ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تعیین پارامترهای بهینه در فرایند تفجوشی انتخابی با لیزر جهت کمینه سازی میزان تابیدگی قطعه بر مبنای روش تاگوچی

احمد منشوری یگانه[1]، سعید خدایگان[2*]، محمد رضا موحدی[3]

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 9567-11155، khodaygan@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 شهریور 1396
پذیرش: 06 آبان 1396
ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:
الگوریتم اسکن
تفت جوشی لیزر انتخابی
مدل‌سازی اجزا
محدود، طول بردار اسکن
ساخت افزودنی
طراحی آزمایش‌ها

چکیده

فناوری ساخت افزودنی یا چاپ سه بعدی، فرایند جدیدی در ساخت است که در آن قطعه به صورت لایه لایه ساخته می‌شود. یکی از مهمترین روش‌های ساخت افزودنی، روش تفجوشی انتخابی با لیزر می‌باشد. پایین بودن زمان ساخت و تنوع در مواد مورد استفاده در ساخت قطعات، از مهمترین مزایای روش تفجوشی انتخابی با لیزر است. رسیدن به کیفیت بالای محصولات از اهداف اصلی در فرایند ساخت افزودنی محسوب می‌شود. تابیدگی در قطعه، یکی از عواملی است که موجب کاهش کیفیت محصولات حاصل از روش تفجوشی انتخابی با لیزر است. الگوریتم اسکن و الگوی‌هاشورزنی یکی از مهمترین مراحل ساخت در فرایند SLS می‌باشد که بر روی تابیدگی قطعه مؤثر است. هدف از این مقاله، تعیین پارامترهای بهینه فرایند SLS مانند طول بردار اسکن و تعداد آفست یا کانتور، توان لیزر، سرعت حرکت لیزر و فاصله‌هاشورزنی جهت کمینه سازی تابیدگی قطعه ناشی از تنش‌های حرارتی بر مبنای مدل اجزای محدود و روش تاگوچی است. به همین جهت ابتدا به مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند SLS پرداخته شده است. سپس برای نمایش توانایی، دقت و صحه‌گذاری مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از تست‌های تجربی با استفاده از دستگاه SLS حاوی لیزر CO_2 مقایسه می‌گردد. در پایان، با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی پارامترهای فرایند در سطوح مختلف تغییر یافته است و پارامترهای بهینه بدست آمده است.

Determination of optimal parameters in selective laser sintering for minimizing the part warping based on Taguchi method

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 10 September 2017
Accepted 28 October 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Scanning algorithm
Selective laser sintering
Finite element modeling
Scan vector length
Additive Manufacturing
Design of Experiments

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) or 3D printing is a method to build parts by adding layer-upon-layer of material. The selective laser sintering (SLS) method is one of the most important methods of additive manufacturing processes. The low time and the variety of materials used to build the parts are major advantages of SLS method. The high quality of the product is one of the main goals in the additive manufacturing processes. The part warping is one of the factors that reduce the quality of the products which are built by the SLS process. The hatching patterns and scan algorithms in the SLS process are important factors that affect the product quality. In this paper, the effective parameters of the SLS processes such as the scan vector length and the number of offsets or contours, the laser power, the laser speed, and the hitching spacing are optimally determined to minimize the part warping of the product based on the finite element simulations and Taguchi method. For this reason, SLS process has been modeled on the SLS process. Then, to illustrate and validate the accuracy and efficiency of the proposed method, and the computational results are compared to the obtained results from the experimental tests Using SLS containing CO2 laser. Finally, using the Taguchi design of Experiments, the process parameters have been changed at different levels and optimal parameters have been obtained.

1- مقدمه

یکی از مهمترین روش‌های ساخت با استفاده از فناوری ساخت افزودنی، روش تفجوشی انتخابی با لیزر (SLS) می‌باشد. این روش به دلیل آن که زمان ساخت کمتری داشته و قابلیت ساخت با انواع مواد را فراهم می‌کند، بسیار فراگیر شده است. الگوریتم اسکن وهاشورزنی یکی مهمترین اجزای این فرایند می‌باشد که بر روی خواص قطعه مانند تابیدگی قطعه، استحکام، صافی سطح، و دقت‌های ابعادی و هندسی تأثیرگذار است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای اسکن مانند طول بردار اسکن، (طول مسیر یک پاس لیزر که روی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Manshoori Yeganeh, S. Khodaygan, M. R. Movahhedy, Determination of optimal parameters in selective laser sintering for minimizing the part warping based on Taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 157-166, 2018 (in Persian)

پودر اسکن می‌شود)، تعداد آفست یا کانتور (آفست‌هایی که نسبت به کانتورهای هر لایه تولید می‌شود)، فاصله‌هاشورزنی لیزر (فاصله بین دو بردار اسکن متوالی در نواحی داخلی کانتورها) و زمان تأخیر (زمانی که طول می‌کشد تا لیزر فاصله بین دو نقطه مجاور از دو خط اسکن مجاور را بپیماید) بر میزان تنش‌های حرارتی در داخل قطعه بسیار تأثیرگذار می‌باشد و با بهبود آنها می‌توان میزان تابیدگی قطعه را کاهش داد.

الگوریتم اسکن که شامل الگوی اسکن و پارامترهای اسکن و دستگاه می‌باشد، از اهمیت بالایی برخودار است و بر روی خواص مختلف قطعه تأثیرگذار است. در این بخش به بررسی پژوهش‌هایی که بر روی الگوریتم و پارامترهای اسکن در دستگاه‌های SLS و SLM انجام شده است، پرداخته می‌شود. تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده شامل بهینه‌سازی پارامترهای اسکن و یا ارائه الگوی اسکن جدید می‌باشد. شی و همکاران [1]، یک حالت اسکن مرکب ارائه کردند، که ترکیبی از حالت اسکن زیر ناحیه و حالت اسکن کانتور می‌باشد. سپس بصورت تجربی تست و مقایسه انجام دادند و نتیجه گرفتند، راندمان زمان ساخت در حالت اسکن مرکب کمتر از حالت اسکن زیر ناحیه است و قطعات در حالت اسکن مرکب دارای استحکام کششی، خمشی و استحکام شوک کمتری نسبت به حالت زیر ناحیه است. همچنین قطعات در حالت اسکن مرکب از نظر دقت ابعادی، دقت هندسی و کیفیت سطح بهتر از حالت اسکن زیر ناحیه است. جین و همکاران [2]، تأثیر زمان تأخیر بر روی استحکام قطعه در دستگاه SLS بررسی کردند. زمان تأخیر در واقع اختلاف بین زمان قرار گرفتن لیزر بین هر دو نقطه مجاور در خطوط اسکن متوالی در یک لایه است. کروت و همکاران [3]، یک روش تحلیل برای مقایسه و بررسی عوامل مؤثر بر تنش پسماند در SLM ارائه کردند. در طول فرایند SLM ماده تحت تابش لیزر دچار نوسانات بزرگ حرارتی در یک زمان کوتاه می‌شود که باعث بوجود آمدن تنش‌های حرارتی و پسماند در قطعه می‌گردد. تنش‌های حرارتی موجب ایجاد ترک‌های حرارتی در قطعه می‌شود. در نهایت نتیجه گرفتند که کاهش گرادیان دما، تنش‌های حرارتی را کاهش می‌دهد و بهینه‌سازی جهت بردارهای اسکن لیزر و تغییر الگوی اسکن نیز در میزان تنش‌های حرارتی مؤثر است. با استفاده از تولید الگوریتم‌ها و الگوهای اسکن جدید می‌توان با استفاده از روش تحلیل BCM آنها را بهینه کرد. کالیگنانو و همکاران [4]، صافی سطح نمونه آلومینیومی تولید شده توسط دستگاه DSLM بررسی کرد. پارامترهای ورودی را توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله‌هاشورزنی در نظر گرفت. آزمایش‌ها بر اساس مدل آرایه متعامد L18 تاگوچی انجام گردید. همچنین، برای بررسی صافی سطوح بالای نمونه بررسی و آنالیز گردید و در نهایت پارامترهای بهینه را محاسبه کرد. وانگ و همکاران [5]، مقادیر بهینه برای پارامترهای فرایند SLS را برای کمینه سازی وارپیج در پلی استایرن بررسی کرد. پارامترهای در نظر گرفته شده توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هچ، ضخامت لایه و درجه حرارت پودر است. ابتدا مدل پیش‌بینی برای میزان وارپیج با استفاده از شبکه عصبی ANNs را بدست آورد و پس از آن توسط الگوریتم ژنتیک (GA) پارامترهای بهینه را بدست آورد. جین و همکاران [6]، به بهبود استحکام قطعات در دستگاه SLS پرداخت. نمونه‌های اولیه SLS بایستی استحکام لازم جهت برآوردن نیازها را داشته باشد. به غیر از انرژی که ترکیبی از توان لیزر، سرعت و فاصله ی‌هاشورزنی پرتو لیزر است، پارامترهای مختلف دیگر مانند نرخ تجدید پودر صفحه، ضخامت لایه و الگوی‌هاشورزنی روی استحکام قطعه تأثیرگذار است. در این ارتباط بین استحکام و پارامترهای مختلف یعنی ضخامت لایه، نرخ تجدید پودر صفحه، درجه حرارت بستر و الگوی‌هاشورزنی بررسی شده است.

دای و همکاران[7]، تأثیر الگو اسکن بر روی چروک خوردگی با استفاده از روش اجزا محدود بررسی کرد به همین منظور یک صفحه از جنس نیکل با اندازه 60×60×2 سانتی‌متر، سرعت لیزر 10 میکرومتر بر ثانیه با دو الگوی مختلف اسکن نمود و نتیجه گرفت که افزایش دقت ساخت قطعه طی فرایند SLS از طریق کاهش چروک خوردگی امکان پذیر می‌باشد. علت چروک خوردگی نیز وجود تنش حرارتی، تنش پسماند و مهم‌تر از همه توزیع غیریکنواخت دما بر سطح مواد می‌باشد. پارامترهای ساخت (از قبیل دمای پایه، سرعت لیزر، الگوی اسکن، سرعت اسکن، قدرت اسکن) باید به منظور افزایش دقت ساخت بهینه انتخاب شوند. دینگ و همکاران [8] روش محور میانی (MAT) برای تولید مسیر ابزار جهت تولید سیم ارائه کرد. ساخت سیم و یا کلیه قطعاتی که در لایه‌هایی دارای نواحی نازک و در حدود چند برابر قطر لکه لیزر هستند با مشکل مواجه می‌شود و معمولا از این نواحی دچار آسیب و شکست می‌شوند. ساخت این قطعات با استفاده از این روش بهبود می‌یابد. یو و همکاران [9] چند الگوی مختلف اسکن مورد مقایسه قرار دادند و تأثیر الگوها در تابیدگی قطعه و خواص مکانیکی بررسی کردند. الگوهای بررسی شده شامل؛ حالت اسکن خطوط موازی، حالت اسکن مارپیچی پلکانی (حرکت از داخل و حرکت از بیرون)، حالت اسکن فراکتالی می‌باشد. توابع هدفی که در این کار مورد بررسی قرار گرفته است شامل، گرادیان دما، دما، خواص مکانیکی (مانند استحکام قطعه)، تابیدگی قطعه قطعات و کیفیت سطح می‌باشد. در نهایت توسط دستگاه LSF (فرم‌دهی جامد لیزر) تست انجام داده است. نتایج المان محدود نشان می‌دهد الگوی فراکتالی گرادیان کمتری نسبت به سایر حالات اسکن دارد و با توجه به اینکه گرادیان دما بر روی تابیدگی قطعه تأثیر مستقیم دارد، در نتیجه این حالت اسکن تابیدگی قطعه کمتری نسبت به سایر حالت‌ها دارد. یانگ و همکاران [10] حالت اسکن فراکتالی (شکل‌های خود متشابه) را ارائه دادند و با حالت اسکن خطوط موازی مقایسه انجام دادند. در حالت اسکن فراکتالی برخی از نقاط اسکن نشده باقی می‌مانند. برای بهبود عدم ایجاد جای خالی از الگوریتم مناسبی استفاده شده است. همچنین با تغییر اندازه فراکتال‌ها خواص قطعات تغییر می‌کند. بررسی اثر اندازه فراکتال‌ها روی دقت نیز پرداخته انجام شده است. زمان کارکرد پردازنده برای تولید حالت اسکن فراکتالی زیاد است. از دیگر معایب اسکن فراکتالی خالی ماندن برخی نواحی در داخل لایه می‌باشد و یا امکان پر شدن برخی نواحی خارج از لایه وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از بهینه‌سازی این الگوریتم و همچنین بهبود سیستم کنترلی، مشکلات بوجود آمده در اسکن فراکتالی رفع شده است. نتایج نشان می‌دهد، میزان استحکام در حالت اسکن فراکتالی نسبت به حالت اسکن موازی بهبود یافته است. دینگ و همکاران [11] یک حالت اسکن تقسیم بندی زیر ناحیه معرفی کرده‌اند. این تکنیک برای تبدیل هر لایه به زیرناحیه‌هایی چند ضلعی استفاده می‌کند. به طوری که زوایای این چند ضلعی جهت اسکن مناسب باشند. این الگوریتم لایه دوبعدی را به مجموعه چند ضلعی محدب براساس یک استراتژی تقسیم می‌کند. سپس برای هر چند ضلعی محدب، جهت اسکن بهینه را شناسایی می‌کند. سپس زاویه اسکن را برای نواحی مختلف مانند نواحی باریک، قوس‌ها، زوایای تیز طوری انتخاب می‌شوند که بالاترین دقت را بدهد. این پژوهش به دقت و صافی سطح می‌پردازد. در نهایت برای دو الگوریتم تقسیم بندی زیرناحیه تست توسط دستگاه SLM انجام شده است. چن و همکاران [12] یک مدل ریاضی جزئی از پدیده چروک خوردگی یک پودر که مخلوط دو پودر با دماهای ذوب بالا می‌باشد، ارائه کردند. با حل معادلات حرارتی بدست آمده به وسیله روش حجم محدود به شکل HAZ،

توزیع دمای سطح بدست آمده است. در نهایت تأثیر کسر حجمی گاز در مایع و جامد در شکل و اندازه HAZ به دست آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حجم HAZ با کاهش کسرحجمی گاز در مایع افزایش می‌یابد.

استمپ و همکاران [13] یک تکنیک برای ساخت قطعات متخلخل بیولوژیکی ارائه داده‌اند. ساخت قطعه متخلخل در ارتوپدی جهت تثبیت بیولوژیکی بین ایمپلنت فلزی و استخوان به کار می‌رود. این مواد باید زیست‌سازگار باشند و دارای تخلخل پیوسته بالا با منافذ اندازه 100 تا 700 میکرومتر باشند. برای ساخت این قطعه از تکنیک فاصله بین پرتو استفاده شده است. در نهایت برای یک قطعه با تخلخل 71% (440 میکرومتر) و مقاومت فشاری 70MPa در دستگاه SLM تست شده است.

کریپلس و همکاران [14] به مطالعه آزمایشگاهی فرایند ترکیب بستر پودر لیزر (L-PBF) پرداخته است. این فرایند ساخت افزودنی فلزی می‌تواند ساختارهای سه بعدی کاملا متراکم را با استفاده از پودر فلز بسازد. در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند و استراتژی اسکن بر تراکم نسبی، اندازه و شکل حوزچه مذاب پرداخته شده است.

چیومنتی و همکاران [15] به مدل‌سازی عددی انتقال حرارت فرایند ساخت افزودنی با تکنولوژی پودری پرداخته است. در مدل عددی پیشنهاد شده، مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت با محیط اطراف در نظر گرفته شده است. این مدل‌سازی با روش فعالسازی المان محدود بر اساس تولد و مرگ المان انجام شده است.

هدف از این مقاله تعیین پارامترهای بهینه فرایند SLS مانند طول بردار اسکن و تعداد آفست یا کانتور، توان لیزر، سرعت حرکت لیزر و فاصله‌هاشورزنی جهت کمینه سازی تابیدگی قطعه ناشی از تنش‌های حرارتی بر مبنای مدل اجزای محدود و روش تاگوچی است. به همین جهت، به منظور صحت سنجی مدل اجزا محدود، نتایج چند مدل اجزاء محدود و نتایج حاصل از انجام چند نمونه تست تجربی مقایسه می‌شود. سپس اثر پارامترهای مختلف فرایندSLS مانند طول بردار اسکن و تعداد آفست بر میزان تابیدگی قطعه ناشی از تنش‌های حرارتی برمبنای مدل‌سازی اجزای محدود فرایند SLS بررسی می‌گردد. به همین علت در ابتدا به مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند SLS پرداخته می‌شود. در نهایت، با تغییر پارامترهای اسکن به روش تاگوچی، پارامترهای مناسب برای کمینه کردن تابیدگی لایه‌هایی که پس از حرکت لیزر جامد می‌شوند، به طور بهینه تعیین می‌گردد.

2- مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند SLS

به طورکلی، به‌دلیل وجود محدودیت‌های ساخت در دستگاه SLS مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند SLS انجام می‌شود. در این مقاله، مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند SLS در حالت تک لایه انجام می‌گردد. نرم‌افزار مورد استفاده در تحلیل‌های اجزای محدود آباکوس می‌باشد. برای شبیه سازی حرارتی لیزر، نرم‌افزار آباکوس به فرترن متصل شده است و تمام معادلات حرکت لیزر در فرترن نوشته شده است. همچنین برای شبیه‌سازی تغییرات مدول الاستیسیته از یکی دیگر از سابروتین‌های فرترن استفاده و کدنویسی شده است. در این بخش، به فرضیات مدل‌سازی پرداخته می‌شود:

1- دمای بستر پودر در تمام نقاط یکسان در نظر گرفته شده است. گرمای ایجاد شده در بستر پودر توسط هیترهای تابشی که در اطراف سیلندر دستگاه قرار دارند تامین می‌شود، تا گرادیان‌های حرارتی ناشی از گرمای لیزر را کاهش دهد. در برخی دستگاه‌ها این دما در نواحی مختلف لایه متغیر است که موجب کاهش راندمان ساخت می‌شود و معمولاً در مرکز لایه‌ها تغییرات دما کمتر است و برای ساخت قطعات دقیق مناسب‌تر است. هیترهای تابشی موجب نزدیک تر شدن تمامی نقاط بستر پودر به دمای ذوب پودر می‌شود و لیزر تفاوت دمای کمتری ایجاد مینماید، به همین علت گرادیان دما کمتر بوده و موجب افزایش راندمان ساخت می‌شود. در این مدل‌سازی دمای بستر پودر ثابت در نظر گرفته شده است.

2- تخلخل پودر در نظر گرفته نشده است. در میان ذرات پودر فضاهای خالی وجود دارد که بسته به نوع و کیفیت آن تخلخل متفاوت است. بطورکلی، در نظر گرفتن اثر تخلل پودر موجب افزایش چشمگیر حجم و طولانی شدن زمان محاسبات است. مشابه با مرجع [7]، برای جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد مدل‌سازی تخلخل و برهمکنش بین هوای داخل پودر و خود پودر، در نظر گرفته نشده است.

3- خواص حرارتی، ثابت در نظر گرفته شده است. تغییرات ضرایب حرارتی پلی آمید-12 در حین انجام سینترینگ اندک است. به همین علت این ضرایب از جمله ضرایب انتقال حرارت و یا ظرفیت گرمایی ثابت در نظر گرفته شده است.

4- تنش‌های تسلیم، کرنش‌های پلاستیک و ضرایب الاستیسیته متغیر در نظر گرفته شده است. یعنی با تغییرات دمای پودر این ضرایب تغییر می‌کند. در هنگامیکه ماده لایه مورد نظر بصورت پودر است و لیزر از آن عبور نکرده، مدول الاستیسیته بسیار کم و در حد صفر برای آن تعریف شده است. با عبور لیزر از روی هر ناحیه از لایه، مدول الاستیسیته آن تغییر کرده و با توجه به منحنی مدول الاستیسیته-دما که در خواص ماده تعریف شده است، تغییر می‌کند.

2-1- مدل‌سازی فرایند

در قسمت تحلیل‌های حرارتی، معادله انتقال حرارت سه بعدی هدایتی زیر حل می‌گردد که بصورت رابطه (1) می‌باشد[16]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\mathring{q}}{K}=\frac{1}{\propto}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

شرایط اولیه برای دمای پودر ثابت و برابر دمای پیش گرم معمول در دستگاه‌های SLS که برای پلی‌آمید-12 منظور می‌شود. همچنین شرایط مرزی برای ناحیه زیرین پودر و روی پودر که با گاز بی اثر در داخل محفظه دستگاه تبادل دارد، بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

شرایط اولیه برای دمای پودر ثابت و برابر دمای پیش گرم معمول در دستگاه‌های SLS که برای پلی‌آمید-12 منظور می‌شود. همچنین شرایط مرزی برای ناحیه زیرین پودر و روی پودر که با گاز بی اثر در داخل محفظه دستگاه تبادل دارد بصورت روابط (2) و (3) در نظر گرفته شده است [16]:

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{z=d}=h(T_w-T_\infty) \quad (2)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{z=0}=0 \quad (3)$$

در ابتدا به مدل‌سازی حرارتی اجزاء محدود پودر پرداخته می‌شود. مرادی و همکاران [18,17] برای شبیه سازی اجزاء محدود فرایند سوراخ‌کاری جهت تعیین توزیع گوسین مناسب پرتو لیزر از سابروتین DFLUX برای پیاده‌سازی منبع گرمایی لیزر با زبان فرترن استفاده کرده است. همان‌طور که گفته شد، معادلات خطوط اسکن لیزر توسط سابروتین DFLUX فرترن نوشته شده است. این معادلات برحسب فاصله‌هاشورزنی، ضخامت لایه پودر، سرعت اسکن و توان لیزر می‌باشد که با تغییرات پارامترها و الگوریتم اسکن می‌توان نتایج مختلف از حل دمایی بدست آورد. پس از اسکن کانتورها و

نواحی داخلی قطعه، لایه پودر خنک می‌شود. خروجی این قسمت دمای تک تک نودها برحسب زمان می‌باشد. سپس این دما به عنوان بار حرارتی، ورودی برای مدل مکانیکی در نظر گرفته می‌شود. تنش‌های حرارتی بوجود آمده توسط گرادیان دما در قطعه موجب جابجایی المان‌ها می‌گردد. سپس با استفاده از سابروتین USDFLD مدول الاستیسیته تغییر می‌کند. به این ترتیب که با حرکت لیزر بر روی سطح، نقاط لیزر شده از مدول الاستیسیته صفر که حالت پودر است تغییر کرده و از این به بعد مدول الاستیسیته را از منحنی دمایی می‌گیرد. پس از جابجایی نودها و تغییر شکل لایه‌ی پودر و خنک شدن آن، شکل نهایی قطعه بدست می‌آید. در نهایت با اندازه گیری تغییر شکل‌ها و مقایسه نسبت به حالت ابتدایی، تابیدگی لایه بدست می‌آید.

2-2- تعریف خواص ماده

ماده‌ای که برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است پلی‌آمید-12 می‌باشد. خواص حرارتی و مکانیکی این ماده مطابق جدول 1 است [19]. در جدول 2 نقاط مشخصی برای مقادیر مدول الاستیسیته برحسب دما گزارش شده است.

2-3- شرایط اولیه و شرایط مرزی

برای جلوگیری از واکنش هوای بالای لایه پودر، به دلیل دمای بالای لیزر با ماده‌ی پلیمری، از گازهای بی اثر درون محفظه ساخت استفاده می‌کنند. بین لایه پودر و گاز داخل سیلندر، انتقال حرارت جابجایی صورت می‌گیرد که به عنوان شرایط مرزی مسئله است.

مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی ($h = 1 \times 10^{-6} \frac{W}{mm^2.K}$) در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه دمای پودر که همان دمای پیش گرم است برابر 178 درجه سانتی‌گراد اعمال شده است.

جدول 1 خواص حرارتی و مکانیکی پلی آمید-12 [19]

Table 1 Thermal and mechanical properties of polyamide-12 [19]

کمیت	مقدار کمیت		واحد
ضریب انتقال حرارت	0.24		$\frac{W}{m.K}$
چگالی	1		$\frac{gr}{cm^3}$
گرمای نهان ذوب	70		$\frac{J}{gr}$
دمای ذوب	190		°C
دمای جامد شدن	160		°C
تنش تسلیم	دمای 300کلوین	46	MPa
	دمای 600 کلوین	1	
ظرفیت حرارتی	2500		$\frac{J}{kg.K}$
ضریب پواسون	0.3		-
ضریب انبساط حرارتی	1.5×10^{-4}		$\frac{1}{K}$

جدول 2 مقادیر مدول الاستیسیته برای دماهای مختلف در محدوده کاری فعلی[20]

Table 2 Modulus of elasticity for different temperatures in the current working range [20]

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

2-4- شرایط مرزی مکانیکی

شرایط مرزی قطعه در حل مکانیکال در سه نقطه تعریف می‌شود. جابجایی‌ها در سه نقطه، به ترتیب در سه راستا، در دو راستا و در یک راستا صفر شده است که موجب گرفتن درجات آزادی جسم در فضا می‌شود.

2-5- معادله شار حرارتی لیزر

معادله توزیع حرارتی لیزر که توسط سابروتین فرترن نوشته و به عنوان بار حرارتی به آباکوس وارد می‌گردد، از تابع توزیع نرمال یا همان توزیع گوسین پیروی می‌کند و رابطه (4) توزیع حرارتی گوسین لیزر را نشان می‌دهد [20]:

$$q(r) = \frac{2P}{\pi r_0^2} e^{\frac{-2r^2}{r_0^2}} \tag{4}$$

رابطه (4)، توزیع حرارتی را نسبت به شعاعی از مرکز تابش لیزر نشان می‌دهد 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.

3- صحت سنجی مدل اجزاء محدود

برای صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، ابتدا به مدل‌سازی اجزاء محدود یک لایه از مقطع یک تیر پرداخته می‌شود. سپس چند نمونه تک لایه توسط دستگاه SLS تست انجام شده و با مدل اجزاء محدود مقایسه می‌گردد.

3-1- تست‌های تجربی نمونه مقطع تیر

دستگاه‌های تجاری SLS فعلی در دسترس، تعدادی محدودی الگوریتم اسکن آماده جهت انتخاب دارند که ساده می‌باشند و قابلیت تغییر الگوریتم و پترن اسکن را ندارند. برای اجرا و پیاده سازی الگوی اسکن بر روی قطعات، خطوط و منحنی‌های الگو به نقاطی تبدیل شدند و لیزر از این نقاط عبور میکند. شکل 1، دستگاه T1-R230 که تست‌ها در آن انجام شده است را نشان می‌دهد. لیزر استفاده شده در دستگاه لیزر CO_2 می‌باشد.

جنس پودر استفاده شده پلی آمید-12 می‌باشد. قطر ذرات پودر که در آزمایش‌ها استفاده شده است، 50 میکرومتر است. پارامترهای دستگاه که در این تست‌ها ثابت در نظر گرفته شده و در جدول 3 آمده است.

Fig. 1 The SLS device for testing

شکل 1 دستگاه SLS مورد استفاده جهت انجام تست

جدول 3 پارامترهای دستگاه در تست تجربی

Table 3 Device parameters of the experimental test

توان لیزر	سرعت اسکن	فاصله هاشورزنی	دمای بستر پودر	دمای محیط	چگالی انرژی	زمان خنک کاری	ضخامت لایه
20	2500	12.0	447 تا 449	360	05.0	5	12.0

در این تحقیق، به جهت تحلیل دقیق‌تر تابیدگی قطعه و پارامترهای مورد نظر از تکنیک اسکن گوشه‌ها، استفاده نشده است. به همین دلیل گوشه‌های جسم انحنای کمی دارد. در شکل 2، هشت نمونه ساخته شده نمایش داده شده است.

3-2- اندازه گیری تابیدگی قطعه نمونه‌های آزمایش

معیار تابیدگی قطعه جهت اندازه گیری نمونه‌های تست شده، مجموع زوایایی خطوطی است که مرکز نمونه را به دو سر آن متصل می‌کند. این زاویه در شکل 3 نمایش داده شده و با A مشخص شده است. شکل 4، یک نمونه از آزمایشات تجربی انجام شده توسط دستگاه SLS را از نمای جانبی نشان می‌دهد.

3-3- نتایج تست تجربی

پس از معرفی معیار تابیدگی قطعه برای نمونه‌های تست شده، زوایای مورد نظر اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول 4 مشخص شده است. تابیدگی قطعه برای مربوط به آزمایشات یک مقطع تیر هشت مرتبه تکرار آزمایش بدست آمده است.

3-4- نتایج صحت سنجی

برای صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود مقایسه‌ای بین نتایج تجربی بدست آمده از تست تجربی و مدل اجزاء محدود تیر تک لایه (قطعه با مقطع H شکل) انجام می‌شود. نتایج تابیدگی قطعه مدل اجزاء محدود و تست تجربی بر اساس معیار تغییر زاویه و همچنین میزان خطا در جدول 5 ارایه شده است.

در شکل 5 نمونه‌ای از مدل اجزاء محدود مقطع تیر نشان داده شده است. در این شکل U معرف قدر مطلق جابجایی می‌باشد و برحسب میلی‌متر است. با توجه به مقایسه نتایج بدست آمده از تستهای تجربی و شبیه سازی مدل اجزاء محدود، خطای تابیدگی قطعه در حدود 11 درصد است و خطای قابل قبولی می‌باشد. این خطا می‌تواند ناشی از فرضیات ساده کننده مدل اجزاء محدود باشد.

در تست‌های تجربی دمای بستر پودر در تمام نواحی یکسان نیست و

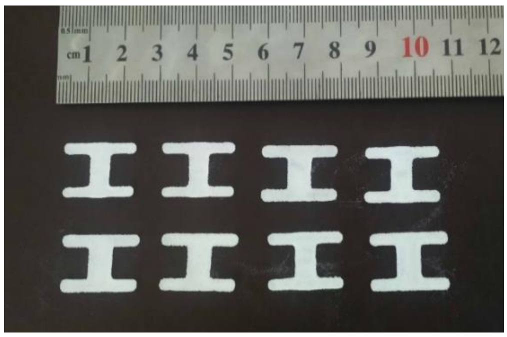


Fig. 2 Produced parts by the SLS machine

شکل 2 قطعات ساخته شده توسط دستگاه SLS

Fig. 3 The measured angle for the part warping criterion

شکل 3 زاویه اندازه گیری شده برای معیار تابیدگی قطعه

Fig. 4 The side view of the section of the beam for measuring the part warping

شکل 4 نمای جانبی مقطع تیر برای اندازه‌گیری تابیدگی قطعه

جدول 4 نتایج تست تجربی مربوط به قطعه با مقطع H شکل

Table 4 Experimental results of the part with H-shape section

آزمایش‌ها	تابیدگی قطعه برحسب درجه
آزمایش 1	16.4
آزمایش 2	19.1
آزمایش 3	19.6
آزمایش 4	17.4
آزمایش 5	15.5
آزمایش 6	17.3
آزمایش 7	17
آزمایش 8	17.3

جدول 5 مقایسه نتایج مدل تست و اجزاء محدود

Table 5 Comparing results from the test and the finite element model

صحت سنجی	میانگین نتایج تست تجربی (درجه)	میانگین نتایج مدل اجزاء محدود (درجه)	درصد خطا
مقطع تیر با اسکن ساده	17.45	15.51	11.1

اختلاف اندکی دارد که موجب بوجود آمدن گرادیان‌های حرارتی می‌شود، اما در شبیه سازی مدل اجزاء محدود، این دما در تمام نقاط سطح یکسان در نظر گرفته می‌شود. البته عوامل دیگر مانند زمان تأخیر لیزر در حالت تست تجربی و یا در نظر نگرفتن ضریب جذب می‌تواند تأثیرگذار باشد.

4- بهینه‌سازی طول بردار اسکن و تعداد آفست

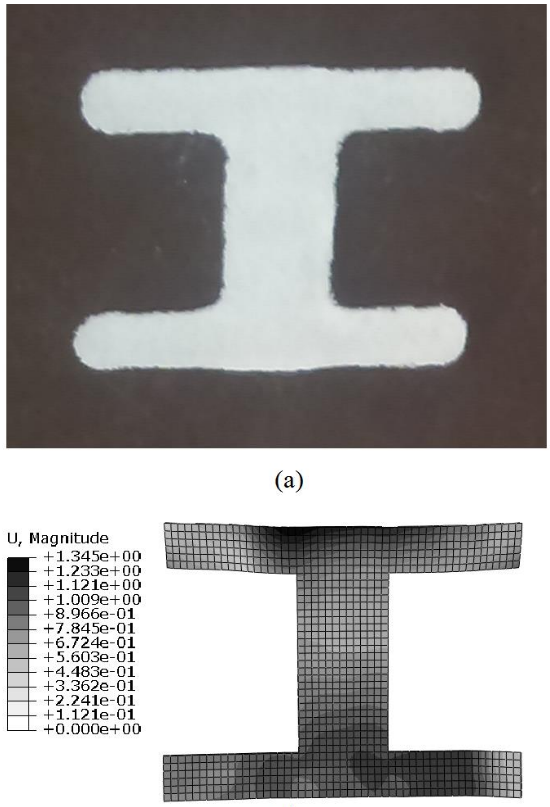
برای محاسبه طول بردار اسکن بهینه و تعداد کانتور بهینه تعداد آزمایش توسط مدل اجزاء محدود انجام می‌شود. پارامترهای دیگر اسکن، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به‌طورکلی، عواملی که می‌توانند بر روی تعداد کانتور n تأثیرگذار باشند، عبارتند از:

1- سرعت اسکن (سرعت کانتور و سرعت‌هاشورزنی)

2- توان لیزر (توان کانتور و توان‌هاشورزنی)

3- فاصله‌هاشورزنی و فاصله کانتور وهاشورزنی

پارامترهای دیگر دستگاه مانند قطر لکه لیزر، دمای محیط، دمای بستر پودر ثابت در نظر گرفته می‌شود.



(a)

(b)

Fig. 5 Comparing of obtained results from (a) the experimental test (b) the finite element simulation on a part with H-shape section for verification

شکل 5 مقایسه نتایج حاصل از (a) تست تجربی (b) شبیه سازی اجزای محدود بر روی یک قطعه با سطح مقطع H - شکل جهت صحت سنجی

حال بایستی با استفاده از مدل‌سازی و آزمایش تابعی برای تعداد کانتورn برحسب پارامترهای مربوطه بدست آورد، به نحوی که تابیدگی قطعه مینیمم شود. به طورکلی، تابع تابیدگی قطعه برحسب تعداد کانتور در رابطه (5) نشان داده شده است.

$$Warp = [f(n)] \quad (5)$$

عواملی که می‌توانند بر روی طول بردار اسکن b تأثیر گذار باشند به نحوی که تابع هدف تابیدگی قطعه مینیمم شود، عبارتند از:

- سرعت اسکن (سرعت کانتور و سرعت‌هاشورزنی)
- توان لیزر (توان کانتور و توان‌هاشورزنی)
- فاصله‌هاشورزنی و فاصله کانتور وهاشورزنی

پارامترهای دیگر دستگاه مانند قطر لکه لیزر، دمای محیط، دمای بستر پودر ثابت در نظر گرفته شده است. حال بایستی با استفاده از مدل‌سازی و آزمایش بر روی مدل، تابعی برای طول بردار اسکن b برحسب پارامترهای گفته شده در بالا بدست آورد به نحوی که تابیدگی قطعه مینیمم شود. به طورکلی، تابع تابیدگی قطعه برحسب طول بردار اسکن در رابطه (6) نشان داده شده است.

$$Warp = [g(b)] \quad (6)$$

4-1- مدل‌سازی برای بهینه‌سازی تعداد کانتور (n)

برای انجام مدل‌سازی یک صفحه مربعی با ابعاد 10×10 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل 6 صفحه مدل‌سازی شده نشان داده شده است. در اینجا 10 آزمایش انجام شده و تعداد کانتور از 1 تا 10 تغییر کرده است. در شکل 7، نمونه ای از حل مدل حرارتی برای $n = 2$ نشان داده شده است. پارامترهای اسکن در این آزمایشات ثابت فرض شده که در جدول 6 آمده است.

زمان اسکن کانتور و اسکن‌هاشور برای تمامی حالات اسکن از یک تا ده کانتور و برای $V = 1800\text{mm/s}$ و $Ha = 0.12\text{mm}$ محاسبه شده است و

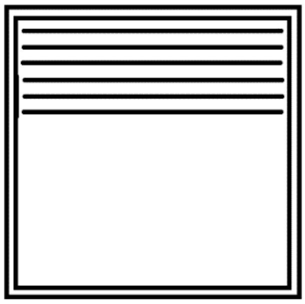


Fig. 6 Square shaped layer for modeling to change the number of contours

شکل 6 لایه مربعی شکل جهت مدل‌سازی برای تغییر تعداد کانتور

جدول 6 پارامترهای دستگاه در مدل اجزاء محدود

Table 6 Device parameters in the finite element model

پارامتر اسکن	قطر لکه (mm)	ضخامت لایه (mm)	توان اسکن (W)	سرعت اسکن (mm/s)	فاصله هاشورزنی (mm)	دمای بستر پودر (K)	دمای محیط (K)
مقدار پارامتر	0.6	0.12	12	1800	0.12	451	360

جدول 7 زمان اسکن کانتور و اسکن‌هاشور برای 10 آزمایش

Table 7 Cantor scan time and Hatching scan time for 10 experiments

تعداد کانتور (آفست)	زمان اسکن کانتور (s)	زمان اسکن‌هاشور (s)
1	0.021	0.410
2	0.042	0.390
3	0.063	0.370
4	0.082	0.350
5	0.101	0.331
6	0.120	0.031
7	0.138	0.294
8	0.155	0.277
9	0.172	0.260
10	0.189	0.244

جدول 8 نتایج تابیدگی قطعه بر حسب تعداد کانتور شبیه سازی اجزای محدود برمبنای 10 آزمایش

Table 8 Results of the part warping with respect to the number of contours from the FEM simulations based on 10 experiments

تعداد کانتور (آفست)	تابیدگی قطعه (مجموع جابجایی کلیه نودها) (mm)
1	2324
2	4377
3	3730
4	3509
5	2248
6	5374
7	2242
8	2324
9	7028
10	3215

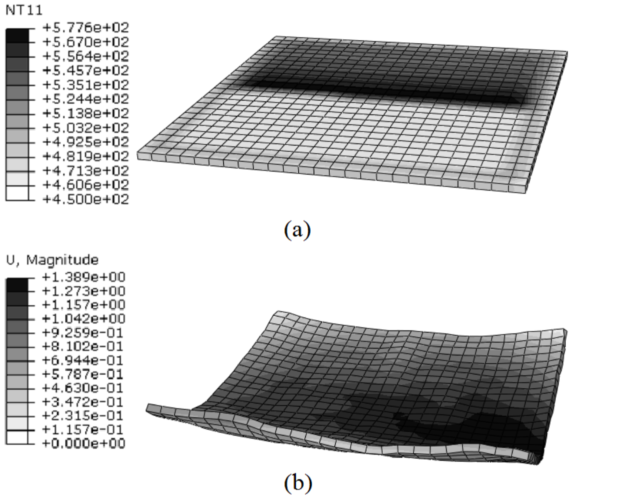


Fig. 7 a) Solving the thermal model b) Solving the mechanical model for $n = 3$ mode

شکل 7 a) حل مدل حرارتی b) حل مدل مکانیکی برای برای حالت $n = 3$

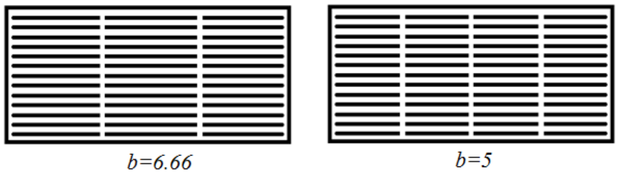


Fig. 8 The number of contours in the experiments

شکل 8 تعداد کانتورها در آزمایشات

جدول 9 زمان اسکن کانتور و اسکن‌هاشور برای 5 آزمایش

Table 9 Contour and hatching scan times for 5 experiments

طول بردار اسکن (mm)	زمان اسکن کانتور (s)	زمان اسکن‌هاشور (s)
4	0.032	0.849
5	0.032	0.849
6.66	0.032	0.849
10	0.032	0.849
20	0.032	0.849

در جدول 7 آمده است. اندازه مش‌بندی برای تمامی مدل‌ها 4.0 و معیار تابیدگی قطعه، مجموع جابجایی تمامی نودها از حالت اولیه در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی المان محدود در جدول 8 نشان داده شده است. در شکل 7 حل مدل حرارتی و حل مدل مکانیکی برای حالت $n = 3$ نشان داده شده است. دما در مدل‌های حرارتی برحسب کلوین می‌باشد. در مدل حرارتی، U معرف جابجایی کل برحسب میلی‌متر می‌باشد.

4-2- مدل‌سازی برای بهینه‌سازی طول بردار اسکن (b)

برای انجام مدل‌سازی یک صفحه مستطیلی با ابعاد 200×100 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در اینجا 5 آزمایش انجام شده است و طول بردار اسکن از $b = 4\text{mm}$ تا $b = 20\text{mm}$ تغییر کرده است. در شکل 8 برخی از نمونه‌های مدل‌سازی شده ($b = 5\text{mm}$, $b = 6.66$ mm)، نشان داده شده است.

پارامترهای اسکن در این آزمایشات ثابت در نظر گرفته شده است و در جدول 6 آمده است. زمان اسکن کانتور و اسکن‌هاشور در تمامی حالات بردار اسکن یکسان و برای $V = 1800\text{mm/s}$ و $Ha = 0.12\text{mm}$ محاسبه شده است (جدول 9). اندازه مش‌بندی برای تمامی مدل‌ها 0.4 و معیار تابیدگی قطعه، مجموع جابجایی تمامی نودها از حالت اولیه در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی المان محدود در جدول 10 ارایه شده است.

نمودار نتایج مدل‌سازی (تابع تابیدگی قطعه) برحسب طول بردار اسکن در شکل 9 نمایش داده شده است. مطابق نتایج ارایه شده در جدول 10 و شکل 9، کمترین میزان تابیدگی قطعه در شرایطی است که طول بردار اسکن برابر با 6.66mm است.

4-3- تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی

مطابق با شکل 9، نمودار تابیدگی برحسب طول بردار اسکن نشان می‌دهد، اگر مقدار طول بردار اسکن از مقدار بهینه فاصله بگیرد و افزایش یابد، مقدار تابیدگی قطعه زیاد می‌شود، زیرا تنش‌های حرارتی در یک راستا اعمال شده و در همان راستا تابیدگی زیادی ایجاد می‌شود. همچنین اگر از مقدار بهینه کمتر شود، تابیدگی قطعه نیز افزایش می‌یابد، زیرا مجموعه خطوط اسکن کوتاه در یک ناحیه کوچک موجب بالا رفتن دما در آن نقطه شده و گرادیان حرارتی نسبت به سایر نقاط اسکن نشده بالاتر می‌رود. نتیجه دیگر از نمودار طول بردار اسکن این است که در بردارهای بزرگتر از مقدار بهینه، طراحی مقاوم و پایدارتر است. در شکل 10 حل مدل حرارتی و حل مدل مکانیکی با تغییر طول بردار اسکن برای حالت $b = 4$ mm نشان داده شده است. دما برحسب کلوین و U جابجایی کل برحسب میلی‌متر می‌باشد.

4-4- بهینه‌سازی همزمان طول بردار اسکن و تعداد کانتور و پارامترهای مربوطه بر مبنای تاگوچی

با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، می‌توان الگوی مناسبی برای تغییرات متغیرهای طراحی را انتخاب نمود و بر روی مدل المان محدود اجرا کرد تا حالت بهینه کلیه پارامترها بدست آید. برای تحلیل و بدست آوردن مدل برای تعداد کانتور و طول بردار اسکن برحسب پارامترهای اسکن، بایستی آزمایش‌های متعددی انجام گیرد. با توجه به اینکه تحلیل المان محدود زمان زیادی می‌گیرد، به جهت کاهش محاسبات، از الگوی مناسبی منطبق بر روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. به طور کلی

جدول 10 نتایج شبیه سازی اجزای محدود بر مبنای 5 آزمایش

Table 10 Results of FEM simulations based on 5 experiments

طول بردار اسکن b (mm)	تابیدگی قطعه (مجموع جابجایی کلیه نودها) (mm)
4	8776
5	6527
6.66	5002
10	6414
20	7545

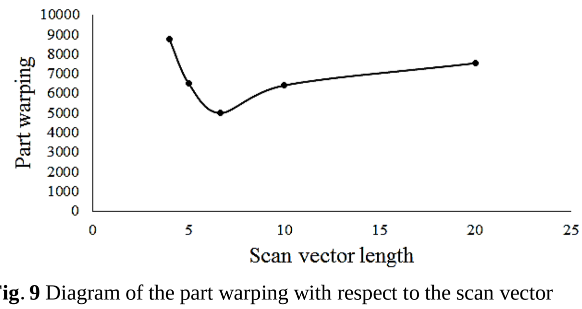


Fig. 9 Diagram of the part warping with respect to the scan vector length

شکل 9 نمودار تابیدگی قطعه برحسب طول بردار اسکن

انتخاب سطوح عوامل در روش تاگوچی متناسب با ماهیت عوامل مورد مطالعه، اطلاعات تجربی قبلی از اثرات آنها بر روی خروجی مورد مطالعه، تعداد آزمایش مورد نظر و شرایط آزمایش انجام می‌گردد. در این مقاله، انتخاب سطوح آزمایش در روش تاگوچی با مطالعه و بررسی مقالات متعددی که به بررسی پارامترهای اسکن پرداخته اند و رعایت ملاحظات مربوط به تعداد و شرایط آزمایش‌ها انجام شده است.

برای مدل کردن تعداد کانتور در قطعه با مقطع مستطیلی از آرایه $L16$ تاگوچی و برای مدل کردن طول بردار اسکن از آرایه $L9$ تاگوچی استفاده شده است که در ادامه به تحلیل و بررسی نتایج پرداخته می‌شود.

4-5- تخمین بهینه تعداد کانتور بر مبنای روش تاگوچی

پارامترهایی که می‌توانند برروی تعداد کانتور بهینه تأثیر گذار باشند، در

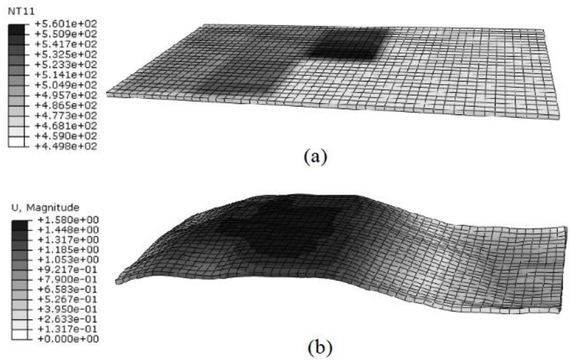


Fig. 10 Results of FEM simulations based on a) the thermal model b) the mechanical model for $b = 4$mm

شکل 10 نتایج شبیه سازی اجزای محدود بر مبنای a) مدل حرارتی b) مدل مکانیکی برای حالت $b = 4$ mm

جدول 11 سطوح تغییر پارامترها با تغییر تعداد کانتور

Table 9 Levels of parameters by changing the number of contours

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
n تعداد کانتور	1	4	7	10
P (W) توان لیزر	10	15	20	25
V (m/s) سرعت اسکن	1500	2000	2500	3000
Ha (mm) فاصله‌هاشورزنی	0.1	0.13	0.16	0.19

جدول 12 آرایه L16 تاگوچی بر اساس سطوح پارامترها

Table 12 Taguchi L16 array based on parameters levels

شماره آزمایش	n	P	V	Ha	تابیدگی قطعه (mm)
1	1	1	1	1	2644
2	1	2	2	2	3774
3	1	3	3	3	3402
4	1	4	4	4	1150
5	2	1	2	3	1664
6	2	2	1	4	2811
7	2	3	4	1	2728
8	2	4	3	2	2242
9	3	1	3	4	3014
10	3	2	4	3	3017
11	3	3	1	2	6483
12	3	4	2	1	2987
13	4	1	4	2	6099
14	4	2	3	1	3438
15	4	3	2	4	4053
16	4	4	1	3	8732

بخش قبل تشریح شد. این پارامترها شامل توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله‌هاشورزنی می‌باشد. پارامترها در چهار سطح تغییر داده شده و در جدول 11 نشان داده شده است. سطح بندی آزمایشات بر اساس آرایه L16 تاگوچی و نتایج هر آزمایش پس از تحلیل در نرم‌افزار المان محدود در جدول 12 آمده است. نمودار نتایج میانگین‌ها در شکل 11 آمده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر پارامتر بهترین سطح جهت تابیدگی قطعه کمتر مشخص شده است.

در شکل 12، حل مدل حرارتی و همچنین حل مکانیکی برای آزمایش نهم نشان داده شده است. دما برحسب کلوین و U معرف جابجایی کل می‌باشد.

4-6- تخمین بهینه طول بردار اسکن بر مبنای روش تاگوچی

در این بخش، جهت تعیین سطوح بهینه پارامترهای مؤثر برروی طول بردار اسکن بهینه یعنی توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله‌هاشورزنی از روش بهینه‌سازی تجربی تاگوچی استفاده می‌گردد. به این منظور، پارامترها در چهار سطح تغییر داده شده و در جدول 13 نشان داده شده است.

سطح بندی آزمایش‌های مربوط به مقطع تیر بر اساس آرایه L9 تاگوچی و نتایج هر آزمایش پس از تحلیل در نرم‌افزار المان محدود در جدول 14 آمده

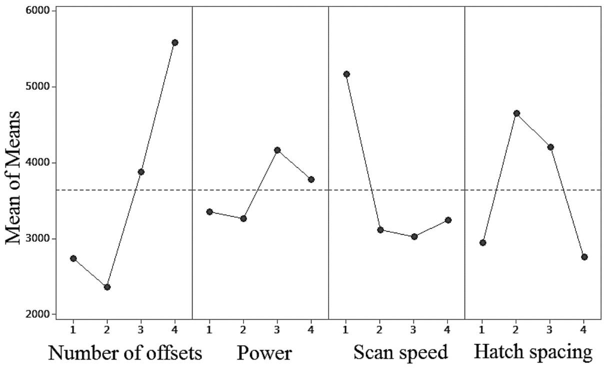


Fig. 11 Results of the mean part warping with respect to the process parameters

شکل 11 نتایج میانگین‌تابیدگی نسبت به پارامترهای فرایند

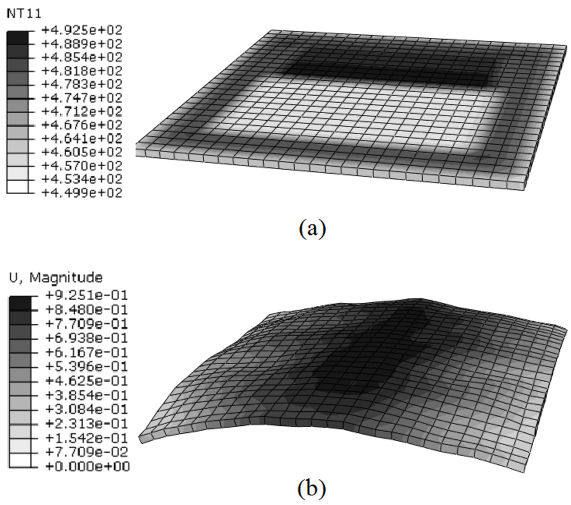


Fig. 12 Results of FEM simulations based on a) the thermal model b) the mechanical model for the ninth test

شکل 12 نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود بر مبنای a) مدل حرارتی b) مدل مکانیکی برای آزمایش نهم

جدول 13 سطوح پارامترهای مؤثر

Table 13 Levels of effective parameters

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
طول بردار اسکن b	4	6.66	20
توان لیزر P	10	15	20
سرعت اسکن V	1500	2000	2500
فاصله‌هاشورزنی Ha	0.1	0.13	0.16

است.

نمودار نتایج میانگین‌ها در شکل 13 ارایه شده است. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، برای هر پارامتر بهترین سطح بر اساس کمترین تابیدگی قطعه تعیین شده است. در جدول 15، مقادیر بهینه برای پارامترهای اسکن گزارش شده است.

در پایان، با استفاده از تحلیل حساسیت و رگرسیون خطی، ضرایب حساسیت محاسبه و درصد تأثیر هر پارامتر مشخص گردید. ارتباط تابیدگی قطعه را بر حسب پارامترهای مربوطه می‌توان بر اساس معادله رگرسیون خطی تابیدگی نوشت. رابطه 7 معادله رگرسیون را نمایش می‌دهد.

$$Warp = 8810 + 2638\,b - 1180\,P + 1765\,V - 2191\,Ha \qquad (7)$$

بطوری‌که $Warp$ معرف تابیدگی قطعه است. در رابطه (7)، پارامترهای b، P، V و Ha به ترتیب بیانگر طول بردار اسکن، توان لیزر، سرعت اسکن و طول فاصله‌هاشور زنی است.

شکل 14، هیستوگرام درصد تأثیر هر یک از پارامترها بر روی میزان تابیدگی را نشان می‌دهد.

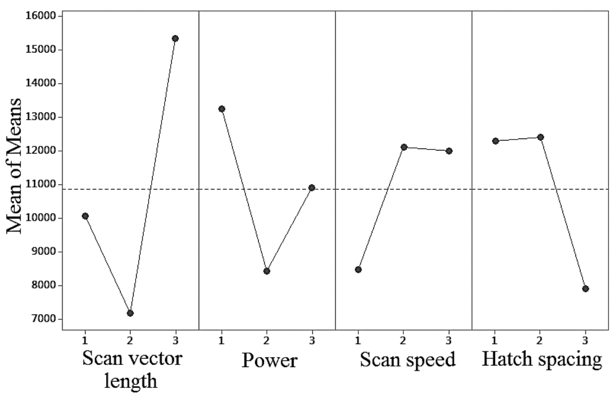
5-نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از روش تاگوچی، مقادیر بهینه پارامترهای فرایند

جدول 14 آرایه L9 تاگوچی بر اساس سطوح پارامترها

Table 14 Taguchi L9 array with respect to parameters levels

تابیدگی قطعه	Ha	V	P	b	شماره آزمایش
11513	1	1	1	1	1
10445	2	2	2	1	2
8302	3	3	3	1	3
7867	3	2	1	2	4
7311	1	3	2	2	5
6357	2	1	3	2	6
20432	2	3	1	3	7
7584	3	1	2	3	8
18074	1	2	3	3	9



شکل 13 نتایج میانگین تابیدگی قطعه نسبت به پارامترهای فرایند

Fig. 13 Results of the mean part warping with respect to the process parameters

جدول 15 مقادیر بهینه پارامترهای اسکن در مدل اجزاء محدود

Table 15 Optimal values of scan parameters in the finite element model

پارامتر اسکن	طول بردار اسکن (mm)	توان لیزر (W)	سرعت اسکن (m/s)	فاصله‌هاشورزنی (mm)
مقدار بهینه	6.66	15	1500	0.16

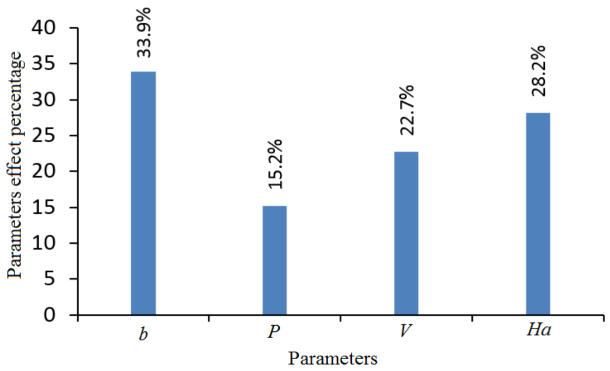


Fig. 14 Histogram of the parameter’s effect on the part warping

شکل 14 هیستوگرام درصد تأثیر هر پارامتر بر روی تابیدگی قطعه

SLS (طول بردار اسکن و تعداد آفست یا کانتور)، توان لیزر، سرعت حرکت لیزر و فاصله‌هاشورزنی جهت کمینه سازی تابیدگی قطعه ناشی از تنش‌های حرارتی بر مبنای مدل اجزای محدود تعیین گردید. با تغییر طول بردار اسکن و تعداد آفست در الگوی اسکن می‌توان تابیدگی ناشی از تنش‌های پسماند حرارتی را کاهش داد. پارامترهای بهینه برای کاهش تابیدگی در طول بردار اسکن 6.66mm، توان لیزر 15w، سرعت اسکن 1500mm/s و فاصله‌هاشورزنی 0.16mm بدست آمده است. مدل اجزاء محدود با استفاده از دو سابروتین فرترن و اتصال آن به نرم‌افزار آباکوس انجام گردید. یکی از سابروتین‌ها برای مدل‌سازی حرکت لیزر بر روی سطح پودر و یکی از سابروتین‌ها برای تبدیل ضرایب الاستیسیته از حالت پودر (که نزدیک به صفر است) به حالت جامد (که از روی منحنی دمایی و برحسب دما مشخص می‌شود)، استفاده گردید. جهت صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود چند نمونه آزمایش در دستگاه SLS با استفاده از پودر پلی آمید-12 انجام شد. تابیدگی مدل‌های تست شده اندازه‌گیری گردید و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل اجزاء محدود پیشنهادی و مورد استفاده در بهینه‌سازی تجربی به روش تاگوچی مقایسه شد. نتایج حاصل نشان داد که خطای حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج تجربی در محدوده قابل قبول (11 درصد) است.

6- مراجع

[1] Y. Shi, W. Zhang, Y. Cheng, S. Huang, Compound scan mode developed from subarea and contour scan mode for selective laser sintering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 6, pp. 873-883, 2007.

[2] P. K. Jain, P. M. Pandey, P. V. Rao, Effect of delay time on part strength in selective laser sintering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 117-126, 2009.

[3] J.-P. Kruth, J. Deckers, E. Yasa, R. Wauthlé, Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method, *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 6, pp. 980-991, 2012.

[4] F. Calignano, D. Manfredi, E. Ambrosio, L. Iuliano, P. Fino, Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 9-12, pp. 2743-2751, 2012.

[5] C. Wang, Q. Dong, X. Shen, Warpage optimization of polystyrene in selective laser sintering using neural network and genetic algorithm, *Advanced Science Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 669-674, 2011.

[6] P. K. Jain, P. M. Pandey, P. Rao, Experimental investigations for improving

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.

[15] 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.

[16] K. Dai, L. Shaw, Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification, *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 18, pp. 4743-4754, 2005.

[17] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 14, No. 3, pp. 464-484, 2017.

[18] E. Golchin, M. Moradi, S. Shamsaei, Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Modares Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, November 4-5, 2015. (in Persian فارسی)

[19] J. Mark, *Polymer Data Handbook*, pp. 225-229, New York: Oxford University Press, 2009.

[20] Y. Zhang, S. Li, G. Chen, J. Mazumder, Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics & Laser Technology*, Vol. 48, No. Supplement C, pp. 405-414, 2013.

part strength in selective laser sintering, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 3, No. 3, pp. 177-188, 2008.

[7] 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.

[8] D. Ding, Z. S. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1-4, pp. 173-183, 2014.

[9] J. Yu, X. Lin, L. Ma, J. Wang, X. Fu, J. Chen, W. Huang, Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1094-1104, 2011.

[10] J. Yang, H. Bin, X. Zhang, Z. Liu, Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering (SLS), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 3, pp. 293-300, 2003.

[11] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 34, pp. 8-19, 2015.

[12] 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.

[13] R. Stamp, P. Fox, W. O'neill, E. Jones, C. Sutcliffe, The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Vol. 20, No. 9, pp. 1839-1848, 2009.

[14] L. E. Criales, Y. M. Arısoy, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez, T. Özel, Laser