



بررسی تجربی و شبیه سازی المان محدود خواص قطعات آلومینیومی تولیدی در فرایند ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده در صنایع هوافضا

امیر علی شاهی¹، محمد کاظمی نصرآبادی^{2*}

1- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه خواجه نصیر، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

* نهران، صندوق پستی 1384673411، kazemi@ssau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

ریخته‌گری فوم از دست رنده با قابلیت ساخت قطعات با اشکال پیچیده و بدون نیاز به فرایندهای ثانویه‌ای مانند ماشین‌کاری، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فوم استفاده شده در ریخته‌گری فوم از دست رنده می‌تواند تأثیر مستقیمی بر معایب ظاهر شده در داخل قطعه و کیفیت محصول تولید شده داشته باشد. برای پیش‌بینی این معایب و بررسی فوم مطلوب برای ریخته‌گری آلومینیوم، در این تحقیق، فرایند ریخته‌گری فوم از دست رنده برای سه فوم پلیمری پلی استایرن، آکریلونیتریل بوتادین استایرن و پلی لاکتیک اسید با بهره‌گیری از نرم‌افزار پروکست شبیه‌سازی شد و فرایند واقعی ریخته‌گری نیز برای این سه الگوی فومی انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمایشات خواص مکانیکی و آنالیز معایب قطعات تولیدی در فرایند شبیه‌سازی و ریخته‌گری تجربی مشخص نمود که فوم پلی لاکتیک اسید می‌تواند به عنوان یک فوم مطلوب در ریخته‌گری فوم از دست رنده آلومینیوم با کمترین معایب و بهترین خواص مکانیکی نسبت به دو فوم دیگر استفاده شود.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 1 شهریور 1397
پذیرش: 28 دی 1397
ارائه در سایت: خرداد 1398

کلیدواژگان:

ریخته‌گری فوم از دست رنده
شبیه‌ساز پروکست
فوم پلی لاکتیک اسید

Study on the experimental and finite element simulation of aluminum Compounds manufactured in lost foam casting process in the Aerospace Industry

Amir Alishahi¹, Mohammad Kazemi Nasrabadi^{2*}

1- Material Engineering, Khaje Nasir University, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran

* P.O.B. 1384673411 Tehran, Iran, kazemi@ssau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 23 August 2018
Accepted 18 January 2019
Available Online June 2019

Keywords:

Lost Foam Casting
Procast simulator
poly lactic acid

Abstract

Lost Foam Casting (LFC) with the ability to fabricate parts with complex shapes and without the need for secondary processes such as machining, has been very much considered. The foam used in LFC can have a direct influence on the defects that appear inside the piece and the quality of the product produced. In order to predict these defects and to study on proper foams for casting aluminum in this research, the process of foam casting for the three polystyrene foam polystyrene and acrylonitrile butadiene styrene and poly lactic acid was simulated using Procast casting simulator software and the real casting process was performed for these three foam patterns. The Results obtained from mechanical properties tests and analysis of disadvantages of manufactured components in the simulation and experimental casting process indicate that the poly lactic acid foam can be used as a suitable foam for casting aluminum in LFC method with the least defects and the best mechanical properties than 2 more foams.

1- مقدمه

ریخته‌گری مناسب تعیین می‌گردد. فرایند ریخته‌گری شامل ذوب فلز پایه، اضافه نمودن عناصر آلیاژی مناسب با دقت و اندازه کنترل شده به فلز مذاب و انجام فرایند انجماد به منظور آماده‌سازی برای سایر فرایندهای شکل‌دهی و ماشین‌کاری با هدف ساخت یک قطعه در صنعت هوا و فضا می‌باشد. از طرفی فرایندهای ریخته‌گری بسیار متنوع شده و گسترش یافته‌اند و با توجه به حساسیت کار در ساخت قطعات صنایع هوایی، انتخاب

تاکنون تلاش‌های زیادی در ساخت اجزا و تجهیزات موتور صنایع هوافضا صورت گرفته که در تمام آن‌ها از فلزات استفاده شده است. اولین گام برای ساخت این قطعات فلزی با ریخته‌گری آغاز می‌گردد. خواص مکانیکی مطلوب، مقاومت در برابر خوردگی و خیلی از خواص دیگری که در انتخاب و به کارگیری فلزات در صنایع هوایی مهم است، با انتخاب روش

Please cite this article using:

A. Alishahi, M. Kazemi Nasrabadi, Study on the experimental and finite element simulation of aluminum Compounds manufactured in lost foam casting process in the Aerospace Industry, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 47-55, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با توسعه تکنولوژی علم کامپیوتر در زمینه‌های مختلف امکان حل و پیش‌بینی بسیاری از مسائل و مشکلات در حین تولید قطعات به روش ریخته‌گری فراهم آمده است. این پیشرفت‌ها موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه شده و امکان انتخاب روش بهینه تولید قطعات ریخته‌گری را فراهم آورده است. شبیه‌ساز پروکست با حل معادلات بر پایه روش امان محدود³ قادر خواهد بود، هندسه‌های بسیار پیچیده را حل کرده و این امکان را به کاربر می‌دهد تا مدل‌سازی انتقال حرارت گرمایی (جریان گرما)، پر شدن قالب و ... را انجام دهد. در کنار آن، این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی ریز ساختار عملیات حرارتی، مدل‌سازی ساختار دانه‌ای و مدل‌سازی تخلخل را نیز دارا می‌باشد. مدل‌های خاص، شامل محاسبه برای مدل‌سازی نیمه جامد و ریخته‌گری فوم از دست رونده از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌باشد [9].

در این پژوهش، فرایند ریخته‌گری با فوم از دست رونده برای یک قطعه هواپیمایی با استفاده از 3 فوم پلیمری پلی استایرن⁴، آکریلونیتریل بوتادین استایرن⁵ و پلی لاکتیک اسید⁶، به وسیله‌ی نرم‌افزار شبیه‌ساز ریخته‌گری پروکست انجام گرفته و پس از آن نتایج حاصل شده با نتایج تجربی بدست آمده از ریخته‌گری عملی این 3 فوم، شامل فرایند انجماد، میزان حفره‌ها و تخلخل‌ها و خواص مکانیکی مورد مقایسه قرار گرفته است.

روش مناسب ریخته‌گری بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [1].

از مشکلات روش‌های ریخته‌گری متداول در ساخت قطعات پیچیده نیاز به ریخته‌گری چند تکه، استفاده از تغذیه و ماهیچه و همچنین فرایندهای ثانویه‌ای مانند ماشین‌کاری، تراش‌کاری و ... می‌باشد، که تمام این‌ها باعث کاهش کیفیت قطعه و افزایش هزینه و زمان تولید می‌گردد [2].

حال، یکی از روش‌های ریخته‌گری که برای حل این مشکلات پیشنهاد شده است، ریخته‌گری با فوم از دست رونده¹ می‌باشد [3].

ریخته‌گری با فوم از دست رونده با قابلیت ساخت قطعات با ساختار پیچیده مدتی است مورد توجه قرار گرفته است. این نوع ریخته‌گری از الگوهای فومی پلیمری برای ساخت اجزای فلزی استفاده می‌کند. فوم‌های پلیمری در شکل‌های مورد نظر، توسط مواد نسوزی پوشش داده می‌شوند [4]، سپس خشک شده و در مرحله بعد در شن و ماسه بدون سرباره جاساز می‌شوند. مذاب فلز مستقیماً بر پلیمر پوشش داده شده، ریخته می‌شود و پلیمر تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد و به تدریج توسط فلز مذاب جایگزین گشته تا ذوب‌ریزی و پس از آن انجماد صورت گیرد. فلز ریخته‌گری شده باید دارای سیالیت مناسب بوده تا امکان سوزاندن کامل فوم و جایگزینی آن را داشته باشد [5].

ریخته‌گری با فوم از دست رونده در ساخت قطعات با دیواره نازک، هندسه پیچیده، سطح صاف به کار می‌رود [6]. ریخته‌گری آلیاژ آلومینیوم به طور موفقیت‌آمیزی در ریخته‌گری با فوم از دست رونده انجام شده است. این در حالی است که لیو² و همکارانش به این نکته در ریخته‌گری آلومینیوم به روش فوم از دست رونده رسیدند که انتخاب پارامترهای مناسب ریخته‌گری تأثیر بسیار مهمی در تولید قطعات فلزی در این روش دارد [5]. فلز آلومینیوم با توجه به نسبت بالای قدرت به وزن، قابلیت ماشین‌کاری مناسب، مقاومت در برابر خوردگی، پوشش سطح بهینه و هدایت الکتریکی و حرارتی به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌گردد [7]. فلز مذاب که به فوم می‌رسد، آن را به گاز و مایع تجزیه می‌کند. گاز به وسیله‌ی فرار از حوزه‌ها با نفوذ در پوشش از بین می‌رود. پس از آن، پوشش می‌تواند آنچه را که از مایع پلیمر به جا مانده است را جذب نماید. این گاز و مایع تولید شده در جبهه‌ی انجماد به حرکت در می‌آید که به صورت شماتیک در شکل 1 نمایش داده شده است [8]. امروزه

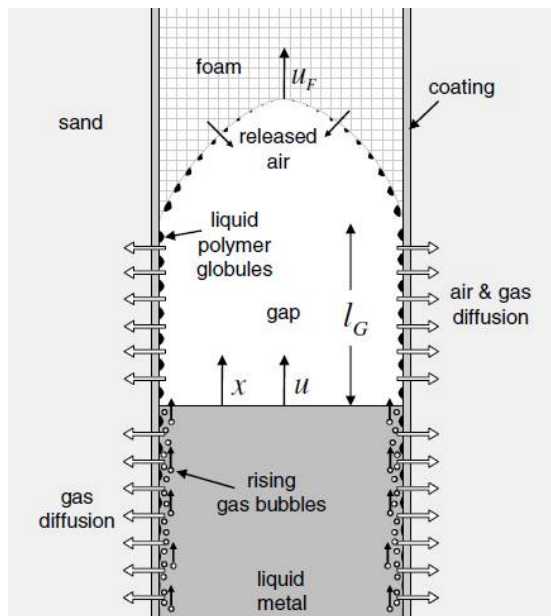


Fig. 1 Schematic illustration of foam decomposition in LFC [8].

شکل 1 طرح شبیه سازی تجزیه فوم در ریخته‌گری فوم از دست رونده [8].

³ Finite Element Method

⁴ EPS

⁵ ABS

⁶ PLA

¹ Lost Foam Casting

² Liu

2- ریخته گری تجربی

1-1- مواد استفاده شده

در این پژوهش از سه فوم به عنوان الگوهای پلیمری استفاده شده، که خواص آنها در جدول 1 نمایش داده شده است. از طرفی از آلیاژ AlSi7Mg برای ذوب ریزی استفاده شده است که ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 قابل مشاهده است.

2-2- مدل هندسی

ابتدا قطعه مورد نظر که از جمله قطعات مورد استفاده در صنعت هوافضا است با یکی از نرم افزارهای طراحی سه بعدی به کمک رایانه مانند کتیا طراحی می شود و بعد از تمام شدن طراحی قطعه، در نقطه ای مناسب روی طرح یک مخروط ناقص طراحی می شود که این مخروط نقش راهگانه را دارد و جریان مذاب از این راهگانه وارد قالب می شود. به منظور جلوگیری از تلاطم جریان مذاب به درون قالب در زمان ساخت قطعه، قاعده کوچک مخروط به قطعه متصل می شود. مدل های هندسی با نرم افزار طراحی سه بعدی متشکل از قطعه اصلی و راهگانه در شکل 2 شده است.

جدول 1 خواص فوم های استفاده شده به عنوان الگو

فوم	چگالی (gr/cm ³)	دمای ذوب (°C)
EPS	0/2	200
ABS	1/02	105
PLA	1/22	160

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AlSi7Mg بر حسب درصد وزنی [10]

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Mg	Si
باقیمانده	0/2	0/4	0/6	0/2	0/2 - 0/7	6/5 - 7/5

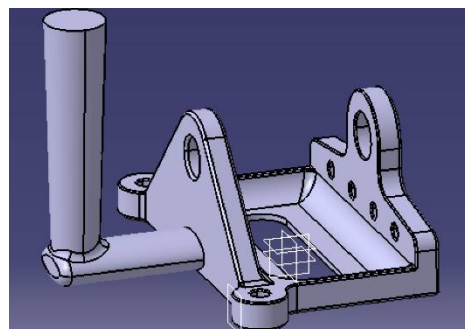


Fig. 2 Geometric model designed with cad software

شکل 2 مدل هندسی طراحی شده با نرم افزار CAD

پس از اینکه الگوها با نرم افزار طراحی سه بعدی کشیده شد، سه نمونه فوم پلیمری با جنس های پلی استیرن (a)، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (b) و پلی لاکتیک اسید (c) انتخاب و با استفاده از پرینتر سه بعدی مدل های فومی تولید شد. این مدل های فومی با مواد نسوز پایه آبی تهیه شده از شرکت فارس ریزان مواد، پوشش داده شدند (شکل 3). این پوشش به منظور افزایش استحکام الگو در حین ذوب ریزی و با هدف عدم فروپاشی ماسه در داخل فوم در حین ذوب فوم همچنین قابلیت جذب گازها و مایع تولید شده در اثر تجزیه فوم اعمال گشته است [11].

وجود این گازها و مایعات یکی از مشکلات روش فوم از دست رفته می باشد [12]. گریفیس¹ و دیویس² اثبات نمودند که افزایش ضخامت پوشش اعمالی بر الگوها بر کیفیت ریخته گری تأثیرگذار است [13].

2-3- قالب گیری، ذوب آلیاژ و بار ریزی

پس از پوشش دهی، الگوهای فومی در داخل درجه های فولادی قرار داده شده و ماسه سیلیسی بدون چسب به درون درجه ها ریخته شد و در چند مرحله با استفاده از کوبه دستی، کوبیده شد تا دانسیته مورد نظر برای ماسه کوبیده شده حاصل گردد (شکل 4).

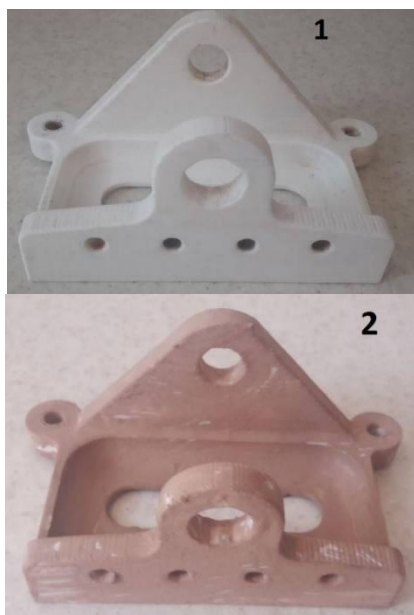


Fig. 3 (1) Foam before refractory coating, (2) foam after refractory coating

شکل 3 (1) فوم قبل از پوشش نسوز، (2) فوم پس از پوشش نسوز

¹ Griffiths

² Davies

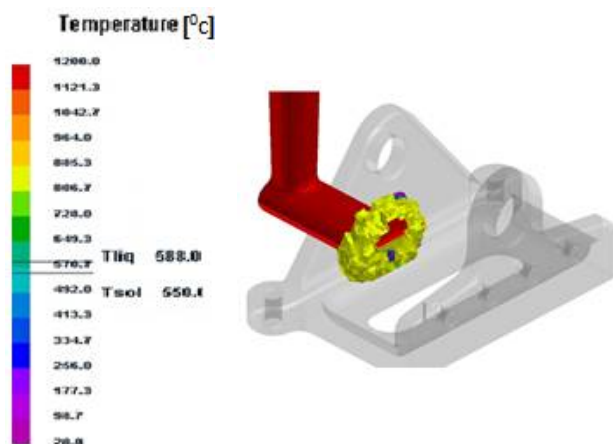


Fig. 6 Solidification front at the moment of dealing with foam
 شکل 6 نمایش جبهه انجماد در لحظه برخورد با فوم

3- شبیه سازی ریخته گری

در حال حاضر، با پیشرفت فناوری و علم رایانه در صنایع مختلف، امکان حل و پیش بینی بسیاری از مسائل و مشکلات در حین تولید قطعات به روش ریخته گری، فراهم آمده است. این پیشرفت ها موجب صرفه جویی در وقت و هزینه شده و امکان انتخاب روش بهینه تولید قطعات ریخته گری را فراهم می آورد.

شبیه ساز پروکست با حل معادلات بر پایه روش المان محدود قادر خواهد بود، هندسه های بسیار پیچیده را حل کرده و این امکان را به کاربر می دهد تا مدل سازی انتقال حرارت گرمایی (جریان گرما)، پر شدن قالب و ... را انجام دهد. در کنار آن، این نرم افزار قابلیت مدل سازی ریز ساختار عملیات حرارتی، مدل سازی ساختار دانه ای و مدل سازی تخلخل را نیز دارا می باشد. مدل های خاص، شامل محاسبه برای مدل سازی نیمه جامد و ریخته گری فوم از دست رفته از دیگر قابلیت های این نرم افزار می باشد [9].

ساده ترین روشی که نرم افزار بکار می برد تشخیص مناطقی است که مذاب توسط جامد احاطه می شود. نرم افزار پروکست اولین نرم افزار تجاری است که برای مدل کردن تخلخل های گازی و انقباضی از روشی با پایه فیزیکی استفاده می کند. این تحلیل کاملاً با تخمین ماکروتخلخل و کشیدگی های انقباضی کوپل است. محاسبات جریان سیال در منطقه خمیری و افت فشار همراه آن براساس معادله دارکی می باشد. افزون بر این، جوانه زنی تخلخل ها و جدایش گاز که به علت کاهش حلالیت آن صورت می گیرد، در مدل در نظر گرفته شده است.

در ریخته گری با مدل فومی، با انجام بارریزی، مدل فومی شروع به گدازش کرده و از منافذ موجود در قالب خارج می شود. اندازه و کسر حجمی این منافذ و جنس مدل فومی بر روی



Fig. 4 Foam pattern at the mold box

شکل 4 الگوی فومی در داخل درجه

الگوها پس از آماده سازی در ماسه سیلیس تعبیه شده و به مدت 30 دقیقه در دمای 100 درجه سانتی گراد پیش گرم شدند، پس از آماده شدن قالب ها، آلیاژ آلومینیوم AISi7Mg که در کوره ی بوتله ای ذوب شده بود، به درون قالب ریخته شد (شکل 5).

قطعات حاصل تحت آزمایش های سختی سنجی و ضربه قرار گرفتند تا خواص مکانیکی آن ها با هم مقایسه گردد. رفتار جریان مایع فلزی در طی فرایند ریخته گری فوم از دست رفته پیچیده است و شامل دو مرحله می باشد [14]: 1- جریان کانال، 2- جریان در حضور فوم قبل از برخورد فلز مذاب با فوم، دما و حرکت جریان مذاب به صورت معمول می باشد و در برخورد با فوم دمای جبهه مذاب و سرعت جریان مذاب به شدت کاهش می یابد (شکل 6).

4-2- شرایط مرزی و ابتدایی

با توجه به روند خنک سازی واقعی، شرایط خنک سازی در هوای معمولی و دمای اتاق در نظر گرفته شده است [15]، از طرفی با فرض انجام فرایند پیش گرم دمای فوم و قالب ماسه ای 50 درجه سانتی گراد و دمای ابتدایی مذاب 1200 درجه سانتی گراد اعمال گشته است.



Fig. 5 Molten metal cast and vaporizes foam pattern

شکل 5 ریختن فلز مذاب و بخار شدن مدل فومی

$$\nabla \cdot v = \left(\frac{\partial [\varepsilon_p(\rho_p - \rho_l) + \varepsilon_s(\rho_s - \rho_l) - \varepsilon_a \rho_l + \rho_l]}{\partial t} \right) \quad (7)$$

معادله مومنتم متناظر با معادله استوک است که یک ترم اضافی از رابطه دارکی به آن اضافه شده است. با توجه به این که سرعت سیال و در نتیجه عدد رینولدز (R_e) خیلی کوچک است، ترم اینرسی و همچنین ترم انتقال گرما می تواند فراموش شود و در نتیجه خواهیم داشت:

$$\nabla_v^2 = \frac{\varepsilon_l}{K} v + \frac{\varepsilon_l}{\mu_l} \nabla P - \frac{\varepsilon_l}{\mu_l} \rho_{ref} g \quad (8)$$

در این رابطه g شتاب ثقل، ρ_{ref} دانسیته مایع در درجه حرارت گذارش، μ_l ویسکوزیته دینامیک و K نفوذپذیری است که با معادله (9) بیان شده است.

$$K = K_r K_0 \frac{\varepsilon_l^3}{(1 - \varepsilon_l)^2} \quad (9)$$

در رابطه (8)، $K_r = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_l + \varepsilon_a}$ ، $K_0 = 6 \times 10^{-4} \lambda_1^2$ است.

موقعی که نفوذپذیری به بی نهایت میل می کند معادله مومنتم به معادله استوک کاهش می یابد و این در حالتی رخ می دهد که فاز حاضر فقط مایع باشد. در غیر اینصورت زمانیکه کسر حجمی مایع خیلی کوچک باشد ترم سمت چپ معادله نیز خیلی کوچک شده و معادله به قانون دارکی کاهش می یابد.

شعاع تخلخل های ایجاد شده طبق رابطه (10) توسط پکوت¹ و همکارانش محاسبه گردید [17].

$$r_p = \text{MAX}[r_0; \text{MIN}(r_{\text{sphere}}; r_{\text{dend}})] \quad (10)$$

در رابطه فوق r_0 یک شعاع اولیه ناچیز است که می توان 1 میکرومتر فرض نمود. از طرفی r_{sphere} و r_{dend} در رابطه (10) آمده است و در آنها n چگالی عددی تخلخل می باشد:

$$r_{\text{den}} = \frac{\lambda_2 (1 - \varepsilon_s)}{2 \varepsilon_s} \quad (11)$$

$$r_{\text{sphere}} = \left[\frac{3 \varepsilon_p}{4 \pi n} \right]^{1/3}$$

معادله تشکیل تخلخل در حضور گاز [17]:

$$\varepsilon_s \rho_s C_s + \varepsilon_l \rho_l C_l + \varepsilon_p \rho_p C_p = \rho_l C_0 \quad (12)$$

در معادله فوق C_0 میزان تمرکز اولیه گاز C_L ، C_S و C_P میزان گاز به ترتیب در مایع، جامد و میزان گاز در تخلخل می باشد.

پس از تعریف شرایط شبیه سازی، فرایند شبیه سازی با نوب ریزی برای هر سه نمونه فومی به صورت جداگانه انجام می شود. فشاری که بر دیواره های قالب در نظر گرفته شده است 1bar می باشد، از طرفی در ورودی مذاب، فشار 1/05 بار در نظر گرفته شده است تا فرایند ریخته گری انجام شود. زمان انجام شبیه سازی برای سه مدل فومی در جدول 3 نمایش داده شده

سرعت گذارش و نحوه خروج گاز مؤثر است. نرم افزار دارای ویژگی هایی است که می توان به کمک آن انتقال حرارت بین فلز مذاب و فوم، گذارش قالب فومی، انتقال محصولات گازی، اثر پوشش سرامیکی و اثر گاز محبوس بر روی جنبش فلز مذاب را بررسی نمود.

3-1- مدل سازی ریاضی و فیزیکی برای شبیه سازی فرایند ریخته گری

مدل ارائه شده بیان می کند که هر امان حجمی در ریخته گری متشکل از ترکیبی از هوا (a)، تخلخل (p)، فلز مایع (l) و فلز جامد (s) می باشد و مجموع کسر حجمی آنها برابر با یک است. کسر حجمی هوا ε_a مربوط به هوای ورودی است که انقباض باز را شکل می دهد [16].

$$\varepsilon_a + \varepsilon_p + \varepsilon_l + \varepsilon_s = 1 \quad (1)$$

خواص مخلوط بعنوان تابعی از خواص هر فاز ضربدر کسر حجمی مربوط با آن بدست می آید. به عنوان مثال دانسیته مخلوط بصورت رابطه (2) محاسبه می شود.

$$\rho = \varepsilon_a \rho_a + \varepsilon_p \rho_p + \varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_s \rho_s \quad (2)$$

معادله بقای انرژی به صورت رابطه (3) نوشته می شود [16].

$$(\rho c - \rho_l \frac{d\varepsilon_s}{dT}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

که در این رابطه ρ دانسیته مخلوط، C ظرفیت حرارتی ویژه، T درجه حرارت و λ قابلیت هدایت حرارتی است. با این معادله می توان درجه حرارت و کسر حجمی فلز جامد ε_s را محاسبه نمود با این فرض که کسر حجمی فلز جامد تابعی از درجه حرارت باشد. برای بقای جرم فقط نیاز به محاسبه فاز مایع است. اگر فرض شود که تخلخل و فاز جامد ثابت باشند، با کم کردن معادله فاز هوا (معادله 4) از معادله پیوستگی (معادله 5) بدست می آید.

$$\frac{\partial (\varepsilon_a \rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_a \rho_a v_a) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\varepsilon_p \rho_p + \varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l v) = 0 \quad (5)$$

که در این رابطه v سرعت سطحی $v = \varepsilon_l v_l$ است. ترم آخر معادله نیز می تواند بصورت رابطه (6) نوشته شود.

$$\nabla \cdot (\rho_l v) = \rho_l \nabla \cdot v + v \cdot \nabla \rho_l \quad (6)$$

ترم دوم این معادله ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است.

با جایگزینی این معادله در معادله (5) و مرتب نمودن معادله، رابطه (7) بدست می آید:

¹ Pequet

است. همان طور که از نتایج برمی آید با افزایش چگالی فوم، فرایند شبیه سازی پیچیده تر و به طبع آن زمان شبیه سازی افزایش می یابد.

4- بحث و نتایج

4-1- نتایج مرحله بارریزی

در این بخش نتایج فرایند شبیه سازی قطعات به صورت گرافیکی و در شرایط واقعی نشان داده شده است (شکل های 7 تا 9). در مرحله شبیه سازی حرارتی، همان طور که در جدول 3 دیده شد، زمان فرایند شبیه سازی ذوب ریزی و انجماد در سه قطعه متفاوت بوده که می توان نتیجه گرفت، با افزایش چگالی فومها حرکت مذاب کند شده و به تبع آن زمان انجماد نیز طولانی تر شده است.

جدول 3 زمان شبیه سازی برای سه قطعه

Table 3 Simulation time for 3 pieces

فوم	زمان شبیه سازی (Sec)
EPS	375/2802
ABS	455/2444
PLA	462/4920



Fig. 8 Result of casting and simulation in ABS part.

شکل 8 نتایج بارریزی و شبیه سازی در قطعه ABS.

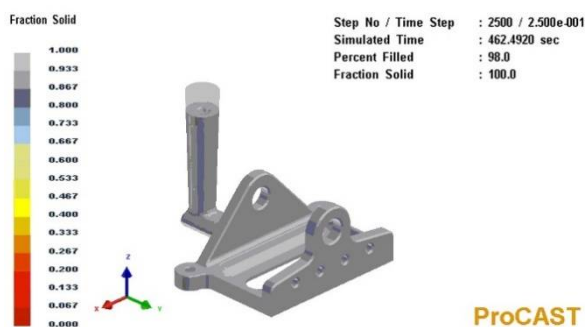


Fig. 9 Result of casting and simulation in PLA part.

شکل 9 نتایج بارریزی و شبیه سازی در قطعه PLA.

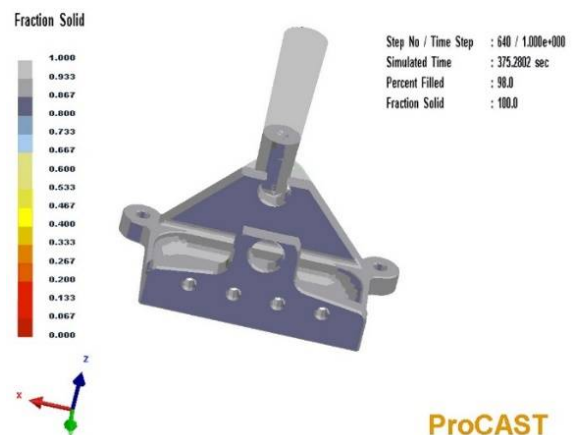


Fig. 7 Result of casting and simulation in EPS part.

شکل 7 نتایج بارریزی و شبیه سازی در قطعه EPS.

نتایج فرایند ریخته گری در حالت آزمایشگاهی تا حدود زیادی با نتایج شبیه سازی تطابق دارد، فوم EPS دارای

جدول 4 سختی سه قطعه ریخته گری شده

Table4 Hardness for 3 casting pieces

سختی (HB)	قطعه
72	EPS
75	ABS
79	PLA

جدول 5 انرژی شگست 3 قطعه ریخته گری شده

Table5 Impact energy for 3 casting pieces

انرژی شگست (J)	قطعه
14/4	EPS
16/3	ABS
16/8	PLA

3-4- آنالیز معایب قطعات

در ادامه به بررسی معایب پیش بینی شده توسط نرم افزار پروکست برای هر سه قطعه شبیه سازی شده پرداخته می شود و با نتایج حاصل شده از ریخته گری تجربی مقایسه می گردد. تشکیل حفرات و تخلخل های پیش بینی شده در شکل 11 نشان داده شده است. این معایب با رنگ بنفش نشان داده شده است، در قطعه EPS معایب بسیار زیاد و در قطعات ABS و PLA کم و در قسمت پایینی قطعه پیش بینی شده است. برای مقایسه معایب دو قطعه b و c، 6 نقطه فرضی یکسان در منطقه ای که تخلخل پیش بینی شده بود در نظر گرفته شد (شکل 12).

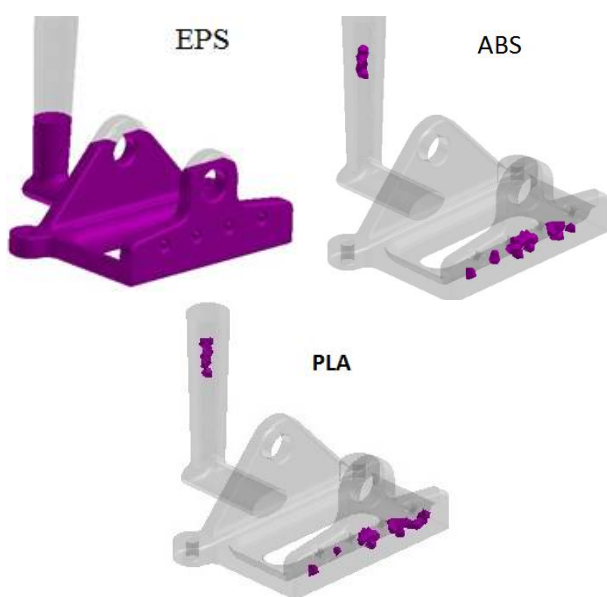


Fig. 11 Porosity in 3 pieces EPS, ABS and PLA

شکل 11 تخلخل ها در سه قطعه EPS، ABS و PLA

نرم افزار شبیه سازی پیش بینی کرد که درصد تخلخل ها در

ریخته گری ناقص است، این در حالی می باشد که ریخته گری در دو فوم ABS و PLA آنها به صورت کامل انجام شده است. در ادامه به خواص حاصل از ریخته گری هر سه فوم پرداخته می شود. همان طور که در شکل 10 نشان داده شده است در هر سه نمونه انجماد از لبه ها و گوشه های تیز آغاز می شود و به سمت مرکز نمونه حرکت می کند و در نهایت انجماد در قسمت راهگاه پایان می یابد.

4-2- خواص مکانیکی

با توجه به حساسیت کاربرد قطعات در صنایع هوایی، بررسی خواص مکانیکی محصولات تولیدی در این حوزه بسیار مهم می باشد. به منظور بررسی سختی سطحی سه قطعه تولید شده، این نمونه ها مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج در جدول 4 نمایش داده شده است. نتایج سختی سنجی هر 3 قطعه به صورت تقریبی نزدیک به هم بود اما بهترین کیفیت سختی را قطعه تولید شده با الگوی فوم PLA دارا بوده است. همچنین میزان انرژی شگست برای سه قطعه تولیدی معیار مناسبی برای مقایسه کیفیت سه نمونه تولیدی می باشد، از این رو انرژی شگست این نمونه ها در جدول 5 نشان داده شده است. کیفیت پایین قطعه EPS در این آزمایش مشهود است اما مقاومت به ضربه دو قطعه دیگر مشابه هم بوده و با اختلاف کم قطعه تولیدی با الگو فومی PLA بهترین کیفیت را دارد.

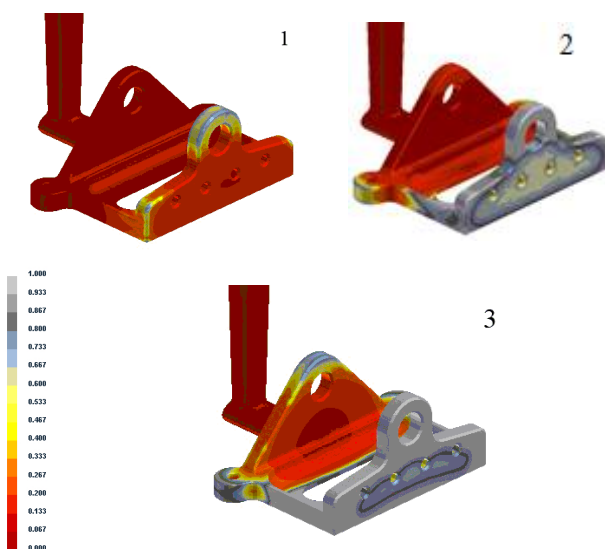


Fig. 10 In each of the 3 samples, solidification begin at the edges and sharp edges (1) and move toward the center of the sample (2), and finally, the solidification ends in the side of the runner (3)

شکل 10 در هر 3 نمونه انجماد از لبه ها و گوشه های تیز آغاز (1) می شود و به سمت مرکز نمونه حرکت می کند (2) و در نهایت انجماد در قسمت راهگاه پایان می یابد (3).

مدل فومی مناسب می باشد اما از سوئی چگالی فوم کم به علت ایجاد تلاطم در قالب باعث ایجاد عیوب ریخته گری می گردد که در نتیجه استفاده از چگالی فوم بهینه در تولید مدل فومی بسیار حائز اهمیت می باشد.

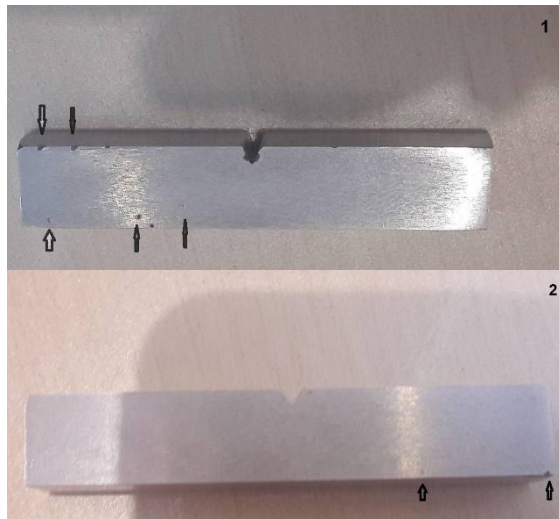


Fig.14 Internal defects (1) ABS and (2) PLA

شکل 14 معایب داخلی (1) ABS، (2) PLA

گاز تولید شده در قالب به صورت تابعی از چگالی فوم و دمای ذوب ریزی بیان می شود زمانی که چگالی فوم افزایش یابد گاز بیش تری در دمای ثابت ذوب ریزی ایجاد می گردد و همچنین زمانی که در یک چگالی ثابت از مدل فومی دمای ذوب ریزی افزایش یابد گاز تولید شده نیز افزایش خواهد یافت. این گازها و مایعات یکی از مشکلات روش فوم از دست رونده می باشد [12].

اگر گاز تولید شده در قالب به علت تجزیه و تبخیر شدن و سوختن مدل فومی به صورت متناسب نتواند از قالب خارج گردد همچون مانعی در مقابل حرکت مذاب عمل کرده و باعث می شود تا قالب به صورت کامل پر نگردد و عیوب ذوب ریزی ظاهری ایجاد می گردد. افزایش ضخامت پوشش اعمالی بر الگوها بر کیفیت ریخته گری تأثیر گذار است [13].

در این تحقیق پوشش استفاده شده روی مدل فومی باعث جذب گازهای تولیدی می شود و با افزایش چگالی فوم، کیفیت ریخته گری افزایش یافته است که دلیل آن می تواند بر اثر پیش گرم نمودن فومها تا نزدیکی دمای ذوبشان و افزایش دمای آلومینیوم تا 1200 درجه باشد.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش، فرایند ریخته گری فوم از دست رونده برای سه

اطراف این 6 نقطه برای این 2 قطعه به شکلی است که در شکل 13 نمایش داده شده است. میانگین درصد تخلخل برای قطعه ABS، 0/35% و برای قطعه PLA، 0/27% می باشد.

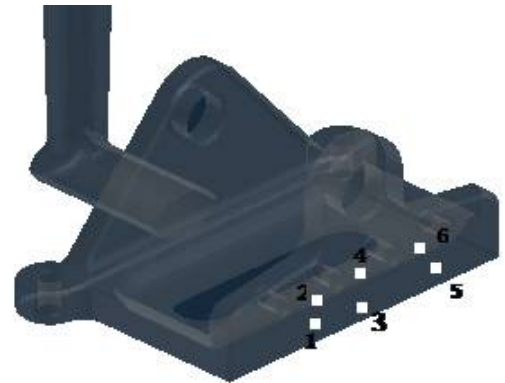


Fig.12 Calculation percentage porosity of points

شکل 12 نقاط فرضی محاسبه درصد تخلخل

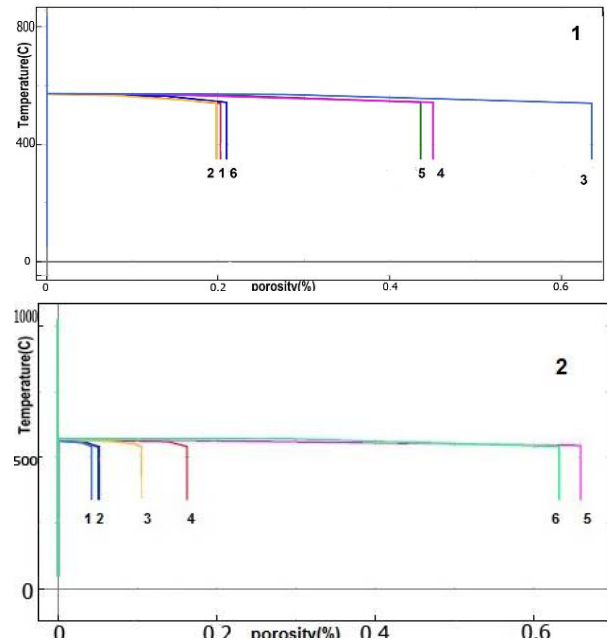


Fig.13 Amount of porosity in (1) PLA and (2) ABS

شکل 13 میزان تخلخلها برای نقاط تعیین شده (1) PLA و (2) ABS

به منظور مقایسه تخلخلهای پیش بینی شده توسط پروکست و ریخته گری واقعی، برشی از قسمتی که در دو قطعه b و c پیش بینی تخلخل شده بود در قطعات تولید شده انجام شد که وجود معایب پیش بینی شده را تأیید می کند (شکل 14). چگالی فوم یکی از مهمترین پارامترهای تأثیر گذار بر روی ریخته گری بامدل فومی می باشد. چگالی فوم با گاز تولیدی حاصل از تبخیر آن و همچنین محصولات تجزیه فوم رابطه ای مستقیم دارد که جهت به حداقل رساندن مقدار این گاز و محصولات حاصل از تجزیه مدل فومی، چگالی فوم کمتر برای

- [7] Wang L., et al. 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 and Engineering: A*, 2016.
- [8] D. A. Caulk, A foam melting model for lost foam casting of aluminum. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49. 13-14, 2124-2136, 2006.
- [9] M. Javaheri, M. abasi, h. zeydabadi, Simulation and assessment of the thermal and current conditions in the parts of the cast iron thread, *Third Iranian Conference on Heat and Mass Transfer*, Tehran, Iran, June 12-14, 2012. (in Persian فارسی)
- [10] J. Cyboron, M. Karolus, P. Putyra, M. Dyzia and W. Ratuszek, Structure Properties of AlSi7Mg/SiC Composite Produced by Stir Casting Method. *Acta Physica Polonica A* 130.4: 969-971, 2016.
- [11] S.M.H. Mirbagheri, S. Serajzadeh, N. Varahram, P. Davami, Modelling of foam degradation in lost foam casting process. *Materials & design* 27.2: 115-124, 2006.
- [12] Kannan, Pravin; Biernacki, Joseph J.; VISCO JR, Donald P. A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007.
- [13] M. Kariman, A. Ourdjini, M.H. Idris, H. Jafari, "Effect of pattern coating thickness on characteristics of lost foam Al-Si-Cu alloy casting.", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22.9: 2092-2097.
- [14] Lu. Su-Ling, Xiao. Fu-Ren, Zhang. Shuang-Jie, Mao. Yong-Wei and Liao, Bo, "Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST." *Applied Thermal Engineering* 73.1: 512-521, 2014.
- [15] Hodbe, G. A., and B. R. Shinde. Design And Simulation of LM 25 Sand Casting For Defect Minimization. *Materials Today: Proceedings* 5.2: 4489-4497, 2018.
- [16] Kent D. Carlson, Zhiping Lin, Christoph Beckermann, George Mazurkevich, and Marc C. Schneider, Modeling of porosity formation in aluminum alloys, *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, 2006
- [17] Ch. Pequet., M. Gremaud, and M. Rappaz, *Metall. Mater. Trans. A*, 33A (2002), 2095-2106.
- فوم با بهره گیری از نرم افزار پروکست شبیه سازی شد و فرایند واقعی ریخته گری نیز برای این سه الگوی فومی با استفاده از AlSi7Mg انجام شد که نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد:
- نتایج شبیه سازی و ریخته گری مشخص نمود قطعات تولیدی EPS ناقص و PLA و ABS کامل می باشد.
- شبیه ساز نشان داد که EPS سرشار از عیوب بوده اما ABS و PLA معایب کمتری داشتند و همچنین PLA نسبت به ABS دارای درصد کمتری از معایب بوده است که نتایج نمونه ریخته گری شده در قسمت مورد نظر، این مسأله را تأیید کرد.
- آزمایش های خواص مکانیکی شامل: تست ضربه و سختی سنجی این مسئله را تأیید نمود که قطعه ریخته گری شده با فوم PLA دارای کیفیت مطلوب تری می باشد.

6- مراجع

- [1] Adrian P. Mouritz, Production and casting of aerospace metals, *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, pp. 128-153, 2012.
- [2] H. Jafari, Mohd Hsbullet Idris, and Amirreza Shayganpour, Evaluation of significant manufacturing parameters in lost foam casting of thin-wall Al-Si-Cu alloy using full factorial design of experiment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23.10: 2843-2851, 2013.
- [3] John. Brown, *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [4] Xiao, Bo-tao, et al. Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel Research, International* 21.11: 1049-1054, 2014.
- [5] M. Khodai and N. Parvin. Pressure measurement and some observation in lost foam casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 206.1-3: 1-6, 2008.
- [6] M. Divandari, Golpayegani, AR Vahid. Study of Al/Cu rich phases formed in A356 alloy by inserting Cu wire in pattern in LFC process. *Materials & Design*, 2009.