E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 11, Number 1, 2025

Experimental investigation, statistical analysis, and optimization of the selective laser melting process for the titanium alloy Ti-6Al-4V

M. Safari*, I. Dehfouli
Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Received 21 December 2024 ; Accepted 4 February 2025

Abstract
In this study, components made of titanium alloy Ti-6Al-4V are produced using the selective laser melting process. Additionally, effects of laser power, laser scanning speed, and the amount of overlap between adjacent layers on the surface roughness of produced parts are investigated using design of experiment method based on response surface methodology. The results indicate that surface roughness of components created by selective laser melting process first decreases with an increase in laser power and then increases with further increases in laser power. Moreover, increasing the laser scanning speed leads to an increase in surface roughness of produced components. Furthermore, as the overlap of adjacent layers increases, the roughness of produced parts initially decreases and then increases. To achieve components with the least surface roughness, optimization of the process input parameters was conducted, revealing that with a laser power of 150 watts, a laser scanning speed of 500 mm/s, and an overlap amount of 67.8 microns, components made from the titanium alloy Ti-6Al-4V can be produced with a minimum surface roughness of 1.44 microns using the selective laser melting process.

Keywords:Selective laser melting process, Titanium alloy Ti-6Al-4V, Surface roughness.

*Corresponding Author: M. Safari, m.safari@arakut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404

بررسی تجربی، تحلیل آماری و بهینه سازی فرایند ذوب انتخابی لیزر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V

مهدی صفری*، ایمان دهفولی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

دریافت مقاله: 1403/10/01 ؛ پذیرش مقاله: 1403/11/16

چکیده

دراین پژوهش، قطعات از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از فرایند ذوب انتخابی لیزر تولید می‌شوند. همچنین با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش پاسخ سطح، اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح قطعات تولید شده مطالعه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند زبری سطح قطعات تولید شده توسط روش ذوب انتخابی لیزر، با افزایش توان لیزر ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس با افزایش بیشتر توان لیزر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت اسکن لیزر، زبری سطح قطعات تولید شده افزایش می‌یابد. به علاوه زبری قطعات تولید شده، با افزایش مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس افزایش می‌یابد. به منظور دستیابی به قطعاتی با کمترین مقدار زبری سطح، بهینه‌سازی پارامترهای ورودی فرایند انجام شده و مشخص شد که با توان لیزر برابر با 150 وات، سرعت اسکن لیزر برابر با 500 میلیمتر بر ثانیه و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور برابر با 67/8 میکرون می‌توان قطعات از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با کمترین مقدار زبری سطح برابر با 1/44 میکرون توسط روش ذوب انتخابی لیزر تولید کرد.

کلمات کلیدی: فرایند ذوب انتخابی لیزر، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، زبری سطح.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مهدی صفری، m.safari@arakut.ac.ir

1- مقدمه

فناوری ساخت افزایشی به عنوان یک روش نوآورانه در تولید قطعات پیچیده و سفارشی در چند سال اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین و موفق‌ترین روش های فناوری ساخت افزایش، فرایند ذوب انتخابی لیزر می باشد. این فناوری با قابلیت تولید قطعات فلزی از پودرهای با دقت بالا، توانسته است پیشرفت های عمده‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، صنعت خودروسازی، پزشکی و الکترونیک ایجاد کند. SLM برای نخستین بار در اوایل دهه 90 میلادی معرفی شد و به لطف پیشرفت‌های علمی و فناوری‌های مواد، به سرعت در بین صنایع مختلف محبوبیت یافت. در گذشته، روش‌های تولید سنتی مانند ریخته‌گری و ماشین‌کاری برای تولید قطعات پیچیده و خاص با محدودیت‌هایی مواجه بودند اما فرایند ذوب انتخابی لیزر این امکان را فراهم می‌کند که طراحی‌های غیرممکن و اشکال پیچیده به راحتی تولید شوند. تحقیقات اولیه در زمینه SLMعمدتاً بر روی کاربرد آلیاژهای تیتانیوم و فولاد زنگ نزن متمرکز بود. اما به مرور زمان، سایر مواد مانند آلومینیوم، کبالت-

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

کروم و حتی مواد کامپوزیتی نیز به این فرایند اضافه شدند. این امر باعث گسترش کاربردهای SLM در صنایع مختلف شد و امکان تولید قطعات متنوعی با مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت را فراهم کرد. کیفیت و ویژگی‌های نهایی قطعه تولید شده به پارامترهای متعددی مانند توان لیزر، سرعت اسکن لیزر، ضخامت لایه و استراتژی‌های اسکن وابسته است. این روش در حوزه‌های مختلف صنعتی مانند هوافضا، پزشکی، خودرو سازی، صنایع الکترونیک و .... کاربرد دارد. طی سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در زمینه فرایند ذوب انتخابی لیزر انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می شود. کومار و همکاران [1] بر روی تأثیر توان لیزر، سرعت اسکن و دماهای ساخت مختلف بر ویژگیهای قطعه تولید شده پرداختند و دریافتند که تنظیم مناسب این پارامترها منجر به بهینه‌سازی خواص مکانیکی و کاهش عیوب می‌گردد. سینگ و همکاران [2] به بررسی مکانیزم‌های مختلف ایجاد عیوب در قطعات تولید شده با SLM پرداختند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تکنیک‌های میکروسکوپ نوری، نویسندگان به شناسایی حفرها ها، ترک‌ها و عیوب سطحی پرداخته و دلایل بروز آن‌ها شامل کیفیت پودر، پارامترهای حرارتی و استراتژی‌های اسکن را تجزیه و تحلیل کردند. لی و همکاران [3] به بهینه‌سازی پارامترهای مختلف SLM برای تولید فولاد زنگ نزن پرداختند. آن‌ها از روش‌های طراحی آزمایش‌ها برای شناسایی بهترین ترکیب پارامترها استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده بهینه از انرژی لیزر و الگوهای اسکن مشخص می‌تواند به افزایش کیفیت سطح و کاهش عیوب منجر شود. پاتل و همکاران [4] به بررسی تغییرات میکروساختاری در حین فرایند SLM آلیاژهای کبالت-کروم پرداخته و از تکنیک‌های میکروسکوپی برای بررسی تأثیر پارامترهای حرارتی و الگوی ایجاد حرارت استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که سریع‌ترین عمل انجماد منجر به ایجاد ساختارهایی با اندازه دانه کوچک‌تر و خواص مکانیکی بهتر می‌شود. گوپتا و همکاران [5] به معرفی مواد جدید و نوآورانه برای فرایند SLM پرداخته و بر اهمیت انتخاب صحیح مواد برای دستیابی به خواص مطلوب تأکید کردند. آن‌ها مواد جدیدی نظیر پودرهای کامپوزیتی و آلیاژهای خاص را بررسی کرده و آثار آن‌ها بر کیفیت و ساختار نهایی را تحلیل کردند. ژنگ و همکاران [6] تحلیلی جامع از تأثیر جهت ساخت بر خواص مکانیکی قطعات SLMارائه داده و با آزمایش‌های مکانیکی و بررسی‌های میکروسکوپی نشان دادند که تغییر در زوایای ساخت، تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و سختی قطعات ایجاد می‌کنند. چن و همکاران [7] روش‌های مختلف بهبود انتقال حرارت و کاهش تنش‌های حرارتی را در قطعات تولید شده با روش SLM بررسی کرده و تأکید کردند که اجرای این تکنیک‌ها می‌تواند به کاهش عیوب و بهبود کیفیت قطعه کمک کند. خان و همکاران [8] تأثیر استراتژی‌های مختلف اسکن بر روی تنش‌های باقی‌مانده در قطعات تولید شده با SLM را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی نحوه توزیع تنش‌های حرارتی و مکانیکی در اثر تغییر الگوهای اسکن را بررسی کرده و پیشنهاداتی برای به حداقل رساندن این تنش‌ها ارایه کردند. لیو و همکاران [9] در تحقیقی به توسعه فن‌آوری‌های پیشرفته SLM برای آلیاژهای با عملکرد بالا تمرکز کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از تکنیک‌های مدرنی نظیر روش‌های هوش مصنوعی و شبیه‌سازی عددی کمک شایانی در بهینه کردن مشخصات قطعات تولید شده خواهد کرد. منصوری و همکاران [10] به تأثیر مورفولوژی پودر بر عملکرد SLM پرداخته و نشان دادند که شکل و اندازه ذرات پودر نقش کلیدی در توزیع حرارت و کارایی فرایند دارند. نیمیر و همکاران [11] مقایسه‌ای جامع بین فرایند ذوب انتخابی لیزر و فرایند ذوب الکترونی برای تولید آلیاژهای تیتانیوم انجام داده و به مزایا و معایب هر رویکرد پرداخته و با بررسی کیفیت، هزینه‌های تولید و تأثیرات بر روی خواص مکانیکی و میکروساختار، توصیه‌هایی برای انتخاب روش مناسب ارائه دادند. کومار و همکاران [12] به بررسی تأثیر دما و چرخه‌های حرارتی بر روی خستگی حرارتی در قطعات تولید شده با SLM پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های خستگی را با موادی مختلف انجام داده و به نتایج قابل توجهی در زمینه آنالیز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

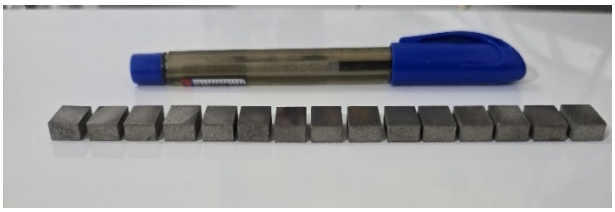
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

مکانیزم‌های شکست و شناسایی نقاط ضعف در طراحی و فرایند SLM دست یافتند. هافرکمپ و همکاران [13] به بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری زبری سطح در قطعات تولید شده با SLM پرداخته و مقایسه‌ای بین تکنیک‌های مختلف اندازه‌گیری از جمله میکروسکوپی و غیرمخرب ارائه دادند. سینگ و همکاران [14] ارتباط بین ویژگی‌های حفره‌های ایجاد شده در قطعات SLM و خواص مکانیکی آن‌ها را مطالعه کرده و نشان دادند که توزیع و شکل حفره ها بر استحکام و پایداری مکانیکی تاثیر مستقیمی دارد. راتهی و همکاران [15] به کاربردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی فرایند SLM پرداختند. آن‌ها تکنیک‌های مختلفی را برای شناسایی و پیش‌بینی بهترین پارامترها معرفی کردند که می‌توانست به کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کیفیت قطعات منجر شود. پاتل و همکاران [16] به بررسی رفتار خستگی آلیاژهای آلومینیومی تولید شده با SLM پرداختند. آن‌ها به تحلیل تأثیر پارامترهای تولید بر عمر خستگی این آلیاژها پرداخته و نشان دادند که مدیریت مناسب پارامترهای حرارتی و شیمیایی می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد خستگی فراهم آورد.

آلیاژ Ti-6Al-4V به دلیل خواص مکانیکی برجسته ای همچون نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی شناخته شده است. علاوه بر این، به طورگسترده در صنایع هوافضا، نظامی و پزشکی استفاده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود تحقیقات مختلفی در زمینه تولید قطعات با روش SLM انجام شده است ولی تعداد تحقیقاتی که با استفاده از روش‌های آماری اثر پارامترهای فرایند را بر ویژگی‌های قطعات تولید شده با روش SLM بررسی کنند علی الخصوص آلیاژ Ti-6Al-4V هنوز محدود بوده و نیاز به بررسیهای بیشتر و جامع‌تر می باشد. از این رو در این پژوهش با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و بکارگیری تکنیک روش پاسخ سطح به بررسی اثر پارامترهای فرایند SLM شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح قطعات تولید شده از پودر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نوآوری این مقاله در بکارگیری روش طراحی آزمایش ها، تحلیل جامع اثر پارامترها و بهینه سازی مقادیر پارامترهای ورودی فرایند ذوب انتخابی لیزر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V می باشد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شده است. اندازه ذرات پودر مورد استفاده 40 میکرون، مورفولوژی ذرات به شکل کروی و خلوص آن حدود 99/8 درصد می‌باشد. همچنین فرایند SLM توسط دستگاه چاپ سه‌بعدی SLM مدل M100Pشرکت طراحی و ساخت لایه نگار استفاده شده است. قطعات تولید شده از پودر Ti-6Al-4V به شکل مکعب های 1سانتی متر در 1 سانتی متر با ضخامت 4 میلی‌متر می‌باشند. در شکل(1) نمونه‌هایی از قطعات تولید شده با استفاده از تکنولوژی پرینت سه بعدی بر اساس روش SLM از پودر Ti-6Al-4V نشان داده شده است.



شکل 1 - نمونه هایی از قطعات تولید شده با استفاده از تکنولوژی پرینت سه بعدی بر اساس روش SLM از پودر Ti-6Al-4V

به منظور بررسی دقیق و جامع اثر پارامترهای فرایند بر ویژگی‌های قطعات تولید شده با استفاده از روش SLM، از روش طراحی آزمایش‌ها بر مبنای تکنیک پاسخ سطح استفاده شده است. پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور و پارامتر خروجی زبری سطح قطعات تولید شده با روش SLM می باشد. پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور در سه سطح همانند جدول(1) در نظر گرفته شده‌اند. انتخاب سطوح پایین و بالای پارامترهای ورودی بر اساس محدودیت‌های دستگاه SLM مورد استفاده و همچنین مطالعه تحقیقات مشابه انجام شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

جدول1 – مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی در روش پاسخ سطح

پارامتر / سطوح	نماد	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
توان لیزر (وات)	Power	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰
سرعت اسکن لیزر (میلیمتر بر ثانیه)	Speed	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰
مقدار همپوشانی لایه های مجاور (میکرون)	Hatch spacing	۶۵	۷۰	۷۵

همچنین در جدول(2) لیست آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش براساس روش سطح پاسخ نشان داده شده است.

جدول 2- لیست آزمایش ها بر اساس روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	توان لیزر	سرعت اسکن لیزر	مقدار همپوشانی لایه های مجاور
1	100	500	70
2	150	500	70
3	100	700	70
4	150	700	70
5	100	600	65
6	150	600	65
7	100	600	75
8	150	600	75
9	125	500	65
10	125	700	65
11	125	500	75
12	125	700	75
13	125	600	70
14	125	600	70
15	125	600	70

لازم به ذکر است که برای اندازه گیری زبری سطح قطعات نمونه از دستگاه اندازه گیری زبری سطح Tesa Rugosurf-10 استفاده شده است. پارامتر اندازه گیری شده برای زبری سطح قطعات R_z نیز می باشد.

3- نتایج و بحث

براساس تحلیل‌های انجام‌شده برای زبری سطح قطعات تولید شده با روش SLM، نتایج آنالیز واریانس پس از حذف عوامل غیر موثر بر زبری سطح در جدول(3) ارائه شده است. این آنالیز به تعیین میزان تأثیر پارامترهای موجود در معادله رگرسیون کمک می‌کند و نقشی اساسی در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها ایفا می‌نماید. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها، اثرات فاکتورهای ورودی و تعاملات آن‌ها بر روی متغیر خروجی را نشان می‌دهد.

جدول 3 - نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه های پرینت شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزر

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1.73083	1.73083	0.288472	6.73	0.008
Linear	3	0.65622	0.65622	0.218742	5.11	0.029
Power	1	0.31601	0.31601	0.316013	7.38	0.026
Speed	1	0.01620	0.01620	0.016200	0.38	0.556
Hatch Spacing	1	0.32401	0.32401	0.324012	7.56	0.025
Square	2	0.73238	0.73238	0.366192	8.55	0.010
Power*Power	1	0.34607	0.39838	0.398380	9.30	0.016
Hatch Spacing*Hatch Spacing	1	0.38631	0.38631	0.386309	9.02	0.017
2-Way Interaction	1	0.34222	0.34222	0.342225	7.99	0.022
Power*Speed	1	0.34222	0.34222	0.342225	7.99	0.022
Error	8	0.34270	0.34270	0.042837		
Lack-of-Fit	6	0.32810	0.32810	0.054683	7.49	0.122
Pure Error	2	0.01460	0.01460	0.007300		
Total	14	2.07353				

در آزمایش‌های مهندسی با سطح اطمینان 95 درصد، مقدار P-value کمتر از 0/05 برای شناسایی تأثیر مؤلفه‌های مدل مورد توجه قرار می‌گیرد. همانطور که از جدول(3) مشاهده می‌شود پارامترهای توان لیزر، و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور تاثیر معناداری بر زبری سطح قطعات تولید شده با روش SLM دارند. همچنین برهم‌کنش پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن لیزر اثر معناداری بر زبری سطح دارد. معادله (1) به توصیف رگرسیون مربوط به پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح قطعات تولید شده با روش SLM می‌پردازد:

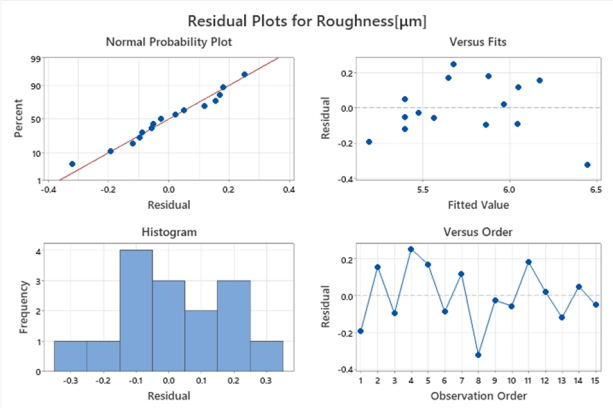
$$\text{Roughness [μm]} = 63.9 - 0.0529\,\text{Power[W]} + 0.01507\,\text{Speed[mm/s]} - 1.766\,\text{Hatch Spacing[μm]} + 0.000524\,\text{Power[W]*Power[W]} + 0.01290\,\text{Hatch Spacing[μm]*Hatch Spacing[μm]} - 0.000117\,\text{Power[W]*Speed[mm/s]} \quad (1)$$

با توجه به مقدار R-sq= 83.47% وهمچنین پراکندگی متناسب تحلیل باقیمانده‌ها براساس شکل(2)، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌سازی انجام‌شده از دقت بالایی برخوردار است.

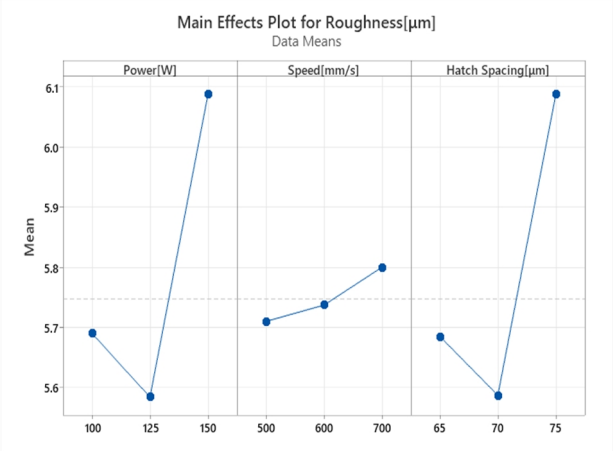
در شکل(3) نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح نمونه‌های تولید شده با روش SLM نشان داده شده است. همانطور که در شکل(3) مشاهده می‌شود زبری قطعات تولید شده با روش SLM با افزایش توان لیزر ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس با افزایش بیشتر تاون لیزر افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]



شکل 2 – نمودارهای باقی‌مانده برای زبری سطح نمونه‌های تولید شده با روش SLM

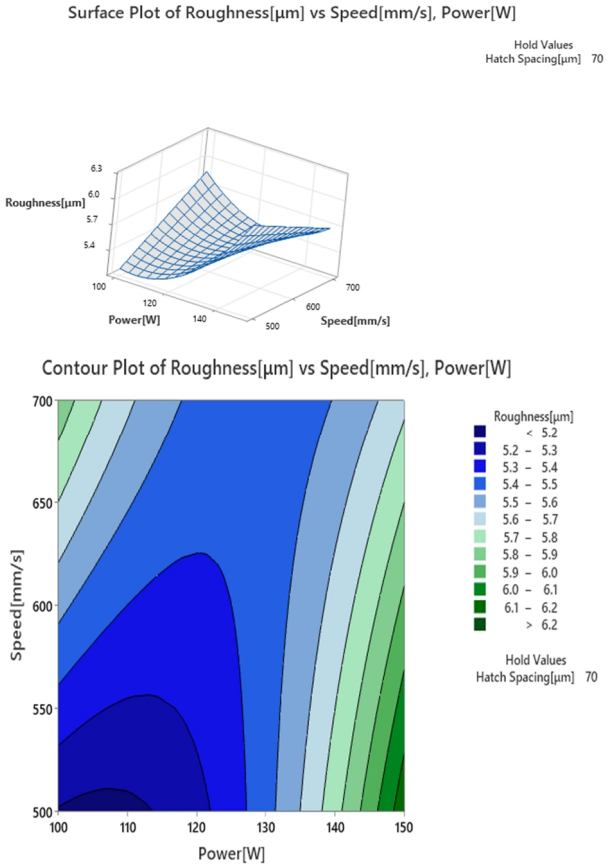


شکل 3 - نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح نمونه‌های تولید شده با روش SLM

دلیل این موضوع اینست که با افزایش توان لیزر، انرژی بیشتری به پودر فلزی منتقل می‌شود که منجر به ذوب بهتر و یکنواخت‌تر این پودر می‌گردد. در این مرحله، ذرات پودر به خوبی به یکدیگر متصل می‌شوند و سطح صاف‌تری حاصل می‌شود. با افزایش بیشتر توان لیزر، میزان ذوب و انتقال حرارت بیشتر می‌تواند به تجمع ذرات در نواحی خاصی منجر شود. این تجمع باعث ایجاد ناهمواری‌های سطحی می‌گردد و زبری سطح افزایش می‌یابد. همچنین از شکل(3) نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش سرعت اسکن لیزر زبری قطعات تولید شده با روش SLM افزایش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش سرعت اسکن لیزر، زمان لازم برای ذوب هر ناحیه از پودر کاهش می‌یابد. این باعث می‌شود که حرارت کافی برای ذوب کامل ذرات پودر در اختیار ناحیه مذاب نباشد و در نتیجه ذوب ناقص به وجود آید. این موضوع می‌تواند به ایجاد نواحی جامد و ناهموار منجر شود که زبری سطح را افزایش دهد. به عبارت دیگر افزایش سرعت اسکن می‌تواند مانع از انتقال حرارت مناسب از پودر به محیط شود. به عبارت دیگر، حرارت تشکیل شده در ناحیه مذاب نمی‌تواند به‌خوبی پخش شود و به همین دلیل نواحی بیشتری از پودر غیرذوب‌شده در سطح قطعه باقی می‌مانند که این نواحی می‌توانند منجر به زبری شوند. همانطور که در شکل(3) مشاهده می‌شود زبری قطعات تولید شده با روش SLM با افزایش مقدار همپوشانی لایه های مجاور ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس افزایش می‌یابد. دلیل این موضع اینست که ابتدا، با افزایش همپوشانی بین لایه‌های مجاور، نواحی مذاب بیشتری در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند. این باعث می‌شود که ذرات به خوبی به یکدیگر متصل شوند و پیوستگی لایه‌ها بهتر شود. زبری سطح کاهش می‌یابد زیرا سطح بیشتری از پودر ذوب‌شده به یکدیگر پیوسته‌اند و نواحی غیرمذاب کمتری وجود دارد. همچنین همپوشانی بیشتر باعث می‌شود که حرارت به طور مؤثرتری از یک لایه به لایه دیگر منتقل شود. این انتقال حرارت یکنواخت می‌تواند باعث بهبود کیفیت سطح و کاهش زبری شود، زیرا نواحی بیشتری از پودر به طور کامل ذوب و یکنواخت می‌شوند. در ادامه بیشتر شدن همپوشانی می‌تواند به ناپایداری حرارتی منجر شود. این به خاطر این است که وقتی لیزر به نواحی با همپوشانی بیش از حد می‌تابد، حرارت اضافی می‌تواند باعث شود که نواحی ذوب به طور غیریکنواخت رفتار کنند. این ناپایداری‌های حرارتی می‌تواند به تشکیل زبانه‌های مذاب و ناهمواری‌های سطحی منجر شود. به عبارت دیگر با افزایش بیش از حد همپوشانی، ممکن است ذرات مذاب تحت تأثیر حرارت و فشار بیشتری قرار بگیرند و به اطراف پاشیده شوند. این پاشش می‌تواند منجر به ایجاد ناهمواری‌های سطح و در نتیجه افزایش زبری شود. در شکل‌های (4 تا 6) برهم‌کنش پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح

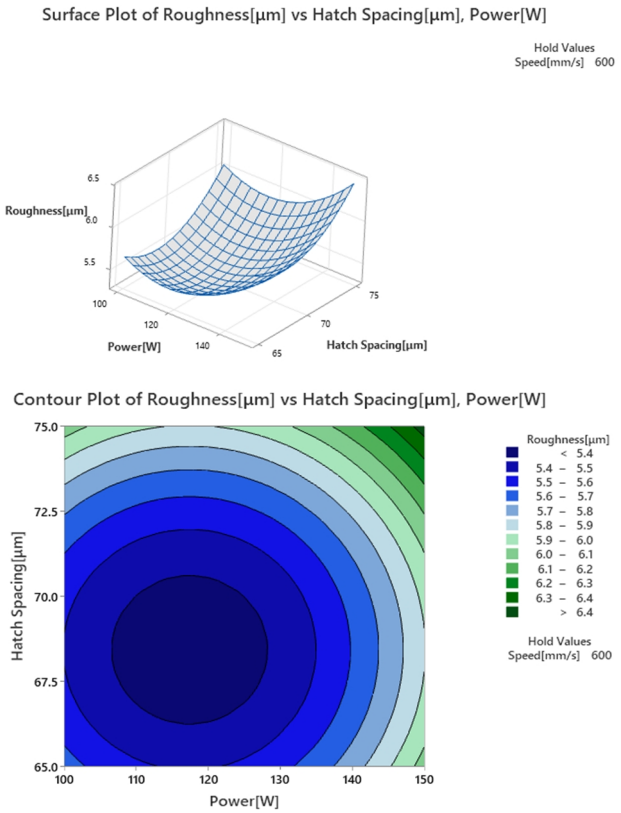
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

نمونه‌های تولید شده با روش SLM نشان داده شده است که همگی تایید کننده نتایج شکل(3) هستند و اثرات همزمان پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح نمونه‌های تولید شده با روش SLM را نشان می دهند.

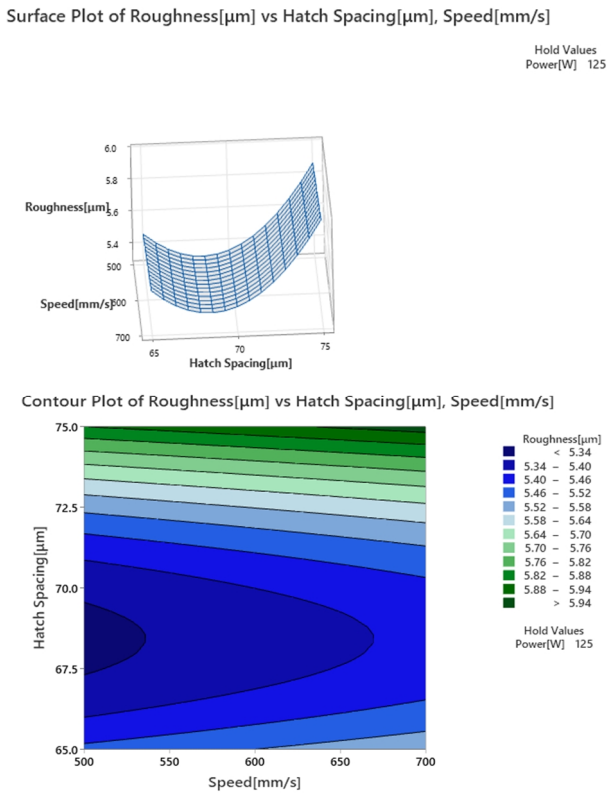


شکل 4 – برهم‌کنش پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن لیزر بر زبری سطح نمونه های تولید شده با روش SLM

پس از بررسی‌ها در زمینه تحلیل زبری سطح قطعات تولید شده با روش SLM، در این بخش بهینه‌سازی فرایند برای کاهش زبری سطح نمونه‌ها انجام می‌شود. با توجه به حداقل مقدار زبری سطح در مدل‌های مطابق با آزمایش‌ها و همچنین در نظر گرفتن معیارهای بهینه، بهینه‌سازی براساس مدل آزمایش‌ها در شکل(7) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که جهت دستیابی به کمترین مقدار زبری سطح برابر با 1/44 میکرون، باید پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور به ترتیب 150 وات، 500 میلیمتر بر ثانیه و 67/8 میکرون تنظیم شوند.



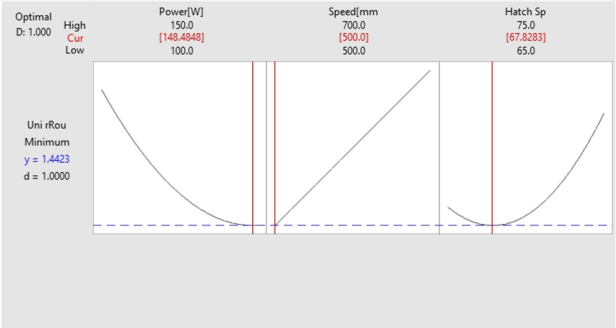
شکل 5- برهم‌کنش پارامترهای توان لیزر و مقدار همپوشانی لایه های مجاور بر زبری سطح نمونه‌های تولید شده با روش SLM



شکل 6 – برهم‌کنش پارامترهای سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح نمونه های تولید شده با روش SLM

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]



شکل 7- بهینه سازی پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور جهت دستیابی به کمترین زبری سطح در قطعات تولید شده با روش SLM

4- نتیجه گیری

دراین پژوهش فرایند ذوب انتخابی لیزر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی دقیق و جامع اثر پارامترهای فرایند بر ویژگی‌های قطعات تولید شده با استفاده از روش ذوب انتخابی لیزر، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و بکارگیری تکنیک روش پاسخ سطح، اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور بر زبری سطح قطعات تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که:

- زبری سطح قطعات تولید شده توسط روش ذوب انتخابی لیزر، با افزایش توان لیزر ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس با افزایش بیشتر توان لیزر افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع اینست که با افزایش توان لیزر، انرژی بیشتری به پودر فلزی منتقل می‌شود که منجر به ذوب بهتر و یکنواخت‌تر این پودر می‌گردد. در این مرحله، ذرات پودر به خوبی به یکدیگر متصل می‌شوند و سطح صاف‌تری حاصل می‌شود.

- با افزایش سرعت اسکن لیزر زبری سطح قطعات تولید شده با روش ذوب انتخابی لیزر افزایش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش سرعت اسکن لیزر، زمان لازم برای ذوب هر ناحیه از پودر کاهش می‌یابد. این باعث می‌شود که حرارت کافی برای ذوب کامل ذرات پودر در اختیار ناحیه مذاب نباشد و در نتیجه ذوب ناقص به وجود آید. این موضوع می‌تواند به ایجاد نواحی جامد و ناهموار منجر شود که زبری سطح را افزایش دهد.

- زبری قطعات تولید شده توسط روش ذوب انتخابی لیزر، با افزایش مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور ابتدا کاهش پیدا کرده و سپس افزایش می یابد. دلیل این موضع اینست که ابتدا، با افزایش همپوشانی بین لایه‌های مجاور، نواحی مذاب بیشتری در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند. این باعث می‌شود که ذرات به خوبی به یکدیگر متصل شوند و پیوستگی لایه‌ها بهتر شود. در ادامه بیشتر شدن همپوشانی می‌تواند به ناپایداری حرارتی منجر شود. این به خاطر این است که وقتی لیزر به نواحی با همپوشانی بیش از حد می‌تابد، حرارت اضافی می‌تواند باعث شود که نواحی ذوب به طور غیریکنواخت رفتار کنند. این ناپایداری‌های حرارتی می‌تواند به تشکیل زبانه‌های مذاب و ناهمواری‌های سطحی منجر شود.

- نتایج بهینه سازی نشان دادند که جهت دستیابی به کمترین مقدار زبری سطح برابر با 1/44 میکرون، باید پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و مقدار همپوشانی لایه‌های مجاور به ترتیب 150 وات، 500 میلیمتر بر ثانیه و 67/8 میکرون تنظیم شوند.

منابع

1-Kumar, A., P. Singh, R. Sharma and H. R. Gupta. 2022. Enhancing mechanical properties of SLM fabricated titanium alloys. Journal of Materials Science 57 (5): 2357-2373.

2-Singh, H., S. Gupta and T. Rao. 2021. Formation mechanisms of defects in selective laser melted parts. Materials Characterization 180: 111-123.

3-Li, J., T. Zhang and K. Wang. 2023. Optimization of process parameters for SLM of stainless steel. Additive Manufacturing 58: 102475.

4-Patel, D., S. Mehta and N. Desai. 2022. Microstructural evolution during SLM of cobalt-chromium alloys. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 119 (7): 1234-1245.

5-Gupta, S., R. Kumar and D. Sharma. 2023. Innovations in material selection for SLM processes. Materials Today: Proceedings 70: 134-140.

6-Zhang, Y., X. Liu and T. Chen. 2022. Effect of build orientation on mechanical properties in SLM. Journal of Manufacturing Science and Engineering 144 (6): 061012.

7-Chen, L., J. Yang and S. Zhao. 2021. Thermal management strategies in SLM. Additive Manufacturing Technologies 29: 307-320.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]

8-Khan, F., A. Singh and R. Patel. 2023. Impact of scanning strategy on residual stress in SLM. Journal of Materials Research 38 (10): 2236-2245.
9-Liu, X., Y. Zhang and H. Wang. 2022. Development of advanced SLM technologies for high-performance alloys. Materials Science and Engineering: A 840: 143084.
10-Mansouri, H., A. Rathi and K. Khanna. 2021. Role of powder morphology in SLM performance. Powder Technology 379: 187-197.
11-Niemeyer, J., P. Weiss and M. J. Müller. 2023. Comparative study of SLM and EBM processes for titanium. Rapid Prototyping Journal 29 (2): 289-305.
12-Kumar, R., M. Singh and D. Choudhury. 2022. Investigation of thermal fatigue in SLM parts. Materials Science Forum 1018: 361-366.
13-Haferkamp, H., J. Weber and F. Krause. 2023. Measurement techniques for surface roughness in SLM. Journal of Manufacturing Processes 78: 143-153.
14-Singh, A., P. Verma and R. Sharma. 2021. Understanding the relation between pore morphology and mechanical properties in SLM. Materials Letters 293: 129677.
15-Rathi, R., J. Singh and L. Prasad. 2022. Use of artificial intelligence for process optimization in SLM. AI & Society 37 (4): 964-975.
16-Patel, R., D. Ghosh and V. Bhatia. 2023. Fatigue behavior of SLM fabricated aluminum alloys. Journal of Alloys and Compounds 914: 165256.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.14]