



بهینه‌سازی گرادیان حرارتی با تغییر پارامترهای دمایی برای فرایند ساخت افزودنی به کمک لیزر بر پایه پودر پلی آمید-12 با استفاده از مدل عددی

احمد منشوری یگانه¹، سعید خدایگان^{2*}، محمد رضا موحدی³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-9567، khodaygan@sharif.edu

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل	ساخت افزودنی به کمک لیزر بر پایه پودر، یکی از روش‌های کارآمد ساخت لایه ای است که با استفاده از توان بالای لیزر در ساخت قطعات پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنش‌های حرارتی ناشی از لیزر موجب بروز اعوجاج و انقباض در قطعه می‌شود. تنش‌های حرارتی لیزر از گرادیان‌های حرارتی که توسط لیزر و سایر پارامترهای دستگاه بوجود می‌آیند، ناشی می‌شود. کاهش گرادیان‌های حرارتی موجب کاهش تغییر شکل‌ها در قطعه و افزایش دقت ساخت می‌شود. هدف از این مقاله تعیین پارامترهای دمایی شامل دمای پیش گرم یا دمای بستر پودر، دمای محیط، توان اسکن و قطر لکه است به نحوی که گرادیان دمایی کمینه گردد. مدل‌سازی المان محدود فرایند تفجوشی لیزر انتخابی برای پودر پلی آمید-12 انجام شده است. گرادیان حرارتی با تغییر پارامترهای دمایی بر مبنای مدل دمایی اجزاء محدود فرایند و روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه‌سازی می‌شود. به منظور رسیدن به این هدف، ابتدا شبیه‌سازی المان محدود فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر برای پودر پلی آمید-12 انجام می‌شود. جهت صحت‌گذاری شبیه‌سازی‌ها، تست تجربی توسط دستگاه تفجوشی انتخابی به کمک لیزر انجام شده و نتایج حاصل با مدل المان محدود مقایسه می‌گردد. سپس با استفاده از روش تاگوچی، آزمایش‌ها در سطوح مختلف طراحی می‌شود و پارامترهای دمایی بهینه فرایند بدست می‌آید. مطابق با نتایج حاصل، پارامترهای بهینه برای کمینه کردن گرادیان حرارتی در دمای پیش گرم 451K، دمای محیط 359K، توان لیزر 10W و قطر لکه 0/5mm بدست آمده است.
دریافت: 18 تیر 1397	
پذیرش: 6 شهریور 1397	
ارائه در سایت: دی 1397	
کلیدواژه‌گان:	
گرادیان حرارتی	
پارامترهای دمایی	
تفجوشی انتخابی به کمک لیزر	
مدل‌سازی اجزاء محدود	
ساخت افزودنی	
پلی آمید-12	

Optimized thermal gradient by changing temperature parameters for laser-assisted additive manufacturing process based on polyamide-12 powder using numerical model

Ahmad Manshoori Yeganeh, Saeed Khodaygan*, Mohammad Reza Movahhedy

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran, khodaygan@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper
Received 09 July 2018
Accepted 28 August 2018
Available Online January 2019

Keywords:

Thermal Gradient
Temperature Parameters
Selective Laser sintering
Finite Element Modeling
Additive manufacturing
Polyamide-12

Abstract

The laser-assisted additive manufacturing based on the powder is an efficient layer manufacturing process that uses a high-energy laser for the fabrication of polymeric components. The thermal stresses of the laser arise from the thermal gradients generated by the laser and other parameters of the device. Reducing thermal gradients decreases the deformations in the part and increases the fabrication accuracy. The main aim of this paper is to determine the temperature parameters including the preheating temperature or the powder bed temperature, the ambient temperature, scanning power and spot diameter in such a way that the temperature gradient is minimized. The finite element modeling is performed for the selective laser sintering process for polyamide-12 powder. In this paper, thermal gradient by changing temperature parameters based on the temperature model of the finite element and Taguchi experimental design is optimized. In order to reach this aim, the finite element simulation of the selective laser sintering process is first carried out for polyamide-12 powder. In order to verify the simulations, the experimental test is performed by a selective laser sintering device and the obtained results are compared with the finite element model. Then, using the Taguchi method, experiments are designed at the different levels and optimal temperature parameters are obtained. According to obtained results, optimal parameters were obtained to minimize thermal gradients at 451K preheat temperatures, 359K ambient temperature, 10W laser power, and 0.5mm spot diameter.

ساخت اجسام با استفاده از مدل سه بعدی CAD است. یکی از

تکنولوژی‌های ساخت افزودنی روش تفجوشی یا ذوب انتخابی به

1- مقدمه

فناوری ساخت افزودنی (AM) یکی از روش‌های نوین برای

Please cite this article using:

A. Manshoori Yeganeh, S. Khodaygan, M. Reza Movahhedy, Optimized thermal gradient by changing temperature parameters for laser-assisted additive manufacturing process based on polyamide-12 powder using numerical model, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 26-36, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی المان محدود از یک استراتژی فعال‌سازی المان با استفاده از روش تولد و مرگ المان جهت رشد هندسه در فرایند لایه نشانی فلز انجام شده است. کرایلس و همکاران [4] به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرایند ذوب بستر پودر به کمک لیزر بر روی اندازه و شکل حوضچه مذاب پرداخته است. فرایند LPBF یا ذوب بستر پودر به کمک لیزر به عنوان یک روش ساخت افزودنی فلزی است. دای و همکاران [5] به شبیه‌سازی توزیع دمایی در فرایند ذوب گزینشی به کمک لیزر برای کامپوزیت WC/Cu با استفاده از روش حجم محدود پرداخته است. تبدیل پودر به ماده جامد کشش سطحی که از گرادیان‌های حرارتی ناشی می‌شود، بوجود می‌آورد. مدل حرارتی لیزر توسط توزیع انرژی گوسی در مدل فیزیکی در نظر گرفته شده است. دای و همکاران [6] به بررسی اثر اسکن لیزر بر تنش‌های حرارتی و اعوجاج با استفاده از روش المان محدود پرداخته است. علت اعوجاج و انقباض لایه در روش‌های ساخت افزودنی بر پایه پودر، تنش‌های حرارتی و پسماند است که به دلیل توزیع غیر یکنواخت دما و یا گرادیان‌های حرارتی بر سطح لایه بوجود می‌آید. دیکرز و همکاران [7] به انجام آزمایش فرایند SLS و SLM برای لایه‌های پودر آلومینای چگالی بالا در درجه حرارت بالا (تا 800 درجه سانتی‌گراد) با چگالی انرژی کم پرداخته است. این کار موجب کاهش شدید گرادیان‌های حرارتی و در نتیجه کاهش اعوجاج در قطعه می‌گردد. دینگ و همکاران [8] به مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در فرایند SLM تحت اسکن نقطه‌ای برای پودر AISi10Mg پرداخته است. تأثیر زمان قرار گرفتن در معرض لیزر و فاصله نقاط بر روی میدان دمایی، میدان سرعت، زمان سیال بودن و ابعاد حوضچه مذاب بررسی شده است. دانگ و همکاران [9] یک مدل المان محدود گذرای سه بعدی برای شبیه‌سازی تبدیل فاز در فرایند SLS ارائه داده است. با توجه به پدیده‌های گرمایی و تفجوشی در این فرایند، روش یکپارچگی ساختار دو گانه انتخاب شده است که در آن ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما، گرمای ویژه و چگالی ماده در معادلات حرارتی در نظر گرفته شده است. فو و همکاران [10] به مدل‌سازی حرارتی سه بعدی در فرایند SLM پرداخته است. دما در فرایند SLM بصورت مستقیم بر ابعاد و ویژگی‌های حوضچه مذاب تأثیر گذار است. با این حال به دلیل کوچک بودن اندازه حوضچه مذاب، اندازه گیری و کنترل گرادیان‌های حرارتی یک چالش است. حسین و همکاران [11] به مدل‌سازی المان محدود میدان دما و تنش در فرایند SLM

کمک لیزر (SLS و SLM) می‌باشد. در این روش لایه‌ای از پودر فلز یا پلیمر بر روی سطحی ریخته می‌شود و لایه مورد نظر از قطعه توسط لیزر ذوب شده و ذرات پودر به می‌چسبند. سپس لایه بعدی پودر توسط مکانیزم لایه نشانی بر روی لایه قبلی قرار می‌گیرد و دوباره نقاط مورد نظر از جسم توسط لیزر ذوب شده و لایه بعدی تشکیل می‌شود.

اعوجاج، انقباض‌های حرارتی و تغییر شکل قطعات یکی از مشکلات قطعات ساخته شده در روش تفجوشی انتخابی به کمک لیزر است. این عوامل به دلیل وجود تنش‌های حرارتی در قطعه ایجاد می‌شود. توزیع غیر یکنواخت دما و از بین رفتن حفره‌ها در حین انجام فرایند که پودر به جسم جامد تبدیل می‌شود، موجب بروز اعوجاج و تغییر شکل می‌گردد. از عوامل عمده تنش‌های حرارتی وجود گرادیان دما در سطح لایه می‌باشد. همچنین گرادیان‌های حرارتی موجب بوجود آمدن تنش‌های پسماند در قطعه می‌گردد. با کاهش گرادیان‌های حرارتی اعوجاج و تغییرات ابعادی نیز کاهش می‌یابد. حرکت لیزر بر روی سطح لایه در نقاط مختلف لایه تغییرات دمایی بوجود می‌آورد که موجب بروز گرادیان دمایی می‌گردد. تغییر پارامترهای فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر بر روی گرادیان‌های حرارتی تأثیرگذار است. الگوی حرکت لیزر بر روی لایه، دمای پیش گرم یا دمای بستر پودر، دمای محیط، قطر لکه و توان لیزر از عواملی است که می‌تواند بر روی گرادیان دمایی تأثیر بگذارد. دمای پیش گرم یا دمای بستر پودر دمایی است که قبل از شروع فرایند توسط هیترهای تابشی اطراف سیلندر به پودرهایی که در ابتدا در سیلندر وجود دارد، داده می‌شود. این دما تأثیر بسیار زیادی در گرادیان‌های حرارتی و اعوجاج‌های بوجود آمده در قطعه می‌گردد. دمای محیط، دمای اطراف سیلندر پودر است. آمادو و همکاران [1] به مدل‌سازی المان محدود گذرا فرایند SLS برای تابع وارپیچ پرداخته است. برای مدل‌سازی مدل حرارتی و مدل مکانیکی با یکدیگر کوپل شده است. همچنین معادلات تغییر فاز از حالت سیال به حالت جامد در نظر گرفته شده است. چن و همکاران [2] یک مدل ریاضی جزئی از پدیده انقباض یک پودر که مخلوط دو پودر دیگر با دمای بالا می‌باشد، ارائه کرده است. هنگامی که دمای محیط بالاتر از دمای ذوب پودر می‌رود، یک جریان مذاب به راه می‌افتد که مقداری پودر جامد را نیز با خود منتقل می‌کند. چیومنتی و همکاران [3] یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در فرایند ساخت افزودنی توسط تکنولوژی ذوب انتخابی توسط لیزر ارائه داده است. مدل عددی پیشنهادی برای

دما در نظر گرفته شده است.

2-1- معادلات حرارتی

مرسوم ترین رابطه حرارتی برای مدل سازی انتقال حرارت جهت استفاده در فرایند SLS استفاده از رابطه هدایت حرارتی فوریه است [13] برای توصیف معادله حرارتی از رابطه (1) استفاده شده است.

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

دمای اولیه صفحه که همان دمای پیش گرم است بصورت رابطه (2) است:

$$T(X, Y, Z, 0) = T_0 \quad (2)$$

در رابطه (2)، T_0 دمای اولیه یا پیش گرم یا دمای بستر پودر است. شرایط مرزی در نقاط $Z=0$ و $Z=d$ که ضخامت لایه است با قرار دادن Z در رابطه (3) بدست می آید و با صرف نظر کردن از گرمای تشعشعی اتلاف شده، بصورت روابط (4) و (5) [13] بدست می آید.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_e^4) + h(T - T_e) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=d} = h(T - T_e) \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (5)$$

در روابط (3) و (4)، T_e دمای محیط می باشد. T دمای نقاط سطح لایه پودر، λ ضریب هدایت حرارتی، ρ چگالی ماده، c ظرفیت گرمایی، q حرارت اولیه که توسط لیزر ایجاد شده است، $\varepsilon \sigma$ ضریب تشعشع، σ ضریب استفان بولتزمن و h ضریب انتقال حرارت جابجایی است.

2-2- مدل سازی

در این بخش به نحوه مدل سازی المان محدود حالت تک لایه در نرم افزار آباکوس پرداخته می شود. ابتدا فایل CAD قطعه بصورت سه بعدی ایجاد شده است. ضخامت لایه 0.12mm در نظر گرفته شده است و قطعه بصورت مستطیل توخالی است. شکل 1 قطعه سه بعدی مدل سازی شده را نمایش می دهد. شکل 2 ابعاد قطعه را نمایش می دهد.

ماده بررسی شده در این پژوهش پلی آمید-12 است. خواص حرارتی و مکانیکی این ماده در جدول 1 [14] آورده شده است. شکل 3 نمودار مدول الاستیسیته برحسب دما را نشان می دهد که نقاطی از آن برای تعریف خواص ماده در نظر گرفته شده است که در جدول 2 آورده شده است.

پرداخته است. در طی فرایند SLM لایه های ساخت دارای گرادیان های دمایی و تنش های حرارتی می شوند و موجب بوجود آمدن انقباض و ترک در قطعه می شود. در این پژوهش به بررسی المان محدود میدان دما و تنش در لایه های فولاد ضد زنگ L316 توسط فرایند SLM و در حالت تک لایه پرداخته شده است. یک مدل گذرای غیر خطی میدان ترمومکانیکی کوپل شده در ANSYS توسعه داده شده است. کولوسو و همکاران [12] مدل سازی المان محدود دمایی فرایند SLS پرداخته است. در این پژوهش یک مدل حرارتی توسعه داده شده است. این مدل این امکان را می دهد تا رفتار غیر خطی هدایت حرارتی و ضریب هدایتی با تغییر دما و تبدیل فاز تغییر کند. اثر تفجوشی بر تغییرات خواص حرارتی زیاد است.

هدف از این مقاله محاسبه مقادیر بهینه پارامترهای دمایی جهت کمینه سازی گرادیان حرارتی ایجاد شده در سطح لایه پودر پلی آمید-12 است. پارامترها شامل دمای بستر پودر یا پیش گرم، دمای محیط، قطر لکه لیزر و توان اسکن لیزر می باشد. به دلیل مشکلات اندازه گیری دما در کلیه نقاط سطح لایه پودر در حین فرایند و خطاهای اندازه گیری، استفاده از مدل اجزاء محدود بسیار فراگیر تر است. به همین جهت شبیه سازی مدل اجزاء محدود انجام شده است و کلیه بهینه سازی ها بر روی مدل انجام شده است. برای صحت گذاری مدل اجزاء محدود، چند تست تجربی برای یک نمونه انجام شده و با مدل اجزاء محدود مقایسه شده است. در نهایت با تغییر پارامترهای دمایی فرایند SLS مقادیر بهینه جهت کمینه کردن گرادیان دمایی توسط روش تاگوچی انجام شده است.

2- شبیه سازی فرایند

در این قسمت به شبیه سازی المان محدود فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر می پردازیم. برای شبیه سازی فرایند از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای شبیه سازی منحنی دمایی و حرکت لیزر از سابروتین فرترن استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی تغییرات مدول الاستیسیته برحسب دما و تغییر فاز، از سابروتین دیگری در فرترن کدنویسی شده است. برای مدل سازی، دمای بستر پودر در کلیه نواحی سطح ثابت در نظر گرفته شده است. در تست های تجربی هر چه دمای بستر ایجاد شده توسط هیترهای تابشی یکنواخت تر باشد، راندمان ساخت بالاتر می رود. ضرایب حرارتی پلی آمید-12 در مدل سازی اجزای محدود ثابت در نظر گرفته شده است زیرا تغییرات آن اندک است. خواص مکانیکی مانند ضرایب الاستیسیته بصورت متغیر با

جدول 2 نقاطی از منحنی مدول الاستیسیته برحسب دما

Table 2 Modulus of elasticity in terms of temperature

دما (K)	مدول الاستیسیته (MPa)
288	1450
303	1300
313	1090
323	760
358	405
373	275
413	120

برای تعریف شرایط اولیه دمایی، یک بار حرارتی تعریف شده است که مقدار دمای اولیه همان دمای پیش گرم است. بر روی این دما بهینه سازی انجام شده است که در بخش 4 مورد بررسی قرار می گیرد. برای تعریف شرایط مرزی حرارتی در حین فرایند، بین لایه پودر و هوای مجاور آن یک انتقال حرارت جابجایی با $h = 1 \times 10^{-6} \frac{W}{mm^2.K}$ تعریف شده است. در تست تجربی به دلیل عدم واکنش لایه پودر و هوای داخل سیلندر به دلیل دمای بالای داخل سیلندر از گازهای بی اثر درون محفظه ساخت استفاده می شود که مقداری انتقال حرارت جابجایی بین پودر و گاز بی اثر صورت می گیرد.

جهت انطباق مدل اجزاء محدود و تست صحت سنجی، مدل مکانیکی حل شده است و مدل حرارتی به عنوان ورودی برای آن در نظر گرفته شده است. برای مدل مکانیکی شرایط مرزی طوری تعریف شده است که درجات آزادی جسم در فضا را بگیرد. به همین منظور برای سه نقطه از جسم قید جابجایی تعریف شده است و جابجایی ها به ترتیب در یک راستا، دو راستا و سه راستا صفر در نظر گرفته شده است.

3-2- معادله حرارتی لیزر

برای توصیف معادله حرارتی لیزر، از روابط مختلفی استفاده می شود. پر کاربردترین این روابط در این قسمت آورده شده است. رابطه (6) تابع توزیع نرمال یا همان توزیع گوسی برای شار حرارتی سطحی می باشد. [16] رابطه (7) توزیع گوسی دو بعدی شدت سطح می باشد. در این رابطه شعاع مشخصه و شعاع جذب آورده شده است. [9، 11] رابطه (8)، شکل دیگری از توزیع گوسی می باشد. [17] و رابطه (9) تابع شار حرارتی حجمی سه بعدی است که در آن عمق نفوذ آورده شده است [18].

$$q(r) = \frac{2P}{\pi r_0^2} e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \quad (6)$$

$$I(r, w) = \frac{2AP}{\pi w^2} e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \quad (7)$$

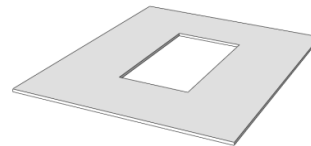


Fig. 1 View a 3D modeled part

شکل 1 نمایی از قطعه سه بعدی مدل سازی شده

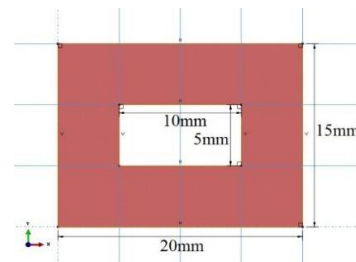


Fig. 2 Dimensions of modeling piece

شکل 2 ابعاد قطعه مدل سازی

جدول 1 خواص حرارتی و خواص مکانیکی پلی آمید-12 [14]

Table 1 Thermal and mechanical properties of polyamide-12 [14]

واحد	مقدار کمیت	کمیت
$\frac{W}{m.K}$	0/24	ضریب انتقال حرارت
$\frac{m.K}{cm^3}$	1	چگالی
$\frac{J}{gr}$	70	گرمای نهان ذوب
$^{\circ}C$	190	دمای ذوب
$^{\circ}C$	160	دمای جامد شدن
MPa	300 کلوین	تنش تسلیم
	600 کلوین	
$\frac{J}{kg.K}$	2500	ظرفیت حرارتی
-	0/3	ضریب پواسون
$\frac{1}{K}$	1.5×10^{-4}	ضریب اتبساط حرارتی

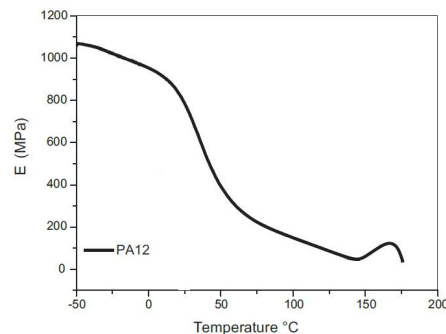


Fig. 3 Modulus of elasticity graph in terms of temperature changes for Polyamide-12 [15]

شکل 3 منحنی تغییرات مدول الاستیسیته برحسب دما برای پلی آمید-12 [15]

توزیع گوسی لیزر توسط سابروتین DFLUX فرتن نوشته شده است. برای حرکت لیزر بر روی سطح لایه نیز از این سابروتین استفاده شده است. پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هاشورزنی، قطر لکه لیزر و ضخامت لایه پودر نیز در معادلات وارد شده است. در این معادلات ابتدا کانتورهای قطعه اسکن می‌شود، سپس نواحی داخلی کانتورها هاشور زده می‌شود. معادلات حرارتی به عنوان بار حرارتی در آباکوس وارد می‌شود و پس از تعریف مدل و خواص ماده، مدل حرارتی حل می‌شود. خروجی این بخش شامل دمای تک تک نودها می‌باشد. این مجموعه دما به عنوان بار حرارتی برای مدل مکانیکی در نظر گرفته می‌شود. گرادیان‌های حرارتی بوجود آمده موجب بوجود آمدن تنش‌های حرارتی می‌گردد که باعث اعوجاج و جابجایی در نقاط مختلف جسم می‌گردد. برای شبیه‌سازی تغییر حالت پودر که مدول الاستیسیته‌ای نزدیک به صفر دارد به مدول الاستیسیته برحسب دما پس از به هم چسبیدن پودرها که در نمودار شکل 3 نمایش داده شده، از سابروتین USDFLD استفاده شده است. هنگامی که لیزر از ناحیه عبور می‌کند میدان الاستیسیته از صفر به یک تغییر می‌کند و مقدار مدول الاستیسیته از منحنی دمایی تعریف شده، خوانده می‌شود و با تغییر دما تغییر می‌کند. المان‌های استفاده شده در مدل المان محدود بصورت مکعبی و با اندازه 0/4mm در نظر گرفته شده است. سه استپ برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. در مرحله اول، کانتورهای لایه اسکن می‌شود، شکل 6 اسکن کانتورهای لایه مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد که دما برحسب کلون است. در مرحله دوم، نواحی داخلی کانتورها هاشور زده می‌شود و در مرحله سوم لایه خنک می‌شود، شکل 7 هاشورزنی نواحی داخلی توسط لیزر را نشان می‌دهد و دما برحسب کلون است. در حین این مراحل تغییر شکل و اعوجاج در جسم بوجود می‌آید تا در نهایت شکل لایه پس از خنک کاری بدست آید. با اندازه‌گیری دمایی تک تک نودها در حل دمایی، گرادیان‌های حرارتی مشخص می‌شود و با اندازه‌گیری جابجایی نودها در حل مکانیکی، اعوجاج در لایه بدست می‌آید.

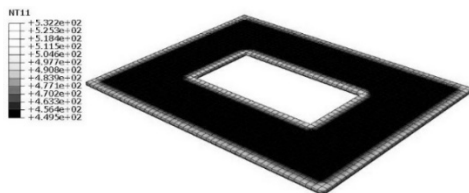


Fig. 6 Thermal simulation of finite element process, layer contour scanning by laser

شکل 6 شبیه‌سازی حرارتی اجزای محدود فرایند، اسکن کانتور لایه توسط لیزر

$$q(r) = \frac{4.55P}{\pi R^2} e^{-\frac{4.5r^2}{R^2}} \quad (8)$$

$$f_{laser} = \frac{A \times I_0(x, y)}{\delta} e^{-\frac{|z-z_{surface}|}{\delta}} \quad (9)$$

در این پژوهش از رابطه (6) که تابع توزیع گوسی نسبت به شعاعی از مرکز تابش لیزر می‌باشد، استفاده شده است. معادله توزیع توسط سابروتین فرتن نوشته شده و به عنوان بار حرارتی در آباکوس در نظر گرفته شده است، که در آن r فاصله از مرکز تابش لیزر، r_0 قطر لکه، P توان لیزر و q شار حرارتی است. واحدهای مورد استفاده در این معادله طبق SI می‌باشد.

با تغییر در توان لیزر و قطر لکه، توزیع حرارتی گوسی تغییر می‌کند، شکل 4 منحنی‌های توزیع برای سه سطح توان 10W، 15W و 20W با قطر لکه 0/5mm که در بخش 4 بررسی خواهد شد را نشان می‌دهد. شکل 5 نیز منحنی‌های توزیع برای سه سطح قطر لکه 0/55mm، 0/45mm و 0/5mm با توان 10W را نمایش می‌دهد.

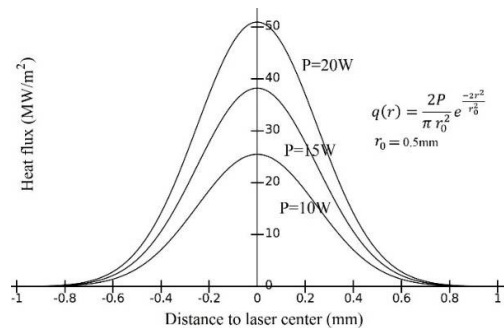


Fig. 4 Laser Gaussian distribution Curves for 10W, 15W and 20W Power Levels with 0.5mm spot Diameter

شکل 4 منحنی‌های توزیع گوسی لیزر برای سه سطح توان 10W، 15W و 20W با قطر لکه 0/5mm

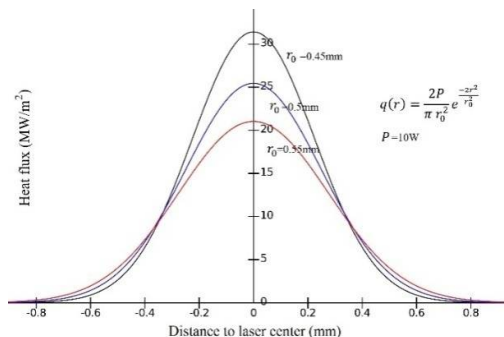


Fig. 5 Laser Gaussian distribution Curves for three levels of 0.45mm, 0.5mm and 0.55mm spot Diameter with 10W laser power

شکل 5 منحنی‌های گوسی برای سه سطح قطر لکه 0/55mm، 0/45mm و 0/5mm با توان لیزر 10W

شکل 9 نمایی از داخل دستگاه تست به همراه مکانیزم پخش پودر در سمت راست را نشان می‌دهد. جدول 3 پارامترهای فرایند در تست تجربی را نشان می‌دهد. شکل 10 قطعات ساخته شده تست را نشان می‌دهد. معیار اعوجاج قطعات اندازه‌گیری شده، مجموع زوایای خطوطی است که مرکز نمونه را به دو سر آن متصل می‌کند. این زاویه در شکل 11 نمایش داده شده است. در شکل 12، یکی از نمونه‌های تست، از نمای جانبی برای اندازه‌گیری زاویه اعوجاج نشان داده شده است. برای کاهش خطاهای آزمایشگاهی، پنج نمونه ساخته شده است که نتایج اندازه‌گیری اعوجاج نمونه‌ها در جدول 4 گزارش شده است.



Fig. 9 View from inside the test device

شکل 9 نمایی از داخل دستگاه تست

جدول 3 پارامترهای دستگاه در تست تجربی

Table 3 Device parameters of the experimental test

توان اسکن (W)	سرعت اسکن (mm/s)	فاصله هاشورزنی (mm)	دمای بستر پودر (K)	دمای محیط (K)	قطر لکه (mm)	ضخامت لایه (mm)
20	1800	0/12	451	360	0/6	0/15



Fig. 10 Samples made by the SLS machine

شکل 10 نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه SLS

جنس پودر استفاده شده در دستگاه تست، پلی آمید-12 است و قطر ذرات پودر بطور متوسط 50 میکرومتر می‌باشد. کلیه شرایط مدل المان محدود و تست تجربی شامل سرعت اسکن لیزر، توان لیزر، فاصله هاشورزنی، ضخامت لایه، قطر لکه، دمای بستر پودر و دمای محیط یکسان در نظر گرفته شده است.

شکل 8 مدل مکانیکی پس خنک شدن لایه را نشان می‌دهد که U جابجایی کل برحسب میلی‌متر است. به دلیل در نظر گرفتن لایه های سوراخ دار در حالت کلی و برخی محدودیت های ساخت، مدل بصورت مستطیل تو خالی در نظر گرفته شده است.

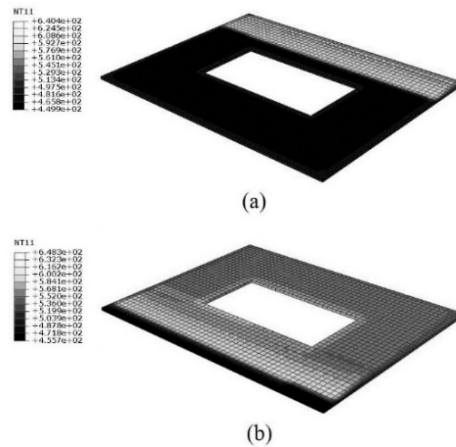


Fig. 7 Layer hatching modeling by laser a) the beginning of hatching; b) the end of hatching

شکل 7 مدل‌سازی هاشورزنی لایه توسط لیزر الف) ابتدای هاشورزنی ب) انتهای هاشورزنی

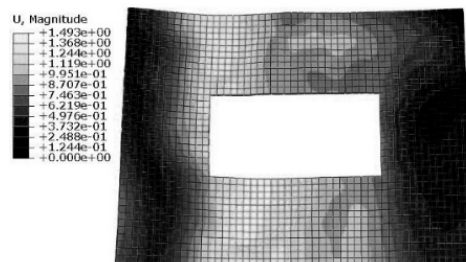


Fig. 8 Mechanical simulation of the process by finite element method

شکل 8 شبیه‌سازی مکانیکی فرایند توسط روش المان محدود

3- تست تجربی جهت صحت‌گذاری شبیه‌سازی

به منظور صحت‌گذاری شبیه‌سازی انجام شده، چند نمونه مستطیل شکل تک لایه توسط دستگاه SLS ساخته و با مدل شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد. دستگاه تست T1-R230 می‌باشد که دارای یک لیزر CO_2 است و عمل اسکن را انجام می‌دهد. دستگاه‌های تجاری اغلب قابلیت تغییر در الگوریتم و الگوی اسکن را ندارند، اما این دستگاه جهت موارد آزمایشی استفاده شده و قابلیت هر گونه تغییر در پارامترها و الگوی اسکن را دارد. برای انجام تست نقاط و منحنی‌هایی که لیزر باید از آنها عبور کند مشخص شده است.



Fig. 13 One sample tested by the SLS machine with a 12-degree polyamide powder

شکل 13 یکی از نمونه‌های تست شده توسط دستگاه SLS با پودر پلی آمید-12

4- تحلیل و بهینه سازی گرادیان حرارتی

مهمترین عامل بوجود آمدن اعوجاج و انقباض در قطعه، وجود تنش‌های حرارتی است که از گرادیان حرارتی ناشی می‌شود. کاهش گرادیان حرارتی در نقاط مختلف سطح لایه پودر موجب کاهش اعوجاج در لایه می‌شود. حرکت لیزر بر روی لایه برای ذوب کردن پودرها موجب بوجود آمدن گرادیان دمایی می‌شود. معیارهای مختلفی برای گرادیان دمایی بر روی لایه پودر می‌توان تعریف کرد. در این مقاله برای تعریف معیار گرادیان، ابتدا دمای تک تک نودها پس از حل دمایی بدست می‌آید، سپس واریانس دمای کلیه گره‌ها محاسبه می‌گردد و واریانس دمایی به عنوان گرادیان دما در نظر گرفته می‌شود. رابطه (10) معیار گرادیان دمایی را نشان می‌دهد. در این رابطه T_i دمای هر گره، \bar{T} دمای میانگین کلیه گره‌هاست که در رابطه (11) آمده است، و N تعداد نودهاست. تابع توزیع احتمال $P(T_i)$ کلیه نودها برابر و $1/N$ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Thermal gradient} = \text{Var}(T) = \sum_{i=1}^N P(T_i)(T_i - \bar{T})^2$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (5)$$

پارامترهای فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر باید به نحوی انتخاب شوند تا گرادیان دمایی کمینه گردد. پارامترهای بررسی شده عبارتند از: دمای پیش گرم یا دمای بستر (T_b)، دمای محیط (T_e)، توان لیزر (P) و قطر لکه لیزر (D_s). سایر پارامترهای فرایند شامل سرعت اسکن، فاصله هاشورزنی و ضخامت لایه پودر ثابت در نظر گرفته شده‌اند که در جدول 6 آمده است. برای بهینه سازی گرادیان حرارتی از مدل اجزاء محدود استفاده شده است و با تغییر پارامترها بر روی مدل و اندازه گیری گرادیان دما، پارامترهای حرارتی بهینه بدست می‌آید. مدل در نظر گرفته شده یک صفحه مربعی با ابعاد

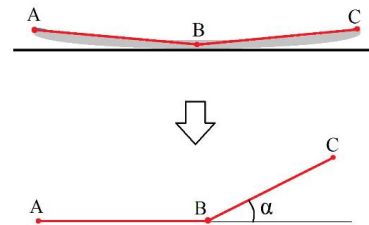


Fig. 11 Measurement distortion criterion

شکل 11 معیار اندازه گیری اعوجاج



Fig. 12 Hollow rectangular side view to measure distortion

شکل 12 نمای جانبی مستطیل تو خالی برای اندازه گیری اعوجاج

جدول 4 نتایج تست تجربی پنج نمونه مستطیل تو خالی
Table 4 Experimental test results for five hollow rectangular samples

آزمایش‌ها	اعوجاج نمونه‌های تست (برحسب درجه)
آزمایش 1	12/65
آزمایش 2	12/51
آزمایش 3	14/70
آزمایش 4	15/37
آزمایش 5	12/32

3-1- مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود و تست تجربی

برای صحت‌گذاری مدل شبیه‌سازی مقایسه‌ای بین نتایج مدل اجزاء محدود و تست تجربی انجام شده است. این نتایج به همراه خطاها در جدول 5 آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل اجزاء محدود و تست تجربی خطای اعوجاج در حدود 9 درصد می‌باشد که خطای قابل قبولی است و این خطاها می‌تواند ناشی از خطای دستگاه در تست تجربی یا فرضیات ساده کننده مدل شبیه‌سازی باشد. در نظر گرفتن دمای ثابت در تمامی نقاط لایه و یا در نظر نگرفتن ضریب جذب از عوامل بروز این خطاها می‌باشد. شکل 13 یکی از نمونه‌های تست را نشان می‌دهد.

جدول 5 مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود و تست تجربی
Table 5 Comparison of Finite Element Simulation Results and Experimental Test

صحت سنجی	میانگین نتایج تست تجربی (درجه)	میانگین نتایج مدل درصد	خطا
مقطع تیر با اسکن ساده	13/51	14/85	9/02

10×10 میلی متر و ضخامت 0/15mm است.

جدول 6 پارامترهای ثابت در شبیه سازی المان محدود
Table 6 Fixed parameters in finite element simulation

ضخامت لایه	فاصله هاشورزنی	سرعت اسکن
0/15mm	0/12mm	1800mm/s

1-4- بهینه سازی پارامترهای دمایی فرایند به روش تاگوچی

روش های متداول در طراحی آزمایش ها را می توان در قالب دو دسته اصلی طرح های عاملی کامل و طرح های عاملی کسری مورد بررسی قرار داد [۱۹،۲۰]. روش طراحی تاگوچی به عنوان یک روش طرح عاملی کسری، بر اساس طرح های متعامد با کاهش تعداد آزمایش ها و با انجام تعداد مشخص و معدودی آزمایش، اطلاعات قابل توجی را از اثرات فاکتورها در اختیار قرار می دهد [20]. با ارزیابی تأثیر پارامترهای فرایند و تعیین سطوح بهینه و با استفاده از مفهوم سیگنال بر روی نویز، می توان فرآیند بهینه سازی را با انتخاب سطوح بهینه و همچنین بالاترین پایداری نسبت به اثرات عوامل غیر مطلوب را انجام داد که در پیشینه تحقیق به تکنیک بهینه سازی تاگوچی شناخته می شود، به طوریکه محققان مختلفی از این روش جهت بهینه سازی استفاده کرده اند [۲۱،۲۲].

برای بررسی پارامترهای فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر پارامترها را سطح بندی کرده و در سطوح مختلف آزمایشات را انجام داد. با در نظر گرفتن کلیه حالات بایستی از روش فاکتوریل استفاده کرد که تعداد آزمایشات زیاد می شود و هزینه زمانی زیادی می برد. برای کاهش تعداد آزمایش ها از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده می شود. این روش از طراحی کسری از فاکتورها گرفته شده است و طراحی بر اساس حداقل تعداد آزمایشات و زمان انجام می شود. برای بررسی تابع گرادیان دما از آرایه L تاگوچی استفاده شده است.

پارامترهای در سه سطح تغییر داده شده است. جدول 7 سطوح پارامترها را نشان می دهد. پارامترهای هر سطح از آرایه L تاگوچی بر روی مدل اجزاء محدود اعمال شده است و پس از حل دمایی، نتایج هر آزمایش بدست آمده است. سطوح مختلف در هر آزمایش و نتایج گرادیان دما که از مدل اجزاء محدود بدست آمده است در جدول 8 نشان داده شده است. پس از تحلیل نتایج توسط روش تاگوچی نتایج میانگین ها بدست آمده و در نمودار شکل 14 نشان داده شده است. برای هر پارامتر بهترین سطح جهت کمینه سازی گرادیان حرارتی بدست آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش توان لیزر گرادیان

حرارتی افزایش می یابد، زیرا تمرکز حرارتی در نقاطی که لیزر بر آنها می تابد ایجاد می شود. قطر لکه لیزر در 0/5mm بهینه است و در سطوح دیگر موجب افزایش گرادیان حرارتی می شود. با افزایش دمای بستر پودر، توزیع حرارتی یکنواخت تر می شود، به همین علت گرادیان حرارتی کاهش می یابد. دمای محیط نیز در سطح 359K بهینه است. شکل 15 نتایج شبیه سازی المان محدود حرارتی را در حالت اسکن کانتور و هاشورزنی را برای آزمایش اول نشان می دهد که دما برحسب کلونین می باشد. پارامترهای بهینه در جدول 9 آمده است.

جدول 7 سطوح تغییر پارامترهای دمایی

Table 7 Levels of temperature parameters change

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
دمای پیش گرم (T)	447 K	449 K	451 K
دمای محیط (T _e)	350 K	359 K	368 K
توان لیزر P(W)	10 w	15 w	20 w
قطر لکه (mm)	0/45 mm	0/50 mm	0/55 mm

جدول 8 آرایه L9 تاگوچی بر اساس سطوح پارامترها و نتایج گرادیان دما در هر آزمایش

Table 8 Taguchi L9 array with respect to parameters levels And the temperature gradient results in each experiment

شماره آزمایش	T _i	T _e	P	D _s	گرادیان دما
1	1	1	1	1	35/936
2	1	2	2	2	82/768
3	1	3	3	3	244/907
4	2	1	2	3	136/062
5	2	2	3	1	160/846
6	2	3	1	2	21/677
7	3	1	3	2	166/094
8	3	2	1	3	21/403
9	4	3	2	1	88/123

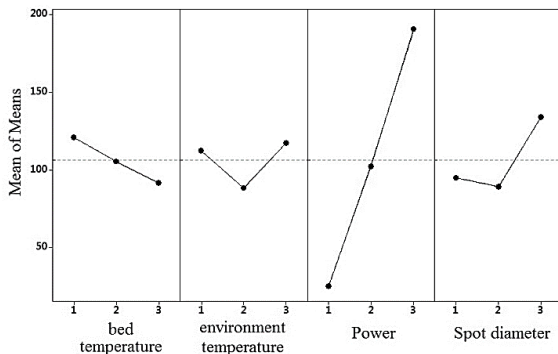


Fig. 14 Results of the mean temperature gradient by varying process parameters

شکل 14 نتایج میانگین گرادیان دما با تغییر پارامترهای فرایند

دمای نقاط اصلی لایه در زمان اسکن کانتور و هاشورزنی و سرد شدن لایه برای آزمایش‌های هشتم و سوم بدست آمده است.

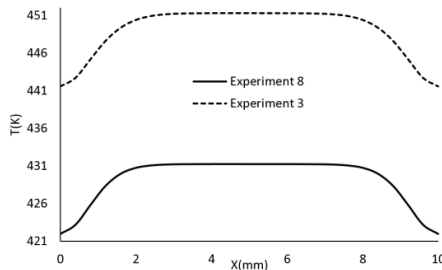


Fig. 19 Temperature graph of the horizontal axis symmetry for eighth and third tests at $t = 5s$ of the hatching

شکل 17 نمودار دمای نقاط محور تقارن افقی برای دو آزمایش هشتم و سوم در $t=5s$ از اسکن هاشورزنی

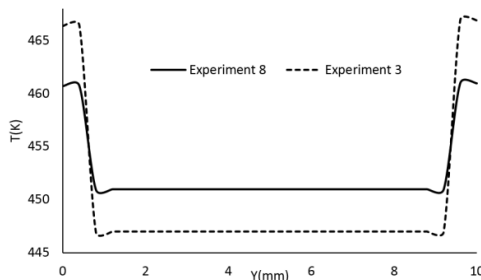


Fig. 20 Temperature graph of the vertical axis symmetry for eighth and third tests after scanning cantor

شکل 18 نمودار دمای نقاط محور تقارن عمودی برای دو آزمایش هشتم و سوم پس از اسکن کانتور

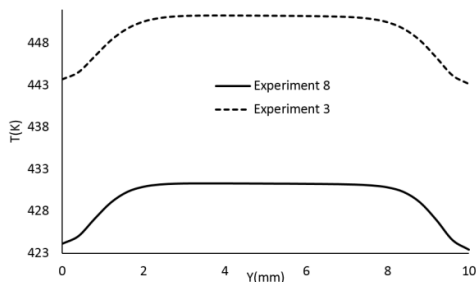


Fig. 23 Temperature graph of the vertical axis symmetry for eighth and third tests at $t = 5s$ of the hatching

شکل 19 نمودار دمای نقاط محور تقارن عمودی برای دو آزمایش هشتم و سوم در $t=5s$ از اسکن هاشورزنی

5- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی گرادیان حرارتی و پارامترهای دمایی در فرایند تفجوشی انتخابی به کمک لیزر پرداخته شد. با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و بر مبنای مدل المان محدود، مقادیر بهینه پارامترهای دمایی فرایند جهت کمینه سازی

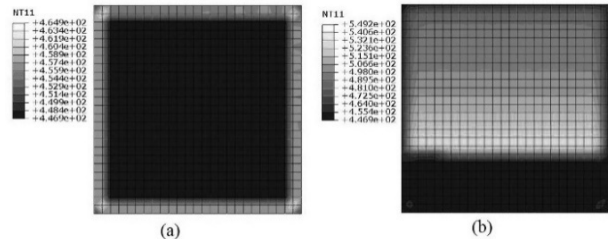


Fig. 15 Finite element simulation results of the first test temperature a) scanning contour b) hatching

شکل 15 نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود دمایی آزمایش اول الف) اسکن کانتور ب) هاشورزنی

جدول 9 مقادیر بهینه پارامترهای اسکن برای تابع گرادیان دما

Table 9 Optimal values of scan parameters for temperature gradient

پارامتر دمایی	قطر لکه (mm)	توان لیزر P(W)	دمای محیط (T_c)	دمای پیش گرم (T_i)
اسکن	0/5 mm	10 W	359 K	451 K
مقدار بهینه				

برای بررسی بیشتر گرادیان‌های حرارتی در آزمایش‌های تاگوچی، دمای نقاط لایه بررسی شده است. آزمایش هشتم در جدول 8 کمترین گرادیان حرارتی و آزمایش سوم بیشترین گرادیان حرارتی را دارد. برای بررسی و مقایسه این دو آزمایش نمودار دمای نقاط محور تقارن عمودی و افقی لایه مربعی در زمان‌های مختلف رسم شده است. در نمودار شکل 16 دمای نقاط محور تقارن افقی پس از اتمام اسکن کانتور برای دو آزمایش هشتم و سوم رسم شده است. شکل 17 دمای نقاط محور افقی به ترتیب در زمان $t=5s$ را نمایش می‌دهد. نمودار شکل 18 دمای نقاط محور تقارن عمودی پس از اسکن کانتور برای دو آزمایش هشتم و سوم را نشان می‌دهد.

شکل 19 دمای نقاط محور تقارن عمودی را به ترتیب در زمان‌های 0/2، 0/3 و 5 ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد، تفاوت دمایی با همان گرادیان حرارتی در کلیه حالت‌ها در آزمایش هشتم کمتر از آزمایش سوم است.

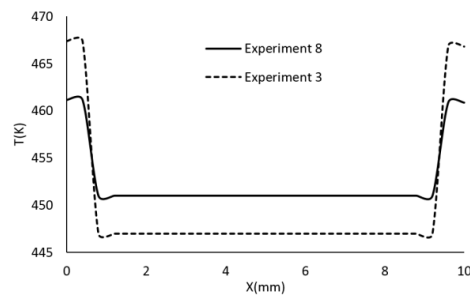


Fig. 16 Temperature graph of the horizontal axis symmetry for eighth and third tests after scanning cantor

شکل 16 نمودار دمای نقاط محور تقارن افقی برای دو آزمایش هشتم و سوم پس از اسکن کانتور

- Direct Selective Laser Sintering/Melting of High Density Alumina Powder Layers at Elevated Temperatures, *Physics Procedia*, Vol. 56, No. Supplement C, pp. 117-124, 2014/01/01/, 2014.
- [8] X. Ding, L. Wang, Heat transfer and fluid flow of molten pool during selective laser melting of AlSi10Mg powder: Simulation and experiment, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. Supplement C, pp. 280-289, 2017/04/01/, 2017.
- [9] L. Dong, A. Makradi, S. Ahzi, Y. Remond, Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 700-706, 2009.
- [10] C. H. Fu, Y. B. Guo, Three-Dimensional Temperature Gradient Mechanism in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 061004-061004-7, 2014.
- [11] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting, *Materials & Design*, Vol. 52, pp. 638-647, 2013.
- [12] S. Kolossov, E. Boillat, R. Glardon, P. Fischer, M. Locher, 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 2, pp. 117-123, 2004.
- [13] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, Conduction of heat in solids, *Oxford: Clarendon Press, 1959, 2nd ed.*, 1959.
- [14] J. Mark, *Polymer Data Handbook*, pp. 225-229, New York: Oxford University Press, 2009.
- [15] G. Salmoria, J. Leite, L. Vieira, A. Pires, C. Roesler, Mechanical properties of PA6/PA12 blend specimens prepared by selective laser sintering, *Polymer Testing*, Vol. 31, No. 3, pp. 411-416, 2012.
- [16] I. A. Roberts, C. Wang, R. Esterlein, M. Stanford, D. Mynors, A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 12-13, pp. 916-923, 2009.
- [17] R. B. Patil, V. Yadava, Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 1069-1080, 2007.
- [18] C. Morsbach, S. Höges, W. Meiners, Modeling the selective laser melting of polylactide composite materials, *Journal of Laser Applications*, Vol. 23, No. 1, pp. 012005, 2011.
- گرادیان دمایی که از حرکت لیزر بر روی لایه پودر ناشی می‌شود، بدست آمد. با تغییر دمای پیش گرم یا دمای بستر، دمای محیط، توان اسکن و قطر لکه لیزر توزیع حرارتی تغییر می‌کند و موجب تغییر در گرادیان حرارتی می‌شود. پارامترهای بهینه برای مینیمم گرادیان دما در دمای پیش گرم 451K، دمای محیط 359K، توان لیزر 10W و قطر لکه 0/5mm بدست آمد. مدل اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس انجام شد و شبیه‌سازی توزیع گوسی لیزر و حرکت آن بر روی لایه پودر از ساپروتین DFLUX و اتصال آن به آباکوس انجام شده است. جهت اعتبار سنجی مدل المان محدود فرایند، چند نمونه تست تجربی توسط دستگاه تفجوشی انتخابی به کمک لیزر انجام و با مدل المان محدود مقایسه گردید. دستگاه شامل لیزر CO₂ و تست‌ها توسط پودر پلی آمید-12 انجام شده است. خطای مدل اجزاء محدود و نتایج تست تجربی در حدود 9 درصد بدست آمد. در نهایت به بررسی دمایی نقاط لایه پودر پرداخته شد.

6- مراجع

- [1] A. Amado, M. Schmid, K. Wegener, *Simulation of warpage induced by non-isothermal crystallization of co-Polypropylene during the SLS process*: ETH-Zürich, 2014.
- [2] T. Chen, Y. Zhang, A partial shrinkage model for selective laser sintering of a two-component metal powder layer, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 49, No. 7, pp. 1489-1492, 2006.
- [3] M. Chiumenti, E. Neiva, E. Salsi, M. Cervera, S. Badia, J. Moya, Z. Chen, C. Lee, C. Davies, Numerical modelling and experimental validation in Selective Laser Melting, *Additive Manufacturing*, Vol. 18, No. Supplement C, pp. 171-185, 2017/12/01/, 2017.
- [4] L. E. Criales, Y. M. Arsoy, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez, T. Özel, Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 121, No. Supplement C, pp. 22-36, 2017/10/01/, 2017.
- [5] D. Dai, D. Gu, Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments, *Materials & Design*, Vol. 55, No. Supplement C, pp. 482-491, 2014/03/01/, 2014.
- [6] K. Dai, L. Shaw, Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 5, pp. 270-276, 2002.
- [7] J. Deckers, S. Meyers, J. P. Kruth, J. Vleugels,

- determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. *Materials & design*, 28(4), 1271-1278.
- [22] Bağcı, E., & Aykut, Ş. (2006). A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(9-10), 940.
- [19] Taguchi, G. *System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs* (No. 04; QA279, T3.), 1987.
- [20] Mori, T. *Taguchi methods: benefits, impacts, mathematics, statistics, and applications*. *ASME Press*, 2011.
- [21] Oktem, H., Erzurumlu, T., & Uzman, I. (2007). Application of Taguchi optimization technique in