

یادداشت مهندسی

بررسی عددی و تجربی پر شدن قالب تزریق و تعیین شرایط

مناسب قالب تزریق در روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز

ولی‌اله پناهی‌زاده^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

حمید خرسند^۲

دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵)

مجید آزاده^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، طراحی و ساخت قالب تزریق است. از موارد بسیار مهم و تأثیرگذار در کیفیت قطعه، محل تزریق در قالب و نحوه پر شدن قطعه در هنگام قالب‌گیری تزریقی می‌باشد که به‌طور مستقیم بر روی کیفیت قطعه نهایی تأثیرگذار خواهد بود. در این مقاله، از پودر حاوی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L برای مواد اولیه و نرم‌افزار مولدکس ۳D برای شبیه‌سازی استفاده شده است. پارامترهای زمان تزریق، زمان خنک کاری و زمان فشار نگهداشت برای همه آزمایش‌ها به ترتیب ۲/۵s، ۱۰s و ۲s به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین پارامترهای سرعت، فشار و دمای تزریق به‌عنوان پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی فرایند، روش لایه‌مرزی (BLM) به‌کار گرفته شد. مدل‌سازی سه‌بعدی قطعه، به همراه سه مسیر راه‌گامی با شرایط تزریقی متفاوت، طراحی شدند. قالب تزریقی برای نمونه بهینه‌شده، ساخته و با شرایط مختلف تولید شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی صحت نتایج شبیه‌سازی را نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند که در فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، سیال تزریقی دارای گرانیوی بسیار بالایی بوده و رفتار متفاوتی را در مقایسه با سیال مشابه پلیمر پایه به‌کاررفته در خوراک از خود نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای بهینه برای سرعت، فشار و دمای تزریق به ترتیب ۶۰٪، ۶۰٪ و ۱۸۵ °C به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، شبیه‌سازی، Moldex3D، خوراک 316L، محل تزریق و گیت

The Numerical and Experimental Investigations of Injection Mold Filling and Determination of the Appropriate Conditions in Metal Injection Molding (MIM)

V. Panahizadeh³

Mechanical Engineering
Department, Shahid Rajee Teacher
Training University

H. Khorsand²

Faculty of Materials Science and
Engineering, K. N. Toosi University
of Technology

M. Azadeh¹

Mechanical Engineering
Department, Shahid Rajee Teacher
Training University

(Received: 02/January/2021; Accepted: 06/May/2021)

ABSTRACT

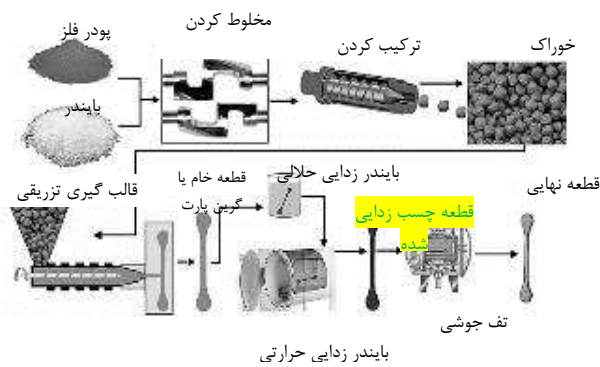
The most important steps in the metal injection molding (MIM) process are the design and manufacture of the injection mold. By far the most influential factors in the quality of the part are the injection site in the mold and how the part is filled during the injection molding, which directly affects the quality of the final part. In this paper, a powder containing 316L stainless steel is used as the raw material, and the Moldex 3D software is used for the simulations. The injection time, the cooling time, and the keeping time parameters are considered fixed for all tests with the values of 2.5, 10, and 2 seconds respectively. The speed, pressure, and temperature of injection are also considered as effective parameters. The boundary layer method (BLM) is used to simulate the process. The 3D model of the part is designed with three gate paths and different injection conditions. The injection mold is made for the optimized sample and produced under different conditions. Comparing the results of simulations with the experimental results shows the accuracy of the simulation results. The results also show that in the process of MIM, the injection fluid has a very high viscosity and different behavior compared to the similar fluid of the base polymer used in the feed. Besides, the optimal values for speed, pressure, and temperature of injection are found to be 60%, 60%, and 185 °C, respectively.

Keywords: Metal Injection Molding Process, Simulations, Moldex3D, Feedstock 316L, Runner & Gate Position.

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): v.panahizadeh@sru.ac.ir

۲- دانشیار: hkhorsand@kntu.ac.ir

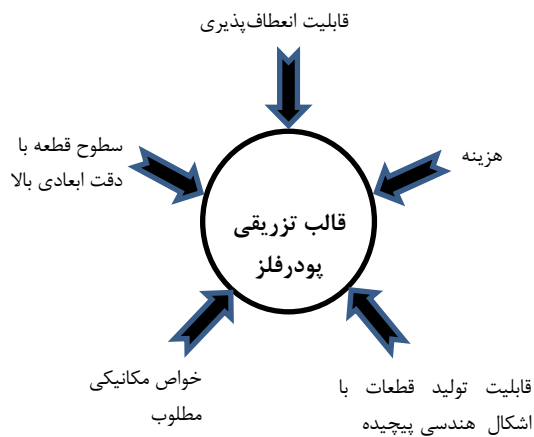
۳- کارشناس ارشد: 743976@sapco.com



شکل (۱): چرخه کامل فرایند قالب‌گیری تزریقی

پودر فلز [۱]

پارامترهای تزریق، سیستم چسب‌زدایی و تف‌جوشی که به شکل و وزن قطعه بستگی دارد، به‌هم‌وابسته است، از این‌رو کنترل ماهیت این مراحل بسیار پیچیده است. به‌دست‌آوردن حالت مناسب مستلزم به‌کارگیری ترکیبی از شبیه‌سازی و کار تجربی برای هر قطعه در هر مرحله می‌باشد. نحوه پرشدن حفره باعث شکل‌گیری ساختار قطعه شده، فرایندهای بعدی را تحت تأثیر قرار خواهد داد این در حالی است که به‌صورت ظاهری، کیفیت قطعه خام حاصل از تزریق مناسب قابل تشخیص نیست. عوامل مؤثر در انتخاب این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): عوامل مؤثر در انتخاب فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز

بیشینه تحقیق

برای اولین بار شناسایی خطوط جوش فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز توسط نرم‌افزار مولد فلو^۷ شبیه‌سازی و

۱- مقدمه

برای تولید قطعه‌های کوچک فلزی، روش‌های جدیدی موردنیاز است که بتوان علاوه بر سهولت در تولید، قطعه‌هایی پیچیده با مواد ویژه، دقت ابعادی بالا، خواص مکانیکی عالی و هزینه پایین تولید کرد. به همین منظور، تحقیقات گسترده‌ای برای روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز انجام شده است.

مراحل فرایند

فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، از ترکیب دو روش متالورژی پودر و قالب‌گیری تزریق پلاستیک به وجود آمده است. مراحل این فرایند را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد:

مرحله اول تهیه مواد اولیه^۱: برای دستیابی به مواد اولیه، لازم است ابتدا چسب یا سیستم چسب^۲ که از نوعی پلیمر پایه و افزودنی‌های دیگر تشکیل می‌شود، آماده کرد و سپس حدود ۷۰٪ درصد پودر فلزی را با حدود ۳۰٪ سیستم چسب ترکیب نمود تا مواد اولیه به‌دست آید.

مرحله دوم تولید قطعه خام^۳: قطعه خام از تزریق مواد اولیه درون قالب تزریقی با دستگاه تزریق به‌دست می‌آید.

مرحله سوم سیستم چسب‌زدایی^۴: سیستم چسب با روش‌های حلالی، حرارتی یا ترکیبی باید از قطعه خارج شود. قطعه حاصل از این مرحله را قطعه چسب‌زدایی شده^۵ گویند.

مرحله چهارم تف‌جوشی^۶: در این مرحله قطعه در کوره و در درجه حرارت و اتمسفر کنترل‌شده قرار گرفته، تف‌جوشی اتفاق می‌افتد تا قطعه نهایی به‌دست آید [۱].

در شکل ۱، چرخه کامل این فرایند نشان داده شده است.

¹ Feedstock

² Binder

³ Green Part

⁴ Debinding

⁵ Brown Part

⁶ Sintering

⁷ MoldFlow

عبارت‌اند از: دمای سطح قالب و نقطه ذوب خوراک به ترتیب 40°C و 120°C و سرعت جریان $2.0\text{ cm}^3/\text{s}$. آن و همکارانش [۸] دریافتند که برای توسعه یک فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز موفقیت‌آمیز، بهینه‌سازی طراحی سیستم چسب‌زدایی، مواد اولیه، هندسه قطعه، طراحی قالب و شرایط تزریق مهم است. شبیه‌سازی نشان داد که پارامترهای مرتبط با فشار وابسته به سیستم چسب هستند و پارامترهای مربوط به درجه حرارت در انتخاب پودر تأثیرگذار است همچنین پارامترهای مربوط به سرعت در انتخاب سیستم پودر - چسب‌زدایی و کنترل آن بسیار مهم است. میائو و همکارانش [۹] با بهره‌گیری از نرم‌افزار مولدکس^۳ به منظور تعیین فاکتور مؤثر بر حجم تزریق در مرحله پرشدن، نتیجه گرفتند که ازدیاد دمای ذوب و قالب باعث افزایش حجم پرشدن قالب می‌شود با این شرط که دمای ذوب بیش از حد نمی‌تواند بالا باشد. ایلینکا و همکارانش [۱۰] مرحله پرشدن تزریق مواد قالب‌گیری تزریقی پودر فلز با روش المان محدود سه‌بعدی، مورد بررسی قرار دادند. جریان غیرایزوترمال و رفتار غیرنیوتنی مواد توسط مدل Cross-WLF توصیف شد. مشاهدات تجربی نشان از افزایش ۲۰ برابری رفتار حرارتی جریان تزریق خوراک در هنگام پرشدن قالب در ترکیبات قالب‌گیری تزریقی پودر فلز نسبت به پلاستیک می‌باشد. کیم و همکارانش [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی جریان تزریق در مسیرهای متقارن راه‌گامی با استفاده از خوراک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L و استفاده از نرم‌افزار مولدفلو به این نتیجه رسیدند که در قالب‌گیری تزریقی پودر فلز با وجود راه‌گام‌های متقارن، یکنواختی تزریق، وجود ندارد. کوتسباخ و همکارانش [۱۲] یک روش و مدل‌سازی ریاضی را برای شبیه‌سازی قالب تزریقی پلیمرهای پودر فلزی توسعه دادند. با انجام این شبیه‌سازی نشان دادند که روش شبیه‌سازی یک روش کارآمد برای تولید محصولات با کیفیت بالا، و جلوگیری از روش گران آزمایش و خطا می‌باشد. جیانگ و همکاران [۱۳] با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی برای مطالعه

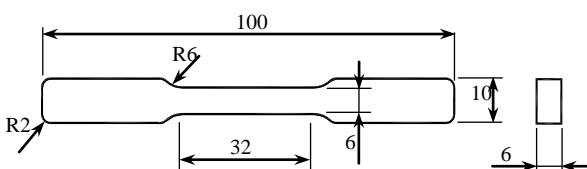
گزارش شد [۲]. مری و اوساکادا [۳] با شبیه‌سازی فوران مذاب^۱ مخلوط پودر و سیستم چسب، درون قالب با روش المان محدود^۲، به این نتیجه رسیدند که رفتار پدیده فوران مذاب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر شکل، سرعت تزریق و اندازه دهانه ورودی مواد، خواهد بود. پیوتر و همکاران [۴] شبیه‌سازی محصولات بسیار کوچک تزریق میکرو^۳ را انجام دادند. از نرم‌افزار آباکوس^۴ برای شبیه‌سازی توزیع دما و از نرم‌افزار مولدفلو برای فرایند پرشدن قالب تزریقی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند به پیش‌بینی عیوبی مانند خط جوش سرد و مشکلات تزریق کمک کند. برییر و همکارانش [۵] برای انجام مؤثر شبیه‌سازی تزریق بر اساس روش المان محدود. یک مدل دوفازی برای توصیف جریان پودر فلزی و سیستم چسب ارائه دادند که برای پیش‌بینی تفکیک پودر فلز، عنوان نمودند که ابزار شبیه‌سازی ضروری است. لی و همکارانش [۶] با استفاده از پودر فولاد زنگ‌نزن 17-4PH و با درصدهای ۶۰، ۶۴، ۶۸ و ۷۲ و اختلاط آن با سیستم چسب، چهار نوع خوراک متفاوت به‌دست آوردند. پس از تزریق به داخل قالب، اثرات بارگذاری پودر بر روی مواد اولیه شامل خواص رئولوژیکی، اعوجاج، کنترل تحمل و همچنین خواص مکانیکی و ریز ساختارها، مورد بررسی قرار گرفت و ثابت شد بارگیری خوراک با حضور ۶۸ درصدی پودر فلز حالت بهینه است. ژینگ و همکارانش [۷] رفتار جریان خوراک، برای پودر آلیاژ تنگستن در حفره قالب را با استفاده از مدل Hele-Shaw به‌طور تقریبی توصیف نمودند. شبیه‌سازی فرایند تزریق با روش ترکیبی المان محدود، تفاضل محدود و کنترل حجم با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو انجام و با آزمایش‌های تجربی نتیجه گرفتند که سرعت جریان^۵، تأثیر مهمی در پرشدن^۶ قالب دارد. همچنین انتخاب سرعت جریان، تحت تأثیر ساختار گیت می‌باشد که پس از طراحی مجدد گیت، پارامترهای بهینه به‌دست آمدند. این پارامترها

¹ Jetting² FEM (Finite Element Method)³ Micro Injection⁴ Abaqus⁵ Flow Rate⁶ Filling

به منظور انجام کار تجربی، قالب تزریقی ساخته و تولید نمونه‌ها با استفاده از خوراک فولاد زنگ‌نزن 316L و دستگاه تزریق انجام شد. عیوب قطعه‌ها بررسی و اقدامات اصلاحی که در شبیه‌سازی انجام شده بود در عمل هم صورت پذیرفت. نمونه‌های بدون عیب به دست آمد.

انتخاب نمونه قطعه

نمونه دمبلی شکل بر اساس این واقعیت که پس از تکمیل مراحل فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، با قطعه‌ای کاملاً فلزی مواجه خواهیم بود و باید با محصول مشابه، حاصل از فرایند دیگری قابل مقایسه باشد، انتخاب گردید. بر این اساس از ابعاد پیشنهاد شده در استاندارد ASTM شماره E8-09 که در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده شد.



شکل (۳): نمونه قطعه دمبلی شکل انتخاب شده بر اساس استاندارد ASTM

طراحی سه‌بعدی قطعه‌ها و مسیرهای راه‌گاهی

در شکل ۴ طراحی مدل سه‌بعدی نمونه قطعه نشان داده شده است. مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار CATIA انجام و با کد P نام‌گذاری شد. مسیرهای راه‌گاهی متفاوت به سه حالت مرکز قطعه، از سمت پهلوی سر قطعه و در راستای طولی سر قطعه در جدول ۱ طراحی و مدل‌سازی شد.

برای شبیه‌سازی، شرایط تولیدی هر یک از قطعه‌ها باید مدنظر قرار گرفته شود از این رو، طراحی بر اساس یک قالب دو حفره انجام و مسیرهای راه‌گاهی برای رعایت تعادل تزریق، در وسط قالب طراحی شد.

در این مرحله نیازی به طراحی قالب نیست ولی ابعاد قطعه نمونه به همراه ابعاد دستگاه تزریق و محدوده قالب باید مورد توجه قرار گیرند.

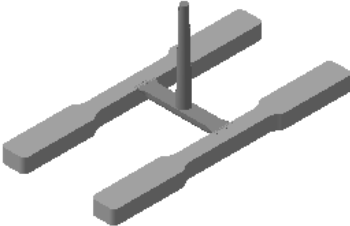


فعل و انفعالات سطحی ساختار ترکیبی پلیمر و فلز، تعامل سطحی و خصوصیات اتصال مابین ساختارهای ترکیبی پلیمر - فلز را بررسی کردند. نتایج که ارائه دادند نشان داد به هنگامی که لایه پلیمر بیشتر جابه‌جا می‌شود، زنجیره‌ها از بستر جدا می‌شوند و منجر به تشکیل حفره‌های در حال رشد می‌شوند. دمرس و همکاران [۱۴] با شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی قالب‌گیری تزریقی پودر فلز با روش پرکردن کم‌فشار مواد اولیه فلزی، نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی عددی انطباق مطلوبی با نتایج تجربی در این روش دارد. علایی و همکاران [۱۵] تأثیر پارامترهای ورودی فشار تزریق، دمای تزریق، دمای قالب، فشار نگهداری، زمان نگهداری، سرعت تزریق و زمان خنک کاری بر چگالی، استحکام و سختی قطعات ساخته شده از پودر ۴۶۰۵ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که فشار تزریق، دمای تزریق و سرعت تزریق با چگالی، استحکام و سختی رابطه‌ای مستقیم دارند، در حالی که دمای قالب با خواص قطعات رابطه معکوس داشته و افزایش دمای قالب موجب کاهش چگالی و خواص مکانیکی شده است. عسگری و همکاران [۱۶] تأثیر پارامترهای چسب‌زدایی و تف جوشی بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری قالب تزریق فلز Fe-2Ni را بررسی نمودند. همچنین در پژوهشی دیگر عسگری و همکاران [۱۷] خصوصیات رئولوژیکی و حرارتی فولاد آلیاژی کم AISI 4605 برای فرآیند قالب‌گیری تزریق فلز را مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به مطالعات انجام شده در این مقاله شبیه‌سازی دقیق و ساخت قطعه واقعی با برطرف کردن عیوب موجود در فرایند و رسیدن به شرایط مناسب قالب تزریق در روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز انجام گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این مقاله، سه نمونه دمبلی شکل با سه مسیر راه‌گاهی با گیت‌های متفاوت، انتخاب گردید. شبیه‌سازی پر شدن تزریق برای هر یک صورت پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها بررسی و با هم مقایسه شد. اقدامات اصلاحی در ناحیه گیت ورودی مواد برای به دست آوردن حالت مناسب انجام شد.

جدول (۲): سه نمونه قطعه یکسان با راه‌گاه‌های متفاوت

کد	نمونه‌های قطعات کامل شده با راه‌گاه
P-1	
P-2	
P-3	

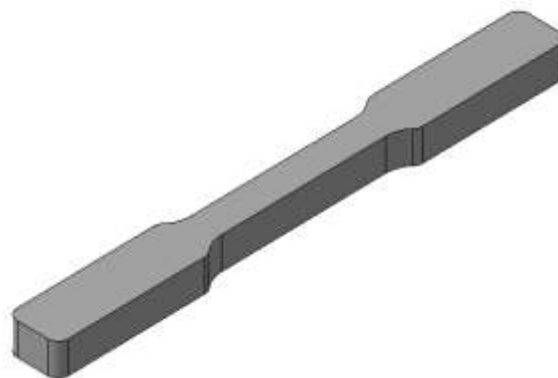
نکته: با توجه به محدودیت ابعادی قالب در نظر گرفته شده برای دست‌یابی به نتایج تجربی کد P-3، طراحی مسیر راه‌گاهی به صورت S شکل انجام شد.

مش‌بندی

برای دست‌یابی به تجزیه و تحلیل دقیق، داشتن یک مش‌بندی با کیفیت که بهترین ویژگی‌های هندسی مدل را نشان دهد، بسیار مهم است.




در نرم‌افزار مولدکس ۳D برای ایجاد مش‌بندی تخصصی شبیه‌سازی جریان سیال، روش مش‌بندی لایه مرزی^۱ (BLM) در نظر گرفته شده است. این روش بر اساس مقاله‌ای که گاریملا و شپارد ارائه نمودند مطرح شد و به‌مرور زمان تکامل یافت و از مناسب‌ترین فن‌آوری‌های مش‌بندی برای فرایند شبیه‌سازی در قالب‌گیری تزریقی پودر فلز محسوب می‌شود که در این مقاله نیز به‌کار گرفته شده است.

با ترکیب قطعه کد P و راه‌گاه‌های نوع ۱، ۲ و ۳ (جدول ۱) سه نمونه قطعه یکسان با راه‌گاه‌های متفاوت و گیت نوع لبه‌ای طراحی شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل (۴): طراحی سه‌بعدی نمونه قطعه با استفاده از ابعاد استاندارد شکل ۶

جدول (۱): مسیرهای راه‌گاهی متفاوت برای نمونه قطعه

کد	مسیر راه‌گاهی	توضیحات
۱		بهترین مسیر گیت ورودی مواد، مرکز ثقل قطعه می‌باشد. فشار تزریق در این حالت، در تمام مسیر به‌صورت متعادل اعمال شده و شرایط ایده‌آلی برای پر شدن قطعه به وجود می‌آورد.
۲		در این طرح، چون هرگونه تنش در ناحیه میانی نمونه دمبلی شکل بر اساس استاندارد ISO 2740 در نتایج آزمون‌های مکانیکی تأثیرگذار خواهد بود، محل انتهای پهلویی قطعه به‌واسطه نزدیکی به مرکز قالب در نظر گرفته شد.
۳		در این طرح، مسیر راه‌گاهی به این علت که جهت جریان در راستای تزریق قرار گرفته و قطعه بدون مشکل تزریقی پر شود، در راستای طولی قطعه در نظر گرفته شد.

^۱ Boundary Layer Mesh

برای تمام نمونه‌ها یکسان تعریف شد ولی شرایط تزریق، با توجه به حجم تزریق و مشخصات مش‌بندی مجموعه، متغیر خواهد بود. خوراک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ نوع L، محصول شرکت PolyMIM آلمان برای این مقاله در نظر گرفته شد و تنظیمات، بر اساس اطلاعات شرکت سازنده، انجام گردید.

جدول (۴): مشخصات مش

موضوع	نمونه P-1	نمونه P-2	نمونه P-3
نام فایل	P-1.mfe	P-2.mfe	P-3.mfe
نوع مش	ترکیبی		
ابعاد قطعه	100 x 47.5 x 6	100 x 47.5 x 6	100 x 50 x 6
حجم	۱۰/۱۱۵ cc	۸/۰۳۶ cc	۱۰/۱۰۹ cc
حجم رانر	۰/۹۱۴ cc	۱/۸۷۹ cc	۱/۶۱۷ cc
تعداد	۸۴۸۷۵	۶۸۸۲۴	۱۰۳۶۰۹
تعداد	۲۷۵۰۷	۲۶۲۴۶	۳۵۱۶۲

جدول (۵): مشخصات مواد

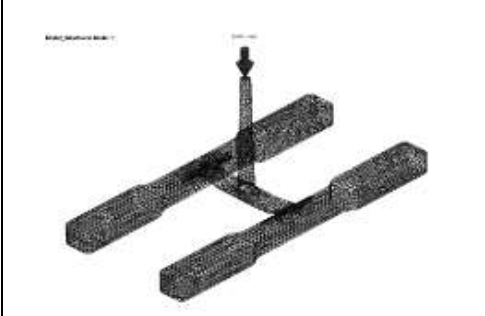
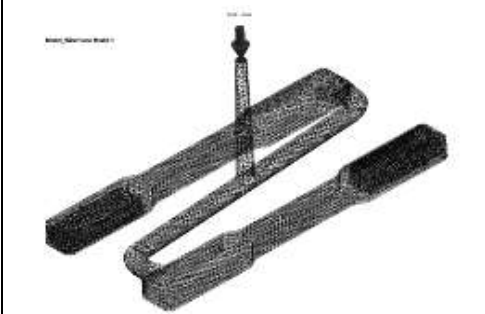
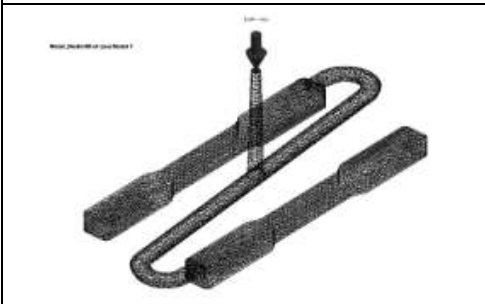
موضوع	نمونه P-1	نمونه P-2	نمونه P-3
نوع مواد	قالب‌گیری تزریقی پودر فلز 316 LG		
سازنده	PolyMIM		
کشور	آلمان		
MFI	۴۵۰ g/۱۰ min		
دمای	۱۸۰-۲۲۰ °C		
دمای	۴۰-۶۰ °C		
دمای	۱۴۰ °C		

جدول (۶): شرایط تزریق

موضوع	نمونه P-1	نمونه P-2	نمونه P-3
نام دستگاه تزریق	FANUK مدل S-2000i100A		
قطر مارپیچ	۲۸mm		
دمای ذوب	۱۹۹/۲ °C		
حداکثر فشار	۱۴۵۰ bar		
حجم تزریق (cc)	۱۱/۰۲۹	۹/۹۱۵	۱۲/۷۲۳
فشار تزریق در ناحیه	٪ ۳۰		
فشار تزریق در ناحیه	٪ ۶۴		
فشار تزریق در ناحیه	٪ ۴۳/۶۵		
زمان پرشدن	۰/۱۵ s		
زمان باز ماندن قالب	۵ s		
زمان خنک‌کاری	۲۰/۴ s		
سیکل تولید	۳۳/۲۶ s		

پارامترهای BLM مانند ابعاد مش، تعداد لایه‌های مرزی و نسبت جبران، قابل تنظیم است. انواع مش‌بندی در این نرم‌افزار از نوع چهارضلعی و بین یک تا پنج لایه هستند. در این روش، سه‌لایه از مش‌های منشوری به سمت داخل تشکیل می‌شوند و فضای باقی‌مانده با مش‌های چهارضلعی پر می‌شوند در نتیجه، مش جامد در جهت ضخامت حداقل هفت لایه دارد و برای اعمال دقت بالاتر می‌تواند تا ۱۱ لایه افزایش یابد. در جدول ۳، قطعه‌های مش‌بندی شده با روش BLM نشان داده شده است.

جدول (۳): قطعه‌های مش‌بندی شده موضوع این مقاله با استفاده از روش BLM

کد	تصویر
P-1	
P-2	
P-3	

شرایط شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی، لازم است اطلاعات موردنیاز برای نرم‌افزار تعریف شود. در جدول ۴، مشخصات مش‌بندی و در جدول ۵ مشخصات مواد برای هر یک از نمونه‌ها تعریف گردید. در جدول ۶، شرایط تزریق مواد و نوع دستگاه تزریق

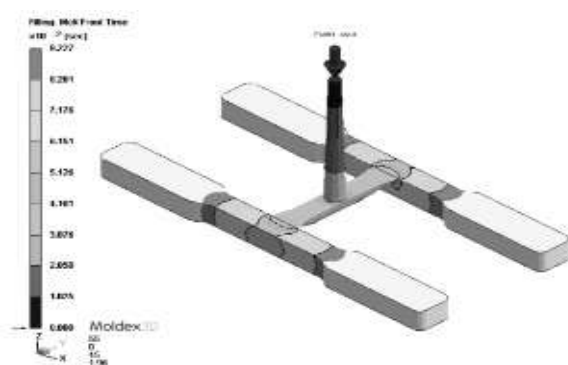
انجام شبیه‌سازی

در این مقاله، شبیه‌سازی پر شدن برای یک نمونه با سه مسیر راه‌گامی مختلف، در نرم‌افزار مولدکس ۳D انجام شد.

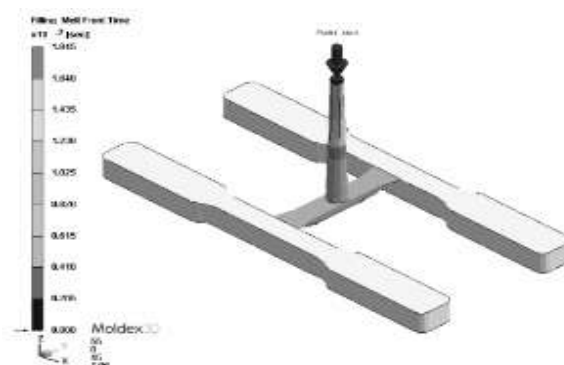
۳- نتایج و بحث شبیه‌سازی

شبیه‌سازی نمونه‌ها بر اساس داده‌های ثابت انجام شد. یکنواختی، موقعیت پر شدن با توجه به زمان، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به‌طور کلی جریان سیال در هر موقعیت زمانی، باید به یک نسبت مساوی پر شود. زمان‌های پر شدن

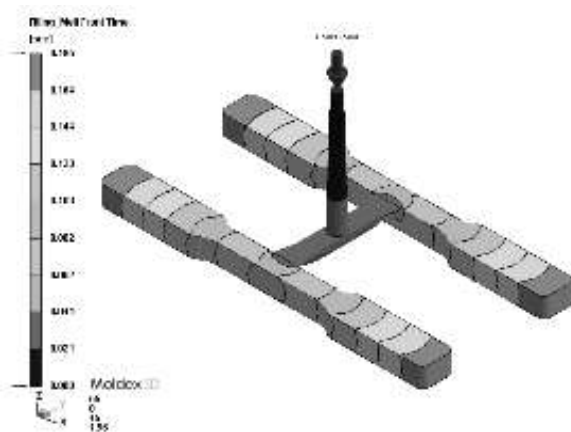
۱۰٪، ۵۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ برای نمونه P-1 در شکل ۵، برای نمونه P-2 در شکل ۶ و برای نمونه P-3 در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۵ شبیه‌سازی پر شدن برای نمونه P-1 نشان می‌دهد که سیال در زمان‌های تعیین شده به‌صورت یکنواخت در حفره جریان یافته و در زمان ۰/۱۸۵ حفره را پر کرده است. این طرح با توجه به استاندارد ISO 2740 مربوط به آزمون قطعات حاصل از فرایند تف‌جوشی، در ناحیه وسط قطعات دمبلی شکل، هیچ‌گونه تمرکز تنش را تأیید نمی‌کند و از آنجا که گیت ورودی مواد ناحیه‌ای پرتنش می‌باشد، این طرح مناسب نیست.



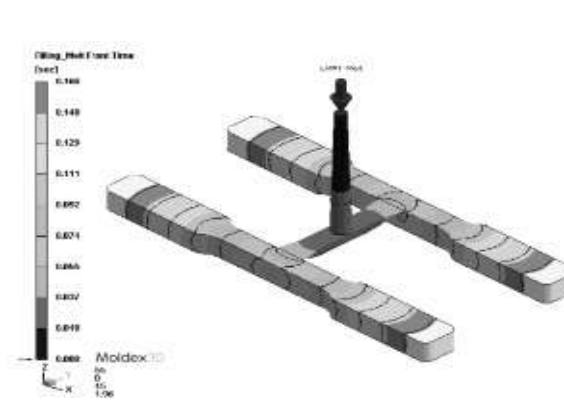
(ب)



(الف)



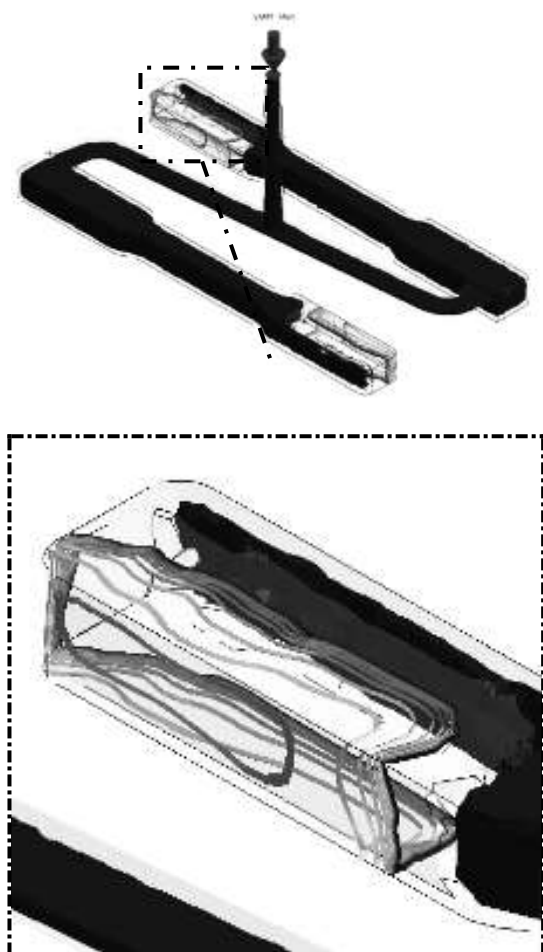
(د)



(ج)

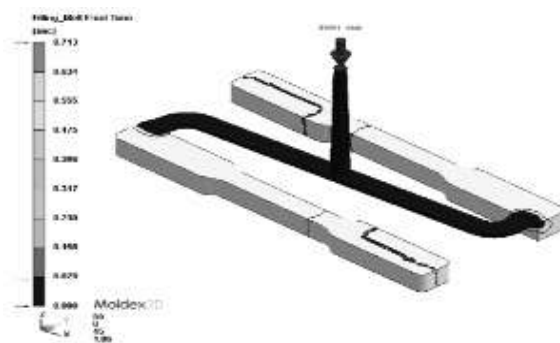
شکل (۵): پر شدن نمونه P-1 در زمان‌های (الف) ۱۰٪، (ب) ۵۰٪، (ج) ۹۰٪ و (د) ۱۰۰٪

در شکل ۶ به دلیل موقعیت مسیر گیت ورودی مواد که از سمت پهلوی سر نمونه طراحی شده، جریان سیال وارد حفره شده و در برخورد با دیوار مقابل، به سمت فضای خالی تغییر مسیر داده و به علت تغییر در ضخامت حفره و گرانشی بالای سیال حاوی پودر فلز و استمرار این شرایط باعث تأخیر در پر شدن حفره و به وجود آمدن جریان گردابی در انتهای قطعه می‌شود. این مشکل سبب شده سیال در تماس با فولاد قالب، حرارت از دست داده و در انتهای مسیر، با مشکل پر نشدن مواجه شویم. در شکل ۷، تصویر شبیه‌سازی پر نشدن حفره در انتهای قطعه نشان داده شده است.

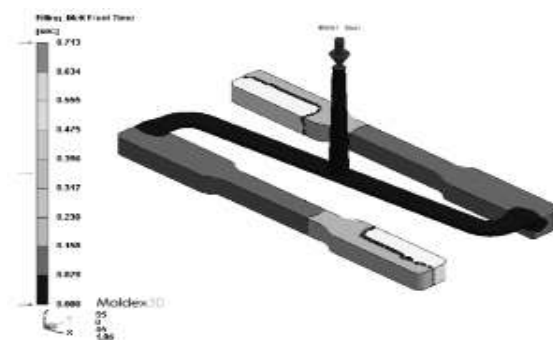


شکل (۷): جهت ورود جریان از پهلو و شبیه‌سازی پر نشدن حفره در انتهای قطعه

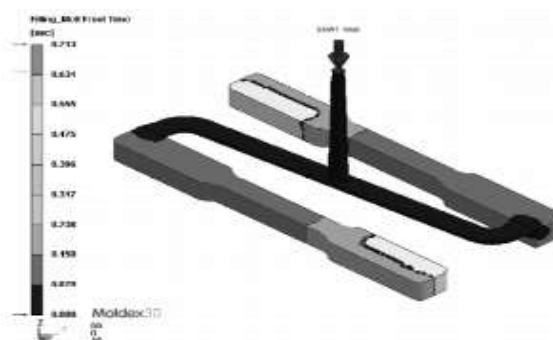
در شکل ۸، شبیه‌سازی پر شدن در زمان‌های مختلف، نشان از یکنواختی تزریق و پر شدن کامل قطعه در زمان ۰/۲۳۲s می‌دهد. زمان بیشتر پر شدن حفره به دلیل طولانی بودن مسیر راه‌گامی می‌باشد.



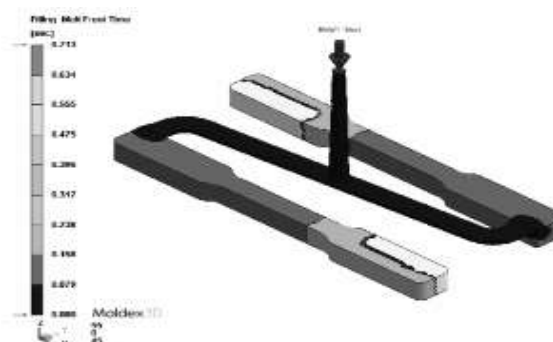
(الف)



(ب)



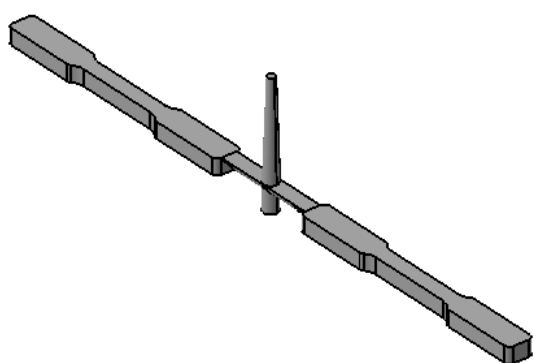
(ج)



(د)

شکل (۶): پر شدن نمونه P-2 در (الف) ۰/۱۰، (ب) ۰/۵۰، (ج) ۰/۹۰ و (د) ۰/۱۰۰

در فرایند قالب‌گیری تزریق پلاستیک، اصولاً از طراحی گیت ورودی مواد در راستای درازای قطعه به‌واسطه مشکل اعوجاج و تابیدگی قطعه، پرهیز می‌شود ولی در این فرایند، به علت حضور ۶۳/۵ درصدی پودر فلز، مشکلی بابت تابیدگی و اعوجاج نخواهیم داشت. طراحی راهگانه مناسب برای این قطعه، در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به ملاحظات قالب‌سازی و محدودیت‌های ابعادی برای دستیابی به نتایج تجربی، مسیر راه‌گاهی به شکل S طراحی شد.

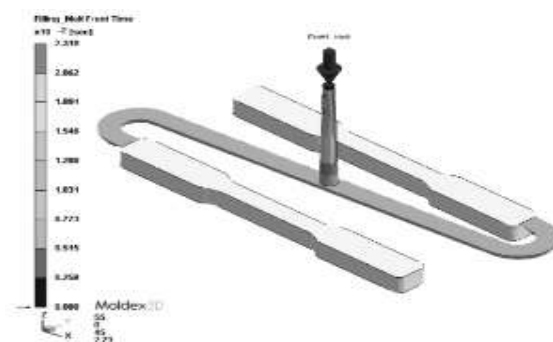


شکل (۹): طراحی راه‌گاهی مناسب برای نمونه قطعه P-3

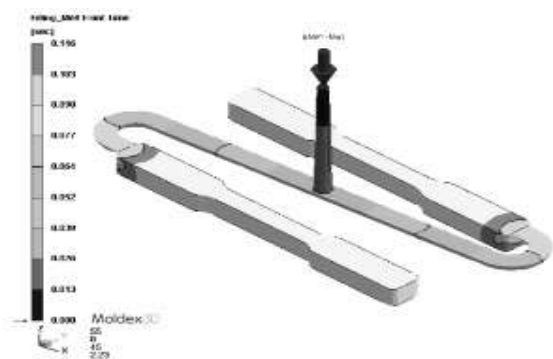
عیوب تزریق

متناسب با شکل قطعه، موقعیت و تعداد گیت ورودی مواد اولیه، عیوبی در قطعه پدیدار می‌شود. از جمله عیوب بسیار مهم که در کیفیت قطعات تأثیر چشم‌گیری دارد، خط جوش سرد و حبس هوا می‌باشد.

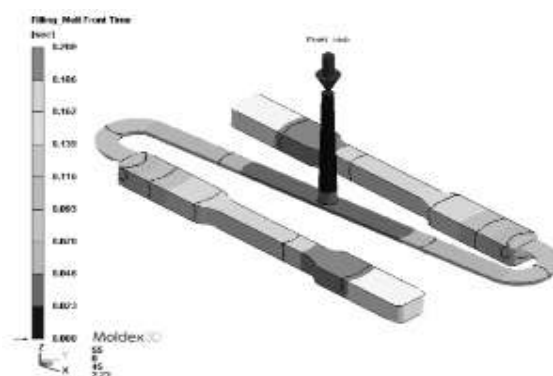
زمانی که دو جبهه سیال مذاب در حال پیشروی در حفره قالب، در تماس با فولاد، افت حرارتی پیدا کرده، به هم می‌رسند از شرایط دمایی مطلوب فاصله گرفته و خط جوش سرد تشکیل می‌شود. هوای موجود در حفره قالب بر اثر پیشروی جریان سیال به تله افتاده، باعث می‌شود مواد به‌صورت کامل حفره را پر نکند. شناسایی محل حبس هوا به طراح کمک می‌کند تا از روش‌هایی مانند اینسرت گذاری و تعبیه مسیر خروج هوا برای خروج این حباب‌ها استفاده نماید. خط جوش سرد و حبس هوا برای نمونه‌های P-1 در شکل ۱۰، نمونه P-2 در شکل ۱۱ و نمونه P-3 در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



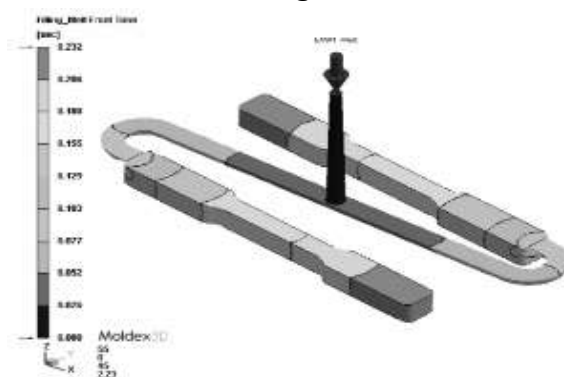
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۸): پر شدن نمونه P-3 در زمان‌های ۱۰٪، ۵۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪

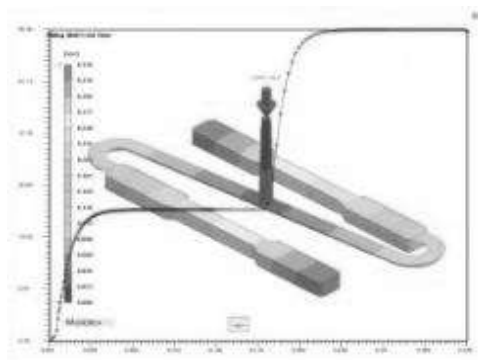
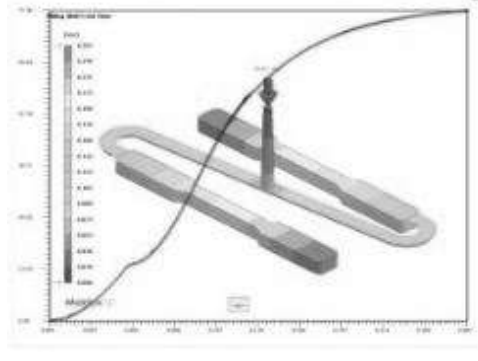
مقایسه بین دو فرایند تزریق پلاستیک و تزریق پودر فلز

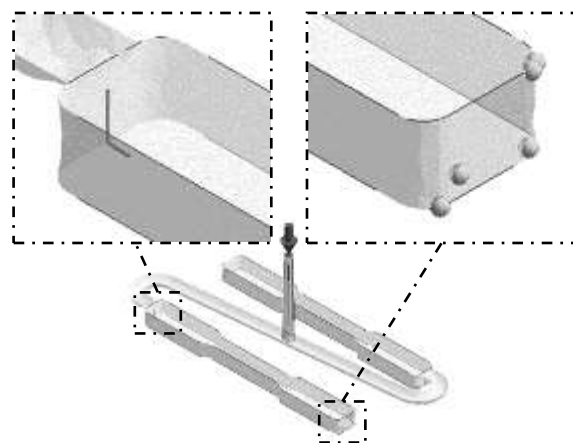
مقایسه شبیه‌سازی بر روی نمونه نوع P-3 با دو فرایند تزریق پلاستیک و تزریق پودر فلز صورت پذیرفت. در جدول ۷، مقایسه شبیه‌سازی پرشدن و در جدول ۸، مقایسه شبیه‌سازی فشار تزریق نشان داده شده است.

این بررسی نشان می‌دهد که به‌واسطه حضور پودر فلزی در روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، فشار تزریق تقریباً ۳ برابر شده و با توجه به اینکه در مواد اولیه فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز فقط حدود ۱۵٪ پلیمر وجود دارد، میزان جابه‌جایی حدود ۳ برابر کمتر شده است.

جدول (۷): مقایسه شبیه‌سازی پرشدن بین دو فرایند

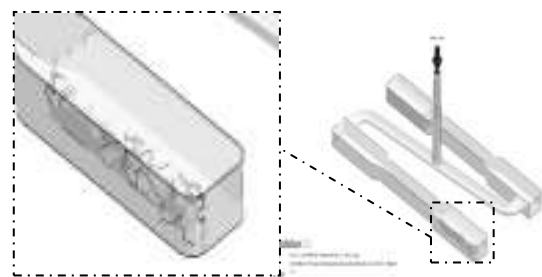
پلاستیک و پودر فلز

شبه‌سازی پر شدن	روش قالب‌گیری تزریق پلاستیک
 <p>زمان پر شدن = ۰/۳۳۹ ثانیه</p>	
 <p>زمان پر شدن = ۰/۲۶۷ ثانیه</p>	روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز



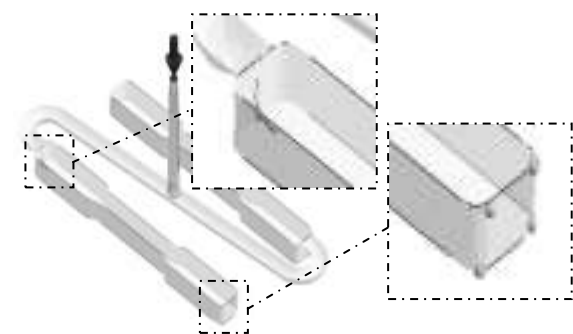
شکل (۱۰): عیوب خط جوش سرد و حبس هوا در

نمونه P-1



شکل (۱۱): عیوب خط جوش سرد و حبس هوا در

نمونه P-2



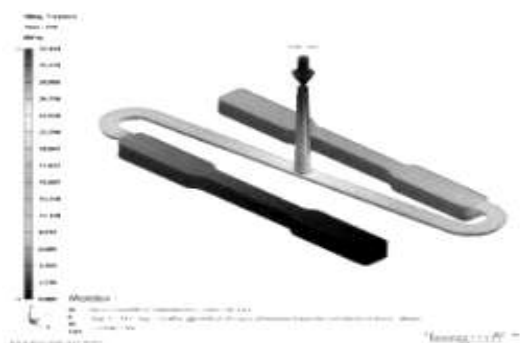
شکل (۱۲): عیوب خط جوش سرد و حبس هوا در

نمونه P-3

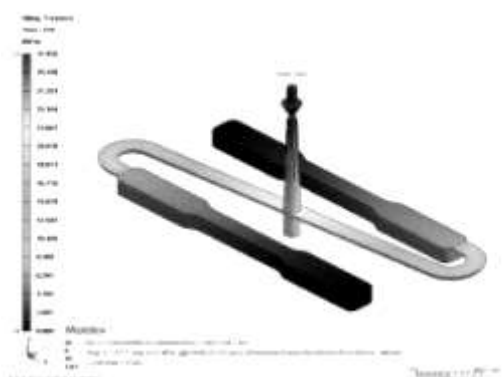
خط جوش سرد در شکل ۱۲، زیر محل تزریق به‌واسطه گرانبوی بسیار زیاد سیال اتفاق افتاده است.

با بررسی‌های انجام‌شده نتیجه گرفته شد که مناسب‌ترین محل راهگاه و گیت ورودی مواد، نمونه نوع P-3 می‌باشد ولی برای حل مشکلات، این طرح نیز نیاز به بهبود دارد.

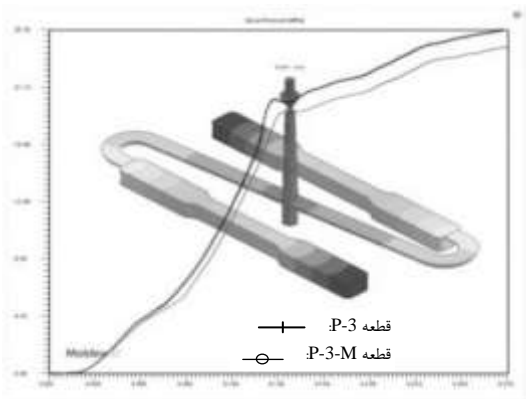
پس از بهینه‌سازی، مقایسه بین شبیه‌سازی قطعه P-3 با دهانه گیت ۱ mm و قطعه P-3-M با دهانه گیت ۱/۵mm انجام شد. شکل ۱۴ اختلاف فشار تزریق بین این دو شبیه‌سازی مشهود است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۴): (الف) فشار تزریق در قطعه P-3 (ب) فشار تزریق در قطعه P-3-M و (ج) مقایسه بین نمودار فشار تزریق/زمان دو قطعه

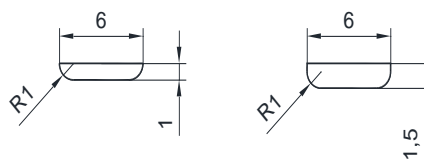
در شکل ۱۵ برطرف شدن مشکل خط جوش سرد در نمونه اصلاح‌شده P-3-M نشان داده شده است.

جدول (۸): مقایسه شبیه‌سازی فشار تزریق بین دو فرایند پلاستیک و پودر فلز

شبیه‌سازی فشار تزریق	
روش قالب‌گیری تزریقی پلاستیک	<p>حداکثر فشار تزریق = ۹/۷ مگاپاسکال</p>
روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز	<p>حداکثر فشار تزریق = ۲۵/۵ مگاپاسکال</p>

اقدامات اصلاحی

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اندازه عرضی گیت ورودی مواد اولیه به داخل حفره، نیاز به بهبود دارد. این بهبود در ابعاد دهانه ورودی گیت بر اساس شکل ۱۳ انجام پذیرفت و طرح جدید P-3-M نام‌گذاری شد.

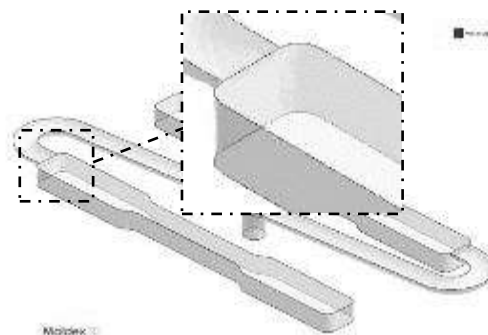
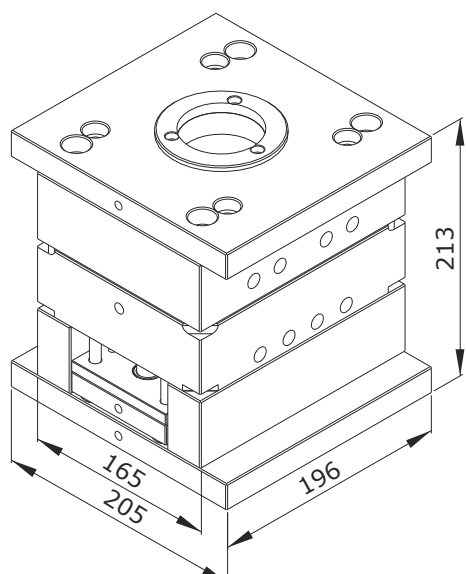


(الف)

(ب)

شکل (۱۳): ابعاد گیت (الف) قدیمی (ب) بهبودیافته (ابعاد به mm)

برای تولید همین قطعه از جنس پلیمر، ابعاد ورودی گیت نوع الف که در شکل ۱۳ نشان داده شده است کفایت می‌کرد.



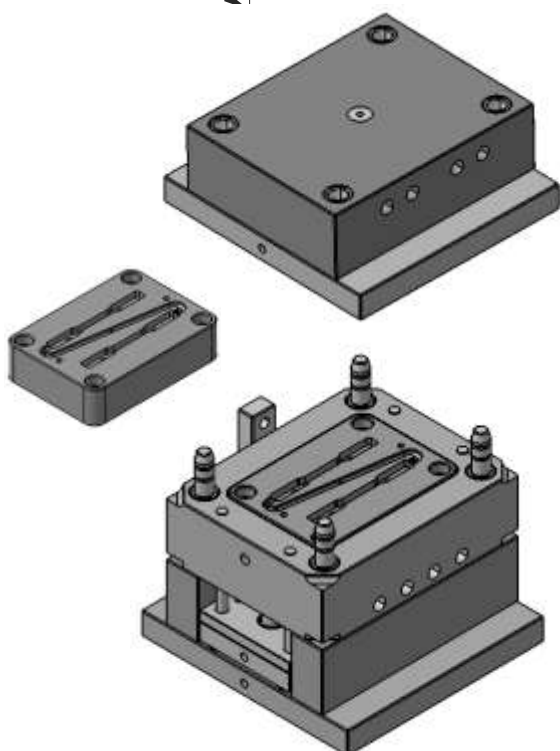
شکل (۱۵): برطرف شدن مشکل خط جوش سرد در نمونه P-3-M

۴- کار تجربی

به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده در شبیه سازی، کار تجربی با طراحی و ساخت قالب و تولید قطعه انجام گردید و مطالعه بر روی قطعه به دست آمده انجام شد.

طراحی و ساخت قالب

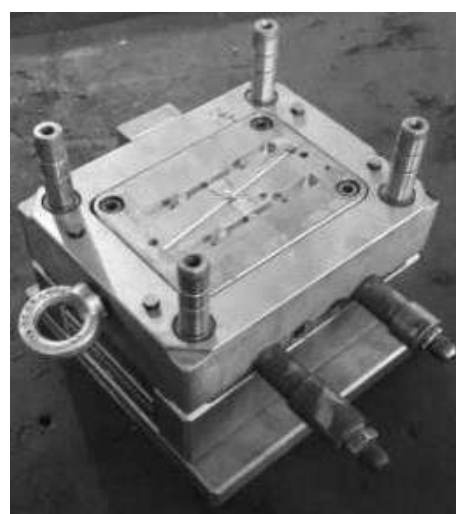
طراحی قالب تزریقی به صورت اینسرتی به منظور کاربرد پهنه بر اساس استاندارد Hasco به شماره K20/156x196x36/1.2767 انجام شد. اینسرت محل حفره در قالب، قابل تعویض در نظر گرفته شد با این ترفند امکان تزریق چندین نمونه با یک بدنه قالب فقط با تعویض اینسرت پیش بینی شد. ساخت اینسرت برای نمونه P-3 انجام شد. در شکل ۱۶، قالب و اینسرت های ساخته شده و در شکل ۱۷ طراحی این قالب و اینسرت ها نشان داده شده است.



شکل (۱۷): طراحی قالب و اینسرت برای نمونه P-3

مواد اولیه

به طور کلی خوراک ها بر اساس دو نوع ترکیب بندی پودر فلز پایه^۱ و پودر فلزی پیش آلیاژی^۲ از یکدیگر متمایز می شوند. در این مقاله از خوراک پودر فلزی پیش آلیاژی فولاد



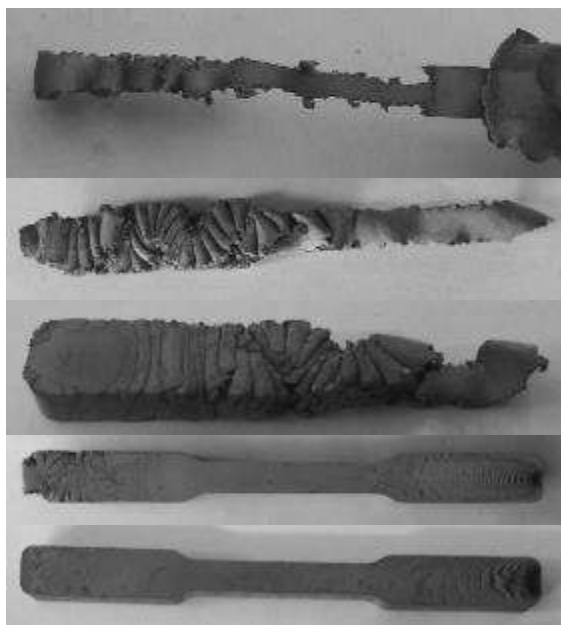
شکل (۱۶): ساخت قالب به همراه اینسرت برای نمونه P-3

^۱ Master Alloy

^۲ Pre-Alloy

۵- نتایج و بحث تجربی

برای درک رفتار متفاوت سیال خوراک در زمان تزریق فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز نسبت به فرایند تزریق پلاستیک، مراحل پرشدن یک نمونه قطعه کامل در شکل ۲۰، نشان داده شده است.



شکل (۲۰): مراحل پرشدن یک نمونه قطعه کامل

مناسب‌ترین شرایط تزریق قطعه نوع P-3 در جدول ۹ نشان داده شده است. زمان‌های تزریق: ۲/۵s ، خنک‌کاری: ۱۰s و زمان فشار نگهداشت ۲s برای تمام نمونه‌ها ثابت تنظیم شد. در جدول ۱۰، اندازه وزن کل، هر یک از قطعه‌ها و مجموعه راه‌گاهی ثبت شده است.

جدول (۹): مناسب‌ترین شرایط تزریق برای نمونه تولیدشده

دمای تزریق (°C)				فشار تزریق (%)			سرعت تزریق (%)		
۲۱۰	۲۰۰	۱۹۵	۱۸۵	۸۰	۱۰۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۶۰

جدول (۱۰): اندازه‌گیری وزن کل، قطعه‌ها و مجموعه راه‌گاهی

نمونه P-3	
۷۶,۲۸	وزن کل قطعه تولیدشده
۲۷,۲۹	وزن هر یک از قطعه‌ها (یکسان)
۲۱,۷	وزن مجموعه راه‌گاهی

زنگ‌زن 316L ساخت شرکت PolyMIM آلمان استفاده شد که در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل (۱۸): خوراک پیش‌آلیاژی فولاد زنگ نزن 316L ساخت شرکت PolyMIM

دستگاه تولیدی

در این مقاله، از دستگاه تزریق مدل Cincinnati- Milacron ۱۲۸ ton استفاده شد. در شکل ۱۹، تصویر دستگاه تزریق نشان داده شده است.

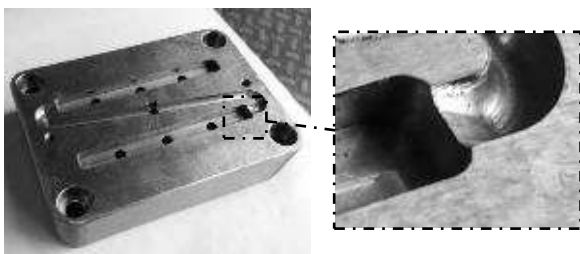


شکل (۱۹): دستگاه تزریق ۱۲۸ ton مدل Cincinnati Milacron

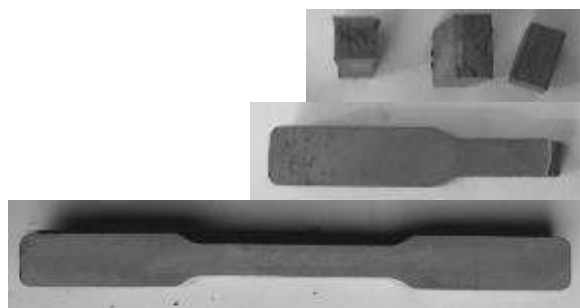
اقدام اصلاحی برای رفع عیب‌های کار تجربی

با توجه به اقدام اصلاحی که باعث برطرف شدن مشکل خط جوش سرد در شبیه‌سازی گردید، برای کار تجربی نیز بر روی قالب اعمال شد. افزایش ۵۰ درصدی دهانه گیت، باعث بهبود کیفیت نمونه تولیدی گردید و مشکل وجود مک و اثر جریان برطرف شد.

در شکل ۲۴، اصلاح دهانه ورودی مواد برای تولید نمونه قطعه P-3-M نشان داده شده است و در شکل ۲۵، برطرف شدن مک در مقطع و اثر جریان نمونه P-3-M نهایی مشهود است.



شکل (۲۴): اصلاح دهانه ورودی مواد برای تولید نمونه قطعه P-3-M



شکل (۲۵): برطرف شدن مک در مقطع و اثر جریان نمونه P-3-M

شرایط مناسب تزریق برای تولید عملی نمونه بهینه‌شده P-3-M در جدول ۱۱ به‌دست آمد.

جدول (۱۱): شرایط بهینه تزریق برای تولید نمونه P-3-M

دمای تزریق (°C)				فشار تزریق (%)			سرعت تزریق (%)		
۴	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱
۲۱۰	۲۰۰	۱۹۵	۱۸۵	۸۰	۱۰۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۶۰

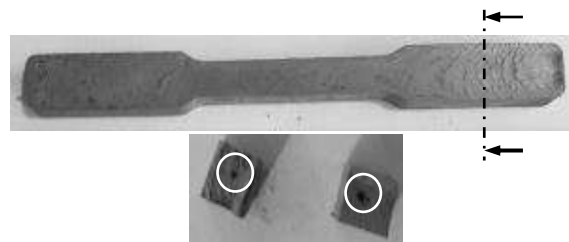
در شکل ۲۱، بهترین نمونه P-3 نشان داده شده است.



شکل (۲۱): بهترین نمونه‌های تولیدشده P-3

مشکل قطعه‌های تولیدشده

در این آزمون، برای بررسی وجود مک، مقطع‌های مختلف بر روی نمونه ایجاد شد. در شکل ۲۲، وجود مک در مقطع‌های نشان داده شده، مشخص می‌باشد. همچنین نمونه از نظر ظاهری دارای اثر جریان^۱ در محل دهانه ورودی مواد تزریق به قطعه می‌باشد که در این ناحیه بیشترین استرس به‌هم‌ریختگی مواد وجود دارد. در شکل ۲۳، اثر جریان در محل دهانه ورودی مواد ورودی خوراک به قطعه نشان داده شده است.



شکل (۲۲): وجود مک بر روی نمونه P-3 در مقطع‌های نشان داده شده



شکل (۲۳): اثر جریان در محل دهانه ورودی مواد

^۱ Flow Mark

8. Ahn, S., Park, S.J., Lee, S., Atre, S. V. and German, R. M., "Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process", Powder. Technol. Vol. 193, No. 2, pp. 162-169, 2009.
9. Miao, L., Xie, P., Zhang, P.P. and Yang, W., "Numerical simulation of differential injection molding based on Moldex 3D", Key. Eng. Mat. Vol. 501, pp. 225-230, 2012.
10. Ilinca, F., Hetu, J.F., Derdoufu, A. and Stevenson, J., "Metal Injection Molding: 3D Modeling of Nonisothermal Filling", Polym. Eng. Scin. Vol. 42, No. 4, pp. 760-770, 2004.
11. Kim, J., Ahn, S., Atre, S.V., Park, S.J., Kang, T.G. and German, R.M., "Imbalance filling of multi-cavity tooling during powder injection molding", Powder. Technol. Vol. 257, pp. 124-131, 2014.
12. Semenov, A.B., Kutsbakh, A.A., Muranov, A.N. and Semenov, B.I., "Development of a Technique to Simulate the Injection Molding of Metallic-Powder-Filled Polymers", Russ. Metall.-Metall-U. Vol. 13, pp. 1351-1356, 2019.
13. Zhou, M., Xiong, X., Drummer, D. and Jiang, B., "Interfacial interaction and joining property of direct injection-molded polymer-metal hybrid structures: A molecular dynamics simulation study" Appl. Surf. Sci. Vol. 478, pp. 680-689, 2019.
14. Trad, M.A.B., Demers, V., Côté, R., Sardarian, M. and Dufresne, L., "Numerical simulation and experimental investigation of mold filling and segregation in low-pressure powder injection molding of metallic feedstock", Adv. Powder. Technol. Vol. 31, No. 3, pp. 1349-1358, 2020.
15. Momeni, V. and Alaei, M.A., "Optimization of Injection Parameters in Metal Injection Molding of 4605 Low Alloy Steel", Modares Mechanical Engineering. Vol. 19, No. 5, pp. 1199-1208, 2019, (In Persian).
16. Askari, A., Alaei, M.A., Nekouee, Kh., Omrani, A.M. and Park, S.J., "The Effect of Debinding and Sintering Parameters on the Mechanical and Microstructural Properties of Fe-2Ni Metal Injection Molded Compacts", Mater. Res. Express. Vol. 6, No. 11, 2019.
17. Askari, A., Alaei, M.A., Omrani, A.M., Nekouee, Kh. And Park, S.J., "Rheological and Thermal Characterization of AISI 4605 Low-Alloy Steel Feedstock for Metal Injection Molding Process", Met. Mater. Int. Vol. 26, pp. 1820-1829, 2019.

۶- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی پر شدن فرایند تزریق روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز با خوراک فولاد زنگ‌نزن 316L نوع PolyMIM با نرم‌افزار Moldex3D انجام گردید. پارامترهای زمان تزریق (۲/۵s)، زمان خنک‌کاری (۱۰s) و زمان فشار نگهداشت (۲s) به‌عنوان ثابت‌های تزریق در نظر گرفته شد.

با افزایش ۵۰ درصدی ابعاد دهانه ورودی مواد در قالب تزریقی مشکل مک و اثر جریان قطعه‌های حاصل از تزریق برطرف شد.

۷- مراجع

1. Manshadi, A.D., Yu, P., Dargusch, M., John D.S. and Qian, M., "Metal injection moulding of surgical tools, biomaterials and medical devices: A review", Powder. Technol. Vol. 364, pp. 189-204, 2020.
2. Vincent, R., "Metal Injection Molding Development: Modeling and Numerical Simulation of Injection with Experimental Validation", Msc. Thesis, Polytechnic School of Montreal, Department of Mechanical Engineering, 2012.
3. Mori, K. and Osakada, K., "Finite element simulation of jetting behaviour in metal injection molding using remeshing scheme", Finite. Elem. Anal. Des. Vol. 25, No. 3-4, pp. 319-330, 1997.
4. Piottter, V., Mueller, K., Plewa, K., Ruprecht, R. and Hausselet, J., "Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding", Microsyst. Technol. Vol. 8, pp. 387-390, 2002.
5. Barriere, T., Gelin, J.C. and Liu, B., "Improving mould design and injection parameters in metal injection moulding by accurate 3D finite element simulation", J. Mater. Process. Tech. Vol. 125-126, pp. 518-524, 2002.
6. Li, Y., Li, L. and Khalil, K.A., "Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels", J. Mater. Process. Tech. Vol. 183, No. 2-3, pp. 432-439, 2007.
7. Zhen-xing, Z., Wei, X., Zhao-yao, Z. and Quan-li, Z., "Numerical simulation of tungsten alloy in powder injection molding process", T. Nonferr. Metal. Soc. Vol. 18, No. 5, pp. 1209-1215, 2008.

