ماهنامه علمى يژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی متغیرهای فرآیند ریخته گری مدل فومی فداشونده با استفاده از روش

تاگوچى

محمدامىن شاھر خىان دھكر دى 1 ، محىدكر ىمىان 2*

1- كارشناسي ارشد، مكانيك، باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان دانشگاه آزاداسلامي واحد خميني شهر، اصفهان

2- استادیار، مکانیک، باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان دانشگاه آزاداسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستى mkarimian@iaukhsh.ac.ir، 119/84175

چکیدہ	اطلاعات مقاله
روش ریخته گری مدل فومی فدا شونده، یک روش نوین برای ریخته گری قطعات پیچیده می باشد که علاوه بر داشتن مزایای فنی و اقتصادی نسبت به روش سنتی دارای مزایای زیست محیطی نیز بوده و از این رو مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی اثر متغیرهای چگالی فوم، دمای ذوب ریزی و ویسکوزیته پوشان که از اثر گذارترین متغیرهای فرآیند ریخته گری مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی نمونه ها هستند، پرداخته می شود. به منظور طراحی آزمایشات و تعیین سطوح بهینه هریک از متغیرهای در نظر گرفته شده از روش تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای درنظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای درنظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای درنظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای درنظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای در نظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی آرایه متعامد 12 مود ارزیایی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که چگالی فوم در سه می وی می فرویزی C م ویسکوزیته پوشان 20 دود می وی و مود این مقدار درصد تخلخل (%6.2) به همراه بیشترین مقدار سختی(با مقدیر بهینه برای متغیرها بود که چگالی فوم و دمای ذوب ریزی به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر روی درصدتخلخل و سختی با مقادیر ضریب تاثیر 24 24 20 مند	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 17 بهمن 1395 ارائه در سایت: 23 اردیبهشت 1396 ریختهگری مدل فومی فداشونده روش تاگوچی تحلیل واریانس سختی درصدتخلخل
% 50.54 و % 50.55 ميباسند.	

An Experimental study on Lost Foam Casting using the Taguchi method

Mohammad Amin Shahrokhian Dehkordi, Majid Karimian^{*}

Department of Mechanical Engineering, Young Researchers Club and the Elite Islamic Azad University of KhomeiniShahr, Esfahan, Iran * P.O.B. 119/84175, Esfahan, Iran, mkarimian@iaukhsh.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 05 February 2017 Accepted 24 March 2017 Available Online 13 May 2017	Lost foam casting is a new method for casting complex parts. This method, in addition to its technical and economic advantages over the traditional methods, has environmental benefits and therefore has been of special interest. In this study, the effects of foam density, pouring temperature, and coating viscosity were studied, which are the most important factors affecting porosity and hardness in the lost
Keywords: Lost Foam Casting Taguchi method Analysis of Variance Hardness Porosity	foam casting method. The Taguchi method, signal to noise ratio and analysis of variance were used to design experiments and determine the optimal levels of each variable. All the considered variables were evaluated in three levels using L9 orthogonal array Taguchi analysis. Results showed that foam density of 20 kg/m3, pouring temperature of 740° C and coating viscosity of 20 sec were the optimal values for the variables due to creating appropriate condition between thermal decomposition and foam evaporation with speed of melting advancement and exhaust gas through the pores in the coating and creating the lowest porosity (2.6%) and the highest hardness value (27.7 HRA). Foam density and pouring temperature were the most influential parameters on the porosity and hardness with the impact factors of 64 58% and 56 35%, respectively.

ضريب انبساط حرارتي پايين اشاره نمود [3]. خواص آلياژ Al-Si-Mg به شدت به فرآیند ریخته گری، ترکیب شیمیایی، رفتار مذاب و نحوه انجماد و اندازه دانه و... وابسته است [3]. انجماد آلياژهای اين گروه نقش بسيار با اهمیتی بر روی اندازه دانه، ساختار، تشکیل تیغههای سیلیسیم در زمینه و... دارد. فرآیند ریخته گری با مدل فومی یک تکنولوژی جدید برای تولید قطعات پیچیده فلزی میباشد. فرآیند ریخته گری با مدل فومی اولین بار در سال 1958 تحت عنوان ريخته گرى توپر ابداع شد. [5,4] در چند سال اخير روش

ریخته گری آلیاژهای آلومینیم و Al-Si-Mg به طور گستردهای در صنایع مختلف مانند هوافضا و صنایع خودروسازی به علت خواص منحصر به فرد آن-ها استفاده می شود [2,1]. از مهمترین دلایل استقبال زیاد از این آلیاژها و مخصوصاً معروفترين آلياژ اين گروه يعني A356 ميتوان به مواردي چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، سیالیت و قابلیت ریختگی عالی، مقاومت به ترک گرم، قابلیت جوشکاری مناسب و همچنین

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

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)

ریخته گری با مدل فومی فداشونده تبدیل به یک روش استاندارد برای تولید قطعات پیچیده با کیفیت سطح مناسب، کاهش هزینههای سوخت و ساخت قالب و… شده است [6]. برخلاف روش ریخته گری سنتی (ریخته گری ماسه ای)، ویژگی منحصربه فرد ریخته گری با مدل فومی فداشونده وجود یک مدل فومی (معمولاً از جنس پلی استایرن منبسط شده) که شکل نهایی قطعه مورد نظر را دارد، در مسیر فلز مذاب است. این مدل قبل از ریخته گری برداشته نمی شود و پس از پوشان دهی و خشک شدن آن، فلز مذاب بر روی مدل فومی ریخته می شود [7]. این روش ریخته گری با کیفیت بالا باید تحت کنترل اساسی و مهم است که برای تولید ریخته گری با کیفیت بالا باید تحت کنترل قرار گیرند.

فرآیند LFC با تهیه مدل فومی که در پوشان نسوز غوطهور میشود تا یک لایه نازک از جنس پوشان را بر روی آن ایجاد کند، آغاز میشود. بعد از خشک شدن لایه پوششی، مدل پوشش داده شده درون قالبی قرار می گیرد و اطراف آن با ماسه خشک و بدون مواد چسبنده پر میشود، سپس ماسه بهوسیله ارتعاش فشرده میشود تا یک ساختار محکم برای حمایت از مدل در حین ریخته گری به وجود آید. سپس فلز مذاب داخل قالب ریخته میشود، بر اثر حرارت فلز مذاب، مدل فومی تجزیه حرارتی شده و به تدریج فلز مذاب بایگزین مدل فومی میشود در انتها و پس از طی شدن زمان انجماد، قطعه ریخته گری حاصل میشود [8]. ریخته گری LFC نسبت به ریخته گری سنتی، نیاز به ماهیچه، به دلیل استفاده از فوم در حین ریختن فلز مذاب، همچنین استفاده از این فرآیند امکان اتصال چند مدل به یک دیگر را فراهم می کند که میاسب است [9]. فرآیند مکان اتصال چند مدل به یک دیگر را فراهم می کند که میاسب است [9]. فرآیندCFC تلرانسهای بسته و سطح پایانی همواری را تولید می کند که به قطعه نهایی بسیار نزدیک است [0].

در فرآیند LFC، پرکنندگی قالب، انتقال حرارت و انجماد به شدت تحت تاثیر تجزیه مدل فومی و تخلیه گاز قالب است. سه پدیده در فرآیندLFC وجود دارد که شامل: جریان کم فلز مذاب، کاهش هوا و محصولات حاصل از تجزیه فوم میباشد. جریان کم فلز مذاب و کاهش اتمسفر ممکن است به کاهش اکسید و سرباره کمک کنند در صورتی که اگر محصولات حاصل از تجزیه فوم از قالب خارج نشوند ممکن است منبعی برای تشکیل عیوب شوند [11]. بنابراین برای بهبود خواص ریخته گریLFC، در کی از واکنش بین مدل فومی و فلز مذاب و همچنین جابجایی و تخلیه محصولات حاصل از تجزیه مدل فومی از طریق پوشان و ماسه ضروری است.

عیوب را به طور کلی و در یک دستهبندی جامع میتوان به عیوب داخلی و عیوب خارجی دستهبندی نمود. عیوب خارجی که اکثراً روی سطح ظاهر می شوند شامل: پرنشدن کامل قالب، روی هم افتادگی، تاول زدن و یا آبله گون شدن هستند. عیوب داخلی ممکن است داخل قطعه ریخته گری ظاهر شود و شامل: تخلخل، آخال و چینخوردگی باشد. برخی از عیوب به ذوب شدن مدل فومی و سرعت جریان مذاب و تکههای بریده شده لایه پوشش که به درون مذاب کشیده می شوند، مربوط می باشد که تخلخل گازی و عیوب ناخالصی ممکن است ناشی از به دام افتادن محصولات تجزیه گازی و مایع فوم باشد [2]. زمانی که فوم در اثر حرارت مذاب تجزیه می گردد مقداری از آن نعوی که در دمای 2° 000 نرخ تبخیر فوم تاحدی افزایش یافته است که محصولات گازی در این دما تشکیل می شوند و تا دمای 2° 80 این گازها محصولات گازی در این دما تشکیل می شوند و تا دمای می این این گازها

مقدار، منومر به هیدروژن و هیدروکربنها تجزیه می گردد که این گاز باید از طریق پوشش و ماسه خارج گردد، در غیر این صورت به درون مذاب برگشته و درون قالب محبوس می شود که باعث بوجود آمدن عیوب خارجی و داخلی خواهد شد [13,12].

در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تحلیل نتایج حاصل از واریانس و نسبت سیگنال به نویز پارامترهای چگالی فوم، دمای ذوبریزی و ویسکوزیته پوشان که از مهمترین و تاثیرگذارترین پارامترهای فرآیند ریخته گری با مدل فومی فداشونده هستند، مقدار ضریب تاثیر و اثرگذاری هریک از پارامترها بر روی مقدار درصد تخلخل و سختی قطعات ریخته گری شده مشخص گردد و بتوان تعیین نمود که کدام یک از پارامترها دارای اهمیت و اثرگذاری بیشتری می باشند.

2- مواد و روش تحقيق

به منظور بررسی پارامترهای فرآیند ریخته گری با مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی از آلیاژ A356 با ترکیب شیمیایی بیان شده در جدول 1 استفاده شد.

ساخت مدل فومی که از جنس پلیاستایرن بود به صورت پلکانی و با پنج پله به ضخامتهای 24 ,18 ,28 ,28 میلیمتر در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا بلوک خام فوم پلیاستایرن با چگالیهای 8/m³ (16, 20, 24) 100×250 فومی و با ابعاد 250×100 میلیمتر توسط دستگاه برش الکتریکی سیم داغ با دقت ابعادی 0.5 میلیمتر برش داده شد. شکل 1 مدل فومی در نظر گرفته شده را برای این تحقیق نشان میدهد.

سیستم راهگاهی سرتاسری در بالا برای مدلها به منظور تغذیه مناسب مذاب به مدل فومی در طول انجام عملیات ذوبریزی استفاده شد. سیستم راهگاهی استفاده شده برای هر مدل فومی مطابق با چگالی فوم مدل بوده است. بعد از اتصال سیستم راهگاهی به مدلها و آمادهسازی آنها، مدلها در محلولی متشکل از زیرکنیم و سیلیس کلوئیدی با نسبت 3 به 1 و مقدار ویسکوزیتههای 25, 20, 25 ثانیه که با کاپ فورد شماره پنج اندازه گیری شد، پوشاندهی شدند تا لایهایی نازک از مواد سرامیکی و نسوز بر روی آنها ایجاد

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ استفاده شده

Table	1 Chemic	al comp	osition of A	A356 alloy	7		
Zn	Si	Cu	Fe	Mg	Ti	Mn	Al
0.1	7.10	0.2	0.17	0.33	0.2	0.1	bal



Fig. 1 View of Lost Foam Casting model dimensions (mm) شکل 1 نمایی از ابعاد مدل فومی فداشونده بر حسب میلیمتر

مطالعه تجربی متغیرهای فرآیند ریختهگری مدل فومی فداشونده با استفاده از روش تاگوچی

شود. پوشان دهی به روش غوطهوری و به مدت 60 ثانیه به منظور ایجاد پوششی یکنواخت و با ضخامت مناسب صورت پذیرفت. شکل2 تصویر مدل فومی پس از اتصال سیستم راهگاهی را نشان میدهد.

کلیه مدلها پس از پوشاندهی در اتاقی با دمای 27 درجه سانتی گراد و به مدت 24 ساعت جهت حصول اطمینان از خشک شدن کامل پوشان نگهداری شد. مدل فومی پوشاندهی شده بعد از خشک شدن به صورت عمودی در قالبی از جنس آلومینیم با ابعاد 460×350 میلیمتر به صورتی که از کنارههای قالب و کف آن فاصله 100 میلیمتری داشته باشد، قرار گرفت و اطراف آن با ماسه سیلیسی دارای عددنرمی AFS 60-400 پر شد [14]. در شکل3 نحوه قرار گیری مدل فومی به همراه ابعاد جانمایی آن درون ماسه و قالب آلومینیمی نشان داده شده است.

از میز ارتعاشی که دارای مشخصاتی مطابق جدول2 بود جهت ایجاد ارتعاش و فشرده کردن ماسه اطراف مدل فومی استفاده شد و در نهایت ذوب فلز در کوره القایی و با سه دمای 680, 740, 800 درجه سانتی گراد انجام پذیرفت.

میزان درصد تخلخل نمونهها به روش ارشمیدس و سختی آنها با استقاده از آزمون راکول A محاسبه شد که بدین منظور از وسط هر قسمت در نمونه پلکانی برشی مطابق شکل4 زده شد و قسمتی از نمونهها برش زده شد که پس از انجام متالوگرافی، تست سختی سنجی بر روی آنها صورت



Fig. 2 View of Lost Foam Casting model with Pouring cup شکل 2 نمایی از مدل فومی فداشونده با سیستم راهگاهی سرتاسری



Fig. 3 Position of the Foam pattern inside the flask (mm) شکل 3 موقعیت قرارگیری مدل فومی درون قالب برحسب میلیمتر

|--|

Table 2 Vibration table specification					
دور (rpm)موتور	(V)ولتاژ	فركانس (Hz)ارتعاش	(mm)ابعاد میز ارتعاشی		
3000	240	0.33	410ار تفاع×400عرض×600طول		



Fig. 4 Typical longitude sectioning of cast sample شکل 4 برش طولی نمونه ریخته گری

پذيرفت.

3- طراحی آزمایشها

به طور کلی در طراحی آزمایشات، برای مشخص کردن سطوح بهینه، سطوح پارامترها و تعیین میزان تاثیرگذاری آنها، متغیرهای فرآیند به دو دستهی کنترلی و غیرکنترلی تقسیم میشوند. عوامل کنترلی عواملی هستند که به منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی پروسه ساخت به کار گرفته میشوند. عوامل غیرکنترلی تمام عواملی هستندکه باعث ایجاد تغیرات میشوند. اما آنها بر حسب شرایط، ثابت فرض میشوند. نسبت سیگنال به نویز، نشان دهندهی حساسیت مشخصهی کیفی مورد بررسی به عوامل میباشد. در هر آزمایش، ما همواره به دنبال بالاترین نسبت (*N/*) در نتایج مستیم. مقدار (*N/*) بالا نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و یا پارامترهای اغتشاشی است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت (*S/N*)، همواره باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس میشود.

در روش تاگوچی، پس از تعیین پارامترهای ورودی و خروجی و مقادیر آنها، تبدیل دادهها و مشاهدات به یک عدد (S/N) در دو مرحله انجام میشود. در مرحله اول، میانگین مجموع مربعات انحراف (MSD)، که یک کمیت آماری است و انحراف از مقدار مشخصه و هدف را نشان میدهد، محاسبه میشود. این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالتهای مختلفی است. دو حالت استفاده شده در این تحقیق به قرار زیر است:

مقدار کوچکتر بهتر ^۱ است: در اندازه گیری درصد تخلخل هرچه عددکوچکتر باشد بهتر است. بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول استفاده می شود:

$$S/N = -10 \log \left(\sum_{l=1}^{n} \left(\frac{1}{Y_{l}^{2}} \right) \right)$$
(1)
مقدار بزرگتر بهتر است: در اندازه گیری میزان سختی، هر چه عدد
بزرگتر باشد بهتر است، بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول استفاده

¹ The Smaller is better

مىشود.

(2) $S/N = -10 \log \left(\sum_{i=1}^{n} (Y_i^2)/n\right)$ (2) در روابط بالا، *n* مرتبه تکرار و *Y* مقدار خروجی آزمایش و واحد نسبت سیگنال به نویز دسیبل میباشد. در مرحله بعد با استفاده از این مقدار نسبت سیگنال به نویز محاسبه میشود. پس از محاسبه تابع زیان برای هر خروجی از فرمول مقدار سیگنال به نویز کل را محاسبه میکنیم *L* در این فرمول همان مقدار تابع زیان محاسبه شده در قسمت قبل است:

 $S/N = -10 \log \left(\sum_{i=1}^{n} (L_i) \right)$ (3) در جدول 3 پارامترهای مورد بررسی و همچنین سطوح هر کدام در روش

طراحی آزمایش تاگوچی نشان داده شده است.

4- بحث و نتايج

در جدول4 نتایج حاصل از مقادیر سیگنال به نویز به همراه مقادیر عملی فرآیند ریخته گری مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی نمونههای ریخته گری شده نشان داده شده است که در ادامه به بررسی و تشریح اثر پارامترها بر روی درصد تخلخل و سختی نمونهها به صورت کامل پرداخته می شود.

1-4- اثرپارامترهای فرآیند برروی درصدتخلخل

در این تحقیق مقدار درصد تخلخل شامل تخلخل گازی و انقباضی میباشد. نتایج حاصل از نمودار سیگنال به نویز برای درصدتخلخل با اعمال حالت، دستیابی به درصد تخلخل کمتر در شکل5 نشان داده شده است. بهترین حالت بر طبق نمودارهای سیگنال به نویز مربوط به چگالی فوم²Okg/m³ دمای ذوبریزی C 20kg/m دمای ذوبریزی C 680° و ویسکوزیته پوشان20sec بدست آمده است که مطابق جدول 4، آزمایش شماره 4 میباشد.

در چگالی فوم 24kg/m³ میزان جوش خوردن دانههای فوم نسبت به چگالی فومهای کمتر افزایش مییابد و فضای خالی کمتری بین دانههای فوم دیده میشود که این منافذ بین دانههای فوم در شکل6 با بزرگنمایی 200 میکرومتر نشان داده شده است. از طرفی در خلال واکنش مذاب و فوم یک لایه پیوسته و متصل از محصولات تجزیه فوم تشکیل میشود که در این

جدول 3 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آنها

Table 3 investigating parameters with their levels				
سطح3	سطح2	سطح 1	پارامتر	
24	20	16	(kg/m³)چگالی فوم	Α
800	740	680	دمای ذوبریزی(C °)	В
25	20	15	ويسكوزيته پوشان(sec)	С

جدول 4 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آنها Table 4 Investigating parameters with their levels

Tuble 4 investigating parameters with their levels					
ل به نویز	نسبت سيگنال	خروجى	پارامترهای خروجی		
سختى	درصدتخلخل	سختى	درصدتخلخل	شمارہ آزمایش	
28.5627	-9.2480	26.8	2.9	1	
28.1648	-9.8272	25.6	3.1	2	
26.8878	-15.2686	22.1	5.8	3	
28.8496	-8.2995	27.7	2.6	4	
28.5627	-10.1030	26.8	3.2	5	
28.0967	-12.6694	25.4	4.3	6	
28.7233	-16.2583	27.3	6.5	7	
28.6594	-14.6479	27.1	5.4	8	
28.2324	-17.5012	25.8	7.5	9	

¹ The larger is better

شرایط گازهای داغ نمی توانند به طور عمیق در فوم با تراکم بالا نفوذ کنند، درنتيجه منطقه متاثر از حرارت در جلوى مذاب كاهش مىيابد و شتاب جریان مذاب کاسته می شود که منجر به کاهش درجه حرارت فلز مذاب و انجماد سريع آن مي شود و در نتيجه محصولات فوم درون مذاب به دام میافتند و تخلخل بیشتری را در نمونهها بوجود میآورند. همچنین علت افزایش درصد تخلخل در چگالی فوم 16kg/m³ را اینچنین میتوان بیان نمود که در این چگالی فوم با توجه به اینکه تراکم دانهها کم است در نتیجه شتاب جریان مذاب به علت کوچکتر شدن لایه پیوسته از محصولات تجزیه فوم و نفوذ بیشتر گازهای داغ به داخل ساختار مدل فومی، تبخیر فوم با سرعت بیشتر صورت می گیرد و گاز حاصل از این فرآیند در مدت زمان کمتری تولید می شود که در این بازه زمانی فرصت خروج از طریق پوشش و ماسه را پیدا نمی کند و در نتیجه مقداری از گاز حاصل در نمونه به دام میافتد و موجب افرایش درصد تخلخل در نمونه می شود. اما در چگالی فوم 20kg/m³ مشاهده می شود که کمترین مقدار درصد تخلخل وجود دارد زیرا سرعت پیشروی فلز مذاب و زمان تجزیه حرارتی مدل فومی با سرعت خروج گاز حاصل از تجزیه به حالت متناسب خود رسیده است و گاز توانسته است از طریق منافذ پوشان و ماسه در مدت زمانی که مدل فومی تجزیه می گردد، خارج شود که کومار نیز بیان نموده بود با افزایش 64 درصدی چگالی فوم، زمان پركنندگى فلز مذاب 2 برابر افزايش مىيابد [15] . همچنين بررسى نحوه تجزیه فوم که توسط گریفیتث و همکاران در سال2016 با استفاده از قالب شیشهای صورت گرفته است نشان داده که با افزایش چگالی فوم فاصله بین جبهه مذاب و فوم بیشتر می شود که در نتیجه باعث انجماد سریعتر مذاب گردیده است [16].

مطابق شكل 5 مشاهده مى شود كه بالاترين مقدار نسبت سيگنال به نويز برای دمای C °680 میباشد. با افزایش دمای ذوبریزی از C °680 تا 800° C سیالیت فلز مذاب افزایش می یابد و همچنین مقدار حرارت بیشتری به جهت تجزیه مدل فومی بدست می آورد که خود این موارد موجب می شوند تا سرعت پیشروی فلز مذاب بیشتر شود و گازهای داغ حاصل از تجزیه فوم بتوانند به صورت عمیق تر از لایه پیوسته بین فلز مذاب و مدل فومی عبور کرده و فوم را با سرعت و شتاب بیشتری تجزیه و تبخیر نمایند که در نتیجه نسبت حجم گاز تولید شده در طی ذوبریزی به زمان پرشدن مدل فومی با افزایش دما کاهش مییابد یعنی گاز تولید شده فرصت زمانی کمتری جهت خروج از طریق منافذ پوشان و ماسه دارد اما با توجه به ثابت بودن منافذ پوشان و ماسه این گاز نمی تواند به صورت کامل خارج گردد و در نمونه ها به صورت تخلخل محبوس می شود که وارنر نیز لازم بودن سرعت پیشروی پایین مذاب به منظور دستیابی به نمونههای بدون عیب را بیان نموده است [17]. اما در دمایC 740° این اختلاف به مقدار کمی با دمای ذوبریزی مشاهده شده است که علت این امر نفوذپذیری مناسب پوشان $680^\circ~{
m C}$ مے باشد.

در شکل 5 قسمت مربوط به ویسکوزیته پوشان و براساس نمودار نسبت سیگنال به نویز بهترین حالت برای ویسکوزیته پوشان، مقدار 20sec نشان داده شده است زیرا در این مقدار نفوذپذیری پوشان به صورت متناسب با نرخ گاز تولید شده در اثر تجزیه فوم و سرعت خروج گاز از طریق منافذ پوشان می باشد و در مقادیر کمتر و بیشتر آن به ترتیب نفوذپذیری زیاد و کم پوشان را داریم که خود عوامل ایجاد عیوب و افزایش درصد تخلخل در نمونههای تولید شده، می باشند. در ویسکوزیته پوشان 20sec به سبب اینکه پوشان رقیق تر بوده است و در زمان ثابتی مدل فومی به روش غوطهوری در آن

پوششدهی شده است لذا لایه پوشان ایجاد شده بر روی مدل فومی دارای خلل و فرج بیشتری نسبت به پوشانهای با ویسکوزیته بالاتر است که همین امر موجب شده تا گازهای تولید شده در قالب فومی با سرعت بیشتری از قالب خارج شده که افت فشار در فضای بین فلز مذاب و پلیمر در حال ذوب ایجاد میشود و پوشان تحمل وزن ماسه را نداشته و ماسه به درون محفظهی قالب وارد میشود همچنین در این حالت لایه پیوسته حاصل از محصولات تجزیه فوم که بین فلز مذاب و مدل فومی قرار داشت بسیار باریک شده و گازهای داغ میتوانند به صورت عمیق تر وارد مدل فومی شده و آنرا تجزیه نمایند که در نتیجه سرعت پیشروی فلز مذاب افزایش یافته و حالت اغتشاش مذاب درون قالب بیشتر میشود و گازهای تولید شده درون مذاب به دام میافتند که چن نیز نفوذپذیری پوشان را عاملی تعیین کننده در خروج گاز از میانات باین نموده بود [18]. در ویسکوزیته پوشان ع552 خلل و فرج در پوشان کاهش مییابد که این امر موجب نفوذپذیری پایین پوشان میگردد.



Fig. 5 S/N parameters effect on the porosity شکل 5 نمودار نسبت سیگنال به نویز برای درصد تخلخل

کند، بالا میرود. به علت افزایش فشار در پشت پوشان و اعمال نیرو به پوشان، برآمدگیهایی بر سطح قطعه ایجاد میشود. مشکل بعدی از حرکت ناپایدار مذاب ناشی میشود، زیرا گازها به طور غیر پیوسته و شدید از میان فلز مذاب و پوشان خارج میگردند و با هر بارخروج گاز، فشار کاهش پیداکرده، جبهه مذاب پیشرفته و به دیوارهی قالب همچون پتک ضربه وارد میکند که نتیجهی این ضربهها ایجاد انبساط در قطعه و یا فرو ریختن ماسه فشرده به داخل حفرههای مدل و همچنین عدم خروج کامل گاز تولید شده در اثر تجزیه حرارتی فوم است که موجب افزایش درصد تخلخل میشوند.

شکل6 که با بزرگنمایی 200 میکرومتر از نمونه فوم مورد استفاده شده به عنوان مدل فومی پس از برش از وسط مدل فومی گرفته شده است، منافذ موجود در بین دانهبندی فوم با چگالیهای متفاوت را نشان میدهد که به ترتیب (a,b,c) برای چگالی فومهای 16,20,24kg/m³ میباشند که نشان میدهند با کاهش چگالی فوم منافذ موجود در بین دانههای آن بیشتر و بزرگتر میشود که خود عاملی است برای نفوذ گازهای داغ به داخل فوم و تخریب فوم که در نتیجه افزایش سرعت پیشروی مذاب را در پی خواهد داشت و باعث میشود تا تخلخل در نمونهها افزایش یابد.

قطعات ریخته گری شده در شکل7 نشان داده شده است که شماره هر شکل مطابق با شماره آزمایش آن در جدول4 است و همانگونه که مشخص است با افزایش دما و چگالی فوم مقدارگاز تولید شده درون قالب و محصولات حاصل از تجزیه فوم به شدت افزایش مییابد و با توجه به نفوذپذیری پوشان مقداری از این گاز از طریق منافذ پوشان خارج می گردد و مقدار باقیمانده همچون سدی جلوی پیشروی حرکت مذاب را گرفته و مانع از پرشدن کامل آن می شوند و موجب افزایش عیوب ریخته گری و تخلخل می گردند.

با توجه به نمودارهای *S*/N خروجی از نرم افزار و نتایج حاصل از قطعات ریخته گری شده شرایط بهینه جهت انجام ریخته گری با کمینه درصد تخلخل برابر %2.6 است که نسبت سیگنال به نویز آزمایش مربوطه 2925-8-می باشد، با اعمال همین شرایط در نرم افزار عدد حاصل از پیش بینی *S*/N نرم افزار 8.2079- می باشد و درصدتخلخل پیش بینی شده نیز %2.8889 است که بسیار به نتیجه عملی به دست آمده نزدیک می باشد و تطابق مناسبی با نتایج عملی آزمایش دارد.

یکی دیگر از مزایای روش سیگنال به نویز، تعیین میزان تاثیرگذاری هر پارامتر در خروجی مورد نظر میباشد. بدین منظور میتوان از نتایج تحلیل واریانس دادههای درصدتخلخل استفاده نمود. در جدول5 نتایج حاصل از تحلیل واریانس و در نتیجه اثرگذاری متغیرهای مورد بررسی بر روی درصد تخلخل نشان داده شده است که نشان میدهد چگالی فوم با داشتن بیشترین ضریب تاثیر همانند آنچه در شکل 5 و نمودار نسبت سیگنال به نویز مشخص است بر روی درصد تخلخل اثرگذارتر از سایر پارامترها میباشد. مقدار تاثیرگذاری چگالی فوم برابر با 64.58 است که نسبت به سایر متغیرها از



شکل 6 منافذ بین دانههای فوم



(9)

Fig.7 View of casting parts

شکل 7 نمای قطعات ریختهگری شده

جدول 5 تحلیل ANOVA متغیرهای مورد بررسی بر روی درصدتخلخل Table 5 ANOVA for investigating parameters on the porosity

		2 21		1 7
ضريب تاثير (%)	عدد فیشر (F)	مجموع میانگین مربعات(MS)	درجه آزادی (<i>f</i>)	پارامتر
64.58	5.49	8.17	2	چگالی فوم
29.09	1.23	3.68	2	دمای ذوبریزی
6.16	0.20	0.78	2	ويسكوزيته پوشان
0.16	-	0.02	2	خطا

اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است و کومار نیز افزایش زمان پرشدن قالب را با افزایش چگالی فوم بیان نموده بود [15].

2-4- اثرپارامترهای فرآیند برروی سختی

سختی حاکی از مقاومت در برابر فرو روی نوک ابزار فرورونده به داخل قطعه بوده و این خاصیت در فلزات معیاری از مقاومت آنها در برابر تغییر شکل مومسان یا دائم است. مقدار سختی نمونه ها وابستگی شدیدی به نرخ و نحوه انجماد فلز مذاب دارد و هرچه انجماد سريعتر اتفاق افتد به علت اينكه ساختار نمونهها ریزتر میشود سختی در آنها نیز افزایش مییابد. نمودار سیگنال به نویز برای سه متغیر درنظر گرفته شده در شکل8 نشان داده شده

است. مطابق شکل با افزایش چگالی فوم مقدار سختی افزایش می یابد اما با افزایش دمای ذوبریزی و ویسکوزیته پوشان این مقدار کاهش مییابد.

با افزایش چگالی فوم فشار برگشتی پیوسته که بوسیله مدل فومی و محصولات تجزیه پلیمری در خلال پر کردن قالب اعمال می شود، به صورت یک مقاومت در برابر جریان فلز مذاب عمل می کند. در مقایسه با روش های ریخته گری ماسهای که در آن فلزمذاب داخل یک حفره خالی ریخته می شود، فلز مذاب به قالب وارد شده و مدل فومی را با یک شتاب بسیار پایین تر تجزیه می کند و در نتیجه وجه مشترک مذاب و مدل فومی، نسبتاً یکنواخت و هم شکل است. بنابراین شتاب جریان فلز با نرخ تجزیه فوم در جلوی مذاب تعیین می شود نه دینامیک جریان مذاب در پشت جبهه مذاب به این معنی که، فلز مذاب به حجم قالب که در اصل توسط مدل فومی اشغال شده، با همان سرعتي كه فوم تجربه مي شود و محصولات تجزيه آن از طريق پوشان و ماسه خارج میشوند، حرکت میکند. با کاهش سرعت حرکت مذاب در فومهای با چگالی بالاتر به علت این امر که تراکم دانههای پلی استایرن بیشتر است و در نتیجه برای تجزیه حرارتی آن نیاز به تبادل حرارتی بیشتر با فلز مذاب است لذا فلز مذاب حرارت خود را سريعتر از دست مىدهد و منجمد می شود که خود عاملی بر ریزدانه تر شدن و نهایتاً افزایش سختی در نمونهها می گردد که کومار نیز نقش افزایش زمان پرشدن قالب با چگالی فوم را بیان نموده بود [15]. در شکل9 تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی 50 میکرومتر از دانهبندی قطعات ریخته گری شده نشان داده شده است که شماره هر شکل مطابق با شماره آزمایشات در جدول4 می باشد. با توجه به شکل ریزدانهترین حالت برای آزمایش شماره4 و درشت دانهترین حالت برای آزمایش شماره 3 است.

درجه حرارت مذاب، شتاب جریان مذاب را کنترل میکند و اینکه این شتاب مذاب به طور چشمگیری در LFC نسبت به ریخته گری ماسهای پایین تر است. ریختن فلز مذاب با درجه حرارت بالاتر، شتاب جریان مذاب را افزایش خواهد داد و زمان پرکنندگی قالب را کاهش خواهد داد. زمانیکه قالب سریعتر پر شود نرخ تبادل گرمای کمتری با پوشان و ماسه اطراف آن دارد و لذا دیرتر منجمد می گردد که موجب درشتتر شدن دانهها و در نتیجه کاهش سختی می شود و این امر به خوبی در شکل8 که نشان دهنده نمودار نسبت سیگنال به نویز برای متغیرهای فرآیند بر روی سختی است و شکل9 که تصاویر متالوگرافی نمونههای ریخته گری شده را نشان میدهد، قابل مشاهده مے باشد.

مطابق شکل8 در قسمت مربوط به ویسکوزیته پوشان مشاهده می گردد که با افزایش ویسکوزیته پوشان مقدار سختی کاهش مییابد زیرا با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشان افزایش می یابد و این افزایش ضخامت همچون عایقی در برابر انتقال حرارت بین فلز مذاب با ماسه و محیط اطراف و خروج محصولات ناشى از تجزيه فوم عمل مىنمايد كه موجب مى گردد تا فلز مذاب با نرخ انجماد آهسته تری سرد شود و در نتیجه با توجه به شکل9درشت دانهتر شده و سختی در نمونهها کاهش یابد و همچنین مقدار گازهای به دام افتاده در مذاب افزایش یابد.

با تحلیل نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس برای مقادیر بدست آمده سختی از نمونههای ریخته گری شده، مقادیر پیشبینی شده تاگوچی در بهترین حالت ریخته گری ها برای نسبت سیگنال به نویز برابر 29.0217 و مقدار سختی 28.133 بدست آمد که با مقادیر عملی آن که برای نسبت سیگنال به نویز 28.8496 و برای سختی مقدار 27.7 میباشد، اختلاف کمی دارد. جدول6 نتایج حاصل از تحلیل واریانس و اثربخشی هریک از متغیرها را

28.6 28.5 28.4 28.3 ≥ 28.2 28.1 28.0



Fig. 9 Pictures metallographic samples casting شکل 9 تصاویر متالوگرافی از نمونه های ریخته گری

به نویز بسیار کارآمد بوده است.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای تاثیرگذار فرآیند ریختهگری مدل فومی فداشونده به صورت آزمایشگاهی با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تحلیل واریانس به منظور بدست آوردن مقادیر بهینه هریک از پارامترها و بررسی درصد تاثیر هریک بر روی درصد تخلخل و سختی نمونههای ریختهگری شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر میباشد:

1- با افزایش دمای ذوب ریزی، حجم گاز بیشتری در حین پرشدن قالب و در زمان کوتاهتر تولید می شود که به علت عدم خروج این گازها از طریق منافذ پوشان درصد تخلخل افزایش می یابد اما مقدار سختی کاهش می یابد زیرا با بالا رفتن دمای ذوب ریزی قالب سریعتر پر



Fig. 8 S/N parameters effect on the Hardness شکل 8 نمودار نسبت سیگنال به نویز برای سختی

بر روی سختی نشان میدهد. مطابق با نتایج نمودار نسبت سیگنال به نویز در شکل8 و همچنین نتایج جدول6 مشخص است که دمای ذوب ریزی بیشترین تاثیر را بر روی سختی نمونهها دارد و مقدار این اثرگذاری برابر با %56.35 می باشد. در شکل9 که اندازه دانه نمونههای ریخته گری شده را نشان میدهد می توان دریافت که با افزایش دما اندازه دانهها بیشتر تحت تاثیر قرار می گیرند که برای درک بهتر این اثرگذاری تحلیل واریانس و نسبت سیگنال

جدول 6 تحلیل ANOVA متغیرهای مورد بررسی بر روی سختی

Table 0 ANOVA for investigating parameters on the Hardness					
ضریب تاثیر (%)	عدد فیشر (F)	مجموع میانگین مربعات(MS)	درجه آزادی (<i>f</i>)	پارامتر	
29.99	1.29	3.49	2	چگالی فوم	
56.35	3.94	6.56	2	دمای ذوبریزی	
8.85	0.29	1.03	2	ويسكوزيته پوشان	
4.8	-	0.56	2	خطا	

and characterization of A356 composite reinforced with SiC nanoand microparticles by stir casting method. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 335-342,2016. (in Persian فارسى)

- [4] H. F. Shroyer, Cavity less Casting, US Patent No. 2830343,1985.
- [5] T.R.Smith, Use of clean, unbounded sand in foam casting, US Patent No. 3157924, 1964.
- [6] S. Tabibian, E. Charkaluk, A. Constantinescu, G. Guillemot, F. Szmytka, Influence of process-induced microstructure on hardness of two Al–Si alloys, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 646, pp. 190–200, 2015.
- [7] B. Xiao, Z. Fan, W. G. Jiang, X. Liu, W. Long, Q. Hu, Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 21, No.11, pp. 1049-1054, 2014.
- [8] T. N. Chakherlou, Y. V. Mahdinia, A. Akbari, Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 162–169, 2011.
- [9] X. BoGtao, F. ZiGtian, J. WenGming, L. XinGwang, HU. Qiang, Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel research*, Vol. 21, No. 11, pp. 1049-1054, 2014.
- [10] L. Wang, N. Limodin, A. Bartali, J. F. Witz, J. Y. Buffiere, E. Charkaluk, Influence of pores on crack initiation in monotonic tensile and cyclic loadings in lost foam casting A319 alloy by using 3D in-situ analysis, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 673, pp. 362–372, 2016.
- Materials Science & Engineering A, Vol. 673, pp. 362–372, 2016.
 W. Zou, Z. Zhang, H. Yang, W. Li, Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting, *China Foundry*, Vol. 13, No. 4, pp. 248–255, 2016.
- [12] M. Khodai, N. Varham, The effects of foam density and thickness of the coating on the flow patterns and some foam molding parameters, *New* processes in Materials Engineering (Majlesi Materials Engineering), Vol. 4, No. 1, pp. 33-40, 2010. (in Persian فارسي)
- [13] M. Khodai, N. Parvin, Pressure measurement and some observation in lost foam casting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, No.3, pp. 1–6, 2008.
- [14] T. N. Chakherlou, Y. V. Mahdinia, A. Akbari, Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 162–169, 2011.
- [15] S. Kumar, P. Kumar, H. Shan, Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. pp. 615-623, 2007.
- [16] W. D. GRiffiths, M. J. ainsworth, Instability of the liquid metal-pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 47, No. 6, pp. 3137–3149, 2016.
- [17] H. Warner, B. Miller, H. Littleton, Pattern pyrolysis defect reduction in lost foam castings, *AFS Transactions*, Vol. 106, pp. 103-109, 1998.
- [18] Y. F. Chen, R. C. Chen, W. S. Hwang, Mold-filling study in the epc processmathematical model and flow characteristics, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 105, pp. 459-464, 1997.

می شود و در نتیجه فلز مذاب با نرخ آرامتری سرد می شود که موجب بزرگتر شدن ساختار و دانه ها و نهایتاً کاهش سختی می گردد که این نتایج بر خلاف مکانیزم اثر گذاری مربوط به چگالی فوم بر روی سختی نمونه ها است همچنین دمای ذوب ریزی بیشترین مقدار ضریب تاثیر بر روی سختی که معادل %56.35 است، می باشد.

- 2- جهت دستیابی به تولید قطعه با کمترین میزان تخلخل چگالی فوم و ویسکوزیته پوشان به ترتیب باید دارای مقادیر 20kg/m³ و برای ویسکوزیته پوشان مقدار 20sec باشند که چگالی فوم با داشتن بیشترین ضریب تاثیر به مقدار 64.58% بر روی درصد تخلخل در فرآیند، مهمترین و اثرگذارترین پارامتر بر روی این عیب می باشد.
- 3- با افزایش چگالی فوم حرارت بیشتری از فلز مذاب صرف تجزیه حرارتی و ذوب این مدل شده و درنتیجه سرد شدن سریعتر فلز مذاب را به همراه دارد که نهایتاً مقدار سختی افزایش می یابد.
- 4- با افزایش ویسکوزیته پوشان مقدار خلل و فرج موجود در آن کاهش می یابد و در نتیجه گازها و محصولات حاصل از تجزیه فوم نمی توانند به خوبی از آن خارج شوند همچنین پوشان مانند عایقی مانع از تبادل حرارتی مناسب فلز مذاب با ماسه و محیط می شود و در نتیجه مذاب با نرخ سرد شدن آهسته تر سرد می شود و نهایتا موجب کاهش سختی می گردد.

6- مراجع

- [1] S. L. Pramod, Ravikirana, A. K. Prasada Rao, B. S. Murty, R. Bakshi, Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 647, pp. 438-450, 2016.
- [2] W. Jiang, Z. Fan, D. Liu, D. Liao, X. Dong, X. Zong, Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 560, pp. 396-403, 2013.
- [3] K. Amouri, J. Amouri, S. Ahmadifard, M. Kazazi, S. Kazemi, Preparation