



## بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در بروز عیب برش جریان در فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک به روش تحلیل واریانس

علیرضا ملائی اردستانی، قاسم اعظمی راد\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۳۰

### کلمات کلیدی:

تحلیل المان محدود

قالب‌گیری تزریق پلاستیک

عیب برش جریان

بهینه‌سازی

تحلیل واریانس

**خلاصه:** فرآیند تزریق پلاستیک یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها در تولید قطعات پلاستیکی است. عیوب بسیاری ممکن است در این فرآیند رخ دهند که کیفیت قطعه را از نظر ظاهری و کارایی دچار مشکل می‌کنند. لذا تلاش برای رفع این عیوب در این صنعت بسیار حائز اهمیت است. یکی از این عیوب، برش جریان است که در منابع مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر این عیب و راه‌های رفع آن کمتر صحبت شده است. لذا در این تحقیق سعی شده پارامترهای مؤثر بر آن شناسایی شده و با بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر پیشنهادهایی جهت کاهش آن ارائه شود. بدین منظور هشت پارامتر با احتمال تأثیر در بروز این عیب که عبارت‌اند از دمای مواد، سرعت تزریق، دمای قالب، فشار نگهداری، قطر راهگاه، قطر گیت، زاویه گیت و زاویه‌ی ورود به قالب جهت بررسی در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی تأثیر یا عدم تأثیر و همچنین میزان و نحوه‌ی اثر این پارامترها بر عیب برش جریان، یک طراحی آزمایش عاملی کسری ۱/۸ با هشت فاکتور و دو سطح به‌وسیله‌ی نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. سپس با انجام تحلیل‌های المان محدود در نرم‌افزار مولدفلو و صحت‌سنجی تحلیل‌ها به‌وسیله‌ی آزمون تجربی، مساحت عیب در هر تحلیل به‌وسیله‌ی روش‌های هندسی محاسبه شد. پس از تحلیل واریانس داده‌ها، مشخص شد که پارامترهای قطر راهگاه، فشار نگهداری، سرعت تزریق و دمای مواد به ترتیب بیشترین تأثیر را در این عیب دارند. پس‌ازاین، برای چهار فاکتور ذکرشده، یک طراحی آزمایش از نوع طراحی مکعب مرکب انجام شد و پس از انجام تحلیل المان محدود و تحلیل واریانس روی داده‌ها، مشخص شد که با افزایش پارامترهای دمای مواد و فشار نگهداری و کاهش قطر راهگاه‌ها و سرعت تزریق تا حد بهینه‌ی ارائه‌شده، می‌توان مساحت عیب برش جریان را به میزان ۸۲/۲٪ کاهش داد.

### ۱- مقدمه

نگهداری<sup>۱</sup>، مدت‌زمان اعمال فشار نگهداری و پارامترهای مربوط به هندسه قالب مانند قطر راهگاه‌ها، قطر گیت، هندسه‌ی قطعه، نحوه بالانس راهگاه‌ها، تعداد حفره‌ها، میزان صافی سطح قالب، زاویه‌ی گیت و زاویه‌ی ورود به قالب تقسیم می‌شوند. از جمله عیوب ناشی از انتخاب نادرست این مقادیر، می‌توان به اعوجاج، انقباض، حبس هوا، خط جوش ضعیف، پر نشدن قالب، برش جریان<sup>۲</sup> و مواردی از این دست اشاره کرد. عیب برش جریان، عیبی است که در نتیجه‌ی فروپاشی ماده‌ی

یکی از مهم‌ترین فرآیندها در تولید قطعات پلاستیکی، فرآیند تزریق پلاستیک است. در فرآیند تزریق پلاستیک، مشخصه‌های زیادی وجود دارند که ایجاد تغییرات در مقادیر آن‌ها می‌تواند کیفیت محصول تولیدشده را چه از نظر ظاهری و چه از نظر استحکام و کارایی تحت تأثیر قرار دهد و باعث بروز عیوب و یا برطرف شدن آن‌ها شود. این پارامترها به دو دسته‌ی شرایط فرآیندی مانند دمای مواد، فشار تزریق، سرعت تزریق، دمای قالب، مدت‌زمان خنک کاری، فشار برگشت ماردون، فشار

1 Holding pressure  
2 Blush

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Azamirad@yazd.ac.ir



سیکل نیز به میزان ۵۰٪ کاهش پیدا کرد. وانگ و همکاران<sup>۵</sup> [۴] در تحقیقی با استفاده از شبکه‌های عصبی سعی در مشخص کردن رابطه بین شرایط فرآیندی (فشار تزریق، سرعت تزریق، زمان خنک کاری، دمای قالب و دمای مذاب) و انقباض یک قطعه تولیدشده به روش تزریق پلاستیک از جنس پلی‌پروپیلن داشتند. مشخص شد که بیشترین اثر بر روی انقباض قطعه مربوط به مقدار ماده‌ی تزریق شده داخل قالب است. همین‌طور از بین شرایط فرآیندی اعمالی بر سیکل تزریق، ترتیب اندازه‌ی تأثیر به‌صورت: فشار نگهداری، دمای مواد و دمای قالب است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای قالب و زمان خنک کاری میزان انقباض نیز افزایش می‌یابد؛ و با افزایش فشار نگهداری، دمای مواد، زمان نگهداری فشار و فشار تزریق، میزان انقباض قطعه کاهش می‌یابد. چن و همکاران<sup>۶</sup> [۵]، پژوهشی را روی بررسی بهبود هم‌زمان کاهش هزینه تولید، راندمان بالا و افزایش دقت تولید انجام دادند. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که دمای مواد و فشار نگهداری مهم‌ترین عوامل قابل کنترل در شبیه‌سازی و در آزمون تجربی هستند. همچنین پارامترهای بهینه جهت انجام فرآیند تزریق برای دستیابی به مطلوب‌ترین نتایج در شبیه‌سازی مشخص شد. لادو<sup>۷</sup> و سانچز [۶] به بررسی میزان تأثیر پارامترهای مختلف تزریق در بروز عیب برش جریان پرداختند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو<sup>۸</sup> قطعه‌ای نیمه‌استوانه‌ای مدل‌سازی شد و تزریق در دماها و سرعت‌های مختلف شبیه‌سازی شد. در نتیجه‌ی این شبیه‌سازی مشخص شد که سرعت تزریق و دمای تزریق، فاکتورهای مؤثر بر قطر عیب برش جریان هستند و تأثیر سرعت تزریق بیشتر از تغییرات دماست. هه و همکاران<sup>۹</sup> [۷] تأثیر پارامترهای مربوط به شرایط فرآیندی را بر اعوجاج قطعه تزریق‌شده بررسی کردند. در این پژوهش که در آن از روش طراحی آزمایش استفاده شده، یک قطعه با جداری نازک در نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی گردید و پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از تحلیل واریانس، مشخص شد که به ترتیب دمای مواد، دمای قالب، زمان اعمال فشار نگهداری و زمان تزریق مهم‌ترین عواملی هستند که اعوجاج قطعه تزریق‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تابی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۸] در تحقیقی سعی در بررسی اثر

تزریقی بر اثر تجاوز تنش برشی ماده از مقدار مجاز آن که یکی از خواص ماده است رخ می‌دهد. این عیب مختص یک جنس پلاستیک خاص نبوده و در انواع مواد پلاستیکی امکان رخ دادن آن وجود دارد؛ اما استعداد برخی مواد در نشان دادن این عیب بیشتر از سایر مواد است. از جمله این مواد، می‌توان به پی‌وی‌سی‌ها اشاره کرد. پارامترهایی که ممکن است در بروز این عیب نقش داشته باشند عبارت‌اند از: دمای مواد، دمای قالب، سرعت تزریق، فشار نگهداری، قطر راهگاه‌ها، قطر گیت، زاویه گیت<sup>۱</sup> و زاویه‌ی ورود به قالب. محققان بسیاری در زمینه‌ی عیوب تزریق فعالیت کرده‌اند. اوکتم و همکاران<sup>۲</sup> [۱] مطالعاتی را بر روی یک قطعه‌ی پلاستیکی جدار نازک ترتیب دادند. هدف این مطالعه، بهبود اثرات انقباضی قطعه با ایجاد تغییرات در شرایط فرآیندی تزریق و با ایجاد تغییرات در انقباض قطعه بود. در این تحقیق مؤثرترین پارامترها در نتایج اعوجاج قطعه به ترتیب از قرار: فشار نگهداری، زمان اعمال فشار نگهداری، زمان تزریق و مدت‌زمان خنک کاری بودند. در نتیجه‌ی شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که میزان اعوجاج قطعه تا ۲/۱۷٪ بهبود می‌یابد. سانگ و همکاران<sup>۳</sup> [۲] در تحقیقی به بررسی تأثیر شکل چهار نوع گیت مختلف بر عیوب نواحی اطراف محل تزریق پرداختند. به این منظور پارامتر هدف نرخ برش اطراف محل تزریق در نظر گرفته شد. این تحقیق مشخص کرد که نوع گیت شماره ۳ کمترین میزان نرخ برش را اطراف محل گیت ایجاد می‌کند. در این بررسی، پارامترهای طراحی: ضخامت، طول، عرض و زاویه‌ی این نوع گیت در نظر گرفته شد و روی این چهار پارامتر بهینه‌سازی صورت گرفت. پس از این بهینه‌سازی، نرخ برش اطراف محل گیت با بهبود ۱۱ درصدی همراه شد. بین و همکاران<sup>۴</sup> [۳] میزان اعوجاج درب داشبورد یک اتومبیل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک شبکه عصبی پس‌رو را با استفاده از جعبه‌ابزار شبکه‌های عصبی متلب طراحی کردند. در نتیجه‌ی این آزمون، شبکه‌ی عصبی نتایج اعوجاج قطعه را ظرف ۰/۰۱ ثانیه و خطای میانگین کمتر از ۲ درصد پیش‌بینی کرد. مقدار بهینه‌شده‌ی اعوجاج برابر ۱/۵۸ میلی‌متر به دست آمد که به میزان ۳۳٪ به نسبت اعوجاج اولیه که مقدار ۲/۳۵۸ میلی‌متر بود بهبود یافت. همچنین به‌صورت هم‌زمان، زمان

5 Wang  
6 Chen, Ching-Piao  
7 J. Llado  
8 Moldflow  
9 Huabo He  
10 T. Tábi

1 Included angle  
2 Oktem, Hasan  
3 D. J. SONG  
4 Fei Yin

تغییر فاز بین سرعت و فشار، حجم فوم اولیه، شعاع فوم اولیه و تراکم گاز اولیه به‌عنوان متغیرهای طراحی، سعی در کاهش اعوجاج قطعه در یک فرآیند تزریق پلاستیک فوم میکرو سلولی داشتند. به این منظور از نتایج شبیه‌سازی المان محدود برای آموزش شبکه عصبی برگشت به عقب، ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک و ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد. پس از بهینه‌سازی، میزان اعوجاج با اعمال پارامترهای بهینه‌شده به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. در تحقیقی دیگر، کیتایاما و همکاران [۱۳] برای بهبود خطوط جوش در قطعه تزریق‌شده، سعی در افزایش حداکثری دمای جبهه‌ی مذاب داشتند. در عین حال آن‌ها به‌منظور کاهش نیروی گیره بندی به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در کیفیت قطعه تولیدی، یک بهینه‌سازی چندهدفه را ترتیب دادند. آن‌ها از روش تابع پایه‌ی شعاعی برای دستیابی به نمودار پارتو فرانتیر استفاده کردند تا مقدار بهینه قابل قبولی را برای هر دو پارامتر هدف موردنظر به‌صورت هم‌زمان پیدا کنند. یوونو و همکاران [۱۴] در تحقیق دیگری با بهره‌گیری از آنالیز المان محدود و الگوریتم ژنتیک، در راستای کاهش زمان تولید محصول با استفاده از بهینه‌سازی شرایط فرآیندی نظیر دمای مواد، فشار تزریق، فشار نگهداری و مدت‌زمان اعمال فشار نگهداری گام برداشتند. در نتیجه این بهینه‌سازی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مذکور یافت شد و مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تجربی، خطای کمتر از ۱٪ را نشان داد. لی و همکاران [۱۵] در تحقیقی به بهینه‌سازی هم‌زمان کیفیت، هزینه و بازدهی تولید پرداختند. پارامترهای طراحی در این تحقیق قطر راهگاه‌ها و شرایط فرآیندی بودند. برای بهینه‌سازی از روش‌های جی-کرایگینگ<sup>۲</sup>، الگوریتم ژنتیک و روش سر بسته برای بهینه‌سازی مقادیر متغیرهای طراحی استفاده شد. با استفاده از روش سر بسته حل بهینه‌ی پارتو<sup>۳</sup> به دست آمد و میزان خطای نتایج پیش‌بینی از آزمون تجربی کمتر از ۲٪ گزارش شد. کیتایاما و همکاران [۱۶] در تحقیقی به بهینه‌سازی شرایط فرآیندی به‌منظور دستیابی هم‌زمان به یک خط جوش و زمان تولید بهینه پرداختند. آن‌ها این کار را با استفاده از پروفیل سرعت تزریق متغیر و پروفیل فشار تزریق متغیر صورت دادند. به این منظور آن‌ها از بهینه‌سازی به کمک شبکه عصبی پایه‌ی شعاعی بهره گرفتند. در نتیجه این تحقیق، حل پارتوی پیشرو<sup>۴</sup> حاصل شد که

بجا ماده از گیت بر عیوب قطعات تزریقی داشتند. آن‌ها در این تحقیق با بررسی ۱۱ نازل مختلف و اندازه‌گیری اثر رد گیت بر قطعه با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونیکی، مشاهده کردند که با افزایش ارتفاع انتهای نازل و یا افزایش قطر انتهای آن، ارتفاع آثار بجا ماده از گیت می‌تواند کمتر شود. در حالی که پارامترهای زمان خنک کاری و سرعت باز شدن قالب به نظر تأثیر ناچیزی بر این موضوع دارند. کیتایاما و همکاران [۹] در تحقیقی سعی در بهینه‌سازی فرآیند تزریق پلاستیک به‌صورت چندهدفه داشتند. در این تحقیق آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای: پروفیل فشار نگهداری، دمای مواد، سرعت تزریق، دمای سیال خنک کار و مدت‌زمان خنک کاری و پارامترهای: زمان تولید و میزان اعوجاج قطعه به‌عنوان پارامتر هدف، سعی در کاهش مقادیر این پارامترها داشتند. آن‌ها با بکارگیری تابع پایه‌ی شعاعی<sup>۱</sup> نمودار پارتوی این دو پارامتر را ترسیم کردند و مقادیر بهینه را برای متغیرهای طراحی گزارش کردند. در این تحقیق هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج پیش‌بینی و نتایج آزمون صحت سنجی گزارش شد. لی و همکاران [۱۰] با در نظر گرفتن پارامترهای اعوجاج، انقباض و تنش پسماند در قطعات پلاستیکی به‌عنوان سه شاخص مهم برای سنجش کیفیت قطعه‌ی تولیدشده، با استفاده از بهینه‌سازی شرایط فرآیندی، سعی در بهبود کیفیت تولید قطعات کامپوزیتی داشتند. به این منظور آن‌ها از ترکیب روش تاگوچی، روش پاسخ سطح و روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده کردند. در انتهای بررسی، مشخص شد که بهترین روش برای بهینه‌سازی فرآیند تولید مواد پلاستیکی مقاوم شده با فیبر، ترکیب پاسخ سطحی با روش الگوریتم ژنتیک است. کیتایاما و همکاران [۱۱] در تحقیق سعی در کاهش هم‌زمان اعوجاج، زمان تولید و نیروی گیره بندی از طریق بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر داشتند؛ بنابراین یک بهینه‌سازی چندهدفه را روی فرآیند تزریق پلاستیک ترتیب دادند. در این بهینه‌سازی، متغیر طراحی، سیستم خنک کاری قالب تزریق بود. پس از انجام بهینه‌سازی به روش تابع پایه‌ی شعاعی، مقدار اعوجاج ۴۳٪، نیروی گیره بندی ۱،۷٪ و زمان تولید به میزان ۴۷٪ نسبت به تزریق با قالب دارای سیستم خنک کاری عادی کاهش پیدا کردند. گوئو و همکاران [۱۲] در تحقیقی با در نظر گرفتن پارامترهای دمای مواد، دمای قالب، دمای سیال خنک کار، عدد رینولدز سیال خنک کار،

2 GKriging

3 Pareto-optimal solution

4 Pareto-Frontier

1 Radial Basis Function (RBF)

دوتایی این تعداد پارامتر نیز مورد بحث نبوده است.

## ۲- بیان مسئله و اهداف

عیب برش جریان، عیبی ظاهری است که به شکل هاله‌ای سفیدرنگ اطراف محل تزریق قطعه بروز پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود این عیب کیفیت ظاهری قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین عمر مفید آن را کاهش می‌دهد.

به نظر می‌رسد هر عاملی که به نوعی در ایجاد تنش برشی در ماده مؤثر باشد، اعم از عوامل مربوط به شرایط فرآیندی یا هندسه‌ی قالب، می‌تواند در بروز یا تشدید این عیب تأثیرگذار باشد. بدین منظور در این تحقیق، هشت فاکتور با احتمال تأثیر در بروز این عیب جهت بررسی در نظر گرفته شده‌اند که عبارت‌اند از دمای مواد، دمای قالب، سرعت تزریق، فشار نگهداری، قطر راهگاه، قطر گیت، زاویه‌ی گیت و زاویه‌ی ورود به قالب. در این تحقیق علاوه بر طراحی آزمایش به کمک مینی‌تب، شبیه‌سازی المان محدود فرآیند با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو نیز انجام خواهد شد و صحت شبیه‌سازی‌ها نیز به کمک آزمون تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۳- روش تحقیق

جهت پیشبرد مسئله و انجام تحلیل المان محدود، باید مدل سه‌بعدی قطعه، راهگاه‌ها، اجزای قالب و مسیرهای خنک کاری طراحی شود. بدین منظور ابتدا هندسه‌ی قطعه در نرم‌افزار کتیا مطابق شکل ۲-الف مدل شد. سپس جهت طراحی سیستم راهگاهی، سیستم خنک کاری و بلوک قالب این هندسه به نرم‌افزار مولدفلو منتقل شد. نوع گیت



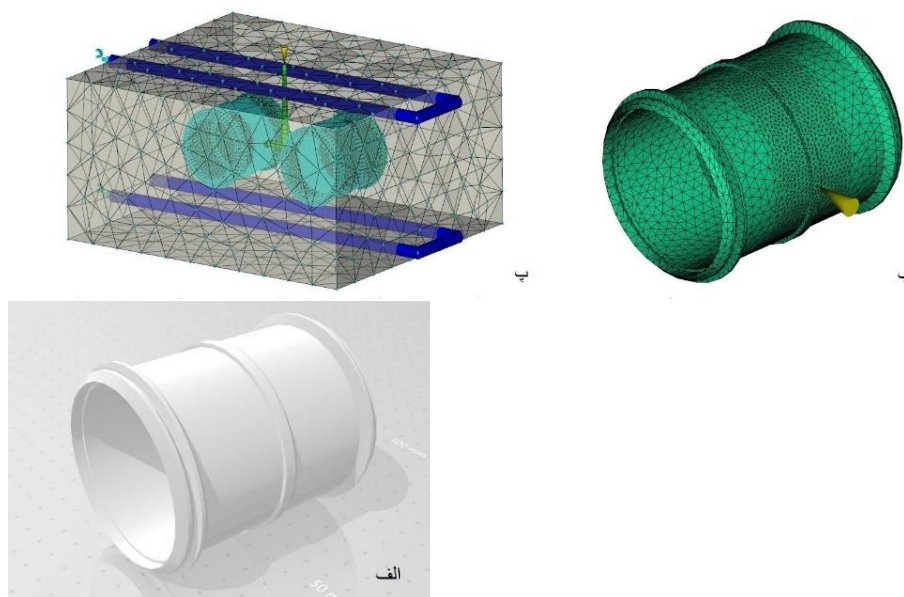
شکل ۱. عیب برش جریان در یک قطعه‌ی بوشن ۶۳ از جنس پی‌وی‌سی

Fig. 1. Blush defect in a bushing size 63 PVC part

می‌توان از بین چند حل بهینه، حل موردنظر را انتخاب کرد. تایال و کومار [۱۷] سعی در به‌کارگیری روش تعریف-اندازه‌گیری-آنالیز-بهبود-کنترل<sup>۱</sup> برای کاهش عیبی نظیر برش جریان، سوختگی، ایجاد سرباره سرد<sup>۲</sup>، پوسته‌شدن<sup>۳</sup> و جریان سرد<sup>۴</sup> از طریق تعیین سطوح مناسب برای پارامترهای مؤثر داشتند. پس از انجام بهینه‌سازی، درصد رد شدن قطعات تولیدی بر اثر عیب برش جریان از ۲/۵ به ۰/۸۶ کاهش یافت. همچنین با کاهش سرعت تزریق، درصد رد شدن قطعات بر اثر سوختگی از ۲/۶۸ به ۰/۷۸ و با سرعت ثابت ماردون میزان رد شدن قطعات تولیدی بر اثر جریان سرد از ۱/۲ به ۰/۶۸ کاهش پیدا کرد.

وجود عیب برش جریان در قطعات از جنس پلیمرهای پی‌وی‌سی در صنایع تولیدی لوله و اتصالات به‌وفور دیده می‌شود و باعث کاهش کیفیت در عملکرد و همچنین وجود عیب ظاهری در قطعه می‌گردد. در نتیجه لازم است پارامترهای مؤثر بر این عیب و میزان و نحوه تأثیر آن‌ها مشخص شود تا بتوان در حد امکان از بروز آن جلوگیری کرد. با وجود تمام تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی عیوب تزریق، طبق یافته‌ها، تاکنون تحقیقات بسیار اندک و انگشت‌شماری در مورد عوامل مؤثر در عیب برش جریان و میزان و نحوه‌ی تأثیر آن‌ها انجام‌شده است. همچنین در این تحقیق به بررسی اثر هشت پارامتر دمای مواد، دمای قالب، سرعت تزریق، فشار نگهداری، قطر راهگاه‌ها، قطر گیت، زاویه‌ی گیت و زاویه‌ی ورود به قالب روی شدت عیب برش جریان در یک قطعه بوشن ۶۳ از جنس پی‌وی‌سی پرداخته شده است که بررسی تأثیر این پارامترهای بخصوص و با این وسعت تعداد نسبت به کلیه تحقیقات پیشین امری نو محسوب می‌شود. این افزایش تعداد پارامترهای موردبررسی باعث خواهد شد تا دلایل بروز این عیب با دید وسیع‌تری بررسی شود. کما اینکه در این تحقیق پارامترهای جدیدی که بر عیب برش جریان مؤثرند و در هیچ‌یک از بررسی‌های پیشین حتی در نظر گرفته نشده بودند، شناسایی شد. همچنین در کلیه تحقیقات پیشین صرفاً تأثیر یا عدم تأثیر پارامترها بر عیب برش جریان بررسی شده است و تحقیقی که در مورد تعیین سطوح بهینه برای پارامترها باهدف دستیابی به قطعه با کمترین عیب ممکن بحث کرده باشد یافت نشد. قابل‌ذکر اینکه در هیچ‌یک از تحقیقات انجام‌شده‌ی یافت شده برخلاف تحقیق پیش‌رو، اثرات برهمکنش‌های

- 1 Define, Measure, Analyze, Improve, Controll (DMAIC)
- 2 Cold slug
- 3 Peeling
- 4 Cold flow



شکل ۲. الف) هندسه‌ی قطعه، ب) قطعه‌ی المان بندی شده، پ) هندسه‌ی قالب به همراه راهگاه‌ها و مسیر سیال خنک کار  
 Fig. 2. a) part geometry b) meshed part c) mold geometry including runners and cooling channels

جدول ۱. خواص مکانیکی و حرارتی بنویک-آی-آر۷۰۵

Table 1. Mechanical and thermal properties of Benvic IR705

مقدار	پارامتر
۱۶۰-۲۰۰ °C	حد مجاز دمای مذاب
۰/۲ MPa	حداکثر تنش برشی قابل تحمل
۲۰۰۰۰ ۱/s	حداکثر نرخ برش قابل تحمل
۱۲۰ °C	دمای تغییر حالت
۱۷۶۷ J/kg°C	گرمای ویژه در ۱۸۰ °C
۰/۱۳ W/m°C	ضریب انتقال حرارتی در ۱۸۰ °C
۱/۳۲۵۳ g/cm <sup>۳</sup>	چگالی مذاب
۱/۴۳۲۹ g/cm <sup>۳</sup>	چگالی جامد
۳۲۸۰ MPa	مدول الاستیک
۰/۴۲	ضریب پواسون
۱۱۶۰ MPa	مدول برشی
۷/۵E-۵ ۱/°C	ضریب انبساط حرارتی

#### ۴- مواد

ماده مورد استفاده در این شبیه‌سازی یک نوع پی‌وی‌سی است که توسط شرکت سالوی بلژیک<sup>۱</sup> با نام تجاری بنویک-آی-آر۷۰۵ تولید شده است. این نوع پی‌وی‌سی در تولید لوله و اتصالات کاربرد فراوان دارد و خواص مکانیکی، حرارتی و رئولوژیک آن مطابق جدول ۱ توسط سازنده‌ی ماده ارائه شده است.

در نظر گرفته شده برای قطعه، مشابه نقشه‌ی قالب قطعه‌ی مورد بررسی، از نوع اسپروبی است. ضمن طراحی این سیستم‌ها، قطعه به وسیله‌ی المان‌های سه‌بعدی مثلثی به تعداد ۴۵۹۰۹۶ المان برای هردو حفره‌ی قالب مطابق شکل ۲-ب المان بندی شد. اندازه المان کلی قطعه برابر ۳/۵ میلی‌متر، و به علت حساسیت بیشتر نواحی اطراف محل تزریق، اندازه المان این نواحی برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تصویری از مدل نهایی قبل از تحلیل در شکل ۲-پ ملاحظه می‌شود.

1 Solvay ET CIE Belgium



جدول ۲. مشخصات ماشین تزریق

Table 2. Injection machine specifications

مقدار	پارامتر
۳۴۸ g	حداکثر وزن قطعه
۲۱۱۸ kgf/cm <sup>۲</sup>	حداکثر فشار تزریق
۴۹۷ cm <sup>۳</sup> /s	حداکثر سرعت تزریق
۱۶۸ T	حداکثر نیروی گیره بندی
۴	تعداد نقاط کنترل حرارت مواد

جدول ۳. سطوح پارامترهای موردنظر برای انجام تحلیل‌های شبیه‌سازی

Table 3. Parameters levels for simulation analysis

دمای مواد °C	دمای قالب °C	سرعت تزریق g/cm <sup>۳</sup>	فشار نگهداری MPa	قطر راهگاه mm	قطر گیت mm	زاویه گیت درجه	زاویه ورود به قالب درجه	
۱۸۵	۲۵	۱۵	۶۰	۷	۲.۵	۰	۲۵	حد پایین
۱۹۵	۳۵	۲۵	۸۰	۱۰	۴.۵	۴۵	۴۵	حد بالا

جدول ۴. سطوح طراحی آزمایش ثانویه به روش مرکب مرکزی  
Table 4. Secondary DOE by Central Composite Design

شماره سطح	دمای مواد °C	سرعت تزریق g/cm <sup>۳</sup>	فشار نگهداری MPa	قطر راهگاه mm
۱	۱۸۵/۲	۱۲	۵۴/۶	۶/۴
۲	۱۸۷	۱۴	۵۹	۷
۳	۱۹۱	۱۹	۷۰	۸/۵
۴	۱۹۶	۲۴	۸۱	۱۰
۵	۱۹۷/۸	۲۶	۸۵/۴	۱۰/۶

طراحی سطح پاسخ<sup>۴</sup> به روش مرکب مرکزی<sup>۵</sup> با چهار فاکتور مؤثر شناخته شده انجام شد. سطوح این پارامترها در جدول ۴ آورده شده است. در این طراحی آزمایش تعداد ۳۱ آزمایش پیشنهاد داده شد که توسط نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی گردید. در این طراحی آزمایش، ضریب آلفا برابر ۱/۴ در نظر گرفته شد و سه داده‌ی میانی حدود اصلی‌اند و داده‌های شماره‌ی ۱ و ۵، داده‌های ستاره‌دار (مربوط به دامنه‌ی خارج از حدود اصلی) هستند.

#### ۷- نحوه‌ی اندازه‌گیری نتایج و صحت‌سنجی شبیه‌سازی

پس از انجام تحلیل‌های مشخص شده توسط طراحی آزمایش‌های

#### ۵- ابزار و تجهیزات

فرآیند تزریق به کمک یک ماشین تزریق مدل اسپید<sup>۱</sup> ۱۶۸ که توسط شرکت چن سانگ<sup>۲</sup> ساخته شده است انجام گرفت. مشخصات این ماشین که در کاتالوگ ماشین ذکر شده، در جدول ۲ آمده است.

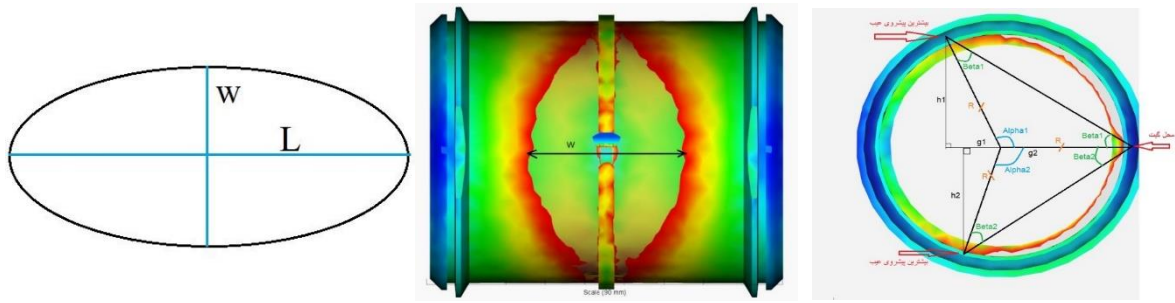
#### ۶- پارامترها و سطوح آزمایش

در طراحی آزمایش‌ها به‌وسیله‌ی نرم‌افزار مینی‌تب، در ابتدا یک طراحی عاملی کسری<sup>۳</sup> برای هشت پارامتر ذکر شده با نسبت ۱/۸ انجام شد و نرم‌افزار تعداد ۳۲ آزمایش را جهت انجام آزمون تجربی مشخص کرد. مقادیر پارامترهای ورودی دوسطحی در نظر گرفته شد. این دو سطح برای هشت پارامتر موردنظر در جدول ۳ آورده شده است. انتخاب حدود بالا و پایین این پارامترها بر اساس محدودیت کشش ماده مورد استفاده یا ظرفیت ماشین تزریق در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال، در نظر گرفتن دمایی بالاتر از ۱۹۸°C به‌عنوان حد بالای دمای مواد به‌احتمال زیاد باعث سوختن ماده‌ی تزریقی خواهد شد؛ بنابراین در تحقیق پیش‌رو، مقدار بیشینه‌ی این پارامتر با یک حاشیه اطمینان جزئی برابر ۱۹۵°C در نظر گرفته شده است.

همچنین پس از شناسایی پارامترهای مؤثر در این طراحی آزمایش اولیه و حذف پارامترهای غیر مؤثر، یک طراحی آزمایش ثانویه از نوع

- 1 Speed 168
- 2 Chen Hsong
- 3 Fractional factorial design

4 Response surface design  
5 Central Composite Design (CCD)



شکل ۳. تصاویری از عیب، به همراه مقادیر  $W, L, \alpha_1, \alpha_2$  و  $R$   
 Fig. 3. Pictures of defect, showing  $W, L, \alpha_1, \alpha_2$ , and  $R$

جدول ۵. صحت سنجی تحلیل‌های المان محدود  
 Table 5. Validation of FEA

درصد خطا	مساحت شبیه‌سازی $\text{mm}^2$	مساحت آزمون تجربی $\text{mm}^2$	فشار نگهداری MPa	سرعت تزریق $\text{g/cm}^3$	دمای مواد $^{\circ}\text{C}$	ردیف
۴٪/۹	۲۲۱۲	۲۱۰۸	۶۰	۱۵	۱۸۵	۱
۴٪/۲	۱۵۵۳	۱۶۲۱	۸۰	۱۵	۱۹۵	۲
۱۱٪/۸	۲۷۷۷	۲۴۸۳	۶۰	۲۵	۱۸۵	۳
۱٪/۳	۱۶۷۴	۱۶۹۶	۸۰	۲۵	۱۹۵	۴

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{h_2}{g_2} \quad (۴)$$

$$\alpha_2 = 180 - (2 \times \beta_2) \quad (۵)$$

$$\alpha_T = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (۶)$$

$$L = \frac{\alpha_T}{360} \times 2\pi R \quad (۷)$$

طبق معادله (۷)، می‌توان مقدار  $L$  را محاسبه کرد؛ بنابراین با توجه به مشخص شدن مقادیر  $L$  و  $W$  و طبق معادله (۱)، مساحت عیب در هریک از حالت‌ها محاسبه می‌گردد.

جهت صحت‌سنجی نتایج استخراج‌شده از تحلیل‌های المان محدود، چهار نمونه از آزمایش‌ها به صورت تجربی تست شد و با نتایج تحلیل المان محدود مقایسه گردید. نتایج این مقایسه در جدول ۵ آمده است. شایان‌ذکر است در این جدول، در تست‌های مربوط به طراحی آزمایش اول، این مقادیر طبق دو سطح گفته‌شده در جدول ۳ تغییر داده شدند و مقادیر پاسخ ناشی از این تغییرات در شبیه‌سازی المان محدود اندازه‌گیری شد و پس از انجام تحلیل واریانس روی نتایج

مرحله‌ی اول (هشت متغیره)، مقدار مساحت عیب به‌عنوان متغیر هدف انتخاب شد و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی مساحت، در نرم‌افزار مینی‌تب وارد شد. با توجه به تقریباً بیضوی بودن شکل عیب، از معادله محاسبه‌ی مساحت بیضی برای اندازه‌گیری مساحت عیب استفاده شد. نحوه محاسبه‌ی مساحت به شکل زیر است:  
 مساحت بیضی از معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$A = \pi \times \frac{L}{2} \times \frac{W}{2} \quad (۱)$$

$L$  قطر بزرگ و  $W$  قطر کوچک بیضی است؛ بنابراین برای محاسبه‌ی مساحت عیب به وجود آمده، با توجه به اینکه مقدار  $W$  قابل‌اندازه‌گیری است، مقدار  $L$  را باید محاسبه کرد. راه‌حل پیشنهادی برای محاسبه‌ی  $L$  با توجه به شکل ۳ در معادلات (۲) تا (۷) آمده است.

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{h_1}{g_1} \quad (۲)$$

$$\alpha_1 = 180 - (2 \times \beta_1) \quad (۳)$$

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس اول، داده‌های مربوط به طراحی آزمایش با پارامترهای هشت‌گانه‌ی دوسطحی

Table 6. Results of first ANOVA, using the data of 2-leveled DOE with 8 parameters

ردیف	منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار $F$	مقدار $P$
۱	مدل	۲۸	۹۵۸۸۹۱۳۵	۳۴۲۴۶۱۲	۱۳/۵۰	۰/۰۱۱
۲	پارامترهای خطی	۸	۶۴۸۴۲۷۵۸	۸۱۰۵۳۴۵	۳۱/۹۶	۰/۰۰۲
۳	دمای مواد	۱	۱۹۳۴۸۹۰۰	۱۹۳۴۸۹۰۰	۷۶/۳۰	۰/۰۰۱
۴	دمای قالب	۱	۸۷۰۰۴۴	۸۷۰۰۴۴	۳/۴۳	۰/۱۳۸
۵	سرعت تزریق	۱	۴۹۷۸۳۶۲	۴۹۷۸۳۶۲	۱۹/۶۳	۰/۰۱۱
۶	قطر راهگاه	۱	۳۲۴۸۸۹۰۵	۳۲۴۸۸۹۰۵	۱۲۸/۱۲	۰/۰۰۰
۷	قطر گیت	۱	۴۵۸۱۹۸	۴۵۸۱۹۸	۱/۸۱	۰/۲۵۰
۸	زاویه ورود به قالب	۱	۹۶۱۰۸	۹۶۱۰۸	۰/۳۸	۰/۵۷۱
۹	زاویه گیت	۱	۱۹۴۶	۱۹۴۶	۰/۰۱	۰/۹۳۴
۱۰	فشار نگهداری	۱	۶۶۰۰۲۹۶	۶۶۰۰۲۹۶	۲۶/۰۳	۰/۰۰۷
۱۱	برهمکنش‌های دوتایی	۲۰	۳۱۰۴۶۳۷۷	۱۵۵۲۳۱۹	۶/۱۲	۰/۰۴۶
۱۲	دمای قالب × دمای مواد	۱	۱۰۴۳۶۶۹	۱۰۴۳۶۶۹	۴/۱۲	۰/۱۱۲
۱۳	دمای مواد × سرعت تزریق	۱	۲۰۴۵۹	۲۰۴۵۹	۰/۰۸	۰/۷۹۰
۱۴	دمای مواد × قطر راهگاه	۱	۱۵۶۲۸۴۸۸	۱۵۶۲۸۴۸۸	۶۱/۶۳	۰/۰۰۱
۱۵	دمای مواد × قطر گیت	۱	۱۳۲۳۰۲۰	۱۳۲۳۰۲۰	۵/۲۲	۰/۰۸۴
۱۶	دمای مواد × زاویه ورود به قالب	۱	۱۹۲۸۷۱	۱۹۲۸۷۱	۰/۷۶	۰/۴۳۲
۱۷	دمای مواد × زاویه گیت	۱	۳۰۹۷۰۳	۳۰۹۷۰۳	۱/۲۲	۰/۳۳۱
۱۸	دمای مواد × فشار نگهداری	۱	۷۴۹۲۶۴	۷۴۹۲۶۴	۲/۹۵	۰/۱۶۱
۱۹	دمای قالب × قطر گیت	۱	۶۹۴۷۰۷	۶۹۴۷۰۷	۲/۷۴	۰/۱۷۳
۲۰	دمای قالب × فشار نگهداری	۱	۶۴۲۰۵۷	۶۴۲۰۵۷	۲/۵۳	۰/۱۸۷
۲۱	سرعت تزریق × قطر راهگاه	۱	۱۵۷۱۸۵۲	۱۵۷۱۸۵۲	۶/۲۰	۰/۰۶۸
۲۲	سرعت تزریق × قطر گیت	۱	۲۲۱۵۱۸	۲۲۱۵۱۸	۰/۸۷	۰/۴۰۳
۲۳	سرعت تزریق × زاویه گیت	۱	۱۸۴۰۶۳۵	۱۸۴۰۶۳۵	۷/۲۶	۰/۰۵۴
۲۴	سرعت تزریق × فشار نگهداری	۱	۳۱۱۶۴۸۳	۳۱۱۶۴۸۳	۱۲/۲۹	۰/۰۲۵
۲۵	قطر راهگاه × قطر گیت	۱	۸۰۰۷۵	۸۰۰۷۵	۰/۳۲	۰/۶۰۴
۲۶	قطر راهگاه × فشار نگهداری	۱	۲۴۷۷۲۸۳	۲۴۷۷۲۸۳	۹/۷۷	۰/۰۳۵
۲۷	قطر گیت × زاویه‌ی ورود به قالب	۱	۲۲۲۴۷۵	۲۲۲۴۷۵	۰/۸۸	۰/۴۰۲
۲۸	قطر گیت × زاویه‌ی گیت	۱	۱۰۳۳۷۲	۱۰۳۳۷۲	۰/۴۱	۰/۵۵۸
۲۹	قطر گیت × فشار نگهداری	۱	۷۸۲۵۵۵	۷۸۲۵۵۵	۳/۰۹	۰/۱۵۴
۳۰	زاویه‌ی ورود به قالب × فشار نگهداری	۱	۲۴۰۴۴	۲۴۰۴۴	۰/۰۹	۰/۷۷۴
۳۱	زاویه‌ی گیت × فشار نگهداری	۱	۱۸۴۸	۱۸۴۸	۰/۰۱	۰/۹۳۶



می‌رسد چهار پارامتر دمای قالب، قطر گیت، زاویه ورود به قالب و زاویه گیت تأثیر چندانی در این مورد نداشته باشند. پس از مشخص شدن پارامترهای مؤثر در طراحی آزمایش اولیه، با توجه به دوسطحی بودن این طراحی آزمایش به علت تعدد پارامترهای موردبررسی و عدم امکان در نظر گرفتن سطوح بیشتر برای اجتناب از انجام تعداد آزمایش‌های بسیار زیاد و غیرمنطقی، طراحی آزمایش دیگری به روش مرکب مرکزی با سطوح ذکرشده در جدول ۴ انجام شد تا با افزایش تعداد سطوح آزمایش و کم کردن فاصله‌ی بین سطوح، تغییرات پارامتر هدف در بازه‌های مشخص‌شده واضح‌تر و دقیق‌تر دیده شود. نتایج تحلیل واریانس حاصل از اندازه‌گیری مساحت عیب پس از شبیه‌سازی آزمایش‌های پیشنهادشده در طراحی آزمایش ثانویه در جدول ۷ مشاهده می‌شود:

بنابراین طبق جدول ۷، با بررسی دقیق‌تر از طریق در نظر گرفتن تعداد سطوح بیشتر برای پارامترهای چهارگانه‌ی مؤثر شناخته‌شده در مرحله‌ی قبل، تأثیر هر چهار پارامتر مجدداً تأیید شد. گفتنی است برهمکنش‌های دوتایی پارامترهای مؤثر، تأثیر قابل‌توجهی در نتایج نداشتند.

در تصاویر موجود در شکل ۴ نمودارهای مربوط به نحوه‌ی تأثیر پارامترهای مؤثر ملاحظه می‌شود.

همان‌طور که در تصاویر بالا مشاهده می‌شود، شیب زیاد نمودارها، حاکی از تأثیر چشمگیر تغییرات پارامترهای دمای مواد، سرعت تزریق، قطر راهگاه و فشار نگهداری در پاسخ به‌دست‌آمده دارد. با توجه به مقدار پی به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل واریانس و همان‌گونه که از شیب نمودارها پیداست، قطر راهگاه پارامتری است که بیشترین تأثیر را بر مساحت عیب برش جریان دارد. پس از آن پارامترهای فشار نگهداری، سرعت تزریق و دمای مواد به ترتیب بیشترین تأثیر را بر مساحت عیب دارند.

با تحلیل واریانس در نرم‌افزار مینی‌تب، معادله رگرسیونی جهت پیش‌بینی مساحت عیب با استفاده از همه پارامترهای ورودی استخراج شد. این معادله پس از حذف پارامترهای غیر مؤثر به‌صورت معادله (۸) خواهد شد.

$$Area = -12367 - (25.4 \times A) + (25.7 \times B) - (13.82 \times C) + (3898 \times D) - (193.2 \times D \times D) \quad (8)$$

که در آن A دمای مواد، B سرعت تزریق، C فشار نگهداری و D

شبیه‌سازی طراحی آزمایش اول، با توجه به غیر مؤثر شناخته شدن پارامترهای زاویه گیت، زاویه‌ی ورود به قالب و قطر گیت در نتایج آزمایش‌ها و همچنین وجود محدودیت برای محققین در ایجاد تغییر در هندسه‌ی قالب مورد استفاده، مقادیر  $0^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $10$  میلیمتر و  $3/5$  میلیمتر به‌صورت پیش‌فرض به ترتیب برای پارامترهای زاویه‌ی ورود به قالب، زاویه‌ی گیت، قطر راهگاه و قطر گیت در نظر گرفته شد. این مقادیر ثابت پیش‌فرض، صرفاً در آزمایش‌های صحت‌سنجی اعمال شدند و در هیچ‌یک از مراحل تحلیل‌المان محدود هیچ‌یک از پارامترها ثابت در نظر گرفته نشدند. همچنین با توجه به تأثیر ناچیز پارامتر دمای قالب، با توجه به تحقیقات انجام‌شده که نتایج آن در جدول ۶ قابل ملاحظه است، مقدار این پارامتر نیز برابر با  $35^\circ C$  و ثابت در نظر گرفته شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درصد خطای تحلیل‌المان محدود نسبت به آزمون تجربی در هر چهار آزمون، مقدار قابل قبولی است و متوسط خطا  $5/5\%$  است؛ لذا می‌توان به نتایج تحلیل‌المان محدود برای انجام مراحل بهینه‌سازی استفاده کرد.

## ۸- نتایج و بحث

اکنون پس از انجام تحلیل‌المان محدود، محاسبه‌ی مساحت‌ها و تحلیل واریانس بر روی نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت که کدام‌یک از پارامترهای هشت‌گانه، بیشترین تأثیر را روی عیب داشته است. در تحلیل واریانس انجام‌شده اثرات برهم‌کنش‌های دوتایی پارامترها نیز در نظر گرفته‌شده‌اند. نتایج تحلیل واریانس در جدول ۶ قابل ملاحظه است.

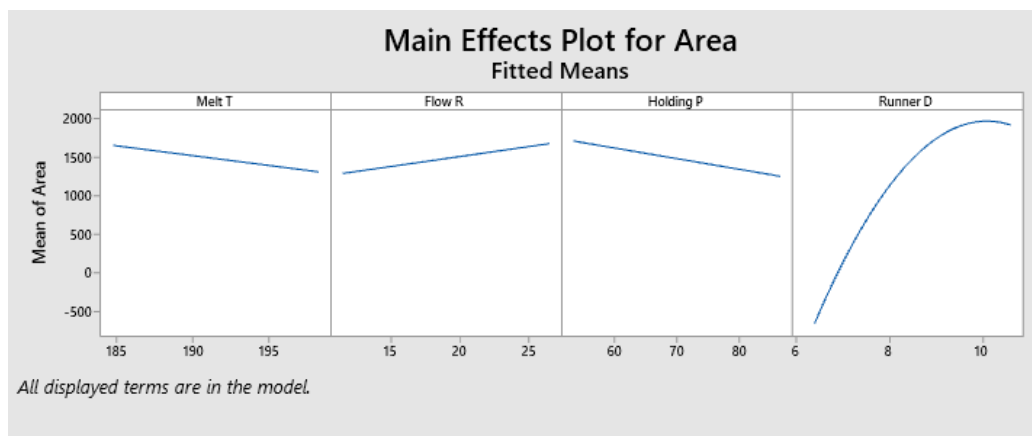
همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، چهار اثر تکی در ستون‌های شماره ۳، ۵، ۶ و ۱۰ و سه اثر دوتایی که در ستون‌های ۱۴، ۲۴ و ۲۶ تأثیر قابل‌توجهی در نتایج آزمایش داشته‌اند. این پارامترها بر اساس کمتر بودن مقدار پی<sup>۱</sup> از مقدار معنی‌دار  $0/05$  گزارش شده‌اند؛ بنابراین پارامترهای دمای مواد، سرعت تزریق، قطر راهگاه و فشار نگهداری، با توجه به کمتر بودن مقدار پی از  $0/05$  مؤثر شناخته می‌شوند و پارامترهای دمای قالب، قطر گیت، زاویه ورود به قالب و زاویه گیت تأثیر ناچیزی بر مساحت عیب دارند. توجه فیزیکی این امر می‌تواند این مسئله باشد که عیب برش جریان به علت گرانشی ماده مذاب و تجاوز تنش برشی ماده از حد مجاز رخ می‌دهد و به نظر

1 P-Value

جدول ۷. نتایج تحلیل واریانس دوم، داده‌های مربوط به طراحی آزمایش با پارامترهای چهارگانه‌ی پنج سطحی

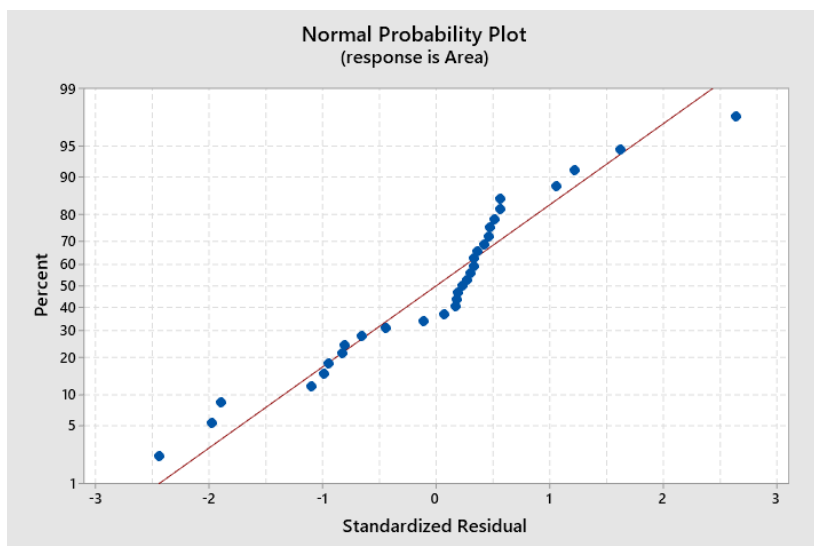
Table 7. Results of second ANOVA, using the data of 5-leveled DOE with 4 parameters

ردیف	منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار $F$	مقداری $P$
۱	مدل	۱۴	۲۰۴۸۶۰۶۳	۱۴۶۳۲۹۰	۱۳/۸۱	۰/۰۰۰
۲	پارامترهای خطی	۴	۱۷۸۹۴۳۲۲	۴۴۷۳۵۸۱	۴۲/۲۳	۰/۰۰۰
۳	دمای مواد	۱	۱۳۶۹۲۲۳	۱۳۶۹۲۲۳	۲/۴۵	۰/۰۵۰
۴	سرعت تزریق	۱	۱۲۰۹۳۱۰	۱۲۰۹۳۱۰	۳/۱۱	۰/۰۳۹
۵	فشار نگهداری	۱	۴۶۰۱۵۴	۴۶۰۱۵۴	۴/۷۴	۰/۰۲۷
۶	قطر راهگاه	۱	۱۶۸۴۵۶۳۵	۱۶۸۴۵۶۳۵	۱۵۹/۰۴	۰/۰۰۰
۷	مربعات	۴	۲۱۳۵۶۹۲	۵۳۳۹۲۳	۵/۰۴	۰/۰۰۸
۸	دمای مواد × دمای مواد	۱	۵۳۷۸۵	۵۳۷۸۵	۰/۵۱	۰/۴۸۶
۹	سرعت تزریق × سرعت تزریق	۱	۶۰۱۳	۶۰۱۳	۰/۰۶	۰/۸۱۵
۱۰	فشار نگهداری × فشار نگهداری	۱	۵۲۷	۵۲۷	۰/۰۰	۰/۹۴۵
۱۱	قطر راهگاه × قطر راهگاه	۱	۱۴۷۴۴۷۱	۱۴۷۴۴۷۱	۱۳/۹۲	۰/۰۰۲
۱۲	برهمکنش‌های دوتایی	۶	۴۵۶۰۴۹	۷۶۰۰۸	۰/۷۲	۰/۶۴۱
۱۳	دمای مواد × سرعت تزریق	۱	۴۷۸۹	۴۷۸۹	۰/۰۵	۰/۸۳۴
۱۴	دمای مواد × فشار نگهداری	۱	۹۶۵۸	۹۶۵۸	۰/۰۹	۰/۷۶۷
۱۵	دمای مواد × قطر راهگاه	۱	۵۰۹۱۷	۵۰۹۱۷	۰/۴۸	۰/۴۹۸
۱۶	سرعت تزریق × فشار نگهداری	۱	۱۲۶	۱۲۶	۰/۰۰	۰/۹۷۳
۱۷	سرعت تزریق × قطر راهگاه	۱	۱۷۵۴۹۶	۱۷۵۴۹۶	۱/۶۶	۰/۲۱۶
۱۸	فشار نگهداری × قطر راهگاه	۱	۲۱۵۰۶۳	۲۱۵۰۶۳	۲/۰۳	۰/۱۷۳
۱۹	خطا	۱۶	۱۶۹۴۷۶۵	۱۰۵۹۲۳		
۲۰	ناهمخوانی	۱۰	۱۶۹۱۷۶۱	۱۶۹۱۷۶	۳۳۷/۹۲	۰/۰۰۰
۲۱	خطای خالص	۶	۳۰۰۴	۵۰۱		
۲۲	مجموع	۳۰	۲۲۱۸۰۸۲۸			



شکل ۴. تأثیر چهار پارامتر دمای مواد، سرعت تزریق، فشار نگهداری و قطر راهگاه بر مقدار مساحت عیب

Fig. 4. Effect of 4 parameters of melt temperature, flow rate, holding pressure and runner diameter on area of defect



شکل ۵. نمودار مقادیر مانده‌ی معادله (۸) در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده  
**Fig. 5. Residual amounts of Eq. (8) compared to simulation results**

جدول ۸. مقایسه‌ی نتایج حاصل از معادله ارائه‌شده با نتایج آزمون تجربی

**Table 8. Comparison of results of presented equation and experimental results**

ردیف	دمای مواد °C	سرعت تزریق g/s	فشار نگهداری MPa	قطر راهگاه mm	مساحت عیب طبق معادله (۸)	مساحت عیب در آزمون تجربی	درصد خطای معادله (۸) از آزمون تجربی
۱	۱۸۵	۱۵	۶۰	۱۰	۲۱۵۰	۲۱۰۸	۲
۲	۱۹۱	۱۷	۷۰	۱۰	۱۹۱۱	۱۹۸۶	۳/۸
۳	۱۸۵	۲۵	۶۰	۱۰	۲۴۰۷	۲۴۸۳	۳/۱
۴	۱۹۵	۲۵	۸۰	۱۰	۱۸۷۷	۱۶۹۶	۱۰/۷

نشان‌دهنده‌ی قطر راهگاه است.

نمودار توزیع نرمال در شکل ۵ نشان می‌دهد که داده‌های آزمون‌های واقعی تا چه حد نزدیک به معادله ارائه‌شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب هستند.

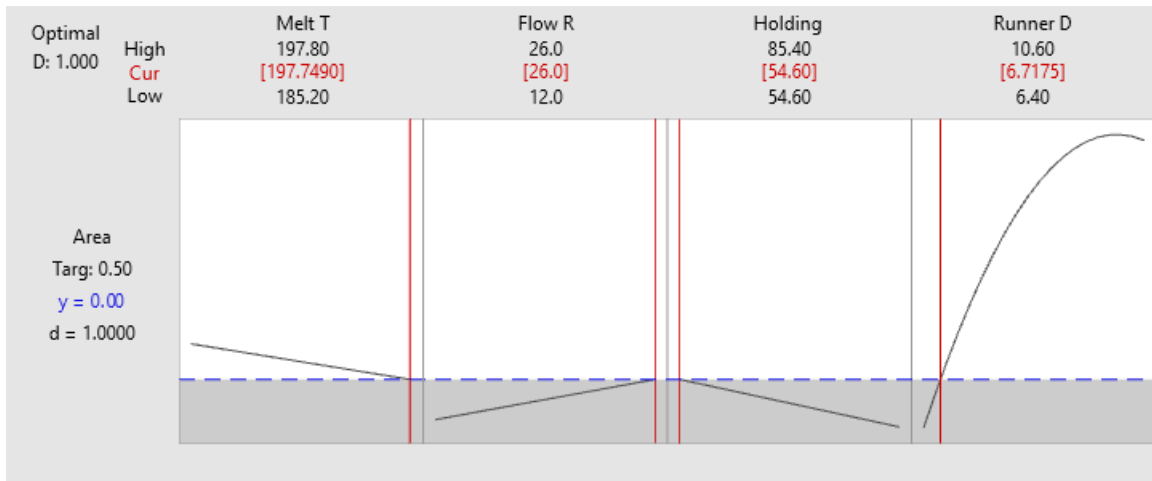
همچنین میزان دقت معادله ارائه‌شده را می‌توان در جدول ۸ که مقایسه‌ای است بین مقادیر مساحت عیب محاسبه‌شده با معادله (۸) و مساحت اندازه‌گیری‌شده از آزمون تجربی ملاحظه کرد. در این جدول پارامترهای زاویه‌ی گیت، زاویه‌ی ورود به قالب، قطر گیت و دمای قالب، به‌صورت پیش‌فرض برابر با مقادیر موجود در قالب مورد تست و برابر با  $۴۵^\circ$ ،  $۰^\circ$ ،  $۳/۵$  میلی‌متر و  $۳۵^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده است. از همین مقادیر پیش‌فرض در کلیه تحلیل‌های المان محدود چهار پارامتری استفاده شد.

همان‌گونه که از محاسبات ارائه‌شده در جدول ۸ برمی‌آید، با

توجه به میانگین درصد خطای اندازه‌گیری شده که برای چهار آزمون صحت سنجی انجام‌شده برابر  $۴/۹\%$  و بیشینه خطای آزمایش‌شده که برابر  $۱۰/۷\%$  است، معادله ارائه‌شده توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی مساحت عیب دارد.

پس از انجام بهینه‌سازی روی نتایج حاصله، مقدار سطوح بهینه‌ی  $۶/۴$  میلی‌متر،  $۸۵/۴$  مگاپاسکال،  $۲۶\text{ cm}^2/\text{s}$  و  $۱۹۷/۸^\circ\text{C}$  به ترتیب برای پارامترهای قطر راهگاه، فشار نگهداری، سرعت تزریق و دمای مواد به دست آمد. در شکل ۶ و جدول ۹ می‌توان پارامترهای بهینه و مساحت عیب پس از بهینه‌سازی تئوری را ملاحظه کرد.

بنابراین همان‌گونه که از شکل ۶ و جدول ۹ پیداست، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مؤثر در عیب برش جریان جهت حداقل کردن مساحت عیب ارائه شد. با به‌کارگیری پارامترهای بهینه‌شده در یک شبیه‌سازی سعی شد تا مقدار مساحت عیب پس از بهینه‌سازی



شکل ۶. سطوح بهینه‌ی پارامترهای مؤثر و مقدار مساحت بهینه‌ی عیب برش جریان  
**Fig. 6. Optimal levels of effective parameters and resulted area of Blush defect**

جدول ۹. سطوح بهینه‌ی پارامترهای مؤثر و مقدار مساحت بهینه‌ی عیب برش جریان  
**Table 9. Optimal levels of effective parameters and the area of Blush defect**

مطلوبیت مرکب <sup>۱</sup>	مساحت بهینه mm <sup>۲</sup>	قطر راهگاه mm	فشار نگهداری MPa	سرعت تزریق g/s	دمای مواد °C	شماره حل
۱	۰	۶/۷	۵۴/۶	۲۶	۱۹۷/۷	۱

1 -Composite Desirability

جدول ۱۰. مقایسه‌ی مساحت عیب، قبل و بعد از بهینه‌سازی  
**Table 10. Comparison of Blush defect before and after the optimization**

مساحت عیب mm <sup>۲</sup>	قطر راهگاه mm	فشار نگهداری MPa	سرعت تزریق g/s	دمای مواد °C	عنوان
۱۹۷۸	۱۰	۳۵	۱۲	۱۹۷	قطعه‌ی اولیه
۳۵۱	۶/۷	۵۴/۶	۲۶	۱۹۷/۷	قطعه‌ی با پارامترهای بهینه در شبیه‌سازی

کاهش قطر راهگاه، مواد با سرعت بیشتری از بوش تزریق و راهگاه‌ها عبور می‌کنند و در نتیجه قبل از ورود به حفره‌ی اصلی فرصت کمتری برای سرد شدن و افزایش گرانیروی دارند. این کاهش گرانیروی باعث کاهش میزان تنش برشی می‌شود و در نتیجه مواد کمتری از حد مجاز تنش برشی تجاوز می‌کنند که این امر باعث ظهور خفیف‌تر عیب برش جریان می‌گردد. همچنین با تنظیم فشار نگهداری در یک سطح مناسب، می‌توان یک تعادل بین فشار درون قالب و فشار نگهداری ایجاد کرد به گونه‌ای که پس از سرد شدن و افزایش گرانیروی مواد، علاوه بر ممانعت از خروج مواد تزریق‌شده از قالب، ماده جدید بر اثر فشار بیش از حد نیز وارد قالب نشود. این امر به ثبات مواد در قالب در حین سرد شدن کمک می‌کند و احتمال بیشتر شدن تنش برشی

اندازه‌گیری شود. در جدول ۱۰ مقدار این مساحت در مقایسه با مساحت عیب در تزریق با پارامترهای قبل از بهینه‌سازی مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از مساحت‌های ارائه‌شده در جدول بالا مشخص است، مساحت عیب در قطعه‌ی تولیدشده با پارامترهای بهینه‌سازی شده به روش ارائه‌شده، به نسبت قطعه‌ی اولیه‌ی تولیدی، به میزان ۸۲/۲٪ (حدود یک‌پنجم مساحت عیب پیش از بهینه‌سازی) کاهش پیدا کرده است. این کاهش مساحت عیب به علت تغییر سطوح پارامترهای مؤثر در عیب به سطوح بهینه‌شده رخ داده است. از نظر فیزیکی با توجه به گرانیروی کمتر پلیمر در دمای بالاتر، پیشنهاد افزایش دمای ماده قابل توجه است. همچنین با توجه به پیشنهاد افزایش سرعت تزریق و

راهگاه، سرعت تزریق، دمای مواد و فشار نگهداری.

- مشخص شد که مساحت عیب با کاهش قطر راهگاه‌ها و سرعت تزریق رابطه‌ی مستقیم و با افزایش دمای مواد و فشار نگهداری رابطه‌ی عکس دارد.
- پس از انجام بهینه‌سازی روی فاکتورهای مؤثر، مقدار مساحت عیب برش جریان در قطعه‌ی تولیدشده، به اندازه‌ی ۸۲/۲٪ کاهش پیدا کرد.

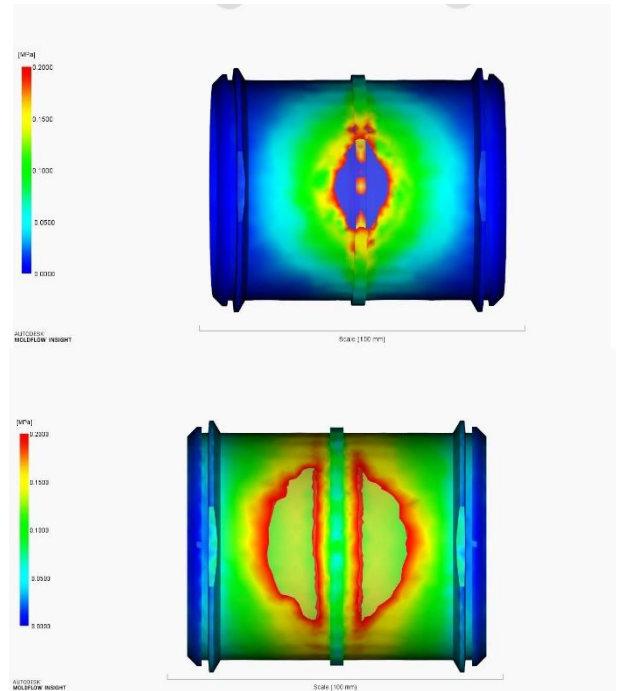
#### ۱۰- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

مساحت عیب، $\text{mm}^2$	<i>Area</i>
دمای مواد، $^{\circ}\text{C}$	<i>A</i>
سرعت تزریق، g/s	<i>B</i>
قطر راهگاه، mm	<i>C</i>
فشار نگهداری، MPa	<i>D</i>
ارتفاع لبه‌ی عیب در نیمه‌ی بالایی قطعه از محل تزریق، mm	<i>h1</i>
ارتفاع لبه‌ی عیب در نیمه‌ی پایینی قطعه از محل تزریق، mm	<i>h2</i>
فاصله‌ی افقی لبه‌ی عیب در نیمه‌ی بالایی قطعه از محل تزریق، mm	<i>g1</i>
فاصله‌ی افقی لبه‌ی عیب در نیمه‌ی پایینی قطعه از محل تزریق، mm	<i>g2</i>
قطر بزرگ عیب بیضی‌شکل در راستای محیط قطعه، mm	<i>L</i>
شعاع قطعه، mm	<i>R</i>
قطر کوچک عیب بیضی‌شکل در راستای محور قطعه، mm	<i>W</i>

##### علائم یونانی

زاویه‌ی بین خط واصل بیشترین پیشروی عیب و مرکز قطعه و محل تزریق با مرکز قطعه در نیمه‌ی بالایی قطعه، $^{\circ}$	$\alpha_1$
زاویه‌ی بین خط واصل بیشترین پیشروی عیب و مرکز قطعه و محل تزریق با مرکز قطعه در نیمه‌ی پایینی قطعه، $^{\circ}$	$\alpha_2$
زاویه‌ی بین خط واصل محل تزریق و بیشترین پیشروی عیب و خط واصل محل تزریق و مرکز قطعه در نیمه‌ی بالایی قطعه، $^{\circ}$	$\beta_1$
زاویه‌ی بین خط واصل محل تزریق و بیشترین پیشروی عیب و خط واصل محل تزریق و مرکز قطعه در نیمه‌ی پایینی قطعه، $^{\circ}$	$\beta_2$
زاویه‌ی بین خطوط واصل بیشترین پیشروی عیب در نیمه‌های بالایی و پایینی قطعه با مرکز قطعه، $^{\circ}$	$\alpha_T$



شکل ۷. تصاویر مربوط به قبل (سمت راست) و بعد (سمت چپ) از بهینه‌سازی پارامترها  
**Fig. 7. Pictures related to before (right hand side) and after (Left hand side) the optimization**

مواد اطراف محل تزریق قالب را کاهش می‌دهد. در تصاویر ارائه‌شده در سمت راست و چپ شکل ۷ به ترتیب نتایج تحلیل المان محدود مربوط به پارامترهای قبل و بعد از بهینه‌سازی مشاهده می‌شود.

#### ۹- نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر یا عدم تأثیر هشت فاکتور دمای مواد، سرعت تزریق، فشار نگهداری، دمای قالب، قطر راهگاه، قطر گیت، زاویه‌ی گیت و زاویه‌ی ورود به قالب بر بروز عیب برش جریان در قطعات بوشن ۶۳ با جنس پی‌وی‌سی انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این بررسی به‌طور مختصر از این‌قرار است:

- در طراحی آزمایش دوسطحی و تحلیل واریانس مشخص شد که پارامترهای دمای مواد، سرعت تزریق، فشار نگهداری و قطر راهگاه بر مساحت بروز عیب برش جریان مؤثرند و پارامترهای دمای قالب، قطر گیت، زاویه‌ی گیت و زاویه‌ی ورود به قالب بر مساحت عیب تأثیر چندانی ندارند.

- پس از انجام تحلیل دوم، با چهار فاکتور و پنج سطح، ترتیب تأثیر فاکتورهای مؤثر، از مؤثرتر به کم‌طاقت به این صورت است: قطر

## ۱۱- مراجع

- 3999-3991 (2017).
- [10] K. Li, S. Yan, Y. Zhong, W. Pan, G. Zhao, Multi-objective optimization of the fiber-reinforced composite injection molding process using Taguchi method, RSM, and NSGA-II, *Simulation Modelling Practice and Theory*, (2019) 91 82-69.
- [11] S. Kitayama, K. Tamada, M. Takano, S. Aiba, Numerical and experimental investigation on process parameters optimization in plastic injection molding for weldlines reduction and clamping force minimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2098-2087 (2018) (5)97.
- [12] W. Guo, F. Deng, Z. Meng, L. Hua, H. Mao, J. Su, A hybrid back-propagation neural network and intelligent algorithm combined algorithm for optimizing microcellular foaming injection molding process parameters, *Journal of Manufacturing Processes*, 538-528 (2020) 50.
- [13] S. Kitayama, K. Tamada, M. Takano, S. Aiba, Numerical optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing weldlines and clamping force using conformal cooling channel, *Journal of Manufacturing Processes*, 790-782 (2018) 32.
- [14] S.Y. Martowibowo, A. Kaswadi, Optimization and simulation of plastic injection process using genetic algorithm and moldflow, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 406-398 (2017) (2)30.
- [15] S. Li, X. Fan, H. Huang, Y. Cao, Multi-objective optimization of injection molding parameters, based on the Gkriging-NSGA-vague method, *Journal of Applied Polymer Science*, 48659 (2020) (19)137.
- [16] S. Kitayama, S. Hashimoto, M. Takano, Y. Yamazaki, Y. Kubo, S. Aiba, Multi-objective optimization for minimizing weldline and cycle time using variable injection velocity and variable pressure profile in plastic injection molding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3361-3351 (2020) (7)107.
- [17] V. Tayal, J. Kumar, Improvement in production rate by reducing the defects of injection moulding, *International Journal of Computer Science and Communication Engineering*, 4-1 (2012) (5)3.
- [1] H. Oktem, T. Erzurumlu, I. Uzman, Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part, *Materials & design*, 1278-1271 (2007) (4)28.
- [2] M. Juraeva, K. Ryu, D. Song, Gate shape optimization using design of experiment to reduce the shear rate around the gate, *International Journal of Automotive Technology*, 666-659 (2013) (4)14.
- [3] 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, *Materials & design*, 1850-1844 (2011) (4)32.
- [4] R. Wang, J. Zeng, X. Feng, Y. Xia, Evaluation of effect of plastic injection molding process parameters on shrinkage based on neural network simulation, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, -206 (2013) (1)52 221.
- [5] C.-P. Chen, M.-T. Chuang, Y.-H. Hsiao, Y.-K. Yang, C.-H. Tsai, Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis, *Expert Systems with Applications*, 10759-10752 (2009) (7)36.
- [6] J. Lladó, B. Sánchez, Influence of injection parameters on the formation of blush in injection moulding of PVC, *Journal of materials processing technology*, (3-1)204 7-1 (2008).
- [7] H.B. He, F.L. Wu, Y.M. Deng, Injection Molding Process Parameter Optimization for Warpage Minimization Based on Moldflow, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2012, pp. 257-254.
- [8] T. Tábi, A. Suplicz, F. Szabó, N.K. Kovács, B. Zink, H. Hargitai, J.G. Kovács, The analysis of injection molding defects caused by gate vestiges, *Express Polymer Letters*, 400-394 (2015) (4)9.
- [9] S. Kitayama, M. Yokoyama, M. Takano, S. Aiba, Multi-objective optimization of variable packing pressure profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing warpage and cycle time, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (9)92



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mollaei Ardestani, GH. Azamirad, *Study and optimization of effective parameters in the occurrence of Blush defect in the plastic injection molding process by analysis of variance*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(10) (2022) 5293-5308.

DOI: [10.22060/mej.2021.19260.6990](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19260.6990)



