

Optimization of Injection Parameters in Metal Injection Molding of 4605 Low Alloy Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Momeni V.¹ MSc,

Alaei M.A.*¹ PhD

How to cite this article

Momeni V, Alaei M.A. Optimization of Injection Parameters in Metal Injection Molding of 4605 Low Alloy Steel. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1199-1208.

ABSTRACT

Metal injection molding (MIM) is a novel process classified in powder metallurgy. This process can produce complex metallic parts with high rate of production and consists of four stages, including mixing, injection, debinding, and sintering, where the properties of the final part highly depends on the parameters of each of these stages. In this study, the parameters of injection pressure, injection and mold temperature, holding pressure, holding time, injection speed, and cooling time on the density, strength, and hardness of the final MIM compact have been investigated. By the design of experiments and response surface methodology (RSM) method, 50 samples have been injected using different parameters. In order to measure the density, tensile strength, and hardness of the samples, the debinding and sintering procedures have been done on the injected samples. The results show that the injection pressure, injection temperature, and mold temperature have the highest effect on the strength and density of the final part, respectively, and on the other hand, holding pressure, holding time, and cooling time have a negligible effect. Within the measured properties, density and strength are more affected by the injection parameters compared to hardness. Finally, the optimum injection parameters for samples made of 4605 low alloy steel include injection pressure of 133 bar, injection temperature of 158°C, mold temperature of 60°C, the holding pressure of 70 bar, holding time of 8 second, injection speed of 112 mm/min, and cooling cycle of 17 second.

Keywords Metal Injection Molding; Injection Parameters; Low Alloy Steel; Mechanical Properties

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Shabanlou Street, Babaei Highway, Lavizan, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 22970274
Fax: +98 (21) 22936578
mhallaee@mut.ac.ir

Article History

Received: October 03, 2018

Accepted: January 05, 2019

ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Influence of feedstock characteristics and process parameters on properties of MIM parts made of 316L [2] Influence of injection moulding and sintering parameters on properties of 316L MIM compact [3] Wear behavior and mechanical performance of metal injection molded Fe-2Ni sintered components [4] Optimizing injection parameter of metal injection molding processes using the feedstock of 16 µm stainless steel powder (SS316L), PEG, PMMA and stearic acid [5] Evolution of stresses in metal injection molding parts during sintering [6] Optimization and evaluation of metal injection molding by using X-ray tomography [7] Interface development and numerical simulation of powder co-injection moulding [8] Effects of surfactant on properties of MIM feedstock [9] Master decomposition curve for binders used in powder injection molding [10] Control the distortion of the large and complex shaped parts by the metal injection molding process [11] Handbook of metal injection molding [12] Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding [13] Parameter optimization of natural hydroxyapatite/SS316L via metal injection molding (MIM) [14] Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powders [15] Pressure analysis of dynamic injection molding and process parameter optimization for reducing warpage of injection molded products [16] Optimization of injection parameters using 16µm stainless steel powder (SS316L) at 63 Vol.%, 63.5 Vol.% and 64 Vol.% powder loading by Taguchi Method for metal injection molding [17] Application of the Grey-Taguchi method to the optimization of Metal Injection Molding (MIM) process [18] Optimization of micro metal injection molding for highest green strength by using Taguchi method

بهینه‌سازی پارامترهای تزریق در فرآیند تزریق پودر فلز (MIM) قطعه فولادی کم‌آلیاژ ۴۶۰۵

وحید مومنی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

محمدحسین علایی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

فرآیند تزریق پودر فلز (MIM) جزء فرآیندهای نوین ساخت و تولید در شاخه متالورژی پودر است. این فرآیند قابلیت تولید قطعات کوچک فلزی با اشکال پیچیده در تیراژهای بالا را دارد که شامل چهار مرحله اختلاط، تزریق، چسب‌زدایی و تف‌جوشی بوده که خواص قطعه تولیدی متأثر از پارامترهای هر کدام از این مراحل است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای فشار تزریق، دمای تزریق و قالب، فشار نگهداری، زمان نگهداری، سرعت تزریق و زمان خنک‌کاری روی چگالی، استحکام و سختی قطعه تولیدی MIM بررسی شده است. سپس با انجام طراحی آزمایش به روش پاسخ رویه سطح (RSM)، تعداد ۵۰ نمونه به حالت‌های مختلف تزریق شده‌اند. در ادامه به‌منظور ارزیابی چگالی، استحکام کششی و سختی نمونه‌ها، فرآیند چسب‌زدایی و تف‌جوشی روی آنها انجام شده است. نتایج نشان دادند که فشار تزریق، دمای تزریق و دمای قالب به‌ترتیب بیشترین تأثیر را روی استحکام و چگالی قطعات MIM داشته و در سمت مقابل پارامترهای فشار نگهداری ماده مذاب، زمان نگهداری و زمان خنک‌کاری اثر ناچیزی دارند. همچنین مشاهده شد که میان این خواص، سختی کمتر از چگالی و استحکام تحت تأثیر پارامترهای تزریق است. در نهایت، بهینه‌ترین حالت برای تزریق نمونه‌ها از جنس فولاد کم‌آلیاژ ۴۶۰۵ با چگالی و استحکام بالا شامل فشار تزریق (۱۳۳ بار)، دمای تزریق (۱۵۸°C)، دمای قالب (۶۰°C)، فشار نگهداری (۷۰ بار)، زمان نگهداری (۸ ثانیه)، سرعت تزریق (۱۱۲ میلی‌متر بر دقیقه) و زمان خنک‌کاری (۱۷ ثانیه) است.

کلیدواژه‌ها: تزریق پودر فلز، پارامترهای تزریق، فولاد کم‌آلیاژ، خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵

* نویسنده مسئول: mhallae@mut.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر (PIM) برای تولید قطعات کوچک با اشکال پیچیده و تیراژ بالا استفاده می‌شود. PIM شامل دو فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز (MIM) و سرامیک (CIM) است. ماده اولیه این فرآیند شامل پودر فلز یا سرامیک و سیستم چسب متشکل از انواع پلیمرها است.

فرآیند MIM شامل چهار مرحله اختلاط، قالب‌گیری تزریقی، چسب‌زدایی و تف‌جوشی است. این فرآیند با اختلاط پودر فلز و سیستم چسب مناسب آغاز می‌شود و به ماده حاصل از آن فیداستوک گفته می‌شود. سیستم چسب مورد استفاده متشکل از یک پلیمر پایه و افزودنی‌های دیگر مانند نرم‌کننده‌ها، پراکنده‌سازها و پایدارکننده‌ها است که هر کدام نقش خاصی را ایفا می‌کنند. پس از آماده‌سازی فیداستوک مناسب، در مرحله بعد، این ماده با استفاده از ماشین قالب‌گیری تزریقی به داخل قالب با شکل مورد نظر تزریق می‌شود که به قطعه خارج‌شده از قالب در این مرحله، قطعه خام گفته می‌شود. بعد از قالب‌گیری تزریقی باید اجزای سیستم چسب به‌طور کامل از قطعه خام خارج شود که این کار با استفاده از یکی از روش‌های گرمایی، حلالی و کاتالستی انجام می‌گیرد. مرحله نهایی فرآیند MIM عملیات تف‌جوشی است که طی آن فضاهای خالی باقیمانده بعد از خروج سیستم چسب از قطعه، حذف و این کار منجر به ایجاد انقباض قابل توجهی در قطعه می‌شود. عملیات تف‌جوشی در یک اتمسفر محافظ یا خلأ در دمای

بالا انجام می‌گیرد. در مرحله تف‌جوشی، ذرات جداشده بعد از چسب‌زدایی به هم متصل می‌شوند و چگالی قطعه تولیدشده در آن افزایش می‌یابد و ممکن است به نزدیک چگالی تئوری برسد.

در این فرآیند، تولید قطعات با خواص نهایی بالا مستلزم دستیابی به قطعات خام با کیفیت مطلوب و عاری از هر گونه عیب است. در مرحله تزریق، پارامترهای تأثیرگذاری شامل فشار تزریق، سرعت تزریق، دمای تزریق، دمای قالب، زمان خنک‌کاری، فشار نگهداری و زمان نگهداری وجود دارد که در صورت بهینه‌نبودن این پارامترها ممکن است عیوب مختلفی در قطعه در حین قالب‌گیری و مراحل بعدی فرآیند ایجاد شود. مطالعات فراوانی در این زمینه انجام شده است که برای مثال می‌توان به مطالعه برگینک و همکاران در سال ۲۰۰۷^[۱] اشاره کرد که تأثیر پارامترهای تزریق را روی خواص قطعات تولیدشده با فرآیند MIM از جنس فولاد زنگ‌زن 316L بررسی کردند. در این مطالعه از طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای بهینه‌سازی پارامترهای تزریق به‌منظور رسیدن به خواص بالا استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از پارامترهای فشار نگهداری ۵۰ بار، دمای قالب ۴۰°C، دمای مذاب ۲۰۰°C و سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌توان به قطعه با خواص بهینه دست یافت. در سال ۲۰۱۱ اثر پارامترهای تزریق روی خواص فیداستوک فولاد زنگ‌زن 316L، حاوی ۵۵٪ پارافین وکس (PW)، ۴۰٪ پلی‌اتیلن چگالی بالا (HDPE) و ۵٪ اسیداستئاریک (SA) توسط هوآنگ و هسو^[۲] مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله تزریق، آنها از دماهای ۱۷۰، ۱۸۰ و ۱۹۰°C، سرعت‌های تزریق ۸، ۱۲، ۲۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، دمای قالب ۴۵°C، زمان خنک‌کاری ۳۰s، فشار نگهداری ۳۴۳ بار برای ۲ ثانیه و سپس ۲۶۴ بار برای یک‌ثانیه استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای تزریق ۱۷۰°C و سرعت تزریق ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه باعث تولید قطعات با کیفیت سطح خوب و بدون عیب می‌شود و با کاهش سرعت تزریق تا ۸ میلی‌متر بر ثانیه، ایجاد عیوبی مانند ترک و پُر نشدن کامل قالب رخ می‌دهد. همچنین با افزایش سرعت تزریق تا ۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، امکان ایجاد پلیسه فراهم می‌شود.

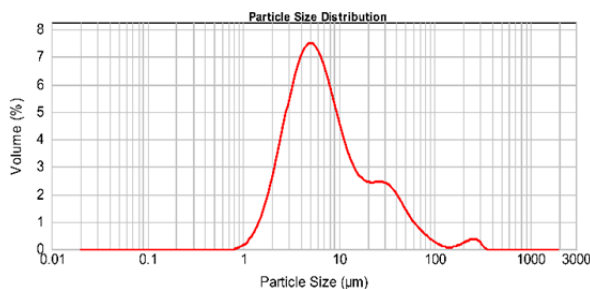
لین در سال ۲۰۱۱^[۳] اقدام به تولید لولای لپ‌تاپ با فرآیند MIM با استفاده از ۵۵٪ پودر Fe-2Ni و سیستم بایندر حاوی ۵۵٪ پارافین وکس، ۲۵٪ پلی‌پروپیلن (PP)، ۱۵٪ کارنابا وکس (CW) و ۵٪ اسیداستئاریک کرد. او دمای تزریق ۱۶۰°C و فشار تزریق ۱۰۰۰ بار را برای قالب‌گیری این قطعه با خواص استحکام و مقاومت به خستگی بالا گزارش کرد.

سولونگ و همکاران^[۴] در سال ۲۰۱۲ به بهینه‌سازی پارامترهای تزریق شامل دمای قالب، دمای تزریق، فشار تزریق و زمان نگهداری فرآیند MIM با هدف دستیابی به کیفیت سطح مطلوب و استحکام بالا در فیداستوک پودر فولاد زنگ‌زن 316L (۶۴٪ حجمی) و سیستم بایندر حاوی ۷۳٪ وزنی پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG)، ۲۵٪ وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA) و ۲٪ وزنی اسیداستئاریک با استفاده از روش تاگوچی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که دمای قالب، بیشتر از پارامترهای دیگر بر استحکام و زمان نگهداری روی کیفیت سطح قطعه تأثیر می‌گذارد.

در مطالعه فنگ و همکاران^[۵] در سال ۲۰۱۵ با موضوع تزریق پودر فولاد زنگ‌زن 316L با میزان بارگذاری ۵۶٪ حجمی به‌همراه بایندر حاوی ۶۹٪ وزنی پارافین وکس، ۳۰٪ وزنی پروپیلن و ۱٪ وزنی اسیداستئاریک مشخص شد که پارامترهای تزریق بهینه برای این کار شامل فشار تزریق ۱۰۰۰ بار، دمای تزریق ۱۷۰°C، سرعت تزریق ۶۰cm³/s و دمای قالب ۶۰°C است. مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۵

به همین دلیل، آزمایش سنجش اندازه ذرات توسط دستگاه مالورن (مدل مسترسایزر ۲۰۰۰) انجام گرفت که نتایج آن در نمودار ۱ مشاهده می‌شود. میانگین اندازه ذرات پودر حدود ۷ میکرون بوده و همچنین دارای توزیع اندازه مناسبی است [10, 11].

انتخاب سیستم چسب مناسب، وابسته به شرایط پودر (جنس، شکل و میزان بارگذاری) است. سیستم چسب در این تحقیق شامل چهار جزء پلی‌پروپیلن به‌عنوان پلیمر پایه، پارافین وکس و کارنابا وکس به‌عنوان بهبوددهنده ویسکوزیته و اسیداستئاریک به‌عنوان فعال‌ساز سطحی بوده که مشخصات آنها در جدول ۱ [12] ارایه شده است.



نمودار ۱) توزیع اندازه ذرات پودر فولاد کم‌آلیاژ ۴۶۰۵

جدول ۱) خواص اجزای سیستم چسب مورد استفاده در این تحقیق [12]

اجزای سیستم چسب	چگالی (g/cm ³)	دمای ذوب (°C)	دمای تجزیه (°C)
پارافین وکس	۰/۹۱	۵۸-۶۰	۱۸-۳۲۰
پلی‌پروپیلن	۰/۹۰	۱۶-۱۶۵	۳۵-۴۷۰
کارنابا وکس	۰/۹۹	۸۳-۹۱	۲۵-۴۴۰
اسیداستئاریک	۰/۸۶	۷-۷۱	۲۶۳-۳۰۶

به‌منظور تولید فیداستوک با توجه به بررسی مطالعات مشابه پیشین، میزان بارگذاری پودر ۶۰٪ حجمی به‌عنوان مقدار مناسب در نظر گرفته شد [8, 9]. سیستم چسب نیز شامل مقدار وزنی ۶۹٪ پارافین وکس، ۲۰٪ پلی‌پروپیلن، ۱۰٪ کارنابا وکس و ۱٪ اسیداستئاریک است [3, 10]. به‌منظور انجام عملیات اختلاط اجزای سیستم چسب و پودر فلز، از مخلوط‌کن اکسترودر ساخت شرکت برابندر در دمای ۱۷۰°C و زمان ۳۰ دقیقه استفاده شده است. اختلاط در اکسترودر بهتر از دیگر روش‌های اختلاط بوده و این امر به‌علت تنش برشی بالایی است که روی ماده در زمان اختلاط ایجاد می‌شود.

در ادامه به‌منظور کاهش تعداد آزمایشات که مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار می‌شود، از روش طراحی آزمایش به شیوه پاسخ رویه سطح (RSM) و ترکیب مرکزی استفاده شده است. همان‌طور که ذکر شد، عملیات تزریق یکی از چهار مرحله فرآیند MIM به شمار می‌رود که طی آن شکل‌دهی قطعه با اندازه بزرگ‌تر انجام می‌شود. اندازه بزرگ‌تر قطعه خام به‌دلیل انقباض آن (۱۴-۱۸٪) در مراحل بعدی MIM (تفجوشی) برای رسیدن به نمونه نهایی است. از این رو انجام صحیح این مرحله، تاثیر مستقیمی روی شکل و خواص قطعه نهایی خواهد داشت. عیوبی که طی این مرحله ممکن است ایجاد شود، عبارت از پلیسه، خط جوش، علایم انقباضی، علایم سوختگی، حفره، پُرشدن ناقص، ترک، چروکیدگی و لایه‌زدایی هستند.

در مرحله تزریق، پارامترهای زیادی وجود دارد که با کنترل دقیق آنها می‌توان به نمونه تزریق بهینه دست یافت [13]. به همین دلیل در این تحقیق، پارامترهای اصلی شامل فشار تزریق، سرعت تزریق، فشار نگهداری، دمای تزریق، زمان نگهداری، دمای قالب و زمان

انجام گرفت که در آن باینگ و همکاران [6] برای تولید قطعه از جنس ترکیب پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و فولاد زنگ‌نزن 316L، بایندر با ترکیب پارافین وکس، پلی‌اتیلن و اسیداستئاریک با نسبت درصد ۱۰:۲۹:۱ به کار برده بودند. در این تحقیق از پارامترهای بهینه فشار تزریق ۱۰۰ بار، سرعت ۵۰ cm³/s و دمای ۱۶۵°C استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای پایین موجب تشکیل حفره و ترک می‌شود، در حالی که افزایش فشار و سرعت تزریق، مقدار حفره‌ها را کاهش می‌دهد.

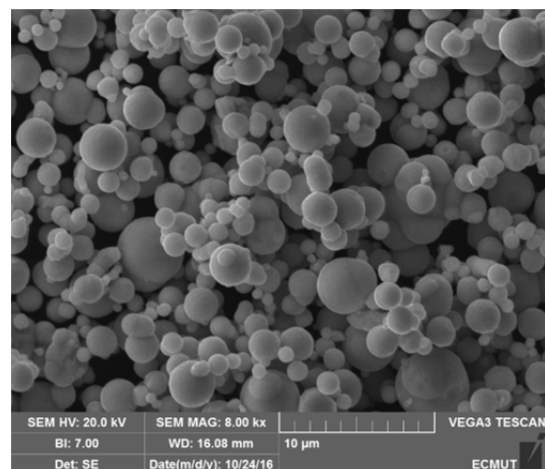
نتایج تجربی رفتار جریان و پُرشدن قالب در فرآیند MIM فولاد زنگ‌نزن 316L و بایندر شامل ۵۵٪ پارافین وکس، ۳۵٪ پلی‌پروپیلن و ۱۰٪ اسیداستئاریک توسط لو و همکاران در سال ۲۰۱۷ [7] انجام گرفت. در این تحقیق، پارامترهای بهینه فشار تزریق ۷۰۰ بار، دمای قالب ۲۵°C، سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، دمای تزریق ۱۷۰°C و زمان تزریق ۳ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت که نتیجه آن قطعه خام با کیفیت سطح بالا و خواص مکانیکی مناسب بود.

۲- شرح مساله

همان‌طور که ذکر شد، پارامترهای تزریق در فرآیند MIM اثر زیادی روی خواص ظاهری، مکانیکی و فیزیکی قطعات خام و نهایی دارند و به همین دلیل، باید بهینه‌سازی این پارامترهای تزریق انجام گیرد. این پارامترها وابستگی بالایی به جنس، شکل پودر و سیستم بایندر به‌کاررفته در فیداستوک دارند. در این تحقیق برای اولین بار بهینه‌سازی پارامترهای قالب‌گیری تزریقی برای فولاد کم‌آلیاژ ۴۶۰۵ مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

پودر مورد استفاده در این تحقیق شامل پودر فولاد کم‌آلیاژ ۴۶۰۵ بوده که توسط شرکت یونیفاین (چین)، به روش اتمیزاسیون گازی تولید شده است. در شکل ۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از این پودر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، شکل ذرات پودر کاملاً کروی است که این امر موجب دستیابی به خواص مکانیکی بالا در قطعات نهایی [6, 7] و بهبود قالب‌گیری قطعات [8, 9] می‌شود.



شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر فولاد کم‌آلیاژ ۴۶۰۵ تولیدشده به روش اتمیزاسیون گازی

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند MIM برای دستیابی به چگالی و خواص مکانیکی بالا، توزیع گسترده ذرات پودر مورد استفاده است.

تزریق نمونه‌ها استفاده شد.

خنک‌کاری در نظر گرفته شده و طراحی آزمایش برای آنها صورت گرفته که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

با توجه به تعداد هفت پارامتر و سه سطح، در کل در روش فاکتوریل کامل نیاز به ۲۱۸۷ آزمایش است که با توجه به محدودیت در مواد، هزینه و زمان با استفاده از نرم‌افزار Design Expert، روش RSM و استفاده از الگوریتم ترکیب مرکزی، چهار حالت آزمایش به تعداد ۴۱، ۵۰، ۸۸ و ۱۵۲ پیشنهاد شد. با بررسی‌های انجام‌شده در نهایت حالت ۵۰ آزمایش انتخاب شد که در جدول ۳ قابل مشاهده است. پس از مشخص شدن حالت‌های مختلف آزمایش، از دستگاه تزریق بتن‌فیلد مدل BA230E برای

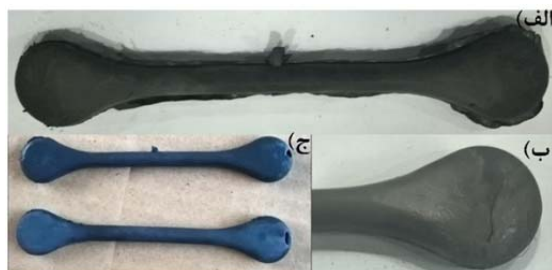
جدول ۲) پارامترهای آزمایش و سطوح آنها

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
فشار تزریق (بار)	۸۰	۱۱۰	۱۴۰
دمای تزریق (°C)	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰
دمای قالب (°C)	۵۰	۶۰	۷۰
فشار نگهداری (بار)	۶۰	۹۰	۱۲۰
زمان نگهداری (ثانیه)	۵	۱۰	۱۵
سرعت تزریق (میلی‌متر بر ثانیه)	۱۰	۸۰	۱۵۰
زمان خنک‌کاری (ثانیه)	۱۰	۲۰	۳۰

جدول ۳) آزمایش‌های طراحی‌شده با روش RSM

آزمایش‌ها	فشار تزریق (بار)	دمای تزریق (°C)	دمای قالب (°C)	فشار نگهداری (بار)	زمان نگهداری (ثانیه)	سرعت تزریق (میلی‌متر بر ثانیه)	زمان خنک‌کاری (ثانیه)
۱	۱۴۰	۱۵۰	۵۰	۶۰	۱۵	۱۰	۳۰
۲	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۵	۸۰	۲۰
۳	۱۱۰	۱۵۰	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۴	۸۰	۱۵۰	۷۰	۱۲۰	۵	۱۵۰	۳۰
۵	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۵	۸۰	۲۰
۶	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۱۰
۷	۸۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۸	۱۱۰	۱۸۰	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۹	۱۴۰	۱۵۰	۷۰	۶۰	۱۵	۱۰	۱۰
۱۰	۱۱۰	۱۶۵	۷۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۱۱	۸۰	۱۸۰	۷۰	۱۲۰	۵	۱۰	۳۰
۱۲	۱۴۰	۱۵۰	۵۰	۱۲۰	۱۵	۱۰	۱۰
۱۳	۱۱۰	۱۶۵	۵۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۱۴	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۱۵	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۱۶	۱۴۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۱۷	۱۴۰	۱۸۰	۵۰	۱۲۰	۵	۱۰	۱۰
۱۸	۸۰	۱۸۰	۷۰	۶۰	۱۵	۱۰	۳۰
۱۹	۱۴۰	۱۵۰	۷۰	۱۲۰	۵	۱۰	۱۰
۲۰	۸۰	۱۸۰	۵۰	۶۰	۵	۱۵۰	۳۰
۲۱	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۲۲	۱۴۰	۱۵۰	۷۰	۱۲۰	۱۵	۱۰	۳۰
۲۳	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۲۴	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۱۰	۲۰
۲۵	۸۰	۱۵۰	۵۰	۱۲۰	۱۵	۱۵۰	۳۰
۲۶	۸۰	۱۸۰	۷۰	۶۰	۱۵	۱۵۰	۱۰
۲۷	۱۴۰	۱۸۰	۷۰	۱۲۰	۱۵	۱۰	۱۰
۲۸	۱۴۰	۱۸۰	۵۰	۱۲۰	۵	۱۵۰	۳۰
۲۹	۸۰	۱۸۰	۵۰	۶۰	۱۵	۱۰	۱۰
۳۰	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۳۱	۸۰	۱۸۰	۵۰	۱۲۰	۱۵	۱۵۰	۱۰
۳۲	۱۴۰	۱۸۰	۷۰	۱۲۰	۱۵	۱۵۰	۳۰
۳۳	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۳۰
۳۴	۸۰	۱۵۰	۵۰	۶۰	۱۵	۱۵۰	۱۰
۳۵	۱۴۰	۱۵۰	۵۰	۶۰	۵	۱۵۰	۳۰
۳۶	۸۰	۱۵۰	۷۰	۱۲۰	۱۵	۱۰	۱۰
۳۷	۱۴۰	۱۸۰	۵۰	۶۰	۵	۱۰	۳۰
۳۸	۱۴۰	۱۸۰	۷۰	۶۰	۵	۱۵۰	۳۰
۳۹	۱۴۰	۱۸۰	۵۰	۶۰	۱۵	۱۵۰	۳۰
۴۰	۸۰	۱۵۰	۵۰	۱۲۰	۵	۱۰	۳۰
۴۱	۱۴۰	۱۵۰	۷۰	۱۲۰	۱۵	۱۵۰	۱۰
۴۲	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۴۳	۸۰	۱۵۰	۷۰	۶۰	۵	۱۵۰	۱۰
۴۴	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۸۰	۲۰
۴۵	۸۰	۱۵۰	۵۰	۱۲۰	۵	۱۵۰	۱۰
۴۶	۸۰	۱۵۰	۷۰	۶۰	۵	۱۰	۳۰
۴۷	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۱۲۰	۱۰	۸۰	۲۰
۴۸	۸۰	۱۸۰	۷۰	۶۰	۵	۱۰	۱۰
۴۹	۱۱۰	۱۶۵	۶۰	۹۰	۱۰	۱۵۰	۲۰
۵۰	۱۴۰	۱۸۰	۵۰	۶۰	۵	۱۵۰	۱۰

Design Expert، رابطه پارامترهای تزریق و خواص مکانیکی به‌طور مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

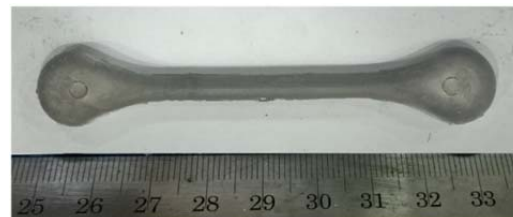


شکل ۳) برخی از عیوب تشکیل شده در قطعات خام

جدول ۴ میانگین خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های ساخته‌شده

شماره آزمایش	میانگین چگالی (g/cm ³)	میانگین استحکام نهایی (MPa)	میانگین سختی (BHR)
۱	۷/۱	۳۹۰	۵۸
۲	۶/۸	۳۶۳	۵۶/۵
۳	۶/۸۵	۳۶۹	۵۶/۵
۴	۶/۸	۳۶۶	۵۶/۵
۵	۶/۸۲	۳۶۷	۵۶
۶	۶/۸۳	۳۶۸	۵۶
۷	۶/۷۸	۳۶۵	۵۶
۸	۶/۸۱	۳۶۷	۵۶
۹	۷	۳۸۶	۵۷
۱۰	۶/۸	۳۶۴	۵۶
۱۱	۶/۵	۳۲۳	۵۶
۱۲	۷/۱	۳۹۲	۵۸
۱۳	۶/۹	۳۷۳	۵۶/۵
۱۴	۶/۸	۳۷۰	۵۶/۵
۱۵	۶/۷۵	۳۶۹	۵۶/۵
۱۶	۷/۱۵	۳۹۴	۵۸/۵
۱۷	۷	۳۸۹	۵۸
۱۸	۶/۴	۳۲۰	۵۶
۱۹	۷/۱	۳۹۰	۵۷
۲۰	۶/۹	۳۷۵	۵۶/۵
۲۱	۶/۷	۳۶۶	۵۶/۵
۲۲	۷/۱۲	۳۹۱	۵۷
۲۳	۶/۸	۳۷۲	۵۶/۵
۲۴	۶/۸	۳۶۴	۵۶
۲۵	۶/۸۵	۳۷۱	۵۷
۲۶	۶/۳	۲۸۶	۵۶/۵
۲۷	۶/۷	۳۸۴	۵۷/۵
۲۸	۷/۱	۳۹۴	۵۸/۵
۲۹	۶/۸	۳۷۰	۵۶
۳۰	۶/۸۵	۳۷۲	۵۶
۳۱	۷	۳۸۰	۵۷
۳۲	۶/۸	۳۹۱	۵۸
۳۳	۶/۸۶	۳۷۳	۵۶
۳۴	۶/۸۶	۳۷۳	۵۷
۳۵	۷/۱	۳۹۳	۵۸
۳۶	۶/۸۴	۳۷۲	۵۷
۳۷	۶/۹	۳۸۸	۵۸
۳۸	۶/۷	۳۸۷	۵۸
۳۹	۷	۳۹۲	۵۸/۵
۴۰	۶/۵	۳۵۷	۵۶
۴۱	۷/۲	۴۰۱	۵۸/۵
۴۲	۶/۸۴	۳۷۱	۵۶
۴۳	۶/۸۵	۳۷۰	۵۷
۴۴	۶/۸۲	۳۷۰	۵۶
۴۵	۶/۸۱	۳۷۱	۵۷
۴۶	۶/۷۸	۳۶۷	۵۶/۵
۴۷	۶/۹۲	۳۷۳	۵۶
۴۸	۶/۷	۳۶۹	۵۶
۴۹	۶/۸۹	۳۷۲	۵۶
۵۰	۶/۹۵	۳۹۰	۵۸/۵

پس از تولید نمونه‌ها، با بررسی مقالات مشابه در زمینه چسب‌زدایی قطعه خام تولیدشده^[14]، چسب‌زدایی آنها انجام گرفت که شامل دو روش حلالی و حرارتی است. ابتدا به‌منظور انجام چسب‌زدایی حلالی، قطعات به‌مدت ۵ ساعت در محلول ان‌هپتان و دمای ۷۰°C قرار داده شدند. در مرحله چسب‌زدایی حلالی، مقدار قابل توجهی از پارافین وکس و اسیداستئاریک از نمونه خارج می‌شود. سپس چسب‌زدایی حرارتی تا دمای ۶۰۰°C در کوره و قبل از عملیات تف‌جوشی انجام گرفت. در نهایت، تف‌جوشی قطعات در دمای ۱۲۵۰°C به مدت دو ساعت، تحت گاز آرگون انجام شده است. در شکل ۲، نمونه تف‌جوشی‌شده آزمایش ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۲) نمونه تف‌جوشی‌شده آزمایش ۸

پس از انجام تف‌جوشی، به‌منظور ارزیابی نمونه‌های تولیدشده، از آزمون‌های کشش، چگالی و سختی استفاده شده است. برای انجام آزمون کشش، از دستگاه سنتام مدل STM-150 طبق استاندارد MPIF50 با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. چگالی یکی از مهم‌ترین خواص ماده خصوصاً در فرآیندهای متالورژی پودر است. برای اندازه‌گیری چگالی قطعات تولیدشده از روش ارشمیدس و به‌منظور بررسی سختی در مقیاس برینل نمونه‌های تولیدشده از دستگاه سختی‌سنج ایسوی استفاده شد. در نهایت، پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آنها با نرم‌افزار Design Expert، نمونه بهینه پیشنهادی ساخته و با نتایج طراحی آزمایش مقایسه شده است.

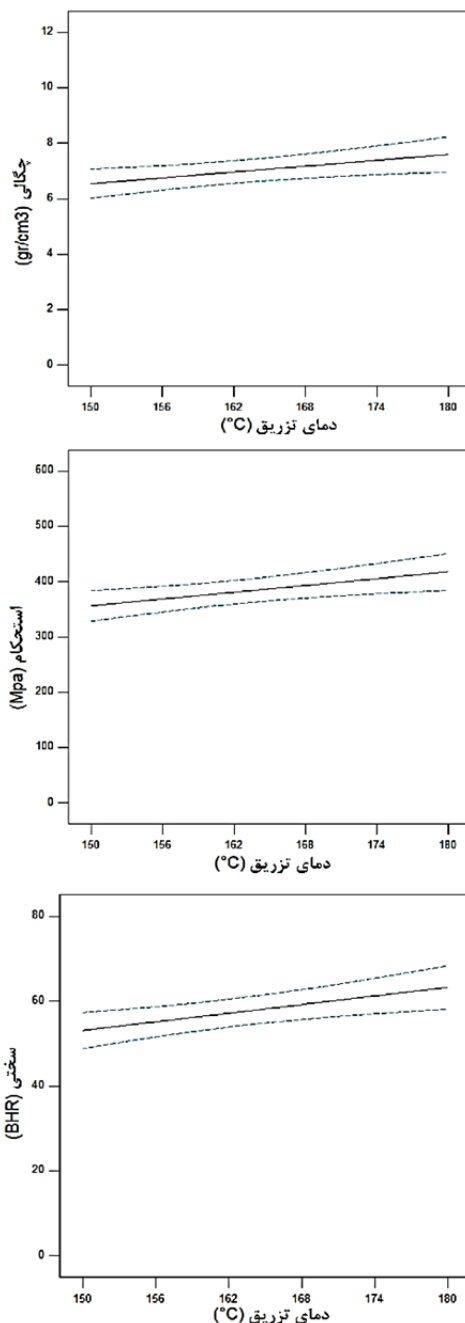
۴- نتایج و بحث

پارامترهای تزریق نامناسب باعث ایجاد عیوبی از قبیل پلیسه، خط جوش، علایم انقباضی، علایم سوختگی، حفره، پُرشدن ناقص، ترک، چروکیدگی و لایه‌زدایی در قطعات می‌شود^[15]. در ادامه به عیوب ایجادشده در برخی از قطعات در این تحقیق اشاره می‌شود. ایجاد پلیسه به‌دلیل فشار تزریق بالا و ویسکوزیته پایین فیداستوک است. راه‌های برطرف‌کردن پلیسه در قطعه عبارت از کاهش فشار تزریق، کاهش دمای تزریق، کاهش فشار نگهداری و کاهش سرعت تزریق هستند. در شکل ۳- الف نمونه شماره ۲۸ همراه با پلیسه نشان داده شده است. البته این عیب روی خواص قطعات اثر منفی ندارد و بیشتر موجب اتلاف مواد و افزایش زمان فرآیند می‌شود. در نمونه شماره ۱ به‌دلیل اینکه دو سمت جریان فیداستوک در حالت سرد به هم می‌رسند، عیب خط جوش تشکیل شده که در شکل ۳- ب قابل مشاهده است. برای جلوگیری از تشکیل خطوط جوش باید سرعت تزریق، دمای قالب و دمای تزریق را افزایش داد. در نمونه‌های ۳۴ و ۴۵ نیز، حبس هوا درون قالب یا رطوبت موجود در پلیمرهای آب‌دوست فیداستوک موجب ایجاد حفره در انتهای قطعات شده است (شکل ۳- ج). نحوه مقابله با این عیوب عبارت از افزایش فشار تزریق، کاهش سرعت تزریق و افزایش دمای قالب است^[11]. برای تمامی آزمون‌ها، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که میانگین این نتایج چگالی، کشش و سختی در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه براساس نتایج به‌دست‌آمده و با استفاده از نرم‌افزار

مکانیکی قطعه نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن فشردگی بیشتر فیداستوک و ذرات پودر در داخل حفره قالب و در نتیجه، بالارفتن چگالی و خواص مکانیکی قطعه است.

۲-۴- رابطه دمای تزریق با خواص مکانیکی قطعه

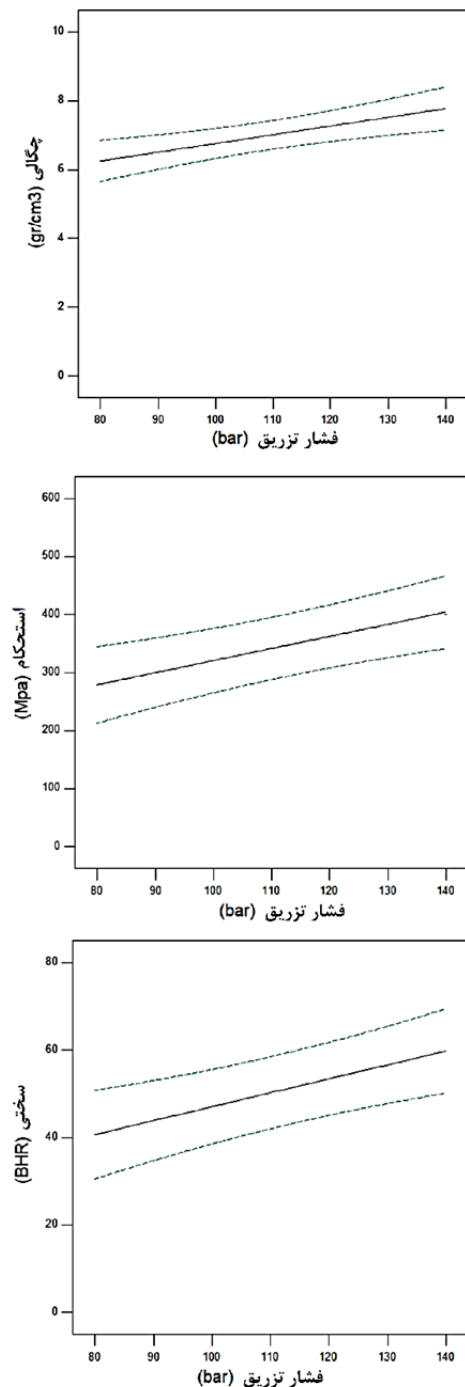
دمای تزریق از دیگر پارامترهای فرآیند تزریق است که دو کران بالا و پایین دارد. کران پایین باید بالاتر از نقطه ذوب فیداستوک و کران بالای آن باید پایین‌تر از دمای تخریب تمامی اجزای فیداستوک باشد. در این میان، هر چه دمای تزریق بالاتر باشد، پُرشدن قالب با فشار کمتری انجام می‌شود. همچنین بالابودن دمای تزریق این امکان را فراهم می‌کند تا فشار نگهداری بیشتری در زمان بیشتری روی قطعه اعمال شود که در نتیجه آن، چگالی قطعه تولیدی بالا می‌رود. با بالارفتن چگالی قطعه خام، چگالی قطعه نهایی نیز بالا می‌رود و خواصی چون استحکام و سختی نیز افزایش می‌یابد (نمودار ۳).



نمودار ۳) رابطه دمای تزریق با خواص مکانیکی

۴-۱- رابطه فشار تزریق با خواص مکانیکی قطعه

همان‌طور که اشاره شد، فشار تزریق از پارامترهای مهم در فرآیند تزریق است که با تنظیم مناسب آن می‌توان از ایجاد عیوب بسیاری جلوگیری کرد. در زمینه فرآیند MIM نیز فشار مناسب تزریق نه تنها باعث پُرشدن کامل قطعه، بلکه موجب افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام، سختی و چگالی می‌شود که در نمودار ۲ قابل مشاهده است. نتایج این تحقیق مشابه مطالعه حکیمی‌چو و همکاران^[16] روی بهینه‌سازی پارامترهای تزریق پودر فولاد زنگ‌نزن 316L بود که در تحقیق آنها نیز با افزایش فشار تزریق، خواص مکانیکی قطعات بهبود یافت.

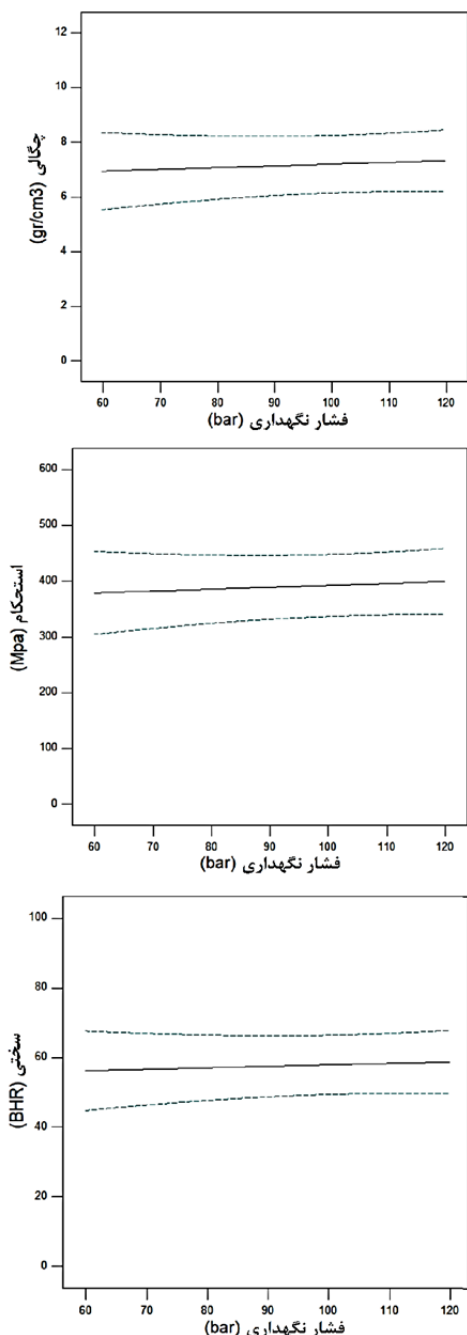


نمودار ۲) رابطه فشار با خواص مکانیکی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار تزریق، خواص

۴-۴- رابطه فشار نگهداری با خواص مکانیکی

فشار نگهداری پشت قالب جزء پارامترهای موثر در تولید قطعه با چگالی بالا در فرآیند تزریق است. در صورتی که فشار نگهداری پایین باشد، ماده با نسبت فشردگی کمتری سرد می‌شود و در نتیجه، چگالی آن نیز کاهش می‌یابد. در زمینه تزریق پودر فلز با توجه به ناچیز بودن میزان تراکم‌پذیری فیداستوک به دلیل درصد بالای پودر فلز، این پارامتر تاثیر چندانی روی خواص مکانیکی قطعه ندارد (نمودار ۵).



نمودار ۵) رابطه فشار نگهداری با خواص مکانیکی

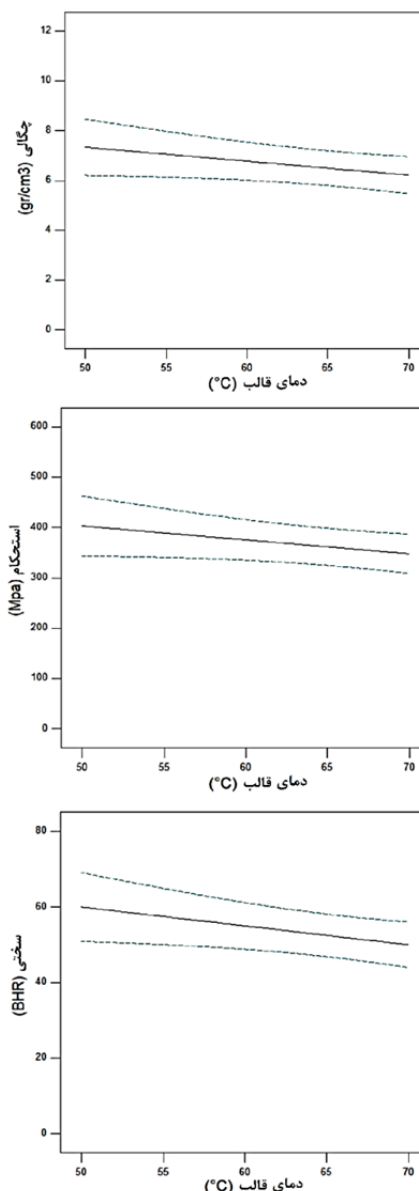
۴-۵- رابطه زمان نگهداری با خواص مکانیکی قطعه

زمان نگهداری و اعمال فشار بر ماده تزریق‌شده تا زمانی اثر قابل توجهی روی خواص مکانیکی قطعه خام دارد که دمای ماده تزریق‌شده، بالای دمای ذوب آن باشد. با توجه به پایین بودن دمای تزریق در فرآیند MIM با هدف دستیابی به چگالی بالا، این پارامتر

در تحقیق انجام‌گرفته توسط حکیمی‌چو/ و همکاران^[16] روی بهینه‌سازی پارامترهای تزریق پودر فولاد زنگ‌نزن با میانگین اندازه ذرات ۱۶ میکرون، دمای تزریق نسبت به فشار تزریق، تاثیر بیشتری روی خواص مکانیکی داشت که می‌تواند به دلیل اندازه ذرات بزرگ‌تر و در نتیجه، اهمیت توزیع مناسب اجزای سیستم چسب بین ذرات پودر باشد.

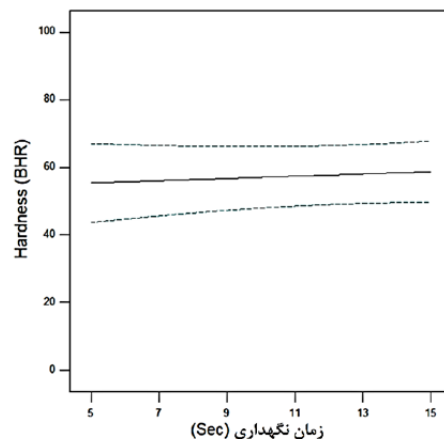
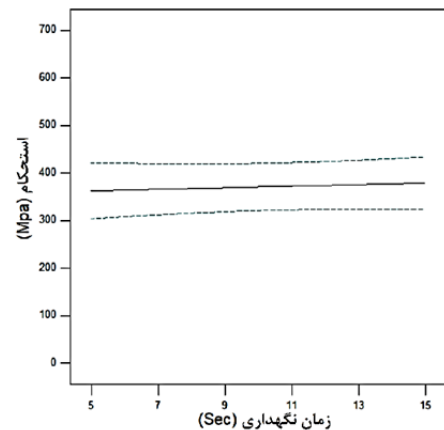
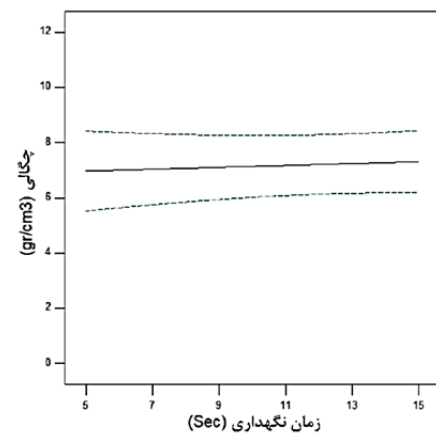
۴-۳- رابطه دمای قالب با خواص مکانیکی

دمای قالب در مواردی که پُرشدن قالب با دما و فشار تزریق بالا امکان‌پذیر نباشد و همچنین برای مواد حساس، جزء پارامترهای تاثیرگذار است. دمای پایین قالب در فرآیند MIM باعث می‌شود تا فیداستوک مذاب با ورود به داخل آن، بلافاصله با افزایش ویسکوزیته همراه شود که در نتیجه آن فشار لازم برای پُرکردن قالب افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش دمای قالب، فیداستوک داخل آن انبساط بیشتری پیدا می‌کند که به دلیل انبساط بالاتر پلیمرها نسبت به پودر فلز در داخل فیداستوک، میزان پودر کمتری به داخل حفره تزریق شده است که این امر باعث افت چگالی قطعه خام می‌شود. با افت چگالی، دیگر خواص مکانیکی نیز کاهش می‌یابد که در نمودار ۴ قابل مشاهده است.



نمودار ۴) رابطه دمای قالب با خواص مکانیکی

در این فرآیند کمتر تأثیرگذار است. در نمودار ۶، تأثیر کم زمان نگهداری بر خواص چگالی، استحکام و سختی قابل مشاهده است. اثرگذاری کم زمان و فشار نگهداری روی خواص مکانیکی قطعات در تحقیقات متعددی نشان داده شده است [17, 18].

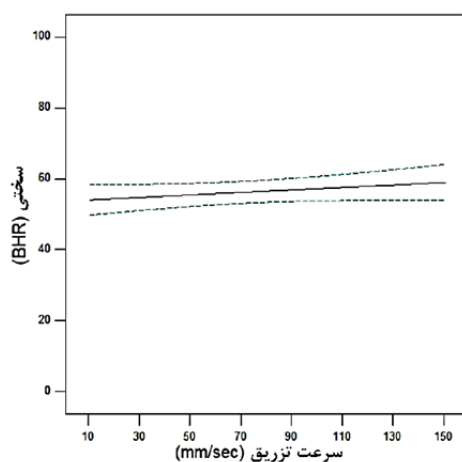
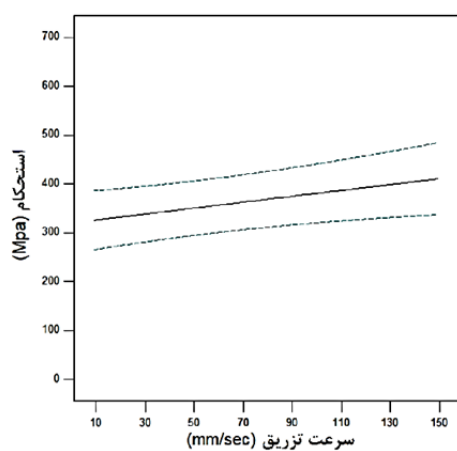
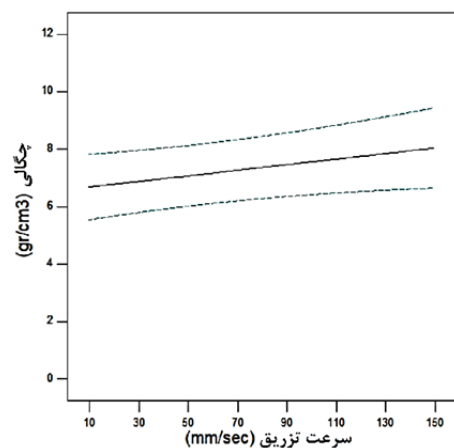


نمودار ۶) اثر زمان نگهداری روی خواص مکانیکی

۴-۶- رابطه سرعت تزریق با خواص مکانیکی قطعه

لازمه اعمال پارامترهایی مانند فشار نگهداری و زمان پُرشدن قالب است. با استفاده از پارامتر سرعت تزریق می‌توان در دمای پایین‌تر، قطعه را تزریق کرد که این امر باعث افزایش چگالی قطعه خام و در نتیجه، خواص مکانیکی قطعه نهایی می‌شود. در نمودار ۷، رابطه سرعت تزریق و خواص مکانیکی نشان داده شده است. سرعت تزریق پایین ممکن است موجب تشکیل عیوب مختلف در قطعه شود که این امر ناشی از سرد شدن فیداستوک قبل از پُرشدن کامل حفره است. البته برخی عیوب شاید به‌گونه‌ای باشد که روی خواص

مکانیکی نمونه استاندارد تست کشش خیلی تأثیرگذار نباشند، ولی به هر حال از نظر ظاهری جزء قطعات معیوب محسوب می‌شوند. از طرف دیگر، عیوبی مانند تشکیل خطوط جریان ممکن است روی ظاهر نمونه خیلی نمایان نباشد، اما موجب کاهش خواص مکانیکی قطعه می‌شود. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، در محدوده سرعت تزریق به‌کاررفته در این تحقیق، افزایش سرعت تزریق باعث بالارفتن خواص مکانیکی قطعه شده و اثر سرعت تزریق بر سختی نمونه‌ها کمتر از اثر آن بر چگالی و استحکام است. نتایج این تحقیق مشابه مطالعه هو/نگ و هسو [2] روی بهینه‌سازی پارامترهای تزریق برای پودر فولاد زنگ‌زن 316L بود که با افزایش سرعت تزریق در این محدوده، خواص مکانیکی قطعات خام و تفجوشی‌شده بهبود یافت.



نمودار ۷) رابطه سرعت تزریق با خواص مکانیکی

آزمایش به نرم‌افزار Design Expert و تعریف اولویت‌های خروجی، چند حالت تزریق توسط نرم‌افزار پیشنهاد شده است که از میان آنها حالت‌های دارای مقدار شرایط مطلوب یک انتخاب شد. در نهایت، ساخت نمونه بهینه با توجه به پارامترهای درج‌شده در جدول ۵ انجام گرفت که نمونه تولیدشده قبل و بعد از آزمون کشش در شکل ۴ قابل مشاهده است. همچنین مقایسه خواص پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار Design Expert و خواص نمونه تولیدشده با پارامترهای بهینه در جدول ۶ ارایه شده است.

جدول ۵) شرایط تزریق بهینه

حالت ۴	شرایط تزریق بهینه
۱۳۳	فشار تزریق (بار)
۱۵۸	دمای تزریق (°C)
۶۰	دمای قالب (°C)
۷۰	فشار نگهداری (بار)
۸	زمان نگهداری (ثانیه)
۱۱۲	سرعت تزریق (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۷	زمان خنک‌کاری (ثانیه)



شکل ۴) نمونه ساخته‌شده با پارامترهای بهینه، قبل و بعد از آزمون کشش

جدول ۶) مقایسه خواص پیش‌بینی‌شده و خواص نمونه تولیدشده با پارامترهای بهینه

خواص	خواص پیش‌بینی‌شده	خواص آزمون تجربی
چگالی (g/cm ³)	۷/۳۵	۷/۴
استحکام نهایی (MPa)	۴۰۴/۴۲	۴۰۴/۱۲
سختی (BHR)	۶۰/۸	۶۰/۱

۴-۹- تحلیل واریانس

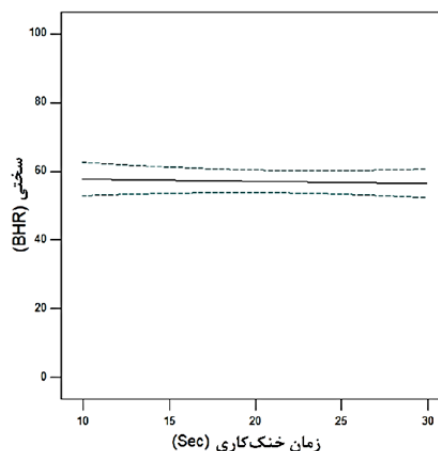
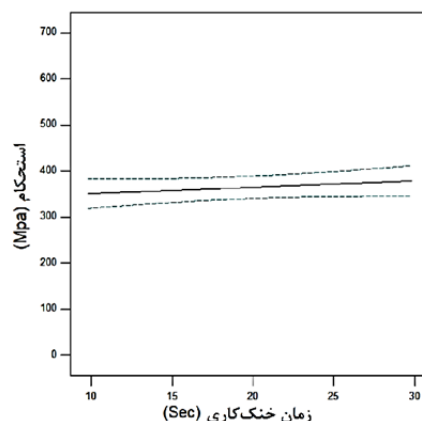
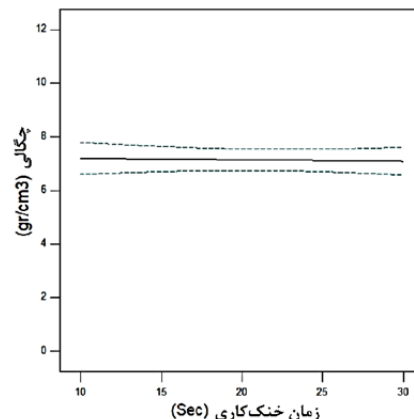
در جدول ۷، نتایج تحلیل واریانس قابل مشاهده است. براساس تحلیل انجام‌گرفته به روش RSM، مدل 2FI مناسب به نظر می‌رسد، به این دلیل که C.V.% آن دارای مقدار مطلوبی است. به‌طور کلی کم‌تر بودن این مقدار نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن مدل است.

جدول ۷) نتایج تحلیل واریانس مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار

2FI	چگالی	استحکام	سختی
C.V.%	۹/۰۹	۸/۸۲	۸/۸۹
Sum of Squares	۱۲۶/۹۲	۳/۹۱۲E+۰۰۵	۸۶۷۳/۶۷
df	۲۸	۲۸	۲۸
Mean Square	۴/۵۳	۱۳۹۷۱/۸۴	۳۰۹/۷۷
F Value	۱۳/۱۸	۱۴/۶۱	۱۳/۷۸
p-value	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
R-Square	۰/۹۴۶۲	۰/۹۵۱۲	۰/۹۴۸۴
Adj R-Square	۰/۸۷۴۴	۰/۸۸۶۰	۰/۸۷۹۵

۴-۷- رابطه زمان خنک‌کاری با خواص مکانیکی قطعه

زمان خنک‌کاری یکی از پارامترهای مهم در فرآیند تزریق است که رابطه مستقیمی با دمای فیداستوک مذاب دارد. اگرچه این پارامتر به‌طور مستقیم روی خواص مکانیکی مانند چگالی، استحکام و سختی تأثیر ندارد، اما کنترل نادرست این پارامتر و خارج‌کردن قطعه قبل از سرد شدن و انقباض کامل آن باعث ایجاد اعوجاج در قطعه می‌شود که این امر می‌تواند موجب کاهش خواص مکانیکی در قطعه شود. با توجه به اینکه در این تحقیق، هندسه قطعه تولیدی شامل نمونه تست کشش است، در دمای خنک‌کاری کم، اعوجاج ایجادشده در قطعه باعث افت در استحکام آن شده است (نمودار ۸).



نمودار ۸) رابطه زمان خنک‌کاری با خواص مکانیکی

۴-۸- پارامترهای بهینه تزریق فیداستوک فولاد ۴۶۰۵

به‌منظور دستیابی به شرایط بهینه تزریق، پس از وارد کردن نتایج

Applied Sciences Research. 2012;8(6):2998-3003.

5- Fang W, He XB, Zhang RJ, Yang SD, Qu XH. Evolution of stresses in metal injection molding parts during sintering. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015;25(2):552-558.

6- Yang Sh, Zhang R, Qu X. Optimization and evaluation of metal injection molding by using X-ray tomography. Materials Characterization. 2015;104:107-115.

7- Lou J, Li Y, He H, Li D, Wang G, Feng J, et al. Interface development and numerical simulation of powder co-injection moulding. Part. I. Experimental results on the flow behaviour and die filling process. Powder Technology. 2017;305:405-410.

8- Li YM, Liu XQ, Luo FH, Yue JL. Effects of surfactant on properties of MIM feedstock. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007;17(1):1-8.

9- Aggarwal G, Park SJ, Smid I, German RM. Master decomposition curve for binders used in powder injection molding. Metallurgical and Materials Transactions A. 2007;38(3):606-614.

10- Hashikawa R, Osada T, Kudo K, Tsumori F, Miura H. Control the distortion of the large and complex shaped parts by the metal injection molding process. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. 2016;63(7):473-478.

11- Heaney DF, editor. Handbook of metal injection molding. Amsterdam: Elsevier Science; 2012.

12- Kong X, Barriere T, Gelin JC. Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding. Journal of Materials Processing Technology. 2012;212(11):2173-2182.

13- Mustafa N, Ibrahim MH, Amin AM, Asmawi R. Parameter optimization of natural hydroxyapatite/SS316L via metal injection molding (MIM). IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2017;165:012015.

14- Özgün Ö, Gülsoy HÖ, Yılmaz R, Fındık F. Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powders. Journal of Alloys and Compounds. 2013;576:140-153.

15- Wang X, Li H, Gu J, Li Z, Ruan Sh, Shen Ch, et al. Pressure analysis of dynamic injection molding and process parameter optimization for reducing warpage of injection molded products. Polymers. 2017;9(3):85.

16- Hakimi Chua MI, Sulong AB, Muhamad N, Abdullah MF, Che Haron CH. Optimization of injection parameters using 16µm stainless steel powder (SS316L) at 63 Vol.%, 63.5 Vol.% and 64 Vol.% powder loading by Taguchi Method for metal injection molding. Key Engineering Materials. 2011;471-472:558-562.

17- Jamaludin KR, Muhamad N, Rahman MN, Ahmad S, Ibrahim MH, Nor NH, et al. Application of the Grey-Taguchi method to the optimization of Metal Injection Molding (MIM) process. Key Engineering Materials. 2010;443:63-68.

18- Ibrahim MHI, Muhamad N, Sulong AB, Ahmad S, Nor NHM. Optimization of micro metal injection molding for highest green strength by using Taguchi method. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2010;5(2):282-289.

با توجه به اینکه مقدار p مدل ارایه شده کمتر از ۰/۰۵ است، در نتیجه می توان گفت که نتایج به دست آمده دقت خوبی دارند. به طور کلی، باید اختلاف بین دو مقدار R-Square و Adj R-Square کمتر از ۲ باشد و هر چه این مقدار کمتر باشد، مدل پیشنهاد شده مناسب تر است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر 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 رابطه ای 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. در این تحقیق، اثرگذاری دمای تزریق کمتر از فشار تزریق بوده است. همچنین فشار و زمان نگهداری اثر چندانی روی خواص قطعات ندارند و تنها فشار نگهداری به میزان خیلی کمی موجب بهبود چگالی و استحکام می شود. افزایش زمان خنک کاری روی چگالی و سختی تاثیرگذار نیست، ولی به میزان کم موجب افزایش استحکام می شود. در نهایت، شرایط بهینه برای تزریق فیداستوک شامل پودر فولاد کم آلیاژ ۴۶۰۵ شامل فشار تزریق ۱۳۳ بار، دمای تزریق ۱۵۸۰°C، دمای قالب ۶۰۰°C، فشار نگهداری ۷۰ بار، زمان نگهداری ۸ ثانیه، سرعت تزریق ۱۱۲ میلی متر بر ثانیه و زمان خنک کاری ۱۷ ثانیه است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این تحقیق برای اولین بار انجام گرفت و نمونه آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافی در این تحقیق وجود ندارد و حقوق همه افراد در نظر گرفته شده است.

سهم نویسندگان: وحید مومنی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)، محمدحسین علائی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Berginc B, Kampus Z, Sustarsic B. Influence of feedstock characteristics and process parameters on properties of MIM parts made of 316L. Powder Metallurgy. 2007;50(2):172-183.
- 2- Huang MS, Hsu HC. Influence of injection moulding and sintering parameters on properties of 316L MIM compact. Powder Metallurgy. 2011;54(3):299-307.
- 3- Lin KH. Wear behavior and mechanical performance of metal injection molded Fe-2Ni sintered components. Materials and Design. 2011;32(3):1273-1282.
- 4- 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