



## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند قالب‌گیری تزریقی قطعات پلی اتر ایمید با روش ترکیبی تاگوچی - تحلیل رابطه خاکستری

کامیاب علی عسکری<sup>۱</sup>، شهرام اعتمادی حقیقی<sup>۲\*</sup>، عادل مقصود پور<sup>۲</sup>

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

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: setemadi@srbiau.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ تیر ۱۴۰۲

پذیرش: ۴ آذر ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

بهینه‌سازی

قالب تزریق پلاستیک

روش تاگوچی

تحلیل رابطه خاکستری

مولدفلو

انتخاب پارامترهای فرآیندی مناسب در فرآیند قالب‌گیری قطعات با استفاده از قالب‌های تزریق پلاستیک برای تولید قطعاتی با کیفیت، امری مهم و ضروری است. هدف از این مقاله انتخاب پارامترهای فرآیندی مناسب و بهینه‌سازی آنان برای قالب‌گیری ۸ قطعه مختلف از جنس پلی اتر ایمید است. در ابتدا بر اساس تحقیقات گذشته و توانایی‌های نرم‌افزار شبیه‌سازی مولدفلو، پارامترهای فرآیندی مناسب انتخاب شدند. این پارامترها شامل دمای ذوب، دمای سطح قالب، فشار نگهداری و دمای ورودی سیال خنک‌کاری بودند. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار مولدفلو بر مبنای آرایه‌های متعامد L25 روش تاگوچی انجام گرفتند. سپس نتایج مهم و قابل مقایسه شامل انقباض حجمی، مکش، اعوجاج (انحراف) و درصد انجماد در قطعات از شبیه‌سازی‌ها استخراج شدند. در نهایت با به کارگیری روش تحلیل رابطه خاکستری، بهینه‌سازی بر اساس این نتایج انجام گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهند که در تمامی ضریب تمایزهای روش تحلیل رابطه خاکستری (۰/۱ الی ۰/۹) دمای ذوب ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد، دمای سطح قالب ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نگهداری برابر با ۱۰۰ درصد فشار تزریق و دمای سیال خنک‌کاری ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای سطح قالب بهینه‌ترین سطح‌ها بودند. همچنین بر اساس نتایج آنالیز واریانس در تمامی ضریب تمایزها نیز پارامترهای دمای ذوب و فشار نگهداری به ترتیب اثرگذارترین پارامترها بودند.

## Simulation and optimization of molding process parameters of ployetherimide parts by Taguchi-grey relational analysis combined method

Kamyab Ali Askari<sup>1</sup>, Shahram Etemadi haghghi<sup>2\*</sup>, Adel Maghsoudpour<sup>2</sup>

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: setemadi@srbiau.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 3 July 2023

Accepted: 25 November 2023

#### Keywords:

Optimization

Plastic Injection Mold

Taguchi Method

Grey Relational Analysis

Moldflow

### Abstract

In the process of molding parts using the plastic injection molding method, it is key essential to apply appropriate parameters in order to produce a qualified product. The purpose of this paper is to choose helpful production parameters and optimize them for molding eight different parts made from Polyetherimide. In the beginning, based on the previous research and the capabilities of Mold Flow software, appropriate process parameters were chosen. These parameters were: melt temperature, mold surface temperature, packing pressure and coolant inlet temperature. The simulations in Mold Flow software were done based on Taguchi's L25 orthogonal array. Afterward, the critical and comparable results including: volumetric shrinkage, sink mark, warpage and the percentage of frozen volume in parts were exported from the simulations. Eventually, the optimizations were made based on these results by applying the gray relational analysis. The optimizing results show that in all distinguishing coefficients of the gray relational analysis (0.1 to 0.9), the melt temperature was 360 °C, the mold surface temperature was 140 °C, the packing pressure was 100% of the injection pressure and the coolant inlet temperature was 12.5 °C lower than the mold surface temperature of the most optimized ones. Also based on the ANOVA results, in all difference indices, parameters of melt temperature and packing pressure were respectively the most effective.

### Please cite this article using:

Ali Askari K, Etemadi haghghi Sh, Maghsoudpour A. Simulation and optimization of molding process parameters of ployetherimide parts by Taguchi-grey relational analysis combined method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 July 23;10(5):19-43. doi: 10.22034/IJME.2023.399399.1801 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

در صنعت، طراحی و ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک و همچنین فرآیند آماده‌سازی قالب‌گیری قطعات بسیار زمان بر و پرهزینه هستند به طوری که بسیاری از اوقات در طراحی، ساخت و فرآیند تزریق یک قالب به روش کارگاهی به علت مشخص نبودن پارامترهای فرآیندی مناسب سبب اصلاح قالب، تکرار ماشین‌کاری، تزریق متعدد مواد و... می‌شوند که در نتیجه تلف شدن انرژی، مواد، زمان و هزینه‌های زیاد به منظور رسیدن به نتایج مناسب را به همراه خواهند داشت [۱].

مطالعاتی از تحقیقات انجام شده در زمینه قالب‌های تزریق پلاستیک توسط پژوهشگران در رابطه با پارامترهای ورودی فرآیند و روش‌های تحلیل و بهینه‌سازی این پارامترها بر اساس عیوب محصولات قالب‌گیری شده نشان می‌دهند که پارامترهای ورودی برجسته شامل دمای مذاب، ماده تزریق، دمای قالب، فشار تزریق، فشار نگه‌دارنده ماده تزریق، زمان تزریق و زمان خنک‌کاری هستند. نمونه روش‌ها و ابزارهایی که به منظور تحلیل و بهینه‌سازی توسط پژوهشگران استفاده شده‌اند شامل روش تاگوچی، روش تحلیل رابطه خاکستری (GRA)<sup>۱</sup>، نرم‌افزار مولدفلو<sup>۲</sup>، آنالیز واریانس (ANOVA)<sup>۳</sup>، انواع نرم‌افزارهای طراحی هستند. همچنین عیب‌های برجسته در قطعات تولیدی شامل اعوجاج قطعات، انقباض، تشکیل خط جوش بر روی قطعات هستند که پژوهشگران با بهینه‌سازی و استفاده از پارامترهای ورودی فرآیند مناسب برای به حداقل رساندن این عیوب متمرکز شده‌اند [۲].

برای بهینه‌سازی پدیده‌هایی که دارای چند تابع پاسخ هستند روش‌های مختلفی وجود دارد یکی از این روش‌ها روش تحلیل رابطه خاکستری است همچنین اگر روش تحلیل رابطه خاکستری و روش تاگوچی هم‌زمان در کنار یکدیگر استفاده شوند می‌توان با انجام تعداد کمتری از آزمایش‌ها یک پدیده با چند تابع پاسخ را بررسی و بهینه‌سازی نمود [۳]. پژوهشگران بسیاری در حوزه مهندسی مکانیک به منظور بهینه‌سازی از روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات لین در بهینه‌سازی پارامترهای برش عملیات ماشین‌کاری [۴]، توسان در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند مته‌زنی [۵]، کو و همکاران در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی مؤثر بر عملکرد کلکتور صفحه تخت خورشیدی<sup>۴</sup> [۶]، همچنین در زمینه فرآیندی قالب‌های تزریق پلاستیک تحقیقات سرید هران و جوانا نتهام در بهبود عیب‌های خط جوش و مکش [۷]، علی و همکاران در بهبود خواص مکانیکی استحکام کشش نهایی، مدول و درصد کشیدگی [۸] و کومار و همکاران در بهبود انقباض، تاب خوردگی و زبری سطح [۹] به عنوان نمونه‌هایی اشاره کرد. در همه تحقیقات اشاره شده نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این روش ترکیبی در بهبود شرایط بر اساس بهینه‌سازی پارامترهای ورودی مؤثر بوده است [۹،۴].

یکی از ابزارهایی که در بهبود شرایط فرآیند تزریق و حتی طراحی و ساخت قالب بسیار کمک می‌کند استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است. مولدفلو یکی از این نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است که پژوهشگران بسیاری از این نرم‌افزار به منظور بهبود شرایط قالب‌های تزریق پلاستیک در تحقیقات خود از آن استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات گاناوان و آنگونو در بهبود کیفیت تولید فنجان پلاستیکی [۱۰]، یانگ و ژو در بهبود کیفیت و کاهش اعوجاج قطعه‌ای از دستگاه کپی [۱۱]، زی او و همکاران در محاسبه نرخ انقباض و عوامل تأثیرگذار بر نرخ انقباض برای سپر عقب یک خودرو [۱۲]، ویشنوو ارتهانان و همکاران در بهینه‌سازی زمان چرخه فرآیند یک قطعه پلاستیکی [۱۳]، سالانکه و همکاران در رفع عیب‌های انقباض، خط جوش، حباب‌های هوا و مکش برای قطعه اسباب بازی [۱۴]، آندهالکار و دالاگه در پیدا کردن محل تزریق مناسب برای قطعه درب بطری به منظور بهبود زمان تزریق، کیفیت و رفع عیب‌های خط جوش، انقباض و حباب‌های هوا [۱۵]، سدریک و هووا در بهبود سیستم خنک‌کاری و زمان چرخه فرآیند برای پوسته چراغ جلوی خودرو [۱۶] و لیمبوره و کاله در بهبود عیب‌های خط جوش، حباب‌های هوا، مکش و اعوجاج قطعه درپوش پلاستیکی بر اساس تغییر طراحی در سیستم تزریق قالب [۱۷] اشاره کرد. در تحقیقات اشاره شده نتایج نشان می‌دهند که استفاده از شبیه‌سازی در بهبود شرایط فرآیند تزریق، طراحی و ساخت قالب‌های تزریق مؤثر بوده است [۱۷،۱۰].

از دیگر از حالت‌های بهینه‌سازی استفاده از شبیه‌سازی در کنار روش تاگوچی بر اساس یک تابع پاسخ و یا روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری بر اساس چند تابع پاسخ است. در این حالت علاوه بر جلوگیری از انجام آزمایش‌های متعدد، استفاده از

<sup>1</sup> Grey Relational Analysis

<sup>2</sup> Moldflow

<sup>3</sup> Analysis of Variance

<sup>4</sup> Solar Flat-Plate Collector

شبیه‌سازی آزمایش‌ها جایگزین آزمایش‌های واقعی می‌شود. که در نتیجه آن از هدر رفت مواد و انرژی جلوگیری خواهد شد. به عنوان نمونه در تحقیقات علی و همکاران در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند تزریق ۴ قطعه از جنس پلی‌پروپیلن از روش تاگوچی و شبیه‌سازی استفاده شده که پارامترهای ورودی فرآیند شامل دمای قالب، دمای ذوب ماده، زمان تزریق ماده و زمان خنک کاری بر اساس پاسخ‌های انحراف، انقباض حجمی و تنش پسماند بهینه‌سازی می‌شوند. پارامترهای فرآیند در ۳ سطح مورد بررسی قرار داده شدند. با توجه به توانایی روش تاگوچی در تحلیل یک تابع پاسخ، به کمک نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها برای بهبود هر یک از عیوب به طور جداگانه پارامترهای فرآیند بهینه به دست آمدند [۱۸]. نیه و همکاران از روش تاگوچی و شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند قطعه پوشش موتور شامل دمای ذوب ماده، دمای قالب، فشار نگهداری و موقعیت گیت تزریق بر اساس بحرانی‌ترین مقدار اعوجاج استفاده کردند. پارامترهای فرآیند در ۳ سطح مورد بررسی قرار گرفته و بهینه‌ترین سطح‌ها استخراج شدند [۱۹].

همچنین در تحقیقات ساتش و همکاران از روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری به همراه شبیه‌سازی مولد فلو برای بررسی و بهینه‌سازی پارامتر فرآیندی استفاده شده‌اند. در این تحقیقات پارامترهای ورودی فرآیند شامل دمای ذوب ماده، دمای قالب و زمان تزریق در سه سطح برای دو قطعه قالب‌گیری از جنس‌های پلی‌کربنات و ABS بر اساس پاسخ‌های انحراف قطعات، انقباض، زمان چرخه و کیفیت قطعات مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین در این دو تحقیق ضریب تمایز<sup>۱</sup> مربوط به روش تحلیل رابطه خاکستری ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است [۱، ۲۰]. در تحقیق ساعدون و همکاران از روش تاگوچی و روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند قطعه آینه دهانی یک بار مصرف شامل دمای ذوب ماده، نرخ تزریق، زمان خنک کاری و دمای قالب بر اساس انقباض حجمی و اعوجاج استفاده شده‌اند. در این تحقیق پارامترهای بهینه برای هر یک از عیب‌های انقباض حجمی و اعوجاج به طور مستقل و با یکدیگر با کمک روش‌های گفته شده به دست آمدند [۲۱].

در روابط مربوط به روش تحلیل رابطه خاکستری یک پارامتر مهم بنام ضریب تمایز وجود دارد هدف از این ضریب گسترش یا فشرده‌سازی دامنه ضریب رابطه خاکستری<sup>۲</sup> از روش تحلیل رابطه خاکستری است [۲۲]. این ضریب در بازه (۰،۱) قرار دارد و معمولاً پژوهشگران این ضریب را ۰/۵ در نظر می‌گیرند با اینکه منطق پشت این فرض هنوز ثابت نشده است [۲۳]. تحقیقات انجام گرفته در رابطه با روش تحلیل رابطه خاکستری نشان می‌دهند که بر عکس استدلال برخی از پژوهشگران تغییر در ضریب تمایز می‌تواند در ترتیب رتبه‌بندی نتایج این روش اثر بگذارد [۲۴]. بر همین اساس با توجه به تأثیر ضریب تمایز در نتایج روش تحلیل رابطه خاکستری بهتر است که در استفاده از این روش ضریب تمایزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آنان بر نتایج روش تحلیل رابطه خاکستری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد [۲۵].

باتوجه به مرور تحقیقات انجام گرفته مشخص می‌شود که در زمینه قالب‌های تزریق پلاستیک از شبیه‌سازی و روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند مختلفی استفاده شده اما همچنان ضعف‌هایی در این مسیر وجود دارند. در برخی تحقیقات پارامترهای ورودی فرآیند به درستی انتخاب نشده‌اند به طوری که برخی پارامترهای انتخابی با یکدیگر در تناقض هستند. همچنین هیچ دلیل علمی در انتخاب بازه عددی برخی از پارامترهای ورودی فرآیند در تحقیقات ذکر نشده و در برخی از پارامترها به علت وابسته بودن آنان به هندسه حفره‌های قالب امکان تعیین آن‌ها به غیر از شبیه‌سازی ممکن نیست. در برخی از تحقیقات نیز طراحی سیستم بوش تزریق، راهگاه‌ها، گلوبی‌ها و ابعاد قالب در شبیه‌سازی‌ها انجام نگرفته و تزریق از حفره‌های قالب فرض گرفته شده که سبب ایجاد نتایجی غلط و دور از واقعیت خواهد شد. در اکثر تحقیقات مرور شده پارامترهای ورودی در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند که با توجه به جدول تاگوچی در صورت امکان می‌توان با افزایش سطوح بررسی نتایج دقیق‌تری به دست آورد. همچنین در هیچ یک از تحقیقات این زمینه تأثیر ضریب تمایزهای مختلف در روش تحلیل رابطه خاکستری بر نتایج بهینه‌سازی بررسی نشدند و فقط نتایج بر اساس یک ضریب تمایز (معمولاً ضریب ۰/۵) گزارش شدند.

در این مقاله به بررسی فرآیند تزریق ۸ قطعه قالب‌گیری از جنس پلی‌اتر ایمید که ماده بسیار پر کاربردی در صنعت هوایی است پرداخته می‌شود به طوری که پارامترهای فرآیندی مهم و مناسب در بیشترین سطح بررسی بر اساس عیوب و مشکلات برجسته بر مبنای شبیه‌سازی و روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری بهینه‌سازی می‌شوند و نتایج بهینه‌سازی در ضریب تمایزهای مختلف گزارش و بررسی خواهند شد.

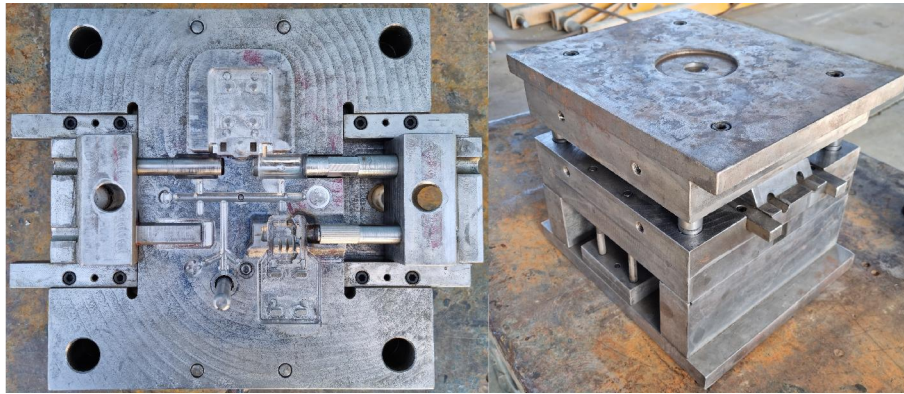
<sup>1</sup> Distinguishing Coefficient

<sup>2</sup> Grey Relational Coefficient

## ۲- اطلاعات مورد نیاز و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات قالب و ماده قالب‌گیری

قالب مورد بررسی برای قالب‌گیری ۸ قطعه بکار می‌رود. ابعاد قالب  $۳۷۰ \times ۳۰۵ \times ۲۶۰$  میلی‌متر و جنس آن از فولاد P20 (۱,۲۳۱۱) است. همچنین قالب مورد نظر دارای دو کشویی و چهار مسیر خنک کاری است. بوش تزریق، راهگاه‌های اصلی و فرعی و گلوبی‌ها همگی از نوع سرد هستند (شکل ۱).



شکل ۱ نمایش کلی قالب، حفره‌ها، کشویی‌ها و مسیرهای خنک کاری

ماده تزریقی که برای قالب‌گیری این قطعات استفاده شده گرانول Ultem 1000 تولید شده توسط شرکت سابک<sup>۱</sup> می‌باشد. Ultem 1000 یک پلی اتر ایمید آمورف تقویت نشده است. پلی اتر ایمید به علت استحکام و سختی در دمای اتاق حتی در دماهای بالا و همچنین مقاومت شعله‌ای ذاتی و تولید دود کم، ماده‌ای پرکاربرد در صنعت هوایی است.

### ۲-۲- پارامترهای ورودی فرآیند

در انتخاب پارامترهای ورودی فرآیند این پژوهش علاوه بر توجه به پارامترهای برجسته تحقیقات پیشین که شامل دمای ذوب ماده تزریق، دمای قالب، فشار تزریق، فشار نگهداری ماده تزریق، زمان تزریق و زمان خنک کاری بودند به اصول فرآیند تزریق نرم‌افزار شبیه‌سازی مولدفلو ۲۰۱۷ مورد استفاده در این پژوهش نیز توجه شده است به طوری که برای پارامترهای دمای ذوب و دمای قالب ماده مورد نظر محدوده دمایی‌های آن ماده از برگه اطلاعات آن استخراج می‌شوند. برای فشار تزریق چون برای هر قالب و هر ماده‌ای در شرایط مختلف فشارهای متفاوت و خاصی مناسب است و همچنین ممکن است با توجه به طراحی قالب بررسی کامل محدوده فشار ماده در فرآیند بهینه‌سازی ممکن نباشد (به طور مثال حفره‌های قالب زودتر از رسیدن به فشار در نظر گرفته شده در محدوده پر شود) بر همین اساس در این پژوهش فشار تزریق مناسب توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی محاسبه می‌شود. فشار نگهداری در فاز بعد از فاز تزریق اعمال می‌شود فشار نگهداری مناسب بر اساس توصیه راهنمای نرم‌افزار شبیه‌سازی مولدفلو ۸۰ درصد فشار تزریق تعیین شده است. همچنین در منابع مختلف فشار نگهداری بر اساس درصدی از فشار تزریق تعریف می‌شود به عنوان نمونه در کتاب شومکر فشار نگهداری مناسب ۸۰ الی ۱۰۰ درصد فشار تزریق توصیه شده است [۲۶]. در مقاله جاواهار و خاره این فشار ۸۰ درصد فشار تزریق توصیه شده و بازه معمول آن ۲۰ الی ۱۰۰ تعیین شده است [۲۷]. همچنین در منابع دیگری با عنوان راهنمای فرآیند قالب‌گیری تزریقی، توسط شرکت‌های سابک و جنرال الکتریک<sup>۲</sup> به ترتیب فشار نگهداری مناسب را ۲۰ الی ۳۰ درصد کمتر از فشار تزریق و ۴۰ الی ۸۰ درصد فشار تزریق توصیه کرده‌اند [۲۹،۲۸]. همان طور که مشاهده می‌شود فشار نگهداری ۸۰ درصد فشار تزریق تنها مقدار از این پارامتر بوده که در تمامی محدوده‌های توصیه شده توسط این منابع قرار دارد که نشان می‌دهد در حالت کلی مقدار توصیه شده توسط راهنمای نرم‌افزار مولدفلو مناسب‌ترین مقدار برای در نظر گرفتن فشار نگهداری است. برای زمان تزریق و زمان خنک کاری از

<sup>1</sup> SABIC

<sup>2</sup> General Electric

آنجا که برای هر قالب و هر ماده در شرایط مختلف این پارامترها مقادیر متفاوتی دارند و همچنین نیز محدوده آنان مشخص نیست به همین دلیل بجای پارامتر زمان خنک کاری از دمای قالب به عنوان پارامتر جایگزین استفاده شده است و نرم‌افزار شبیه‌سازی بر مبنای این پارامتر زمان خنک کاری مناسب را تعیین می‌کند. زمان تزریق مناسب بر اساس مدت زمان لازم برای پر شدن حفره‌های قالب در شرایط مختلف توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی محاسبه می‌شود. پارامتر دمای ورودی سیال خنک کاری از آنجا که نقش مهمی در رسیدن سطح قالب به دمای قالب مورد نظر را دارد به عنوان یک پارامتر ورودی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. دمای ورودی سیال خنک کاری مناسب ۱۰ الی ۲۰ درجه کمتر از دمای قالب مورد نظر است [۲۶]. در نتیجه توضیحات این بخش پارامترهای ورودی فرآیند مناسب و محدوده هر کدام در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱ پارامترهای ورودی فرآیند مناسب و محدوده هر کدام

پارامتر	واحد	محدوده
دمای ذوب ماده تزریق (MT <sup>۱</sup> )	°C	۲۶۰ الی ۴۰۰
دمای سطح قالب (MST <sup>۲</sup> )	°C	۱۴۰ الی ۱۸۰
فشار نگهداری ماده (PP <sup>۳</sup> )	%	۲۰ الی ۱۰۰ (بر اساس فشار تزریق)
دمای ورودی سیال خنک کاری (CIT <sup>۴</sup> )	°C	۲۰ درجه کمتر از دمای سطح قالب

### ۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

در این پژوهش از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. مزیت روش تاگوچی در این است که با حداقل تعداد ممکن از آزمایش‌ها می‌توان پارامترهای ورودی را مورد بررسی قرار داد. با توجه به اینکه در این پژوهش چهار پارامتر فرآیندی مورد بررسی قرار می‌گیرند برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر در بهینه‌سازی با استفاده از جدول پایه طراحی آزمایش‌های تاگوچی بیشترین سطح بررسی در نظر گرفته می‌شود. بیشترین سطح بررسی که می‌توان برای این چهار پارامتر در نظر گرفت پنج سطح است. در جدول ۲ پارامترهای ورودی و سطوح بررسی هر کدام با توجه به توضیحات بخش قبل در رابطه با محدوده مناسب هر پارامتر آورده شده است. در این جدول سطوح بررسی پارامترهای دمای مذاب ماده تزریق (MT) و دمای سطح قالب (MST) بر اساس محدوده مناسب برای ماده Ultem 1000 از جدول ۱ تعیین شده‌اند. پارامتر فشار نگهداری (PP) بر اساس درصدی از فشار تزریق محاسبه شده توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی به دست می‌آید. با توجه به مقدار مناسب فشار نگهداری (۸۰ درصد فشار تزریق) [۲۶-۲۹] سطوح بررسی این پارامتر از ۶۰ درصد الی ۱۰۰ درصد فشار تزریق در نظر گرفته شده است که فشار نگهداری مناسب در وسط این بازه قرار دارد. سطوح بررسی پارامتر دمای ورودی سیال خنک کاری (CIT) که پارامتری وابسته به دمای سطح قالب (MST) است بر اساس محدوده مناسب این پارامتر (جدول ۱) که در بازه ۲۰ الی ۱۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای سطح قالب است تعیین شده‌اند [۲۶].

جدول ۲ پارامترهای ورودی فرآیند و سطوح بررسی آنها

پارامتر	سطح‌ها				
	۱	۲	۳	۴	۵
MT	۳۶۰	۳۷۰	۳۸۰	۳۹۰	۴۰۰
MST(m)	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰
PP	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
CIT	m-۲۰	m-۱۷/۵	m-۱۵	m-۱۲/۵	m-۱۰

<sup>1</sup> Melt Temperature

<sup>2</sup> Mold Surface Temperature

<sup>3</sup> Packing Pressure

<sup>4</sup> Coolant Inlet Temperature

با توجه به روش تاگوچی و با استفاده از نرم‌افزار مینی تب<sup>۱</sup> ۲۰۲۰ برای چهار پارامتر و پنج سطح بررسی باید از آرایه متعامد L25 برای طراحی آزمایش‌ها طبق جدول ۳ استفاده نمود.

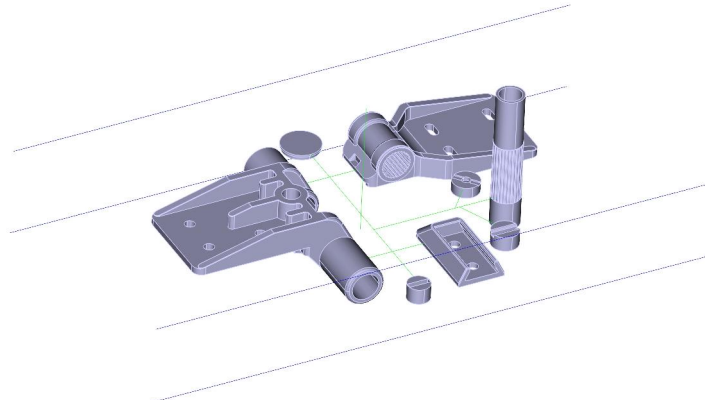
جدول ۳ آرایه متعامد L25 تاگوچی

شماره آزمایش	MT	MST	PP	CIT
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۱	۴	۴	۴
۵	۱	۵	۵	۵
۶	۲	۱	۲	۳
۷	۲	۲	۳	۴
۸	۲	۳	۴	۵
۹	۲	۴	۵	۱
۱۰	۲	۵	۱	۲
۱۱	۳	۱	۳	۵
۱۲	۳	۲	۴	۱
۱۳	۳	۳	۵	۲
۱۴	۳	۴	۱	۳
۱۵	۳	۵	۲	۴
۱۶	۴	۱	۴	۲
۱۷	۴	۲	۵	۳
۱۸	۴	۳	۱	۴
۱۹	۴	۴	۲	۵
۲۰	۴	۵	۳	۱
۲۱	۵	۱	۵	۴
۲۲	۵	۲	۱	۵
۲۳	۵	۳	۲	۱
۲۴	۵	۴	۳	۲
۲۵	۵	۵	۴	۳

<sup>۱</sup> Minitab

## ۲-۴- مدل‌سازی

در ابتدا قطعات بر اساس ابعاد و موقعیت حفره‌های قالب در نرم‌افزار کتیا<sup>۱</sup> V5 R21 مدل‌سازی شده و مسیر بوش تزریق، راهگاه‌ها، گلوبی‌ها و کانال‌های خنک‌کاری به صورت خط طراحی می‌شوند (شکل ۲).

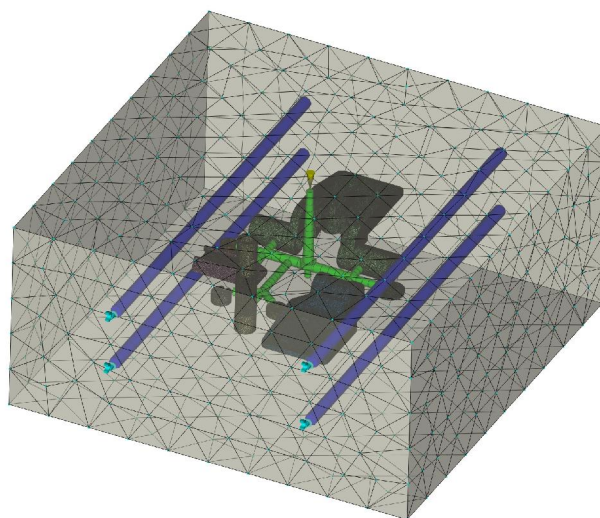


شکل ۲ مدل‌سازی حفره‌های قالب، بوش تزریق، راهگاه‌ها، گلوبی‌ها و کانال‌های خنک‌کاری

## ۲-۵- شبیه‌سازی

### ۲-۵-۱- مش‌بندی و آماده‌سازی

در این مرحله قطعات مدل‌سازی شده وارد نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و مش‌بندی انجام می‌گیرد. عدد مش مناسب باید تا حد امکان کوچک انتخاب شود تا نتایجی دقیق‌تر حاصل شود عدد مش مناسب برای مدل مورد نظر عدد  $0.9$  میلی‌متر است زیرا انتخاب عددی کوچک‌تر از  $0.9$  میلی‌متر سبب ایجاد مشکلات مش‌بندی بسیار زیادی در ساختار مش می‌شود که اصلاح این مشکلات بسیار زمان‌بر بوده و به صرفه نیست. برای هر کدام از مسیرهای بوش تزریق، راهگاه‌ها، گلوبی‌ها و کانال‌های خنک‌کاری که به صورت خط طراحی شده‌اند خواص و ابعاد به صورت المان‌های خطی اختصاص می‌یابد. همچنین موقعیت و ابعاد سطح قالب نیز در شبیه‌سازی تعریف شده و سپس کیفیت مش قطعات بررسی و مشکلات مش‌بندی رفع می‌شوند. در آخر موقعیت ورود برای حرکت مذاب و سیال خنک‌کاری در المان‌های خطی تعریف می‌شود که در شکل ۳ نتیجه توضیحات این بخش نشان داده شده است.



شکل ۳ نمای مش‌بندی قطعات، تعریف المان‌های خطی برای مسیرهای حرکت مذاب و کانال‌های خنک‌کاری و تعریف ابعاد سطح قالب

<sup>۱</sup> CATIA

## ۲-۵-۲- انجام آزمایش‌ها و نتایج مورد بررسی

برای انجام شبیه‌سازی آزمایش‌ها علاوه بر اعمال پارامترهای ورودی مورد نظر هر آزمایش که اساس این تحقیق هستند پارامترهای دیگری هم به صورت ثابت برای تنظیمات فرآیند شبیه‌سازی لازم هستند که این پارامترها شامل دمای پُران قطعه، دمای انتقال شیشه‌ای ماده تزریق، حداقل درصد انجماد مجاز قطعه و نرخ جریان سیال خنک‌کاری هستند. برای پارامترهای دمای پُران قطعه و دمای انتقال شیشه‌ای ماده تزریق از بانک اطلاعات مواد نرم‌افزار مولدفلو استفاده می‌شود. بر اساس توصیه راهنمای نرم‌افزار شبیه‌سازی برای پارامترهای حداقل درصد انجماد مجاز قطعه مقدار ۸۰ درصد و نرخ جریان سیال خنک‌کاری مقدار ۵ lit/min در نظر گرفته می‌شوند. برای سیال خنک‌کاری به علت کارکرد در محدوده دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از روغن به جای آب استفاده می‌شود. همچنین برای به دست آوردن زمان مناسب اعمال فشار نگهداری هر آزمایش دو بار انجام می‌شود که بار اول آزمایش برای تعیین زمان مناسب انجام می‌شود به این صورت که فشار نگهداری در بازه زمانی طولانی (مثلاً ۲۰ الی ۳۰ ثانیه) انجام شده و سپس با توجه به وزن ماده تزریق در هر لحظه در فاز فشار نگهداری در آن زمانی که وزن ثابت بماند و تغییری نکند از آن زمان به بعد اعمال فشار نگهداری بیهوده بوده و اثری بر فرآیند تزریق نخواهد داشت. سپس پس از تعیین زمان مناسب فشار نگهداری این زمان در بار دوم انجام آزمایش اعمال می‌شود هرچند که این کار در نتایج اثری ندارد اما برای انجام شدن اصولی آزمایش‌ها لازم است.

در این پژوهش برای انتخاب نتایج شبیه‌سازی‌ها و یا به عبارت دیگر پاسخ‌ها که پارامترهای ورودی بر اساس آنان بهینه‌سازی می‌شوند علاوه بر توجه به عیب‌های مهم در قطعات به توانایی‌های نرم‌افزار شبیه‌سازی در تحلیل و ارائه اطلاعات کلیدی در رابطه با عیب‌ها در نتایج نیز توجه شده است. عیب‌های مهم قابل بررسی قطعات در نرم‌افزار شبیه‌سازی شامل انقباض، اعوجاج، مکش، خط جوش، حبس هوا یا حباب در قطعات هستند اما در بین این عیب‌ها نتایج خط جوش و حبس هوا به صورت ظاهری بوده و نتایج قابل مقایسه‌ای در اختیار نمی‌گذارند بنابراین در این پژوهش فقط از نتایج عیب‌های انقباض حجمی (هم به صورت متوسط و هم حداکثری)، اعوجاج و مکش در بهینه‌سازی استفاده می‌شوند همچنین از نتایج درصد انجماد نیز در بهینه‌سازی پارامترهای ورودی نیز استفاده می‌شود زیرا قطعات در هنگام پُران شدن باید درصد انجماد زیادی داشته باشند که نشان دهد قطعات به اندازه کافی خنک شده تا از تأثیرات ظاهری در هنگام پُران شدن قطعات جلوگیری شود. همین‌طور اگر قطعات درصد انجماد بالایی نداشته باشند و به اندازه کافی خنک نشده باشند در خارج از قالب مستعد تاب خوردگی خواهند بود.

## ۲-۶- روش تحلیل رابطه خاکستری (GRA)

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد برای بهینه‌سازی پدیده‌هایی با چند تابع پاسخ می‌توان از روش تحلیل رابطه خاکستری استفاده نمود. این روش شامل سه مرحله است که مرحله اول ایجاد رابطه خاکستری<sup>۱</sup> یا نرمال‌سازی، مرحله دوم محاسبه ضریب رابطه خاکستری (GRC) و مرحله آخر محاسبه درجه یا رتبه رابطه خاکستری (GRG<sup>۲</sup>) هستند.

## ۲-۶-۱- ایجاد رابطه خاکستری (نرمال‌سازی)

در این مرحله توابع پاسخ به علت داشتن محدوده و یا واحدهای متفاوت به منظور وزن‌دهی یکسان و قابل مقایسه شدن با یکدیگر از صفر تا یک توسط روابط (۱) الی (۳) بی‌بعد و مرتب می‌شوند [۹،۳]:

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (1)$$

$$x_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2)$$

$$x_i(k) = 1 - \frac{|y_i(k) - X|}{\max\{\max y_i(k) - X, X - \min y_i(k)\}} \quad (3)$$

در روابط بالا رابطه (۱) برای توابع پاسخی استفاده می‌شود که هر چقدر آن بزرگ‌تر باشد بهتر است. رابطه (۲) برای توابع پاسخی استفاده می‌شود که هر چقدر آن کوچک‌تر باشد بهتر است و رابطه (۳) برای توابع پاسخی استفاده می‌شود که هر چقدر آن به عدد مورد نظر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

<sup>1</sup> Grey Relational Generation

<sup>2</sup> Grey Relational Grade



## ۲-۶-۲- محاسبه ضریب رابطه خاکستری (GRC)

ضریب رابطه خاکستری برای تعیین اینکه مقدار بی‌بعد شده  $x_1(k)$  چقدر به مقدار ایده آل  $x_0(k)$  (که برابر ۱ است) نزدیک است استفاده می‌شود. هر چه مقدار  $x_1(k)$  به  $x_0(k)$  نزدیک‌تر باشد مقدار ضریب رابطه خاکستری بزرگ‌تر خواهد بود. این ضریب توسط روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\gamma_{o,i}(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{o,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (1)$$

$$\Delta_{o,i}(k) = |x_o(k) - x_i(k)| \quad (2)$$

همان‌طور که در قسمت مقدمه به آن اشاره شد هدف از ضریب تمایز ( $\zeta$ ) در رابطه (۴) گسترش یا فشردگی دامنه ضریب رابطه خاکستری است [۲۲] و مقدار آن در بازه (۰،۱) قرار دارد [۲۳]. در این پژوهش از ضریب تمایزهای مختلف (۰/۱ الی ۰/۹) در محاسبات استفاده می‌شود تا تأثیر این ضریب بر نتایج بهینه‌سازی بررسی شود.

## ۲-۶-۳- محاسبه درجه (رتبه) رابطه خاکستری (GRG)

پس از محاسبه ضریب رابطه خاکستری (GRC) برای هر تابع پاسخ برای تبدیل چند تابع پاسخ به یک تابع پاسخ با استفاده از رابطه (۶) درجه رابطه خاکستری محاسبه می‌شود که براساس این رابطه مقدار GRG از میانگین‌گیری مقادیر GRC مرحله قبل به دست می‌آید [۳]:

$$\gamma_{o,i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_k \gamma_{o,i}(k) \quad (6)$$

در رابطه (۶) برای وزن توابع پاسخ رابطه  $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$  برقرار است. در این پژوهش وزن توابع پاسخ یکسان در نظر گرفته شده است.

در نهایت با توجه به طراحی آزمایش‌های بر اساس روش تاگوچی برای به دست آوردن بهینه‌ترین سطح از هر پارامتر ورودی و بهینه‌ترین ترکیب پارامترها از آنالیز میانگین (ANOM)<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. براساس این آنالیز مقدار میانگین GRG هر سطح از هر پارامتر از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۳]:

$$(M)_{factor=l}^{level=i} = \frac{1}{N} \sum (f)_{factor=l}^{level=i} \quad (7)$$

## ۲-۷- آنالیز واریانس (ANOVA)

برای به دست آوردن درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی فرآیند لازم است آنالیز واریانس (ANOVA) بر روی مقادیر GRG آزمایش‌ها انجام گیرد. این آنالیز توسط نرم‌افزار مینی تب ۲۰۲۰ در ضریب تمایزهای مختلف انجام شده و با استفاده از رابطه (۸) درصد مشارکت هر پارامتر محاسبه می‌شود.

$$\text{Contribution of factor}(\%) = \frac{SS_F}{SS_T} \times 100 \quad (8)$$

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج شبیه‌سازی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها براساس پارامترهای ورودی فرآیند شبیه‌سازی شده و نتایج انقباض حجمی متوسط (AVS)<sup>۲</sup> و حداکثری (MVS)<sup>۳</sup>، اعوجاج (انحراف) حداکثری (MD)<sup>۴</sup>، مکش حداکثری (MSM)<sup>۵</sup> و درصد انجماد (FV)<sup>۶</sup> قطعات برای ۲۵ آزمایش روش تاگوچی استخراج گردید. این نتایج در جدول ۴ آورده شده است که بر اساس این جدول به عنوان نمونه در نتایج شبیه‌سازی آزمایش ۶ بحرانی‌ترین درصد

<sup>1</sup> Analysis of Mean

<sup>2</sup> Average Volumetric Shrinkage

<sup>3</sup> Maximum Volumetric Shrinkage

<sup>4</sup> Maximum Deflection

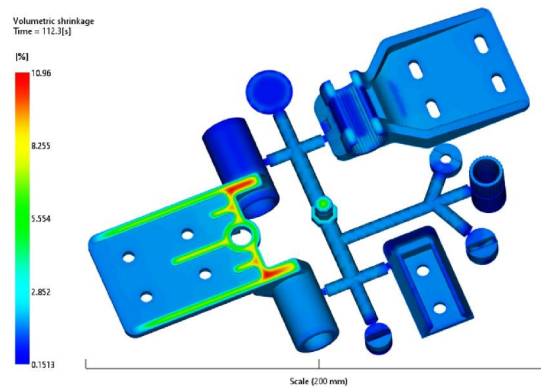
<sup>5</sup> Maximum Sink Mark

<sup>6</sup> Frozen Volume

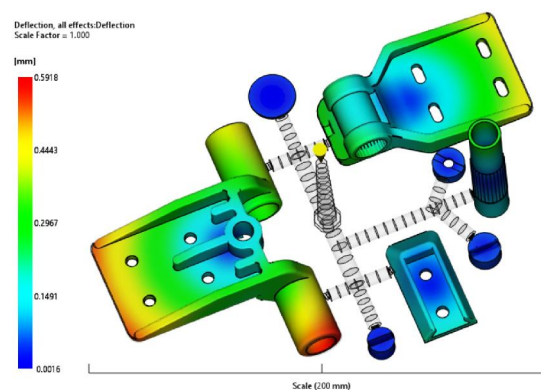
انقباض حجمی (شکل ۴) ۱۰/۹۵۶۲ درصد، بحرانی‌ترین مقدار اعوجاج (شکل ۵) ۰/۵۹۱۸ میلی‌متر و بحرانی‌ترین مقدار مکش (شکل ۶) ۰/۵۱۳۵ میلی‌متر هستند. همچنین درصد انجماد قطعه در پایان چرخه فرآیندی و میانگین درصد انقباض حجمی در این آزمایش بر اساس قسمت نتایج نوشتاری شبیه‌سازی (log) به ترتیب ۱۰۰ درصد و ۳/۳۲۵۲ درصد هستند.

جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی آزمایش‌ها

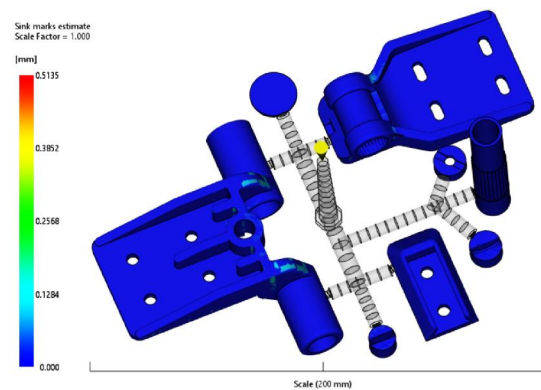
شماره آزمایش	MVS (%)	AVS (%)	MSM (mm)	MD (mm)	FV (%)
۱	۱۰/۴۸۵۲	۲/۹۹۷۵	-/۴۴۸۸	۰/۵۶۳۸	۱۰۰/۰۰۰۰
۲	۹/۹۵۶۰	۲/۶۴۴۸	-/۴۱۶۱	۰/۵۴۲۶	۹۹/۵۸۸۶
۳	۸/۳۴۷۱	۲/۱۸۴۳	-/۲۱۷۴	۰/۴۹۹۰	۹۸/۴۵۲۹
۴	۶/۷۷۴۸	۱/۹۵۵۸	-/۲۳۲۰	۰/۴۶۴۷	۹۶/۶۳۴۶
۵	۷/۴۹۲۱	۱/۸۸۶۴	-/۲۳۹۹	۰/۴۴۴۳	۹۵/۱۸۱۴
۶	۱۰/۹۵۶۲	۳/۳۲۵۲	۰/۵۱۳۵	۰/۵۹۱۸	۱۰۰/۰۰۰۰
۷	۱۰/۶۶۸۲	۳/۰۴۸۲	-/۴۷۷۵	۰/۵۷۲۲	۹۹/۹۸۲۶
۸	۱۰/۲۵۹۹	۲/۸۶۸۵	-/۴۵۱۷	۰/۵۵۹۲	۹۸/۷۱۷۴
۹	۹/۵۶۲۰	۲/۶۱۸۷	-/۴۱۳۴	۰/۵۴۱۴	۹۵/۹۵۰۷
۱۰	۱۰/۸۸۱۰	۴/۰۳۶۷	۰/۵۸۴۵	۰/۶۴۸۶	۹۲/۸۸۴۳
۱۱	۱۰/۹۳۰۶	۳/۰۰۶۰	۰/۵۰۲۱	۰/۵۶۸۵	۱۰۰/۰۰۰۰
۱۲	۱۰/۶۵۳۵	۲/۸۴۲۲	-/۴۶۹۶	۰/۵۵۱۳	۹۹/۹۴۷۳
۱۳	۱۰/۱۱۶۱	۲/۶۷۱۰	-/۴۳۷۰	۰/۵۳۴۷	۹۸/۵۹۱۸
۱۴	۱۱/۳۶۱۵	۴/۲۱۸۸	-/۶۱۰۱	۰/۶۵۱۳	۹۶/۴۲۷۶
۱۵	۱۰/۴۵۵۲	۳/۶۷۳۰	-/۳۳۹۹	۰/۶۳۱۴	۹۳/۹۰۷۲
۱۶	۱۱/۰۷۵۲	۲/۸۱۵۱	-/۴۸۹۸	۰/۵۴۸۷	۱۰۰/۰۰۰۰
۱۷	۱۰/۷۹۵۵	۲/۷۶۴۹	-/۴۷۶۲	۰/۵۴۱۱	۹۹/۹۸۹۱
۱۸	۱۱/۵۶۵۰	۴/۰۴۳۸	-/۶۲۴۲	۰/۶۳۹۶	۹۹/۴۷۷۵
۱۹	۱۱/۴۳۶۵	۳/۸۴۹۹	۰/۵۷۸۱	۰/۶۳۴۶	۹۷/۱۲۳۱
۲۰	۱۰/۳۹۹۲	۳/۴۲۰۵	-/۳۶۲۱	۰/۶۱۸۸	۹۲/۳۱۳۹
۲۱	۱۱/۴۷۱۱	۲/۸۳۹۵	۰/۵۱۰۹	۰/۵۴۶۱	۱۰۰/۰۰۰۰
۲۲	۱۲/۲۱۶۸	۴/۰۵۴۰	-/۶۳۸۹	۰/۶۳۸۲	۱۰۰/۰۰۰۰
۲۳	۱۱/۸۴۱۹	۳/۷۵۴۸	۰/۵۹۸۵	۰/۶۲۶۶	۹۹/۳۲۲۲
۲۴	۱۱/۵۵۵۹	۳/۵۴۰۱	۰/۵۶۵۲	۰/۶۱۸۸	۹۶/۸۹۳۹
۲۵	۱۱/۰۱۱۳	۳/۲۲۰۴	۰/۵۲۵۲	۰/۶۰۴۲	۹۴/۳۱۸۸



شکل ۴ نمایش انقباض حجمی نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش ۶



شکل ۵ نمایش اعوجاج نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش ۶



شکل ۶ نمایش مکش نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش ۶

### ۲-۳- بهینه‌سازی پارامترهای ورودی

#### ۳-۲-۱- ایجاد رابطه خاکستری (نرمال‌سازی مقادیر توابع پاسخ)

مقادیر بی‌بعد شده توابع پاسخ با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شده و در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. در این جدول مقادیر نرمال‌سازی شده برای پاسخ‌های انقباض حجمی حداکثری و متوسط، اعوجاج حداکثری و مکش حداکثری بر اساس رابطه (۲) (هر چه کوچک‌تر بهتر) و برای نتایج درصد انجماد بر اساس رابطه (۱) (هر چه بزرگ‌تر بهتر) به دست آمده‌اند.

جدول ۵ مقادیر نرمال‌سازی شده توابع پاسخ

Grey relational generation					شماره آزمایش
$X_i$ (FV)	$X_i$ (MD)	$X_i$ (MSM)	$X_i$ (AVS)	$X_i$ (MVS)	
۱/۰۰۰۰	-۰/۴۲۲۷	-۰/۴۵۱۰	-۰/۵۲۳۶	-۰/۳۱۸۲	۱
-۰/۹۴۶۵	-۰/۵۲۸۱	-۰/۵۲۸۶	-۰/۶۷۴۸	-۰/۴۱۵۴	۲
-۰/۷۹۸۷	-۰/۷۳۵۷	۱/۰۰۰۰	-۰/۸۷۲۳	-۰/۷۱۱۱	۳
-۰/۵۶۲۱	-۰/۹۰۱۴	-۰/۹۶۵۴	-۰/۹۷۰۲	۱/۰۰۰۰	۴
-۰/۳۷۳۱	۱/۰۰۰۰	-۰/۹۴۶۶	۱/۰۰۰۰	-۰/۸۶۸۲	۵
۱/۰۰۰۰	-۰/۲۸۷۴	-۰/۲۹۷۵	-۰/۳۸۳۱	-۰/۲۳۱۶	۶
-۰/۹۹۷۷	-۰/۳۸۲۱	-۰/۳۸۲۹	-۰/۵۰۱۹	-۰/۲۸۴۶	۷
-۰/۸۳۳۱	-۰/۴۴۴۹	-۰/۴۴۴۱	-۰/۵۷۸۹	-۰/۳۵۹۶	۸
-۰/۴۷۳۲	-۰/۵۳۰۹	-۰/۵۳۵۰	-۰/۶۸۶۰	-۰/۴۸۷۸	۹
-۰/۰۷۴۲	-۰/۰۱۳۰	-۰/۱۲۹۱	-۰/۰۷۸۱	-۰/۲۴۵۵	۱۰
۱/۰۰۰۰	-۰/۴۰۰۰	-۰/۳۲۴۶	-۰/۵۲۰۰	-۰/۲۳۶۳	۱۱
-۰/۹۹۳۱	-۰/۴۸۳۱	-۰/۴۰۱۷	-۰/۵۹۰۲	-۰/۲۸۷۳	۱۲
-۰/۸۱۶۸	-۰/۵۶۳۳	-۰/۴۷۹۰	-۰/۶۶۳۶	-۰/۳۸۶۰	۱۳
-۰/۵۳۵۲	-۰/۰۰۰۰	-۰/۰۶۸۳	-۰/۰۰۰۰	-۰/۱۵۷۲	۱۴
-۰/۲۰۷۳	-۰/۰۹۶۱	-۰/۷۰۹۴	-۰/۲۳۴۰	-۰/۳۳۳۷	۱۵
۱/۰۰۰۰	-۰/۴۹۵۷	-۰/۳۵۳۷	-۰/۶۰۱۸	-۰/۲۰۹۸	۱۶
-۰/۹۹۸۶	-۰/۵۳۲۴	-۰/۳۸۶۰	-۰/۶۲۳۳	-۰/۲۶۱۲	۱۷
-۰/۹۳۲۰	-۰/۰۵۶۵	-۰/۰۳۴۹	-۰/۰۷۵۰	-۰/۱۱۹۸	۱۸
-۰/۶۲۵۷	-۰/۰۸۰۷	-۰/۱۴۴۲	-۰/۱۵۸۲	-۰/۱۴۳۴	۱۹
-۰/۰۰۰۰	-۰/۱۵۷۰	-۰/۶۵۶۷	-۰/۳۴۲۳	-۰/۳۳۴۰	۲۰
۱/۰۰۰۰	-۰/۵۰۸۲	-۰/۳۰۳۷	-۰/۵۹۱۴	-۰/۱۳۷۰	۲۱
۱/۰۰۰۰	-۰/۰۶۳۳	-۰/۰۰۰۰	-۰/۰۷۰۷	-۰/۰۰۰۰	۲۲
-۰/۹۱۱۸	-۰/۱۱۹۳	-۰/۰۹۵۸	-۰/۱۹۸۹	-۰/۰۶۸۹	۲۳
-۰/۵۹۵۹	-۰/۱۵۷۰	-۰/۱۷۴۹	-۰/۲۹۱۰	-۰/۱۲۱۴	۲۴
-۰/۲۶۰۸	-۰/۲۲۷۵	-۰/۲۶۹۸	-۰/۴۲۸۱	-۰/۲۲۱۵	۲۵

### ۳-۲-۲- محاسبه مقادیر دنباله انحراف<sup>۱</sup> و ضریب رابطه خاکستری (GRC)

در ابتدا برای محاسبه GRC باید با استفاده از رابطه (۵) مقادیر دنباله انحراف برای توابع پاسخ بی‌بعد شده را به دست آورد. در جدول ۶ این مقادیر محاسبه و آورده شده است.

جدول ۶ مقادیر دنباله انحراف محاسبه شده

Deviation sequence					
$\Delta_{o,i}$ (FV)	$\Delta_{o,i}$ (MD)	$\Delta_{o,i}$ (MSM)	$\Delta_{o,i}$ (AVS)	$\Delta_{o,i}$ (MVS)	شماره آزمایش
۰/۰۰۰۰	-۰/۵۷۷۳	-۰/۵۴۹۰	۰/۴۷۶۴	۰/۶۸۱۸	۱
۰/۰۵۳۵	۰/۴۷۴۹	۰/۴۷۱۴	۰/۳۲۵۲	۰/۵۸۴۶	۲
۰/۲۰۱۳	-۰/۲۶۴۳	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۷۷	۰/۲۸۸۹	۳
۰/۴۳۷۹	-۰/۰۹۸۶	-۰/۰۳۴۶	۰/۰۲۹۸	۰/۰۰۰۰	۴
۰/۶۲۶۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۵۳۴	۰/۰۰۰۰	۰/۱۳۱۸	۵
۰/۰۰۰۰	۰/۷۱۲۶	۰/۷۰۲۵	۰/۶۱۶۹	۰/۷۶۸۴	۶
۰/۰۰۲۳	-۰/۶۱۷۹	-۰/۶۱۷۱	۰/۴۹۸۱	۰/۷۱۵۴	۷
۰/۱۶۶۹	-۰/۵۵۵۱	-۰/۵۵۵۹	۰/۴۲۱۱	۰/۶۴۰۴	۸
۰/۵۲۶۸	-۰/۴۶۹۱	-۰/۴۶۵۰	۰/۳۱۴۰	۰/۵۱۲۲	۹
۰/۹۲۵۸	-۰/۹۸۷۰	-۰/۸۷۰۹	۰/۹۲۱۹	۰/۷۵۴۵	۱۰
۰/۰۰۰۰	-۰/۶۰۰۰	-۰/۶۷۵۴	۰/۴۸۰۰	۰/۷۶۳۷	۱۱
۰/۰۰۶۹	۰/۵۱۶۹	۰/۵۹۸۳	۰/۴۰۹۸	۰/۷۱۲۷	۱۲
۰/۱۸۳۲	-۰/۴۳۶۷	-۰/۵۲۱۰	۰/۳۳۶۴	۰/۶۱۴۰	۱۳
۰/۴۶۴۸	۱/۰۰۰۰	-۰/۹۳۱۷	۱/۰۰۰۰	۰/۸۴۲۸	۱۴
۰/۷۹۲۷	-۰/۹۰۳۹	-۰/۲۹۰۶	۰/۷۶۶۰	۰/۶۷۶۳	۱۵
۰/۰۰۰۰	-۰/۵۰۴۳	۰/۶۴۶۳	۰/۳۹۸۲	۰/۷۹۰۲	۱۶
۰/۰۰۱۴	-۰/۴۶۷۶	-۰/۶۱۴۰	۰/۳۷۶۷	۰/۷۳۸۸	۱۷
۰/۰۶۸۰	۰/۹۴۳۵	۰/۹۶۵۱	۰/۹۲۵۰	۰/۸۸۰۲	۱۸
۰/۳۷۴۳	-۰/۹۱۹۳	-۰/۸۵۵۸	۰/۸۴۱۸	۰/۸۵۶۶	۱۹
۱/۰۰۰۰	-۰/۸۴۳۰	-۰/۳۴۳۳	۰/۶۵۷۷	۰/۶۶۶۰	۲۰
۰/۰۰۰۰	-۰/۴۹۱۸	-۰/۶۹۶۳	۰/۴۰۸۶	۰/۸۶۳۰	۲۱
۰/۰۰۰۰	-۰/۹۳۶۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۲۹۳	۱/۰۰۰۰	۲۲
۰/۰۸۸۲	-۰/۸۸۰۷	-۰/۹۰۴۲	۰/۸۰۱۱	۰/۹۳۱۱	۲۳
۰/۴۰۴۱	-۰/۸۴۳۰	-۰/۸۲۵۱	۰/۷۰۹۰	۰/۸۷۸۶	۲۴
۰/۷۳۹۲	۰/۷۷۲۵	۰/۷۳۰۲	۰/۵۷۱۹	۰/۷۷۸۵	۲۵

<sup>۱</sup> Deviation Sequence

در این پژوهش برای محاسبه مقادیر GRC توابع پاسخ از ضریب تمایزهای مختلف (۰/۱ الی ۰/۹) استفاده شده است تا تأثیر این ضریب بر نتایج GRG بررسی شود. مقدار GRC برای هر تابع پاسخ در هر آزمایش با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در جدول ۷ مقادیر GRC محاسبه شده بر اساس ضریب تمایز ۰/۵ به عنوان نمونه آورده شده‌اند.

جدول ۷ مقادیر GRC محاسبه شده بر اساس ضریب تمایز ۰/۵

Grey relational coefficient (GRC)					
شماره آزمایش	$Y_{o,i}$ (MVS)	$Y_{o,i}$ (AVS)	$Y_{o,i}$ (MSM)	$Y_{o,i}$ (MD)	$Y_{o,i}$ (FV)
۱	۰/۴۲۳۱	۰/۵۱۲۱	۰/۴۷۶۶	۰/۴۶۴۱	۱/۰۰۰۰
۲	۰/۴۶۱۰	۰/۶۰۵۹	۰/۵۱۴۷	۰/۵۱۲۹	۰/۹۰۳۳
۳	۰/۶۳۳۸	۰/۷۹۶۵	۱/۰۰۰۰	۰/۶۵۴۲	۰/۷۱۳۰
۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۴۳۸	۰/۹۳۵۲	۰/۸۳۵۴	۰/۵۳۳۱
۵	۰/۷۹۱۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۰۳۵	۱/۰۰۰۰	۰/۴۴۳۷
۶	۰/۳۹۴۲	۰/۴۴۷۷	۰/۴۱۵۸	۰/۴۱۲۴	۱/۰۰۰۰
۷	۰/۴۱۱۴	۰/۵۰۰۹	۰/۴۴۷۶	۰/۴۴۷۳	۰/۹۹۵۵
۸	۰/۴۳۸۴	۰/۵۴۲۸	۰/۴۷۳۵	۰/۴۷۳۹	۰/۷۴۹۸
۹	۰/۴۹۴۰	۰/۶۱۴۳	۰/۵۱۸۱	۰/۵۱۶۰	۰/۴۸۶۹
۱۰	۰/۳۹۸۶	۰/۳۵۱۶	۰/۳۶۴۷	۰/۳۳۶۳	۰/۳۵۰۷
۱۱	۰/۳۹۵۷	۰/۵۱۰۲	۰/۴۲۵۴	۰/۴۵۴۵	۱/۰۰۰۰
۱۲	۰/۴۱۲۳	۰/۵۴۹۶	۰/۴۵۵۲	۰/۴۹۱۷	۰/۹۸۶۵
۱۳	۰/۴۴۸۸	۰/۵۹۷۸	۰/۴۸۹۷	۰/۵۳۳۸	۰/۷۳۱۸
۱۴	۰/۳۷۲۳	۰/۳۳۳۳	۰/۳۴۹۲	۰/۳۳۳۳	۰/۵۱۸۲
۱۵	۰/۴۲۵۱	۰/۳۹۴۹	۰/۶۳۲۴	۰/۳۵۶۲	۰/۳۸۶۸
۱۶	۰/۳۸۷۵	۰/۵۵۶۷	۰/۴۳۶۲	۰/۴۹۷۸	۱/۰۰۰۰
۱۷	۰/۴۰۳۶	۰/۵۷۰۴	۰/۴۴۸۸	۰/۵۱۶۷	۰/۹۹۷۲
۱۸	۰/۳۶۲۳	۰/۳۵۰۹	۰/۳۴۱۳	۰/۳۴۶۴	۰/۸۸۰۳
۱۹	۰/۳۶۸۶	۰/۳۷۲۶	۰/۳۶۸۸	۰/۳۵۲۳	۰/۵۷۱۹
۲۰	۰/۴۲۸۸	۰/۴۳۱۹	۰/۵۹۲۹	۰/۳۷۲۳	۰/۳۳۳۳
۲۱	۰/۳۶۶۸	۰/۵۵۰۳	۰/۴۱۷۹	۰/۵۰۴۱	۱/۰۰۰۰
۲۲	۰/۳۳۳۳	۰/۳۴۹۸	۰/۳۳۳۳	۰/۳۴۸۰	۱/۰۰۰۰
۲۳	۰/۳۴۹۴	۰/۳۸۴۳	۰/۳۵۶۱	۰/۳۶۲۱	۰/۸۵۰۱
۲۴	۰/۳۶۲۷	۰/۴۱۳۶	۰/۳۷۷۳	۰/۳۷۲۳	۰/۵۵۳۰
۲۵	۰/۳۹۱۱	۰/۴۶۶۴	۰/۴۰۶۴	۰/۳۹۲۹	۰/۴۰۳۵

### ۳-۲-۳- محاسبه مقادیر درجه رابطه خاکستری (GRG) آزمایش‌ها

مقدار GRG هر آزمایش با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده و در جدول ۸ آورده شده است. همچنین در این جدول رتبه هر آزمایش بر اساس مقدار GRG آن نشان داده شده است.

جدول ۸ مقادیر GRG هر آزمایش بر اساس ضریب تمایز ۰/۵

Grey relational grade (GRG)		
رتبه آزمایش	$\gamma_{o,i}$	شماره آزمایش
۸	۰/۵۷۵۲	۱
۴	۰/۵۹۹۶	۲
۳	۰/۷۵۹۵	۳
۱	۰/۸۴۹۵	۴
۲	۰/۸۲۷۷	۵
۱۴	۰/۵۳۴۰	۶
۱۰	۰/۵۶۰۵	۷
۱۳	۰/۵۳۵۷	۸
۱۵	۰/۵۲۵۹	۹
۲۵	۰/۳۶۰۴	۱۰
۱۲	۰/۵۵۷۲	۱۱
۶	۰/۵۷۹۱	۱۲
۱۱	۰/۵۶۰۴	۱۳
۲۴	۰/۳۸۱۳	۱۴
۱۹	۰/۴۳۹۱	۱۵
۷	۰/۵۷۵۷	۱۶
۵	۰/۵۸۷۳	۱۷
۱۸	۰/۴۵۶۲	۱۸
۲۳	۰/۴۰۶۸	۱۹
۲۰	۰/۴۳۱۸	۲۰
۹	۰/۵۶۷۸	۲۱
۱۶	۰/۴۷۲۹	۲۲
۱۷	۰/۴۶۰۴	۲۳
۲۱	۰/۴۱۵۸	۲۴
۲۲	۰/۴۱۲۱	۲۵

### ۳-۲-۴- محاسبه مقادیر درجه رابطه خاکستری (GRG) پارامترهای ورودی فرآیند

بر اساس آنالیز میانگین (ANOM) با استفاده از رابطه (۷) GRG هر سطح از هر پارامتر با میانگین‌گیری از مقادیر GRG آزمایش‌هایی که آن سطح از آن پارامتر در آن آزمایش‌ها شرکت داشته محاسبه می‌شوند. در جدول ۹ این مقادیر بر اساس ضریب تمایز ۰/۵ محاسبه و آورده شده است.

جدول ۹ مقادیر GRG سطح‌های پارامترهای ورودی فرآیند بر اساس ضریب تمایز ۰/۵

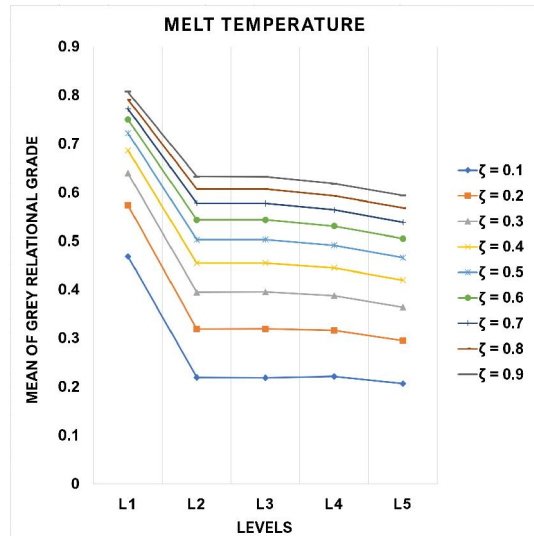
Grey relational grade (GRG)				
CIT	PP	MST	MT	سطح‌ها
۰/۵۱۴۴۶۹	۰/۴۴۹۱۹۶	۰/۵۶۱۹۷	۰/۷۲۲۲۹۸	۱
۰/۵۰۲۳۵۳	۰/۴۸۷۹۷۶	۰/۵۵۹۸۷۹	۰/۵۰۳۲۹۴	۲
۰/۵۳۴۸۴۶	۰/۵۴۴۹۶۵	۰/۵۵۴۴۴۴	۰/۵۰۳۳۹۶	۳
۰/۵۷۴۶۳۶	۰/۵۹۰۳۹۷	۰/۵۱۵۸۵۵	۰/۴۹۱۵۷۸	۴
۰/۵۶۰۰۶۱	۰/۶۱۳۸۳۱	۰/۴۹۴۲۱۸	۰/۴۶۵۷۹۹	۵

همچنین به طور کامل مقادیر GRG محاسبه شده برای سطح‌های مختلف پارامترهای ورودی بر اساس ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ در قالب نمودار در شکل‌های ۷ الی ۱۰ نشان داده شده‌اند.

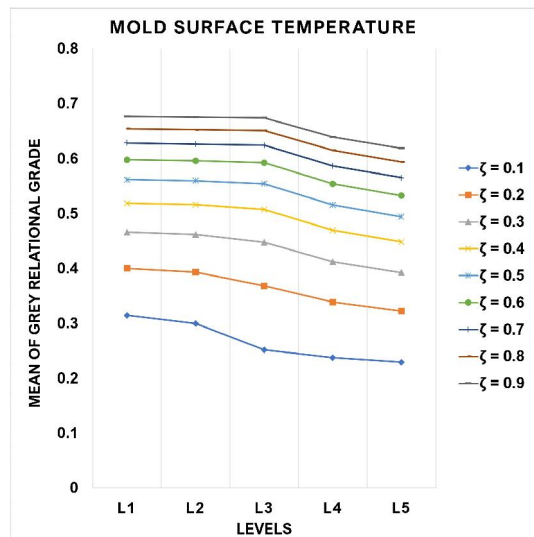
### ۳-۲-۵- تعیین بهینه‌ترین سطح از هر پارامتر

در نمودار پارامتر دمای مذاب (شکل ۷) رتبه‌بندی سطح‌های این پارامتر بر اساس درجه رابطه خاکستری در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ در حال تغییر است به طوری که در ضریب تمایز ۰/۱ رتبه‌بندی سطح‌ها از بالاترین تا پایین‌ترین GRG به ترتیب به صورت L5,L3,L2,L4,L1 در بازه ۰/۲ الی ۰/۵ رتبه‌بندی به صورت L5,L4,L2,L3,L1 و در بازه ۰/۶ الی ۰/۹ رتبه‌بندی به صورت L5,L4,L3,L2,L1 هستند. همان طور مشاهده می‌شود در تمامی این ضریب تمایزها سطح اول دارای بالاترین درجه بوده و در رتبه اول قرار دارد که نشان می‌دهد دمای مذاب ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد (L1) بهینه‌ترین سطح است. در نمودار پارامتر دمای سطح قالب (شکل ۸) در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ رتبه‌بندی سطح‌ها بر اساس درجه رابطه خاکستری از بالاترین درجه تا پایین‌ترین درجه به صورت L5,L4,L3,L2,L1 است که نشان می‌دهد دمای سطح قالب ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد (L1) بهینه‌ترین سطح از این پارامتر است. در نمودار پارامتر فشار نگهداری (شکل ۹) در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ رتبه‌بندی سطح‌ها بر اساس درجه رابطه خاکستری از بالاترین درجه تا پایین‌ترین سطح به صورت L1,L2,L3,L4,L5 است که نشان می‌دهد فشار نگهداری برابر با ۱۰۰ درصد فشار تزریق (L5) بهینه‌ترین سطح از این پارامتر است. در نمودار پارامتر دمای ورودی سیال خنک کاری (شکل ۱۰) در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ رتبه‌بندی سطح‌ها بر اساس درجه رابطه خاکستری از بالاترین درجه تا پایین‌ترین درجه به صورت L2,L1,L3,L5,L4 است که نشان می‌دهد سطح ۱۲/۵ درجه کمتر از دمای سطح قالب (L4) بهینه‌ترین سطح از پارامتر دمای ورودی سیال خنک کاری است. در نهایت با توجه به توضیحات این بخش بهینه‌ترین سطح از هر پارامتر ورودی که بهینه‌ترین آزمایش را نشان می‌دهند و برای تولید قطعات مناسب هستند در جدول ۱۰ آورده شده‌اند.

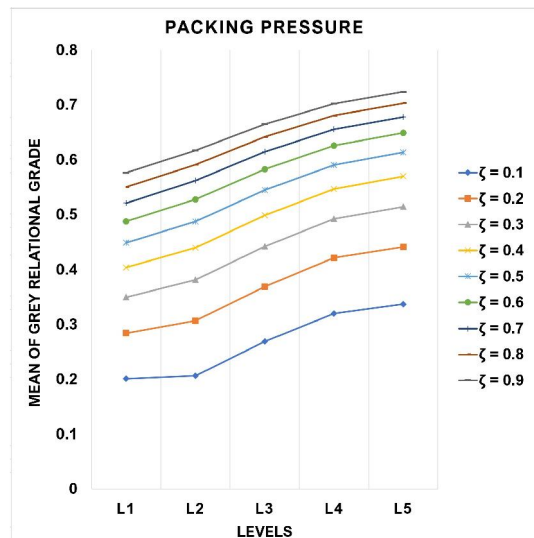




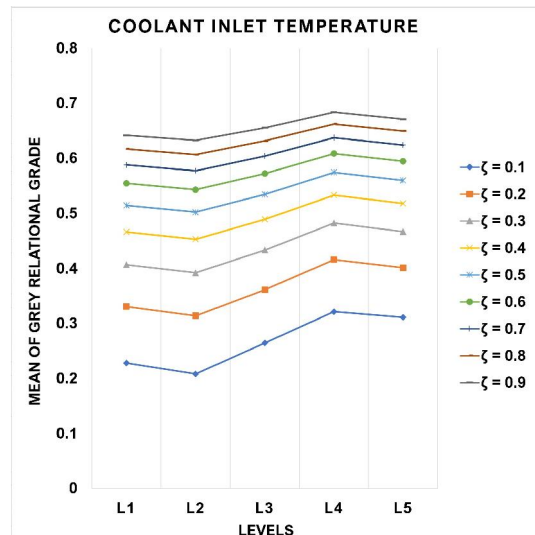
شکل ۷ نمودار مقادیر GRG دمای مذاب در سطح‌های مختلف



شکل ۸ نمودار مقادیر GRG دمای سطح قالب در سطح‌های مختلف



شکل ۹ نمودار مقادیر GRG فشار نگهداری در سطح‌های مختلف



شکل ۱۰ نمودار مقادیر GRG دمای ورودی سیال خنک‌کاری در سطح‌های مختلف

جدول ۱۰ بهترین سطح از هر پارامتر ورودی فرآیند

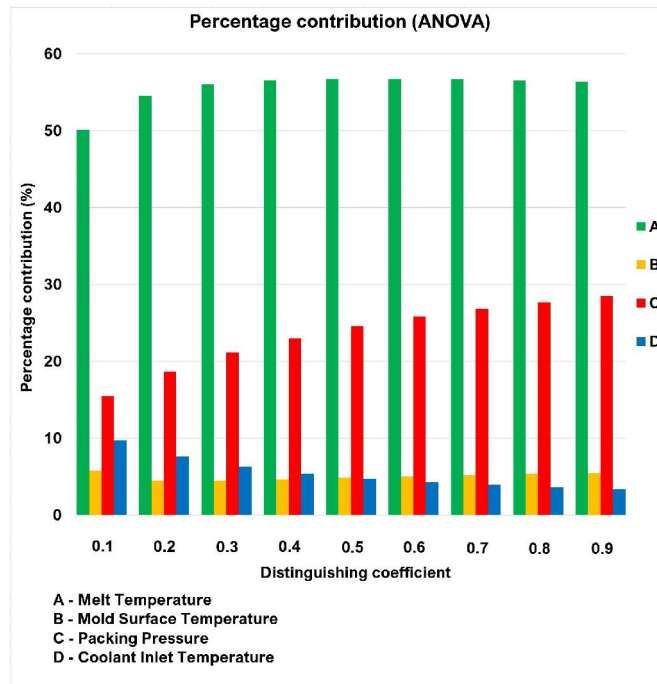
CIT(°C)	PP (%) (برحسب فشار تزریق)	MST(°C)	MT(°C)
MST-۱۲/۵	۱۰۰	۱۴۰	۳۶۰

### ۳-۳- محاسبه درصد مشارکت پارامترهای ورودی فرآیند

با استفاده از نرم‌افزار مینی تب ۲۰۲۰ آنالیز واریانس برای نتایج GRG آزمایش‌ها در ضریب تمایزهای مختلف (۰/۱ الی ۰/۹) محاسبه و درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی فرآیند بر اساس رابطه (۸) به دست آمدند که به عنوان نمونه در جدول ۱۱ آنالیز واریانس برای نتایج GRG در ضریب تمایز ۰/۵ آورده شده است. همچنین در نمودار شکل ۱۱ درصد مشارکت هر پارامتر در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۱ آنالیز واریانس نتایج GRG بر اساس ضریب تمایز ۰/۵

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
MT	۴	۰/۲۱۸۶۷	۰/۲۱۸۶۷	۰/۰۵۴۶۶۷	۱۲/۴۹	۰/۰۰۲
MST	۴	۰/۰۱۸۶۴	۰/۰۱۸۶۴	۰/۰۰۴۶۶۰	۱/۰۶	۰/۴۳۳
PP	۴	۰/۰۹۴۶۵	۰/۰۹۴۶۵	۰/۰۲۳۶۶۳	۵/۴۱	۰/۰۲۱
CIT	۴	۰/۰۱۸۳۰	۰/۰۱۸۳۰	۰/۰۰۴۵۷۶	۱/۰۵	۰/۴۴۱
Residual Error	۸	۰/۰۳۵۰۲	۰/۰۳۵۰۲	۰/۰۰۴۳۷۷		
Total	۲۴	۰/۳۸۵۲۸				



شکل ۱۱ درصد مشارکت هر پارامتر ورودی فرآیند در ضریب تمایزهای مختلف (۰/۱ الی ۰/۹)

در نمودار شکل ۱۱ همان طور که مشاهده می‌شود در تمامی ضریب تمایزها پارامتر دمای ذوب بیشترین تأثیر و درصد مشارکت را به خود اختصاص داده است و بعد از آن فشار نگهداری در رتبه دوم قرار دارد. پارامترهای دمای ورودی سیال خنک کاری و دمای سطح قالب در بازه ضریب تمایز ۰/۱ الی ۰/۴ به ترتیب در رتبه سوم و چهارم قرار گرفته‌اند. اما در بازه ۰/۵ الی ۰/۹ دمای سطح قالب در رتبه سوم و دمای ورودی سیال خنک کاری در رتبه چهارم قرار دارند.

### ۳-۴- مقایسه نتایج بهینه‌سازی با نتایج واقعی

در این بخش مقایسه نتایج واقعی و نتایج بهینه به دست آمده از شبیه‌سازی با یکدیگر به منظور اینکه تا چه حد نتایج بهینه شبیه‌سازی به نتایج واقعی نزدیک و قابل اطمینان هستند انجام می‌شود. ابتدا آزمایش بهینه به منظور تعیین پارامترهای تزریق برای آزمایش واقعی در نرم‌افزار مولدفلو بر اساس نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی شبیه‌سازی شده و اطلاعات فرآیندی برای تزریق قطعات در حالت بهینه استخراج و در جدول ۱۲ آورده شده است. در اینجا از دستگاه تزریق FUHRUNG Ningbo Leadway مدل BLAZE 1800-II برای قالب‌گیری استفاده شده (شکل ۱۲) که مقایسه مشخصات دستگاه (جدول ۱۳) با نتایج حداکثری شبیه‌سازی آزمایش بهینه از جدول ۱۲ (حداکثر فشار تزریق در فاز تزریق و حداکثر نیروی گیره‌بندی همچنین ابعاد قالب و وزن قطعات نشان می‌دهد که این دستگاه توانایی لازم برای تزریق آزمایش بهینه را دارا است.



شکل ۱۲ دستگاه تزریق پلاستیک FUHRUNG Ningbo Leadway مدل Blaze 1800-II و کیفی خشک کن دستگاه

جدول ۱۲ اطلاعات فرآیندی از شبیه‌سازی آزمایش بهینه

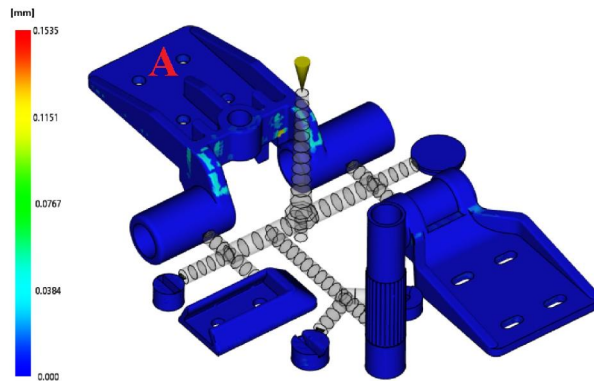
پارامتر	واحد	مقدار
حداکثر فشار تزریق در فاز تزریق	MPa	۱۳۲/۵۰۰۷
مدت زمان رسیدن به حداکثر فشار تزریق	s	۱/۳۵۷۴
فشار نگهداری (۱۰۰٪ فشار تزریق)	MPa	۱۳۲/۵۰۰۷
مدت زمان اعمال فشار نگهداری	s	۱۲
مدت زمان خنک کاری	s	۹۶/۴۳۲۶
مدت زمان کل	s	۱۰۹/۷۹
نیروی گیره‌بندی حداکثر	tonne	۱۷۶/۶۴۱۰
وزن کل	g	۹۵/۱۶۱۲
وزن قطعات	g	۸۱/۵۰۶۸
وزن بوش تزریق، راهگاه‌ها، گلوبی‌ها	g	۱۳/۶۵۴۴

جدول ۱۳ مشخصات دستگاه تزریق پلاستیک

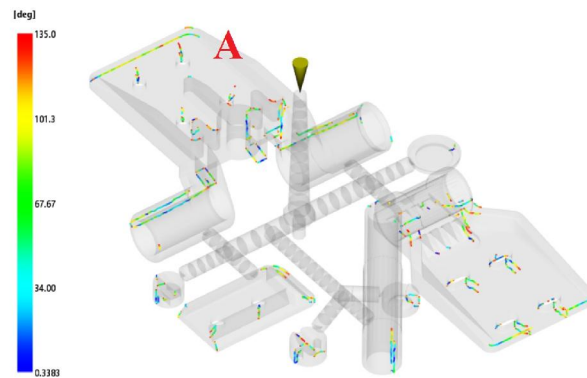
مشخصات	واحد	مقدار
قطر ماریج	mm	۴۵
حداکثر وزن تزریق	g	۳۲۶
حداکثر فشار تزریق	MPa	۱۷۶/۳
حداکثر نیروی گیره بندی	KN	۱۸۰۰
حداقل ارتفاع قالب	mm	۱۸۰
حداکثر ارتفاع قالب	mm	۵۳۰

برای قالب‌گیری قطعات ابتدا گرانول ماده تزریق باید به مدت ۴ ساعت و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مطابق اطلاعات آن ماده در خشک کن دستگاه تزریق گازگیری می‌شود (شکل ۱۲). همچنین از روغن به عنوان سیال خنک کاری قالب به علت کارکرد دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. در اینجا برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج واقعی فقط می‌توان از نتایج خط جوش، مکش و اعوجاج (انحراف نقاط) استفاده کرد. از نتایج انقباض حجمی (به صورت حداکثری و متوسط) به علت ارائه نتایج غیر قابل مقایسه (به علت بررسی نقطه‌ای و بر اساس درصد) نمی‌توان استفاده نمود. همان طور که در نتایج مکش، خط جوش و اعوجاج از شبیه‌سازی آزمایش بهینه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۳ الی ۱۵) قطعه A به علت داشتن نواحی دارای مکش، خط جوش و اعوجاج بیشتری نسبت به دیگر قطعات و همچنین داشتن نتایج بحرانی‌تری برای مقایسه با نتایج واقعی در نظر گرفته شده است. قطعات با توجه به شرایط بیان شده قالب‌گیری شده (شکل ۱۶) سپس برای دو نمونه از قطعه A در ابتدا تعداد نواحی دارای عیب‌های خط جوش و مکش مورد بررسی قرار گرفته. به علت شفاف بودن قطعات نواحی دارای خط جوش قابل تشخیص هستند. تعداد نواحی دارای خط جوش بر روی قطعات قالب‌گیری شده نشان می‌دهند فقط در یک مورد از هر نمونه قطعه A خط جوش مشاهده نشده است (جدول

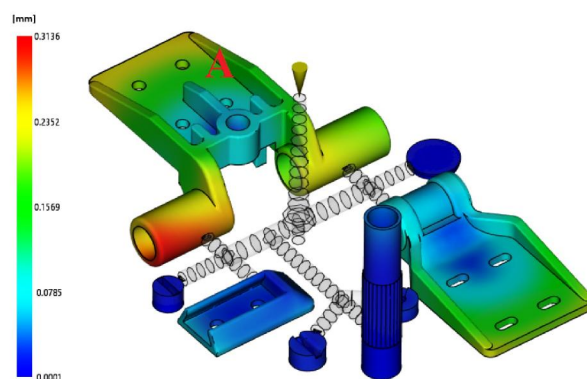
۱۴). همچنین برای نواحی دارای مکش در دو نمونه مورد بررسی ابتدا توسط دستگاه CMM<sup>۱</sup> با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر نواحی مشخص شده از شبیه‌سازی اندازه‌گیری می‌شوند نتایج نشان می‌دهند که در تمامی نواحی مشخص شده در قطعات قالب‌گیری شده مکش وجود دارد (جدول ۱۴) که میزان مکش نواحی مشخص شده اندازه‌گیری شده و در جدول ۱۵ آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهند که ۴ ناحیه اندازه‌گیری شده خطای بسیار زیادی نسبت به نتایج شبیه‌سازی دارند اما در دیگر موارد خطا کم است. همچنین برای بررسی نتایج اعوجاج (انحراف نقاط) اندازه دو ناحیه بحرانی (نواحی کناری قطعه به علت تغییر وضعیت زیاد و قابل اندازه‌گیری انتخاب شده‌اند) از دو نمونه قطعه A با دستگاه CMM اندازه‌گیری شده و مقایسه آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی خطای بسیار کمی در همه موارد را نشان می‌دهد (جدول ۱۶).



شکل ۱۳ نمایش مکش نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش بهینه

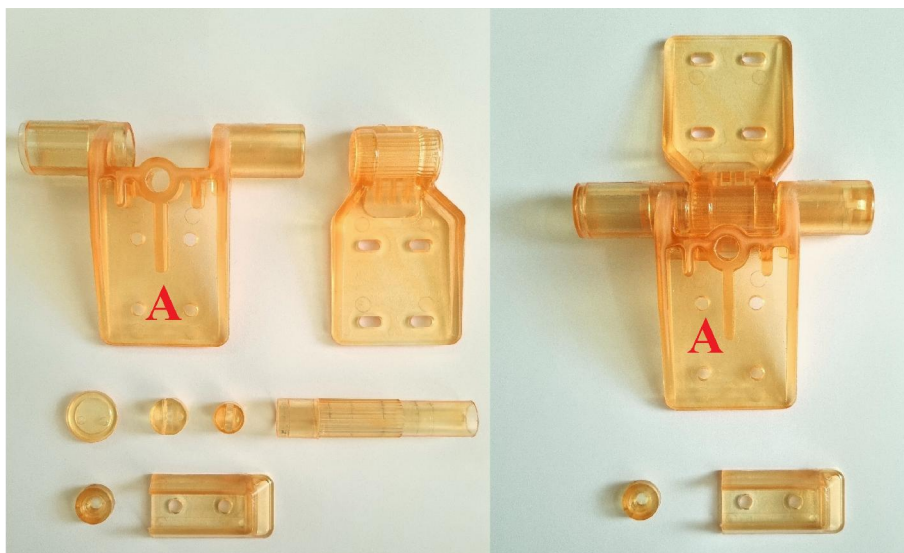


شکل ۱۴ نمایش خط جوش نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش بهینه



شکل ۱۵ نمایش اعوجاج نواحی مختلف از شبیه‌سازی آزمایش بهینه

<sup>۱</sup> Coordinate Measuring Machine



شکل ۱۶ قطعات قالب‌گیری شده آزمایش بهینه قبل و بعد از مونتاژ

جدول ۱۴ تعداد عیب‌های خط جوش و مکش مشاهده شده

عیب	شبیه‌سازی	نمونه ۱	نمونه ۲
تعداد خط جوش	۱۰	۹	۹
تعداد نواحی دارای مکش	۱۷	۱۷	۱۷

جدول ۱۵ مقادیر مکش شبیه‌سازی و نمونه‌های قالب‌گیری شده

نقاط	شبیه‌سازی (mm)	نمونه ۱ (mm)	درصد خطا ۱	نمونه ۲ (mm)	درصد خطا ۲
۱	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	۸/۵۱	۰/۰۴۴	۶/۳۸
۲	۰/۰۵۳	۰/۰۴۹	۷/۵۵	۰/۰۵۱	۲/۷۷
۳	۰/۱۲۰	۰/۲۸۱	-۱۳۴/۱۷	۰/۲۷۶	-۱۳۰
۴	۰/۰۴۴	۰/۲۵۲	-۴۷۲/۷۳	۰/۲۴۸	-۴۶۳/۶۴
۵	۰/۰۴۹	۰/۳۶۱	-۶۳۶/۷۳	۰/۳۵۳	-۶۲۰/۴۱
۶	۰/۰۴۸	۰/۳۱۳	-۵۵۲/۰۸	۰/۳۰۵	-۵۳۵/۴۲
۷	۰/۱۵۳	۰/۱۲۴	۱۸/۹۵	۰/۱۱۸	۲۲/۸۸
۸	۰/۰۶۳	۰/۰۵۹	۶/۳۵	۰/۰۵۷	۹/۵۲
۹	۰/۱۴۸	۰/۱۲۶	۱۴/۸۶	۰/۱۳۵	۸/۷۸
۱۰	۰/۱۲۲	۰/۱۱۰	۹/۸۴	۰/۱۰۵	۱۳/۹۳
۱۱	۰/۰۳۷	۰/۰۳۳	۱۰/۸۱	۰/۰۳۱	۱۶/۲۲
۱۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۶	-۷/۶۹	۰/۰۵۹	-۱۳/۴۶
۱۳	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۱۱/۱۱	۰/۰۳۵	۲/۷۸
۱۴	۰/۰۴۱	۰/۰۳۸	۷/۳۲	۰/۰۳۵	۱۴/۶۳
۱۵	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۹/۳۰	۰/۰۴۰	۶/۹۸
۱۶	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	-۶/۸۲	۰/۰۵۰	-۱۳/۶۴
۱۷	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲	۴/۵۵	۰/۰۴۱	۶/۸۲

جدول ۱۶ اندازه نواحی دارای انحراف بحرانی در شبیه‌سازی و نمونه‌های قالب‌گیری شده

ناحیه	شبیه‌سازی (mm)	نمونه ۱ (mm)	درصد خطا ۱	نمونه ۲ (mm)	درصد خطا ۲
۱	۱۰۵/۲۴۰	۱۰۵/۲۳۲	۰/۰۱	۱۰۵/۱۰۶	۰/۱۳
۲	۴۹/۱۱۰	۴۹/۰۸۹	۰/۰۴	۴۹/۰۵۱	۰/۱۲

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شده اصولی‌ترین و مناسب‌ترین مسیر بهینه‌سازی پارامترهای ورودی فرآیند تزریق پلاستیک بر اساس روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری و شبیه‌سازی در کنار یکدیگر ارائه شود. پارامترهای بهینه به دست آمده برای قالب‌گیری ۸ قطعه مورد نظر از جنس پلی اتر ایمید در این بررسی شامل دمای مذاب ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد، دمای سطح قالب ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نگهداری بر اساس ۱۰۰ درصد فشار تزریق و دمای ورودی سیال خنک‌کاری بر اساس ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای قالب هستند. در این بررسی بر اساس آنالیز واریانس دمای مذاب و فشار نگهداری مؤثرترین پارامترها در فرآیند بودند که به ترتیب رتبه اول و دوم را داشتند. پس از تعیین پارامترهای بهینه، قطعات قالب‌گیری و مونتاژ شدند. مقایسه نتایج بهینه‌سازی و نتایج واقعی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی بر اساس روش ترکیبی تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری و شبیه‌سازی مولدفلو کارآمد و مؤثر هستند. همچنین همان طور که در قسمت نتایج اشاره شد رتبه بهینه‌ترین سطح هر پارامتر (رتبه‌های اول) در ضریب تمایزهای ۰/۱ الی ۰/۹ تغییر نمی‌کند و ثابت است اما رتبه برخی دیگر سطح‌ها در این بازه تغییر می‌کند. همین طور رتبه مؤثرترین پارامترهای فرآیند بر اساس آنالیز واریانس در ضریب تمایزهای مختلف ثابت است اما رتبه دیگر پارامترها تغییر می‌کند. با اینکه تأثیر ضریب تمایز در نتایج تحلیل رابطه خاکستری و آنالیز واریانس ایجاد مشکلی در مسیر بهینه‌سازی نکرده است اما لازم است در تحقیقات آینده روش تحلیل رابطه خاکستری در انتخاب ضریب تمایز مناسب و تأثیرات این ضریب بررسی‌های بیشتری انجام گیرد.

#### فهرست علائم

$y_i(k)$	مقدار تابع پاسخ $k$ در آزمایش $i$
$x_i(k)$	مقدار نرمال‌سازی شده تابع پاسخ $k$ در آزمایش $i$
$X$	مقدار مورد نظر از تابع پاسخ $k$
$x_0(k)$	مقدار ایده آل تابع پاسخ $k$ در حالت نرمال‌سازی شده (برابر ۱)
$n$	تعداد GRCها در هر آزمایش
$N$	تعداد GRG آزمایش‌هایی که سطح $i$ از پارامتر $l$ در آن‌ها شرکت داشته
$(f)_{factor=l}^{level=i}$	مقدار GRG آزمایشی که سطح $i$ از پارامتر $l$ در آن شرکت داشته
$(M)_{factor=l}^{level=i}$	مقدار GRG میانگین برای سطح $i$ از پارامتر $l$
$SS_F$	مجموع مربعات برای فاکتور $F$ از آنالیز واریانس
$SS_T$	مجموع مربعات تمامی فاکتورها از آنالیز واریانس

#### علائم یونانی

$\Delta_{o,i}(k)$	دنباله انحراف
$\Delta_{min}$	کمترین اختلاف بین مقدار ایده آل $x_0(k)$ و $x_i(k)$
$\Delta_{max}$	بیشترین اختلاف بین مقدار ایده آل $x_0(k)$ و $x_i(k)$
$\zeta$	ضریب تمایز
$\gamma_{o,i}(k)$	مقدار GRC تابع پاسخ $k$ از آزمایش $i$
$\omega_k$	وزن تابع پاسخ $k$
$\gamma_{o,i}$	مقدار GRG آزمایش $i$



## References

- [1] Sateesh N, Reddy S D, Kumar G P, Subbiah R. Optimization of injection moulding process in manufacturing the top cap of water meter. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1; 18: 4556-4565. doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.430](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.430)
- [2] Farooque R, Asjad M, Rizvi S J. A current state of art applied to injection moulding manufacturing process -A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1; 43: 441-446. doi: [10.1016/j.matpr.2020.11.967](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967)
- [3] Atarodi A, Karami H, Ardeshir A, Hosseini K. Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA. *Journal of Water and Soil Science - Isfahan University of Technology*. 2020 May 10; 24(1): 13-26. doi: [10.47176/jwss.24.1.34123](https://doi.org/10.47176/jwss.24.1.34123) [In Persian]
- [4] Lin C L. Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*. 2004 Dec 28; 19(2): 209-220. doi: [10.1081/AMP-120029852](https://doi.org/10.1081/AMP-120029852)
- [5] Tosun N. Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006 Mar; 28: 450-455. doi: [10.1007/s00170-004-2386-y](https://doi.org/10.1007/s00170-004-2386-y)
- [6] Kuo C F J, Su T L, Jhang P R, Huang C Y, Chiu C H. Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing. *Energy*. 2011 May 1; 36(5): 3554-3562. doi: [10.1016/j.energy.2011.03.065](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.065)
- [7] Sreedharan J, Jeevanantham A K. Optimization of injection molding process to minimize weld-line and sink-mark defects using Taguchi based grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2018 Jan 1; 5(5): 12615-12622. doi: [10.1016/j.matpr.2018.02.244](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.244)
- [8] Ali M A M, Idayu N, Izamshah R, Kasim M S, Salleh M S, Sivarao. Multiobjective optimization of injection moulding process parameters on mechanical properties using Taguchi method and grey relational analysis. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(3.7): 14-16. doi: [10.14419/ijet.v7i3.7.16196](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.7.16196)
- [9] Kumar B P, Venkataramaiah P, Ganesh J S. Optimization of process parameters in injection moulding of a polymer composite product by using gra. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1; 18: 4637-4647. doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.448](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.448)
- [10] Gunawan H, Anggono W. Improving quality of injection mold using moldflow software simulation case study: new design plastic cup. In *Proceeding of International seminar on Product Design and Development 2006*.
- [11] Yang J K, Xu Y J. Warpage analysis of injection molding based on mold flow. *Advanced Materials Research*. 2012 Sep 19; 538: 1192-1196. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.1192](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.1192)
- [12] Xiao F, Chen L, Wang X. Calculation of shrinkage rate for injection molding based on moldflow. In *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress Springer Berlin Heidelberg*. 2013; 8: 1501-1510. doi: [10.1007/978-3-642-33738-3\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33738-3_48)
- [13] Vishnuvarthanan M, Panda R, Ilangovan S. Optimization of injection molding cycle time using moldflow analysis. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013; 13(7): 944-946. doi: [10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2934](https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2934)
- [14] Salunke M, Kate R, Lomate V, Sopal G. Injection molding methods design, optimization, simulation of plastic toy building block by mold flow analysis. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET)*. 2015 Jun; 6(6): 33-42.
- [15] Andhalkar V V, Dulange S R. Injection molding methods design, optimization, simulation of plastic bottle cap part by Mold flow analysis. *International Journal Of Current Engineering And Scientific Research (IJCESR)*. 2017; 4(7): 40-44.
- [16] Cedric T F, Hua H X. Injection molding cycle time reduction for automobile headlamp shell in moldflow. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019 Nov 1; 692(1). doi: [10.1088/1757-899X/692/1/012002](https://doi.org/10.1088/1757-899X/692/1/012002)
- [17] Limbore S S, Kale P D. Design and Optimization of Plastic Injection Mould for Plastic Lid. 5th Mechanical Engineering Post Graduate Students' Conference MECHPGCON2019, India. 2019.
- [18] Ali M A M, Idayu N, Aziz M S A, Hadzley M, Sivaraos. Optimization of process parameters in linear runner family injection mold using moldflow simulation software. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 11(4): 2475-2482.
- [19] Nie Y, Zhang H M, Niu J T. Optimization of the injection molding process parameters based on moldflow and orthogonal experiment. *Key Engineering Materials*. 2013 Sep 27; 561: 239-243. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.561.239](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.561.239)
- [20] Sateesh N, Reddy S D, Kumar G P, Subbiah R. Optimization of injection moulding process in manufacturing the flip cover of water meter. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1; 26: 240-246. doi: [10.1016/j.matpr.2019.11.089](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.089)



- [21] Saedon J B, Azlan M Z, Adenan M S, Azuddin M. Multi-objectives Optimization of Volumetric Shrinkage and Warpage for Disposable Mouth Mirrors Using Taguchi Method, ANOVA and Grey Relational Analysis (GRA). In Enabling Industry 4.0 through Advances in Manufacturing and Materials: Selected Articles from iM3F 2021, Malaysia. 2022 Aug 26; 161-172. doi: [10.1007/978-981-19-2890-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2890-1_16)
- [22] Kuo Y, Yang T, Huang G W. The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems. *Engineering Optimization*. 2008 Jun 1; 40(6): 517-528. doi: [10.1080/03052150701857645](https://doi.org/10.1080/03052150701857645)
- [23] Javed S A, Syed A M, Javed S. Perceived organizational performance and trust in project manager and top management in project-based organizations: comparative analysis using statistical and grey systems methods. *Grey Systems: Theory and Application*. 2018 Jun 28; 8(3): 230-245. doi: [10.1108/GS-01-2018-0009](https://doi.org/10.1108/GS-01-2018-0009)
- [24] Mahmoudi A, Javed S A, Liu S, Deng X. Distinguishing coefficient driven sensitivity analysis of GRA model for intelligent decisions: application in project management. *Technological and Economic Development of Economy*. 2020 Jun 2; 26(3): 621-641. doi: [10.3846/tede.2020.11890](https://doi.org/10.3846/tede.2020.11890)
- [25] Kuo Y, Yang T, Huang G W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & industrial engineering*. 2008 Aug 1; 55(1): 80-93. doi: [10.1016/j.cie.2007.12.002](https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.002)
- [26] Shoemaker J. *Moldflow design guide: a resource for plastics engineers*. Hanser publishers. 2006.
- [27] Jawahar N, Khare S. Failure Analysis of Injection Molded Parts Using Multi-Physics Approach. SAE Technical Paper 2015-01-0669. 2015 Apr 14. doi: [10.4271/2015-01-0669](https://doi.org/10.4271/2015-01-0669)
- [28] Injection molding processing guide. SABIC Innovative Plastics.
- [29] Injection Molding Processing Guide. General Electric Engineering Thermoplastics.