

رفع عیوب سوختگی و پرنشیدن قالب با کاهش نیروی گیره‌بندی در فرایند تولید بوشن ۶۳ به روش عددی و آماری

علی جعفرزاده^۱، قاسم اعظمی‌راد^{۲*}، رؤیا سلطانی^۳، علیرضا مولایی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، alijafarzadeh1996@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، azamirad@yazd.ac.ir

۳- کارشناس ارشد بخش کنترل کیفیت و آزمایشگاه، شرکت تولیدی صنایع یزد پولیکا، royasoltani2012@yahoo.com

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی دانمارک، کپنهاگ، دانمارک، Almoa@dtu.com

چکیده

فرایند تزریق پلاستیک به دلیل هزینه کم و کارایی بالا برای تولید انبوه قطعات پیچیده کاربردی است. در این فرایند، عیوب سوختگی و پرنشیدن قالب در قطعه تولیدشده، اولین عامل اثرگذار در رد شدن یا قبول آن از نظر اپراتور است. در این پژوهش، قطعه بوشن ۶۳ از جنس یوپی‌وی‌سی، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده، رویکردی کم‌هزینه و جایگزین انجام تجربی فرایند برای تعیین مقادیر بهینه است. پارامترهای فرایندی قابل‌تغییر بر روی دستگاه تزریق به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. از روش غربالگری داده، پارامترهای مؤثر بر فرایند شناسایی شد. سپس از روش سطح پاسخ و تحلیل واریانس به ترتیب معادله رگرسیون دقیق‌تر برای پاسخها و مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای رفع عیوب مدنظر با کمترین مقدار نیروی گیره‌بندی موردنیاز به‌دست‌آمده است. در نهایت مشخص شد، مقادیر خروجی پیش‌بینی‌شده به روش طراحی مرکب مرکزی، میانگین خطای ۰۳٪ با نتایج شبیه‌سازی دارند و در نتیجه، دقت پژوهش انجام شده را تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی فرایند تزریق پلاستیک، عیب سوختن، عیب پرنشیدن قالب، نیروی گیره‌بندی، تحلیل آماری.

Fixing the Defects of Burn mark and Short shot by Reducing the Clamping Force in the Production Process of Bushing 63 by Numerical and Statistical Methods

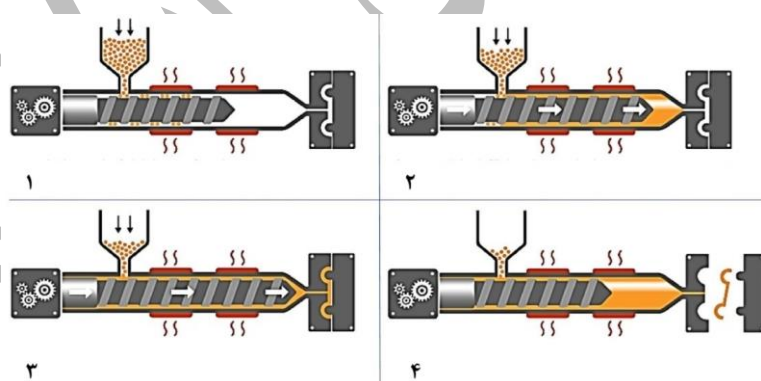
ABSTRACT

The plastic injection process is useful for the mass production of complex parts due to its low cost and high efficiency. In this process, burn mark and short shot in the produced part are the first effective factors in rejecting or accepting it from the operator's point of view. In this research, bushing 63 piece made of UPVC has been investigated. Validated simulation is a low-cost alternative to experimentally performing the process to determine optimal values. Process parameters that can be changed on the injection machine are considered as input parameters. From the data screening method, the parameters affecting the process are identified. By the response surface method and variance analysis, respectively, to fix the considered defects with the minimum amount of clamping force required. Finally, the predicted output values from the CCD method, when compared with the simulation results, showed an average error of 6.03%, and as a result, it confirms the accuracy of the conducted research.

KEYWORDS

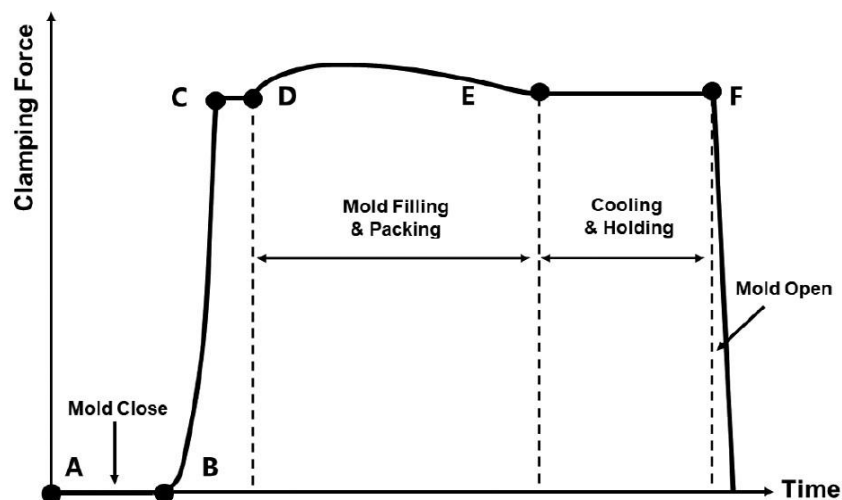
Simulation of plastic injection process, Burn mark defect, Short shot defect, Clamping force, Statistical analysis.

قالب‌گیری تزریقی، روشی مناسب و پرکاربرد برای تولید قطعات پلیمری است به طوری که ۳۲٪ از تولید قطعات پلاستیکی را به خود اختصاص داده است. محصولات پلاستیکی چندین مزیت قابل توجه مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا و فرایندپذیری آسان‌تر در برابر فلزات دارند. در فرایند تزریق پلاستیک مطابق با «شکل ۱»، ابتدا مواد پلیمری به شکل گرانول در سیلندر^۱ مجهز به المنت‌های حرارتی ریخته می‌شوند تا گرم شده و به دمای مذاب برسند. سپس، گرانول‌ها به دلیل سایش با یکدیگر و تماس با سیلندر و ماردون به شکل خمیری درآمده و دمای آنها بالا می‌رود. مواد با حرکت چرخشی ماردون^۲ مخلوط می‌شوند و به سمت جلوی سیلندر پیش می‌روند و سپس مواد با نیروی ماردون به داخل قالب تزریق می‌شوند. پس از زمان سیکل خنک‌کاری، قالب باز شده و به کمک پین‌های پران، قطعه از قالب جدا می‌شود [1]. یکی از عوامل اساسی در انتخاب دستگاه ماشین تزریق، مقدار نیروی گیربندی است و وظیفه آن بسته نگه‌داشتن دونیمه قالب و تحمل فشار هنگام تزریق است و کم‌بودن آن منجر به بهره‌وری بالا و کاهش هزینه می‌شود. همان‌طور که در «شکل ۲» نشان داده شده است، از نقاط A تا B نشان‌دهنده مرحله آماده‌سازی است که در آن قسمت‌های قالب توسط واحد گیربندی بسته می‌شوند و بستن نیمه‌های قالب باعث افزایش نیروی گیربندی می‌شود و این مرحله در نقطه D تکمیل می‌شود [2]. پس از آن، مراحل پرکردن و نگهداری^۳ قالب شروع می‌شود. نیروی گیربندی با توجه به مدت زمان تزریق به مقدار حداکثر خود نزدیک می‌شود و نقطه اوج آن به دلیل رسیدن فشار تزریق به حداکثر مقدار تنظیم شده بر روی دستگاه است. سپس مرحله نگهداری تا زمان منجمد شدن دریاچه برای جبران انقباض ادامه می‌یابد و دیگر مذاب به داخل حفره قالب جریان پیدا نمی‌کند. در نقطه E، مذاب جامد شده و نیروی گیربندی به پایداری می‌رسد و در نهایت نقطه F، اتمام مرحله خنک‌کاری و نگهداری را نشان می‌دهد [3,4]. «شکل ۳» نشان می‌دهد که این نیرو از تغییر شکل الاستیک میله‌های مهار^۴ ایجاد می‌شود [5]. برای افزایش کارایی و داشتن کیفیت محصول ثابت، حذف عیوب مختلف در قطعه تولیدی مانند تاب برداشتن^۵، استحکام پایین خط جوش^۶ و علائم فرورفتگی موضعی^۷ حائز اهمیت است، اما عیوب پرنسندن قالب^۸ و سوختن^۹، متداول‌ترین عیوب در اتصالات از جنس یوپی‌وی‌سی هستند. ارزیابی این عیوب در فرایند قالب‌گیری تزریقی بسیار پیچیده است و عیب سوختن در تولید قطعات جدار نازک بیشتر اتفاق می‌افتد [6,7].

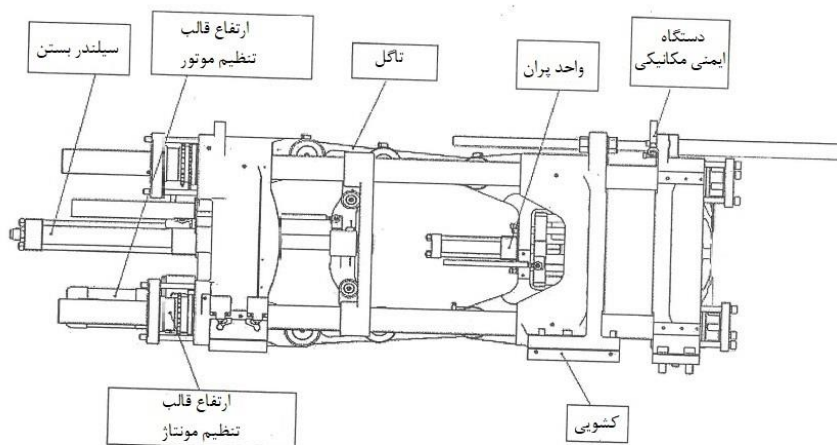


شکل ۱: مراحل تزریق پلاستیک [8]

- 1 Barrel
- 2 Screw
- 3 Packing
- 4 Tie bars
- 5 Warpage
- 6 Weldline
- 7 Sink marks
- 8 Short Shot
- 9 Burn mark



شکل ۲: تغییر نیروی گیره‌بندی در فرایند تزریق [2]



شکل ۳: واحد بستن قالب از نوع تاگل^۱

محققان با استفاده از نوآوری‌های مختلف در بهینه‌سازی مقادیر یا تغییر طراحی قالب در فرایند تزریق پلاستیک تلاش کرده‌اند، کیفیت قطعات تولیدی را افزایش دهند. مولایی و همکاران، میزان تأثیر پارامترهای مختلف در بروز عیب پاشش جریان را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی کردند [9]. حسن و همکارانش، تحقیقی درباره تأثیر سیستم خنک‌کننده بر نرخ انقباض^۲ قطعه‌ای از جنس پلی‌استایرن در طی فرایند تزریق پلاستیک انجام دادند و متوجه شدند، کانال‌های خنک‌کننده تأثیر زیادی بر دمای نهایی و توزیع نرخ انقباض قطعات دارند [10]. یوانگ^۳ و همکارانش با استفاده از فرایند تزریق پلاستیک میکروسولولی، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی انقباض یک چرخ‌دنده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد، تزریق پلاستیک میکروسولولی باعث تغییر ضخامت و مقدار انقباض کمتر نسبت به تزریق پلاستیک معمولی می‌شود [11]. بهشتیان و الهامی، تأثیر قالب بر عیوب سوختن و انقباض قطعه را بررسی کرده و با اصلاح قالب به کمک قراردادن پین بیرون‌انداز در محل مناسب، باعث کاهش عیب مورد نظر شدند [7]. بین^۴ و

¹ Toggle

² Shrinkage

³ Hwang

⁴ Yin

همکاران، عیب تاب برداشتن^۱ را به کمک مدل شبکه عصبی پس انتشار^۲ و پارامترهای فرایند شامل دمای قالب، دمای مذاب، فشار نگهداری، زمان فشار نگهداری و زمان سیکل خنک کاری، سنجیدند [12]. وی - جی^۳ و پنگ^۴، مطرح کردند که تنظیم نادرست نیروی گیره بندی منجر به کیفیت پایین قطعه و کوتاه تر شدن طول عمر دستگاه می شود [4]. کیتایاما^۵ و ناتسومه^۶، نتیجه گرفتند که نیروی گیره بندی ناکافی باعث ایجاد عیب پلیسه می شود و منجر به آسیب دائمی به قالب و وزن غیریکسان محصول ها می گردد [13] و همچنین تنظیم بیش از حد نیروی گیره بندی منجر به عیوبی از جمله سوختگی، پرنشیدن قالب و تهویه ضعیف هوا می شود [3]. وایبووو^۷ و همکاران، عیب پرنشیدن قالب در تولید روکش رادیاتور را بررسی کردند. آنها با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار مولدفلو^۸ متوجه شدند که دلیل این عیب، عدم پرشدن هم زمان دو حفره است. با تجزیه و تحلیل ابعاد سیستم راهگامی، این عیب را برطرف نمودند [14]. ماهاجان^۹ و اوله^{۱۰}، عیب پرنشیدن قالب در قطعه ای از جنس سی پی وی سی^{۱۱} بررسی نمودند. مقادیر بهینه پارامترهای بهینه تزریق را با استفاده از روش تاگوچی^{۱۲} برای به حداقل رساندن عیب پرنشیدن قالب تعیین کردند. با توجه به نتایج آنها، پارامتر سرعت بسته شدن قالب، بیشترین تأثیر بر ویژگی کیفی قطعه تولیدی داشت [15]. جان^{۱۳} و همکاران، تأثیر عوامل مختلف بر قطعات ساخته شده از جنس پلی پروپیلن و پلی استایرن را با روش تاگوچی بررسی کردند و متوجه شدند که دما مهم ترین عامل برای به حداقل رساندن انقباض است [16]. ایزدی و مصدق، اثر تغییر دمای قالب در نمونه ای از جنس پلی آمید ۶ را بررسی کردند و اعوجاج نمونه را به کمک مدل کلی ماکسول^{۱۴} و شبیه سازی پیش بینی نمودند [17]. معاونیان و همکاران، به بررسی فرایند تزریق در تولید لوله های سانتریفیوژ از جنس پلی لاکتیک اسید به جای پلی پروپیلن پرداختند [18]. آخوندی و همکاران با استفاده از شبیه سازی و تجربی، اثر ابعاد درجه، فشار نگهداری و زمان فشار نگهداری را بر روی میزان انقباض قطعه ای از جنس پلی اکسی متیلن^{۱۵} بررسی کردند [19]. ابوالحسنی فر و همکاران با استفاده از شبیه سازی، تأثیر جنس قالب بر اعوجاج قطعه کاربردی در فیزیوتراپی را بررسی کردند [20]. در فرایند تجربی تزریق می توان دریافت، مقدار نامناسب پارامترهای فرایندی منجر به عیب پرنشیدن قالب می شود و به ندرت در تحقیق های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف اصلی این پژوهش، پیش بینی و رفع عیوب سوختگی و پرنشیدن قالب با کاهش نیروی گیره بندی برای تولید قطعه پلاستیکی است و در محدوده جستجوی مؤلفین تحقیقی یافت نشد که این سه خروجی تأثیرگذار در بازدهی تولید به صورت هم زمان مورد بررسی قرار گرفته باشند. تنظیم نادرست پارامترهای ورودی بر روی دستگاه تزریق به راحتی منجر به پیدایش این عیوب در فرایند می شوند و رفع این عیوب، باعث افزایش کارایی فرایند و بهبود کیفیت محصول خواهد شد؛ لذا در این تحقیق مقدار پارامترهای فرایندی بهینه برای رسیدن به قطعه بدون عیب با کمترین نیروی گیره بندی لازم تعیین شدند. ابتدا این عیوب در کارگاه شناسایی و به وسیله نرم افزار مولدفلو، فرایند شبیه سازی گردید و عیوب مدنظر در نرم افزار نیز مشاهده شد. در نتیجه اعتبار و صحت مدل شبیه سازی تأیید شد.

¹ Warpage

² Back propagation

³ Wei-Jie

⁴ Peng

⁵ Kitayama

⁶ Natsume

⁷ Wibowo

⁸ Moldflow

⁹ Mahajan

¹⁰ Ulhe

¹¹ CPVC

¹² Taguchi

¹³ Jan

¹⁴ Generalized Maxwell Model

¹⁵ Polyoxymethylene

مزیت استفاده از شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده به‌عنوان گام اول فرایند بهینه‌سازی، نیاز به آزمون‌وخطا برای رسیدن به مقادیر بهینه پارامترهای ورودی به وسیله فرایند تجربی را برطرف می‌کند. سپس برای مشخص کردن میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی، طراحی آزمایشی به روش پلاکت - برمن^۱ انجام شد. پس از مشخص شدن عامل‌های مؤثر، طراحی آزمایشی به روش سطح پاسخ^۲ از نوع طراحی مرکب مرکزی^۳ انجام شد. در ادامه برای هر پاسخ، معادلات چندجمله‌ای از روش تحلیل واریانس^۴ به دست آمد. در نهایت برای سنجش دقت روش به کارگرفته‌شده، شبیه‌سازی با مقادیر بهینه ورودی انجام شد که نشان‌دهنده نتایج مناسب و قابل قبول است.

۲- بیان مسئله و ذکر اهداف

قطعه مورد بررسی در این مطالعه، بوشن ۶۳ از جنس یوپی‌وی‌سی است که از طریق فرایند تزریق پلاستیک ساخته می‌شود. این قطعه کاربردی در صنعت تاسیسات و ساختمان است. «شکل ۴»، قطعه مدل‌سازی شده به کمک نرم‌افزار سالیدورکس^۵ را نشان می‌دهد. آزمایش‌های تجربی به‌وسیله دستگاه تزریق با نیروی گیره‌بندی ۲۲۰ تن انجام شده است. مشخصات فنی دستگاه در «جدول ۱» ذکر شده است. هدف از این مقاله، پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترهای فرایندی برای حذف عیوب پرنشند قالب و سوختگی قطعه با کاهش نیروی گیره‌بندی موردنیاز به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار مولدفلو و تحلیل آماری است. ورودی مسئله، شش پارامتر فرایندی شامل دمای مذاب، مدت‌زمان تزریق، مدت‌زمان فشار نگهداری، مدت‌زمان خنک‌کاری، فشار تزریق و فشار نگهداری است که قابل تنظیم بر روی دستگاه تزریق هستند. دمای مذاب، مقدار آخرین المنت حرارتی سر نوک نازل تزریق است. خروجی مسئله، حداکثر نیروی گیره-بندی قالب، عیب پرنشند قالب و حداکثر دمای جبهه جریان مذاب در داخل قالب است که به ترتیب با پارامترهای G، H و I در متن پژوهش بیان شده‌اند.



شکل ۴: مدل سه‌بعدی قطعه بوشن ۶۳

¹ Plackett-Burman
² RSM
³ CCD
⁴ ANOVA
⁵ Solidworks

جدول ۱: مشخصات ماشین تزریق

پارامتر	مقدار
حداکثر نیروی گیره‌بندی (ton)	۲۲۰
کورس ماردون (mm)	۲۳۵
حداکثر سرعت چرخشی ماردون (rpm)	۱۷۱
قطر ماردون (mm)	۵۲
حداکثر ظرفیت کیف (L)	۸۲
ابعاد ماشین (m)	۵/۳x۱/۵x۲/۱

۳- شبیه‌سازی

فرایند تزریق پلاستیک قطعه با قالب دو حفره‌ای به کمک نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی شد. در داخل نرم‌افزار جنس یوپی‌وی‌سی مورد استفاده با نام تجاری بنویک - ای - آر ۷۰۵^۱، به دلیل نزدیک بودن مقدار چگالی جامد و دمای مذاب پیشنهادی تأمین‌کننده آن به ماده تجربی، انتخاب گردید که مشخصات آن در «جدول ۲» آورده شده است. برای اعتبارسنجی و استقلال مش مدل، شبیه‌سازی آزمایش تجربی دوم که در بخش صحت‌سنجی بیان شده است، ابتدا با مش از نوع سه‌بعدی درشت سپس با ابعاد ریزتر انجام شد. خلاصه نتایج اعتبارسنجی مش مدل در «جدول ۳» و قطعه مش‌بندی شده در «شکل ۵» آورده شده است، بنابراین اندازه مش کلی و مش اطراف دریچه به ترتیب برابر ۴/۵ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نوع شبیه‌سازی فرایند داخل نرم‌افزار از نوع Cool+Fill+Pack انتخاب گردید. جنس قالب در فرایند تجربی از جنس DIN 1.2312 می‌باشد که معادل آن داخل نرم‌افزار از نوع فولاد ابزار P20 انتخاب شد. آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به منظور سیال خنک‌کار قالب در ورودی آن لحاظ گردید.

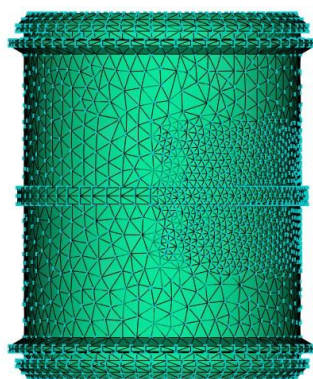
جدول ۲: مشخصات ماده بنویک - ای - آر ۷۰۵

خواص ماده	مقدار
چگالی جامد (g/cm^3)	۱/۴۳
چگالی مذاب (g/cm^3)	۱/۳۲
حداقل دمای مذاب پیشنهاد شده ($^{\circ}C$)	۱۶۰
حداکثر دمای مذاب پیشنهاد شده ($^{\circ}C$)	۲۰۰
دمای گذار ($^{\circ}C$)	۱۲۰
ضریب حرارت ویژه در دمای ۱۸۰ درجه ($J/kg^{\circ}C$)	۱۷۶۷
رسانایی گرمای در دمای ۱۸۰ درجه ($W/m^{\circ}C$)	۰/۱۳
مدول الاستیک (MPa)	۳۲۸۰
مدول برشی (MPa)	۱۱۶۰
نسبت پواسون	۰/۴۲

^۱ Benvic IR705

جدول ۳: ابعاد مش

پرشدن کامل قالب	حداکثر دمای جبهه جریان مذاب (°C)	ابعاد مش	
		اطراف دریچه (mm)	کلی (mm)
خیر	۱۹۸/۲	۲	۶
خیر	۱۹۹/۳	۲	۵/۵
بله	۱۹۸/۶	۲	۵
بله	۲۰۲/۸	۲	۴/۵
بله	۲۰۲/۹	۲	۴



شکل ۵: قطعه مش بندی شده

ابعاد سیستم راهگاهی در «جدول ۴» بیان شده است. «شکل ۶»، قالب دوحفره‌ای آزمون تجربی به همراه مسیر خنک کاری و سنبه آن را نشان می‌دهد و «شکل ۷»، مدل شبیه‌سازی شده تجربی در نرم‌افزار مولدفلو است.

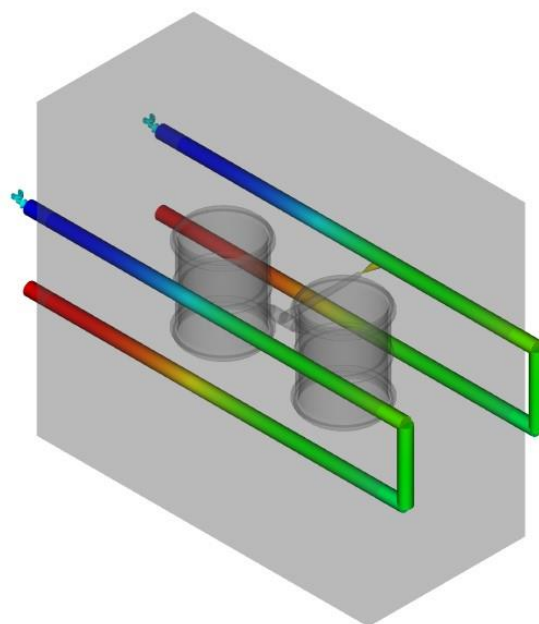
جدول ۴: ابعاد سیستم راهگاهی

اجزا	نوع	تعداد	طول (mm)	قطر شروع	زاویه (deg)
اسپرو ^۱	دایروی	۲	۱۲	۱۰	
راهگاه	مخروطی	۱	۷۶	۴	۱/۵
دریچه	مخروطی	۲	۱۲/۵	۳/۵	۱۴/۵

^۱ Sprue



شکل ۶: قالب تجربی (الف) نیمه راست و (ب) نیمه چپ



شکل ۷: مدل شبیه‌سازی شده با سیستم خنک کاری

۳-۱- دلایل تشکیل عیوب

پلیمر یوپی‌وی‌سی، هنگام حرارت‌دادن تولید گاز می‌کند و عدم تخلیه کامل این گاز می‌تواند باعث بروز لکه‌های قرمز رنگ روی قطعه شود که به‌عنوان عیب سوختگی نام‌برده می‌شود. دلایل بروز این عیب شامل دمای بالای جبهه جریان مذاب، تخلیه ناکافی گاز حاصل از حرارت دادن به پلیمر و هوای حبس شده در قالب است. حبس هوا را می‌توان از طریق الگوی پرشدن قالب پیش‌بینی کرد. زمانی که مذاب به داخل حفره تزریق می‌شود، جریان سیال به‌صورت خطی است و اگر سرعت تزریق افزایش یابد، حالت جریان مغشوش می‌شود؛ بنابراین اگر سرعت یا فشار تزریق خیلی زیاد باشد، در مدت‌زمان اندک مرحله تزریق، هوای محبوس شده در سیستم راهگایی و حفره‌ها نمی‌تواند از مسیر کانال تهویه قالب به‌درستی خارج شود. در نتیجه، هوای به‌دام‌افتاده، فشرده می‌شود و فشار و دمای آن افزایش می‌یابد که منجر به سوختن مواد ترموپلاستیک می‌شود و پلیمر دچار ازهم‌پاشیدگی (تخریب) می‌گردد [7]. در مقابل

سرعت تزریق خیلی کم منجر به پرنشیدن قالب می‌شود و علت این اتفاق باتوجه به «شکل ۸»، وجود بالشتک^۱ است. مواد باقیمانده در نوک ماردون، پس از مراحل پر کردن و نگهداری، بالشتک نامیده می‌شود. بالشتک برای فراهم کردن مواد کافی برای پر کردن کامل قالب حیاتی است و اگر مواد در آن ناحیه، در هنگام تزریق کافی نباشد، قطعاتی با جرم کم و شامل حفره تولید می‌شوند [21]. نیروی گیره‌بندی زیادی برای جلوگیری از جداشدن قالب در حین پرکردن لازم است، باین‌حال با اعمال نیروی بیش از حد، عمر مفید قالب کاهش می‌یابد و سطوح قالب را لکه‌دار می‌کند و منجر به تخلیه ناکافی گاز و ایجاد عیوب سوختگی و پرنشیدن قالب می‌شود. در مقابل، نیروی گیره‌بندی مناسب، مصرف انرژی را کاهش و راندمان تولید را بالا می‌برد [22-24].



شکل ۸: بالشتک در فرایند تزریق

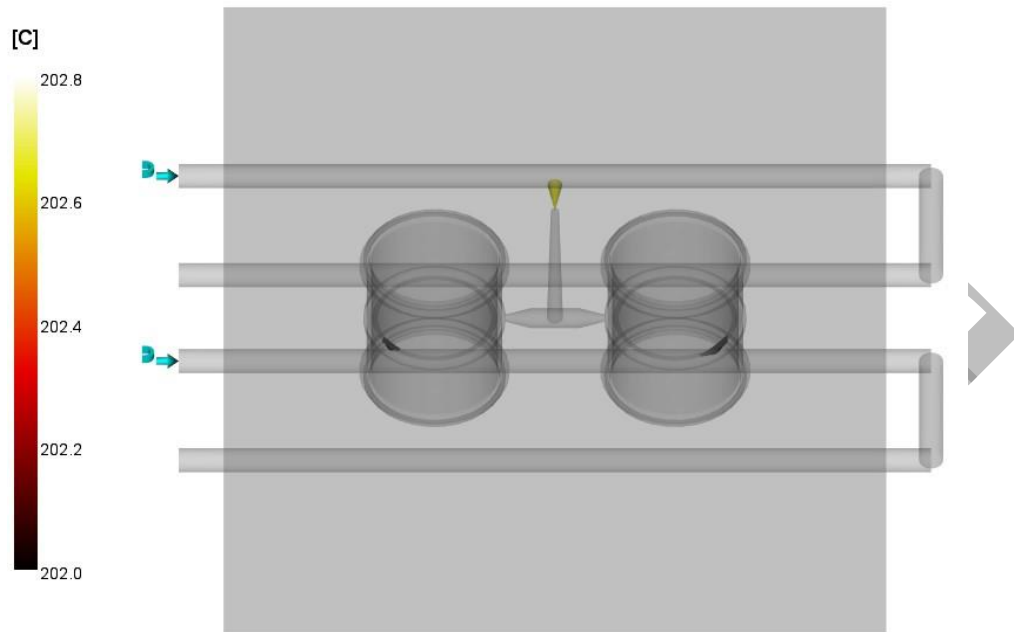
۲-۳- صحت سنجی

در فرایند تزریق تجربی، معمولاً نیروی گیره‌بندی در حداکثر مقدار ممکن بر روی دستگاه تنظیم می‌شود. مدل شبیه‌سازی فرایند می‌تواند با نشان دادن عیوب مدنظر، صحت آن تأیید و حداکثر نیروی گیره‌بندی موردنیاز تزریق از آن قابل استنتاج شود. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند، دمای جبهه جریان مذاب بالای ۲۰۲ درجه سانتی‌گراد داخل قالب، باعث سوختن پلیمر می‌شود. در نرم‌افزار با تنظیم محدوده جبهه جریان مذاب مطابق با «شکل ۹»، محل آثار سوختن و یا عدم سوختن در قطعه نهایی قابل مشاهده است. برای مشاهده مقدار حداکثر نیروی گیره‌بندی و پرشدن قالب از فایل گزارش^۲ نرم‌افزار استفاده شد. از الگوی پرشدن قطعه نیز مطابق با «شکل ۱۰»، محل ایجاد حبس هوا قابل پیش‌بینی است و حبس هوا، علت اصلی ایجاد عیوب سوختگی و پرنشیدن قالب است. «شکل ۱۰-الف» و «شکل ۱۰-ب» چگونگی پرشدن قطعه به صورت تجربی را نشان می‌دهد که با «شکل ۱۰-ج» مطابقت دارد و در نتیجه صحت مدل شبیه‌سازی در چگونگی پرشدن مذاب در قالب نیز تأیید می‌گردد. مقدار پارامترهای ورودی، مقدار حداکثر نیروی گیره‌بندی موردنیاز، داشتن و نداشتن عیب پرنشیدن قالب و مقدار حداکثر دمای جبهه جریان مذاب برای آزمایش‌های تجربی ۱ و ۲، در «جدول ۵» نشان داده شده است. برای پارامتر خروجی H، مقدار صفر و یک آن به ترتیب به معنای پرنشیدن و پرشدن کامل قالب می‌باشد و حتی مقدار اندکی از پرنشیدن قالب به عنوان عیب در نظر گرفته شده است. «شکل ۱۱ و ۱۲»، نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی و تجربی آزمایش اول و دوم است و نتایج مشابهی را نشان می‌دهد و در نتیجه، صحت مدل شبیه‌سازی برای عیوب مدنظر تأیید می‌گردد.

¹ Cushion

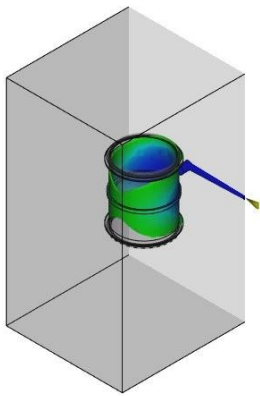
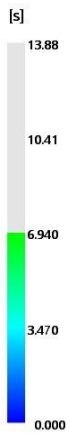
² Log file

Temperature at flow front
= 202.8[C]



شکل ۹: نمایی از محل سوختن قطعه در شبیه‌سازی نرم‌افزار

Fill time
= 6.940[s]



ج



ب



الف

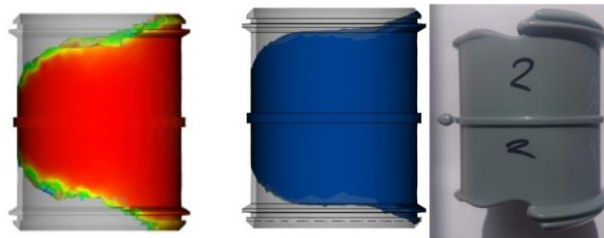
شکل ۱۰: عیب پرنشدهن قالب (الف و ب) نحوه پرشدن مذاب در قالب به صورت تجربی و (ج) الگو پرشدن مذاب در شبیه‌سازی

جدول ۵: مقادیر پارامترهای آزمایش ۱ و ۲

عوامل	عنوان	پارامتر	آزمایش ۱ مقدار	آزمایش ۲ مقدار
ورودی	A	دمای مذاب (°C)	۱۹۱/۲	۱۹۶
	B	مدت زمان سیکل خنک کاری (s)	۱۹/۷۵	۱۸/۶۴
	C	مدت زمان فشار نگهداری (s)	۸/۴۴	۶
	D	فشار نگهداری (MPa)	۶۴/۷۰	۶۴/۷۰
	E	فشار تزریق (MPa)	۱۲۶/۴۶	۱۱۵
	F	مدت زمان تزریق (s)	۹/۷	۷/۷
خروجی	G	حداکثر نیروی گیره‌بندی لازم (t)	۱۰۳	۱۲۲
	H	عیب پرنشدن قالب	بله	خیر
	I	حداکثر دمای جبهه جریان مذاب (°C)	۱۹۱/۱	۲۰۲/۸

Temperature at flow front = 191.1[C]

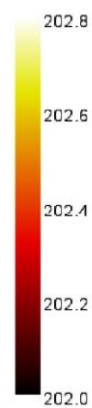
[C]



شکل ۱۱: عیب پرنشدن قالب در آزمایش ۱

Temperature at flow front = 202.8[C]

[C]



شکل ۱۲: عیب سوختگی در آزمایش ۲

۴- طراحی آزمایش

در فرایند تزریق پلاستیک پارامترهای فرایندی زیادی بر کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است. درک و بیان صریح رابطه بین پارامترهای فرایندی برای به حداقل رساندن نیروی گیره‌بندی و رفع عیوب پرنشیدن قالب و سوختگی دشوار است. در چنین شرایطی، طراحی آزمایش و بهینه‌سازی، یک رویکرد مفید است. طراحی آزمایش رویکردی علمی است که به محققان اجازه کسب دانشی برای کاهش زمان و هزینه انجام فرایند، فهم بهتر فرایند و میزان تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها را می‌دهد. این روش عمدتاً عوامل کنترل و ویژگی‌های کیفی را با تعریف پیوندهایی بین ورودی و خروجی، ترکیب می‌کند. در این تحقیق ابتدا به کمک نرم‌افزار مینی‌تب^۱ برای شناسایی پارامترهای مؤثر از شش پارامتر ورودی، طراحی آزمایش دوسطحی به روش پلاکت - برمن^۲ و با نسبت ۱/۲ انجام شد. در طراحی غربالگری برای هر ورودی سطوح بالا و پایین در نظر گرفته می‌شود که باید به صورت واقع‌بینانه تعیین شوند؛ بنابراین مقادیر سطوح غربالگری باید به گونه‌ای تعریف شوند که اگر همه عوامل مؤثر واقع شدند، انجام آزمایش تجربی در محدوده عوامل طراحی سطح پاسخ، امکان‌پذیر باشد. باتوجه به ماده موردنظر حد پایین و حد بالای دمای مذاب در غربالگری به ترتیب برابر ۱۹۱/۲ و ۱۹۴/۸ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. باتوجه به مشخصات دستگاه تزریق مقدار حد پایین و حد بالای فشار نگهداری و فشار تزریق مطابق «جدول ۶» در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین مقادیر سطوح مدت‌زمان خنک‌کاری، نگهداری و تزریق از متخصصان شرکت یزداتصال پلیمر کمک گرفته شد. نرم‌افزار، تعداد ۳۶ آزمایش را جهت انجام شبیه‌سازی مشخص کرد. محدوده پارامترهای ورودی و نتایج تحلیل غربالگری به ترتیب در «جدول ۶» و «جدول ۷» آمده است.

جدول ۶: محدوده پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش

پارامتر	حد پایین	حد بالا
A	۱۹۱/۲	۱۹۴/۸
B	۱۹/۸۵	۲۵/۱۵
C	۴/۵۶	۸/۴۴
D	۶۴/۷۰	۷۵/۳۰
E	۱۲۶/۴۶	۱۳۳/۵۴
F	۷/۳	۸/۷

جدول ۷: نتایج طراحی آزمایش به روش پلاکت - برمن

اجرا	پارامترهای ورودی								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
۱	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۹	۱	۲۰۷/۶
۲	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۷	۰	۱۹۹/۳
۳	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۶	۱	۱۹۸/۴
۴	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۸۲	۰	۲۰۱/۵
۵	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۷۰	۰	۲۰۱/۵
۶	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۸	۰	۲۰۶/۵
۷	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۴	۰	۲۰۱/۹

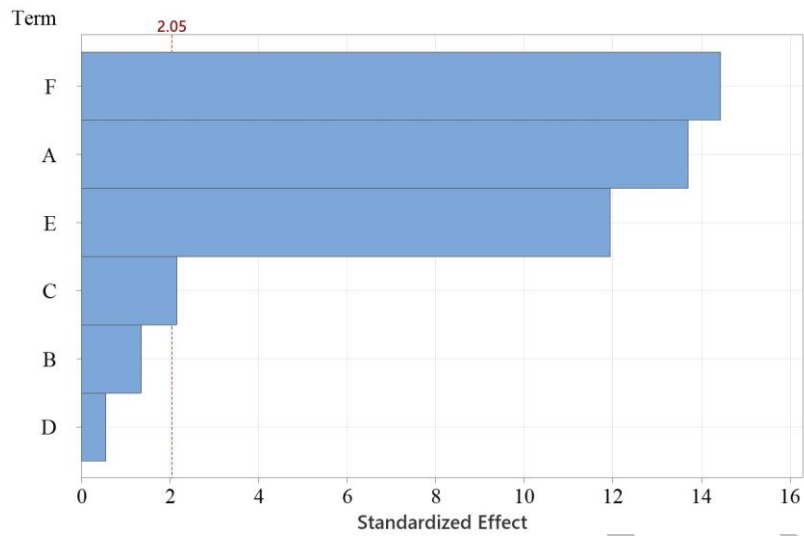
^۱ Minitab

^۲ Plackett-Burman

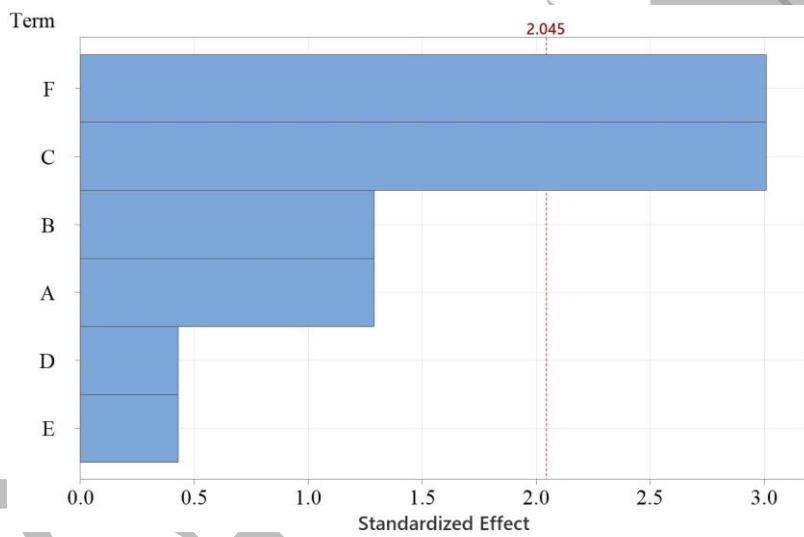
۲۰۱/۵	۰	۱۷۶	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۸
۲۰۱/۹	۱	۱۶۵	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۹
۱۹۹/۰	۰	۱۳۷	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۸	۱۰
۱۹۸/۴	۱	۱۴۵	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۱۱
۱۹۸/۵	۰	۱۴۶	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۱۲
۲۰۷/۶	۰	۱۷۹	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۱۳
۲۰۱/۵	۰	۲۰۰	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۱۴
۲۰۱/۹	۰	۱۴۴	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۱۵
۱۹۸/۲	۱	۱۶۳	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۱۶
۱۹۸/۵	۱	۱۸۹	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۱۷
۱۹۹/۹	۰	۱۱۷	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۱۸
۲۰۱/۴	۱	۱۸۲	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۱۹
۲۰۷/۶	۰	۱۴۵	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۲۰
۲۰۱/۵	۰	۱۸۱	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۲۱
۱۹۹/۱	۰	۱۳۴	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۲۲
۲۰۹/۶	۰	۱۷۳	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۲۳
۱۹۹/۱	۰	۱۱۱	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۲۴
۱۹۹/۳	۰	۱۱۷	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۲۵
۲۰۱/۵	۰	۱۹۴	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۲۶
۱۹۸/۵	۱	۱۴۶	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۲۷
۲۰۶/۵	۰	۱۷۳	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۲۸
۱۹۹/۰	۰	۱۳۷	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۲۹
۱۹۹/۲	۰	۱۷۶	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۳۰
۱۹۸/۴	۱	۱۷۷	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۶۴/۷۰	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۳۱
۱۹۹/۲	۰	۱۷۶	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۳۲
۲۰۱/۵	۰	۱۹۴	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۳۳
۲۰۱/۵	۱	۱۷۷	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۳۴
۱۹۸/۵	۱	۱۴۶	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۳۵
۱۹۹/۱	۰	۱۱۱	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۷۵/۳۰	۸/۴۵	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۳۶

نمودار پارتو^۱، کمک بسیاری در تعیین پارامترهای مؤثر دارد و هرکدام از عوامل ورودی که از خط مبنای قرمز رنگ عبور کرده باشند، به عنوان پارامتر اثرگذار شناخته می‌شوند. در شکل‌های «۱۳ تا ۱۵»، پارامترهای گذرنده از خط مبنا به عنوان پارامترهای اثرگذار قابل مشاهده هستند.

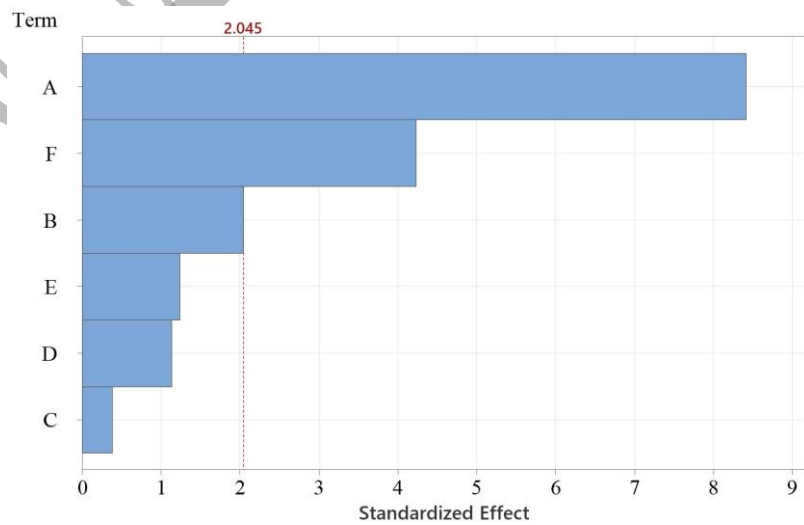
^۱ Pareto



شکل ۱۳: غربالگری برای نیروی گیره‌بندی



شکل ۱۴: غربالگری برای عیب پر نشدن قالب



شکل ۱۵: غربالگری برای عیب سوختگی

نتایج غربالگری نشان می‌دهد، برای جلوگیری از سوختن پلیمر باید مقدار دمای مذاب و مدت زمان تزریق تاحدامکان کاهش داده و مدت زمان خنک‌کاری را افزایش داد. برای جلوگیری از پرنشیدن قطعه، باید مقدار مدت زمان تزریق و مدت زمان فشار نگهداری را کاهش داده تا سرعت تزریق مواد در مراحل پرکردن و نگهداری بیشتر شود و سر نوک نازل، مواد به اندازه کافی برای شروع تزریق قطعه جدید وجود داشته باشد؛ بنابراین برای جلوگیری از وقوع حبس هوا، تعیین مدت زمان تزریق باید بادقت انتخاب شود. برای کاهش نیروی گیره‌بندی لازم باید مقدار دمای مذاب، فشار تزریق و سرعت تزریق مواد در مراحل پرکردن و نگهداری را کاهش داده تا نیروی کمتری برای مقابله با جریان تزریق در قالب و جدانشدن دونیمه قالب لازم باشد. پس از شناسایی پارامترهای مؤثر، یک عامل غیرمؤثر شناسایی شد. به منظور بررسی عمیق‌تر پارامترهای مؤثر، طراحی آزمایشی به روش پاسخ سطح و از نوع طراحی مرکب مرکزی با ۳۲ آزمایش و با مقدار آلفا^۱ برابر با ۲/۸۲۸ انجام شد. مقدار عامل غیرمؤثر D، برابر با مقدار ثابت ۶۴/۷ در نظر گرفته شد و نتایج آن در «جدول ۸» آورده شده است.

جدول ۸: نتایج طراحی آزمایشی به روش مرکب مرکزی

پارامترهای خروجی			پارامترهای ورودی مؤثر				اجرا	
I	H	G	F	E	C	B		A
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱
۱۹۸/۰	۱	۱۷۰	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۲
۲۰۱/۴	۱	۱۹۶	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۳
۲۰۳/۹	۰	۱۹۱	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۸/۰	۴
۱۹۸/۹	۰	۱۳۵	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۵
۱۹۹/۰	۰	۱۱۲	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۸/۴۴	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۶
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۷
۱۹۵/۹	۰	۱۲۲	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۸۸/۰	۸
۲۰۰/۱	۱	۱۶۶	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۱۵/۰۱	۱۹۳/۰	۹
۲۰۰/۵	۰	۱۱۵	۸/۰	۱۱۹/۹۹	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۰
۲۰۷/۶	۱	۱۷۷	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۸/۴۴	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۱۱
۲۰۲/۹	۰	۱۴۳	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۸/۴۴	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۱۲
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۳
۲۰۰/۵	۱	۲۰۳	۸/۰	۱۴۰/۰۱	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۴
۱۹۹/۵	۱	۱۶۲	۶/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۵
۱۹۸/۰	۱	۱۵۸	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۸/۴۴	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۱۶
۲۰۱/۶	۱	۱۷۸	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۱۷
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۸
۲۰۰/۶	۱	۱۵۵	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۱/۰۱	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۱۹
۲۰۰/۳	۱	۱۵۱	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۱۱/۹۹	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۲۰
۲۱۱/۷	۰	۱۳۶	۱۰/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۲۱
۲۰۱/۶	۰	۲۰۲	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۸/۴۴	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۲۲
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۲۳
۲۰۰/۲	۱	۱۴۸	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۹/۹۹	۱۹۳/۰	۲۴
۱۹۷/۹	۱	۱۴۶	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۲۵
۲۰۳/۶	۰	۱۷۱	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۴/۸	۲۶
۱۹۸/۲	۰	۱۱۷	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۴/۵۶	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۲۷

^۱ Alpha

۲۰۷/۳	۰	۱۴۷	۸/۷	۱۳۳/۵۴	۸/۴۴	۱۹/۸۵	۱۹۱/۲	۲۸
۲۰۱/۴	۰	۱۶۸	۷/۳	۱۲۶/۴۶	۸/۴۴	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۲۹
۲۰۰/۵	۱	۱۵۰	۸/۰	۱۳۰/۰۰	۶/۵۰	۲۲/۵۰	۱۹۳/۰	۳۰
۱۹۸/۸	۱	۱۶۱	۷/۳	۱۳۳/۵۴	۸/۴۴	۲۵/۱۵	۱۹۱/۲	۳۱
۲۰۵/۶	۰	۱۵۴	۸/۷	۱۲۶/۴۶	۴/۵۶	۲۵/۱۵	۱۹۴/۸	۳۲

تحلیل واریانس، روشی آماری به منظور بررسی یک متغیر کمی به عنوان تابعی از یک یا چند متغیر کمی یا کیفی است. این روش، اثرات خطی، مربعات و برهم کنش دوتایی پارامترهای ورودی بر خروجی را مورد بررسی قرار می دهد. در این پژوهش، مقبولیت مدل پیشنهادی ارائه شده به کمک تحلیل واریانس بررسی شده و نتایج آن در «جدول ۹» آمده است. به دلیل مقدار P کمتر از ۰/۰۵، صحت مدل ها تأیید می گردد و بالاتر بودن مقدار F، به معنای تأثیر بیشتر عامل است. از «جدول ۹» می توان دریافت که دمای مذاب، بیشترین تأثیر بر روی نیروی گیره بندی و زمان تزریق مهم ترین عامل ورودی در ایجاد عیوب سوختن و پرنشیدن قالب است. دقت مدل تحلیل داده با ضریب رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. محدوده مقدار ضریب رگرسیون بین ۰ و ۱ است و اگر مقدار آن نزدیک به ۱ باشد، نشان دهنده تطابق خوب مدل با پاسخ ها است و مقادیر ضرایب همبستگی مدل ها در «جدول ۱۰» آورده شده است.

جدول ۹: نتایج تحلیل واریانس برای مدل رگرسیون

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع	رابطه
۰/۰۰۱	۷/۴۱	۷۷۲/۵۵	۱۵۴۵۱/۰	۲۰	مدل G	خطی
۰/۰۰۰	۵۷/۵۴	۵۹۹۹/۶۴	۵۹۹۹/۶	۱	A	
۰/۰۰۰	۵۵/۹۰	۵۸۲۹/۲۱	۵۸۲۹/۲	۱	E	
۰/۰۰۰	۲۶/۳۶	۲۷۴۸/۱۹	۲۷۴۸/۲	۱	F	
		۱۰۴/۲۴	۱۱۴۷/۰	۱۱	خطا	
			۱۶۵۹۸/۰	۳۱	مجموع	
۰/۰۲۵	۳/۲۲	۰/۳۲۹۶۲	۶/۵۹۲۳۵	۲۰	مدل H	خطی
۰/۰۰۱	۱۸/۷۰	۱/۹۱۵۲۱	۱/۹۱۵۲۱	۱	F	
۰/۰۰۳	۱۴/۶۵	۱/۵۰۰۳۸	۱/۵۰۰۳۸	۱	AA	
۰/۰۳۹	۵/۴۹	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۱	BE	
۰/۰۳۹	۵/۴۹	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۱	CF	برهم کنش دوتایی
۰/۰۳۹	۵/۴۹	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۱	AF	
		۰/۱۰۲۴۰	۱/۱۲۶۴۰	۱۱	خطا	
			۷/۷۱۸۷۵	۳۱	مجموع	
۰/۰۰۰	۱۰/۸۶	۱۵/۱۶۵	۳۰۳/۲۹۱	۲۰	مدل I	خطی
۰/۰۰۰	۶۱/۰۳	۸۵/۲۴۲	۸۵/۲۴۲	۱	A	
۰/۰۰۰	۷۷/۶۳	۱۰۸/۴۳۵	۱۰۸/۴۳۵	۱	F	
۰/۰۰۰	۲۷/۹۳	۳۹/۰۱۷	۳۹/۰۱۷	۱	FF	
۰/۰۱۸	۷/۸۰	۱۰/۸۹۰	۱۰/۸۹۰	۱	AB	برهم کنش دوتایی
۰/۰۰۸	۱۰/۶۱	۱۴/۸۲۲	۱۴/۸۲۲	۱	CE	
۰/۰۴۳	۵/۲۲	۷/۲۹۰	۷/۲۹۰	۱	EF	
		۱/۳۹۷	۱۵/۳۶۴	۱۱	خطا	
			۳۱۸/۶۵۵	۳۱	مجموع	

جدول ۱۰: ضرایب همبستگی مدل

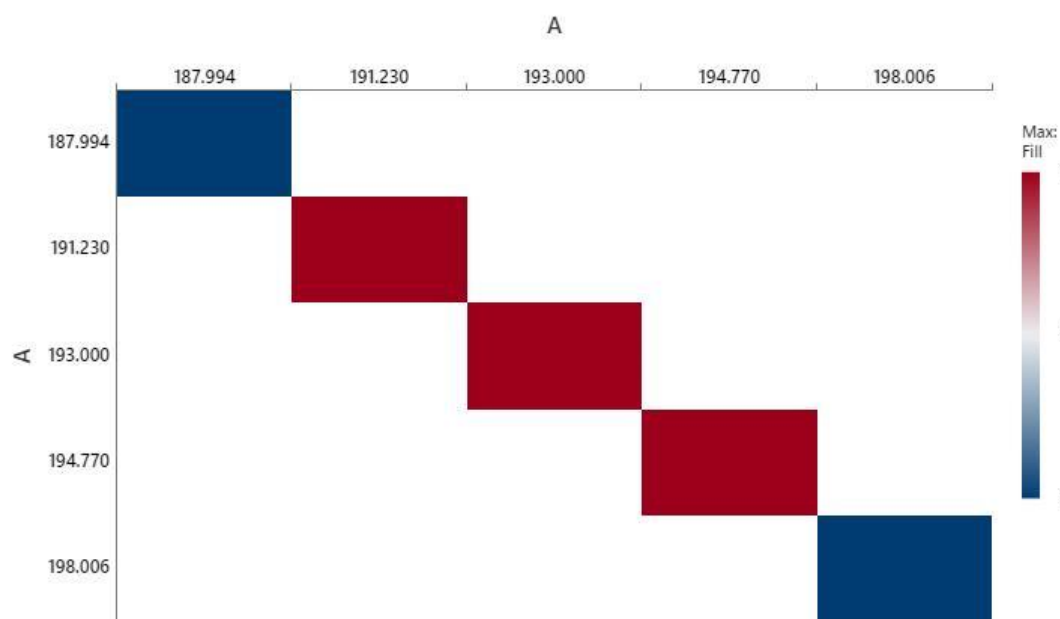
I	H	G	پاسخ
۹۵/۱۸	۸۵/۴۱	۹۳/۰۹	مقدار ضریب رگرسیون (%)

در ادامه به تفسیر نتایج حاصل از تحلیل واریانس پرداخته می‌شود. ماتریس همبستگی، جدولی ساده است که ضرایب همبستگی بین تمام جفت متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد و ابزاری کاربردی در شناسایی و تجسم الگو برای داده‌های فراوان است. همان‌طور که در «شکل ۱۶» نشان داده شده است، ماتریس همبستگی بین متغیرهای ورودی و پاسخ، نتایج ارزشمندی در حل مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. اعداد جدول در بازه -۱ تا +۱ قرار دارد و هرچه قدر این عدد به -۱ نزدیک‌تر باشد، به این معنا است که دو متغیر ارتباط معکوس باهم دارند و هرچه قدر این عدد به +۱ نزدیک باشد، نشان می‌دهد دو متغیر ارتباط مستقیمی باهم دارند. به عنوان مثال می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دمای مذاب، احتمال تشکیل عیب سوختن و نیروی گیربندی لازم افزایش می‌یابد و با کاهش مدت‌زمان تزریق، احتمال عیب سوختن و نیروی گیربندی لازم کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت برای تولید قطعه سالم و با کیفیت سطح بالا، در انتخاب دمای مذاب و مدت‌زمان تزریق، باید حساسیت بیشتری نشان داده شود. از لحاظ فنی می‌توان بیان کرد که با افزایش سرعت تزریق در دمای مذاب ثابت، ماده کاهش گرانیوی کمتری نسبت به افزایش دمای مذاب از خود نشان می‌دهد و با افزایش فشار تزریق، نیروی گیربندی بیشتری برای بسته نگه‌داشتن قالب در سطح مقطع ثابت نیاز است. با افزایش فشار تزریق، گرانیوی ماده کاهش پیدا کرده و ماده را می‌توان با سرعت بیشتری تزریق نمود تا عیب پرنشندن قالب در قطعه ایجاد نشود. دمای جبهه جریان مذاب در قالب با افزایش دمای مذاب و کاهش سرعت تزریق، افزایش یافته و احتمال ایجاد عیب سوختگی به دلیل ایجاد حبس هوا و تخریب پلیمر افزایش می‌یابد.

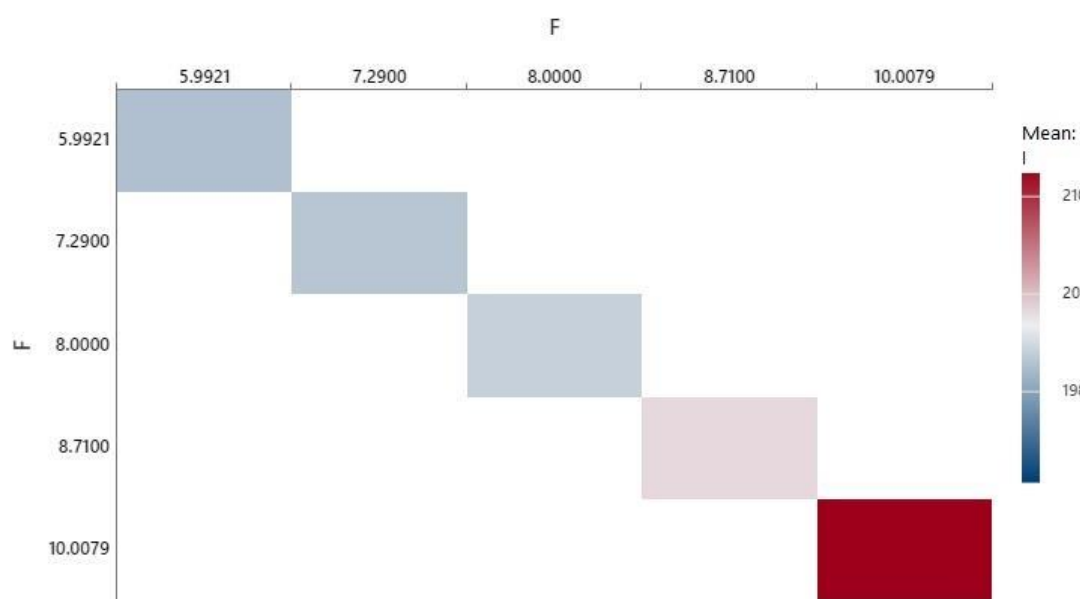
A	1							
B	1.78E-17	1						
C	0	1.62E-17	1					
E	-4.4E-18	-2.4E-17	-1.2E-17	1				
F	5.52E-18	1.84E-17	-2.5E-17	0	1			
G	0.601222	-0.12063	-0.01415	0.592621	-0.40691	1		
H	-0.06363	0.063633	-0.06363	0.243588	-0.49812	0.31221	1	
I	0.517211	-0.00314	0.1045	0.124787	0.583344	0.187669	-0.30371	1
	A	B	C	E	F	G	H	I

شکل ۱۶: تأثیر خطی پارامترهای مؤثر

باتوجه به «جدول ۹» می‌توان دریافت که عوامل ورودی فقط تأثیر خطی مؤثر بر پاسخ G دارند و مقدار تأثیر خطی آن از «شکل ۱۶» قابل استنتاج است. نقشه حرارتی برای بررسی و مشاهده تأثیر مربعات یک عامل در خروجی کاربرد دارد. متغیر AA و FF باتوجه به «جدول ۹» به ترتیب برای عیوب پرنشندن قالب و سوختگی مؤثر هستند و نقشه حرارتی آنها به ترتیب در «شکل ۱۷» و «شکل ۱۸» نشان داده شده است. هر چه قدر پارامتر ورودی در محدوده رنگ قرمز انتخاب شوند، به مقدار حداکثر خروجی مدنظر نزدیک می‌شوند. از «شکل ۱۷» و «شکل ۱۸» به ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که برای عیب پرنشندن قالب، انتخاب مقدار فاکتور A، بدون توجه به فاکتورهای دیگر، حساس است و برای عیب سوختگی تا حد امکان کمترین مقدار F را باید انتخاب کرد.

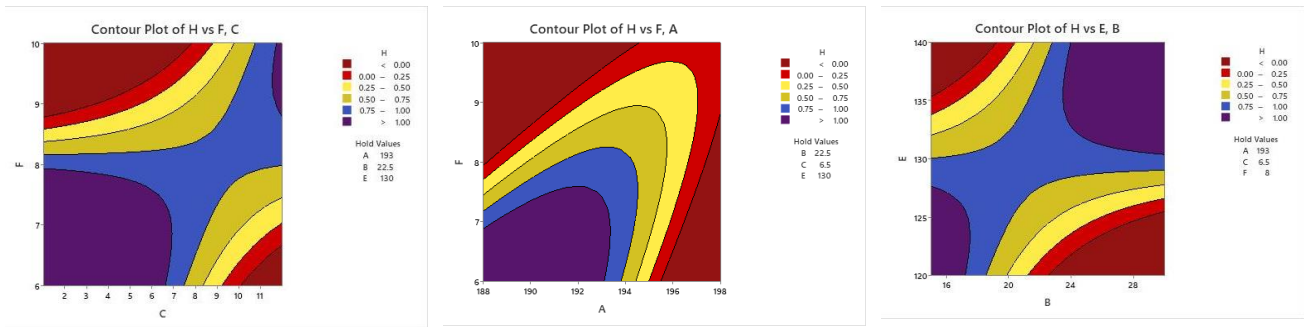


شکل ۱۷: نقشه حرارتی برای عیب پرنشدن قالب



شکل ۱۸: نقشه حرارتی برای عیب سوختگی

نحوه برهم کنش‌های دوتایی عوامل مختلف به صورت نمودارهای کانتور دوبعدی در «شکل ۱۹» و «شکل ۲۰» نشان داده شده است. برهم کنش‌های دوتایی مؤثر برای پاسخ H در «شکل ۱۹» نشان داده شده است و می‌توان نتیجه گرفت، برای جلوگیری از عیب پرنشدن قالب، پارامتر B و E همزمان باهم در حد بالا یا پایین خود قرارگیرند و برای دو پارامتر C و F نیز، این اطلاعاتی برداشت می‌شود و برای دو پارامتر A و F، به ترتیب تا حد امکان در پایین‌ترین مقدار خود همزمان قرار بگیرند.



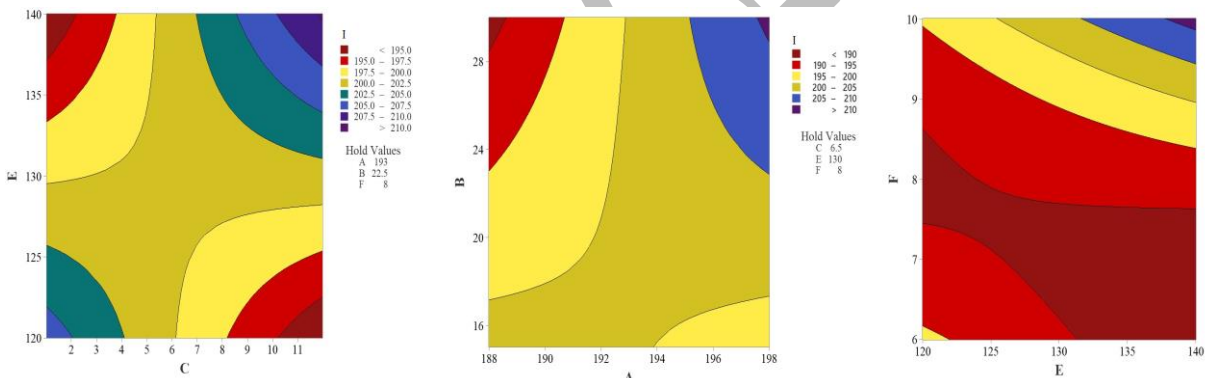
ج

ب

الف

شکل ۱۹: برهمکنش دوتایی عوامل (الف) مدت زمان خنک کاری و فشار تزریق، (ب) دمای مذاب و مدت زمان تزریق و (ج) زمان تزریق و مدت زمان فشار نگهداری برای عیب پر نشدن قالب

«شکل ۲۰-الف»، اثر ترکیبی فشار تزریق و مدت زمان تزریق را نشان می‌دهد و احتمال ایجاد عیب، متناسب با افزایش این دو پارامتر، افزایش می‌یابد. «شکل ۲۰-ب»، اثر ترکیبی دمای مذاب و مدت زمان خنک کاری را نشان می‌دهد. هرچقدر از مقدار متوسط دمای مذاب فراتر برویم، باعث ایجاد عیب می‌شود. «شکل ۲۰-ج»، اثر ترکیبی مدت زمان فشار نگهداری و فشار تزریق را بر روی عیب سوختن نشان می‌دهد. درحالی که دمای ۲۰۲ معیار است؛ بنابراین، قراردادن این دو پارامتر هم‌زمان در بیشترین یا کمترین مقدار ممکن، باعث ایجاد عیب می‌شود.



ج

ب

الف

شکل ۲۰: برهمکنش دوتایی عوامل (الف) مدت زمان تزریق و فشار تزریق، (ب) دمای مذاب و مدت زمان خنک کاری و (ج) فشار تزریق و مدت زمان فشار نگهداری برای عیب سوختگی

۱-۴- بهینه‌سازی

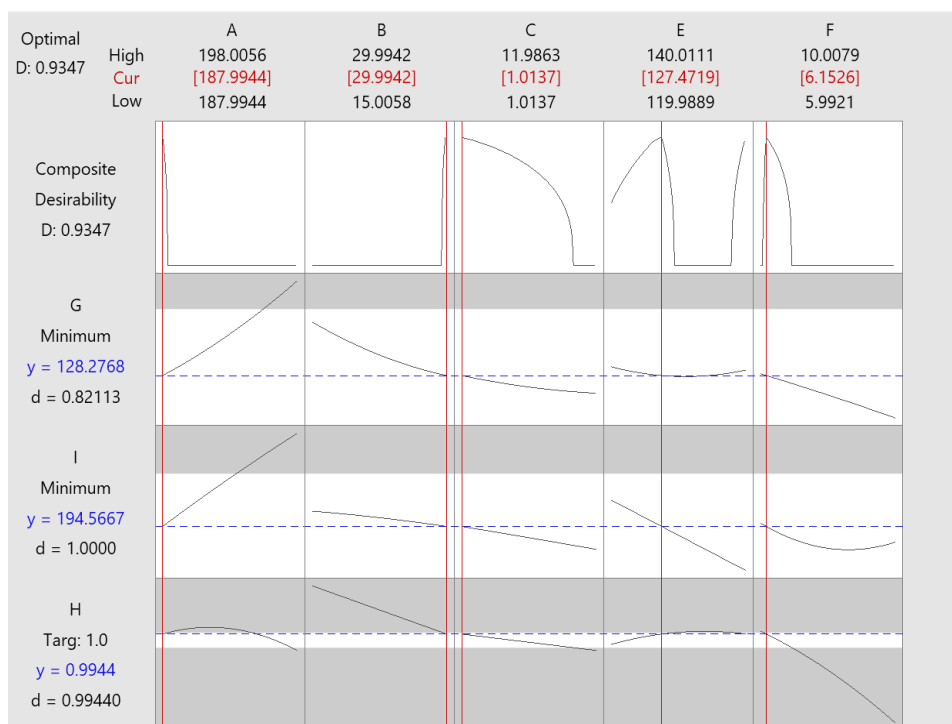
بهینه‌سازی، فرایندی است که در آن بهترین جواب از میان مجموعه جواب‌های ممکن با توجه به قیدهای توابع هدف، برای یک مسئله خاص انتخاب می‌شود. در این پژوهش با توجه به قید سالم بودن قطعه از لحاظ فیزیکی و باهدف کاهش نیروی گیربندی، باید مقدار بهینه پارامترهای ورودی برای به حداقل رساندن حداکثر مقدار ممکن پارامترهای نیروی گیربندی و دمای جبهه جریان مذاب به همراه پر شدن کامل قالب تعیین شوند. در ادامه بهینه‌سازی بر روی رابطه‌های (۱) تا (۳) انجام شد. مقادیر بهینه ورودی شامل دمای مذاب ۱۸۸/۰ (درجه سانتی‌گراد)، مدت زمان سیکل خنک کاری ۲۹/۹۹ (ثانیه)، مدت زمان فشار نگهداری ۱/۰۱ (ثانیه)، فشار نگهداری ۶۴/۷۰ (مگاپاسکال)، فشار تزریق ۱۲۷/۴۷ (مگاپاسکال) و مدت زمان تزریق ۶/۱۵ (ثانیه) به دست آمد. مقادیر بهینه خروجی با نیروی گیربندی ۱۲۸ (تن) و حداکثر دمای جبهه جریان مذاب ۱۹۴/۶ (درجه سانتی‌گراد) همراه با پر شدن کامل قالب پیش‌بینی شد. در

«شکل ۲۱» نیز می‌توان نتایج بهینه‌سازی را مشاهده کرد. در نهایت با مقادیر بهینه تحلیل آماری، شبیه‌سازی انجام شد و مقدار میانگین خطا ۶/۰۳٪ با مقادیر خروجی پیش‌بینی‌شده توسط تحلیل آماری دارد که در «جدول ۱۱»، مقادیر خروجی شبیه‌سازی نیز آورده شده است. در «شکل ۲۲»، نتایج بهینه تحلیل آماری به‌صورت شبیه‌سازی و تجربی نشان‌داده شده است که نتایج یکسانی را نشان می‌دهد.

$$G = 19980 - 142A - 69.8E - 358F \quad (۱)$$

$$H = -954 - 32F - 0.04AA + 0.15AF + 0.02BE + 0.14CF \quad (۲)$$

$$I = -1569 + 15.4A - 83.3F + 1.27FF + 0.18AB + 0.14CE + 0.27EF \quad (۳)$$

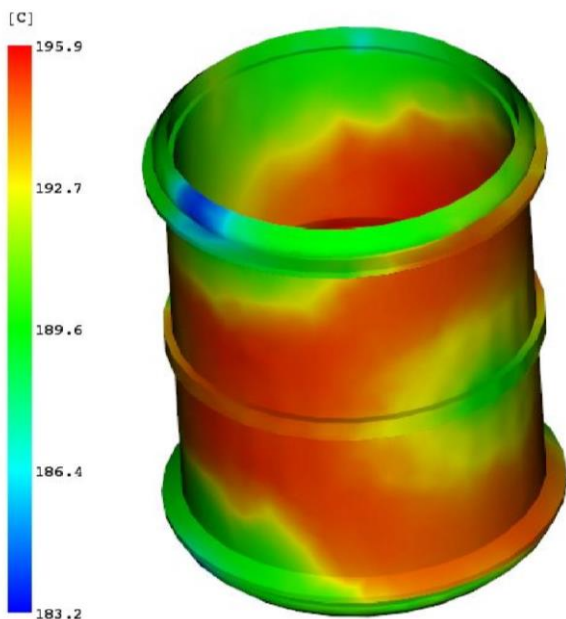


شکل ۲۲: بهینه‌سازی

جدول ۱۱: مقایسه نتایج بهینه به‌دست‌آمده از روش طراحی مرکب مرکزی با شبیه‌سازی

نتیجه شبیه‌سازی با مقادیر بهینه			نتیجه عددی		
I	H	G	I	H	G
۱۹۵/۹	۱	۱۵۵	۱۹۴/۶	۱	۱۲۸
	خطا (%)		۰/۶۶	۰	۱۷/۴۲
	میانگین خطا (%)			۶/۰۳	

Temperature at flow front
= 195.9[C]



شکل ۲۳: قطعه بدون عیب

در این تحقیق، عوامل فرایندی شامل دمای مذاب، مدت زمان خنک کاری، فشار نگهداری، مدت زمان فشار نگهداری، فشار تزریق و مدت زمان تزریق بر کیفیت فرایند تزریق پلاستیک بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار تزریق، نیروی گیره‌بندی بیشتری نیاز است و فشار تزریق کم منجر به بروز عیب پرنشندن قالب می‌شود که با نتیجه پژوهش [13] مطابقت دارد. در پژوهش [13] محدوده فشار تزریق از ۱۰ تا ۸۰ (مگاپاسکال) در تولید قطعه‌ای از جنس ای‌بی‌اس^۱ بررسی گردید؛ اما در این پژوهش محدوده فشار تزریق از ۱۱۹/۹۹ تا ۱۱۴/۰۱ (مگاپاسکال) است. در پژوهش [13] عیب پرنشندن قالب با استفاده از میزان پرنشندن قالب بررسی شده است؛ ولی در پژوهش حاضر به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری و افزایش دقت تحلیل داده، عیب پرنشندن قالب به صورت صفر یا یک (خروجی گسسته) بیان شد. نیروی گیره‌بندی بیشتر به دلیل بسته نگه داشتن قالب در فرایند تزریق با فشار تزریق بالاتر، نیاز است و با افزایش فشار تزریق، گرانیوی ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه، احتمال بروز عیب پرنشندن قالب کاهش می‌یابد. باتوجه به «شکل ۱۶» نیروی گیره‌بندی زیاد منجر به تهویه هوای ضعیف و عیب پرنشندن قالب می‌شود که با پژوهش [25] مطابقت دارد. در پژوهش [25] تزریق نمونه دمبلی شکل از جنس پلی‌کربنات^۲ و ای‌بی‌اس در شرایط مختلف نیروی گیره‌بندی و به صورت تجربی انجام شد. محاسبه نیروی گیره‌بندی در پژوهش [25] با استفاده از نصب سنسور کرنش بر روی میله مهار قالب انجام شد؛ ولی در پژوهش حاضر، میزان استفاده از تناژ دستگاه به کمک حل عددی باتوجه به محدودیت‌های ماشین تزریق از نوع تاگل استخراج شد. در پژوهش [26] فقط عامل سرعت تزریق به عنوان متغیر ورودی برای بررسی عیب سوختگی در نظر گرفته شد و بررسی این عیب به صورت تجربی و با کمک سنسور گاز بود؛ ولی در این پژوهش شش عامل فرایندی برای بررسی عیب سوختگی در نظر گرفته شده است. برخلاف نتیجه پژوهش [26] که با کاهش مدت زمان تزریق، احتمال بروز عیب سوختگی افزایش می‌یابد، در این پژوهش نتیجه گرفته شد که به ترتیب با افزایش دمای مذاب و مدت زمان تزریق، احتمال بروز این عیب، افزایش می‌یابد. برخلاف پژوهش‌های گذشته [7,26,27] که به صورت تجربی، عیب سوختگی را رفع کردند، در این پژوهش با شناسایی نقطه بحرانی تخریب پلیمر در قالب به کمک حل عددی، نیاز به انجام فرایند تجربی برای رفع عیب را از بین برد. در نهایت صحت معادلات حاکم بر پاسخها، تأیید شده و می‌توان از این معادله‌ها برای تولید بوشن در آینده استفاده کرد تا باتوجه به مقادیر ورودی، نتایج تجربی از قبل قابل پیش‌بینی باشد.

¹ ABS

² Polycarbonate

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر و بهینه‌سازی عامل‌های فرایندی بر عیوب سوختن، پرنشدن قالب و نیروی گیره‌بندی در فرایند تزریق قطعه بوشن ۶۳ است. این قطعه به وسیله دستگاهی با نیروی گیره‌بندی ۲۲۰ تن تولید می‌شود. پارامترهای فرایندی (ورودی) شامل دمای مذاب، مدت‌زمان خنک‌کاری، مدت‌زمان فشار نگهداری، فشار نگهداری، فشار تزریق و مدت‌زمان تزریق است. در ادامه، فرایند در نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی شد. پس از تأیید صحت مدل شبیه‌سازی به کمک نتایج تجربی، بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی به وسیله تحلیل آماری برای به حداقل رساندن عیوب سوختن و پرنشدن قالب با حداقل نیروی گیره‌بندی موردنیاز انجام شد. برای این هدف در طراحی غربالگری به روش پلاکت - برمن مشاهده شد، عوامل مؤثر بر نیروی گیره‌بندی، به ترتیب دمای مذاب، فشار تزریق، مدت‌زمان تزریق و مدت‌زمان فشار نگهداری است. برای عیب پرنشدن قالب، فقط پارامترهای مدت‌زمان اعمال فشار نگهداری و مدت‌زمان تزریق مؤثر هستند و برای عیب سوختن، عوامل دمای مذاب، زمان تزریق و مدت‌زمان خنک‌کاری مؤثر بر آن هستند. پارامتر فشار نگهداری به‌عنوان عامل غیرمؤثر شناسایی شد. سپس برای دستیابی به معادله رگرسیونی دقیق‌تر برای پیش‌بینی فرایند تزریق در کارگاه، طراحی آزمایشی به روش مرکب مرکزی انجام شد. با بررسی اثرات متقابل عوامل فرایند می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای مذاب و مدت‌زمان فشار نگهداری، زمان کمتری برای تزریق کامل قالب لازم است ولی احتمال تشکیل عیب سوختن در فشار تزریق بالا را افزایش می‌دهد و نیاز به نیروی گیره‌بندی بیشتری دارد. بررسی تأثیر و انتخاب مقدار عوامل بر پاسخ‌ها به‌منظور رفع عیوب، استفاده از بهینه‌سازی را آشکار می‌سازد. در نهایت شبیه‌سازی با مقادیر بهینه تحلیل آماری انجام شد و با میانگین خطای ۶/۰۳٪ با کمترین نیروی گیره‌بندی امکان‌پذیر، عیوب موردنظر نیز رفع گردید و در تست تجربی نیز قطعه سالمی تولید شد. بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی به کمک شبیه‌سازی، هزینه بسیار کمتری در مقابل اصلاح قالب و تعویض دستگاه با نیروی گیره‌بندی بالاتر دارد و همچنین باعث بهبود دقت ابعادی محصول، عدم هدررفت مواد خام و کاهش زمان تولید می‌گردد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	دمای مذاب، °C
B	مدت‌زمان سیکل خنک‌کاری، s
C	مدت‌زمان فشار نگهداری، s
D	فشار نگهداری، MPa
E	فشار تزریق، MPa
F	مدت‌زمان تزریق، s
G	حداکثر نیروی گیره‌بندی لازم، t
H	عیب پرنشدن قالب
I	حداکثر دمای جبهه جریان مذاب، °C

۷- واژه نامه

Burn mark defect	عیب سوختگی
Short shot defect	عیب پرنشدن قالب
Clamping force	نیروی گیره‌بندی
Holding pressure	فشار نگهداری
Packing time	مدت‌زمان فشار نگهداری
Melt temperature	دمای مذاب
Simulation	شبیه‌سازی
Moldflow software	نرم‌افزار مولدفلو
Regression equation	معادله رگرسیون
Design of Experiment	طراحی آزمایش

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از امکانات فراهم‌شده توسط شرکت یزد اتصال پلیمر در حین انجام تحقیقات تقدیر نمایند.

۹- منابع و مراجع

- [1] S.H. Tang, Y.M. Kong, S.M. Sapuan, R. Samin, S. Sulaiman, Design and thermal analysis of plastic injection mould, *J. Mater. Process. Technol.* 171 (2006) 259–267.
- [2] Y. Xu, G. Liu, K. Dang, N. Fu, X. Jiao, J. Wang, P. Xie, W. Yang, A novel strategy to determine the optimal clamping force based on the clamping force change during injection molding, *Polym. Eng. Sci.* 61 (2021) 3170–3178.
- [3] J.-Y. Chen, C.-Y. Liu, M.-S. Huang, Tie-bar elongation based filling-to-packing switchover control and prediction of injection molding quality, *Polymers (Basel)*. 11 (2019) 1168.
- [4] W. Su, H. Peng, A real- time clamping force measurement eigenvalue for prediction, adjustment, and control of injection product quality, *Polym. Eng. Sci.* 61 (2021) 420–431.
- [5] Z. Jiao, H. Liu, P. Xie, W. Yang, Clamping characteristics study on different types of clamping unit, in: *AIP Conf. Proc.*, AIP Publishing, 2015.
- [6] H. Oktem, T. Erzurumlu, I. Uzman, Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part, *Mater. Des.* 28 (2007) 1271–1278.
- [7] S. Beheshtian Mesgaran, F. Elhami Nik, S.E. Seyyed Mousavi, Experimental and Numerical Analysis of Burn Marks and Shrinkage Effect on Injection Molding, in: *Int. Manuf. Sci. Eng. Conf.*, American Society of Mechanical Engineers, 2017: p. V001T02A038-V001T02A038.
- [8] B. Ravikiran, D.K. Pradhan, S. Jeet, D.K. Bagal, A. Barua, S. Nayak, Parametric optimization of plastic injection moulding for FMCG polymer moulding (PMMA) using hybrid Taguchi-WASPAS-Ant Lion optimization algorithm, *Mater. Today Proc.* 56 (2022) 2411–2420.
- [9] A. Mollaei Ardestani, G. Azamirad, Y. Shokrollahi, M. Calaon, J.H. Hattel, M. Kulahci, R. Soltani, G. Tosello, Application of Machine Learning for Prediction and Process Optimization—Case Study of Blush Defect in Plastic Injection Molding, *Appl. Sci.* 13 (2023) 2617.
- [10] H. Hassan, N. Regnier, C. Pujos, E. Arquis, G. Defaye, Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding, *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 1547–1557.
- [11] S. Hwang, P.P. Hsu, C. Chiang, Shrinkage study of textile roller molded by conventional/microcellular injection-molding process, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 35 (2008) 735–743.
- [12] F. Yin, H. Mao, L. Hua, W. Guo, M. Shu, Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding, *Mater. Des.* 32 (2011) 1844–1850.
- [13] S. Kitayama, S. Natsume, Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization, *Simul. Model. Pract. Theory* 48 (2014) 35–44.
- [14] E.A. Wibowo, A. Syahriar, A. Kaswadi, Analysis and simulation of short shot defects in plastic injection molding at multi cavities, in: *Proc. 2021 Int. Conf. Eng. Inf. Technol. Sustain. Ind.*, 2020: pp. 1–6.
- [15] L.D. Mahajan, P.N. Ulhe, Analysis of Injection Molding Process to Reduced Defects (Short-Shot), *Int. J. Eng. Technol. Manag. Res.* 5 (2018) 113–119.
- [16] Q.M. Usman Jan, T. Habib, S. Noor, M. Abas, S. Azim, Q.M. Yaseen, Multi response optimization of injection moulding process parameters of polystyrene and polypropylene to minimize surface roughness and shrinkage's using integrated approach of S/N ratio and composite desirability function, *Cogent Eng.* 7 (2020) 1781424.
- [17] O. Izadi, P. Mosaddegh, Experimental investigation and simulation of PA6 warpage based on

thermomechanical behavior obtained from uniaxial tensile test, *Amirkabir Mech. Eng. J.* 52 (2019) 1127–1138. <https://doi.org/10.22060/mej.2019.15196.6057>.

- [18] M. Moavenian, ali Esmaili khiabani, H. Janani, Comparison of process conditions and defects of plastic injection in replacing biodegradable polymer polylactic acid (PLA) with polypropylene (PP) for the production of centrifuge tubes (Falcon), 19th Natl. Conf. 8th Int. Conf. Manuf. Iran (1401). <https://civilica.com/doc/1649919>.
- [19] B. Akhoundi, V. Modanloo, A. Mashayekhi, Numerical and experimental investigation of the effect of gate size, holding pressure and holding pressure time on the shrinkage of polyoxymethylene plastic injection parts., *Third Int. Conf. New Technol. Sci.* (2023). <https://civilica.com/doc/1754047>.
- [20] Z. Abolhasani Far, N. Ramadanian, S. abozae Fanayi, N. Akhlian, Investigation and comparison of aluminum and tool steel molds on the results of warpage and volume shrinkage with simulation of plastic injection using Moldflow software in the production of rollers based on polyethylene vinyl acetate, 19th Natl. Conf. 8th Int. Conf. Constr. Prod. Eng. Iran (2022). <https://civilica.com/doc/1649872>.
- [21] D.F. Heaney, C.D. Greene, Molding of components in metal injection molding (MIM), in: *Handb. Met. Inject. Molding*, Elsevier, 2019: pp. 105–127.
- [22] M.H. Chiang, Y.P. Yeh, F.L. Yang, Y.N. Chen, Integrated control of clamping force and energy-saving in hydraulic injection moulding machines using decoupling fuzzy sliding-mode control, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 27 (2005) 53–62.
- [23] M.-S. Huang, K.-Y. Chen, R.-F. Fung, Comparison between mathematical modeling and experimental identification of a spatial slider–crank mechanism, *Appl. Math. Model.* 34 (2010) 2059–2073.
- [24] Y. Kudo, T. Hakoda, K. Nakamura, S. Morozumi, Method of setting mold clamping force of injection molding machine, (2011).
- [25] M.-S. Huang, C.-Y. Lin, A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding, *Int. J. Heat Mass Transf.* 109 (2017) 223–230.
- [26] Y. Fukushima, T. Suzuki, K. Onda, H. Komatsu, H. Kuroiwa, T. Kaburagi, Study on the online monitoring of burn marks by gas sensor, *Int. J. Autom. Technol.* 11 (2017) 112–119. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0112>.
- [27] J. Li, W. Liu, X. Xia, H. Zhou, L. Jing, X. Peng, S. Jiang, Reducing the burn marks on injection-molded parts by external gas-assisted injection molding, *Polymers (Basel)*. 13 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.3390/polym13234087>.

نسخه چاپی منتشر