بسته و باز	[۱۴]
<b>روش های رسوب دهی الکتروشیمیایی</b>					
الکتروشیمیایی	CELLMET, METAPORE	<٪ ۹۶	نیکل	تخلخل باز همراه با پایه های توخالی	[۱۵]
<b>روش های رسوب دهی از حالت بخار</b>					
رسوب دهی بخار فلز	INCO	٪ ۹۳-۹۷/۵	نیکل، نیکل-کروم، مس	تخلخل باز همراه با پایه های توخالی	[۱۶]

## ۱-۱-۲ روش پودری

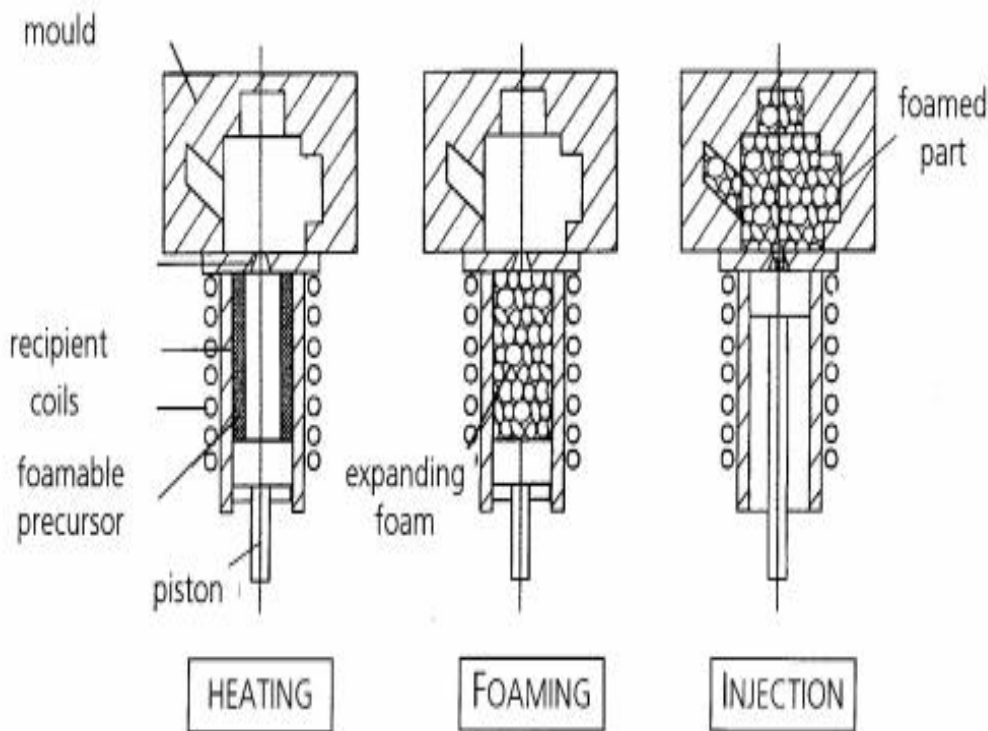
### الف- تف جوشی پودرهای فلزی

در این روش پودر فلزی یا آلیاژی همرا با عامل گاززا مخلوط می‌شود. سپس بدنبال فشرده کردن نمونه، عملیات شکل دهی و تولید فوم انجام می‌شود. عملیات فشرده‌سازی به چند طریق از جمله فشرده‌سازی سرد و گرم، فشرده‌سازی ایزواستاتیکی، آسیاب کاری پودر و اکستروژن پودر، قابل انجام است. هدف اصلی انجام این فرایند تهیه یک پیش ماده متراکم با توزیع یکنواخت عامل گازی در درون آن، با کمترین درصد تخلخل موجود می‌باشد. در نهایت با حرارت دادن تا دمای زیر نقطه ذوب زمینه‌ی جامد، عملیات تولید فوم انجام می‌شود. در واقع با افزایش درجه حرارت، عامل گاززا شروع به تجزیه شدن می‌کند و گاز آزاد می‌شود [۱۲]. روند این روش در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. روش تولید فوم از طریق متالورژی پودر [۱۲].

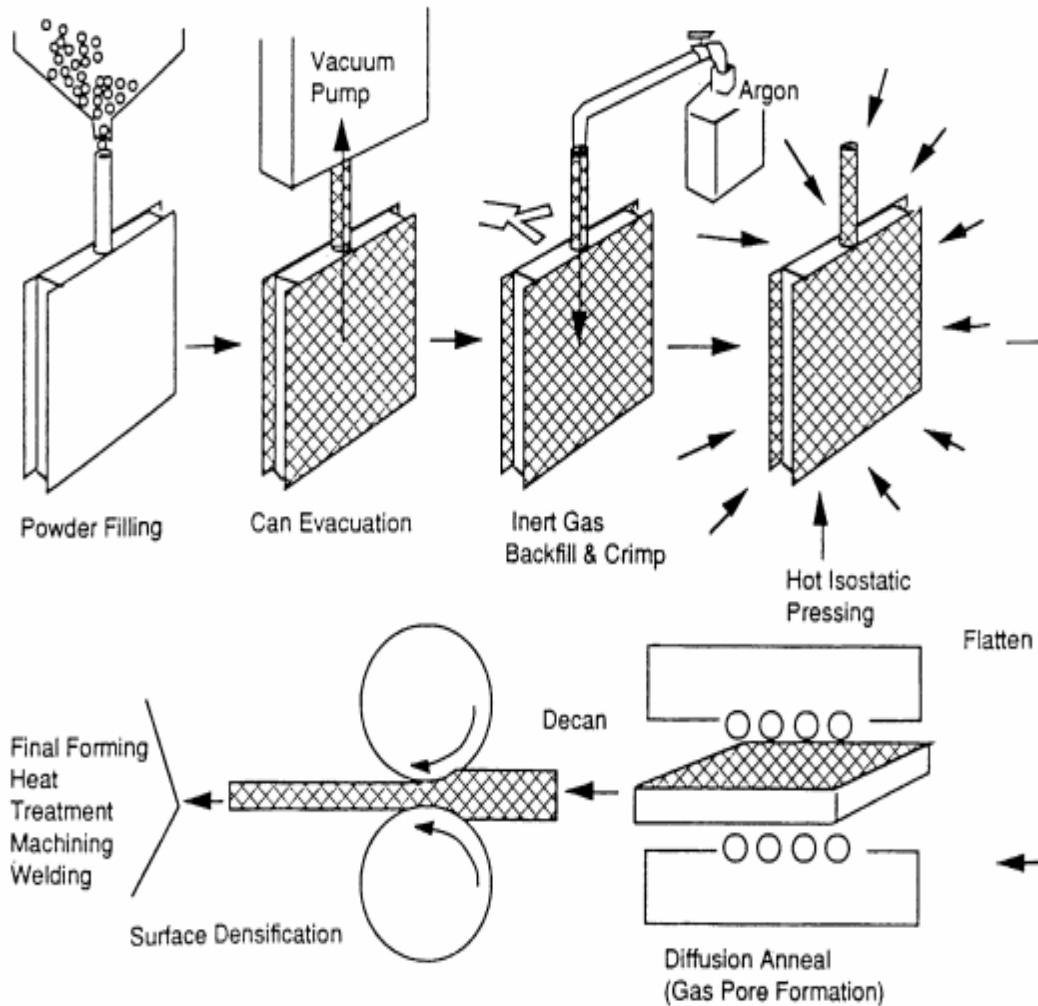
نرخ حرارت دادن، سرعت تجزیه و پایداری دیواره‌های سلول‌ها، چگالی نهایی فوم را تعیین می‌کند. برای به تاخیر افتادن تجزیه عامل گاززا و همزمان‌سازی با ذوب جزئی زمینه، عامل گاززا را عملیات حرارتی می‌کنند. قطعات با شکل‌های هندسی پیچیده نیز از طریق روش پودری قابل تولید می‌باشد. مطابق شکل ۲-۲ در این روش ابتدا پیش ماده در داخل یک محفظه تا دمای نزدیک نقطه‌ی ذوب زمینه حرارت می‌بیند. در نتیجه این پیش ماده شروع به انبساط می‌کند و هنگامی که به حالت نیمه جامد در آمد، به وسیله یک پیستون وارد قالب می‌شود و فرایند انبساط تکمیل می‌شود. این روش باید به دقت کنترل شود، در غیر اینصورت ساختار فوم نهایی، پراز عیوب خواهد شد [۱۳].



شکل ۲-۲. روش تولید فوم از طریق تزریق در داخل قالب [۱۳].

#### ب- تکنیک به دام انداختن گاز

فوم‌های فلزی را می‌توان بدون استفاده از عامل گاززا و یا مذاب فلزات، نیز تولید کرد. در شرکت هواپیمایی بویینگ آمریکا به منظور ساخت فوم از روش به دام انداختن گاز برای بهبود خواص مکانیکی استفاده می‌شود. بدین منظور پودرها برای تولید یک پیش ماده متراکم فشرده می‌شوند، در طول فشرده سازی گاز در بین مواد قرار می‌گیرد. حرارت دادن این پیش ماده سبب افزایش فشار گاز به دام افتاده شده، و در نتیجه سبب انبساط فلز می‌شود [۱۱]. در شکل ۲-۳ مراحل تولید فوم در این روش نشان داده شده است.



شکل ۲-۳. روش به دام انداختن گاز [۸].

ابتدا قالب به وسیله پودرها پر شده، سپس قالب از گاز تخلیه شده و به وسیله گاز آرگون با فشار ۳-۵ اتمسفر پر می-شود. در گام بعدی قالب درزبندی شده و فشار ایزواستاتیکی گرم برای متراکم کردن اعمال می-شود. با انجام عملیات آنیل به مدت زمان ۶-۲۴ ساعت، مواد با ساختار سلولی مناسب به دست می-آیند. در طول فرایند حفرات گازی شروع به منبسط شدن می-کنند و فشار داخلی شروع به کاهش می-یابد، در نتیجه یک تعادل بین فشار داخلی و استحکام فوم به دست می-آید. فوم حاصل دارای تخلخل بین ۲۰-۴۰ درصد به صورت بسته است و محاسبات تئوریک نشان می-دهد که محصولات تولیدی در این روش نمی-توانند به تخلخل بیش از پنجاه درصدی برسند.

#### پ - تف جوشی کره‌های توخالی

به وسیله تف جوشی کره‌های توخالی از مس، نیکل، فولاد یا تیتانیم ساختارهایی با تخلخل بالا به دست می-آیند. روش‌های متعددی برای ساخت کره‌های توخالی استفاده می-شود که یکی از معمول‌ترین این روش‌ها استفاده از کره-های پلیمری است. در این روش کره‌های پلیمری به وسیله مخلوط پودر فلزی و چسب، پوشش داده می-شود و در