



بررسی قالب‌گیری تزریقی فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵: بهینه‌سازی پارامتریک مرحله تزریق با استفاده از رویه پاسخ سطح (RSM)

سینا رضائی^۱، علی عسکری^{۲*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Ali.askari@kia.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۵ خرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

قالب‌گیری تزریقی پودر فلز

فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵

فیداستوک

چگالی

رویه پاسخ سطح

چکیده

در مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای مؤثر روی مرحله تزریق فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز (MIM) به منظور ساخت یک قطعه صنعتی مورد کاربرد در موتور از جنس فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵-AISI انجام شده است. به منظور کاهش آزمایشات تجربی مورد نیاز و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای مختلف تزریق، از روش آماری سطح پاسخ (RSM) و طرح پنج متغیری Box-Behnken Design (BBD) با فرض یک مدل درجه دوم استفاده شده است. با استفاده از این نرم افزار تعداد ۴۶ آزمایش طراحی گردید. سپس نمونه‌های ساخته شده و چگالی آن‌ها اندازه‌گیری شده است. پس از آن، اهمیت پارامترهای تزریق و همچنین اثر متقابل پارامترها روی یک‌دیگر، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان داده است که دمای تزریق ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت تزریق ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه، فشار نگهداری ۸۳ بار، زمان نگهداری ۹ ثانیه و فشار تزریق ۱۳۲ بار منتج به بیشترین چگالی در قطعه تزریق شده که معادل ۴،۸۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است، شده است. نهایتاً، پس از تولید یک نمونه جدید با استفاده از پارامترهای بهینه قطعه‌ای با چگالی ۴،۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد که مشاهده شد نتایج بسیار نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده بوده است که نشان‌دهنده صحت مدل تقریب زده شده می‌باشد.

Investigating metal injection molding of AISI-4605 low alloy steel feedstock: parametric optimization of the injection stage using RSM technique

Sina Rezaei¹, Ali Askari^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Materials Engineering, Science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

* Corresponding Author's Email: Ali.askari@kia.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 31 January 2024

Accepted: 25 May 2024

Keywords:

Metal Injection Molding

Low Alloy Steel 4605

Feedstock

Density

Response Surface Method (RSM)

Abstract

In the present study, the effective parameters of injection stage of the metal injection molding process (MIM) is investigated in order to make a sound industrial part from the AISI-4605 low-alloy steel. In order to design of experiments and also to optimize different parameters of injection, statistical method of response surface method (RSM) and five-variable Box-Behnken Design (BBD) have been used assuming a quadratic model. Using this software, 46 experiments were designed. Then the samples are made and their density is measured. After that, the importance of the injection parameters as well as the interaction between each parameter have been investigated using analysis of variance (ANOVA). Finally, this research has shown that the injection temperature of 155°C, the injection speed of 80 mm/s, the holding pressure of 83 bar, the holding time of 9 seconds and the injection pressure of 132 bar led to the maximum density of the green body, which is equivalent to 4.892 g/cm². Finally, after producing a new sample using the optimal parameters a piece with a density of 4.9 g/cm² was obtained, and it was observed that the results were very close to the predicted value, which presented the model has good accuracy in prediction..

Please cite this article using:

Rezaei S, Askari A. Investigating metal injection molding of AISI-4605 low alloy steel feedstock: parametric optimization of the injection stage using RSM technique. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 May 21;11(3):13-25. doi: 10.22034/IJME.2024.440630.1926 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

قالب‌گیری تزریقی فلز (MIM) یک فرایند تولید مقرون به صرفه جهت ساخت قطعات با هندسه پیچیده در ابعاد کوچک تا متوسط است [۱]. این فرایند از اختلاط پودر فلزی یا سرامیکی و سیستم چسب برای ساخت فیداستوک، قالب‌گیری تزریقی، چسب‌زدایی و در نهایت تفجوشی تشکیل شده است [۲-۴]. مزیت بزرگ فرایند MIM دستیابی به شکل نهایی محصول در یک مرحله بدون هرگونه عیب است که اگر پارامترهای تولید به دقت تنظیم گردند، منجر به تولید محصولی با دقت ابعادی بالا می‌شود [۳، ۵]. در مرحله اول، مواد اولیه (فیداستوک) به داخل حفره قالب تزریق می‌شوند. در مرحله دوم، سیستم چسب به روش جداسازی حرارتی یا حلالی از قطعه تزریق شده حذف می‌شود. در نهایت، قطعه چسب‌زدایی شده در یک کوره پخته می‌شود [۶-۸]. آنچه در تمامی مراحل فرایند مهم است بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به محصولی با خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب مانند چگالی و استحکام است [۶]. تاکنون تلاش‌های زیادی در زمینه بهینه‌سازی مراحل مختلف فرایند MIM انجام گرفته است. به‌عنوان مثال، تأثیر پارامترهای تزریق روی استحکام و چگالی قطعه تزریق شده در نمونه استاندارد بررسی شده است که نشان می‌دهد دمای قالب حیاتی‌ترین پارامتر برای دستیابی به بهترین کیفیت سطح نمونه است [۴]. همچنین در تحقیق دیگری طیف وسیعی از پارامترهای بهینه برای مرحله تزریق پودر فولاد زنگ‌نزن 316L (SS316L) با استفاده از روش تاگوچی به دست آمده است و مشخص شد که زمان نگهداری تأثیر زیادی بر کیفیت سطح نمونه دارد [۵].

اخیراً استفاده از فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵ در MIM به منظور تولید قطعات استاندارد به طور چشم‌گیری مورد توجه قرار گرفته شده است [۹-۱۱]. آلیاژ ۴۶۰۵ استحکام نسبتاً بالایی را با هزینه تولید معقول ارائه می‌دهد. بیشتر مطالعات روی این آلیاژ بر روی تأثیر سیستم چسب [۱۲]، فرایند آلیاژسازی [۹]، درصد وزنی پودر در تولید فیداستوک [۱۰] و بررسی‌های رئولوژیکی فیداستوک در قالب [۱۱-۱۳] متمرکز شده است. علی‌رغم ویژگی‌های جذاب این آلیاژ، تلاش کمی برای بهینه‌سازی پارامترهای تزریق این آلیاژ هنگام استفاده در MIM انجام شده است. در واقع، مطالعات مربوطه عمدتاً بر روی نمونه‌های استاندارد متمرکز شده‌اند و برای یک قطعه واقعی مهندسی که شرایط ساخت متفاوتی را تجربه می‌کند، انجام نشده است، چرا که در عمل، هندسه قطعه هنگام تولید توسط فرایند MIM نقش بسیار مهمی دارد [۱۴].

قطعات فلزی خمیده با اندازه کوچک از جمله قطعات پرکاربرد در موتورهای صنعتی هستند [۱۵]. یک کاربرد معمولی از این قطعات خمیده فلزی در موتورهای مورد استفاده در صنعت خودرو و هوافضا است [۶]. از نظر ساخت، روش‌های مختلفی برای تولید این قطعات در مقادیر زیاد استفاده می‌شود. MIM یک تکنولوژی امیدوارکننده است که برای طیف وسیعی از آلیاژها مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه ساخت یک قطعه موتور با هندسه نسبتاً پیچیده ساخته شده از آلیاژ ۴۶۰۵ با ضخامت حدود ۱ میلی‌متر را از طریق فرایند MIM مورد بررسی قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است قطعه مذکور قبلاً توسط فرایندهای تولید دیگر که دارای ضایعات ماده اولیه زیادی بوده است، تولید شده است. پارامترهای تزریق کلیدی در فرایند MIM با استفاده از روش رویه پاسخ سطح (RSM) بهینه شده است. طیف وسیعی از پارامترهای تزریق، از جمله فشار، دما و سرعت تزریق بر روی مقدار چگالی قطعه تزریق شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً یک نمونه جدید بر اساس پارامترهای بهینه‌شده به دست آمده از روش RSM ساخته و چگالی آن اندازه‌گیری شده است. همچنین چگالی و سختی نمونه پس از چسب‌زدایی و تفجوشی با مقادیر استاندارد اعلام شده برای MIM-4605 مقایسه شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

ماده اولیه مورد استفاده در این مطالعه، فیداستوک polyPOM 4605 B 341 است که توسط شرکت POLYMIM آلمان تولید شده است. این محصول در واقع فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵ می‌باشد که خواص شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. ذرات پودر در این فیداستوک کاملاً کروی هستند و به‌طور یکنواخت با چسب مخلوط شده‌اند و همچنین توزیع اندازه ذرات در فیداستوک به‌طور مناسب صورت گرفته است که در نتیجه آن خاصیت قالب‌گیری مواد اولیه در مرحله تزریق افزایش می‌یابد و نیز خواص مکانیکی نهایی نمونه بهبود می‌یابد.

۲-۲- روش آزمایش

قطعه مورد نظر که به روش خمکاری فلزی تولید شده است در شکل ۱ نشان داده شده است. هدف این مقاله ساخت این قطعه فلزی از طریق فرایند MIM می باشد. برای این کار از یک قالب دو حفره ای با ضریب افزایش سایز ۱٫۲٪ ساخته استفاده شده شد (این عامل بر اساس مشخصات اعلامی فیداستوک توسط شرکت تولید کننده در نظر گرفته شده است). در این فرایند از دستگاه تزریق HTF60WII HAITIAN ARAS برای فرایند تزریق استفاده شده است. برای محدود کردن تعداد آزمایش‌ها از نرم افزار Design Expert، روش رویه پاسخ سطح (RSM) و بر اساس طرح پنج متغیری (BBD) Box- Behnken Design (BBD) با شش نقطه مرکزی و یک مدل درجه دوم استفاده شده است. پارامترهای تزریق، ورودی‌های RSM را تشکیل می‌دهند (که در واقع پارامترهای تزریق هستند) و در جدول ۲ فهرست شده‌اند.



شکل ۱ محصول مورد نظر که از طریق فرایند MIM ساخته می‌شود (نمونه با یک لایه کروم پوشیده شده است)

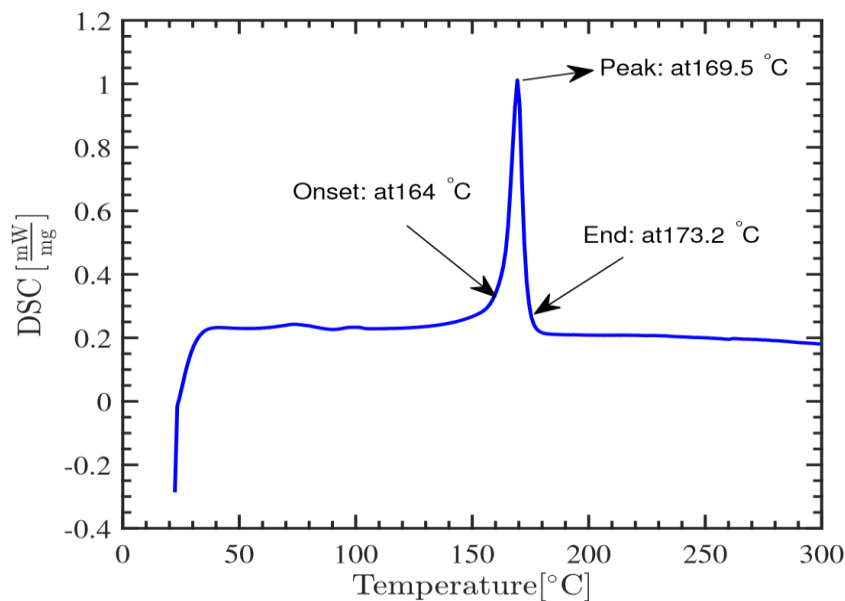
جدول ۱ خواص شیمیایی فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵

عناصر	درصد
آهن	۹۵٫۴ - ۹۷٫۹
نیکل	۱٫۵ - ۲٫۵
مولیبدن	۰٫۲۰ - ۰٫۵۰
سیلیکون	۱٫۰ =>
کربن	۰٫۴۰ - ۰٫۶۰

جدول ۲ سطوح آزمایش‌های طراحی شده

ردیف	متغیر	پارامتر	-۱	۰	+۱
۱	الف	دمای تزریق [°C]	۱۴۰	۱۵۵	۱۷۰
۲	ب	سرعت تزریق [mm/s]	۳۰	۶۰	۹۰
۳	پ	فشار نگهداری [bar]	۸۰	۱۱۰	۱۴۰
۴	ت	زمان نگهداری [s]	۴	۸	۱۲
۵	ث	فشار تزریق [bar]	۹۰	۱۱۵	۱۴۰

با توجه به اینکه فاصله تغییرات ورودی‌ها می‌بایست با دقت انتخاب شوند، برای یافتن فاصله دمای تزریق مناسب، ابتدا از دو آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) و آنالیز رئولوژی استفاده شده است. آنالیز DSC رفتار دمایی فیداستوک را نشان می‌دهد که از آن می‌توان حد بالای دمای تزریق را بدست آورد. دستگاه مورد استفاده DSC DSC200F3Maia با استاندارد ASTM D 3418-15 بوده است. تغییرات داده های DSC اندازه گیری شده به عنوان تابعی از دما برای فیداستوک اولیه در شکل ۲ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دمای ۱۶۴ درجه سانتی‌گراد، ماده اولیه شروع به ذوب شدن می‌کند و در $T=173.2$ درجه سانتی‌گراد در نهایت به پایان نقطه ذوب می‌رسد. تحلیل بعدی، تحلیل رئولوژی است که گامی حیاتی برای مشخص کردن ویسکوزیته مواد اولیه قبل از پرکردن قالب در مرحله تزریق می‌باشد. در قالب‌گیری تزریقی، نرخ برش از ۱۰۰ تا 10000 s^{-1} متغیر است [۱۶]. برای اینکه یک ماده اولیه برای قالب‌گیری تزریقی مناسب باشد، ویسکوزیته لازم در نرخ برشی بالا می‌بایست کمتر از 1000 Pa.s باشد [۱۷]. برای انجام آنالیز رئولوژی از رئومتر موبینگ Instron مدل ۳۲۱۱ استفاده شده است. این تحلیل باعث می‌شود که حاشیه پایین‌تر دمای تزریق را که ویسکوزیته آن در محدوده مناسبی قرار دارد (یعنی $1000 \text{ Pa.s} >$) را تخمین زد. با توجه به تنظیمات دستگاه، قالب با قطر ۰٫۱۲۷ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر برای دستگاه رئومتر انتخاب شده است. نرخ برش دستگاه بین ۱۰ تا 10000 s^{-1} تنظیم شده است و ماده اولیه در دماهای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده است. سایر پارامترهای کلیدی تزریق، از جمله سرعت و فشار تزریق، به همراه زمان نگهداری و فشار، با توجه به مشخصات دستگاه تزریق مشخص شده‌اند.



شکل ۲ گرماسنجی روبشی تفاضلی به عنوان تابعی از دما برای فیداستوک polyPOM 4605 B 341

با دانستن دامنه تغییرات پارامترهای تزریق و با استفاده از نرم افزار Design Expert 11.0.3.0 (STATEASE Inc., Minneapolis, USA) و روش رویه پاسخ سطح (RSM) و الگوریتم BBD طراحی آزمایشات روی خروجی چگالی قطعه خام انجام شده است. با انجام طراحی آزمون، ۴۶ آزمایش مطابق جدول ۳ با توجه به سطوح متغیر آورده شده در جدول ۲ طراحی شده است. سپس، مرحله تزریق این آزمایش‌ها را انجام و چگالی نمونه‌ها را با استفاده از روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد MPF 42 اندازه‌گیری شده‌اند. پس از آن، چگالی قطعات خام به عنوان خروجی در نرم افزار Design Expert بارگذاری شده‌اند تا مقدار بهینه پارامترها را تعیین کنند. در انتها، به منظور صحت‌گذاری نتایج، آزمایش بهینه پیشنهاد داده شده توسط RSM، تزریق و ضمن اندازه‌گیری چگالی، مقدار چگالی آن با مقدار تخمین زده شده توسط طراحی آزمایش‌ها مقایسه شده‌اند؛ سپس چسب‌زدایی و تفجوشی قطعه تزریق شده انجام شده است.

جدول ۳ ۴۶ آزمون با استفاده از روش پاسخ رویه سطح (RSM) به همراه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده چگالی قطعات تزریق شده طراحی شده‌اند

آزمون ها	دمای تزریق [°C]	سرعت تزریق [mm/s]	فشار نگهداری [bar]	زمان نگهداری [s]	فشار تزریق [bar]	چگالی اندازه گیری شده [g/cm3]	چگالی پیش بینی شده [g/cm3]
۱	۱۵۵	۹۰	۱۱۰	۸	۱۴۰	۴٫۶۷	۴٫۷۲
۲	۱۵۵	۹۰	۱۱۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۸۵	۴٫۸۳
۳	۱۷۰	۶۰	۸۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۶	۴٫۷
۴	۱۴۰	۹۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷	۴٫۶۸
۵	۱۵۵	۳۰	۸۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۹	۴٫۷
۶	۱۵۵	۳۰	۱۴۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۶	۴٫۸
۷	۱۵۵	۶۰	۸۰	۸	۹۰	۴٫۳۵	۴٫۳۲
۸	۱۵۵	۶۰	۱۴۰	۴	۱۱۵	۴٫۶۹	۴٫۷۱
۹	۱۷۰	۶۰	۱۱۰	۴	۱۱۵	۴٫۶۵	۴٫۶۷
۱۰	۱۷۰	۶۰	۱۴۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۹	۴٫۶۷
۱۱	۱۵۵	۳۰	۱۱۰	۴	۱۱۵	۴٫۸۱	۴٫۸
۱۲	۱۷۰	۶۰	۱۱۰	۸	۹۰	۴٫۳۵	۴٫۳۲
۱۳	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۱۲	۱۴۰	۴٫۷۲	۴٫۷۵
۱۴	۱۴۰	۶۰	۱۱۰	۴	۱۱۵	۴٫۶۸	۴٫۶۷
۱۵	۱۵۵	۹۰	۱۴۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۴	۴٫۶۶
۱۶	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۴	۹۰	۴٫۳۷	۴٫۳۶
۱۷	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۱۸	۱۵۵	۳۰	۱۱۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۷۲	۴٫۶۹
۱۹	۱۴۰	۶۰	۱۴۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۱	۴٫۶۷
۲۰	۱۷۰	۶۰	۱۱۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۶۷	۴٫۷
۲۱	۱۵۵	۹۰	۸۰	۸	۱۱۵	۴٫۸۳	۴٫۸۲
۲۲	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۲۳	۱۷۰	۳۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۹	۴٫۶۹
۲۴	۱۵۵	۶۰	۸۰	۸	۱۴۰	۴٫۸۹	۴٫۸۲
۲۵	۱۷۰	۶۰	۱۱۰	۸	۱۴۰	۴٫۶۹	۴٫۶۷
۲۶	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۲۷	۱۵۵	۶۰	۱۴۰	۸	۹۰	۴٫۴۲	۴٫۴۴
۲۸	۱۴۰	۶۰	۱۱۰	۸	۱۴۰	۴٫۶۴	۴٫۶۷
۲۹	۱۴۰	۳۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۸	۴٫۶۹
۳۰	۱۴۰	۶۰	۸۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۴	۴٫۷۱
۳۱	۱۵۵	۳۰	۱۱۰	۸	۹۰	۴٫۳۳	۴٫۳۹
۳۲	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۴	۱۴۰	۴٫۷۱	۴٫۷۱
۳۳	۱۵۵	۹۰	۱۱۰	۴	۱۱۵	۴٫۶۴	۴٫۶۴
۳۴	۱۴۰	۶۰	۱۱۰	۸	۹۰	۴٫۳۱	۴٫۳۳
۳۵	۱۷۰	۹۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۶۹	۴٫۶۸
۳۶	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۳۷	۱۵۵	۶۰	۸۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۷۹	۴٫۷۸
۳۸	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۱۲	۹۰	۴٫۴	۴٫۴
۳۹	۱۵۵	۶۰	۱۴۰	۸	۱۴۰	۴٫۶۷	۴٫۶۴
۴۰	۱۵۵	۹۰	۱۱۰	۸	۹۰	۴٫۴	۴٫۳۸
۴۱	۱۴۰	۶۰	۱۱۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۶۸	۴٫۷۱
۴۲	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۴۳	۱۵۵	۶۰	۱۱۰	۸	۱۱۵	۴٫۷۴	۴٫۷۴
۴۴	۱۵۵	۶۰	۸۰	۴	۱۱۵	۴٫۷۵	۴٫۷۴
۴۵	۱۵۵	۶۰	۱۴۰	۱۲	۱۱۵	۴٫۷۵	۴٫۷۴
۴۶	۱۵۵	۳۰	۱۱۰	۸	۱۴۰	۴٫۷۲	۴٫۷۳

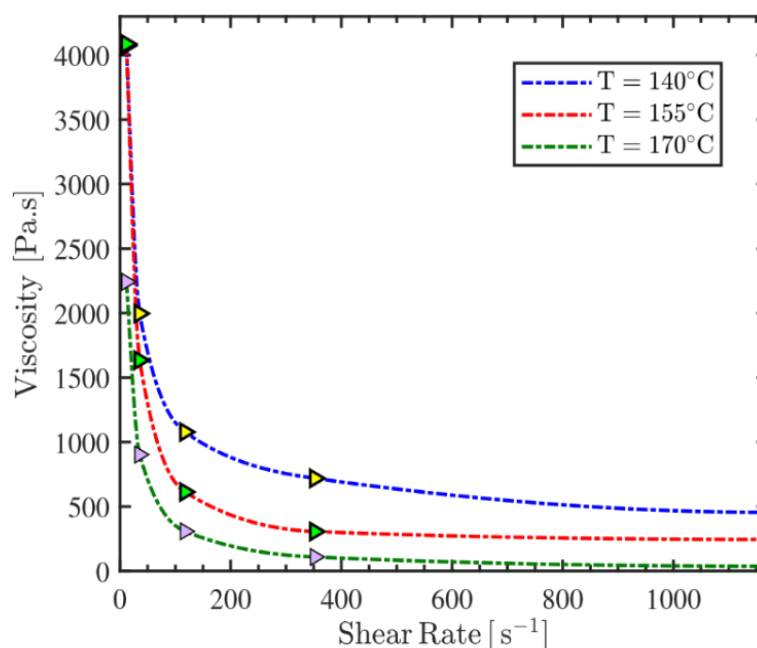
۳- نتایج و بحث

۳-۱- رئولوژی فیداستوک

تجزیه و تحلیل رئولوژی برای اطمینان از جریان ثابت فیداستوک در حین تزریق و پر کردن یکنواخت حفره قالب ضروری است [۱۹]، [۲۰]. با توجه به شکل ۳، ویسکوزیته مواد اولیه با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد که نشان دهنده این است که فیداستوک رفتار شبه پلاستیک دارد [۲۱]. این ویژگی قالب‌گیری تزریقی را تسهیل می‌کند تا انرژی مورد نیاز برای پر کردن حفره کاهش یابد [۲۲]. رابطه بین سرعت برش و ویسکوزیته در یک ماده شبه پلاستیک مطابق معادله ۱ تعریف می‌شود:

$$\eta = k\gamma^{n-1} \quad (1)$$

که در آن η و γ به ترتیب ویسکوزیته و نرخ برش هستند، k یک ثابت و n شاخص جریان است [۲۳]. مقادیر n در جدول ۴ آمده است. لازم به ذکر است که شاخص جریان بالای ۱ نشان می‌دهد که ماده رفتار غیر نیوتونی دارد [۲۴]. علاوه بر این، شاخص جریان نزدیک به ۱ برای فرایند MIM مناسب نیست [۱۱].



شکل ۳ ویسکوزیته نمونه به عنوان تابعی از نرخ برش در دمای ۱۴۰، ۱۵۵ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۴ مقادیر شاخص جریان (n) برای دماهای مختلف تزریق

شاخص جریان	دما (درجه سانتی‌گراد)
۰,۵۳۰۹	۱۴۰
۰,۳۶۶۸	۱۵۵
۰,۱۰۵۰	۱۷۰

۳-۲- بهینه‌سازی آزمایش‌های طراحی شده

همان‌طور که اشاره شده است در جدول ۳ تعداد ۴۶ آزمایش طراحی شده آورده شده است که چگالی اندازه‌گیری شده هر آزمون نیز در این جدول درج شده است. برای بدست آوردن چگالی نهایی قطعه تزریق شده فرمولی ارائه گردیده است که به عنوان تابعی از ورودی‌های RSM با استفاده از الگوریتم BBD استخراج شده است. میزان اثر هر پارامتر بر روی تراکم قطعه نهایی متفاوت است که برای مشخص کردن پارامترهای مؤثر از تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شده است. جدول ۵ داده‌های مربوطه را نشان می‌دهد که در آن مقادیر p نشان می‌دهد که آیا اثر یک پارامتر قابل توجه است یا خیر. به عنوان مثال، عبارات با مقادیر p کمتر از ۰,۱ به عنوان

عبارات اثر گذار شناسایی می‌شوند. در نتیجه، عبارات پ، ت، ث، ب پ، ب ت، پ ث، الف ۲ و ث ۲ به گروه عبارات معنی‌دار تعلق دارند. چگالی نهایی قسمت سبز، پس از حذف عبارات غیر موثر به شکل زیر ساده‌سازی می‌گردد:

$$\text{چگالی} = 0.075 \text{ ب ت} + 0.065 \text{ ب پ} - 0.1737 \text{ ث} + 0.0175 \text{ ت} + 0.0169 \text{ پ} - 0.005 \text{ ب} - 0.0031 \text{ الف} - 4.74 = \text{چگالی} \quad (۲)$$

$$- 0.1884 \text{ ث}^2 - 0.0559 \text{ الف}^2 - 0.0725 \text{ پ ث}$$

در معادله فوق عبارات با علامت مثبت به اثر هم‌افزایی اشاره دارد و علامت منفی اثر متضاد را نشان می‌دهد [۲۵]. چگالی به‌دست آمده با این رابطه به عنوان مقدار پیش‌بینی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که چگالی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای هر آزمایش به خوبی به یک‌دیگر نزدیک هستند که نشان می‌دهد معادله ۲ یک تقریب مناسب برای پیش‌بینی چگالی قسمت سبز است. برای تایید معادله محاسبه چگالی، شاخص R2 که نسبت مجموع مجذورات ناشی از رگرسیون به مجموع مربعات است معیاری مناسب می‌باشد. حداکثر مقدار R، ۱ می‌باشد که بیانگر آن است که تطبیق مناسبی بین مقدار تجربی و پیش‌بینی شده چگالی قطعات تزریق شده وجود دارد [۲۶]. R2 پیش‌بینی شده ۰.۸۶۴۵ و R2 اندازه‌گیری شده ۰.۹۳۹۰ است که تفاوت آن‌ها کمتر از ۰.۲ است که بیانگر آن است که عبارت تقریبی ما برای چگالی قطعه تزریق شده معتبر است. به عبارت دیگر، واریانس خطاها کمتر از خطاهای ناشی از متغیرهای وابسته است. این داده‌ها در جدول ۶ آمده است. اکنون که اعتبار فرمول محاسبه چگالی قطعه تزریق شده، تایید شد، بر اساس معادله ۲ پارامترهای تزریق بهینه برای حدکثر چگالی را بدست می‌آید که در جدول ۷ آورده شده‌اند. بعد از آن، بار دیگر فرایند تزریق با پارامترهای بهینه تکرار شد و چگالی آن به‌دست آمد. برای قطعه مذکور چگالی ۴.۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد که بسیار نزدیک به فیداستوک‌های مبتنی بر آهن است [۱۶].

جدول ۵ تحلیل واریانس ضرایب رگرسیون مدل‌ها

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-مقدار	p-مقدار
مدل	۰.۹۲۹۵	۲۰	۰.۰۴۶۵	۳۵.۶۴	۰.۰۰۰۱
الف-دمای تزریق	۰.۰۰۰۲	۱	۰.۰۰۰۲	۰.۱۱۹۸	۰.۷۳۲۱
سرعت تزریق - ب	۰.۰۰۰۴	۱	۰.۰۰۰۴	۰.۳۰۶۸	۰.۵۸۴۶
فشار نگهداری - پ	۰.۰۰۴۶	۱	۰.۰۰۴۶	۳.۴۹	۰.۰۷۳۳
زمان نگهداری - ت	۰.۰۰۴۹	۱	۰.۰۰۴۹	۳.۷۶	۰.۰۶۳۹
فشار تزریق - ث	۰.۴۸۳	۱	۰.۴۸۳	۳۷۰.۴۷	۰.۰۰۰۱
الف ب	۰.۰۰۱۶	۱	۰.۰۰۱۶	۱.۲۳	۰.۲۷۸۵
الف پ	۰.۰۰۰۴	۱	۰.۰۰۰۴	۰.۳۰۶۸	۰.۵۸۴۶
الف ت	۰.۰۰۰۱	۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۷۶۷	۰.۷۸۴۱
الف ث	.	۱	.	۰.۰۱۹۲	۰.۸۹۱
ب پ	۰.۰۱۶۹	۱	۰.۰۱۶۹	۱۲.۹۶	۰.۰۰۱۴
ب ت	۰.۰۲۲۵	۱	۰.۰۲۲۵	۱۷.۲۶	۰.۰۰۰۳
ب ث	۰.۰۰۳۶	۱	۰.۰۰۳۶	۲.۷۶	۰.۱۰۹۱
پ ت	۰.۰۰۰۱	۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۷۶۷	۰.۷۸۴۱
پ ث	۰.۰۲۱	۱	۰.۰۲۱	۱۶.۱۳	۰.۰۰۰۵
ت ث	۰.۰۰۰۱	۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۷۶۷	۰.۷۸۴۱
الف 2	۰.۰۲۶۴	۱	۰.۰۲۶۴	۲۰.۲۵	۰.۰۰۰۱
ب 2	۰.۰۰۰۱	۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۴۱۸	۰.۸۳۹۶
پ 2	۰.۰۰۰۱	۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۷۴۴	۰.۷۸۷۳
ت 2	۰.۰۶ - ۰.۰۶	۱	۰.۰۶ - ۰.۰۶	۰.۰۰۴۶	۰.۹۴۶۲
ث 2	۰.۳۰۶۸	۱	۰.۳۰۶۸	۲۳۵.۳۲	۰.۰۰۰۱
باقیمانده	۰.۰۳۲۶	۲۵	۰.۰۰۱۳		
کمبود تناسب	۰.۰۳۲۶	۲۰	۰.۰۰۱۶		
خطای محض	.	۵	.		
هسته کل	۰.۹۶۲۱	۴۵			

جدول ۶ مقادیر R2 برای معادله چگالی قطعه تزریق شده

انحراف از معیار	۰/۰۳۶۱	R2	۰/۹۶۶۱
متوسط	۴/۶۶	R^2 تنظیم شده	۰/۹۳۹۰
ضریب تغییرات	۰/۷۷۵۳	R^2 پیش بینی شده	۰/۸۶۴۵
		دقت مناسب	۲۰/۹۴۶۶

جدول ۷ مقادیر پارامتر بهینه برای حداکثر چگالی قطعه تزریق شده

الف	ب	پ	ت	ث	چگالی [g/cm ³]	مطلوبیت
۱۵۵	۸۰	۸۳	۹	۱۳۲	۴/۸۹۲	۱

۳-۳- تأثیر پارامترهای تزریق بر تراکم قطعه تزریق شده

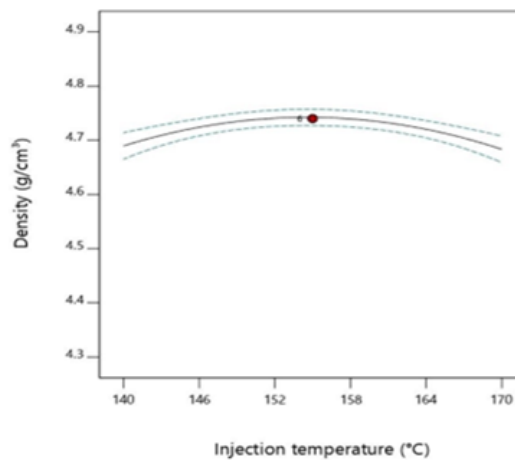
در این بخش تجزیه و تحلیل دقیقی از تأثیر پارامترهای مختلف تزریق بر روی چگالی قطعه تزریق شده ارائه می‌دهد. همان‌طور که برای بهینه کردن پارامترهای بهینه، حداکثر چگالی هدف قرار داده شد، انتظار می‌رفت که تعدادی نقص در برخی آزمون‌ها مشاهده شود. همچنین بر اساس معادله ۲ تعدادی از پارامترها اثر متقابل بر روی یکدیگر دارند که به نقش آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۳-۱- دمای تزریق

شکل ۴-الف نشان می‌دهد که با افزایش دما، مقدار چگالی قطعه تزریق شده به تدریج افزایش یافته است و به ۴,۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده و سپس کاهش یافته است. اما در آزمایش شماره ۱۸ که بر روی نمونه استاندارد آلیاژ ۴۶۰۵ انجام شده اشاره شده است که مقدار چگالی با بالا رفتن دما به طور پیوسته افزایش یافته است. این رفتار را در طیف وسیعی از آزمایش‌ها مشاهده شد. برای مثال در آزمایش شماره ۱۹ جدول ۳ با اینکه دما بر روی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده بود، قطعه دچار پلیسه شد؛ اما در آزمایش شماره ۱۰ که تزریق تحت دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و سایر پارامترها مشابه آزمایش شماره ۱۹ بود انجام شد، مشاهده گردید که قطعه به طور ناقص به دست آمد که در شکل ۴ (ب) آمده است. در آزمایش شماره ۲۷ اشاره شده است که وقتی دمای تزریق حداقل و فشار نگهداری حداکثر باشد قطعه دچار پلیسه می‌گردد که همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، مقدار فشار نگهداری برای آزمایش شماره ۱۹، ۱۴۰ بار بوده است. اما در آزمایش شماره ۱۰ چون دما حداکثر است سرعت حرکت فیداستوک درون قالب بسیار بالا است، مواد با سرعت زیاد به انتهای مجرای قالب می‌رسد و چون ضخامت آن ناحیه بسیار کم است جریان برگشتی در آن ناحیه اتفاق می‌افتد و قطعه به طور ناقص تزریق می‌شود. بنابراین، دمای تزریق تابعی از مواد اولیه، هندسه نمونه و طراحی قالب و مسیر ورود قالب است [۱۴].



ب

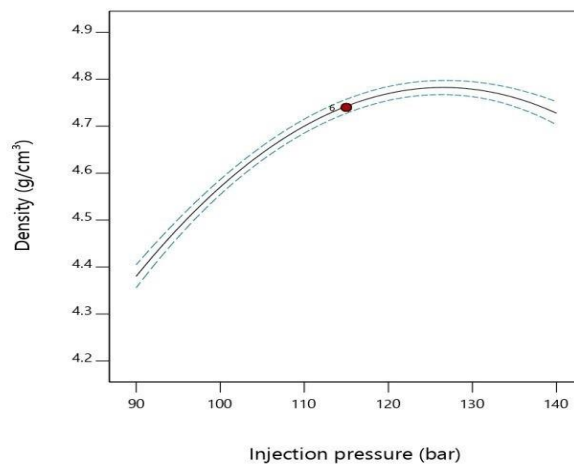


الف

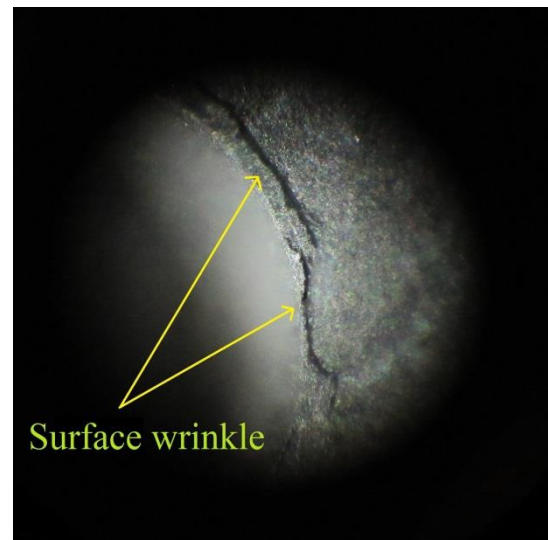
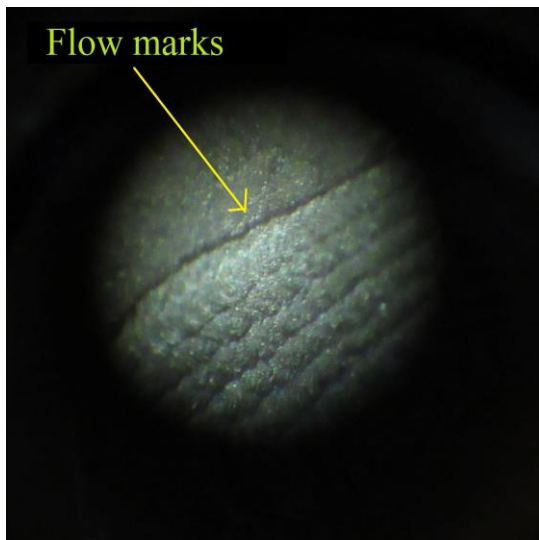
شکل ۴ الف) چگالی قطعه تزریق شده به عنوان تابعی از دمای تزریق. خطوط سبز فاصله اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد. تمام پارامترهای دیگر در مقادیر مرکزی خود هستند. ب) دو ساختار با پر شدگی ناقص و پلیسه. تمام پارامترهای دیگر در مقادیر مرکزی خود هستند.

۳-۳-۲- فشار تزریق

همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است چگالی قطعه با افزایش فشار تزریق ابتدا افزایش یافته و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. رفتار مشابهی برای پودر فولاد زنگ نزن SS316L در آزمایش شماره ۴ گزارش شده است اما برای نمونه استاندارد آلیاژ ۴۶۰۵ در آزمایش شماره ۱۸ مشاهده شده است که مقدار چگالی با افزایش فشار تزریق به طور تدریجی افزایش یافته است. بنابراین، فشار تزریق بالا لزوماً منجر به چگالی بالاتر نمی‌گردد. این نکته را می‌توان با مقایسه آزمایش‌های شماره ۲۵ و ۲۸ در جدول ۳ بهتر درک کرد. در هر دو آزمایش فشار تزریق حداکثر است (یعنی ۱۴۰ بار)، اما آزمایش شماره ۲۸ که دمای تزریق پایین‌تری داشته است، دارای چگالی کمتری بوده است. در همین آزمایش، عیوبی روی سطح قطعه مشاهده شد. زمانی که قطعه در شرایط دمای تزریق پایین و فشار تزریق بالا تولید شود، قطعه دچار عیب جریان مذاب می‌شود [۲۸]. شکل ۶ نشان‌دهنده این عیب است. همچنین این شرایط تزریق منجر به تولید قطعه با چین و چروک‌های سطحی می‌شود [۶]. برای مثال در آزمایش شماره ۳۹ این عیب مشاهده گردید که در شکل ۶ آورده شده است.



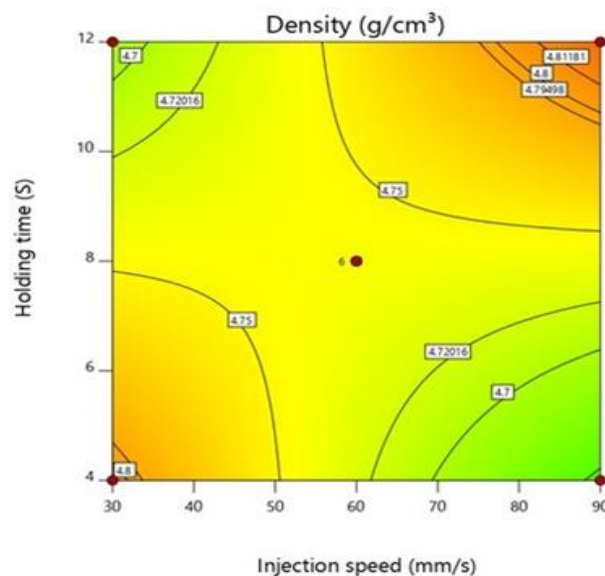
شکل ۵ تغییر چگالی قطعه تزریق شده به عنوان تابعی از فشار تزریق (همه پارامترهای دیگر در مقادیر مرکزی خود هستند)



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از سطح قطعات تزریق شده آزمایش‌های شماره ۲۸ و ۳۹ هنگامی که علائم جریان و چین و چروک سطحی ظاهر می‌شود.

۳-۳-۳- زمان نگهداری

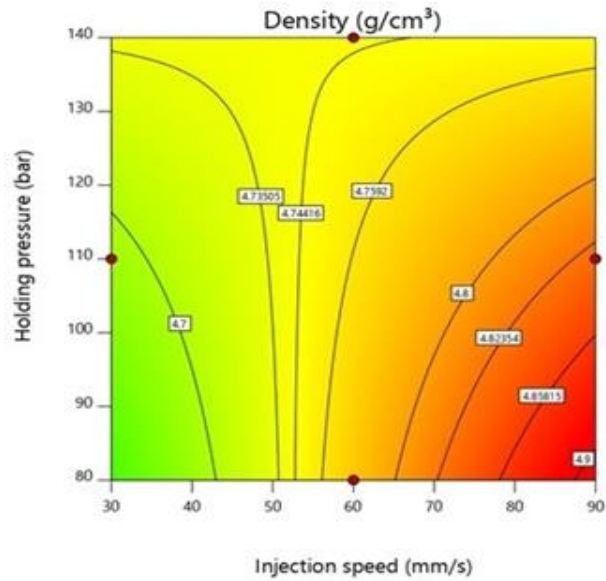
با توجه به مدل‌های آماری استخراج‌شده از ANOVA (یعنی مقادیر P در جدول ۵) تأثیر زمان تزریق ناچیز است و مقدار چگالی با افزایش این پارامتر یک افزایش تدریجی داشته است. زمانی که ماده اولیه تحت فشار در قالب در مدت طولانی‌تری خنک شود قطعه متراکم‌تری به دست می‌آید. آزمایش‌های ۸ و ۴۵ که در آن‌ها فقط زمان نگهداری بین این دو تغییر کرده است، نشان می‌دهد که با افزایش زمان نگهداری چگالی نهایی افزایش یافته است. همچنین زمان نگهداری دارای یک اثر متقابل با سرعت تزریق است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین چگالی زمانی بدست می‌آید که هم سرعت تزریق و هم زمان نگهداری حداکثر باشند. این موضوع به این دلیل است که قبل از اینکه ماده اولیه درون مجرا و حفره قالب سرد شود، حجم بیشتری از مواد اولیه به داخل حفره وارد می‌شود که منجر به نمونه‌ای با تراکم بالاتر می‌گردد. این اثر در آزمایش‌های شماره ۲ و ۱۸ قابل مشاهده است؛ جایی که در آن زمان نگهداری ۱۲ ثانیه بوده اما با افزایش سرعت تزریق از ۳۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ثانیه، چگالی از ۴,۷۲ به ۴,۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافت.



شکل ۷ کانتور چگالی دو پارامتر متقابل سرعت تزریق و زمان نگهداری زمانی که تمام پارامترهای دیگر مقادیر مرکزی خود را می‌گیرند.

۳-۳-۴- سرعت تزریق

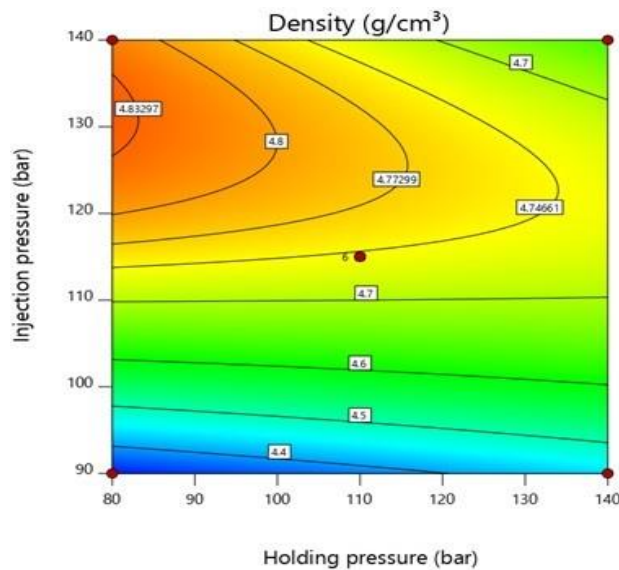
با توجه به مدل‌های آماری استخراج‌شده از ANOVA (یعنی مقادیر P در جدول ۵) تأثیر سرعت تزریق ناچیز است. با این حال، تأثیر متقابل این پارامتر با عوامل دیگر قابل توجه است. به عنوان مثال، اثر متقابل سرعت تزریق و زمان نگهداری بر چگالی قطعه تزریق شده در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخص شد که چگالی زمانی حداکثر خواهد بود که هر دو این پارامتر بالاترین مقادیر خود را داشته باشند. همچنین این پارامتر با فشار نگهداری نیز اثر متقابل دارد. با در نظر گرفتن این موضوع، در شکل ۸ کانتور چگالی به عنوان تابعی از سرعت تزریق و فشار نگهداری با فرض این‌که زمان نگهداری حداکثر باشد (یعنی ۱۲ ثانیه)، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی زمانی حداکثر خواهد بود که فشار نگهداری در کمترین مقدار خود (یعنی ۸۰ بار) و سرعت تزریق حداکثر خود باشد. از این رو می‌توان از ایجاد عیوب مختلف ناشی از انجماد مواد اولیه قبل از پر شدن کامل حفره جلوگیری کرد. برای مثال در آزمایش شماره ۲۱ چگالی ۴,۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب تجربه شد. همچنین در آزمایش شماره ۲۷ اشاره شده است که برای نمونه‌های با ضخامت پایین نیازی به فشار نگهداری بالا نیست.



شکل ۸ کانتور چگالی دو پارامتر متقابل سرعت تزریق و فشار نگهداری در زمان نگهداری روی ۱۲ ثانیه تنظیم شده است و پارامترهای باقیمانده مقادیر مرکزی خود را می‌گیرند.

۳-۳-۵- فشار نگهداری

شکل ۹ اثر متقابل فشار نگهداری و فشار تزریق را بر روی چگالی قطعه نهایی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، چگالی قطعه به تدریج با افزایش فشار نگهداری کاهش می‌یابد و در فشارهای تزریق بالاتر افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که فشار نگهداری با سرعت تزریق نیز تأثیر متقابل دارد که در قسمت قبل توضیح داده شد. به عنوان مثال همان‌طور که در آزمایش‌های شماره ۱۵ و ۲۱ که در آن‌ها فقط فشار نگهداری تغییر کرده و سایر پارامترها بدون تغییر مانده‌اند، می‌توان مشاهده کرد که چگالی قطعه در هنگام افزایش فشار نگهداری از ۴,۸۴ به ۴,۶۳ سانتی‌متر مکعب کاهش یافته است. این روند نزولی تغییرات با نتایج گزارش شده در مطالعات قبلی متفاوت است [۲۹] و این رفتار فیزیکی نشان دهنده تأثیر قابل توجه هندسه نمونه بر روی بهینه‌سازی پارامترهای تزریق و در نهایت چگالی نمونه نهایی است [۱۴].



شکل ۹ کانتور چگالی دو پارامتر متقابل فشار تزریق و فشار نگهداری زمانی که پارامترهای باقی‌مانده مقادیر مرکزی خود را دارند.

۴- نتیجه گیری

این مقاله پارامترهای تزریق بهینه برای ساخت یک قطعه نسبتاً پیچیده ساخته شده از یک فیداستوک از فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵ که اغلب در موتورهای صنعتی استفاده می‌شود را مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش پاسخ رویه سطح و با فرض دمای تزریق، سرعت تزریق، فشار نگهداری، زمان نگهداری و فشار تزریق به عنوان ورودی و با استفاده از الگوی (BBD) Box-Behnken یک مدل درجه دوم برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. پس از ارزیابی معادله چگالی حاصل، مشخص شد که دمای تزریق ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت تزریق ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه، فشار نگهداری ۸۳ بار، مدت زمان نگهداری ۹ ثانیه و فشار تزریق ۱۳۲ بار مقادیر بهینه برای بدست آوردن بالاترین چگالی هستند. سپس بر اساس این شرایط نمونه جدیدی ساخته شد و به چگالی ۴/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسید که نزدیک به مقادیر گزارش شده برای فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵ بوده است.

References

- [1] Husein S, Park JH, Choi DY, Ko YG. Influence of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of Fe-2Ni-2Cu alloy processed by metal injection moulding. *Materials Research Innovations*. 2014 May 1;18(sup2):S2-633. doi: 10.1179/1432891714Z.000000000542
- [2] Huang C, Li L, Ngai T, Zhang W, Ngai S. Effect of sintering temperature and solution treatment on microstructure and mechanical properties of high-N Ni-free austenitic stainless steel prepared by metal injection molding. *InJournal of Physics: Conference Series* 2020 Nov 1 (Vol. 1676, No. 1, p. 012099). IOP Publishing.
- [3] Berginc B, Kampus Z, Sustarsic B. The use of the Taguchi approach to determine the influence of injection-moulding parameters on the properties of green parts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006 Mar;15(1-2):63-70.
- [4] Chua MIH, Sulong AB, Abdullah MF, Muhamad N. Optimization of injection molding and solvent debinding parameters of stainless steel powder (SS316L) based feedstock for metal injection molding. *Sains Malaysiana*. 2013;42(12):1743-50.
- [5] Sulong AB, Muhamad N, Arifin A, Yong KB. Optimizing injection parameter of metal injection molding processes using the feedstock of 16 μm stainless steel powder (SS316L), PEG, PMMA and stearic acid. *Journal of Applied Sciences Research*. 2012;8(6):2998-3003.
- [6] Mohamad Nor NH, Muhamad N, Ismail MH, Jamaludin KR, Ahmad S, Ibrahim MHI. Flow behaviour to determine the defects of green part in metal injection molding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2009;4(1):70-5.
- [7] Virdhian S, Osada T, Kang HG, Tsumori F, Miura H. Evaluation and analysis of distortion of complex shaped Ti-6Al-4V compacts by metal injection molding process. *Key Engineering Materials*. 2012 Sep 19;520:187-94. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.520.187
- [8] Thomas-Vielma P, Cervera A, Levenfeld B, Várez A. Production of alumina parts by powder injection molding with a binder system based on high density polyethylene. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008 Jan 1;28(4):763-71. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.08.004
- [9] Coleman AJ, Murray K, Kearns M, Tingskog TA, Sanford B, Gonzalez E. Processing and properties of MIM AISI 4605 via master alloy routes. *InInternational conference. Powder metallurgy and particulate materials.* - 2012.-32 p 2012.
- [10] Momeni V, Alaei MH, Askari A, Rahimi AH, Nekouee K. Effect of the fraction of steel 4605 powder in the load in injection molding with the use of a polymer-based binder. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020 Mar;61:777-81.
- [11] Momeni V, Askari A, Allaei MH, Zangi H. Investigating the effect of stearic acid on the mechanical, rheological, and microstructural properties of AISI 4605 feedstock for metal injection molding process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021 Sep;74(9):2161-70.
- [12] Askari A, Momeni V. Rheological investigation and injection optimization of Fe-2Ni-2Cu feedstock for metal injection molding process. *Materials Chemistry and Physics*. 2021 Oct 1;271:124926.
- [13] Askari A, Alaei MH, Mehdipoor Omrani A, Nekouee K, Park SJ. Rheological and thermal characterization of AISI 4605 low-alloy steel feedstock for metal injection molding process. *Metals and Materials International*. 2020 Dec;26:1820-9.
- [14] Ebel T. Metal injection molding (MIM) of titanium and titanium alloys. *InHandbook of metal injection molding* 2019 Jan 1 (pp. 431-460). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-102152-1.00023-4
- [15] Omar MA, Subuki I, Abdullah N, Hassan N. Production of medical devices prototype through metal injection moulding technique. *Materials Research Innovations*. 2009 Sep 1;13(3):320-2. doi: 10.1179/143307509X440640

- [16] German RM, Bose A. Injection molding of metals and ceramics. Metal Powder Industries Federation; 1997;413.
- [17] Hossain A, Choudhury IA, Nahar N, Hossain I, Bin Mamat A. Experimental and theoretical investigation of powder-binder mixing mechanism for metal injection molding. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015 Jan 2;30(1):41-6. doi: [10.1080/10426914.2014.930955](https://doi.org/10.1080/10426914.2014.930955)
- [18] Momeni V, Alaei MH. Optimization of injection parameters in metal injection molding of 4605 low alloy steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2019 May 10;19(5):1199-208. [In Persian]
- [19] Amin SY, Muhamad N, Jamaludin KR, Fayyaz A, Yunn HS. Characterization of the feedstock properties of metal injection-molded WC-Co with palm stearin binder system. *Sains Malaysiana*. 2014 Jan 1;43(1):123-8.
- [20] Islam ST, Samanta SK, Lohar AK, Bandyopadhyay A. Rheological study of alumina feedstock for a micro-powder injection moulding application. *Materials Research Express*. 2019 Jul 3;6(9):095204.
- [21] Virdhian S, Doloksaribu M, Supriadi S, Balfas NM, Suharno B, Shieddieque AD. Characterization of 17-4 PH stainless steel metal injection molding feedstock using mixing torque data. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Dec 1 (Vol. 980, No. 1, p. 012053)*. IOP Publishing.
- [22] Machaka R, Ndlangamandla P, Seerane M. Capillary rheological studies of 17-4 PH MIM feedstocks prepared using a custom CSIR binder system. *Powder Technology*. 2018 Feb 15;326:37-43. doi: [10.1016/j.powtec.2017.12.051](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.051)
- [23] Zakaria H, Muhamad N, Sulong AB, Ibrahim MH, Foudzi F. Moldability characteristics of 3 mol% yttria stabilized zirconia feedstock for micro-powder injection molding process. *Sains Malaysiana*. 2014 Jan 1;43(1):129-36.
- [24] Li D, Pan D, Zhang C, Wu W, Lu R, Yang Z. Powder injection moulding of Inconel 713C alloy. *Powder Metallurgy*. 2019 Sep;62(4):240-6. doi: [10.1080/00325899.2019.1637171](https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1637171)
- [25] Sahu JN, Acharya J, Meikap BC. Optimization of production conditions for activated carbons from Tamarind wood by zinc chloride using response surface methodology. *Bioresource technology*. 2010 Mar 1;101(6):1974-82. doi: [10.1016/j.biortech.2009.10.031](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.031)
- [26] Mehdi H, Mishra RS. An experimental analysis and optimization of process parameters of AA6061 and AA7075 welded joint by TIG+ FSP welding using RSM. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022 Jan 2;8(1):598-620. doi: [10.1080/2374068X.2020.1829952](https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1829952)
- [27] Heaney DF, Greene CD. Molding of components in metal injection molding (MIM). In *Handbook of Metal Injection Molding 2019 Jan 1 (pp. 105-127)*. Woodhead Publishing. doi: [10.1016/B978-0-08-102152-1.00008-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102152-1.00008-8)
- [28] Hwang KS. Common defects in metal injection molding (MIM). In *Handbook of Metal Injection Molding 2012 Jan 1 (pp. 253-269)*. Woodhead Publishing. doi: [10.1016/B978-0-08-102152-1.00014-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102152-1.00014-3)
- [29] Momeni V, Zangi H, Alaei MH. Effect of thermal debinding and sintering parameters on the mechanical properties of 4605 MIM compact using the RSM. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022 Jul 3;8(3):3199-214. doi: [10.1080/2374068X.2021.1945807](https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1945807)