



Simulation and Experimental Implementation of Investment Casting Process of Supercharger Impeller

Abbas Abbasian^{1*} , Seyed Mohammad Jesmani² , Hadi Moshrefzadeh Sani³

^{1,2}Faculty Member, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.07.2021

Revised: 12.17.2021

Accepted: 01.05.2022

Keyword:

Investment casting
Supercharger blade
Design
3D printer
Wax model
Ceramic slurry

***Corresponding Author:**

Abbas Abbasian

Email:

abbasian_phd@yahoo.com

ABSTRACT

The purpose of this research was to simulate the investment casting process of the supercharger blade and its practical implementation based on the simulation results. For this purpose, the desired specimen after modeling was first analyzed in Pro-Cast software. The results of this simulation showed that the solidification of the piece starts from the edges and moves towards the center of the piece, and therefore the volumetric and surface shrinkage defects are not concentrated due to unbalanced thermal gradients in the center. Heat transfer from the edges to the center is much faster due to the thermal conductivity of the edges as well as the thinness. For practical implementation, the desired specimen was designed and used by a polymer 3D printer. Then, the silicone mold of the piece was made of RTV2 and a wax model produced by injecting wax. This was followed by the ceramic mold of the piece being made of SiO₂ for melting. The results of the practical execution of the specimen showed that due to the defects identified in the simulation, the vacuum system should be used after the end of melting and at high temperature; otherwise, the piece produced would be completely defective. The use of vacuum caused the piece to be produced in a completely desirable and flawless manner.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Investment casting refers to a method in which a mold is created by covering die-cast models with a ceramic slurry. The model, usually made of wax or plastic, is removed from the mold chamber by heat. There are two methods, solid mold and ceramic mold, to make a precise casting mold.

In the solid mold method, the model is placed in a steel cylinder and filled with ceramic slurry. After a few hours, the slurry is self-contained, and at this time, the wax is removed with heat, and after baking the mold, pouring is done. Today, this casting method is used less in the production of industrial parts and more in the production of decorative items, jewelry and dentistry. In the ceramic mold method, the wax model is immersed in ceramic slurry. Then, sand with different granularity is sprinkled on the model. This is followed by a ceramic layer being created around the model, and by repeating this process, the thickness of the layer increases. Next, the wax is removed and after baking the mold, the melt is poured into it. A supercharger is a compressor that is connected to the crankshaft through a mechanical mechanism, and by sucking in more air, it increases the pressure of the air entering the engine, and as a result, the output power of the engine increases. In this system, the device takes the energy it needs from the engine, and for this reason, it weakens the engine's power. Extensive research has been carried out on heat transfer analysis, air circulation in the turbine or other computational analyzes such as Computational Fluid Dynamics (CFD) to improve the performance of the blade or turbine, each of which represents the heat transfer in the blade or the geometry of the blade rotation and even the heat when the blade is rotating. One of the most important parts of the supercharger is its blade, considering all the mechanical conditions for it, AlSi5Cu1Mg is the most suitable material for it.

Methodology

In this research, the material of the supercharger blade, which should be a soft and flexible metal and also have good mechanical properties, was selected according to its real sample from the AlSi5Cu1Mg alloy, whose chemical analysis is listed in Table 1. In addition, SolidWorks software was used for 3D modeling of the sample.

Table 1. Chemical composition percentage of AlSi5Cu1Mg alloy

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
1.1-5	0.4-0.6	0.5	5.4-5.5	0.6	0.25	0.35	0.25	Rem

Pro-Cast software was used to evaluate melting and casting, and check possible defects. The simulation of this sample took into consideration the conditions of loading temperature of 680-700 °C, the mold filling time of 4 seconds according to the channel calculations and the chemical composition of the alloy according to Table 1.

After the design, the prototype was produced with the help of the mentioned software using a 3D printer. This method is one of the rapid prototyping methods in which filaments of PLA polymer or wax with a diameter of about 1.25 mm are used to produce the part.

Results and discussion

Figure 1 illustrates the different criterion of the fluid resulting from the simulation. According to these shapes, it is possible to analyze such criteria as speed, temperature and failure resulting in a more accurate casting of the part.

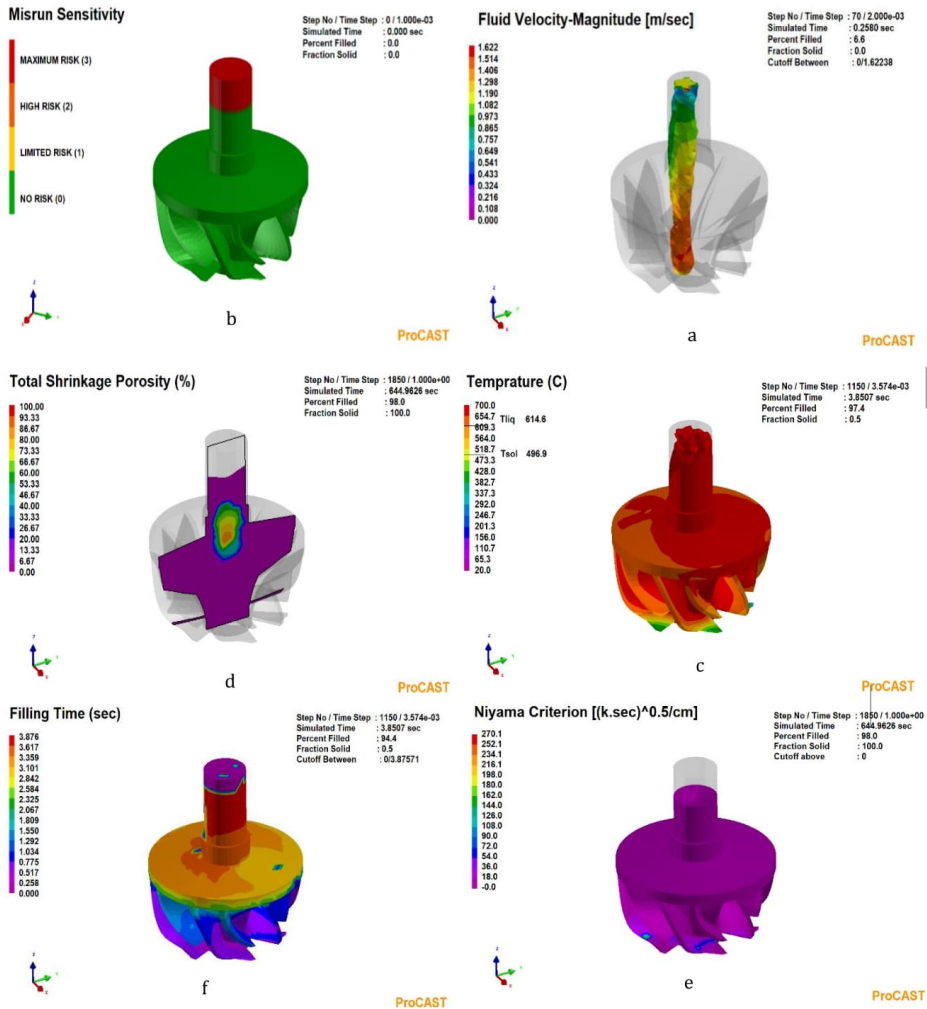


Figure 1. Casting simulation with Pro-Cast software a) Fluid velocity criterion b) No defect criterion c) Temperature criterion d) Total porosity shrinkage criterion e) Niyama criterion con criterion tour f) Filling time criterion

Niyama criterion and filling time in the central part which is cylindrical had the lowest value. The analysis of the Pro-cast software showed that the edges of the blades, marked in phosphorous green color, was not subject to increased probability due to early solidification and low thickness of the blades by changing from purple to red. The amount of unmet increased. In the analysis of the Pro-cast software, it was observed that at the first

instant, the melting directly hit the bottom of the mold and due to the gravitational field of the earth, the lower part was filled; and only parts under the blades were filled due to the turbulent flow of the melt (turbulent flow). Because of the creation of a vacuum in the outer wall of the mold, the melt tended to fill the side surface of the mold and extended to the top, marked in red color; the upper part of the blades, seen in red color, was filled at the last moment.

The appearance of the part is such that the heat transfer occurred in the form of thermal conduction, so its solidification in the center or core was very different from the surrounding edges; the solidification method of the edges according to the thermal conductivity of the part occurred under 10 seconds and reduced to 500°C, but the center of the part needed approximately 600 seconds to cool down as shown in the curve in Figure 2 where the red curve corresponds to the center of the part and the black curve corresponds to the edges.

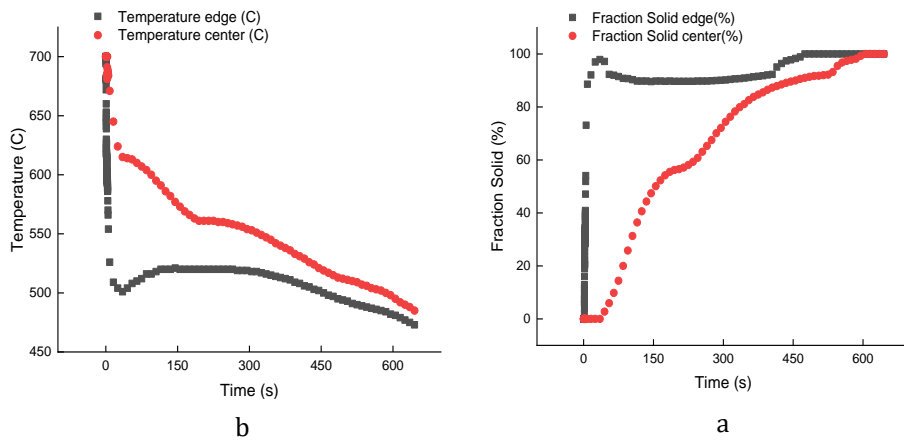


Figure 2. a) The diagram of solidification of the part in terms of time b) The diagram of the temperature of the part in terms of time

Conclusion

- 1- The analysis of the results extracted from the Pro-cast software showed that due to the complex conditions of the sample and the burning of the remaining wax inside the ceramic mold, the possibility of casting defects increased.
- 2- The results of the simulation showed that the percentage of shrinkage in the center of the specimen was the highest and the fluid velocity almost the same everywhere in the model. The initiation of the nuclei of nucleation and solidification took place at the lower edges of the specimen and solidification from these points moved towards the center of the part. In order to produce an imperfect and defect-free part, melting should be carried out first, and immediately after finishing melting and before solidification, the vacuum device should be turned on so as not to create turbulence inside the mold.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



شبیه‌سازی و اجرای تجربی فرایند ریخته‌گری دقیق پره سوپرشارژر

عباس عباسیان^{*۱}، سید محمد جسمانی^۲، هادی مشرف‌زاده ثانی^۳

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی فرایند ریخته‌گری دقیق پره سوپرشارژر و اجرای عملی آن براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی است. برای این منظور قطعه موردنظر نخست پس از مدل‌سازی، فرایند در نرم‌افزار Pro-Cast تحلیل شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که انجماد قطعه از لبه‌ها شروع می‌شود و به سمت مرکز قطعه حرکت می‌کند و به همین علت عیوب انقباض حجمی و سطحی، نیامد در اثر شیب‌های حرارتی نامتعادل در مرکز متمرکز می‌شود. انتقال حرارت از لبه‌ها نسبت به مرکز بسیار سریع‌تر است که دلیل آن هدایت حرارتی لبه‌ها و هم‌چنین نازکی می‌باشد. برای اجرای عملی، قطعه موردنظر طراحی و توسط پرینتر سه‌بعدی از جنس پلیمر استفاده گردید. سپس قالب سیلیکونی قطعه از جنس RTV2 تهیه و با تزریق موم مدل مومی تولید شد، پس از آن قالب سرامیکی قطعه برای ذوب‌ریزی از جنس SiO₂ تهیه گردید. نتایج حاصل از اجرای عملی قطعه نشان داد که به علت عیوب مشخص‌شده در شبیه‌سازی باید از سیستم خلا پس از پایان ذوب‌ریزی و در دمای بالا استفاده شود در غیر این صورت، قطعه به‌صورت کاملاً معیوب تولید می‌گردد. استفاده از خلا باعث شد تا قطعه به‌صورت کاملاً مطلوب و بدون عیب تولید شود.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

کلید واژگان:

ریخته‌گری دقیق
پره سوپر شارژر
طراحی
پرینتر سه بعدی
مدل مومی
دوغاب سرامیکی

*نویسنده مسئول: عباس عباسیان

پست الکترونیکی:

abbasian_phd@yahoo.com



مقدمه

ریخته‌گری دقیق به روشی اطلاق می‌شود که در آن قالب با استفاده از پوشاندن مدل‌های از بین‌برونده توسط دوغاب سرامیکی ایجاد می‌شود. مدل که معمولاً از موم یا پلاستیک است، توسط حرارت از محفظه قالب خارج می‌شود. دو روش قالب توپر و قالب سرامیکی برای ساختن قالب ریخته‌گری دقیق وجود دارد.

در روش قالب توپر مدل در استوانه‌ای فولادی قرار داده می‌شود و داخل آن با دوغاب سرامیکی پرمی‌گردد. بعد از چند ساعت دوغاب خودگیر می‌شود و در این هنگام موم با حرارت، خارج و بعد از پخت قالب، عملیات بارریزی انجام می‌شود. امروزه، این روش ریخته‌گری کمتر در تولید قطعات صنعتی به کار می‌رود و بیشتر در تولید قطعات تزئینی و جواهرسازی و دندان‌سازی به کار گرفته می‌شود. در روش قالب سرامیکی مدل مومی را در دوغاب سرامیکی غوطه‌ور می‌کنند. سپس ماسه‌هایی با دانه‌بندی گوناگون روی مدل پاشیده می‌شود. پس از آن دوباره یک لایه سرامیکی اطراف مدل ایجاد می‌گردد که با تکرار این فرایند، ضخامت لایه افزایش می‌یابد. در ادامه موم، خارج و پس از پخت قالب، ذوب در آن بارریزی می‌شود. این روش امروزه در تولید قطعات صنعتی به‌طور معمول به کار می‌رود و در تولید بعضی از قطعات بهترین روش ریخته‌گری محسوب می‌شود [۱]. در فرایند ریخته‌گری دقیق ابتدا از قطعه موردنظر، یک مدل مومی یا پلاستیکی تهیه شد، سپس این مدل توسط دوغاب سرامیکی پوشانیده شد و پس از خشک‌شدن دوغاب سرامیکی موم به کمک حرارت خارج گردید و بدین‌روش محفظه قالب به‌دست می‌آید. فرایند خشک کردن را می‌توان با استفاده از خلأ یا به‌حداقل رساندن رطوبت محیط، سرعت بخشید. قالب دقیق را همچنین می‌توان با قرار دادن خوشه الگو درون یک فلاسک و سپس ریختن دوغاب مایع از بالا ایجاد کرد. سپس فلاسک به ارتعاش درمی‌آمد تا هوای به‌دام‌افتاده خارج شود و به مواد کمک کند تا هرگونه حفره کوچک را پر کنند [۲-۴].

چن و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای بهبود هرچه بهتر کیفیت ریخته‌گری فلزات به تحقیق روی کاهش تخلخل انقباضی پرداختند؛ زیرا یکی از مشکلاتی که در آزمون میله برای تعیین کیفیت فلز در ریخته‌گری وجود دارد، تخلخل انقباضی است که کیفیت خوب قالب را کاهش می‌دهد. به همین منظور آن‌ها از شبه‌سازی کامپیوتری ماگماسافت که بر پایه روش حجمی محدود می‌باشد برای پیش‌بینی طراحی یک قالب دائمی ارتقا یافته استفاده کردند. برای این کار، آلیاژهای A319 و A356 بسیار حساس به وجود تخلخل هستند و خواص کششی را از طریق پرسکاری داغ ایزواستاتیک بهبود بخشیدند. در همین راستا درصد افزایش طول که نسبت به مقاومت کششی نهایی به تخلخل بسیار حساس‌تر می‌باشد را افزایش دادند. نتایج نشان داد که برای بهبود کیفیت آلیاژ A356، ازدیاد طول به میزان ۷/۱۷ تا ۱۰/۸۳ درصد و برای آلیاژ A319 به میزان ۳/۱۷ تا ۳/۵ درصد باید افزایش یابد [۵]. چاداساما در سال ۲۰۱۳ در راستای بهینه‌سازی فرایند ریخته‌گری دقیق، طراحی مجدد محصول با استفاده از نرم‌افزار پروکست^۱ و افزایش طول عمر آن را بررسی کرد. در همین زمینه گزارش کرده‌اند که حدود ۹۰ درصد از نقص‌ها در ریخته‌گری به دلیل طراحی اشتباه راهگاه و سیستم راهگاهی بوده و تنها ۱۰ درصد از نقص‌ها به دلیل مشکلات تولید می‌باشد و فرایند شبه‌سازی ریخته‌گری قادر به حل این مشکلات است [۶]. طبق تحقیقات، ضخامت لایه‌های دیواره قالب ریخته‌گری دقیق بر روی

¹ Pro-Cast

سختی محصول ریخته‌گری مؤثر است. بر اساس دمای پایدار سطح بیرونی و درونی مواد قالب، آنالیز المان محدود با فضای دو بعدی کرنش، می‌توان هدایت حرارتی مواد قالب با ضخامت‌های متفاوت را ارزیابی کرد. خواص مکانیکی مواد ریخته‌گری از طریق مشاهده ساختار و آزمون سختی ویکرز برای نمونه‌های ریخته‌گری بررسی می‌شوند. طبق یافته‌ها، هدایت حرارتی مواد قالب تقریباً یکسان است. سختی ویکرز نیز با افزایش ضخامت دیواره قالب کاهش می‌یابد [۷]. میلو و همکاران طی تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که هرچه دمای فوق‌ذوب کمتر باشد، حباب‌های هیدروژنی کمتری تشکیل می‌شوند و به دلیل کوچک‌تر شدن فاصله‌های بین دندریتی این حباب‌ها به صورت ظریف‌تر شکل می‌گیرند. اما از طرفی وقتی فضای بین دندریتی کوچک باشد، به دلیل اینکه آخرین مناطق انجمادی هستند، دمای پایین‌تر مذاب سیالیت آن را کاهش می‌دهد و مذاب‌رسانی به این نقاط به خوبی صورت نمی‌گیرد و انقباض ناشی از انجماد جبران نمی‌گردد. بنابراین می‌توان انتظار ایجاد حفره‌های انقباضی را داشت [۸].

در آلیاژهای آلومینیوم بین خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. از جمله عوامل ریزساختاری می‌توان به اندازه دانه، فاصله بین بازوهای دندریتی، کسر حجمی و توزیع فاز ثانویه و خواص فصل مشترک بین فازها اشاره کرد. طبق تحقیقات، مشخص شد که فوق‌ذوب یکی از پارامترهای مهم برای کنترل ساختار ریختگی است و بر اندازه دانه و سرعت سرد شدن تأثیرگذار است. افزایش فوق‌ذوب موجب گسترده‌شدن دانه‌های ستونی می‌شود [۹-۱۱]. شبیه‌سازی پره با استفاده از نرم‌افزار ANSYS برای آلیاژهای نیکل، فولاد و تیتانیوم تحقیق شد. نتایج حاصل نشان داد که نیکل بهترین عملکرد را در تنش و دفورمه شدن دارد، هم‌چنین عملکرد حرارتی بهتری نسبت به آلیاژهای دیگر از خود نشان می‌دهد [۱۳].

سوپرشارژر، کمپرسوری است که از طریق یک مکانیزم مکانیکی به میل‌لنگ^۱ متصل می‌شود و با مکش میزان هوای بیشتر، فشار هوای ورودی به موتور افزایش می‌دهد و در نتیجه قدرت خروجی موتور افزایش می‌یابد. در این سامانه، دستگاه انرژی موردنیاز خود را از موتور می‌گیرد و به همین دلیل موجب تضعیف قدرت موتور می‌گردد. تحقیقات گسترده‌ای در مورد آنالیز انتقال حرارت، گردش هوا در توربین یا آنالیزهای محاسباتی دیگری مثل دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) برای بهبود عملکرد پره یا توربین انجام شده است که هرکدام بیانگر انتقال حرارت در پره یا هندسه چرخش پره و حتی گرمایی که پره حین چرخش دارد است [۱۴-۱۶]. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سوپرشارژر پره آن است با در نظر گرفتن تمام شرایط مکانیکی برای آن AISi5Cu1Mg مناسب‌ترین جنس برای آن می‌باشد [۱۷].

هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی فرایند ریخته‌گری دقیق پره سوپرشارژر است. برای این منظور نخست مدلی از پره طراحی شد و سپس توسط نرم‌افزار Pro-Cast عملیات ریخته‌گری شبیه‌سازی خواهد شد. پس از تعیین شرایط فرایند ریخته‌گری توسط شبیه‌سازی، عملیات به صورت تجربی با یافته‌ها اجرا خواهد شد. در پایان نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تأثیر آن بر کیفیت نهایی قطعه ارزیابی خواهد شد.

¹ Crankshaft

² Computational fluid dynamics

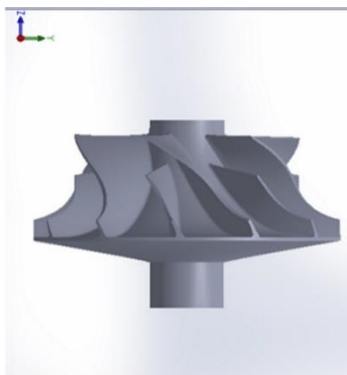
مواد و فرایند طراحی و تولید

طراحی مدل و ساخت قالب سیلیکونی

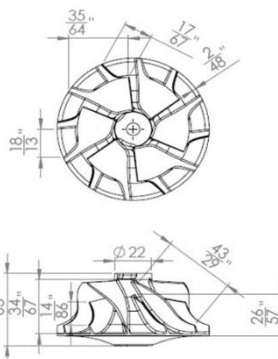
در این تحقیق، جنس پره سوپرشارژر که باید فلزی نرم و انعطاف‌پذیر باشد و توأمان خواص مکانیکی مناسبی هم داشته باشد مطابق با نمونه واقعی آن از آلیاژ $AlSi5Cu1Mg$ انتخاب شد که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ درج شده است [۱۸]. همچنین از نرم‌افزار سالی‌دورکس (SolidWorks) برای مدل کردن سه‌بعدی نمونه استفاده گردید. شکل ۱ طراحی سه‌بعدی و سه‌نمای قطعه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۱. درصد ترکیب شیمیایی آلیاژ $AlSi5Cu1Mg$

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
۱/۱-۵	۰/۶-۰/۴	۰/۵	۵/۴-۵/۵	۰/۶	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۲۵	Rem



ب



الف

شکل ۱. نمای نمونه تحت مطالعه الف) نقشه‌های اجرایی از سه‌نمای قطعه ب) طراحی پرسپکتیو قطعه در

نرم‌افزار سالی‌دورکس

برای ارزیابی ذوب و ریخته‌گری و بررسی ایجاد عیوب احتمالی از نرم‌افزار پروکاست (Pro-Cast) استفاده شده است. این نرم‌افزار به تحلیل شرایط ذوب در سطح و مغز قطعه می‌پردازد و نحوه انتقال حرارت و ایجاد عیوب انقباضی را مشخص می‌کند. در این نرم‌افزار با استفاده از ترکیب شیمیایی مذاب می‌توان خواص فیزیکی و ترمودینامیکی آن را به‌دست آورد که شبهه‌سازی بسیار مؤثر به نظر برسد. همچنین با استفاده از ترکیب شیمیایی مذاب می‌توان آنالیزهای کوپل حرارتی، سیالاتی و عیوب قطعه را به‌دست آورد که در سادگی شبهه‌سازی بسیار مؤثر است. این نرم‌افزار قادر است قابلیت‌های متالورژیکی را برای آلیاژهای ریخته‌گری فراهم کند [۱۹]. شبهه‌سازی این نمونه در شرایط دمایی بارریزی $700-680^{\circ}C$ ، زمان پر شدن قالب مطابق با محاسبات راهگامی انجام شده ۴ ثانیه و ترکیب شیمیایی آلیاژ مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد.

پس از طراحی به کمک نرم افزارهای ذکر شده نمونه اولیه با استفاده از پرینتر سه بعدی تولید شد. این روش یکی از روش های نمونه سازی سریع است که در آن برای تولید قطعه از اکستروود کردن فیلامنت هایی از پلیمر PLA^۱ یا موم به قطر حدودی ۱.۲۵ میلی متر استفاده می شود. نمونه پرینت شده پره، توسط پرینتر سه بعدی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. مدل پرینت شده پره سوپرشارژ

از سیلیکون و هاردنر مایع به نام RTV^۲ (شکل ۳) ساخت کشر چین در وزن ۱ کیلوگرم و با میزان اختلاط ۱۰۰ گرم سیلیکون و ۵ گرم هاردنر و زمان خشک شدن ۴ الی ۲۴ ساعت در رنگ سفید برای ساخت قالب سیلیکونی استفاده شد. برای این منظور بسته به ابعاد قالب مورد نظر و محاسبه حجم آن خمیر سیلیکون به اندازه ۱ کیلوگرم وزن شد. پس از وزن کردن سیلیکون، به اندازه ۵ درصد از وزن سیلیکون هاردنر اضافه گردید و خوب بهم زده شد تا کامل ترکیب شود. شایان ذکر است که پس از افزودن هاردنر، فرایند سفت شدن سیلیکون آغاز می شود؛ بنابراین بلافاصله سیلیکون تهیه شده اطراف نمونه ریخته شد.



شکل ۳. قالب سیلیکونی RTV^۲ آماده شده برای قالب گیری

^۱ Polylactic acid

^۲ Room temperature vulcanization

پس از تهیه قالب سیلیکونی مدل‌هایی از جنس موم تولید شد. از کوره المنتی یا مقاومت الکتریکی برای ذوب کردن موم در دمای 80°C و بازپخت قالب ریخته‌گری که از جنس گچ نسوز است استفاده شد که مشخصات موم به‌کاررفته در مدل‌سازی به‌طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات موم مدل‌سازی

نوع موم	رنگ	نقطه‌ی ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	چگالی ($\frac{\text{gr}}{\text{cc}}$)
پارافین	سفید	۵۸/۵	۰/۹۴

از بوته گرافیتی ۱ کیلوگرمی برای ذوب‌گیری استفاده شد. برای کسب بهترین نتیجه از آنالیز عناصر شیمیایی، آلیاژسازی با درصد اتلاف کوره برای عناصر مختلف محاسبه شد. در صورتی که درصد وزنی اتلاف در کوره زمینی برای عناصر مس، منگنز به میزان یک درصد، برای منیزیم و روی به میزان ۳ درصد، برای آهن و سیلیسیم به میزان ۰/۵ درصد و برای آلومینیم به میزان ۱/۵ درصد در نظر گرفته شد.

شایان ذکر است که عناصر آلیاژی در نظر گرفته‌شده تماماً به‌صورت خالص به بوته اضافه شد و به‌منظور جلوگیری از ورود گازهای مضر مانند اکسیژن و هیدروژن از فلاکس پوششی کاورال قبل از بارریزی به بوته افزوده شد. پس از ذوب شدن و قبل از بارریزی از هیدورژن‌زدا (قرص دگازور) نیز برای خروج و سرپاره شدن گازهای باقیمانده با تشکیل ترکیبات در مذاب و دستیابی به مذاب بدون مک‌گازی استفاده شده است. این آلیاژ در دمای 680°C تا 700°C ریخته‌گری شده است.

ساخت قالب سیلیکونی و مدل مومی

پس از ساخت مدل پرینت‌شده، تمامی قسمت‌های آن با استفاده از وازلین چرب شده‌اند. این کار به‌منظور جلوگیری از چسبیدن سیلیکون به مدل صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از طراحی‌های صورت گرفته نشان داد که بهترین روش برای ساخت این مدل پره، ساختن قالب به‌صورت هشت‌تکه می‌باشد. با ایجاد جداره دور مدل، سیلیکون‌ریزی آغاز گردید. برای ریختن سیلیکون درون قالب باید سیلیکون از ارتفاع مشخصی به‌صورت باریکه در گوشه قالب ریخته شود تا مقدار زیادی از حباب‌های هوا در اثر این عمل شکسته شود و از بین رود. برای خروج کامل حباب‌های هوا از سیلیکون مایع، از دستگاه وکیوم یا دستگاه ویراتور استفاده می‌شود. بدین صورت که فرایند سیلیکون بعد از ۴ روز تا ۷ روز به استحکام می‌رسد (شکل ۴).



شکل ۴. سفت شدن قسمت اولیه قالب و ریختن سیلیکون درون هر پروانه

پس از سفت شدن سیلیکون، مرحله ساخت قالب به اتمام می‌رسد. برای اینکه محفظه‌های به شکل پره ایجاد شود، مدل از آن‌ها جدا می‌شود و قسمت‌های بین هر پره که شش عدد می‌باشد، به کمک پین‌های ایجاد شده هر کدام از قسمت‌ها تثبیت می‌گردد و در آخر قسمت رویی قالب گذاشته می‌شود و پس از آن عملیات موم‌ریزی صورت می‌گیرد. در شکل ۵ (الف و ب) مدل مومی سالم درون قالب مشاهده می‌شود. برای این که مدل مومی سالم به دست آید، به مدت پنج ساعت زمان داده شد و سپس مدل از قالب خارج شده است. دمای ریختن (۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد) موم اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا در صورت پایین بودن دما، سیالیت موم کاهش می‌یابد و همچنین در صورت بالا بودن دما، موم به راحتی می‌سوزد و پس از ریختن موم درون قالب، درون مدل پر از حباب می‌شود.



ب



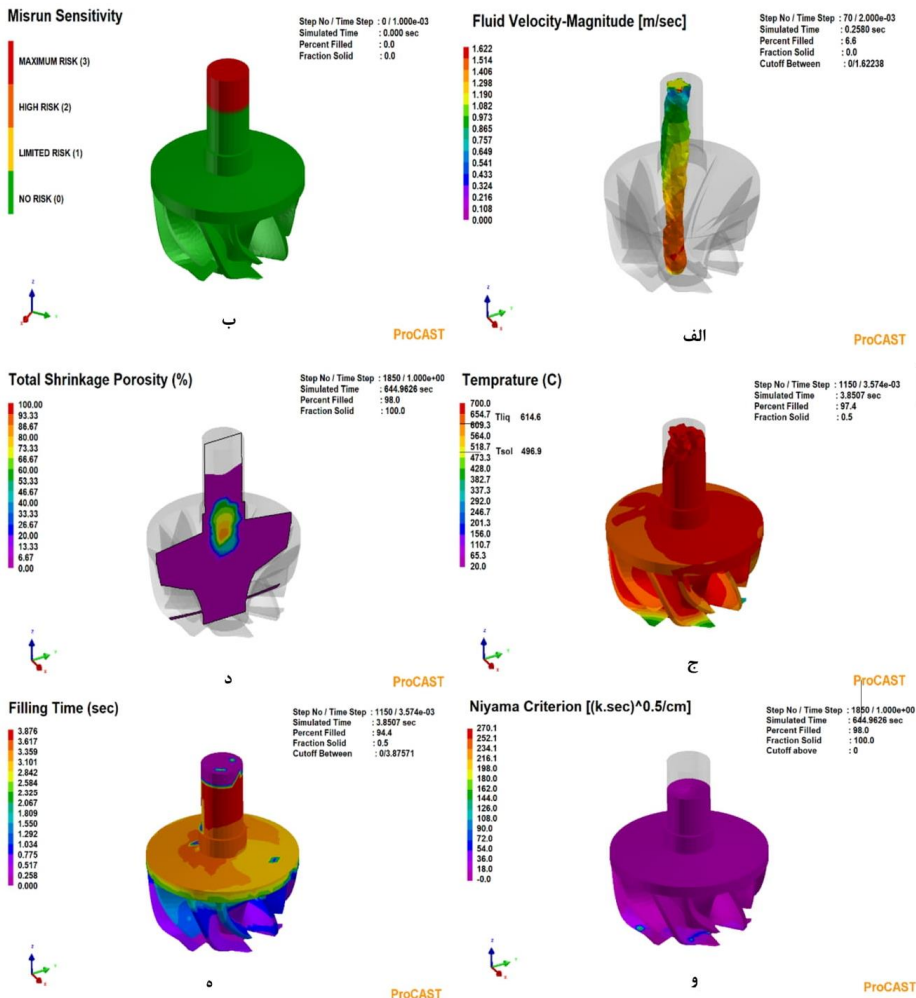
الف

شکل ۵. الف) برداشتن قالب رویی از روی مدل مومی سالم ب) جداسدن تمامی پره‌ها از سیلیکون

شبیه‌سازی و ساخت قطعه

شبیه‌سازی فرایند ریخته‌گری با نرم‌افزار Pro-Cast

شکل ۶ کانتورهای متفاوت سیال حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها می‌توان کانتورهای سرعت، دما، عیب نیامد و غیره را تحلیل کرد و بنابراین ریخته‌گری دقیق‌تر قطعه قابل انجام خواهد بود.

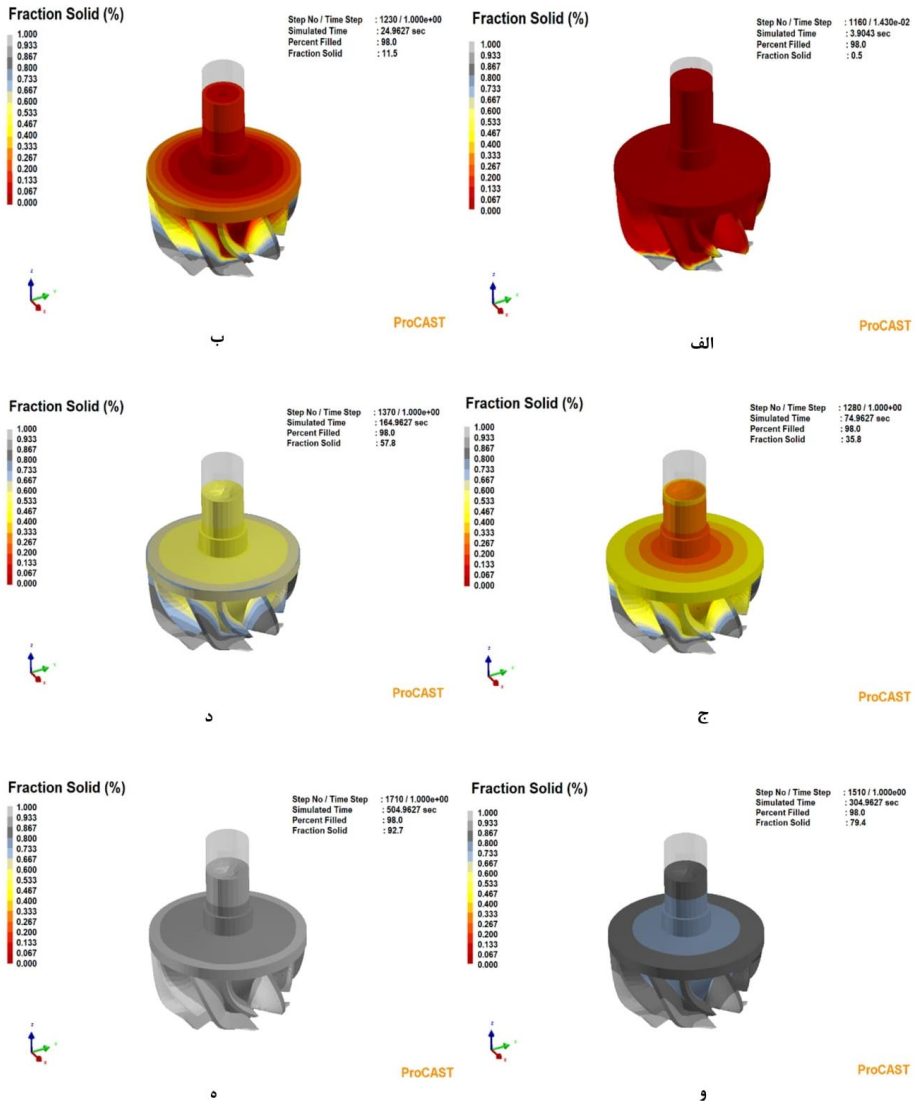


شکل ۶. شبیه‌سازی ریخته‌گری با نرم‌افزار Pro-Cast (الف) کانتور سرعت سیال (ب) کانتور عیب نیامد (ج) کانتور دما (د) کانتور انقباض تخلخل کل (و) کانتور معیار نیاما (ه) کانتور زمان پرشدن

شکل ۶ (الف) کانتور سرعت سیال را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که سرعت سیال در همه‌جا تقریباً برابر است. شکل ۶ (ب) کانتور عیب نیامد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً همه‌جا مدل در ریسک کم برای دچار شدن به عیب نیامد قرار دارد. شکل ۶ (ج) کانتور دما را نشان می‌دهد که براساس آن در همه قسمت‌های مدل دما تقریباً یکسان است اما مقدار آن در لبه‌ها اندکی کمتر است. نتایج تحلیل نرم‌افزار پروکست نشان داد (شکل ۷ الف-ه) دما در لبه‌های پایینی قطعه با افت دمایی بیشتر به دلیل سطوح انتقال حرارت بیشتر همراه می‌باشد و اولین محل‌هایی هستند که پر می‌شود و انجماد می‌یابند. بنابراین شروع هسته‌های جوانه‌زایی و انجماد در این مکان صورت می‌گیرد و انجماد از این نقاط به سمت مرکز قطعه پیش می‌رود. شکل ۶ د، کانتور تخلخل انقباضی کل را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی کانون تمام تخلخل‌های انقباضی در مرکز قطعه تجمع پیدا کرده است؛ زیرا انجماد از قسمت پایینی قطعه شروع شده و همان‌طور که از شکل ۶ ج مشاهده شد افت دمایی از قسمت پایین قطعه بوده و خط انجماد به سمت مرکز قطعه پیش رفته است. شکل ۶ و، کانتور معیار نیاما^۱ و شکل ۶ ه، کانتور زمان پر شدن^۲ را نشان می‌دهد. معیار نیاما و نیز زمان پر شدن در قسمت مرکزی که استوانه‌ای شکل است، کمترین مقدار را دارد. تحلیل نرم‌افزار پروکست نشان می‌دهد که لبه‌های تیغه‌ها که به رنگ سبز فسفری مشخص شده به دلیل انجماد زود و به دلیل ضخامت کم تیغه‌ها در معرض افزایش احتمال نیامد خواهد بود، با تغییر از رنگ بنفش به سمت رنگ قرمز مقدار نیامد افزایش می‌یابد. در تحلیل نرم‌افزار پروکست مشاهده می‌شود در لحظه اول ذوب به‌صورت مستقیم با کف قالب برخورد کرده و به دلیل وجود میدان گرانشی زمین قسمت پایینی پر شده و فقط بخش‌هایی از قسمت زیر تیغه‌ها به دلیل جریان متلاطم مذاب (جریان آشفتگی) و به دلیل ایجاد خلا در جداره بیرونی قالب، مذاب تمایل به پر شدن از سطح جانبی قالب داشت و به بالا که به رنگ قرمز مشخص شده است امتداد پیدا کرده است قسمت بالایی تیغه‌ها که به رنگ قرمز مشاهده می‌شوند در آخرین لحظه پر شده‌اند.

¹ Niyama Criterion

² Filling Time

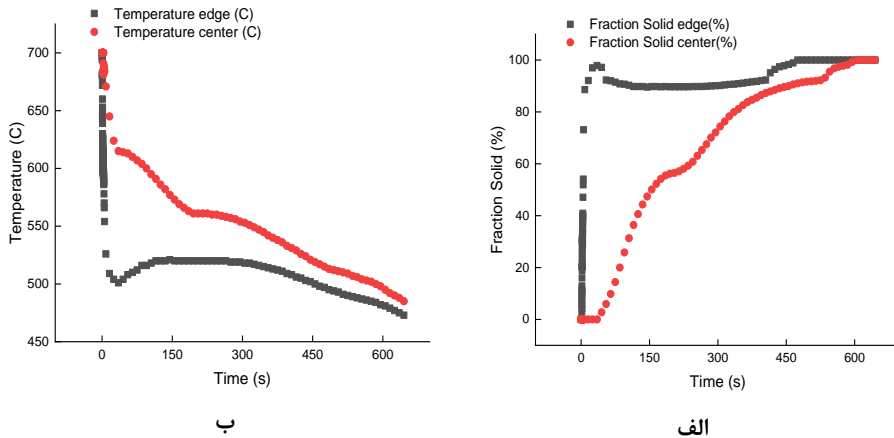


شکل ۷. شبیه‌سازی فرایند انجماد قطعه

شکل ظاهری قطعه به گونه‌ای است که انتقال حرارت به صورت هدایت حرارتی^۱ هدایت انجام می‌شود؛ بنابراین انجماد آن در مرکز یا هسته با لبه‌های اطراف به شدت متفاوت است، نحوه انجماد لبه‌ها با توجه به هدایت حرارتی قطعه با سرعت بسیار زیاد زیر ۱۰ ثانیه انجام شد و تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت اما مرکز قطعه حدود ۶۰۰ ثانیه

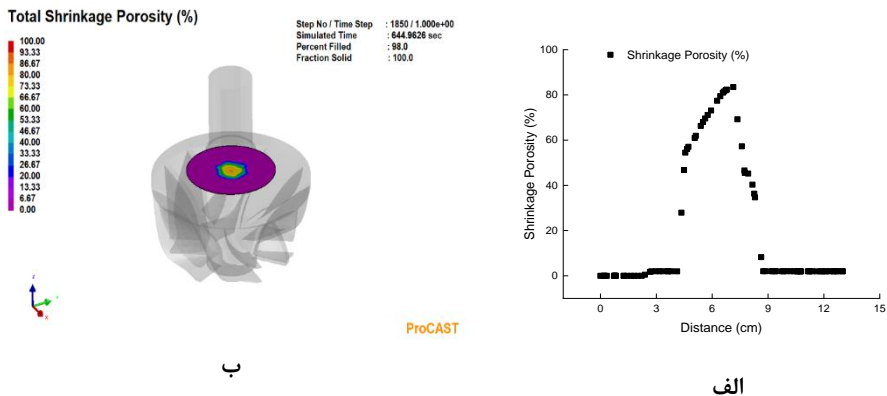
¹ Convection

برای سرد شدن زمان نیاز دارد که در منحنی شکل ۸ مشخص شده است که در آن منحنی قرمز رنگ مربوط به مرکز قطعه و منحنی سیاه رنگ مربوط به لبه‌ها می‌باشد. نکته قابل توجه این‌که انجماد لبه‌ها پس از ۵۰ ثانیه دوباره دمای آن تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت (شکل ۸ الف) و تا ۴۰۰ ثانیه ادامه پیدا کرد که علت آن داغ شدن لبه‌های قالب و کاهش انتقال حرارت می‌باشد؛ به عبارتی مقدار دمایی که از مرکز به لبه‌ها انتقال داده می‌شود با انتقال حرارتی که لبه‌ها انجام می‌دهند بیشتر است؛ بنابراین دمای لبه‌ها دوباره افزایش خواهد یافت که در شکل ۸ ب مشاهده می‌شود.



شکل ۸. الف) نمودار انجماد قطعه برحسب زمان ب) نمودار دمای قطعه برحسب زمان

همچنین به علت این‌که در مرکز قطعه حرارت بسیار زیادی متمرکز می‌شود و انجماد از سطوح به سمت مرکز حرکت می‌کند درصد انقباض در آنجا به شدت افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ ب و شکل ۶ د مشاهده می‌شود درصد انقباض در سه بعد در مرکز قطعه بیشترین مقدار خود را دارد. در فاصله ۴ تا ۸ سانتی‌متری درصد انقباض به ۸۰ درصد افزایش یافته است که این موضوع در ریخته‌گری می‌تواند مشکلات عمده‌ای ایجاد کند. برای از بین رفتن این عیب از سیستم پمپ خلأ و مکش آن پس از ریختن و پر شدن قطعه و در حین انجماد استفاده شد که نتیجه مطلوب در ساخت قطعه به دست آمد.



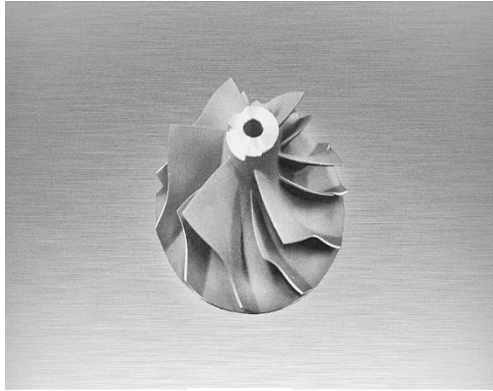
شکل ۹. الف) منحنی درصد انقباض برحسب فاصله تا مرکز ب) مختصات سه‌بعدی تشکیل انقباض

ذوب و ریخته‌گری مدل مومی

در روش ریخته‌گری دقیق بعد از ساختن مدل مومی باید آن را درون دوغاب سرامیکی ریخته‌گری قرار داد. برای این کار، باید ابتدا دیواره‌ای ساخت و مدل را درون دیواره قرار داد و دوغاب سرامیکی را روی آن ریخت. برای اینکه یک راه ورود مذاب درون قالب وجود داشته باشد، یک راهگاه مومی ساخته شد و به مدل متصل گردید.

پس از متصل کردن راهگاه به مدل، جداره‌ای دور مدل ایجاد می‌شود. سوراخ‌های ایجاد شده به این منظور است که قطعات پیچیده داخل دستگاه و کیوم قرار داده می‌شوند و عملیات ذوب‌ریزی تحت مکش صورت می‌گیرد. دور جداره یا به اصطلاح سیلندر با چسب نواری پوشانده شده است که پس از ریختن دوغاب و سفت‌شدن آن، چسب باز می‌شود. دوغاب سرامیکی پس از آماده‌سازی درون سیلندر ریخته شد. پس از سفت‌شدن دوغاب درون سیلندر، حرارت‌دهی مستقیم انجام گرفت. در این هنگام، موم، ذوب و محفظه‌ای خالی ایجاد شد. پس از خارج کردن موم، سیلندر درون خشک‌کن قرار داده شد تا کاملاً خشک شود.

پس از خشک شدن قالب، ذوب‌ریزی انجام شد. در این مرحله به‌منظور بررسی اثر، و کیوم به دو صورت ذوب‌ریزی انجام شد. در مرحله اول دستگاه و کیوم حین ذوب‌ریزی روشن بود که باعث ایجاد عیوب زیادی در قطعه گردید و عملاً قطعه معیوب شد (شکل ۱۰ الف) اما در مرحله دوم پس از اینکه فرایند ذوب‌ریزی به اتمام رسید دستگاه و کیوم روشن شد و قطعه بسیار سالم و بدون عیب به‌دست آمد (شکل ۱۰ ب). علت ظهور برخی عیوب در نمونه اول را می‌توان به: الف) وجود دود ناشی از سوختن موم باقی‌مانده در قالب ب) تلاطم زیاد به دلیل روشن بودن دستگاه و کیوم هنگام ذوب‌ریزی نسبت داده شود. بنابراین برای سالم بودن قطعه، ابتدا باید ذوب‌ریزی صورت گیرد و بلافاصله پس از اتمام ذوب‌ریزی و قبل از منجمدشدن آن، دستگاه و کیوم روشن گردد تا از تلاطم درون قالب ممانعت شود.



ب



الف

شکل ۱۰. تأثیر فرایند ریخته‌گری به کاررفته در پژوهش حاضر در مقایسه با ریخته‌گری مرسوم. الف) قطعه تولیدشده در ذوب‌ریزی اول ب) قطعه تولیدشده در ذوب‌ریزی دوم، ماشین‌کاری و پرداخت‌شده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پره سوپرشارژر به روش ریخته‌گری دقیق شبیه‌سازی گردید. قطعه موردنظر با رعایت یافته‌های شبیه‌سازی به صورت تجربی ریخته‌گری شد. اهم نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

- ۱- تحلیل نتایج مستخرج از نرم‌افزار پروکست نشان داد که به دلیل شرایط پیچیده نمونه و نیز سوختن موم باقی‌مانده درون قالب سرامیکی، احتمال ایجاد عیوب ریخته‌گری افزایش می‌یابد که برای این منظور از مکنده خلأ به همراه پیش‌گرم کردن قالب استفاده شد.
- ۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که درصد انقباض در مرکز قطعه، بیشترین مقدار خود را دارد و سرعت سیال در همه جای مدل تقریباً یکسان است و شروع هسته‌های جوانه‌زایی و انجماد در لبه‌های پایینی قطعه صورت می‌گیرد و انجماد از این نقاط به سمت مرکز قطعه پیش می‌رود که برای تولید قطعه سالم و بدون عیب، ابتدا باید ذوب‌ریزی انجام شود و بلافاصله پس از اتمام ذوب‌ریزی و قبل از منجمدشدن آن، باید دستگاه وکیوم روشن گردد تا داخل قالب تلاطم ایجاد نشود.
- ۳- یافته‌های تجربی ما نشان داد قطعه تولید شده به روش ریخته‌گری دقیق، علاوه بر لزوم رعایت نتایج شبیه‌سازی، در صورتی دارای کیفیت سطح مناسب، مک‌های گازی و حفره انقباضی اندک، سرعت تولید و مقرون‌به‌صرفه خواهد بود که عملیات در شرایط خلأ انجام شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشکده شهید مہاجر اصفهان بابت همکاری و تأمین تجهیزات و مواد لازم برای آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

- [1] Babazadeh Agh Ismaili, M., & Taremi, S. (2009). *Investment Casting*. Forouzesh. <https://www.adinehbook.com/gp/product/9648501988>
- [2] Rangi, M., & Kaviani, S. (2015). *Ceramic wax and mold in precision casting*. Sades. <https://www.gisoom.com/book/11138751/>
- [3] Degarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A., & Black, J. T. (1997). *Materials and Processes in Manufacturing* (8 ed.). Prentice Hall College Div. <https://www.amazon.com/Materials-Processes-Manufacturing-Paul-Degarmo/dp/0023286210>
- [4] Stefanescu, D. M. (1998). *ASM Handbook: Volume 15: Casting* (9 ed.). <https://www.amazon.com/ASM-Handbook-D-M-Stefanescu/dp/0871700212>
- [5] Chen, C-J. (2014). *Optimization of mechanical properties in A356 via simulation and permanent mold test-bars* [Doctor, Case Western Reserve University]. Cleveland, Ohio. <https://www.proquest.com/openview/27c9c1f26d0729e5757bed6d820e8f77/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [6] Chudasama, B. J. (2013). Solidification analysis and optimization using pro-cast. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*, 1(4), 9-19. https://www.rajimr.com/ijrmeet/wp-content/uploads/2017/12/IJRMEET_2013_vol01_issue_04_02.pdf
- [7] Phuan, Y. J. (2005). *Fe evaluation of thermal property of mould wall material for investment casting and the effect of layers on the hardness of the casting product* [Bachelor, Universiti Teknologi Malaysia]. Johor Bahru, Malaysia. <http://eprints.utm.my/id/eprint/2648/1/75063.pdf>
- [8] Melo, M. L. N. M., Rizzo, E. M. S., & Santos, R. G. (2005). (Predicting dendrite arm spacing and their effect on microporosity formation in directionally solidified Al-Cu alloy. *Journal of Materials Science*, 40(7), 1599-1609. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-0659-y>
- [9] Jie, W., Chen, Z., Reif, W., & Müller, K. (2003). Superheat treatment of Al-7Si-0.55Mg melt and its influences on the solidification structures and the mechanical properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(3), 799-806. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0115-z>
- [10] Pereira, J. C., Gil, E., Solaberrieta, L., San Sebastián, M., Bilbao, Y., & Rodríguez, P. P. (2020). Comparison of AlSi7Mg0.6 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes: Microstructure and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 778, 139124. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139124>
- [11] Venkataramani, R., Simpson, R., & Ravindran, C. (1995). Effect of melt superheat on maximum nuclei density in A356 alloy. *Materials Characterization*, 35(1), 81-92. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(95\)80096-4](https://doi.org/10.1016/1044-5803(95)80096-4)
- [12] Wang, M., Song, B., Wei, Q., Zhang, Y., & Shi, Y. (2019). Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 739, 463-472. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.047>
- [13] Sathishkumar, N., Premkumar, P., Bruce, A. R., Pravinkumar, K., & Sudharsan, P. (2020). Design and analysis of an impeller of a turbocharger. *International Journal of Research and Review*, 7(4), 45-51. https://www.researchgate.net/profile/Sathishkumar-Natesan2/publication/341051085_Design_and_Analysis_of_an_Impeller_of_a_Turbocharger/links/5eaaf4d7299bf18b958a553a/Design-and-Analysis-of-an-Impeller-of-a-Turbocharger.pdf

- [14] Feneley, A. J., Pesiridis, A., & Andwari, A. M. (2017). Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.201612.125>
- [15] Romagnoli, A., & Martinez-Botas, R. (2012). Heat transfer analysis in a turbocharger turbine: An experimental and computational evaluation. *Applied Thermal Engineering*, 38, 58-77. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.022>
- [16] Serrano, J. R., Navarro, R., García-Cuevas, L. M., & Inhestern, L. B. (2018). Turbocharger turbine rotor tip leakage loss and mass flow model valid up to extreme off-design conditions with high blade to jet speed ratio. *Energy*, 147, 1299-1310. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.083>
- [17] Abdelmadjid, C., Mohamed, S-A., & Boussad, B. (2013). CFD Analysis of the Volute Geometry Effect on the Turbulent Air Flow through the Turbocharger Compressor. *Energy Procedia*, 36, 746-755. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.087>
- [18] Matoofi, F. (2006). *Aluminum switches and alloys*. Fadak Isatis. <https://www.gisoom.com/book/1375194/>
- [19] Kumar, R., Madhu, S., Aravindh, K., Jayakumar, V., Bharathiraja, G., & Muniappan, A. (2020). Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using procast software for defect minimization. *Materials Today: Proceedings*, 22, 799-805. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.156>