



Thermal-fluid analysis of effective parameters in plastic injection molding for the production of fuse/relay frames for motor housing of a passenger car

Fatemeh Rafei¹, Navid Ramezani^{2*}, Sayyed Aboozar Fanaee³

¹ MSC, Department of Chemistry, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

* 9177948974, Mashhad, Iran, ramezani@um.ac.ir

Article info

Article history:

Received: 16 Jul 2025

Revised: 23 Aug 2025

Accepted: 26 Aug 2025

Available online: 21 Sep 2025

Keywords:

Numerical model

Thermal-fluid analysis

Moldflow software

Optimization

<https://doi.org/10.22077/AEC.2025.9761.1031>

Abstract

In this work, thermal-fluid analysis and optimization of plastic injection molding of the fuse/relay frame of the motor housing of the Peugeot 206 car have been performed using Moldflow software. Also, the development of multiple decision-making methods and decision support systems to Moldflow software in this work have provided tools for analysis and optimization under conditions of uncertainty of this quality. In order to manufacture parts in a mold with good quality, a cooling system must always be designed to transfer heat evenly to the mold and cool the melt with quality. For this optimization of the system, a cooling temperature range corresponding to the melting temperature has been used. The results of this work show that for a cooling temperature of 150°C, the amount of depression is reduced by at least 49% and the volume shrinkage is reduced by at least 2% compared to other temperatures. The distortion is also increased slightly, so water vapor at a temperature of 150°C will provide the best cooling for the production of the present part. The optimized cooling systems include the designed system (1) with 7 coolant inlets and 7 coolant outlets and 15 baffles, the designed systems (2) and (3) with increased length and including 6 and 15 baffles, respectively. Comparison between the performance of these systems shows that the second cooling system is a selected and efficient cooling system compared to other systems, due to the minimum relative depression of about 6%, the minimum relative distortion of about 5%, and the insignificant change in volumetric shrinkage.

آنالیز حرارتی-سیالی پارامترهای مؤثر در تزریق پلاستیک برای تولید قاب فیوز/رله محفظه موتور یک خودروی سواری

فاطمه رافی^۱، نوید رمضانیان^{۲*}، سید ابوذر فناهی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد، ایران، ramezani@um.ac.ir

چکیده

در این کار، آنالیز حرارتی-سیالی و بهینه‌سازی تزریق پلاستیک برای قاب فیوز/رله محفظه موتور خودروی پژو ۲۰۶ توسط نرم افزار مولدفلو انجام شده است. همچنین توسعه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و افزودن سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به نرم‌افزار مولدفلو، ابزارهایی مؤثر برای تحلیل و بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت این مسئله را فراهم آورده‌اند. برای این که ساخت قطعات درون قالب با کیفیت خوبی انجام شود، همواره باید یک سیستم خنک‌کاری با کیفیت، برای انتقال حرارت یکنواخت با قالب و سردسازی مذاب طراحی شود. برای این بهینه‌سازی از یک بازه دمایی خنک‌سازی متناسب با دمای پُران استفاده شده است. نتایج این کار نشان می‌دهد باتوجه به اینکه برای دمایی خنک‌کاری ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مقدار فرورفتگی حداقل حدود ۴۹ درصد و انقباض حجمی حداقل حدود ۲ درصد نسبت به سایر دماها کاهش یافته و اعوجاج نیز به مقدار کمی افزایش یافته، لذا بخار آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بهترین خنک‌کاری را برای تولید قطعه حاضر ایجاد خواهد کرد. سیستم‌های خنک‌کاری بهینه‌شده شامل سیستم طراحی‌شده (۱) با ۷ ورودی و ۷ خروجی برای سیال خنک‌کننده و ۱۵ بافل، سیستم طراحی‌شده (۲) و (۳) با طول افزایش یافته و به ترتیب شامل ۶ و ۱۵ بافل هستند. مقایسه بین کارکرد این سیستم‌ها نشان می‌دهد که سیستم خنک‌کاری دوم با توجه به حداقل مقدار فرورفتگی نسبی حدود ۶ درصد و حداقل مقدار اعوجاج نسبی حدود ۵ درصد و تغییر ناچیز انقباض حجمی، نسبت به سایر سیستم‌ها، یک سیستم خنک‌کاری منتخب و کارآمد است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

نشر برخط: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی عددی

تحلیل حرارتی-سیالی

نرم افزار مولدفلو

بهینه‌سازی

۱ - مقدمه

عملکرد و قابلیت تولید را بررسی می‌کند و محدودیت‌های افت فشار و رابطه بین راندمان خنک‌سازی و مقاومت سیال را آشکار می‌کند. در [۱۶] مروی بر تأثیر خنک‌سازی همگن در قالب‌سازی تزریقی و آنالیز کارکرد انتقال حرارت به روش CFD ارایه شده است.

در کار حاضر به بررسی و بهینه‌سازی با روشهای تصمیم‌گیری چند معیاره از طریق الحاق این روش به کمک برنامه به نرم افزار مولدفلو پرداخته است. این گونه از حل امکان استفاده نرم افزار و حل کامل فرآیند قالب‌سازی تزریق‌همزمان با بهینه‌سازی چندهدفه را برای حل کاربردی ممکن ساخته‌است که در این مقاله هدف کار بر قاب فیوز/رله محفظه موتور 206 متمرکز شده‌است.

۲ - مدل سازی و شبیه سازی

۲-۱- وارد نمودن مدل در نرم افزار

اولین مرحله در تجزیه و تحلیل حرارتی-سیالی با نرم‌افزار مولدفلو، وارد کردن مدل سه بعدی قطعه، که قبلاً با نرم افزار سالیدورک طراحی شده، به نرم افزار مولدفلو با فرمت STEP بود. شکل (۱) مدل سه بعدی قطعه را در دو نمای مختلف نشان می‌دهد.

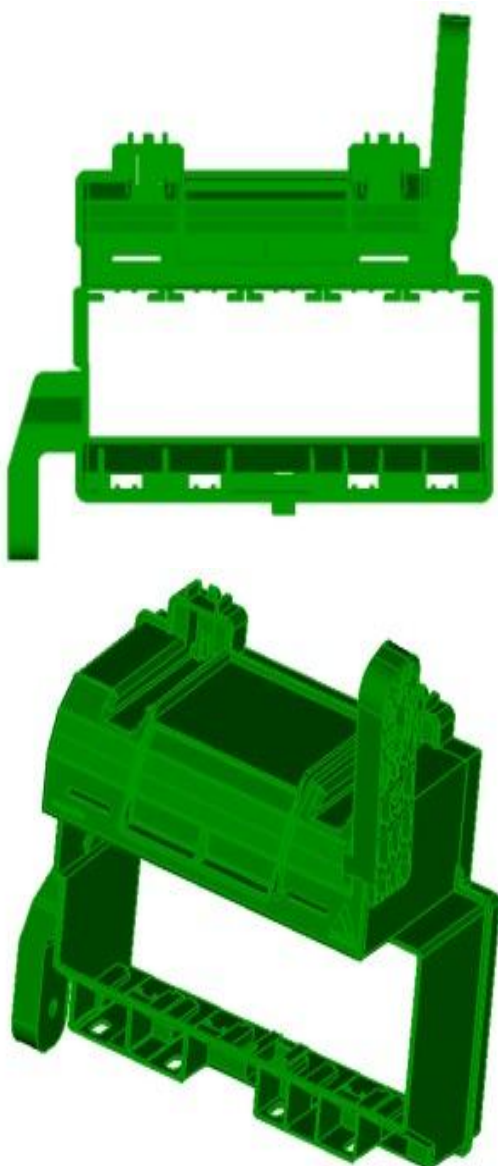


Fig. 1. 3D model of Peugeot 206 engine compartment fuse/relay frame part.

شکل ۱. مدل سه بعدی قطعه قاب فیوز/رله محفظه موتور پژو 206.

قالب‌گیری تزریقی روشی کاربردی برای شکل‌دهی قطعات بادقت ابعادی و پیچیدگی شکل بالا می‌باشد. درگذشته از این فرآیند فقط برای شکل‌دهی پلیمرهای ترموپلاست استفاده می‌شد [۱]. این فرآیند معمول‌ترین روش تولید قطعات پلاستیکی است. انواع مختلفی از اقلام پلاستیکی، که از نظر اندازه، پیچیدگی و کاربرد بسیار متفاوت هستند، با استفاده از قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند [۲]. فرآیند تزریق پلاستیک متأثر از مشخصه‌های زیادی است که این مشخصه‌ها کیفیت قطعات تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مشخصه‌هایی مانند دمای مذاب، دمای قالب، فشار تزریق، هندسه قطعه و ضخامت قطعه که می‌توانند باعث کاهش یا افزایش عیوب در قطعات تولیدی از قبیل تولید ناقص قطعات، خطوط جوش، انقباض و اعوجاج شوند [۳]. سال‌ها پیش، قبل از این که صنعت قالب‌گیری تزریق پلاستیک از نرم افزارهای تجزیه و تحلیل عناصر محدود برخوردار باشد، بیشتر سازندگان قالب تزریق از سبک و تجربه قدیمی و روش آزمون و خطا استفاده می‌کردند. این روش، که در مرحله آزمایش مورد نیاز است، می‌تواند از طریق مهندسی به کمک کامپیوتر^۱ با شبیه سازی الگوی جریان رزین و عیوب پیش‌بینی‌شده کاهش یابد و با بهبود بالانس جریان می‌توان از آن جلوگیری کرد [۲]. امروزه بهینه‌سازی پارامترهای تزریق در قالب‌گیری به روش تزریق به دو روش تجربی و شبیه‌سازی انجام می‌شود. از آنجا که انقباض و تابیدگی از جمله نقص‌های رایج هستند که کیفیت نهایی محصول را کاهش می‌دهند، بنابراین با بدست آوردن نتایج دقیق و تجزیه و تحلیل، مناسب‌ترین شرایط تزریق جهت افزایش کیفیت نهایی محصول قابل دستیابی است [۴]. تجزیه و تحلیل از طریق مهندسی به کمک کامپیوتر، متداول‌ترین روش تجزیه و تحلیل مورد استفاده در صنعت تولید است. به طور خاص، تعیین موقعیت خطوط جوش در قطعه با استفاده از این روش آسان است [۵]. نرم افزار مولدفلو^۲ در تجزیه و تحلیل قالب قطعات پلاستیکی استفاده می‌شود که می‌تواند به منظور پیش‌بینی نقص احتمالی در طراحی محصول تقلید کند، بنابراین عملکرد و کیفیت قطعات پلاستیکی تأیید می‌شود [۶]. نرم افزار مولدفلو یکی از نرم افزارهای معروف در فرآیند قالب‌گیری تزریقی برای تعیین رفتار محصول بر اساس خواص ترموپلاستیک مورد استفاده است. اکثر محققان بر این باورند که نرم افزار مولدفلو نتایج خوبی از شبیه سازی انجام شده در مقایسه با هر نرم افزار دیگری ارائه می‌دهد [۷]. مولدفلو اساساً می‌تواند زمان چرخه قطعه، زمان پر شدن و بسیاری از نتایج فرآیند تزریق پلاستیک را پیش‌بینی کند و نتایج دلخواه را به محققین بدهد [۸]. مهم‌ترین مزیت انجام تجزیه و تحلیل پر کردن در نرم افزار مولدفلو، پیش‌بینی الگوی پر شدن است که کمک می‌کند برخی از نقایص موجود در محصول درک شود. برخی از مزایای دیگر استفاده از این نرم افزار کاهش ضایعات، پرکردن متعادل و توزیع مناسب فشار، انتخاب مواد، تعیین نیروی گیره بندی، شناسایی محل جوش و هم چنین شناسایی سطح تنش برشی است. این تجزیه و تحلیل می‌تواند به پیش‌بینی تزریق‌های کوتاه کمک کند. اگر قطعه ای دیواره با ضخامت متغیر دارد، این تجزیه و تحلیل برای اطمینان از پر شدن آن مهم است [۹-۱۱]. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند در شبیه‌سازی قالب‌گیری تزریقی پلاستیک برای فن پروانه دمنده با استفاده از روش سطح پاسخ در [۱۲] نشان داده شده‌است. برای بهینه‌سازی سه سطح از پارامترهای فرآیند تزریق شامل دمای ذوب، دمای قالب‌گیری، زمان تزریق و فشار تزریق انتخاب شدند که ماده مورد استفاده پلی‌پروپیلن بوده و نتایج نشان داد که مقادیر بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار عبارتند از دمای ذوب 210 درجه سانتی‌گراد، دمای قالب‌گیری 110 درجه سانتی‌گراد، زمان خنک‌سازی 0.8 ثانیه و فشار تزریق 212.81 مگاپاسکال. در [۱۳] ساخت افزودنی‌های فلزی با تزریق پلاستیک با مجراهای خنک-کاری تطبیقی پذیر نشان داده شده است. این کار نشان می‌دهد که هندسه بهینه قالب با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه و با توجه به اهداف چندگانه زمان خنک‌سازی، عدم یکنواختی دما و افت فشار در مجرا تعیین می‌شود. در [۱۴] مدلسازی سه بعدی تزریق پلاستیک با خنک‌کاری با شبکه‌های منظم بررسی شده-است. نتایج شبیه‌سازی حرارتی نشان می‌دهد که ساختارهای شبکه‌ای ضخیم‌تر، استحکام مکانیکی را افزایش می‌دهند اما همزمان منجر به افزایش زمان خنک‌سازی می‌شوند. در [۱۵] بهینه سازی توپولوژی مجراهای خنک‌کننده همگن برای قالب-گیری تزریقی نشان داده شده‌است. این فرآیند بهینه‌سازی، محدودیت‌های چندگانه

1. Computer-Aided-Engineering (CAE)

2. Autodesk Moldflow Insight (AMI)

دمای آب ورودی 25 درجه سانتی‌گراد، دمای مذاب 280 درجه سانتی‌گراد، دمای قالب 80 درجه سانتی‌گراد، زمان تزریق 1 ثانیه، زمان سیکل 85 ثانیه و زمان فشرده سازی 30 ثانیه در همه شبیه سازی‌ها یکسان بود.

هر چه میزان نقایص فرورفتگی و انقباض حجمی در قطعه کمتر باشد، کیفیت محصول بالاتر است. با توجه به مقادیر حاصل از بهینه سازی قطر بوش تزریق در جدول (۳)، قطر مناسب برای بوش تزریق 3.5 میلی‌متر است زیرا کمترین مقدار فرورفتگی و انقباض حجمی را دارد.

جدول ۳. نتایج بهینه سازی قطر بوش تزریق.

Table 3. The injection bush diameter optimization results.

	1	2	3	4
Injection bush diameter (mm)	2.5	3	3.5	4
Indentation index (%)	2.056	2.063	1.997	2.103
Volumetric contraction (%)	13.74	13.75	13.74	13.76

جدول (۴) نتایج بهینه سازی طول بوش تزریق را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، مقدار فرورفتگی و انقباض حجمی با بوش تزریق به طول 100 میلی‌متر کمترین است. بنابراین طول مناسب برای بوش تزریق 100 میلی‌متر انتخاب شد.

جدول ۴. نتایج بهینه سازی طول بوش تزریق.

Table 4. The injection bush length optimization results.

	1	2	3	4
Injection bush length (mm)	70	80	100	130
Indentation index (%)	2.069	2.039	1.997	2.123
Volumetric contraction (%)	13.82	13.79	13.74	13.82

در جدول (۵) نتایج بهینه سازی قطر راهگاه قابل مشاهده است. با توجه به این جدول، مقادیر فرورفتگی و انقباض حجمی با راهگاه به قطر 12 میلی‌متر کمترین است.

جدول ۵. نتایج بهینه سازی قطر راهگاه.

Table 5. Results of optimization of the gate diameter.

	1	2
Gate diameter (mm)	10	12
Indentation index (%)	1.997	1.997
Volumetric contraction (%)	13.74	13.74

نتایج بهینه سازی قطر گوی در جدول (۶) نشان می‌دهد مقادیر فرورفتگی و انقباض حجمی با گوی به قطر 3.5 میلی‌متر کمترین است. بنابراین قطر بهینه گوی 3.5 میلی‌متر است.

جدول ۶. نتایج بهینه سازی قطر گوی.

Table 6. The throat diameter optimization results.

	1	2	3	4
Throat diameter (mm)	3	3.5	4	4.5
Indentation index (%)	2.084	1.996	2.075	2.013
Volumetric contraction (%)	13.77	13.74	13.84	13.90

پس از دستیابی به ابعاد بهینه سیستم راهگاه، تجزیه و تحلیلی جهت مقایسه راهگاه سرد و گرم با تنظیمات اولیه قطر مجراها 12 میلی‌متر، دمای آب ورودی 25 درجه سانتی‌گراد، دمای مذاب 280 درجه سانتی‌گراد، دمای قالب 80 درجه سانتی‌گراد، زمان تزریق 1 ثانیه، زمان سیکل 85 ثانیه، زمان فشرده سازی 30 ثانیه، انجام شد. نتایج در جدول (۷) گزارش شده است. با توجه به نتایج این جدول، مقدار سه نقص اصلی فرورفتگی، انقباض حجمی و اعوجاج برای راهگاه گرم کمتر است. به همین دلیل راهگاه گرم برای قطعه انتخاب شد.

جدول ۷. مقایسه نتایج راهگاه سرد و گرم.

Table 7. The comparison of cold and hot runner results.

	Hot gate	Cold gate
Warp (mm)	1.864	1.871
Indentation index (%)	1.986	1.996
Volumetric contraction (%)	13.72	13.74

برای تحلیل این مسئله در نرم افزار مولدفلو از شبکه دوبعدی استفاده می‌شود. این نوع شبکه زمانی مناسب است که مناطق نازک زیادی در طراحی قطعه وجود داشته باشد. همچنین اختلاف ضخامت در قسمت‌های مختلف قطعه کم باشد. محاسبات در این نوع شبکه‌بندی به علت کم بودن تعداد گره‌ها، سریع تر است و بنابراین زمان انجام تجزیه و تحلیل‌های مختلف کمتر است. عدد شبکه برای این قطعه 2.5 میلی‌متر انتخاب شد. بیشترین نسبت ابعادی المان‌های مثلثی برای تجزیه و تحلیل باید زیر 8 و درصد تطابق بالای 90 درصد باشد در ابتدا پس از شبکه‌بندی مدل با عدد شبکه 2.5 میلی‌متر، بیشترین نسبت ابعادی 33.62 بود که به روش دستی به عدد 7.86 کاهش داده شد. تعداد المان‌های مثلثی قطعه پس از اصلاح شبکه 117286، تعداد گره‌های متصل 58595 است. تعداد لبه‌های آزاد، لبه‌های چندگانه، المان‌های روی هم افتاده، المان‌های متقاطع نیز پس از اصلاح شبکه صفر و درصد تطابق 90.7 شد.

۲-۲- انتخاب ماده و دستگاه

مواد مورد استفاده در تجزیه و تحلیل تأثیر زیادی بر نتایج دارد [۱۰]. بنابراین باید ماده مورد نظر با دقت انتخاب شود تا نتایج آنالیز مورد قبول باشند. ماده مورد نظر پلی‌آمید 6.6 با 14 درصد وزنی الیاف شیشه است. جدول (۱) مشخصات ماده ترموپلاستیک را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات ماده پلی‌آمید 6.6 با 14٪ وزنی الیاف شیشه.

Table 1. Material specifications of Polyamide 6.6 with 14% by weight of glass fibers.

Brand name	Heramid A EFG015W 3733 BK
Manufacturer company	Radici Plastics
Mold surface temperature (°C)	90
Melt temperature (°C)	280
Mold temperature range (°C)	80-100
Melt temperature range (°C)	280-300
Ejector temperature (°C)	216
Maximum shear stress (MPa)	0.5
Maximum shear rate (s ⁻¹)	600000
Melt density (gc ⁻¹ m ⁻³)	0.99512
Solid density (gc ⁻¹ m ⁻³)	1.2103

یک دستگاه قالب‌گیری تزریقی را می‌توان از پایگاه داده انتخاب کرد تا در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گیرد و با فرایند تولید واقعی مطابقت داشته باشد. با انتخاب ماشین قالب‌گیری واقعی، می‌توان پارامترهایی مانند سرعت ماردون نسبت به زمان یا مکان ماردون نسبت به زمان را مشخص کرد، بنابراین تجزیه و تحلیل دقیق تری انجام می‌شود [۱۰]. مشخصات دستگاه تزریق مورد نظر در جدول (۲) آمده است. جنس قالب نیز فولاد M200 انتخاب شد.

جدول ۲. مشخصات دستگاه تزریق.

Table 2. Specifications of the injection device.

Brand name	NN 275 275 tone 21.30 oz (60 mm)
Maximum injection rate (cm ³ s ⁻¹)	565.8
Maximum screw diameter (mm)	60
Maximum hydraulic pressure (MPa)	14.0276
Maximum clamping force (ton)	249.397

۳-۲- طراحی سیستم راهگاهی و بهینه سازی ابعاد آن

برای تجزیه و تحلیل با نرم افزار مولدفلو، طراحی سیستم راهگاه شامل گوی، راهگاه و بوش تزریق ضروری است. سیستم راهگاه باید برای دستیابی به الگوی جریان مورد نیاز طراحی شود. ابعاد آن باید طوری تنظیم شود که جریان متعادل و دارای حداقل حجم باشد. سیستم راهگاه همچنین باید برای دستیابی به شرایط قالب‌گیری که برای بهینه سازی قطعه استفاده می‌شود، طراحی شود [۱۰].

بهینه سازی ابعاد سیستم راهگاهی، با راهگاه سرد انجام شد. طراحی راهگاه به‌صورت خودکار توسط نرم افزار صورت گرفت و برای بهینه سازی ابعاد سیستم راهگاه در هر مرحله شبیه سازی‌های مختلف با آنالیز خنک سازی، پرکردن و فشرده سازی انجام شد. تنظیمات اولیه نرم افزار و آنالیز مانند قطر مجراها 12 میلی‌متر،

۴-۲- طراحی و بهینه سازی سیستم خنک کاری

طراحی قطعه برای صنایع از طریق قالب گیری تزریقی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این که ساخت قطعات درون قالب با کیفیت خوبی انجام شود، همواره باید یک سیستم خنک کاری جهت انتقال حرارت یکنواخت با قالب و سردسازی مذاب به صورت با کیفیت طراحی شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی در این فضا به پارامترهایی مانند فاصله بین مذاب و لوله، هندسه طراحی سیستم خنک کاری، نوع سیال انتخابی و دبی سیال ورودی به سیستم خنک کننده بستگی دارد. همچنین سیستم خنک کننده باید بتواند گرما را با سرعت مورد نیاز از قالب خارج کند تا قطعه پلاستیکی از درون قالب بدون اعوجاج خارج شود.

توسعه روشهای تصمیم گیری چند معیاره و سیستمهای پشتیبان تصمیم گیری ابزارهایی مؤثر برای تحلیل و انتخاب بهترین گزینهها در شرایط عدم قطعیت فراهم آورده اند. این ابزارها به طراح کمک میکند تا دادههای مختلف را به صورت بهینه پردازش کرده و تصمیماتی جهت بهبود محصول تولیدی حاصل از قالب سازی اتخاذ گردد. در تصمیم گیری چند معیاره کار حاضر معیار اصلی تغییرات دما و طراحی سیستم خنک کننده با واحدهای متفاوت به صورتی است که کیفیت فرآیند شکل دهی مذاب درون قالب به بهترین صورت درآید. بنابراین پارامترهای پیچیده شاخص فرورفتگی و درصد انقباض حجمی نیز جهت درک کیفیت قالب سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. برای این بهینه سازی از یک بازه دمای خنک سازی متناسب با دمای پُران و سه طرح هندسی خنک سازی برای حداکثر تبادل بین سیال و قالب استفاده شده است. نرم افزار مولد فلو در کار حاضر از روش تاپسیس استفاده می کند. در این روش نقطه ای به عنوان گزینه بهینه انتخاب می شود که کمترین فاصله را از راه حل ایده آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه حل ایده آل منفی داشته باشد.

۵-۲- بهینه سازی دما و هندسه سیستم خنک کننده

با توجه به محدوده دمای مذاب بین 280 تا 300 درجه سانتی گراد سیال آب به عنوان سیال خنک کننده تعیین شده که می تواند انتقال حرارت مؤثر را در محدوده سرد شدن مذاب با کیفیت خوبی ارائه دهد. بنابراین نیاز نیست هزینه بیشتری برای سیال انتقال حرارت با دامنه تغییر فازی بزرگتر یا کوچکتری نسبت به آب داشته باشیم. هر چه دمای سیال خنک کننده کمتر باشد، زمان رسیدن قطعه به دمای پُران و سیکل تزریق کوتاهتر می شود. شبیه سازیها به منظور بهینه سازی دمای آب ورودی به مجراهای خنک کاری با شرایط قطر مجراها 12 میلی متر، دمای مذاب 280 درجه سانتی گراد، دمای قالب 80 درجه سانتی گراد، زمان تزریق 1 ثانیه، زمان چرخه 85 ثانیه و زمان فشرده سازی 30 ثانیه انجام می شود.

نتایج بهینه سازی دمای آب ورودی به مجراهای خنک کاری در جدول (۸) آمده است. پس از مقایسه مقادیر فرورفتگی، انقباض حجمی و اعوجاج برای دماهای متفاوت آب ورودی به مجراهای خنک کننده در این جدول، می توان نتیجه گرفت با افزایش دمای آب، مقدار فرورفتگی و انقباض حجمی کاهش ولی میزان اعوجاج افزایش می یابد. باتوجه به اینکه مقدار فرورفتگی حدود 49% و انقباض حجمی حدود 2% برای دمای 150 درجه سانتی گراد نسبت به دمای 80 درجه سانتی گراد کاهش یافته و اعوجاج نیز به مقدار کمی حدود 5% افزایش داشته است، دمای مناسب 150 درجه سانتی گراد برای سیال آب انتخاب شد. در واقع استفاده از بخار آب در دمای 150 درجه سانتی گراد بهترین خنک کاری را برای تولید قطعه حاضر ایجاد خواهد کرد.

جدول ۸. نتایج بهینه سازی دمای آب ورودی به مجراهای خنک کاری.

Table 8. The results of optimizing the temperature of water entering the cooling channels.

Cooling fluid temperature (°C)	25	80	150
Warp (mm)	1.864	1.971	2.075
Indentation index (%)	1.986	1.648	0.8396
Volumetric contraction (%)	13.72	13.60	13.37

۶-۲- بهینه سازی هندسه سیستم خنک کننده

هندسه پیچیده در قالب های پلاستیکی می تواند مناطقی را ایجاد کند که خنک کردن آنها دشوار است. به عنوان مثال، قسمت هایی از قالب که به داخل حفره منتقل می شوند، مانند برجستگی ها و دنده ها، بارهای حرارتی زیادی را حمل می کنند زیرا توسط

پلاستیک احاطه شده اند. آنها همچنین مساحت فلز را که از طریق آن گرما می تواند خارج شود محدود می کنند. بنابراین برای هدایت سیال خنک کننده به مناطق دارای بار حرارتی بالا، طراحی هندسه سیستم خنک کننده ضروری می باشد [۱۰]. انتخاب تعداد ورودی و خروجی با هدف ایجاد جریان کاملاً توسعه یافته آرام درون مجراها و پوشش حداکثری مذاب توسط لوله ها است. این امر سبب ایجاد یک انتقال حرارت یکنواخت با امکان قطع سریع می باشد. همچنین نقاط ورودی سیال به مجراها به صورتی انتخاب می شود که یک مبدل جریان متقاطع در فضای باز ایجاد کند.

سیستم خنک کاری طراحی شده (۱) که در شکل (۲) نشان داده شده با 7 ورودی و 7 خروجی سیال خنک کننده، به صورت دستی طراحی گردیده است. این سیستم خنک کننده، متشکل از 15 بافل در قسمت های داخلی قطعه و مجراهای ساده در اطراف قطعه است که بافل ها خود هوای واسط بین لوله خنک کاری و قالب مذاب را تحت تأثیر قرار داده و با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی تبادل حرارت را افزایش می دهد.

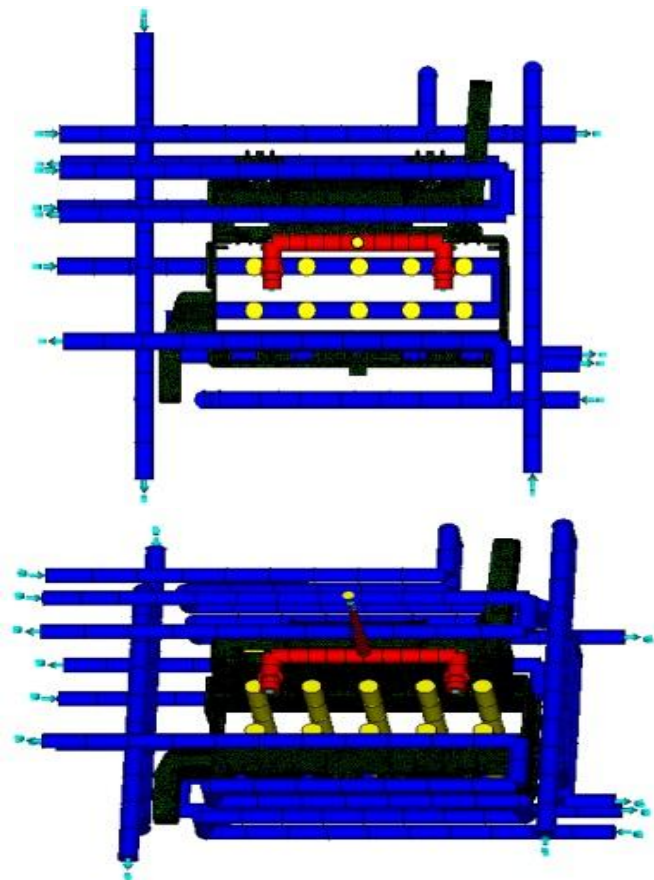


Fig. 2. Designed cooling system (1) in two views.

شکل ۲. سیستم خنک کاری طراحی شده (۱) در دو نما.

برای سیستم خنک کاری دوم که در شکل (۳) نشان داده شده است در مقایسه با سیستم خنک کاری اول، مجراها 20 میلی متر از قطعه دورتر شدند و تعداد بافل ها 6 عدد کمتر شد. در سیستم خنک کاری نوع سوم مطابق با شکل (۴) تعداد بافل 15، اما تعداد و طول مجراها از دو سیستم خنک کاری قبل بیشتر است. به منظور مقایسه این سه سیستم خنک کننده، تنظیمات اولیه شبیه سازی مانند قطر مجراها 12 میلی متر، دمای آب ورودی 150 درجه سانتی گراد، دمای مذاب 280 درجه سانتی گراد، دمای قالب 80 درجه سانتی گراد، زمان تزریق 1 ثانیه، زمان چرخه 85 ثانیه و زمان اعمال فشار 30 ثانیه در هر سه یکسان بود. در جدول (۹) نتایج مقایسه سیستم های خنک کاری نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول، در سیستم خنک کاری دوم با 6 بافل و فاصله دورتر لوله ها، مقدار فرورفتگی حدود 6% نسبت به دو سیستم دیگر و مقدار اعوجاج حدود 5% نسبت به سیستم خنک کاری اول کمتر است. از آن جایی که تفاوت مقدار انقباض حجمی نیز ناچیز است بنابراین سیستم خنک کاری دوم به عنوان سیستم خنک کننده کارآمد معرفی می شود.

	Cooling system (1)	Cooling system (2)	Cooling system (3)
Warp (mm)	2.075	1.975	1.978
Indentation index (%)	0.8396	0.7842	0.8354
Volumetric contraction (%)	13.37	13.38	13.37

۳ - نتایج آنالیز بهینه پرکردن و فشرده سازی

۱-۳- زمان پر شدن

نتیجه زمان پر شدن، موقعیت جبهه جریان را در فواصل منظم با پر شدن حفره نشان می‌دهد. رنگ‌ها در شکل (۵) نشان دهنده جریان پلاستیک به داخل قطعه است. همه مناطق با رنگ یکسان به طور همزمان پر می‌شوند. بنابراین در ابتدای تزریق آبی تیره و آخرین مناطقی که باید پر شود، قرمز است. اگر قطعه کامل پر نشده باشد، قسمتی که پر نشده رنگ ندارد. این قطعه با گذشت زمان 1.093 ثانیه از شروع فرایند تزریق پر شد. بهتر است که همه مناطق قطعه به طور منظم و یکنواخت پر شوند تا عیوب نهایی آن‌ها کمتر باشد که این امر، بستگی به هندسه و طراحی قطعه و انتخاب محل گوی‌ها دارد.

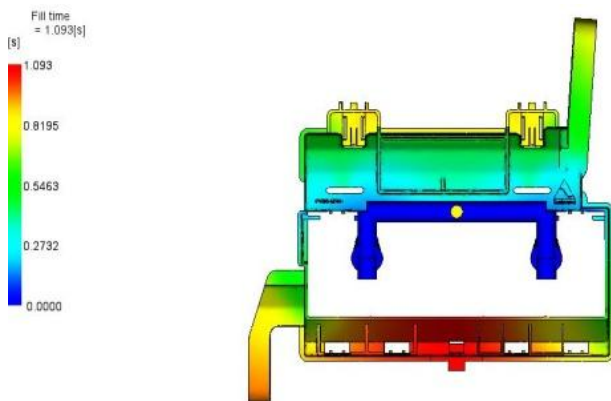


Fig. 5. Filling the part with thermoplastic melt.

شکل ۵. پر شدن قطعه از مذاب ترموپلاستیک.

۲-۳- فرورفتگی

فرورفتگی، نشان دهنده درجه ای از عمق است که تحت تأثیر مواد، هندسه قطعه، موقعیت نسبت به محل تزریق و شرایط پر شدن قالب قرار دارد. فرورفتگی برای محصول قالب‌گیری شده یک نقص است و تا جای ممکن باید از به وجود آمدن آن جلوگیری کرد.

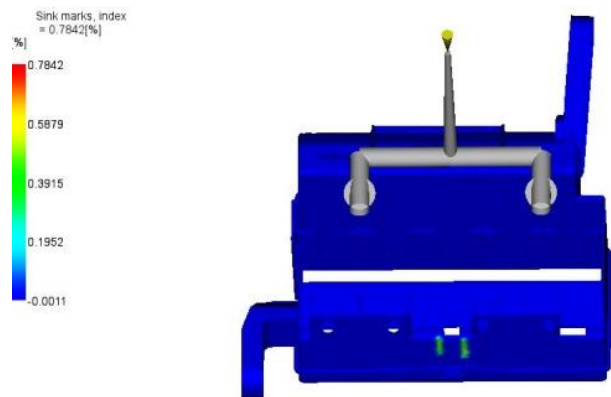


Fig. 6. Sink mark of the part.

شکل ۶. فرورفتگی قطعه.

مقدار فرورفتگی در این قطعه به دلیل نقص در طراحی، با افزایش زمان فشرده‌سازی و زمان چرخه، صفر نمی‌شود. البته فقط در بخش کوچکی از قطعه این نقص وجود دارد

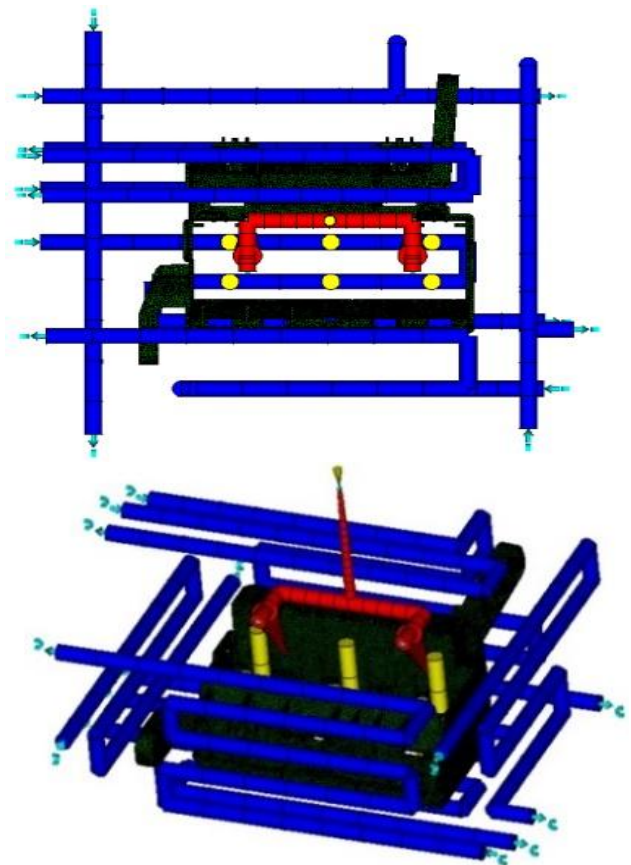


Fig. 3. Designed cooling system (2) in two views.

شکل ۳. سیستم خنک‌کاری طراحی شده (۲) در دو نما.

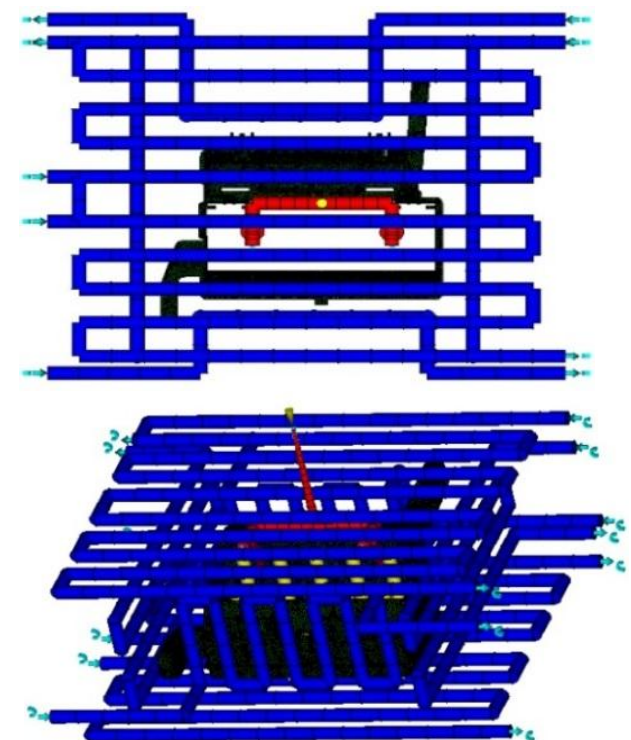


Fig. 4. Designed cooling system (3) in two views.

شکل ۴. سیستم خنک‌کاری طراحی شده (۳) در دو نما.

جدول ۹. نتایج مقایسه سه سیستم خنک‌کاری طراحی شده.

Table 9. The comparison results of three designed cooling systems.

نتیجه دمای مایع خنک کننده مدار، دمای مایع خنک کننده داخل مدار خنک کننده را نشان می دهد. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی باید در حدود 5 درجه سانتی گراد باشد. در شکل (9) دمای سیال درون لوله های خنک کننده نشان داده شده است. در قسمت هایی که فاصله کانال ها تا قطعه کمتر است و یا قسمت های گرم تر قطعه مانند قسمت های داخلی، دمای سیال در آن جا بالاتر است. با توجه به شکل (9)، ماکزیمم دمای آب درون کانال ها 153.4 درجه سانتی گراد و اختلاف این دما در سراسر مدار حدودا 5.3 درجه سانتی گراد است.

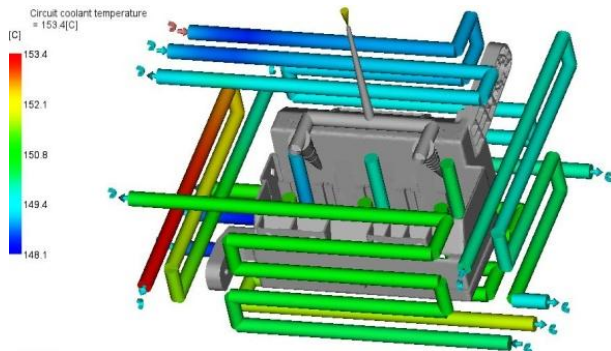


Fig. 9. Circuit coolant temperature.

شکل ۹. دمای سیال خنک کننده مدار.

۲-۴- زمان رسیدن به دمای پُران قطعه

زمان لازم برای رسیدن به دمای پُران قطعه نشان می دهد که نواحی مختلف قطعه چه مدت زمانی طول می کشد تا به دمای پُران برسد. در نواحی با ضخامت بالاتر و نواحی که به آسانی خنک نمی شوند، زمان بیشتری برای رسیدن به دمای پُران نیاز است. کاهش دمای مذاب و دمای قالب می تواند در کاهش زمان رسیدن به دمای پُران موثر باشد. زمان رسیدن به دمای پُران در شکل (۱۰) نشان داده شده است. زمان لازم برای رسیدن قطعه به دمای پُران 46.13 ثانیه است. در نواحی دارای رنگ سبز قطعه دیرتر از سایر نواحی آبی رنگ خنک می شود و نیاز به زمان بیشتری برای رسیدن به دمای پُران دارد.

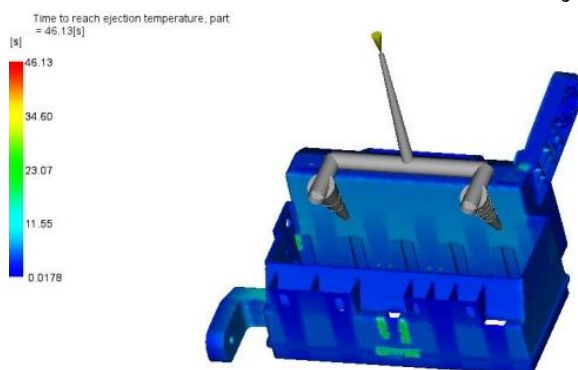


Fig. 10. Time to reach ejection temperature of the part.

شکل ۱۰. زمان رسیدن به دمای پُران قطعه.

۳-۴- حداکثر دمای قطعه

حداکثر دمای قطعه، میانگین دمای قسمت بالا و قسمت پایین سطح قالب در سراسر قطعه را نشان می دهد. حداکثر دمای قطعه باید کمتر از دمای پُران ماده باشد. اگر این دما بالاتر از دمای پُران ماده باشد، سیستم خنک کاری باید اصلاح شود. دمای پُران برای ماده پلی آمید 6.6 با 14 درصد الیاف شیشه، 216 درجه سانتی گراد است. شکل (۱۱) حداکثر دمای قطعه را 203.9 درجه سانتی گراد نشان می دهد که از دمای پُران ماده کمتر است.

۴-۴- نتایج آنالیز اعوجاج

انحراف قطعه در سه جهت x، y و z از نتایج آنالیز اعوجاج است. این نتیجه تغییر شکل قطعه را پس از پر شدن و انجماد کامل تعیین می کند. در نقاط گرم تر قطعه و در دیواره ها میزان انحراف و تغییر شکل بیشتر است.

و با اصلاح طراحی در این ناحیه می توان آن را برطرف کرد. روش های تجربی مانند قالب گیری به کمک گاز در حذف این علائم می تواند مؤثر باشد. شکل (۶) فرورفتگی قطعه را نشان می دهد. مقدار فرورفتگی با زمان چرخه 85 ثانیه، 0.7842 درصد است.

۳-۳- کسر لایه منجمد شده

نتیجه کسر لایه منجمد ضخامت لایه منجمد را به عنوان کسری از ضخامت قطعه نشان می دهد. مقادیر این نتیجه از صفر تا یک متغیر است. نواحی که دارای کسر لایه منجمد برابر با 1 هستند، کاملاً منجمد شده اند و دمای آن ها نزدیک یا پایین تر از دمای انتقال شیشه است. زمان خنک کاری و زمان فاز فشرده سازی باید به میزانی باشد که قطعه کاملاً منجمد شود و پس از آن پُران صورت بگیرد. شکل (۷) کسر لایه منجمد شده قطعه را نشان می دهد. با توجه به اینکه کسر لایه منجمد در سراسر قطعه برابر با 1 است، می توان از خنک شدن کامل قطعه در پایان سیکل تزریق اطمینان یافت.

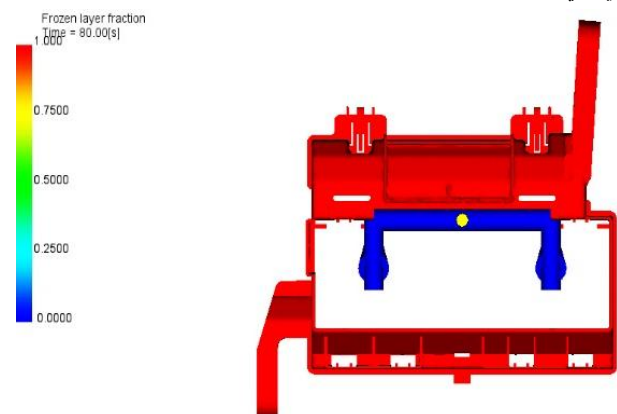


Fig. 7. Frozen layer fraction of the part.

شکل ۷. کسر لایه منجمد شده قطعه.

۴-۳- انقباض حجمی

انقباض حجمی، درصد افزایش چگالی موضعی از پایان مرحله فشرده سازی تا زمان سرد شدن قطعه تا دمای مرجع محیط است. ساختار پلی آمید 6.6 نیمه بلوری است و انقباض بالایی دارد. یعنی با خنک شدن مواد، حجم آن ها کاهش می یابد. افزایش فشار و زمان فاز فشرده سازی و نیز کاهش دمای مذاب و دمای قالب در کاهش مقدار انقباض محصول موثر است. انقباض در نقاط دارای ضخامت بالاتر، بیشتر است. شکل (۸) انقباض حجمی قطعه را نشان می دهد. مناطقی که در شکل (۸) به رنگ قرمز وجود دارند، بیشترین میزان انقباض را دارند. بیشینه انقباض حجمی برای این قطعه با زمان چرخه 85 ثانیه، 13.38 درصد است. برای کاهش انقباض حجمی، می توان درصد الیاف شیشه در کامپوزیت پلیمری را افزایش داد. همچنین استفاده از هسته سازها می تواند در کاهش انقباض حجمی قطعه موثر واقع گردد.



Fig. 8. Volumetric shrinkage of the part.

شکل ۸. انقباض حجمی قطعه.

۴ - نتایج آنالیز بهینه خنک کاری

۱-۴- دمای سیال خنک کننده مدار

- [2] Z. Razak, A. B. Sulong, N. Muhamad, M. K. Radzi, N. Farhani, D. T. Ismail, I. Tharazi, "Numerical Simulation Analysis of Wood/PP Composites for Injection-Moulded Car Battery Trays", *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7, No. 17, pp. 15-20, 2018.
- [3] M. Kouchaki, E. Soury, "Controlling the warpage of plastic parts in injection molding process using the variation in coolant temperature of core and cavity", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 39-46, 2019.
- [4] Z. SalahshorNejad, P. Saraeian, E. Shakori, Sh. Etemadi, M. Najafi, "Investigation and effect of number of recycling steps on molten flow rate and crystalline percent in injection process in wood-plastic composite", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 1-7, 2019.
- [5] Y. Fukushima, M. Kosaka, A. Sakamoto, "A study on the optimal mould design method for the prevention of weld-line by injection moulding CAE", *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1-16, 2020.
- [6] J. K. Yang, "Analysis and optimization of Plastic parts moldflow based on Mold Flow", In *Advanced Materials Research*, Vol. 709, pp. 262-265, 2013.
- [7] G. Singh, A. Verma, "A Brief Review on injection moulding manufacturing process", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 1423-1433, 2017.
- [8] J. B. Saedon, M. Z. Azlan, M. S. Adenan, M. Azuddin, "CAE Analysis for Disposable Mouth Mirror Based on Autodesk Moldflow Plastic Insight", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 834, No. 1, pp. 206-220, 2020.
- [9] I. Pandelidis, Q. Zou, "Optimization of injection molding design. Part I: Gate location optimization", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 873-882, 1990.
- [10] R. J. Palmer, "Polyamides and plastics", *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 873-882, 2000.
- [11] H. Hassan, N. Regnier, B. C. Le, G. Defaye, "3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 161-169, 2010.
- [12] M. U. Rosli, S. A. Termizi, C. Y. Khor, M. A. M. Nawi, A. A. Omar, M. I. Ishak, "Optimisation of process parameters in plastic injection moulding simulation for blower impeller's fan using response surface methodology", In *Intelligent Manufacturing and Mechatronics: Proceedings of SympoSIMM 2020*, pp. 309-318.
- [13] B. B. Kanbur, Y. Zhou, S. Shen, K. H. Wong, C. Chen, A. Shocket, F. Duan, "Metal additive manufacturing of plastic injection molds with conformal cooling channels", *Polymers*, Vol. 14, No. 3, pp. 424-429, 2022.
- [14] S. Shen, B. B. Kanbur, C. Wu, F. Duan, "Three-dimensional printing conformal cooling with structural lattices for plastic injection molding", *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, No. 5, pp. 107-115, 2024.
- [15] Y. Sun, A. G. Dastidar, A. Agazzi, R. Le Goff, J. Alexandersen, "Topology Optimisation of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding: A Scaling Strategy for Forced Convection in High Reynolds Number Flows", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 30, No. 5, pp. 1-5.
- [16] G. Wagner, J. M. Nóbrega, "Conformal Cooling Channels in Injection Molding and Heat Transfer Performance Analysis Through CFD—A Review", *Energies*, Vol. 18, No. 8, pp. 1972, 2025.

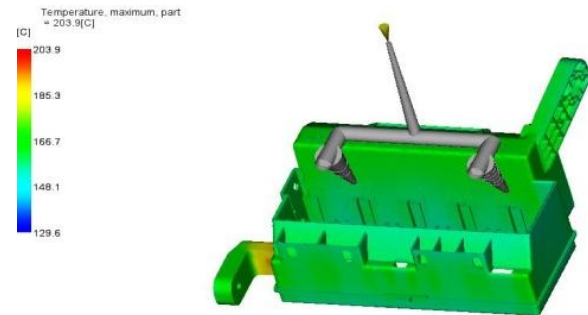


Fig. 11. Maximum temperature part.

شکل ۱۱. حداکثر دمای قطعه. نقص اعوجاج می‌تواند در اثر طراحی ضعیف قطعه، جهت‌گیری نامناسب الیاف شیشه، توزیع نامناسب ضخامت دیواره‌ها، صحیح عمل نکردن فشار پشت تزریق، فرسوده بودن شیر یک طرفه و ضعیف بودن سیستم کنترل دمای قالب ایجاد شود. به منظور کاهش آن، باید این عوامل کنترل شوند. در شکل (۱۲) اعوجاج قطعه نشان داده شده است. مقدار ماکزیمم اعوجاج در قطعه 1.975 میلی‌متر است.

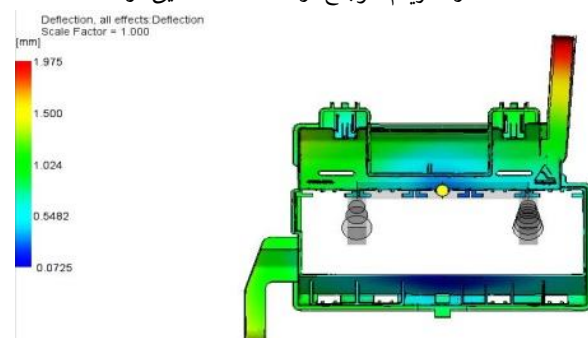


Fig. 12. Warpage and deflection of the part

شکل ۱۲. اعوجاج و تغییر شکل قطعه.

۵ - نتیجه گیری

در این کار آنالیز حرارتی-سیالی فرآیند قالب‌گیری مذاب برای رله محفظه موتور پژو 206 انجام شده و بهینه‌سازی این مسئله با تمرکز بر نوع راهگاه و سیستم خنک‌کاری انجام شده‌است. مهمترین نتایج به‌دست‌آمده از این کار عبارتند از:

- دمای جبهه مذاب در تمامی قسمت‌های قطعه 281.1°C می‌باشد که 1.1°C از دمای مذاب بالاتر است.
- حداقل دمای سیال خنک‌کننده 148.1°C و حداکثر آن 153.4°C می‌باشد.
- برای دمای خنک‌کاری 150 درجه مقدار فرورفتگی حداقل حدود 49% و انقباض حجمی حداقل حدود 2% نسبت به سایر دماها کاهش یافته است.
- بخار آب در دمای 150°C بهترین خنک‌کاری را برای تولید ایجاد خواهد کرد.
- سیستم‌های خنک‌کاری بهینه‌شده شامل سیستم طراحی‌شده (۱) با 7 ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده و 15 بافل، سیستم طراحی‌شده (۲) با مجرا بافاصله بیشتر از مذاب و 6 بافل و شامل سیستم طراحی‌شده (۳) با طول مجرا افزایش یافته و 15 بافل به‌دست‌آمده‌است.
- مقایسه کارکرد این هندسه‌ها نشان داد که سیستم خنک‌کاری (۲) با حداقل فرورفتگی نسبی حدود 6% و حداقل اعوجاج نسبی حدود 5% و تغییر ناچیز انقباض حجمی نسبت به سایر سیستم‌ها، یک سیستم خنک‌کاری کارآمد است.

۶ - تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد در گروه شیعی دانشکده علوم (برنامه پروژه 5.54374) انجام شده است.

۷ - مراجع

- [1] M. Moradjoy, H. Khorsand, "Synthesis and Investigation of Properties of Polyethylene Oxide Bonding System for Production of High Density 316L Alloy Parts by Metal Injection Molding", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 8, pp. 60- 69, 2021.