مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۲۱، صفحات ۴۳-۴۹

# شبیه‌سازی فرآیند تولید تزریق پودر فلزی با استفاده از نرم‌افزار Moldflow

علیرضا حاجی علی محمدی[۱ و *]، فاطمه لقمان[۲]

[۱] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
[۲] کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
*مسئول مکاتبات: ahajiali@semnan.ac.ir

◄ چکیده

فرآیند تولید تزریق پودر فلزی یکی از فرآیندهای جدید تولید قطعات دقیق و نزدیک به شکل نهایی است که مکانیزم آن بر پایه روش متالورژی پودر است. در این روش پودر فلزات به همراه چسب به داخل قالب تزریق می‌شوند و با توجه به سیالیت بیشتر مخلوط تشکیل شده در این حالت نسبت به روش متالورژی پودر، هندسه قطعات پیچیده‌تری را می توان به کمک آن تولید نمود. در بسیاری از صنایع از قبیل صنایع هوافضا، پزشکی و خودروسازی این روش اخیرا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. قطعات درب خودرو، انگشتی های سوپاپ، بست نگهدارنده انژکتور و پره های پرخوران از جمله قطعاتی هستند که در حال حاضر با استفاده از این روش تولید می‌شوند. با توجه به اینکه این روش در صنعت کشور هنوز چندان شناخته شده نیست، در این مقاله سعی شده است شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از نرم افزار تجاری Moldflow انجام شده و قابلیت نرم‌افزار برای انجام شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور ابتدا صحه‌گذاری نتایج نرم‌افزار با هندسه و شرایط مرزی مشخص از مقالات موجود انجام شد، سپس برای قطعه پره پرخوران مربوط به یک موتور دیزل سواری شبیه‌سازی انجام گرفت. نتایج نشان دادند که نرم‌افزار انتخاب شده قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی فرایند تولید تزریق پودر فلزی دارد.

◄ واژگان کلیدی

تزریق پودری فلز
شبیه‌سازی
پره پرخوران
نرم‌افزار
Moldflow

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۰۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

## ۱ مقدمه

روش متالورژی پودر یکی از روش هایی است که اخیرا جایگزین روش های ریخته گری و آهنگری برای تولید برخی قطعات در صنایع مختلف شده است [۱]. این روش جز روش‌های تولید نزدیک به شکل نهایی[1] دسته بندی می شود و قطعاتی که به این روش تولید می‌شوند، نیاز به ماشین‌کاری کمی دارند. همین مزیت باعث می‌شود که این روش به عنوان روش تولید بسیاری از قطعات مطرح باشد. با توجه به اینکه در این روش پودر فلز در حالت جامد به داخل قالب جریان می‌یابد، برای هندسه‌های پیچیده مثل پره توربین پرخوران موتور نمی‌توان از آن استفاده نمود و برای رفع این مشکل، روش تزریق پودر فلزی[2] مطرح شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که برای توسعه هر روش تولید، استفاده از ابزار شبیه‌سازی جهت پیش بینی فرایند، انتخاب صحیح متغیرهای فرآیند و بهینه سازی آن ضرورت دارد، تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی این فرآیند تولید با استفاده از کدها و نرم‌افزارهای مختلف تجاری انجام شده است. نرم‌افزارهایی از قبیل Moldflow، Moldex3D، PIM Solver و SIMUFLOW تاکنون برای شبیه‌سازی فرآیند تولید تزریق پودر فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. نرم‌افزار Moldflow معمولا برای شبیه‌سازی فرآیند تزریق پلاستیک مورد اسفاده قرار می‌گیرد و به تازگی ماژول شبیه‌سازی فرآیند تزریق پودر فلزی بدان اضافه شده است. گانشرام و آچودهان شبیه‌سازی فرآیند تولید تزریق پلاستیک برای تولید نازل‌های خنک‌کن سمبه[3] را با استفاده از نرم‌افزار Moldflow انجام دادند [۳]. نرم‌افزار Moldflow توسط کیت و همکاران برای شبیه‌سازی فرآیند تزریق پودر فلزی آلیاژ آلومینیوم یک رادیاتور حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که انتخاب پارامترهای بهینه فرآیند تزریق پودری با توجه به هندسه قطعه کار باید انجام گیرد [۴]. خرسند و همکاران نمونه‌سازی قطعات دقیق سیستم ایمنی و قفل خودرو را با استفاده از روش تزریق پودر فلزی انجام دادند [۵]. انتی و همکاران از نرم‌افزار PIM Solver برای شبیه‌سازی پر شدن قالب برای ساخت قطعه براکت دندانپزشکی به روش تزریق پودر فلزی استفاده نمودند [۶]. با توجه به پژوهش‌ها و فعالیت‌های صنعتی مختلف، می‌توان اینطور نتیجه گرفت که تاکنون این روش تولید در کشور برای تولید انبوه قطعه‌ای مورد استفاده قرار نگرفته است، همچنین شبیه‌سازی قطعات خودرو توسط این روش انجام نشده است. در این مقاله اولا کارایی ماژول جدید نرم‌افزار Moldflow مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و در ادامه طراحی قالب یک قطعه نمونه از صنعت خودرو (پره توربین پرخوران) با استفاده از قابلیت نرم‌افزار انجام خواهد شد.

## ۲ روش تزریق پودر فلزی

در این فرآیند ابتدا پودر غیرآلی (فلزی یا سرامیکی) با مقدار معینی از یک پلیمر به منظور ایجاد یک ماده خام اولیه که قابلیت قالب‌گیری را دارد،

[1] Near net shape [2] Metal Injection Moulding (MIM) [3] Piston Cooling Jet

مخلوط می‌شود. سپس مخلوط مذکور از طریق فرایند قالب‌گیری تزریقی به شکل قطعه مورد نظر درمی‌آید. در ادامه پیوند دهنده پلیمری از داخل نمونه خارج شده و قطعه به منظور ایجاد استحکام نهایی تحت تف جوشی[1] (سیکل حرارت‌دهی تحت دما و زمان مشخص) قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان بیان نمود که قالب‌گیری تزریقی امکانی را فراهم می‌سازد تا بتوان از روش تزریق که در گذشته منحصرا مربوط به مواد پلیمری بوده، برای تولید قطعات سرامیکی و فلزی استفاده نمود [۵].

## ۱.۲ ماده تزریقی

مخلوط پودر و چسب که به صورت قرص درآمده و در قالب تزریق می‌شود را اصطلاحا گندله تزریقی[2] می‌نامند. خصوصیات و ویژگی‌های ماده تغذیه توسط ۵ عامل از ویژگی‌های پودر مورد استفاده یعنی: مشخصات و ویژگی‌های ماده پلیمری به عنوان چسب، نسبت پودر به پلیمر، روش مورد استفاده در مخلوط سازی و روش ساخت گندله از مخلوط پودر و پلیمر تعیین می‌شود. در حالت مطلوب این تغذیه به گونه‌ای طراحی شده که قالب‌گیری را تسهیل و کنترل بر روی ابعاد نهایی قطعه را افزایش دهد. برای رسیدن به این هدف، در تهیه تغذیه از پلیمرهای سبک‌وزن استفاده می‌شود تا ویسکوزیته کاهش یافته و قالب‌گیری راحت‌تر شود. در چنین شرایطی تا حد امکان از ایجاد تخلخل و سوراخ جلوگیری می‌شود چرا که در صورت وجود حفره‌های هوا، دانسیته مخلوط کمتر از مقدار مورد انتظار می‌شود. تجهیزات این فرآیند بسیار شبیه تجهیزات فرآیند تزریق پلاستیک است و به مانند تزریق پلاستیک از استوانه و مارپیچ برای گرم کردن مخلوط پودر و چسب استفاده می‌شود. در این فرآیند تولید، دمای استوانه[3] و مارپیچ[4] تا حدی بالا می رود تا چسب پلیمری موجود در گندله تزریق ذوب شده و همین باعث می‌شود پودر فلز داخل قالب بهتر جریان یابد. در این فرآیند پودر فلزی ذوب نمی‌شود.

## ۲.۲ پودر فلزی

بیشتر مواد مورد استفاده در علوم مهندسی به غیر از شیشه، سرب و قلع قابلیت تولید از طریق فرایند تزریق پودر درون قالب را دارا هستند. شایان ذکر است که به واسطه تشکیل لایه اکسیدی چسبنده بر روی سطح پودرهای آلومینیومی که از فرآیند تفجوشی جلوگیری می‌کند، این روش برای پودرهای آلومینیومی مناسب نیست. پودرهای گوناگون توسط روش‌های متفاوتی از قبیل: خردکردن، رسوب‌سازی الکتریکی، کربونیل، رسوب‌گیری از محلول نمکی و تجزیه حرارتی ترکیبات شیمیایی تولید می‌شوند [۷].

## ۳.۲ چسب (بایندر پلیمری)

پیونددهنده‌ها معمولا مخلوط‌های از ترکیبات آلی هستند، مواد تشکیل‌دهنده اصلی موم‌های طبیعی یا پلیمرهای مصنوعی هستند. به غیر از موارد مذکور در برخی حالات ممکن است از مواد افزودنی دیگری نیز به منظور اصلاح خصوصیات به ترکیب اضافه شود که نقش چسب را ایفا می‌کنند. سیستم‌های چسب معمولا بر پایه ترموپلاستیک‌ها (مانند: پلی‌ـالفین و پلیکسی متیلن)، به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به غیر از پلیمر، سیستم‌های مذکور دربرگیرنده موم‌ها، روان‌سازها و ترکننده‌ها هستند [۸].

پس از انتخاب پودر و پلیمر مناسب، عملیات مخلوط‌سازی به منظور درهم آمیختن پودر و پلیمر صورت می‌پذیرد. درصد پودر و چسب به جنس قطعه و پارامترهای فرآیند بستگی دارد. معمولا درصد پودر بین ۵۰ تا ۷۰ درصد است. یک مخلوط مناسب شامل توزیع یکنواخت پودر درون ماده پلیمری یا بایندر بدون هیچ‌گونه تخلخل است. ناهمگنی در ماده خام اولیه در اثر غیر یکنواختی ویسکوزیته، قالب‌گیری ناهمگن و مشکلات عملیات زینترینگ به وجود می‌آید.

## ۴.۲ قالب‌گیری

قالب‌گیری شامل گرم کردن تغذیه تزریقی تا دمای ذوب چسب است. پس از آن مایع با فشار در قالب وارد شده و در آنجا سرد می‌شود. این عملیات به گونه‌ای انجام می‌شود که در نهایت تغذیه تزریقی، شکل قالب خود را می‌گیرد. هدف اصلی، به‌دست آوردن قطعه‌ای با شکل مطلوب و بدون عیب است که پودر در آن به طور همگن پراکنده شده باشد. به همین دلیل پودر مورد استفاده باید دارای ویسکوزیته پایینی باشد تا به راحتی در داخل قالب پراکنده شود، یک نمونه دستگاه تزریق پودر در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: ماشین تزریق پودر دیجیتال [۵]

## ۵.۲ چسب‌زدایی

منظور از عملیات چسب‌زدایی[5] حذف سیستم پلیمری در کوتاه‌ترین زمان و با حداقل تاثیر بر روی استحکام و ابعاد قطعه است. مواد بایندر یا پلیمری یک قسمت مصرف‌شدنی بوده که نقش اصلی را در عملیات قالب‌گیری دارند. عدم حذف عمده مواد پلیمری قبل از زینترینگ می‌تواند منجر به اعوجاج و ترک خوردن قطعه شود. حذف مواد پلیمری به گونه‌ای که در پیکره قطعه، گسیختگی و جدایش به وجود نیاورد عملیاتی بسیار حساس و دقیق است. زمانی که قطعه به منظور دفع چسب تحت حرارت قرار می‌گیرد، تا حد زیادی استحکام خود را از دست می‌دهد. به‌علاوه در صورتی که منافذ متخلخل به صورت جزئی باز باشند، نیروهای مویینگی در برابر اعوجاج مقاومت می‌کند (به دلیل نرم شدن پیونددهنده). حذف گام به گام و تدریجی پیونددهنده جهت

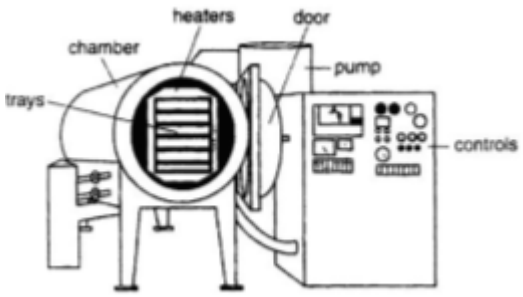
[1]Sintering [2]Feedstock [3]barrel [4]Plunger [5]Debinding

نگهداری و حفظ شکل قطعات اجباری است، دلیل این امر، حفظ استحکام کافی به منظور جلوگیری از تغییر شکل در اثر انجام عملیات زینترینگ پس از بایندرزدایی است [۸].

عملیات بایندرزدایی با دو روش: حرارت دادن در قالب و حل کردن پلیمر در حلال مناسب، انجام می‌شود. این روش‌ها متناسب با نوع پلیمر انتخاب و استفاده می‌شوند.

### ۶.۲ تف جوشی

به فرایند عملیات حرارتی گفته می‌شود که در آن ذرات پودر با یکدیگر جوش خورده تا استحکام لازم در محلول نهایی را ایجاد کنند. این فرآیند در کوره‌هایی تحت خلا در درجه حرارت زیر نقطه ذوب فلز انجام می‌گیرد. نوع زینترینگ و نحوه انجام آن بستگی به جنس قطعه مورد استفاده دارد. کوره‌های زینترینگ وظیفه کنترل زمان و درجه حرارت چرخه حرارتی را در فشار تنظیم شده برعهده دارند. در شکل ۲ نمونه‌ای از کوره‌های زینترینگ نشان داده شده است [۵].




شکل ۲: طرحی از یک کوره خلا زینترینگ [۵]

## ۳ شبیه‌سازی

همان‌طور که گفته شد نرم‌افزار Moldflow در ورژن ۲۰۱۷/۳ به طور تخصصی ماژول (MIM) را اضافه نموده است.

با توجه به تفاوت اصلی دو فرآیند تزریق پلاستیک و تزریق پودر فلزی، که همان ماده تزریقی به داخل قالب است، در شبیه‌سازی فرآیند تزریق پودر فلزی، گلوگاه اصلی، اختصاص صحیح خواص مواد مانند چگالی، ویسکوزیته و رفتار حرارتی است. در این میان توجه به تغییرات ویسکوزیته ماده تزریقی نسبت به دما، تغییرات نرخ تنش برشی[1] و تغییرات حجم جامد ضروری است.

برای محاسبه این خواص ماده تغذیه، چگالی ذوب، ظرفیت گرمایی و انتقال حرارت چسب و مورد نیاز است. در نهایت تطابق ویسکوزیته چسب اندازه‌گیری شده با مدل‌های موجود انجام می‌شود. مراحل مختلف شبیه‌سازی قالب تزریق پودر فلز و یا سرامیک عبارتند از:

- ایجاد هندسه و شبکه بندی
- اختصاص خواص مواد
- اعمال شرایط اولیه و مرزی
- حل مساله

برای شبیه‌سازی فرض می‌شود مخلوط تزریق به صورت همگن و سیال نیوتنی داخل قالب می‌شود. نیروی غالب در جریان سیال نیروهای چسبنده[2] است و از نیروهای اینرسی صرف‌نظر می‌شود [۹]. این فرض برای شبیه‌سازی پرشدن قالب با استفاده از مخلوط بسیار چسبنده پودر در روش تزریق پودر فلزی فرض قابل قبولی است. شبیه‌سازی پر کردن قالب با استفاده از اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و بر اساس حل معادلات پایستگی حرکت، جرم و انرژی (معادلات ناویر–استوکس) انجام می‌شود. این معادلات حرکت سیال را در شرایط غیر ایزوترمال توصیف می‌کنند. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر بیان می‌شوند [۹]:

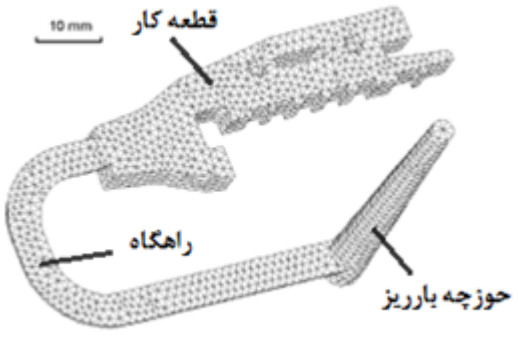
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{and} \quad -\nabla p + \nabla \cdot (2\eta \mathbf{D}) = 0 \qquad (1)$$

که در آن $\eta$ ویسکوزیته، D تانسور نرخ تغییر شکل، P فشار و u سرعت است. برای محاسبه ارتباط بین ویسکوزیته مخلوط پودر و چسب با دما T فشار P و نرخ تنش برشی معمولا از مدل Cross-WLF استفاده می‌شود [۹].

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma}/\tau^*)^{1-n}} \qquad (2)$$

توضیحات کامل در مورد اصول و معادلات حاکم بر شبیه‌سازی در مرجع [۱۰] آمده است.

برای صحه گذاری شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار Moldflow با توجه به اینکه نتایج آزمون های تجربی برای یک قطعه در مرجع [۲] ذکر شده بود، شبیه‌سازی مشخصات دقیق آن قطعه ابتدا انجام شد تا شبیه‌سازی به نوعی صحه گذاری شود. در شکل ۳ هندسه مش بندی شده قطعه و بقیه اجزای قالب نشان داده شده است. به عنوان شرط مرزی و اولیه شبیه‌سازی، سرعت جریان پودر تزریقی برابر ۱ متر بر ثانیه و دمای پودر برابر ۱۸۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد. برای محاسبه ویسکوزیته مخلوط پودر و چسب نیز از مدل کارو–یاسودا[3] استفاده شد [۲].

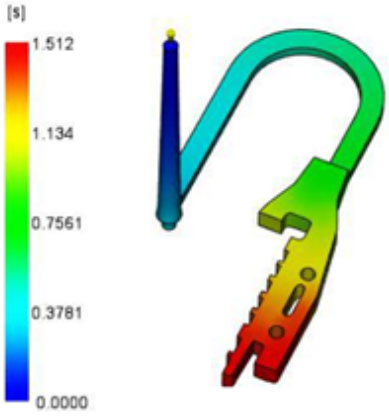



شکل ۳: هندسه شبکه بندی شده قطعه و بقیه اجزای قالب

نتایج شبیه سازی مربوط به پر شدن قالب بر حسب زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده کاملا با نتایج شبیه‌سازی و تجربی به دست آمده در مرجع [۲] مطابقت دارند. زمان پر شدن قالب به دست آمده از آزمون تجربی ۱/۵ ثانیه [۲] و در شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله این زمان ۱/۵۱۲ ثانیه محاسبه شد. همچنین بالاترین دمای به دست آمده از آزمون تجربی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد [۲] و در شبیه‌سازی انجام گرفته در

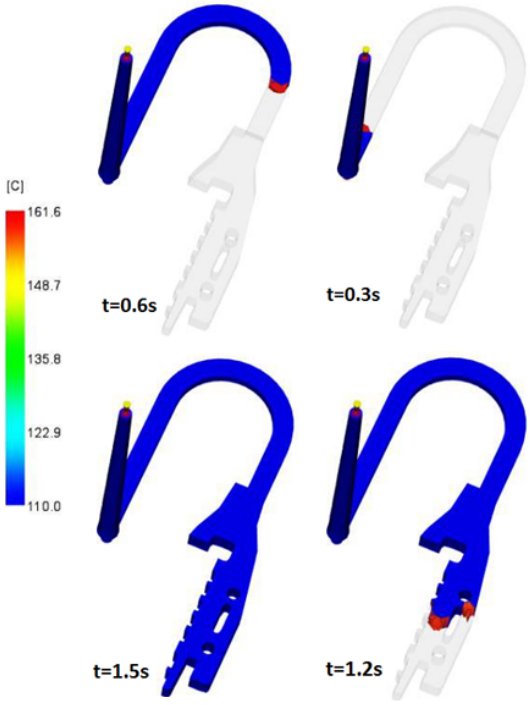
[1] Shear Rate [2] Viscouse Forces [3] Carreau-Yasuda

این مقاله ۱۶۱ درجه سانتی‌گراد به دست امد، بنابراین میزان درصد خطا در محاسبه زمان پر شدن قالب ۰/۸ درصد و درمحاسبه حداکثر دما، ۱۵درصد بود. در مورد زمان پر شدن ذکر این نکته ضروری است که زمان تزریق به دست آمده در این شبیه‌سازی بسیار وابسته به دقت خواص مخلوط تزریقی داخل قالب است، همچنین حل سیالاتی مساله (روش حل معادلات ناویر استوکس) جهت پیش بینی دما، سرعت و فشار مخلوط پودر نیز بسیار موثر است. عامل موثر دیگر که تعیین کننده دقت شبیه‌سازی است، انتخاب ضریب اصطکاک صحیح بین مخلوط پودر و دیواره قالب است. هر چقدر پارامترهای ذکر شده با واقعیت تطابق بیشتری داشته باشند، طبیعتا نتایج شبیه‌سازی به نتایج واقعی نزدیکتر خواهند بود.




شکل ۴: منحنی زمان پر شدن قالب

در شکل ۵ دمای نقاط مختلف مخلوط پودر و چسب در زمان های مختلف نشان داده شده است. قابل ذکر است که تعداد شبکه های مدل مورد استفاده برابر ۵۳۴۴۴۸ عدد بود. جنس گرانول تزریق مورد استفاده BASF 316 L و جنس قالب نیز فولاد ابزار H13 بود.




شکل ۵: دما در زمان های مختلف در نقاط مختلف قالب

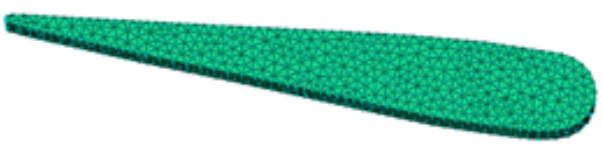
## ۴ شبیه‌سازی تولید پره پرخوران به روش تزریق پودر فلزی

پس از صحه‌گذاری شبیه‌سازی در مرحله بعد طراحی قالب برای تولید پره پرخوران هندسه متغیر به روش تزریق پودر فلزی با استفاده از نرم‌افزار Moldflow انجام گرفت. دلیل بکارگیری این روش (صحه گذاری و سپس حل مساله اصلی) این بود که نتایج تجربی مربوط به فرایند تزریق پودر فلزی پره پرخوران موجود نیست. قطعه کار اصلی که شرایط مختلف طراحی قالب برای آن مورد بررسی قرار گرفت، در شکل ۶ نشان داده شده است.

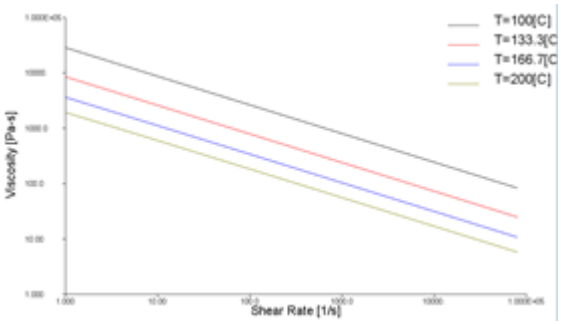
شکل ۶: مجموعه پره های پرخوران موتور هوندا

ابتدا با استفاده از دستگاه CMM مدل سه بعدی مربوط به قطعه پره پرخوران مربوط به موتور دیزل سواری Honda Civic که در شکل ۶ نشان داده شد، استخراج شد. مدل سه بعدی با فرمت STL وارد محیط Moldflow شده و شبکه بندی این پره با تعداد المان ۲۸۲۸۵ انجام شد (شکل ۷). برای شبیه‌سازی جریان، از المان های سه وجهی (غیر قابل تغییر شکل) استفاده شد که در شبیه‌سازی فرآیند تزریق پودری معمول هستند [۲]. برای بررسی استقلال از مش در تمام شبیه‌سازی های این مقاله، پارامتر زمان پر شدن قالب به عنوان پارامتر مرجع در نظر گرفته شده و با استفاده از تعداد مختلف مش ها، پاسخ های به دست آمده با هم مقایسه شد. تعداد المان هایی که بیش از آن تغییر محسوسی در پاسخ مشاهده نشد به عنوان تعداد المان (اندازه مش) بهینه در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی با آن ادامه یافت. زمان حل با توجه به تعداد المان در نظر گرفته شده برابر ۵ دقیقه بود.

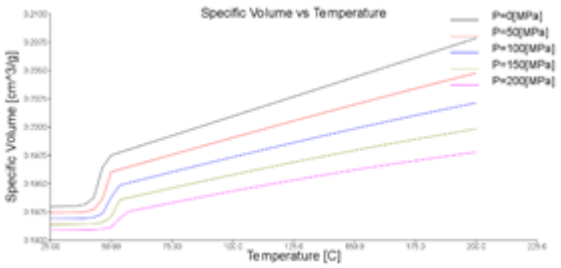
ماده اولیه انتخاب شده به منظور شبیه‌سازی پره پرخوران به نام JKMB-MIM-1 با ۶۱/۵ درصد پودر فولاد ضد زنگ است. نمودارهای مربوط به تغییرات ویسکوزیته و حجم مخصوص بر حسب دما به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷: مدل شبکه بندی شده پره پرخوران انتخاب شده



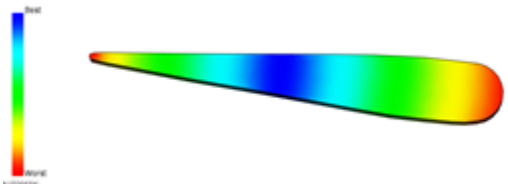

شکل ۸: نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی در دماهای مختلف




شکل ۹: نمودار حجم مخصوص بر حسب دما

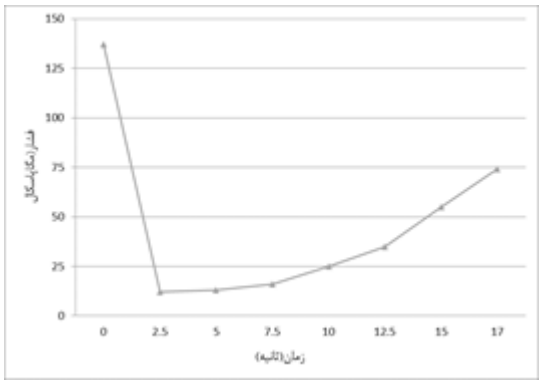
## ۱.۴ آنالیز محل قرارگیری دریچه

برای شروع شبیه‌سازی و طراحی قالب لازم است ابتدا محل قرارگیری بهینه دریچه[1] ورود مخلوط پودر و چسب به داخل حفره قالب مشخص شود. برای این منظور از آنالیز محل قرارگیری دریچه در نرم‌افزار استفاده شد. با درنظر گرفتن معیار حداقل فشار به عنوان معیار بهینه سازی، محل بهینه قرارگیری دریچه به صورت شکل ۱۰ محاسبه شد. ناحیه آبی رنگ در این شکل بهترین مکان (گره ۷۸۲) برای قرارگیری دریچه است. برای انجام این آنالیز صرفا مدل مش‌بندی شده و نوع ماده تزریقی لازم است. با توجه به نتایج تحلیل انجام شده، نقطه به دست آمده به عنوان محل دریچه در نظر گرفته شد.



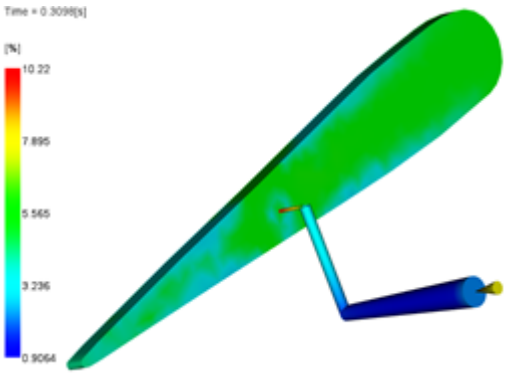
شکل ۱۰: نتیجه تحلیل محل قرارگیری دریچه

در مرحله بعد فشار تزریق در زمان‌های مختلف محاسبه شد. محاسبه این پارامتر برای اندازه گیری میزان نیروی گیره بندی مورد نیاز برای طراحی قالب مورد نیاز است. با در نظر گرفتن دمای قالب ۳۰ درجه و دمای مخلوط پودر ۱۴۸ درجه مقدار فشار در زمان‌ـ‌های تزریق مشخص شده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.




شکل ۱۱: فشار قالب در زمان های مختلف

جمع شدگی[2] قطعات تزریقی امری ذاتی در قالبگیری تزریقی است. علت این عیب تفاوت دانسیته پلیمر در دماهای گوناگون است، این عیب موجب ایجاد تنش باقی مانده در قطعه شده و در نتیجه باعث تاب برداشتن قطعه هنگام خارج شدن از قالب می‌شود. نتیجه تحلیل جمع شدگی برای پره پرخوران در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است جمع شدگی قطعه زیر ۵ درصد است. در حال حاضر در نسخه ای از نرم‌افزار که شبیه‌سازی به کمک آن انجام گرفت، تنها چیدمان خطی سیستم راهگاهی به عنوان ماژول استاندارد در دسترس است، که قطر و طول راهگاه پارامترهای قابل تنظیم آن هستند. برای دریچه (gate) نیز سه نوع دریچه مستطیلی، U شکل و انواع دیگر در نرم‌افزار قابل انتخاب هستند که با توجه به شرایط هندسی قطعه کار و جنس آن می توان حالتی که کمترین عیوب را ایجاد نماید، انتخاب نمود.



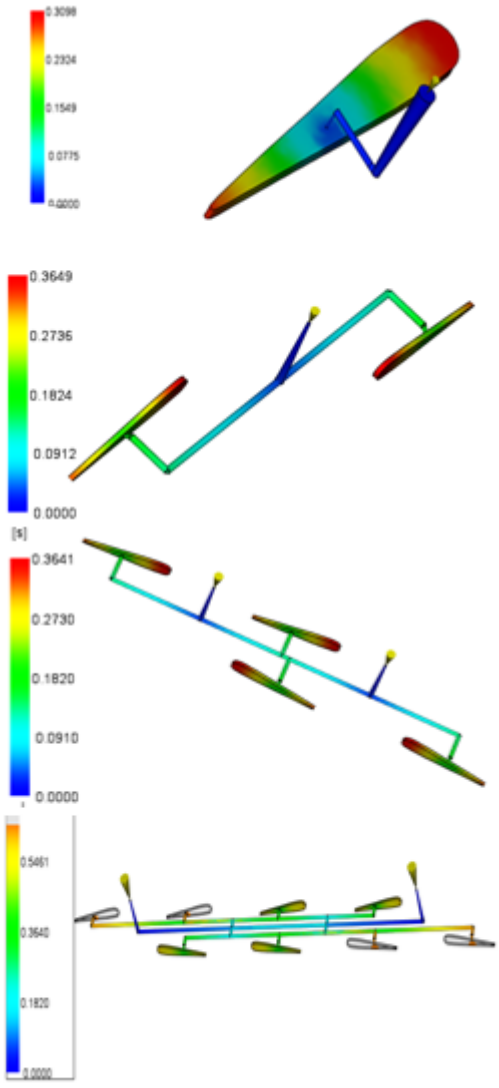

شکل ۱۲: جمع‌شدگی نقاط مختلف قالب برای قطعه پره پرخوران

## ۲.۴ محاسبه تعداد حفره های قالب

با ورود مذاب داخل حفره قالب، می‌توان در مدت زمان معین، تعداد حفره‌های معلومی را پر نمود، از جمله موارد قابل توجه از حیث تعداد حفره برای طراحی قالب، می‌توان به پر شدن یکسان و هماهنگ قالب اشاره داشت، چراکه از بین رفتن توازن در پر شدن قالب عیوبی مانند سردجوشی و حبس هوا را به دنبال

[1]Gate [2]Shrinkage

خواهد داشت. در شکل ۱۳ نتایج آنالیز برای پر شدن قالب همراه با یک، دو، چهار و هشت حفره همزمان، نشان داده شده است. با انجام آنالیزهای متعدد، طراحی قالب برای قطعه پره پرخوران با ۴ حفره، بهترین حالت تشخیص داده شد زیرا با بالارفتن تعداد حفره ها، پرشدن کامل قالب نیازمند اعمال فشار اضافی خواهد بود، به عنوان نمونه و با توجه به شکل ۱۱، قالب با تعداد ۸ حفره و بدون اعمال فشار و در نظر گیری شرایط عادی به صورت کامل پر نشده است.




شکل ۱۳: نتایج مربوط به زمان پرشدن قالب برای قالب با یک، دو، چهار و هشت حفره (به ترتیب از بالا به پایین)

برای مدلسازی دقیق رفتار مواد در نرم‌افزار Moldflow مهمترین عامل استفاده از مشخصات صحیح ویسکوزیته و حجم مخصوص بر حسب دما برای مخلوط تزریق پودر است. ترجیحا اگر برای ماده ای که در آزمون تجربی مورد استفاده قرار می گیرد این پارامترها را بتوان اندازه گیری نمود، نتایج بسیار دقیقی حاصل خواهد شد. عامل تعیین کننده مهم دیگر در دقت شبیه‌سازی اندازه المان هاست. به مانند تمامی شبیه‌سازی های نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی تزریق پودر لازم است از اندازه المان بهینه که حاصل بررسی استقلال از مش است، استفاده نمود.

## ۵ نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه روش تولید تزریق پودر فلزی در ایران به صورت تجاری تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است، در این مقاله تلاش شد این روش و کاربردهای آن به نحوی معرفی شود تا به نحوی سرآغاز فعالیت های تحقیقاتی و تولیدی آینده باشد. در این مقاله همچنین کارایی ماژول جدید نرم‌افزار Moldflow که اختصاصا برای شبیه‌سازی فرآیند تزریق پودر فلزی اخیرا به نرم‌افزار اضافه شده است، مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه شبیه‌سازی یک قطعه نمونه با نتایج تجربی موجود نشان داد که این نرم‌افزار قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی این روش تولیدی دارد و در صورتی موجود بودن خواص مربوط به گرانول تزریق پودر فلزی، برای مطالعه پرشدن قالب، زمان پرشدن، جمع شدگی، فشار و دمای مخلوط پودر روش قابل اطمینانی است. الیته ذکر این نکته هم ضروری است که استفاده از نرم‌افزار فقط مرحله پر شدن قالب و سرد شدن را پیش بینی می کند و مراحل دیگر روش تزریق پودر نظیر تف جوشی و عملیات حرارتی را شبیه‌سازی نمی کند. نتایج شبیه‌سازی قطعه پره پرخوران همچنین نشان داد موقعیت بهینه دریچه تقریبا در وسط قالب است و از جهت بهتر پر شدن قالب، قالب با چهار حفره بهترین انتخاب است.

## ۶ قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه سمنان به خاطر حمایت مالی از این تحقیق و مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو به خاطر در اختیار قرار دادن قطعه کار، ابراز می‌دارند.

## مراجع

[1] Groover, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2007.

[2] Bilovol, Volodymyr Valeriyovych. *Mould filling simulations during powder injection moulding*. Ph.D. thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2003.

[3] Ganeshram, V and Achudhan, M. Design and moldflow analysis of piston cooling nozzle in automobiles. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(6):4808–4813, 2013.

[4] Ganeshram, V and Achudhan, M. Design and moldflow analysis of piston cooling nozzle in automobiles. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(6):4808–4813, 2013.

[۵] خرسند، ح. ساخت قطعات دقیق سیستم ایمنی و قفل خودرو به روش تزریق پودر. گزارش طرح تحقیقی، قرارداد پژوهشی شماره ۵۱۰۲۴۷۳ /۴۵۰. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.

[6] Enneti, Ravi K, Park, Seong-Jin, Schenck, Andrew, German, Randall M, Thomas, Patricia, Levenfeld, Belén, Várez, Alejandro, Palagi de Souza, Igor O, Palagi de Souza, J, Fuentefria, Alexandre M, et al. Critical issues in manufacturing dental brackets by powder injection molding. *International Journal of Powder Metallurgy*, 48(2):23, 2012.

[7] Chiaberge, M. *New trends and developments in automotive system engineering*. Intech, Croatia, 2011.

[8] Mathew, B. A. and Mastromatteo, R. Metal injection moulding for automotive applications. *Metal Powder Report*, 58(9):32–35, 2003.

[9] T. G. KANG, et al. Modeling and simulation of metal injection molding (mim). in Heany, Donald F., ed. , *Handbook of metal injection molding*, pp. 197–233. Woodhead Publishing Limited, Oxford, England, 2012.

[۱۰] لقمان، ف. مدلسازی فرآیند تولید تزریق پودر برای تولید قطعات خودرو. پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۶.