



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Effect of Laser Power and Scanning Speed on the Structural Resolution of Polymeric parts Produced by Selective Laser Melting 3D Printer

Seyed Taha Khademian^a, Aliasghar Ajami^{a,*} ^a Faculty of physics, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-01

Revised: 2025-04-10

Accepted: 2025-05-13

Keywords:

Additive manufacturing;
3D printer;
Selective laser melting;
Selective laser sintering;
Structural resolution;
Critical fluence.

ABSTRACT

Additive manufacturing, also known as 3D printing, is an innovative method for building complex 3D structures. One of the primary 3D printing techniques is powder bed fusion in which, specific areas of a thin layer of powder material are irradiated by a laser to melt or sinter the material, which then solidifies. In this research, the parameters related to selective laser melting/sintering (SLM/SLS) are investigated both experimentally and numerically. Since the lasers used in SLS 3D printers are typically continuous wave (CW) or long-pulse lasers, heat generation and conduction are the main processes resulting from light-matter interaction. Therefore, the heat conduction equation is employed to simulate the interaction process and determine the temporal and spatial behavior of temperature using COMSOL software. A diode laser with a wavelength of 450 nm and maximum power of 4 W is used for experiment. Polyethylene plastic powder (HDPE 3840UA) is utilized for SLM/SLS structuring. Since the absorption of pure polyethylene at 450 nm is very low, it is mixed with a portion of graphite to serve as an absorptive additive. The effects of the two main parameters of 3D printing, laser power and scanning speed, on the width of solid lines printed via SLM/SLS are investigated experimentally and numerically. The results of investigation show that for a low laser power of about 0.3 W, the scanning speed should be set below 600 mm/min, and for a high scanning speed of 3000 mm/min, the laser power should exceed 2 W. Beyond these ranges, no SLM/SLS will occur.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34924.2713>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: ajami@semnan.ac.ir

How to cite this article:

S.T. Khademian and A. Ajami, "Effect of Laser Power and Scanning Speed on the Structural Resolution of Polymeric parts Produced by Selective Laser Melting 3D Printer," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 115-126, doi: 10.22075/jme.2025.34924.2713

تأثیر توان لیزر و سرعت روبش بر دقت ساختاری قطعات پلیمری تولید شده به وسیله چاپگر سه بعدی ذوب لیزری انتخابی

سید طاها خادمیان^۱، علی اصغر عجمی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳	ساخت افزایشی که همچنین با نام چاپ سه بعدی شناخته می شود، روش جدیدی برای تولید ساختارهای پیچیده سه بعدی است. در چاپگر بر مبنای گداخت بستر پودر نواحی مشخصی از پودر مواد تحت تابش لیزر ذوب و سپس جامد می شود. در این پژوهش پارامترهای مرتبط با چاپگر ذوب/تفجوشی لیزری انتخابی (SLM/SLS) به طور تجربی و عددی بررسی می شود. از آنجاییکه چشمه های نوری مورد استفاده در چاپگر سه بعدی SLS لیزر پیوسته یا لیزر پالس بلند می باشند در نتیجه تولید و هدایت گرما فرآیند اصلی حاصل از برهم کنش تابش با ماده می باشد. از اینرو از معادله هدایت گرما برای شبیه سازی برهم کنش در نرم افزار کامسول استفاده می شود. برای ساخت بر مبنای گداخت بستر پودر از پودر پلی استیکی پلی اتیلن HDPE 3840UA به عنوان ماده تحت فرآیند و از یک لیزر دیودی با طول موج ۴۵۰ nm و توان ۴ W به عنوان چشمه لیزری استفاده می شود. از آنجایی که جذب پلی اتیلن خالص در طول موج ۴۵۰ nm خیلی کم است، مخلوط آن با پودر گرافیت به عنوان افزودنی جاذب مورد استفاده قرار می گیرد. تأثیر دو پارامتر مهم در چاپ سه بعدی، توان لیزر مورد استفاده و سرعت روبش باریکه لیزری، بر کیفیت ذوب و پهنای خطوط جامد تولید شده از پودر پلی اتیلن بررسی می شود. نتیجه بررسی ها نشان داد که برای توان لیزری پایین در حدود ۰.۳ W سرعت روبش باید کمتر از ۶۰۰ mm/Min تنظیم گردد و برای سرعت روبش نسبتاً زیاد در حدود ۳۰۰۰ mm/Min توان لیزری بیش از ۲ W نیاز است. خارج از این محدوده توان-سرعت هیچ ذوب یا حتی تفجوشی رخ نمی دهد.

واژگان کلیدی:

ساخت افزودنی،
چاپگر سه بعدی،
ذوب لیزری انتخابی،
کلوخه سازی لیزری انتخابی،
دقت ساختاری،
شار آستانه.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34924.2713>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

بشر برای تولید قطعات مورد نیاز خود از روش های گوناگونی بهره برده است. در یک مدل دسته بندی، روش تولید قطعات به سه دسته کاهشی، فرم دهی و افزایشی تقسیم می شود. در روش کاهشی، قطعه مورد نظر با تراشیدن و کاستن از ماده توپر حاصل می شود. در روش فرم دهی، یک ماده با محصور سازی تحت فشار درون یک قالب به قطعه مورد نظر تبدیل می شود. در روش ساخت افزایشی، (AM) با قرار

دادن مواد در کنار و روی یکدیگر، قطعه نهایی تولید می شود [۱]. از مزیت های روش تولید به شیوه ساخت افزایشی می توان به توانایی در تولید قطعات پیچیده و تودرتو، کاهش مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت، حذف فرآیندهای سنگین و هزینه بر قالب سازی و همچنین حذف مواد دورریز و ضایعات تولید اشاره کرد. این روش اساس کار چاپگرهای سه بعدی می باشد [۱].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ajami@semnan.ac.ir

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله:

سیدطاها خادمیان و علی اصغر عجمی، "تأثیر توان لیزر و سرعت روبش بر دقت ساختاری قطعات پلیمری تولید شده به وسیله چاپگر سه بعدی ذوب لیزری انتخابی"، مدل سازی در مهندسی، ۸۲ (۱۴۰۴): ۱۱۵-۱۲۶، doi: 10.22075/jme.2025.34924.2713

austenitic را مطالعه کردند [۵]. السید و همکارانش تاثیرات متغیرهای فرآیند ذوب لیزری انتخابی نظیر سرعت روبش، فاصله خطوط روبش از یکدیگر و توان لیزر بر کیفیت قطعات تولید شده از آلیاژ Ti6Al4V به منظور کاربرد در صنعت پزشکی را بررسی کردند [۶]. گایان هو و همکارانش تاثیر متغیرهای فرآیند بر مقاومت کششی قطعات تولید شده از پودر PA2200 را مطالعه کردند [۱۰].

باج دینه و همکارانش اثرات متغیرهای فرآیند بر نوعی پودر جدید به نام GBCP که از مخلوط پودر لوبیا سبز و Poly(lactic Acid) تهیه کرده بودند را مطالعه کردند و بررسی ویژگی‌های مکانیکی آنها استحکام خوبی از قطعات را نشان داد [۱۷]. المگری و همکارانش اثرات توان لیزر و جهت‌گیری خطوط روبش بر کیفیت قطعات و ساختارهای تولید شده از ماده Poly (dodecano-12-lactam) را مطالعه کردند. آنها از آزمون‌های کششی و تصویربرداری SEM برای تعیین کیفیت قطعات استفاده کردند [۹]. فراج و همکارانش تاثیرات متغیرهای توان لیزر، سرعت روبش و فاصله لایه‌ها بر مقاومت کششی و مدول الاستیسیته قطعات تولید شده از ماده PA12 را بررسی کردند. آنها نمونه‌برداری خود را مطابق الگوی جدول L9 تاگوچی و به تعداد ۱۳۵ نمونه انجام دادند [۸]. کرمریس اوبراتانسکی و همکارانش چگالی انرژی حجمی و توان لیزر به عنوان دو عامل تعیین کننده خواص مکانیکی قطعات تولید شده فرآیند تفجوشی لیزری انتخابی را بررسی کردند. آنها همچنین تاثیرات تمام متغیرهای فرآیند در گداخت بستر پودر بر عامل چگالی انرژی حجمی را بررسی کرده و سپس تاثیرات چگالی حجمی بر کیفیت مکانیکی قطعات را گزارش کردند [۷].

جدول ۱ خلاصه‌ای از پیشینه‌ی تحقیقات گداخت بستر پودر به همراه نوع چاپگر مورد استفاده را گزارش می‌کند. بررسی پیشینه پژوهش‌ها در زمینه گداخت بستر پودر نشان می‌دهد که لیزرهای مورد استفاده در این پژوهش‌ها، لیزرهای گران قیمت با توان‌های بالای لیزری می‌باشد. در این پژوهش از یک لیزر دیودی ارزان قیمت با طول موج ۴۵۰ nm و توان ۴ W استفاده شده است. پودر پلاستیک با اندازه ذرات ۱۰۶ μm مورد آزمون قرار گرفته است. تاثیر توان لیزر و سرعت روبش باریکه لیزر بر پهنای خطوط، که نماینده کیفیت سطح قطعه نهایی و به عبارتی معیاری از دقت ساختاری قطعه تولید شده است، به روش تجربی و شبیه سازی بررسی گردیده است.

گداخت لیزری انتخابی یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در سال ۱۹۸۶ میلادی و در دانشگاه تگزاس توسط کارل دکارت ابداع و توسعه داده شد [۲ و ۱]. چاپ سه‌بعدی بر مبنای گداخت بستر پودر مانند دیگر روشهای چاپ سه‌بعدی به شیوه ساخت لایه به لایه است. در ابتدا لایه نازکی از پودر روی سکوی ساخت توزیع شده، کانون باریکه لیزر سطح پودر را مطابق نقشه سطح اولین مقطع روبش می‌کند. جذب تابش لیزر توسط پودر در نواحی تحت تابش باعث افزایش دمای آن می‌گردد. این افزایش دما ممکن است در حدی باشد که فقط باعث ذوب سطح خارجی ذرات پودر شود در نتیجه، پس از عبور باریکه لیزر و کاهش دما ذرات پودر به یکدیگر می‌چسبند. این فرآیند تفجوشی لیزری انتخابی (SLS) نامیده می‌شود. همچنین ممکن است افزایش دما در حدی باشد که ذرات پودر تابش دیده کاملاً ذوب شوند که پس از عبور باریکه لیزری و سرد شده تبدیل به جامد می‌شود. این فرآیند ذوب لیزری انتخابی (SLM) نامیده می‌شود. پس از اتمام لایه اول، سکوی ساخت پایین رفته و دومین لایه پودر روی اولین لایه ساخته شده توزیع می‌شود. بدین شیوه لایه‌های متوالی روی یکدیگر ساخته شده تا قطعه نهایی تولید گردد [۳].

پودر استفاده شده در چاپگر ذوب/تفجوشی لیزری انتخابی می‌تواند فلز [۴-۶]، پلاستیک [۷-۱۰]، شیشه [۱۱] یا سرامیک [۱۲] باشد. البته توان لیزری لازم برای پودرهای متفاوت یکسان نیست و برای هر نوع پودر لازم است پارامترهای بهینه چاپ بررسی و تعیین شود.

عوامل زیادی بر استحکام و کیفیت قطعه تولید شده با روش گداخت بستر پودر تاثیرگذار هستند. گذشته از نوع پودر، اندازه دانه‌ها [۱۳]، فرایندهای پساتولید [۱۴ و ۱۵]، فاصله بین خطوط روبش در هر لایه [۸ و ۶]، فاصله بین لایه‌های متوالی [۸ و ۶]، اندازه لکه لیزری [۱۶]، توان لیزر و سرعت روبش [۴] هر کدام اثرات خاصی بر خواص مکانیکی و دقت ساختاری قطعه تولید شده دارند.

مشتاق‌خان و دیکنز کیفیت ذوب لیزری انتخابی برای پودر طلا با ترکیب‌های متفاوتی از سرعت روبش و توان لیزری را بررسی کردند. آنها کیفیت ذوب را به پنج دسته تقسیم کردند و بهترین ترکیب سرعت روبش و توان به منظور دستیابی به خط ذوب مطلوب را معرفی کردند [۴]. لیورانی و همکارانش تاثیر متغیرهای فرآیند ذوب لیزری انتخابی بر میکروساختار و خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ 316L

جدول ۱- پیشینه تحقیقات گداخت بستر پودری

مرجع	سال انتشار	عنوان	مشخصات دستگاه و لیزر	پیشینه توان لیزر	ماده مورد استفاده
[۷]	۲۰۲۴ میلادی	چگالی انرژی حجمی و توان لیزر: عوامل تعیین کننده خواص مکانیکی قطعات تولید شده به روش تفجوشی لیزری انتخابی با ماده PA12	EOS P100 SLS machine – CO2 laser source	۳۰ W	PA12
[۸]	۲۰۲۳ میلادی	تاثیر متغیرهای فرآیند بر خواص کششی قطعات PA12 تولید شده به روش تفجوشی لیزری انتخابی	ProX 500 SLS printer (marketed by 3D Systems) – CO2 laser source	۱۰۰ W	PA12
[۹]	۲۰۲۲ میلادی	اثرات توان لیزر و جهت گیری خطوط روبش بر کیفیت نهایی قطعات تولید شده با ماده PA12 به روش تفجوشی لیزری انتخابی	P3200HT SLS system from TPM3D (Stratasys company) – CO2 laser source	۶۰ W	Poly (dodecano-12-lactam) (PA12)
[۱۷]	۲۰۲۰ میلادی	بهینه سازی سرعت و توان لیزر فناوری چاپ سه بعدی تفجوشی لیزری انتخابی برای مخلوط پودر لوبیا سبز و پلی لاکتیک اسید (GBP/PLA)	Rapid prototyping equipment AFS-360 – CO2 laser source – Wavelength 10.6 mm – Laser beam diameter 0.4 mm	۵۵ W	مخلوط لوبیا سبز و پلی لاکتیک اسید (GBCP)
[۱۰]	۲۰۲۰ میلادی	تاثیر متغیرهای فرآیند تفجوشی لیزری انتخابی بر مقاومت کششی پودر پلاستیک PA2200	Selective laser sintering rapid prototyping machine: EOS P396 CO2 laser source	۷۰ W	پودر پلاستیک PA2200
[۶]	۲۰۱۸ میلادی	بهینه سازی متغیرهای فرآیند ذوب لیزری انتخابی برای کاشتنی های پزشکی Ti6AL4V	ProX 100TM machine – Fiber laser – Wavelength 1070 nm	۵۰ W	Ti6AL4V
[۵]	۲۰۱۷ میلادی	تاثیر متغیرهای فرآیند ذوب لیزری انتخابی بر میکروساختار و خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ از نوع 316L austenitic	MYSINT100 SLM machine – Fiber laser	۲۰۰ W	فولاد ضد زنگ نوع 316L austenitic
[۴]	۲۰۱۰ میلادی	ذوب لیزری انتخابی برای طلای خالص	MMT Technologies Group SLM 100 System – Continuous wave ytterbium doped infrared fiber laser in the infrared rang of 1070 nm to 1090 nm wavelength	۵۰ W	پودر طلای ۲۴ عیار با متوسط اندازه ذرات ۲۴ میکرون

جدول ۲- مشخصات ماده پلی اتیلن چگالی بالا (HDPE 3840UA) [۱۸].

PROPERTY	UNIT	TEST METHOD	TYPICAL VALUE
MELT FLOW INDEX (190C 2.16KG)	g/10min	ASTM D-1238	4
DENSITY	g/cm ³	ASTM D-1505	0.938
YELLOWNESS INDEX	-	ASTM E-313	-1
WHITENESS INDEX	-	ASTM E-313	60
VICAT SOFTENING POINT	C	ASTM D-1525	115
TENSIL STRESS AT YEILD	MPA	ASTM D-638	15
ELONGATION AT BREAK	%	ASTM D-638	900
ESCR (IGEPAL 10% F50,50C)	HR	ASTM D-1693	200
FLEXURAL MODULUS	MPA	ISO178-197	650
CHARPY IMPACT	KJ/M ²	ASTM D-6110	18

۲- مواد و روش‌ها

جدول ۲ مشخصات ماده پلی‌اتیلن چگالی بالا (HDPE 3840UA) مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد [۱۸].

گرانول‌های این ماده پلیمری با استفاده از دستگاه رنده دیسکی پلاستیک رنده شده است. ذرات خرد شده از سرند با شماره ۱۴۰ با اندازه دریچه ۱۰۶ میکرونی عبور داده شد. به دلیل بازتاب زیاد از سطح پودر پلی‌اتیلن خالص، لیزر مورد استفاده در این پژوهش حتی در حالت استاتیک (عدم روبش) نیز قادر به ذوب این پودر نیست. بنابراین به منظور افزایش جذب، پودر پلی‌اتیلن با پودر گرافیت به نسبت جرمی ۹۵ به ۵ مخلوط شد. شکل (۱) تصویر این پودر را در دو حالت خالص و با افزودنی گرافیت نشان می‌دهد.

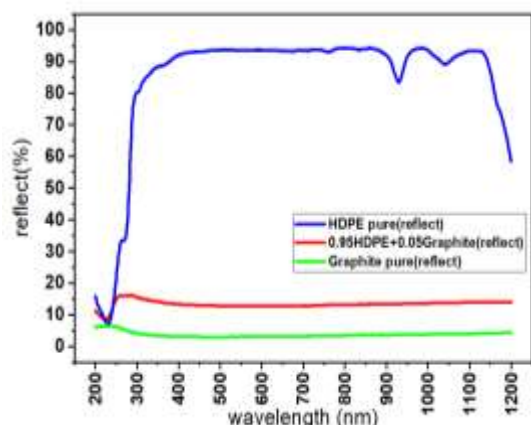


شکل ۱- پودر HDPE 3840UA در دو حالت (الف) خالص و (ب) با افزودنی گرافیت

نتایج آزمون طیف‌سنجی بازتابی (DRS) در بازه طول موجی ۲۰۰-۱۲۰۰ nm (شکل ۲) نشان می‌دهد که بازتاب پودر پلی‌اتیلن خالص در طول موج لیزری مورد استفاده (۴۵۰ nm) حدود ۹۳ درصد است که پس از مخلوط شدن با گرافیت به نسبت جرمی ۹۵ به ۵ بازتاب آن به ۱۳ درصد کاهش یافته است. بنابراین قابلیت جذب بالا رفته و امکان ذوب فراهم می‌شود.

لیزر مورد استفاده یک لیزر دیودی با توان ۴ W و طول‌موج ۴۵۰ nm است. لیزر روی جابجاگر دو بعدی طوری نصب شده که باریکه لیزر عمود بر سطح پودر می‌تابد و کمر باریکه لیزری روی سطح پودر قرار می‌گیرد. برای تولید نمونه‌های چاپی با توان لیزری و سرعت روبش متفاوت ابتدا پودر با ضخامت یکنواخت روی سکوی ساخت توزیع می‌شود. لیزر با توان مشخص روشن شده و باریکه لیزر مسیر مربع‌شکل به ضلع ۱۲ میلی‌متر را با سرعت مشخص روبش می‌کند

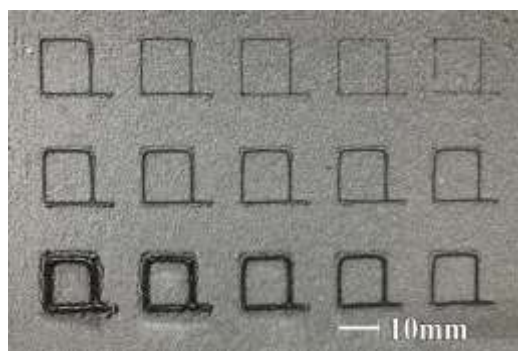
(شکل ۳). در نتیجه یک سلول مربع‌شکل توخالی تولید می‌شود که اضلاعش را خطوط جامد ناشی از سرد شدن مذاب تشکیل می‌دهند. پهنای چهار ضلع در سه مکان مختلف توسط میکروسکوپ نوری-دیجیتالی با بزرگنمایی 300X اندازه‌گیری شده و میانگین آن به عنوان پهنای خط ذوب در نظر گرفته شد.



شکل ۲- طیف بازتابی ماده HDPE 3840UA خالص، گرافیت خالص و مخلوط ۵ به ۹۵ جرمی از آنها در محدوده طول موج در بازه ۲۰۰-۱۲۰۰ nm

۳- بررسی‌های تجربی

شکل (۳) ماتریسی از مربعات چاپ‌شده با توان ثابت W ۰/۹۸ و سرعت‌های روبش متفاوت در بازه ۵۰-۳۰۰۰ mm/min را نشان می‌دهد به این ترتیب که نمونه سمت چپ ردیف پایین با سرعت ۵۰ mm/min و نمونه سمت راست ردیف بالا با سرعت ۳۰۰۰ mm/min تولید شده است.

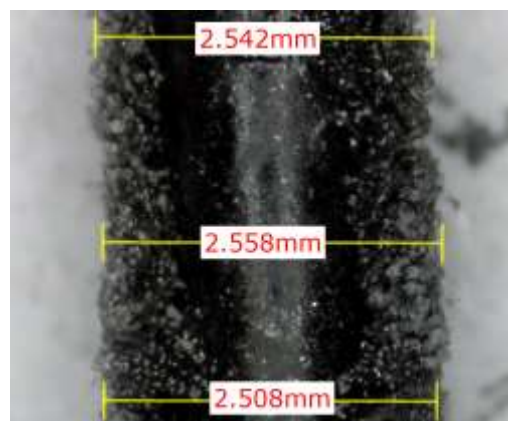


شکل ۳- تصویر نمونه‌های مربع شکل چاپ شده با توان ثابت W ۰/۹۸ و سرعت‌های روبش متفاوت در بازه ۵۰-۳۰۰۰ mm/min

شکل (۴) تصویر میکروسکوپی از یک ضلع نمونه‌ای را نشان می‌دهد که با توان لیزری W ۳/۶۸ و سرعت روبش ۱۰۰ mm/min تولید شده است.

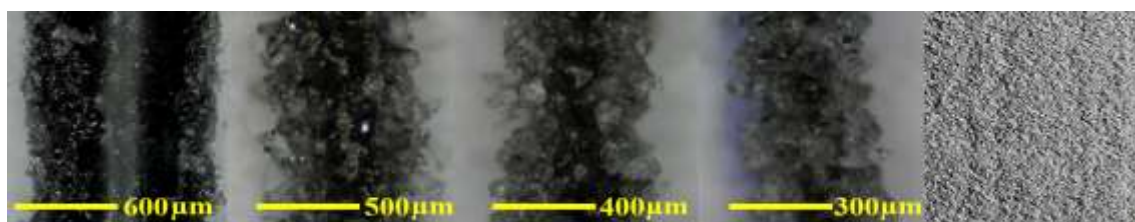
باریکه است و در نتیجه توزیع شعاعی دما در سطح پودر یکنواخت نیست. عدم یکنواختی دمای بیشینه باعث می‌شود در حالی پودر موجود در مرکز باریکه لیزری ذوب می‌شود در حاشیه باریکه لیزری تفجوشی رخ می‌دهد. این پدیده تعیین دقیق مرز بین پودر سالم و ماده تفجوشیده را با مشکل مواجه ساخته و باعث خطا در اندازه‌گیری پهنای خطوط چاپ شده می‌شود.

کیفیت ذوب به پنج دسته ذوب پیوسته، ذوب ناپیوسته، تفجوشی ضعیف، تفجوشی خیلی ضعیف و تفجوشی نشده تقسیم‌بندی شده است. در ذوب پیوسته یک خط ذوب پیوسته مشاهده شده است در حالی که در ذوب ناپیوسته خط ذوب منقطع است. در تفجوشی ضعیف، ذوب به صورت نقطه‌ای مشاهده شده است و در تفجوشی خیلی ضعیف، نقاط ذوب شده دیده نمی‌شوند اما افزایش دمای ناشی از تابش لیزر به اندازه‌ای بوده است که فرآیند تفجوشی رخ دهد. در دسته تفجوشی نشده، هیچ پیوندی بین ذرات پودر شکل نگرفته است. شکل (۵) تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های چاپ شده با کیفیت متفاوت را نشان می‌دهد. شکل (۶) که در حوزه چاپ سه بعدی به پنجره کاری معروف است کیفیت ذوب در پنج دسته تعریف شده را در یک ماتریس بر حسب توان و سرعت روبش نمایش می‌دهد.

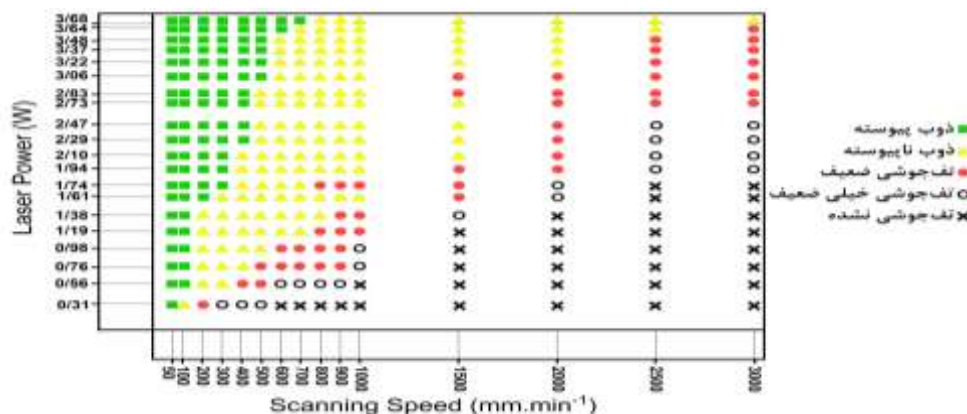


شکل ۴- تصویر میکروسکوپی تک‌خط چاپ‌شده با توان لیزر ۳/۶۸ W و سرعت روبش ۱۰۰ mm/min

مشاهده شد که هر چه توان لیزر بیشتر و سرعت روبش کمتر باشد، پهنای خط ذوب بیشتر می‌شود. کاهش توان در یک سرعت روبش مشخص و یا افزایش سرعت روبش در یک توان مشخص منجر به کاهش چگالی انرژی حجمی و در نتیجه کاهش پهنای ذوب می‌شود. افزایش بیش از حد سرعت روبش و یا کاهش بیش از حد توان لیزر باعث می‌شود چگالی انرژی حجمی دریافتی توسط پودر از مقدار آستانه تفجوشی کمتر شده و تفجوشی رخ ندهد. از آنجاییکه توزیع شدت باریکه لیزر مورد استفاده در این پژوهش تقریباً گاوسی است انرژی دریافتی در مرکز باریکه بیشتر از کناره

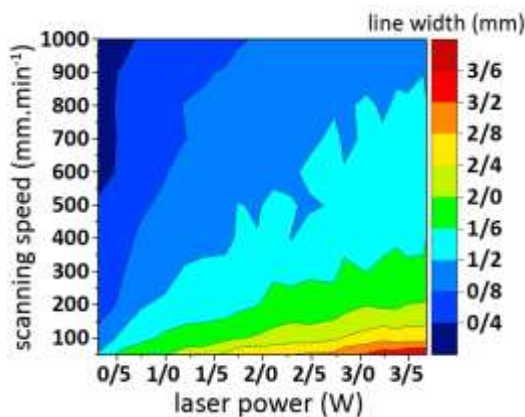


شکل ۵- دسته‌بندی کیفیت ذوب. تصاویر از سمت راست: تفجوشی نشده، تفجوشی خیلی ضعیف، تفجوشی ضعیف، ذوب ناپیوسته و ذوب پیوسته.



شکل ۶- دسته‌بندی کیفیت ذوب برای سرعت‌های روبش و توان‌های متفاوت لیزر در پنج دسته تفجوشی نشده، تفجوشی خیلی ضعیف، تفجوشی ضعیف، ذوب ناپیوسته و ذوب پیوسته.

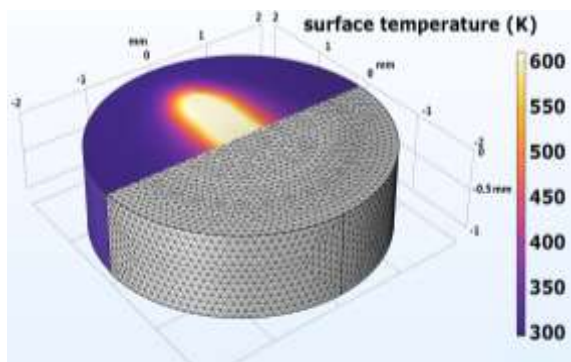
شکل (۹) نمودار سه بعدی پهنای خط چاپ شده بر حسب سرعت روبش و توان لیزر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در سرعت‌های روبش کم و توان‌های زیاد، پهنای ذوب بیشتر است و در شرایطی که توان لیزر کم و سرعت روبش زیاد است پهنای ذوب کم می‌شود.



شکل ۹- نمودار پهنای تک‌خط چاپ شده بر حسب توان و سرعت روبش.

۴- شبیه‌سازی

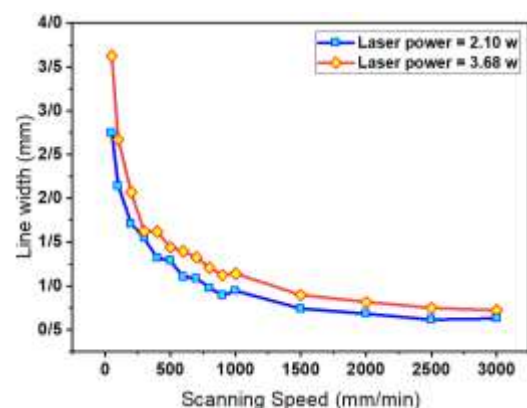
شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده است. شکل (۱۰) تصویری از هندسه استوانه‌ای شکل ماده تحت فرآیند را نشان می‌دهد. باریکه لیزر روی سطح بالایی حرکت می‌کند. دو شبکه‌بندی برای این هندسه با اندازه 0.1 mm و 0.05 mm در نظر گرفته و محاسبات انجام شد. نتایج محاسبات برای دو شبکه بندی کمتر از ۲٪ با یکدیگر تفاوت دارد که نشان دهنده استقلال نتایج از اندازه شبکه می‌باشد.



شکل ۱۰- هندسه شبیه‌سازی و توزیع دمایی (بر حسب کلونین)

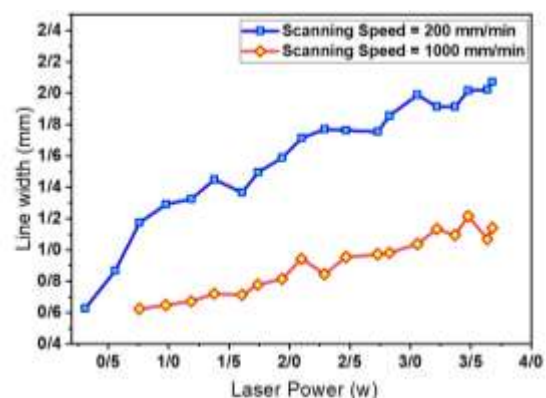
معادله (۱) رابطه انتقال گرما در جامدات است که معادله اصلی حاکم بر شبیه‌سازی این فرآیند در نظر گرفته شده است [۱۹ و ۲۰].

شکل (۷) پهنای تک‌خط چاپ شده را در دو توان 2.10 W و 3.68 W بر حسب سرعت روبش نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت روبش، پهنای خط تقریباً به طور نمایی کاهش می‌یابد. در سرعت‌های پایین، افزایش سرعت روبش باعث کاهش شدید پهنای ذوب می‌شود اما در سرعت‌های بالا تاثیر سرعت روی پهنای خط کاهش می‌یابد. به عبارتی نمی‌توان با افزایش سرعت روبش پهنای خط را به هر مقدار دلخواهی کاهش داد. افزایش سرعت روبش نهایتاً باعث کاهش شار انرژی به مقداری کمتر از آستانه لازم برای تفرجوشی/ذوب می‌شود و تفرجوشی یا ذوب رخ نمی‌دهد و در نتیجه خطی چاپ نمی‌گردد.



شکل ۷- پهنای تک‌خط چاپ شده به ازای سرعت‌های متفاوت روبش در دو توان 2.10 W و 3.68 W

شکل (۸) پهنای تک‌خط چاپ شده را بر حسب توان لیزر برای دو سرعت روبش 200 mm/min و 1000 mm/min نشان می‌دهد. مشاهده شد که با افزایش توان لیزر پهنای خط ذوب ابتدا تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد لیکن در نهایت اشباع می‌شود که علت آن می‌تواند افزایش اتلاف انرژی حرارتی از طریق انتقال گرما به هوای مجاور باشد.



شکل ۸- پهنای تک‌خط چاپ شده به ازای توان‌های متفاوت در دو سرعت روبش 200 mm/min و 1000 mm/min

کمیت‌های مختلف پودر را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی اعمال شده است.

جدول ۳- مقادیر کمیت‌های مختلف پودر برای شبیه‌سازی

مقدار	کمیت
۰/۹۳۸ g/cm ³	چگالی نمونه غیر پودری (Bulk)
۰/۳۶ g/cm ³	چگالی نمونه پودری
٪۶۲	درصد تخلخل نمونه پودری
٪۱۳	درصد بازتاب نور از نمونه
۰/۵۲ W/m.°C	ضریب رسانندگی گرما [۲۴]
۲۳۰۰ J/kg.°C	ظرفیت گرمایی ویژه [۲۵]
۱۲۷ °C	دمای ذوب [۲۵]
۲۰۰ J/g	گرمای پنهان [۲۶ و ۲۷]
۱۰ W/m ² .°C	ضریب انتقال گرما از سطح [۲۸-۳۰]

پهنا و ضخامت تارهای پیوسته پلاستیکی در واقع همان عرض و عمق دریاچه مذاب است. این دو پارامتر از طریق محاسبه توزیع فضایی دمای نمونه و سپس محاسبه دمای بیشینه برای هر نقطه تعیین می‌گردند. پهنای خط ذوب به صورت دو برابر فاصله نقطه‌ای روی سطح با دمای ۱۲۷ (دمای ذوب) تا نقطه با دمای بیشینه تعریف می‌گردد و ضخامت خط ذوب فاصله نقطه‌ای درون ماده با دمای ۱۲۷ تا نقطه با دمای بیشینه تعریف می‌گردد.

شکل (۱۱) تاثیر سرعت روبش و توان لیزر بر پهنای ذوب را نشان می‌دهد. در قسمت (الف) سرعت روبش mm/min ۵۰۰ ثابت فرض شده است و توان لیزر در بازه ۰.۳ W تا ۱.۴ W تغییر داده شده است. همانطور که از شکل دیده می‌شود پهنای خط ذوب با افزایش توان لیزر افزایش می‌یابد. این رفتار افزایشی به طور تجربی نیز مشاهده گردید که نتایج آن در شکل (۸) قابل مشاهده است. به علت افزایش دمای ناشی از افزایش شار انرژی دریافتی در هر نقطه از سطح از طریق جذب تابش لیزر می‌باشد.

در شکل (۱۱) قسمت (ب) توان لیزر ۰/۹۸ W ثابت فرض شده است و سرعت روبش از ۲۰۰ mm/min تا ۲۵۰۰ mm/min تغییر داده شده است. نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت روبش پهنای خط ذوب به طور وارون کاهش می‌یابد و برعکس، با کاهش سرعت روبش پهنای خط ذوب به طور وارون افزایش می‌یابد این نتایج حاصل از شبیه‌سازی به طور تجربی نیز مشاهده شد که در شکل (۷) نشان داده شده است.

$$\rho(r, T) c_p(r, T) \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} - \nabla \cdot [k(r, T) \nabla T(r, t)] + \rho(r, T) c_p(r, T) v_s \cdot \nabla T(r, t) = Q(r, t) \quad (1)$$

در معادله (۱)، ρ چگالی، r بردار مکان، c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، t زمان، k ضریب رسانندگی گرمایی، v_s سرعت نسبی میان چشمه نوری و ماده تحت فرآیند، $Q(r, t)$ توان دریافتی در واحد حجم و $T(r, t)$ دما در نقطه‌ای با مختصات r در لحظه t می‌باشد. معادله (۲) رابطه بین ضریب رسانندگی گرمایی ماده پودری را با حالت جامد توده‌ای آن نشان می‌دهد [۲۱].

$$k_{\text{powder}} = k_{\text{bulk}}(1 - \emptyset) \quad (2)$$

که در آن $\emptyset$ ضریب تخلخل است که مقداری بین صفر تا یک است.

معادله (۳) به عنوان شرط مرزی روی سطح پودر [۲۲] و معادله (۴) به عنوان شرط مرزی سطح زیرین پودر اعمال شده است [۲۳].

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\text{TopSurface}} = Q - h(T - T_s) \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\text{BottomPowder}} = 0 \quad (4)$$

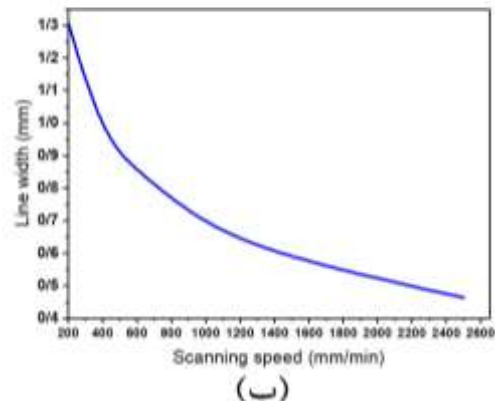
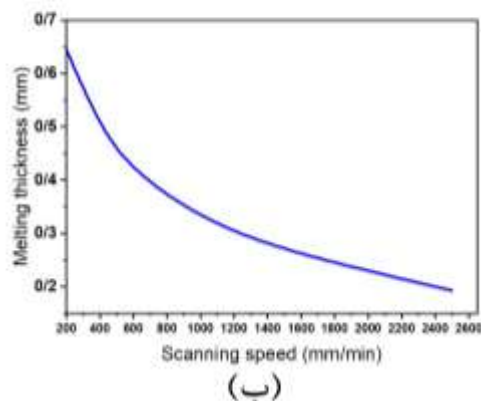
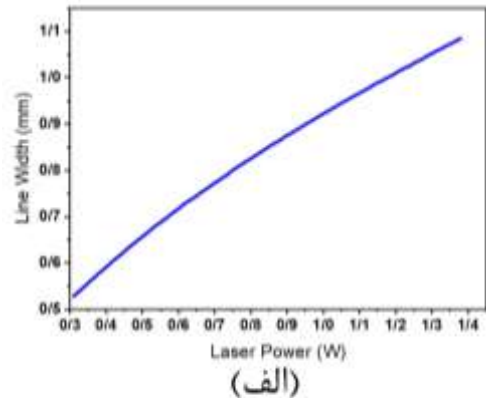
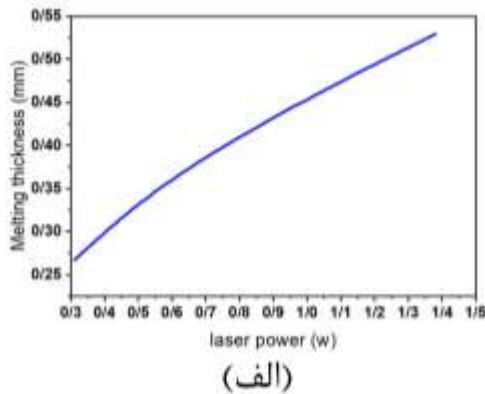
که در آن، h ضریب انتقال حرارت از سطح و T_s دمای سطح می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شرط مرزی همرفت طبیعی و یا عایق گرمایی برای سطوح جانبی تغییر چشمگیری در مقدار محاسبه شده برای پهنا و ضخامت خط ذوب ایجاد نمی‌کند (تغییر نتایج کمتر از ٪۲). معادله (۵) شرایط اولیه را بیان می‌کند.

$$T(x, y, z, t)_{t=0} = 293(K) \quad (5)$$

با فرض گاوسی بودن باریکه لیزری توزیع فضایی شدت با معادله (۶) داده می‌شود [۲۳].

$$I(r) = \left(\frac{2P}{\pi w^2} \right) \exp \left[-\frac{2r^2}{w^2} \right] \quad (6)$$

که در آن r فاصله از محور باریکه، P توان باریکه و w شعاع باریکه است. در این شبیه‌سازی قطر باریکه ۱۵۰ μm در نظر گرفته شده است که تقریباً مساوی اندازه لکه لیزری مورد استفاده در بررسی تجربی می‌باشد. جدول ۳ مقادیر



شکل ۱۲- ضخامت خط ذوب (الف) بر حسب توان لیزر در سرعت روبش ثابت ۵۰۰ mm/min و (ب) بر حسب سرعت روبش در توان ثابت ۰/۹۸ W.

شکل ۱۱- پهنای خط ذوب (الف) بر حسب توان لیزر در سرعت روبش ثابت ۵۰۰ mm/min و (ب) بر حسب سرعت روبش در توان ثابت ۰/۹۸ W.

۱) جذب مستقیم انرژی از تابش رسیده به هر نقطه از سطح ماده و ۲) انتقال گرما طی فرایند رسانش از ناحیه با دمای بیشتر به نواحی با دمای کمتر. شار انرژی رسیده به سطح در حالتی که باریکه لیزری روی سطح جابجا می‌شود با رابطه $J = P / 2wv_s$ داده می‌شود که در آن P توان لیزر، w شعاع باریکه لیزر و v_s سرعت روبش باریکه لیزر روی سطح ماده می‌باشد. طبق این رابطه انباشت انرژی در ناحیه روبش شده با توان لیزر نسبت مستقیم و با سرعت روبش باریکه نسبت عکس دارد. افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش باریکه لیزر هر دو منجر به نتیجه مشابه یعنی افزایش پهنای و ضخامت خط ذوب می‌گردد هرچند توضیح این دو فرایند یکسان نیست.

افزایش توان لیزر باعث می‌شود تا شدت تابش در تمام نواحی تحت تابش افزایش یابد. افزایش شدت در کناره باریکه منجر به افزایش دما در آن ناحیه شده و بدین طریق پهنای خط ذوب افزایش می‌یابد. به طور همزمان، افزایش دما در مرکز باریکه باعث می‌شود تا انتقال گرما از این ناحیه

شکل (۱۲) ضخامت ذوب را بر حسب توان لیزر و سرعت روبش نشان می‌دهد. در قسمت (الف) سرعت روبش ۵۰۰ mm/min ثابت فرض شده است و توان لیزر در بازه ۰/۳ W تا ۱/۴ W تغییر داده شده است. در قسمت (ب) توان لیزر ۰/۹۸ W ثابت فرض شده است و سرعت در بازه ۲۰۰ mm/min تا ۲۵۰۰ mm/min تغییر داده شده است. همانند پهنای خط ذوب، ضخامت خط نیز با افزایش توان لیزر افزایش و با افزایش سرعت روبش کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که مقایسه نمودار شکل (۱۱) با نمودار شکل (۱۲) نشان می‌دهد که ضخامت خط ذوب به ازاء هر توان لیزر و سرعت روبش تقریباً نصف پهنای آن می‌باشد.

شکلهای (۷) و (۸) نتایج تجربی و شکلهای (۱۱) و (۱۲) نتایج شبیه‌سازی تاثیر توان لیزر و سرعت روبش بر پهنای و ضخامت خط ذوب را نشان می‌دهند.

این نتایج قابل پیش‌بینی را می‌توان به صورت زیر توضیح داد. افزایش دمای ماده تحت تابش لیزر در فرایند چاپ سه بعدی به دو طریق فراهم می‌گردد.

به نواحی کناره باریکه با آهنگ بیشتری رخ دهد که این پدیده نیز منجر به افزایش دمای نواحی کناره باریکه و در نتیجه باعث افزایش پهنای و ضخامت خط ذوب می‌شود. قابل توجه است که آهنگ افزایش پهنای و ضخامت خط ذوب با افزایش توان لیزر کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به دو دلیل باشد. (۱) با افزایش بیش از حد توان و در نتیجه دمای ماده تحت تابش اتلاف انرژی به علت انتقال گرما به هوای مجاور افزایش می‌یابد و (۲) با افزایش توان و در نتیجه افزایش پهنای و ضخامت خط ذوب فاصله مرکز خط با کناره آن بیشتر شده و آهنگ انتقال گرما از مرکز به کناره کاهش می‌یابد. برهمین پایه این دو فرایند نهایتاً منجر به اشباع شدن پهنای و ضخامت خط می‌شود.

کاهش سرعت روبش باریکه لیزر باعث افزایش زمان تابشدهی و در نتیجه انباشت انرژی در نواحی تحت تابش و نهایتاً افزایش دما می‌شود. افزایش دما در حاشیه خط مستقیماً باعث افزایش پهنای و ضخامت خط شده و افزایش دما در مرکز خط باعث افزایش آهنگ انتقال گرما از مرکز به حاشیه و در نتیجه تقویت افزایش دمای حاشیه می‌شود. در مجموع، افزایش پهنای و ضخامت خط از طریق کاهش سرعت روبش حاصل برهمین پایه دو پدیده انباشت مستقیم انرژی به علت افزایش زمان تابشدهی و انتقال انرژی از مرکز خط به حاشیه آن می‌باشد.

به طور خلاصه، افزایش پهنای و ضخامت خط ذوب حاصل همزمانی دو پدیده متفاوت در فرآیند افزایش دمای ماده است؛ جذب مستقیم انرژی از باریکه لیزر در هر نقطه و انتقال گرما از نقاط با دمای بیشتر به نقاط با دمای کمتر.

طبق رابطه $E = P \cdot \Delta t$ ، که در آن E انرژی، P توان و Δt زمان تابشدهی است، انباشت انرژی در هر نقطه می‌تواند از طریق افزایش توان لیزر و یا زمان تابشدهی صورت گیرد که زمان تابشدهی متناسب با عکس سرعت روبش است. میزان گرمای منتقل شده از مرکز به حاشیه خط نیز تابع اختلاف دما و فاصله بین این دو ناحیه است.

۶- جمع‌بندی

در این پژوهش از پودر پلیمری پلی‌اتیلن چگالی بالا HDPE 3840UA به عنوان ماده تحت فرآیند و از لیزر دیودی با طول موج ۴۵۰ nm و توان ۴ W به عنوان چشمه لیزری ارزان قیمت استفاده شد. ضریب بازتاب پودر خالص پلی‌اتیلن در طول موج لیزر مورد استفاده بسیار بالا است در نتیجه به منظور افزایش ضریب جذب، این پودر با گرافیت

به عنوان افزودنی جاذب با نسبت جرمی ۹۵ به ۵ مخلوط شد. اثر سرعت روبش و توان لیزر بر پهنای خط چاپ شده بر مبنای گداخت بستر پودر به طور تجربی بررسی گردید. اثر این دو پارامتر بر پهنای و ضخامت خط ذوب با استفاده از نرم‌افزار COMSOL نیز شبیه‌سازی گردید که نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش سرعت روبش موجب کاهش پهنای خط ذوب و افزایش توان لیزر موجب افزایش پهنای خط ذوب می‌گردد. برای هر توان مشخص، سرعت بیشینه‌ای وجود دارد که برای مقادیر بیش از آن ذوب/تفجوشی اتفاق نمی‌افتد. کمترین توان لیزری استفاده شده در بررسی‌های تجربی ۰.۳ W بود که سرعت روبش آستانه برای آن ۶۰۰ mm/Min تعیین گردید. همچنین، برای هر سرعت مشخص، توان کمینه‌ای وجود دارد که برای مقادیر کمتر از آن ذوب/تفجوشی رخ نمی‌دهد. حداکثر سرعت روبش برای تولید نمونه‌ها ۳۰۰۰ mm/Min بود که توان آستانه برای آن ۲ W تعیین گردید.

تعارض منافع:

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تقدیر و تشکر:

از شرکت لیزر پرتو سازان مستقر در پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان برای فراهم نمودن امکانات بخش تجربی این پژوهش تشکر می‌گردد.

تأییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:

طاها خادمیان: بررسی‌های تجربی و محاسبات عددی را برعهده داشته‌اند و در نوشتن طرح اولیه مقاله مشارکت داشته‌اند.

علی اصغر عجمی: نوشتن مقاله، تحلیل داده‌ها، ویرایش نهایی و پاسخ به داوران را برعهده داشته‌اند. در رسم نمودارها هر دو نویسنده مشارکت داشته‌اند.

منابع مالی:

برای تهیه این مقاله هیچ حمایت مالی دریافت نگردیده است.

مراجع

- [1] Ligon, Samuel Clark, Robert Liska, Jurgen Stampfl, Matthias Gurr, and Rolf Mülhaupt. "Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing". *Chemical reviews* 117, no. 15 (2017) : 10212-10290.
- [2] Deckard, Carl R. "Method and apparatus for producing parts by selective sintering." (1991).
- [3] Papazoglou, Emmanouil L., Nikolaos E. Karkalos, Panagiotis Karmiris-Obratański, and Angelos P. Markopoulos. "On the modeling and simulation of SLM and SLS for metal and polymer powders: a review." *Archives of Computational Methods in Engineering* (2022): 1-33.
- [4] Khan, Mushtaq, and Phill Dickens. "Selective laser melting (SLM) of pure gold ". *Gold bulletin* 43, no. 2 (2010) : 114-121.
- [5] Liverani, Erica, Stefania Toschi, Lorella Ceschini, and Alessandro Fortunato. "Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel." *Journal of Materials Processing Technology* 249 (2017): 255-263.
- [6] Elsayed, Mahmoud, Mootaz Ghazy, Yehia Youssef, and Khamis Essa. "Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants." *Rapid Prototyping Journal* 25, no. 3 (2018): 433-447.
- [7] Karmiris-Obratański, Panagiotis, Emmanouil L. Papazoglou, Nikolaos E. Karkalos, and Angelos P. Markopoulos. "Volume energy density and laser power: Key determinants in SLS-processed PA12 mechanical properties." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 130, no. 5 (2024): 2505-2522.
- [8] Faraj, Zainab, Smail Zaki, Mohamed Aboussaleh, and Hamid Abouchadi. "Influence of processing parameters on tensile properties of PA12 parts manufactured by selective laser sintering." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 128, no. 3-4 (2023): 1115-1125.
- [9] El Magri, Anouar, Salah Eddine Bencaid, Hamid Reza Vanaei, and Sébastien Vaudreuil. "Effects of Laser Power and Hatch Orientation on Final Properties of PA12 Parts Produced by Selective Laser Sintering." *Polymers* 14, no. 17 (2022): 3674.
- [10] Hou, Gaoyan, Hong Zhu, and Dan Xie. "The Influence of SLS Process Parameters on the Tensile Strength of PA2200 Powder." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 571, no. 1, p. 012111. IOP Publishing, 2020.
- [11] Fateri, Miranda, Andreas Gebhardt, Stefan Thuemmler, and Laura Thurn. "Experimental investigation on selective laser melting of glass." *Physics Procedia* 56 (2014): 357-364.
- [12] Juste, Enrique, Fabrice Petit, Véronique Lardot, and Francis Cambier. "Shaping of ceramic parts by selective laser melting of powder bed." *Journal of Materials Research* 29, no. 17 (2014): 2086-2094.
- [13] Tran, Hong-Chuong, and Yu-Lung Lo. "Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 411-425.
- [14] Boschetto, Alberto, Luana Bottini, Luciano Macera, and Francesco Veniali. "Post-processing of complex SLM parts by barrel finishing." *Applied Sciences* 10, no. 4 (2020): 1382.
- [15] Ye, Chang, Chaoyi Zhang, Jingyi Zhao, and Yalin Dong. "Effects of post-processing on the surface finish, porosity, residual stresses, and fatigue performance of additive manufactured metals: a review." *Journal of Materials Engineering and Performance* 30 (2021): 6407-6425.
- [16] Weaver, Jordan S., Jarred C. Heigel, and Brandon M. Lane. "Laser spot size and scaling laws for laser beam additive manufacturing." *Journal of Manufacturing Processes* 73 (2022): 26-39.
- [17] Dinh, Ba Bach, Yanling Guo, Tat Thang Nguyen, and Nho Tho Tran. "Optimize print speed and laser power of the 3D printing technology selective laser sintering (SLS) for mixture of powder materials green bean and polylactic acid (GBP/PLA)." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 782, no. 2, p. 022111. IOP Publishing, 2020.
- [18] <https://www.tpco.ir/fa-IR/DouranPortal/4964/page>
- [19] Bäuerle, Dieter. "Laser Processing and Chemistry [electronic resource]." (2000).

- [20] Kaselouris, E., I.K. Nikolos, Y. Orphanos, E. Bakarezos, N.A. Papadogiannis, M. Tatarakis, and V. Dimitriou. "A review of simulation methods of laser matter interactions focused on nanosecond laser pulsed systems." *Journal of Multiscale Modelling* 5, no. 04 (2013): 1330001.
- [21] Thümmel, Fritz, and Rainer Oberacker. "An introduction to powder metallurgy." Institute of Materials, (1993).
- [22] Foroozmehr, Ali, Mohsen Badrossamay, Ehsan Foroozmehr, and Sa'id Golabi. "Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed." *Materials & Design* 89 (2016): 255-263.
- [23] Hussein, Ahmed, Liang Hao, Chunze Yan, and Richard Everson. "Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting." *Materials & Design* (1980-2015) 52 (2013): 638-647.
- [24] Martienssen, Werner, and Hans Warlimont, eds. *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [25] <https://plasto.ru/tpc3440.pdf>
- [26] De Gracia, Alvaro, and Luisa F. Cabeza. "Phase change materials and thermal energy storage for buildings." *Energy and Buildings* 103 (2015): 414-419.
- [27] Yang, C., M.E. Navarro, B. Zhao, G. Leng, G. Xu, L. Wang, Y. Jin, and Y. Ding. "Thermal conductivity enhancement of recycled high density polyethylene as a storage media for latent heat thermal energy storage." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 152 (2016): 103-110.
- [28] <https://www.engineersedge.com/heat-transfer/convective-heat-transfer-coefficients-13378.html>
- [29] Sobolciak, Patrik, Asma Abdulgader, Miroslav Mrlik, Anton Popelka, Ahmed A. Abdala, Abdelnasser A. Aboukhlewa, Mustapha Karkri, Hendrik Kiepfer, Hans-Joerg Bart, and Igor Krupa. "Thermally conductive polyethylene/expanded graphite composites as heat transfer surface: Mechanical, thermo-physical and surface behavior." *Polymers* 12, no. 12 (2020): 2863.
- [30] Vora, Hitesh D., Soundarapandian Santhanakrishnan, Sandip P. Harimkar, Sandra KS Boetcher, and Narendra B. Dahotre. "One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: evolution of surface topography." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (2013): 69-83.