



## مطالعه تجربی خواص مکانیکی و ریخت‌شناسی قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده برای آلیاژ A356

شهرزاد یوسف زاده<sup>1</sup>، پرویز کحال<sup>2\*</sup>، محمد کشفی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد

\* بروجرد، صندوق پستی 6919969411، parvizkahhal@abru.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 مرداد 1397

پذیرش: 11 آبان 1397

ارائه در سایت: اسفند 1397

### کلیدواژگان:

ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده

آلیاژ A356

دمای ذوب‌ریزی

تخلخل

چگالی فوم

ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده یکی از روش‌های جدید ریخته‌گری است که به علت برخورداری از ویژگی‌های خاص تولید، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. به دلیل خواص مطلوب این روش کاربرد آن روز به روز در حال توسعه می‌باشد. کنترل آسان پارامترهای فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده منجر به تولید ریخته‌گری بدون عیب قطعات پیچیده می‌شود. در این پژوهش، ابتدا پارامترهای اثرگذار از قبیل چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان در فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده شناسایی و در سطوح مختلف انتخاب گردیده است. سپس به کمک طراحی آزمایش تاگوچی، آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی گردیده که تأثیر هر یک از پارامترهای اثرگذار روی کیفیت سطح، درصد تخلخل و سختی نمونه‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد که بهترین حالت برای دستیابی به کمترین مقدار تخلخل، کمترین عیوب ظاهری و بالاترین سختی مربوط به ویسکوزیته پوشان 20 پاسکال ثانیه، دمای ذوب‌ریزی 740 درجه سلسیوس و چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

## Experimental study of mechanical properties and morphology of parts made by lost foam casting for A356-Alloy

Shahrouz Yousefzadeh<sup>1</sup>, Parviz Kahhal<sup>2\*</sup>, Mohammad Kashfi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Islamic Azad University, Aligudarz.

2- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

\* P.O.B. 6919969411 Boroujerd, Iran, parvizkahhal@abru.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 08 August 2018  
Accepted 02 November 2018  
Available Online March 2019

### Keywords:

Lost Foam Casting  
Alloy A356  
Melting point  
Porosity  
Foam Density

### Abstract

Lost Foam Casting (LFC) is one of the new methods of casting developed in recent years in many industries. This casting method enjoys many advantages competing with traditional casting methods. Take control of process parameters in LFC lead to the production of complex and high-quality specimens. The objective of the present study is the effective parameters optimization in lost foam casting using Taguchi method based on experimental results. At the first stage, the effective casting parameters such as foam density, melting temperature and coating viscosity are selected as optimization design variables. On the second stage required samples are fabricated in three different levels. In addition, the effects of considered parameters are studied on the surface quality, porosity and stiffness of the samples by Taguchi method. The results showed that the lowest porosity, maximum hardness and the best surface quality are determined for the coating viscosity 20 Pa.s, the melting temperature 740°C and foam density 20 kg/m<sup>3</sup>.

### 1- مقدمه

فومی در دوغاب نسوز غوطه‌ور می‌شود تا یک لایه نازک به نام پوشان را بر روی آن ایجاد کند. پس از خشک شدن لایه پوششی، مدل درون قالبی که از ماسه خشک و بدون مواد چسبنده پر شده است قرار می‌گیرد. سپس، ماسه به وسیله ارتعاش فشرده شده تا یک ساختار محکم برای حمایت از مدل در حین ریخته‌گری به وجود آید. در مرحله بعد، فلز مذاب درون قالب ریخته می‌شود. بر اثر حرارت فلز مذاب، مدل فومی تجزیه

برخلاف ریخته‌گری سنتی (ریخته‌گری ماسه‌ای)، ویژگی منحصر به فرد ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده (LFC<sup>1</sup>) وجود یک مدل فومی در مسیر فلز مذاب است. این مدل قبل از ریخته‌گری برداشته نمی‌شود بلکه فلز مذاب درون قالب ریخته شده و مدل فومی تجزیه می‌گردد [1]. در آغاز فرایند LFC مدل

<sup>1</sup> Lost Foam Casting

### Please cite this article using:

Sh. Yousefzadeh, P. Kahhal, M. Kashfi, Experimental study of mechanical properties and morphology of parts made by lost foam casting for A356-Alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 42-52, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

حرارتی شده و به تدریج فلز مذاب جایگزین مدل فومی می‌شود. در انتها و پس از طی شدن زمان انجماد، قطعه ریخته‌گری حاصل می‌شود [2].

ریخته‌گری LFC نسبت به ریخته‌گری سنتی، از مزیت‌های متعددی برخوردار است. از مزایای فنی آن می‌توان به عدم نیاز به ماهیچه، دقت ابعادی بسیار خوب، سهولت ساخت قالب و فرسایش کمتر آن، عدم وجود خط، کاهش عملیات تمیزکاری و تراشکاری، قابلیت تولید قطعات پیچیده و راندمان ریختگی بالا اشاره نمود [3، 4]. از سوی دیگر از این روش می‌توان جهت تولید قطعات پیچیده آلومینیومی که یکی از پرکاربردترین فلزات به‌ویژه در صنایع هوایی هستند [5] نیز بهره برد. همچنین، این روش دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی نیز می‌باشد [6]. از محدودیت‌های این روش می‌توان به بروز عیوب کربنی در آلیاژهای آهنی، مشکل خروج گازهای تولید شده از قالب و مشکلات ساختاری در ریخته‌گری آلیاژهایی با نقطه ذوب پایین اشاره نمود [7].

در فرایند LFC، پارامترهای پرکنندگی قالب، انتقال حرارت و انجماد به شدت تحت تأثیر تجزیه مدل فومی و تخلیه گاز قالب هستند. جریان کم فلز مذاب و کاهش اتمسفر ممکن است به کاهش اکسید و سرباره کمک کنند. بنابراین، به‌منظور بهبود خواص ریخته‌گری LFC، بررسی واکنش بین مدل فومی و فلز مذاب و تخلیه محصولات حاصل از تجزیه مدل فومی، از طریق پوشان و ماسه ضروری می‌باشد [8].

در دهه‌های اخیر تحقیقات وسیعی جهت مطالعه بر روی تأثیر پارامترهای فرایند LFC بر ریزساختار و خواص مکانیکی ریخته‌گری قطعه تولید شده انجام شده است. فرایند LFC اولین بار به‌صورت اختراع تحت عنوان ریخته‌گری توپر به ثبت رسید. پس از آن فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در زمینه شناسایی متغیرهای فرایند و حل مشکلات آن آغاز گردید [9، 10].

وارنر و همکاران [11] وجود یک ناحیه پیشروی مذاب در فاصله بین جلوی مذاب پیش‌رونده و مدل فومی را پیشنهاد داده‌اند. کومار و همکاران [12] پارامترهای متعدد فرایند و تأثیر هرکدام را بر روی کیفیت ریخته‌گری تولید شده با فرایند LFC را بر اساس یک نمودار به نام نمودار علت و معلول ایشی کاوا شناسایی نموده‌اند. چن و همکاران [13] نشان دادند که رابطه‌ای بین شتاب جریان مذاب و کیفیت ریخته‌گری تولید شده وجود دارد. نامبردگان دریافتند که با افزایش دمای ریزش بین 710 و 750 درجه سانتی‌گراد، شتاب جریان مذاب افزایش می‌یابد. سندز و شیوکومار [14] اثر جرم مولکولی و چگالی فوم را بر روی

خواص حرارتی فوم و زمان پر شدن قالب بررسی نمودند. کالک [15] پر شدن قالب در فرایند LFC را متفاوت از دیگر فرایندهای ریخته‌گری شرح داد؛ زیرا برای پر کردن محفظه قالب، در LFC فلز مذاب باید علاوه بر هوا، مدل فومی را نیز جایجا کند. کومار و همکاران [16] گاز تشکیل شده در قالب را که در اثر تجزیه حرارتی مدل فومی به وجود می‌آید، به‌صورت تابعی از چگالی فوم و دمای ذوب‌ریزی تعریف نموده‌اند. روساچی [17] تأثیر آرایش دانه‌ها بر خاصیت پرکنندگی را با این حقیقت شرح می‌دهد که ساختار نسبتاً باز به وجود آمده در اثر از بین رفتن دانه‌ها در فوم‌های با چگالی پایین، ممکن است گازهای داغ را قادر به نفوذ عمیق در درون مدل فومی سازد. سندز و شیوکومار [18] دریافتند با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی مدل فومی نیز افزایش خواهد یافت. کریمیان و همکاران [19] شواهدی مبنی بر تأثیر ضخامت پوشش با بررسی پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی به دست آوردند. این تصاویر به‌طور واضح نشان داد که پوشش‌های ضخیم نسبت به پوشش‌های نازک که با چسبندگی پایین تولید شده‌اند، دارای مقدار حفره کمتری هستند.

در این پژوهش، چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان به عنوان سه پارامتر تأثیرگذار در فرایند LFC انتخاب و تأثیر هر یک در سه سطح مختلف بر روی عیوب ظاهری و ریختگی، درصد تخلخل و سختی قطعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، با استفاده از روش تاگوچی طراحی آزمایش‌ها انجام شده تا بر اساس تعداد پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده آرایه L9 به دست آید. در نهایت، نمونه‌های ریخته‌گری شده به‌منظور بررسی عیوب ظاهری ریختگی، درصد تخلخل و سختی سطحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## 2- طراحی آزمایش‌ها و انجام فرایند ریخته‌گری

### 2-1- تهیه مدل فومی

نوع فوم بسته به ابعاد مدل و نوع آلیاژ بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی فوم انتخاب می‌شود [20]. عموماً ماده اصلی تهیه مدل‌های فومی، پلیمرهای پلی استایرن (PS) است. با این وجود پلیمرهای دیگری مانند پلی متیل متاکریلات (PMMA) و پلی الکلیل کربنات (PAC) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایند پیرسازی یکی از مراحل مهم در ساخت مدل‌های فومی است که منجر به پایداری ابعادی مدل‌ها می‌شود [21]. پس از تولید اجزای مختلف یک مدل فومی، اجزای مذکور توسط چسب گرمکار به یکدیگر متصل می‌شوند.

## 2-2- قالب‌گیری و ریخته‌گری

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ A356 استفاده شده

Table 1 Chemical composition of A356

ترکیب شیمیایی	Cu	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn
درصد وزنی	0.5	6.5-7.5	0.2-0.4	0.2	0.2	0.1	0.1

جدول 2 متغیرها و سطوح پیشنهادی برای هر متغیر

Table 2 Design variables in three suggested levels

سطوح	متغیر		
	1	2	3
چگالی فوم ( $\text{kg/m}^3$ )	16	20	24
دمای ذوب‌ریزی (C)	680	740	800
ویسکوزیته دوغاب (Pa.s)	15	20	25

جدول 3 آرایه متعامد L9 ارائه شده توسط روش تاگوچی

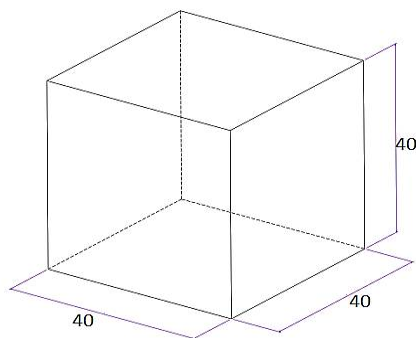
Table 3 L9 orthogonal array given by Taguchi method

شماره آزمایش	سطح متغیر اول	سطح متغیر دوم	سطح متغیر سوم
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

## 5- روش انجام آزمایش‌ها

## 5-1- آماده‌سازی مدل فومی

برای تولید نمونه‌ها از مدل فومی ساخته شده از جنس پلی‌استایرن با ابعاد (40×40×40 میلی‌متر) مطابق شکل 1 استفاده شده است. بلوک منبسط شده پلی‌استایرن با ابعاد (100×350×900 میلی‌متر) و چگالی اسمی (16، 20 و 24 کیلوگرم بر مترمکعب) برای آماده‌سازی مدل‌ها به کار گرفته شد.



شکل 1 ابعاد مدل فومی برحسب میلی‌متر

Fig. 1 Model dimensions in mm

مدل‌های فومی پوشش داده شده پس از خشک شدن در درون درجه‌های ریخته‌گری (ظروف استوانه‌ای شکل فلزی که در انتهای آن یک مخروط فلزی جوش داده شده است) قرار می‌گیرد و عملیات قالب‌گیری توسط ماسه انجام می‌پذیرد. به جهت اطمینان از پر شدن درجه، ظرف موردنظر توسط یک لرزاننده مرتعش می‌شود. به‌وسیله دمش هوا از سوراخ‌های تعبیه شده در کف درجه، ماسه‌ها به حالت شناور در خواهند آمد. در این حال مدل فومی به آرامی روی سطح ماسه شناور گذاشته می‌شود [22].

## 3- متغیرهای فرایند ریخته‌گری

در این پژوهش سه متغیر اصلی فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته شده، مشخص گردید که مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و نوع و ویسکوزیته دوغاب می‌باشند که مقادیر در نظر گرفته برای هر یک در ادامه آمده است [23].

الف) سه چگالی مختلف 16، 20 و 24 کیلوگرم بر مترمکعب برای فوم در نظر گرفته می‌شود.

ب) به‌منظور بررسی تأثیر نوع و ویسکوزیته دوغاب در سه ویسکوزیته 15، 20 و 25 پاسکال ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

ج) سه دمای 680، 740 و 800 درجه سلسیوس به‌منظور بررسی اثر دمای ذوب‌ریزی بر روی فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده بررسی می‌شود.

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش آلیاژ A356 با ترکیب شیمیایی نمایش داده شده در جدول 1 می‌باشد.

## 4- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

روش تاگوچی ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی است که در بررسی‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش می‌تواند با کمترین تعداد آزمایش‌ها، سطوح بهینه را مشخص کند. روش طراحی آزمایش تاگوچی برای تعیین میزان تأثیر متغیرها شامل: چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی، نوع و ویسکوزیته دوغاب و اثرات متقابل آن‌ها بر روی عیوب ظاهری، تخلخل و سختی نمونه‌ها استفاده شده است. خلاصه‌ای از سطوح مختلف متغیرهای به‌کاررفته و آرایه متعامد L9 به ترتیب در جدول‌های 2 و 3 آمده است.

## 5-2- آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش

نمونه‌های ریخته‌گری که برای آنالیز ساختاری و مشخصات مکانیکی به صورت طولی برش داده می‌شوند. طبق استاندارد ابتدا نمونه‌ها توسط کاغذ سمباده به شماره 200، 600 و 1000 به صورت دستی سمباده زده می‌شوند و برای سمباده زنی نهایی از عدد اندازه 2200 و 3000 استفاده می‌شود [24]. در مرحله نهایی با استفاده از خمیر الماس آلومینایی 1 میکرومتر نیز تمامی نمونه‌ها صیقل می‌شوند. همچنین، برای اچ نهایی نمونه‌ها از محلول کلر<sup>1</sup> استفاده می‌شود [25].

به منظور اندازه‌گیری درصد تخلخل، نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 5 برابر جهت تحلیل تخلخل مورد بررسی قرار گرفتند.

آزمایش سختی به منظور تشخیص تغییراتی که در ریزساختار قطعه روی می‌دهد و باعث تغییر در سختی قطعات می‌شود، انجام می‌گیرد. آزمایش سختی با استفاده از مقیاس راکول A (مخروط الماسی 120 درجه و 60kgf) با حداقل 5 تکرار بر روی هر نمونه انجام گرفت [26].

## 6- بحث و نتایج

در این مطالعه تأثیر هر کدام از پارامترهای کنترلی در فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده بر کیفیت سطح، تخلخل و سختی نمونه‌ها توسط روش تاگوچی بررسی شده است.

### 6-1- اثر پارامترهای فرایند بر روی عیوب ظاهری

عیوبی مانند پر نشدن کامل قالب، چین خوردگی، ماسه سوزی و عیوب کربنی از جمله مهم‌ترین عیوب ظاهری در فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده می‌باشند. لازم به ذکر از عیوب فوق با بازرسی ظاهری نمونه قابل ارزیابی هستند.

#### الف) چگالی فوم

مطابق با روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، آزمایش‌ها یک‌بار برای پوشان فریتی و بار دیگر برای پوشان زیرکونیمی انجام پذیرفتند. شکل 2 قطعات تولید شده را با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد بهترین حالت از نظر کاهش عیوب ظاهری در بررسی چگالی فوم، مربوط به مدل با چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

شکل 3 تأثیر چگالی فوم بر بی‌عیبی ظاهری در روش تاگوچی را نشان می‌دهد.

برای کنترل سرعت ذوب‌ریزی، مدل فومی مکعبی مطابق با چگالی هر نمونه به انتهای مدل فومی به‌عنوان حوضچه بار ریز توسط مواد چسبنده متصل گردید. بعد از عملیات ذوب‌ریزی، فلز مذاب وارد حوضچه بار ریز شده، سپس با سرعت یکسان وارد مدل فومی می‌شود.

به منظور پوشش دهی و خشک کردن مدل فومی، از دوغاب پایه آبی متشکل از 75% زیرکونیم و 25% سیلیکات سدیم، استفاده شد. دمای ذوب زیرکونیم 1700 درجه سلسیوس می‌باشد که به شدت تحت تأثیر درصد افزودن سیلیکات سدیم است [23]. ویسکوزیته دوغاب‌ها به وسیله ویسکوزمتر ریزشی (کاپ فورد) با شماره دهانه 5 اندازه‌گیری شد.

برای هم زدن دوغاب از یک همزن الکتریکی با سرعت 1250 دور بر دقیقه و به مدت دو ساعت با استراحت پنج دقیقه‌ای بعد از هر نیم ساعت کار استفاده شد. مدل‌ها به منظور پوشان دهی ابتدا توسط گیره‌ای نگه‌داشته، سپس به روش غوطه‌وری عمل پوشان دهی انجام پذیرفت. با کنترل مقدار غلظت سیلیکات سدیم و زمان فروبری مدل‌ها در پوشان ضخامت پوشش مختلف بر روی مدل‌ها به دست می‌آید. لایه پوشان دهی شده بعد از یک ساعت خشک می‌گردد، اما به جهت حصول اطمینان از خشک شدن کامل پوشان، مدل‌های پوشان دهی شده به مدت 24 ساعت در دمای 25 درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر نگهداری شدند.

در مرحله بعد، مدل‌های فومی پوشان دهی شده در قالبی از جنس آلومینیوم قرار داده می‌شوند و اطراف آن‌ها توسط ماسه بدون چسب به آهستگی پر می‌گردد. بعد از پر شدن قالب با ماسه مجموعه بر روی میز ارتعاشی با فرکانس 50 هرتز به مدت 60 ثانیه قرار داده می‌شود.

عملیات ذوب در یک کوره القایی انجام شد. یک دماسنج دیجیتال جهت اندازه‌گیری دمای مذاب بر روی کوره نصب شد. بعد از رسیدن مذاب به درجه حرارت مناسب با نرخ ثابت درون قالب ریخته می‌شود. سپس، قطعه ریخته‌گری بعد از بیست دقیقه از قالب خارج می‌گردد.

پس از انجام ریخته‌گری، نمونه‌ها از وسط برش داده شد و سطح مقطع نمونه‌ها از نظر عیوب ریخته‌گری، ریزساختار و سختی مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی عیوب سطحی، پر شدن ناقص، نیامدن مذاب، ماسه سوزی، پر شدن ناقص لبه‌ها و گوشه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشاهدات متالوگرافی بر روی نمونه‌های پولیش شده با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام می‌شود.

<sup>1</sup> Keller's reagent

به دلیل آن که عیوب ظاهری جزو پارامترهای کیفی هستند با اختصاص اعدادی برای هر کیفیت تبدیل به پارامتری کمی شده است.

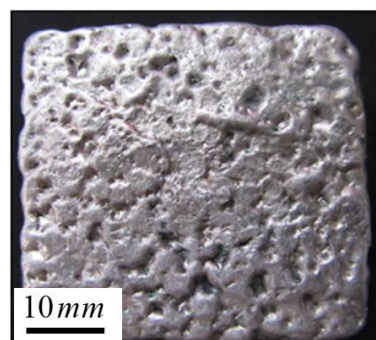
در هر آزمایش همواره بالاترین نسبت (S/N) در نتایج جست‌وجو می‌شود. مقدار بالای این پارامتر نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیشتر از پارامترهای غیرقابل کنترل یا پارامترهای اغتشاشی است. طراحی فرایند تولید با بالاترین نسبت (S/N) همراه باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس می‌شود [23].

همان‌گونه که شکل 3 نشان می‌دهد، چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب دارای بیشترین میزان نسبت سیگنال به نویز (S/N) می‌باشد، بنابراین می‌تواند مقدار بهینه‌ای برای کیفیت سطح در LFC باشد. با افزایش چگالی فوم تا 24 کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار بیشتری از محصولات حاصل از تجزیه فوم در خلال واکنش بین فوم و فلز مذاب به گاز و سایر محصولات تجزیه می‌شوند و از پرشدگی کامل قالب جلوگیری می‌کند. بنابراین، می‌توان با استفاده از فوم با چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب تعادلی بین مقدار گاز تولید شده و گاز خارج شده از طریق پوشان و ماسه، به وجود آورد. دلیل آنکه در چگالی 20 کیلوگرم بر مترمکعب درصد تخلخل کمترین مقدار خورد است مربوط به سرعت پیشروی فلز مذاب و زمان تجزیه حرارتی مدل فومی با سرعت خروج گاز حاصل از تجزیه به حالت بهینه خود رسیده است. نتایج پژوهش‌های دیگری نیز این موضوع را تصدیق می‌کند به‌عنوان مثال کومار گزارش داده است با افزایش 64 درصدی چگالی فوم زمان پرکنندگی فلز مذاب دو برابر افزایش می‌یابد [12].

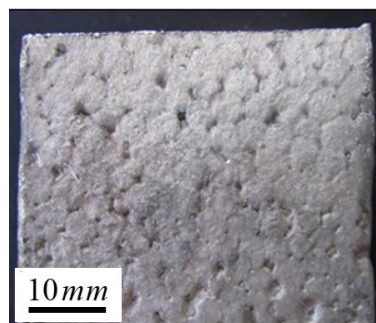
### ب) دمای ذوب‌ریزی

تأثیر فوم بر تولید نمونه، فقط به کم یا زیاد بودن چگالی وابسته نیست بلکه به چگونگی ذوب شدن فوم در حین ذوب‌ریزی نیز مربوط است [23]. با توجه به سه دمای ذوب‌ریزی در نظر گرفته شده، نمودار نسبت سیگنال به نویز برای دماهای مختلف در شکل 4 نشان داده شده است.

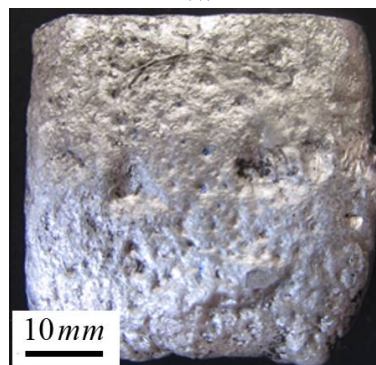
همان‌گونه که شکل 4 نشان می‌دهد، دمای 740 درجه سلسیوس دارای بیشترین مقدار می‌باشد که بدان معناست که بهترین نتایج را از نظر تولید ریخته‌گری با بی‌عیبی ظاهری کمتر برای دو حالت ایجاد می‌کند. همچنین، با افزایش درجه حرارت ذوب‌ریزی، حجم گازهای تولید شده به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با افزایش دما، نرخ انتقال گرما به فوم افزایش می‌یابد که منجر به تخریب سریع‌تر فوم می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 2 Fabricated samples in three different density levels (a) 16, (b) 20 and (c) 24 kg/m<sup>3</sup>

شکل 2 قطعات تولید شده با سه چگالی فوم (الف) 16، (ب) 20 و (ج) 24 کیلوگرم بر مترمکعب

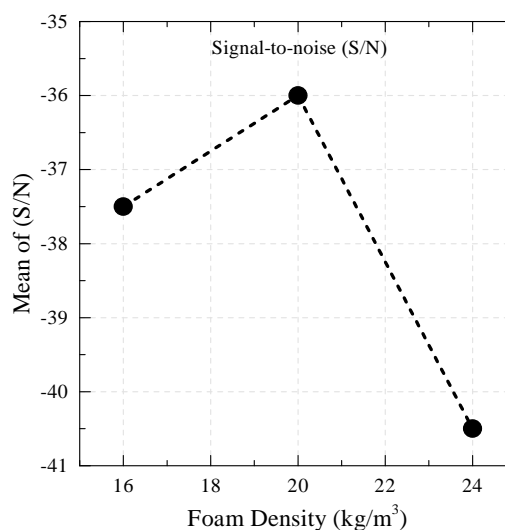


Fig. 3 The influence of specimen density on the visual defects

شکل 3 تأثیر چگالی فوم بر بی‌عیبی ظاهری

انتخابی برای ویسکوزیته پوشان است. همچنین، با افزایش ویسکوزیته به 25 پاسکال ثانیه کیفیت سطح نمونه‌ها به شدت دچار افت می‌شود که این به علت نفوذپذیری کمتر ویسکوزیته 25 پاسکال ثانیه نسبت به سایر ویسکوزیته‌ها می‌باشد. در ویسکوزیته 15 پاسکال ثانیه نیز کاهش کیفیت سطح نمونه‌های ریخته‌گری مشاهده می‌گردد. شاهرخیان و همکاران [23] نیز به نتایج مشابه دست یافتند و بیان کردند که مقدار نفوذپذیری پوشان به صورت متناسب با نرخ گاز از طریق منافذ پوشان می‌باشد. در مقادیر کمتر و بیشتر آن به ترتیب نفوذپذیری زیاد و کم پوشان مشاهده می‌شود. این موضوع خود عامل ایجاد عیب و افزایش درصد تخلخل در نمونه‌ها می‌باشد.

#### 6-2- تأثیر پارامترهای فرایند بر روی تخلخل

تخلخل گازی ممکن است ناشی از به دام افتادن محصولات تجزیه گازی و مایع باشد. زمانی که فوم در اثر حرارت مذاب تجزیه می‌گردد، مقداری از آن به صورت گاز و مقداری از آن نیز به صورت سیال گرانبه تجزیه می‌گردد. این گاز باید از طریق پوشش و ماسه خارج گردد، در غیر این صورت درون مذاب برگشته و در قالب محبوس می‌شود. این پدیده منجر به وجود آمدن عیوب خارجی و داخلی خواهد شد. شکل 6 تخلخل موجود در نمونه که به وسیله تصویر متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری برای نمونه 1 را نشان می‌دهد. سطح نمونه مورد نظر سپس، با استفاده از نرم‌افزار Image J مقادیر تخلخل به وسیله روش پردازش تصویر به مقادیر کمی تبدیل شده است که مقادیر آن برای هر آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است.

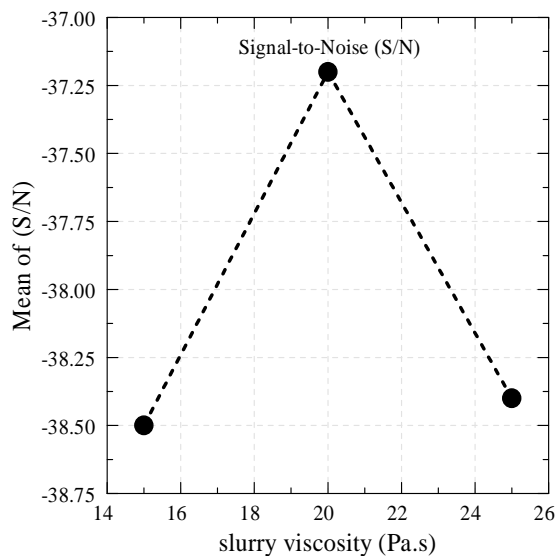


Fig. 5 The influence of slurry viscosity on the visual defects

شکل 5 تأثیر ویسکوزیته پوشان بر بی‌عیبی ظاهری

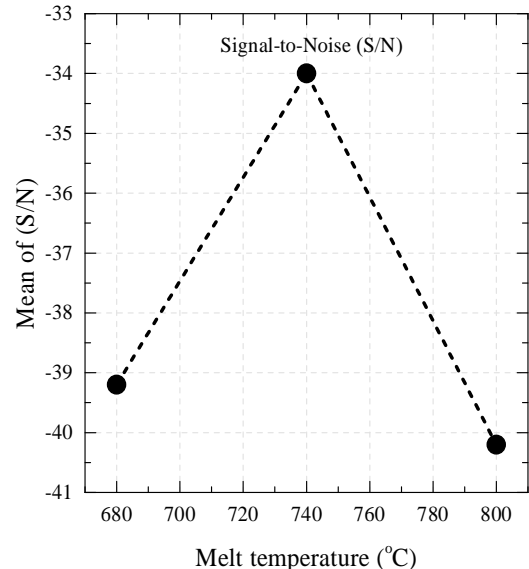


Fig. 4 The influence of melt temperature on the visual defects

شکل 4 تأثیر دمای ذوب‌ریزی بر روی بی‌عیبی ظاهری

با بالا رفتن سرعت تخریب فوم از یک طرف در اثر تخریب، حجم بیشتر و از طرف دیگر گاز بیشتری آزاد می‌گردد. این دو پدیده اثر معکوسی بر روی فشار دارند. افزایش حجم موجب کاهش فشار و افزایش گاز ورودی موجب افزایش فشار می‌شوند. علاوه بر این دما بیش از آن که بر روی زمان و الگوی پر شدن تأثیر داشته باشد، بر روی کیفیت قطعه نهایی و احتمال بروز عیوب تأثیر دارد. این امر به این دلیل است که تجزیه حرارتی مدل فومی در جلوی جبهه مذاب، گرماگیر بوده و اثر قابل توجهی بر پرکنندگی و انجماد در ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده دارد.

#### ج) ویسکوزیته پوشان

پوشان باید توانایی لازم برای خارج ساختن محصولات حاصل از تجزیه فوم را دارا باشد که به این توانایی، نفوذپذیری پوشان گفته می‌شود. نفوذپذیری فاکتوری تعیین کننده در دقت ابعادی قطعات ریخته‌گری شده با فناوری ریخته‌گری با مدل فوم فدا شونده است. با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی مدل فومی نیز افزایش خواهد یافت. با افزایش ضخامت پوشش انتظار می‌رود که قابلیت نفوذپذیری پوشان کاهش پیدا کند و بر نرخ حذف گاز از طریق پوشش و ماسه تأثیر بگذارد.

شکل 5 تأثیر ویسکوزیته دوغاب را بر بی‌عیبی ظاهری با استفاده از نمودار سیگنال به نویز (S/N) نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، ویسکوزیته 20 پاسکال ثانیه دارای بیشترین مقدار سیگنال به نویز می‌باشد که این بدان معناست که دارای کمترین عیوب سطحی در ریخته‌گری با مدل فومی فدا شونده و بهینه‌ترین حالت از بین ویسکوزیته‌های

این‌چنین می‌توان بیان نمود که علاوه بر چگالی فوم، غیریکنواختی تراکم و اندازه دانه‌ها، فاکتورهای بسیار مهمی هستند که بر کیفیت ریخته‌گری اثر می‌گذارند. ضمناً هم‌جوشی دانه‌های فوم بسیار تأثیرگذار هستند.

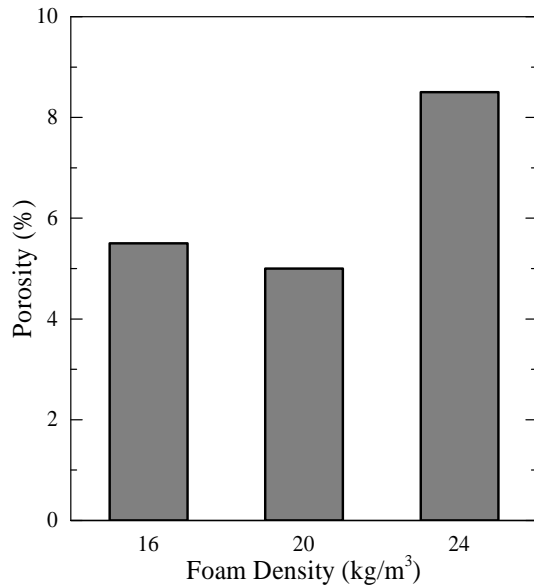


Fig. 8 The influence of foam density on the specimen porosity

شکل 8 تغییرات درصد تخلخل برای چگالی فوم‌های مختلف

در چگالی فوم 16 کیلوگرم بر مترمکعب با توجه به اینکه چگالی فوم و تراکم دانه‌ها کم است در نتیجه فوم با سرعت بیشتری تجزیه می‌گردد و گاز حاصل در مدت‌زمان کمتری تشکیل می‌شود. به دلیل آنکه زمان تشکیل گاز کم است، فرصت خروج از پوشش و ماسه را پیدا نکرده در نتیجه مقداری از گاز در نمونه به دام خواهد افتاد.

#### ب) دمای ذوب‌ریزی

همان‌گونه که شکل 9 نشان می‌دهد، با افزایش دما میزان تخلخل در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. میزان درصد تخلخل از دمای 740 درجه سلسیوس تا دمای 800 درجه سلسیوس افزایش چشمگیری داشته است. اما در دمای 680 درجه سلسیوس نیز درصد تخلخل بیشتر از دمای 740 درجه سلسیوس مشاهده می‌گردد. باید توجه داشت که در دماهای پایین‌تر مقدار مواد گرانبه تولید شده نیز بیشتر خواهد بود که این مواد در بین حفره‌های پوشش نفوذ کرده و باعث انسداد آن‌ها خواهد شد که توانایی خارج ساختن گاز تولید شده را از طریق پوشش (نفوذپذیری پوشش) را کاهش می‌دهد که در نتیجه گاز بیشتری به سمت مذاب بازگشته و به درون آن نفوذ می‌کند.

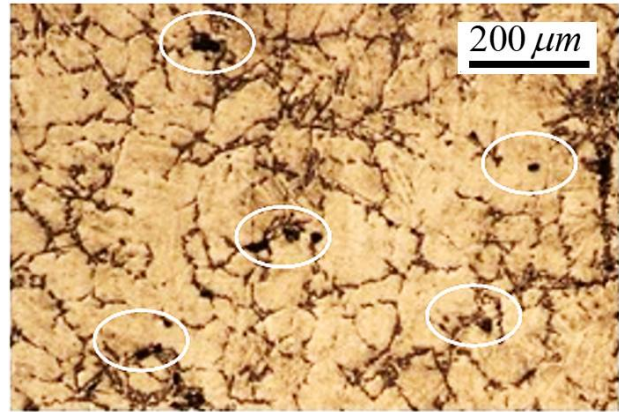


Fig. 6 Porosity defects in the fabricated specimen observed by optical microscope

شکل 6 تخلخل موجود در نمونه در تصویر متالوگرافی

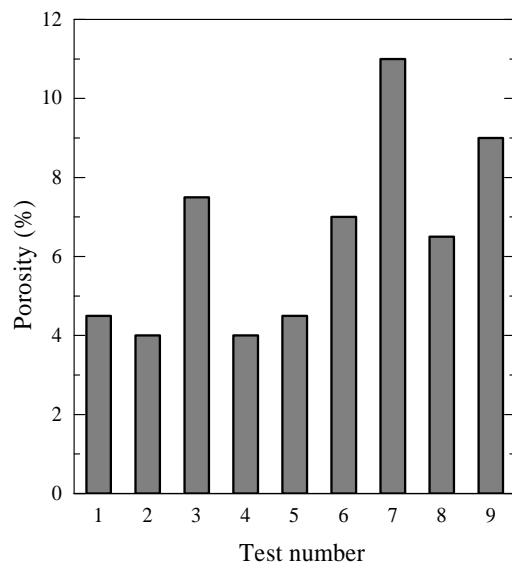


Fig. 7 The porosity percent of all specimens

شکل 7 درصد تخلخل در ریخته‌گری‌های انجام شده

#### الف) چگالی فوم

شکل 8 درصد تخلخل را برای چگالی‌های مختلف فوم مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، درصد تخلخل در چگالی 20 کیلوگرم بر مترمکعب کمینه و در حدود 5% می‌باشد.

همان‌گونه که شکل 8 نشان می‌دهد با افزایش چگالی فوم، درصد تخلخل نیز افزایش خواهد یافت زیرا میزان جوش خوردن دانه‌ها افزایش یافته و فضای خالی کمتری بین دانه‌های فوم دیده می‌شود. در خلال واکنش مذاب و فوم یک لایه پیوسته و متصل از محصولات تجزیه تشکیل می‌شود که در این شرایط گازهای داغ نمی‌توانند به‌طور عمیق در فوم نفوذ کنند، در نتیجه منطقه متأثر از حرارت در جلوی مذاب کاهش می‌یابد. علت افزایش درصد تخلخل در چگالی فوم 16 کیلوگرم بر مترمکعب را

شکل 11 شکل 11 مقادیر سختی راکول را برای آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل 11 نشان می‌دهد سختی‌های محاسبه شده برای هر 9 نمونه آزمایشگاهی مقادیر بین 22/1 تا 28 را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر به ازای تغییرات پارامترهای مختلف حداکثر اختلاف سختی 26/7% تغییرات در سختی نمونه‌ها مشاهده شده است. در ادامه اثر هر یک از پارامترها به‌طور مجزا مورد بحث قرار خواهد گرفت.

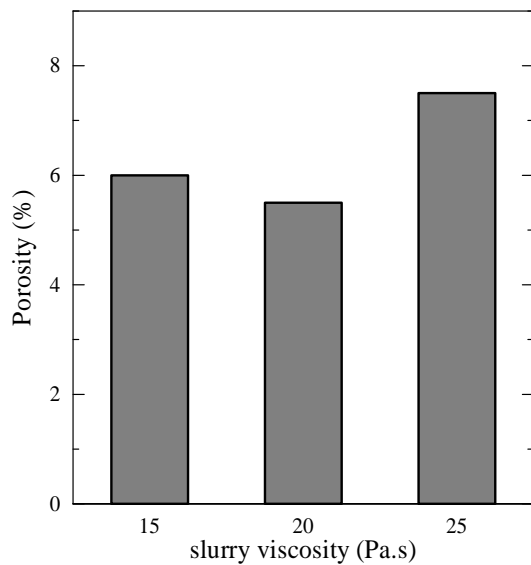


Fig. 10 The influence of slurry viscosity on the specimen porosity  
شکل 10 تغییرات درصد تخلخل برای ویسکوزیته‌های مختلف پوشان

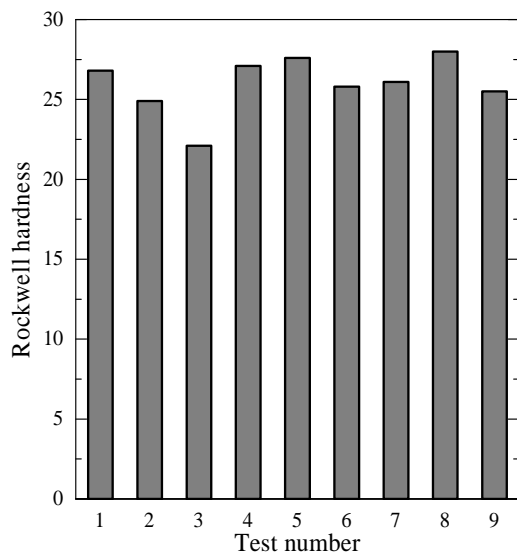


Fig. 11 Rockwell hardness of all specimens  
شکل 11 سختی راکول در ریخته‌گری‌های انجام شده

#### الف) چگالی فوم

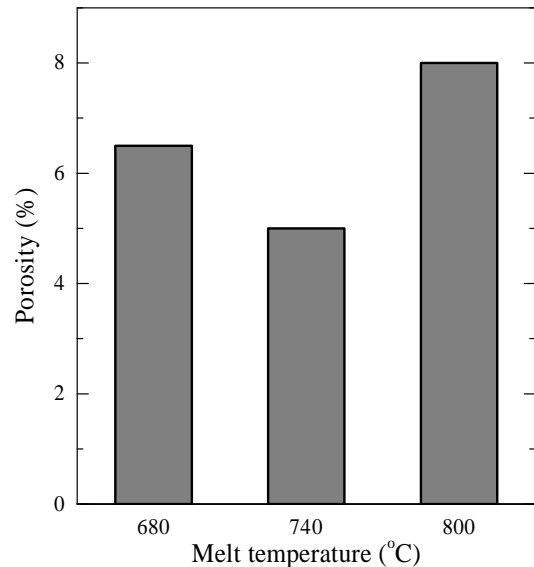


Fig. 9 The influence of melt temperature on the specimen porosity  
شکل 9 تغییرات درصد تخلخل برای دماهای ذوب‌ریزی مختلف

#### ج) ویسکوزیته پوشان

در شکل 10 درصد تخلخل بر اساس ویسکوزیته پوشان نشان داده شده است.

همان‌گونه که شکل 10 نشان می‌دهد، بیشترین درصد تخلخل در ویسکوزیته 25 پاسکال ثانیه وجود دارد. با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشش بر روی مدل فومی افزایش می‌یابد و روزه‌های موجود در پوشش کاهش می‌یابد، در نتیجه راه فرار گازها از درون قالب مسدود می‌شود؛ اما در ویسکوزیته 15 پاسکال ثانیه نسبت به ویسکوزیته 20 پاسکال ثانیه اندکی افزایش مقدار درصد تخلخل مشاهده می‌گردد. در این حالت به علت افت فشار در فضای بین فلز و قالب فومی در حال توسعه ذوب، پوشش تحمل وزن ماسه را نداشته و ماسه به درون محفظه قالب وارد می‌شود.

#### 3-6- تأثیر پارامترهای فرایند بر روی سختی

به‌منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های ریخته‌گری شده از آزمون سختی استفاده شد. این آزمون در بسیاری از مطالعات به عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب ماده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد [27]. پارامتر سختی حاکی از مقاومت در برابر فروروی نوک ابزار فرورونده به داخل قطعه بوده و این خاصیت در فلزات معیاری از مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل پلاستیک یا دائم است [28]. برای انجام آزمون سختی بر روی هر نمونه پنج بار آزمایش انجام شد و میانگین آن‌ها اعلام گردیده است.

Fig. 11 Rockwell hardness of all specimens



بیشتر خواهد شد که همین امر موجب ریزتر شدن ساختار و در نهایت افزایش سختی خواهد شد. نتایج این بخش کاملاً منطبق بر پژوهش‌های پیشین [23] است که دریافتند با افزایش دمای ذوب‌ریزی سختی در نمونه‌ها کاهش خواهد یافت.

### ج) ویسکوزیته پوشان

شکل 14 تغییرات سختی بر اساس ویسکوزیته پوشان را نشان می‌دهد. از نمودار می‌توان استنباط نمود که با افزایش ویسکوزیته پوشان از 15 پاسکال ثانیه به 25 پاسکال ثانیه، مقدار سختی به صورت تدریجی کاهش می‌یابد.

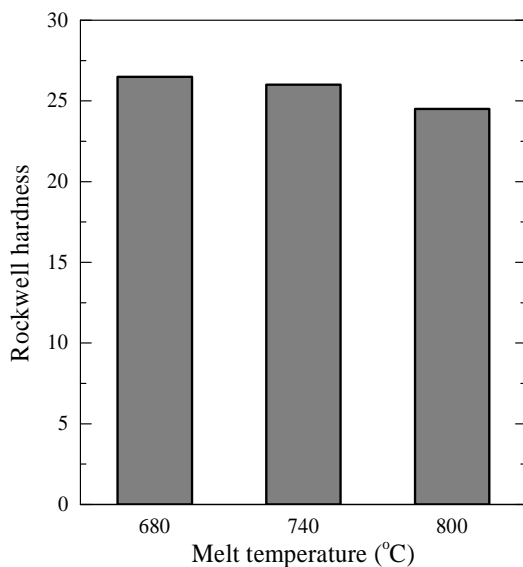


Fig. 13 The influence of melt temperature on the specimen Rockwell hardness

شکل 13 تغییرات مقدار سختی بر اساس دمای ذوب‌ریزی

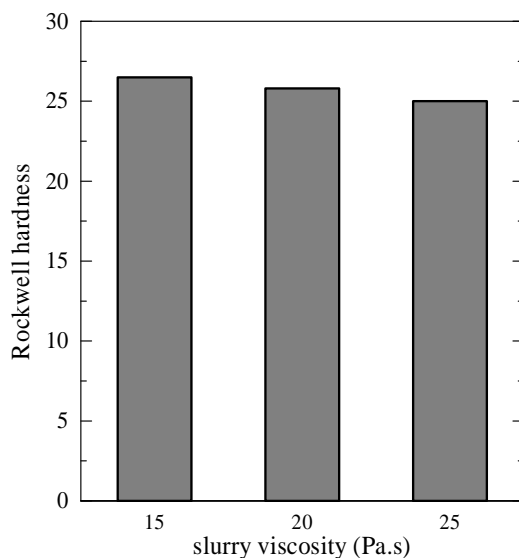


Fig. 14 The influence of slurry viscosity on the specimen Rockwell hardness

در شکل 12 تغییرات سختی بر اساس چگالی فوم نشان داده شده است.

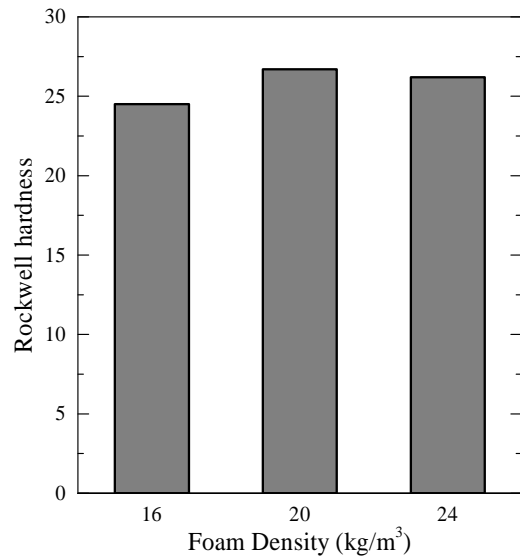


Fig. 12 The influence of foam density on the specimen Rockwell hardness

شکل 12 تغییرات سختی بر اساس چگالی فوم

همان‌گونه که در شکل 12 نشان داده است با افزایش چگالی فوم، سختی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد؛ اما از چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب تا چگالی فوم 24 کیلوگرم بر مترمکعب مقدار جزئی کاهش سختی مشاهده می‌گردد. به طوری که مقدار سختی از میزان 26/7 برای چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب به مقدار 26/2 برای چگالی فوم 24 کیلوگرم بر مترمکعب رسیده است.

علت این پدیده را این‌گونه می‌توان بیان نمود که اگرچه چگالی فوم نقش مهمی بر روی نرخ انجماد نمونه‌های ریخته‌گری شده دارد با این حال علاوه بر چگالی فوم سایر خواص فوم از جمله: هم‌جوشی دانه‌ها، دانه‌بندی فوم و... بر روی نرخ انجماد مذاب نیز تأثیر دارند. حداکثر دامنه تغییرات سختی به ازای تغییرات چگالی تنها 9% حاصل شده است در صورتی که چگالی فوم 50% تغییر نموده است.

### ب) دمای ذوب‌ریزی

تغییرات مقدار سختی بر اساس دمای ذوب‌ریزی در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد با افزایش دمای ذوب‌ریزی، مقدار سختی به وضوح کاهش می‌یابد. دلیل کاهش در مقدار سختی، دما و گرمای زیاد می‌باشد. افت حرارتی شدید و در نتیجه شیب حرارتی به وجود آمده باعث از دست رفتن حرارت می‌گردد که در نتیجه سرعت سرد شدن

- [1] H. Bates, C. Littleton, B. McMellon, P. Stroom, Technological Developments and Worldwide Market Growth in Lost Foam Casting Production, *Transactions of the American Foundry Society*, Vol. 109, pp. 1-16, 2001.
- [2] R. Walling, J. Dantzig, Mechanisms of Mold Filling in the EPC Process, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 102, pp. 849-854, 1994.
- [3] L. Xuejun, *Experimental and computational study of fluid flow and heat transfer in the lost foam casting process*, PhD Thesis, Auburn University, 2005.
- [4] B. A. Miller, *Pattern pyrolysis defect reduction in lost foam castings*, PhD Thesis, University of Alabama at Birmingham, 1996.
- [5] G. H. Majzoobi, M. Kashfi, N. Bonora, G. Iannitti, A. Ruggiero, E. Khademi, Damage characterization of aluminum 2024 thin sheet for different stress triaxialities, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 702-712, 2018/07/01/, 2018.
- [6] S. Shivkumar, *Fundamental Characteristics of Metal Flow in the Full-Mold Casting of Aluminum Alloys*, PhD Thesis, Stevens Institute of Technology, 1988.
- [7] R. Ballmann, Assembly and coating of polystyrene foam patterns for the evaporative pattern casting process, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 96, pp. 465-470, 1988.
- [8] M. Sands, S. Shivkumar, EPS bead fusion effects on fold defect formation in lost foam casting of aluminum alloys, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 8, pp. 2373-2379, 2006.
- [9] S. Kumar, P. Kumar, H. Shan, Optimization of tensile properties of evaporative pattern casting process through Taguchi's method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, No. 1-3, pp. 59-69, 2008.
- [10] E. Niemann, Expandable polystyrene pattern material for the lost foam process, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 96, pp. 793-798, 1988.
- [11] M. Warner, B. Miller, H. Littleton, Pattern Pyrolysis Defect Reduction in Lost Foam Castings (AFS Research)(98-161), *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 106, pp. 777-786, 1998.
- [12] orative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1-3, pp. 615-623, 2007.
- [13] Y. Chen, R. Chen, W. Hwang, Mold-Filling study in the EPC process-mathematical model and flow characteristics, *Transactions-American Foundrymen's Society*, pp. 459-464, 1998.
- [14] M. Sands, S. Shivkumar, EPS molecular weight and

شکل 14 تغییرات مقدار سختی بر اساس ویسکوزیته پوشان همان‌گونه که قبلاً گزارش شد با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشش افزایش می‌یابد که تأثیر چشمگیری بر روی انتقال حرارت دارد. پوشش ضخیم‌تر همچون عایق حرارتی با قدرت بیشتر نسبت به پوشش‌های نازک‌تر، باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که همین امر باعث زمان‌دهی به ریزساختار شده و در نتیجه ریزساختار درشت‌تر می‌شود که در نهایت باعث کاهش میزان سختی می‌شود.

## 7- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سه پارامتر تأثیرگذار در فرایند ریخته‌گری به روش مدل فومی فدا شونده بررسی شد و تأثیر آن‌ها در سه سطح مختلف بر روی عیوب ظاهری و ریختگی، درصد تخلخل و سختی قطعات مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش تاگوچی طراحی آزمایش‌ها انجام شد. نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- با افزایش چگالی فوم مقدار گاز حاصل از تجزیه حرارتی مدل فومی افزایش می‌یابد و همانند سدی در برابر پیشروی مذاب در قالب عمل می‌نماید و موجب پر نشدن کامل قالب و سایر عیوب ظاهری از جمله: گرد شدن لبه‌ها، نیامدن مذاب، زبری سطح و غیره می‌گردد.

- درصد تخلخل نمونه‌ها در چگالی فوم 20 کیلوگرم بر مترمکعب، دمای ذوب‌ریزی 740 درجه سلسیوس و ویسکوزیته پوشان 20 پاسکال ثانیه دارای کمترین مقدار می‌باشد.

- دمای ذوب‌ریزی تأثیر چشمگیری بر روی تخلخل دارد که با افزایش دمای ذوب‌ریزی، مقدار تخلخل نیز افزایش می‌یابد زیرا در دمای بالا سرعت تبخیر مدل فومی افزایش می‌یابد و مقدار گاز تولیدی حاصل نمی‌تواند به‌طور کامل از طریق منافذ پوشان از قالب خارج گردد.

- با افزایش دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان مقدار سختی نمونه‌های ریخته‌گری شده کاهش می‌یابد اما با افزایش چگالی فوم مقدار سختی افزایش می‌یابد.

- مقدار سختی نمونه‌ها برای هر دو نوع پوشان تقریباً برابر بوده و اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

- بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مقادیر بهینه چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان به ترتیب برابر است با 20 کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار 740 درجه سلسیوس و 20 پاسکال ثانیه به دست آمد.

## 8- مراجع

- part i: fracture toughness, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 27, No. 5, pp. 484-505, 1991.
- [22] T. Piwonka, A comparison of lost pattern casting processes, *Materials & Design*, Vol. 11, No. 6, pp. 283-290, 1990.
- [23] M. A. Shahrokhian Dehkordi, M. Karimian, An Experimental study on Lost Foam Casting using the Taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 327-334, 2017. (in Persian)
- [24] J. McCall, *Metallographic specimen preparation: optical and electron microscopy*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [25] G. Vander Voort, *Metallography, Principles and Practice*, ASM International, Materials Park, OH, 1999, *Google Scholar*, pp. 436-450.
- [26] E. ASTM, Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials, E18-08a, 2008.
- [27] G. Majzoobi, K. Rahmani, A. Atrian, Temperature effect on mechanical and tribological characterization of Mg-SiC nanocomposite fabricated by high rate compaction, *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 1, pp. 015046, 2018.
- [28] A. Atrian, G. Majzoobi, S. Nourbakhsh, S. Galehdari, R. M. Nejad, Evaluation of tensile strength of Al7075-SiC nanocomposite compacted by gas gun using spherical indentation test and neural networks, *Adv. Powder Technol*, Vol. 27, No. 4, pp. 1821-1827, 2016.
- foam density effects in the lost foam process, *Journal of Materials Science*, Vol. 38, No. 10, pp. 2233-2239, 2003.
- [15] D. Caulk, A foam engulfment model for lost foam casting of aluminum, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 21-22, pp. 3831-3845, 2006.
- [16] S. Kumar, P. Kumar, H. Shan, Parametric optimization of surface roughness castings produced by evaporative pattern casting process, *Materials letters*, Vol. 60, No. 25-26, pp. 3048-3053, 2006.
- [17] J. Rossacci, S. Shivkumar, Bead fusion in polystyrene foams, *Journal of Materials Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 201-206, 2003.
- [18] M. Sands, S. Shivkumar, Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process, *Journal of Materials Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 667-673, 2003.
- [19] M. Karimian, A. Ourdjini, M. Idris, T. Chuan, H. Jafari, Process Control of Lost Foam Casting using Slurry Viscosity and Dipping Time, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 11, No. 21, pp. 3655-3658, 2011.
- [20] R. C. Bhat, S. Bhavnani, R. Overfelt, D. Sheldon, *Effect of Process and Design Variables in the Production of Expandable Polystyrene Patterns for Lost Foam Casting*, PhD Thesis, Auburn University, 2005.
- [21] P. Stupak, W. Frye, J. Donovan, The effect of bead fusion on the energy absorption of polystyrene foam.