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

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

Volume 12, Number 1, 2026



Optimization of process map and prediction of single-pass properties of Inconel 738LC by selective laser melting method with regression and genetic algorithm

M. Talebipour, R. Shoja Razavi*, R. Mozafarinia, M. Barekat, A. Khorram
Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Received 12 November 2025 ; Accepted 28 January 2026

Abstract

Selective laser melting (SLM) has been considered as a method for manufacturing large and complex industrial parts. Considering that structural defects are generally caused by process parameters, the optimal evaluation of parameter selection to minimize localized defects has been of interest. Therefore, a model was presented to predict the optimal single-pass geometric characteristics based on the main process parameters, namely laser power and scanning speed, to prevent defects in single-pass Inconel 738LC on Inconel 738 casting substrate. An optimal process map was obtained based on the use of linear regression method combined with genetic optimization algorithm with optimal combination parameters ($P^{\alpha}V^{\beta}$). Finally, based on the geometric characteristics of single-passes, an optimal region was identified on the process map. At a power of 325 W and a laser scanning speed of 800 mm/s, due to the decrease in the G/R ratio, the microstructure from the junction to the substrate to the top of the single pass has changed from columnar to coaxial dendritic.

Keywords: Selective laser melting, Inconel 738LC, Linear regression, Genetic algorithm, Microstructure.

*Corresponding Author: R. Shoja Razavi, shoja_r@yahoo.com.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



بهینه‌سازی نقشه فرایندی و پیش‌بینی ویژگی‌های تک‌پاس اینکونل 738LC به روش ذوب انتخابی لیزری با رگرسیون و الگوریتم ژنتیک

مصطفی طالبی‌پور، سید رضا شجاع رضوی*، رضا مظفری‌نیا، مسعود برکت، علی خرم

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت.

دریافت مقاله: 1404/08/21 ؛ پذیرش مقاله: 1404/11/08

چکیده

ذوب انتخابی لیزری (SLM) امروزه به عنوانی روشی برای ساخت قطعات بالک و پیچیده صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که عیوب ساختاری عموما از پارامترهای فرایند ناشی می‌شوند، ارزیابی بهینه انتخاب پارامترها برای به حداقل رساندن عیوب موضعی مورد توجه بوده است. بنابراین، مدلی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس بهینه بر اساس پارامترهای فرایند اصلی یعنی توان و سرعت روبش لیزر برای جلوگیری از ایجاد نقص در تک پاس‌های اینکونل 738LC بر روی زیرلایه از جنس اینکونل 738 ریختگری ارائه شد. نقشه فرایندی بهینه بر اساس استفاده از روش رگرسیون خطی همراه با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با پارامترهای ترکیبی بهینه (PαVβ) به دست آمد. در نهایت، بر اساس ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها، یک منطقه بهینه بر روی نقشه فرایندی مشخص شد. در توان W 325 و سرعت روبش لیزر mm/s 800 با توجه به کاهش نسبت G/R، ریزساختار از ناحیه اتصال به زیرلایه تا بالای تک‌پاس، از دندریتی ستونی به دندریتی هم محور تغییر کرده است.

کلمات کلیدی: ذوب انتخابی لیزری، اینکونل LC738، رگرسیون خطی، الگوریتم ژنتیک، ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سید رضا شجاع رضوی shoja_r@yahoo.com.

1- مقدمه

فرایند ذوب انتخابی لیزری (SLM) به‌عنوان یکی از روش‌های مهم ساخت افزایشی، امکان تولید قطعات فلزی با هندسه‌های پیچیده و دقت بالا را فراهم کرده است [1-2]. با وجود مزایای قابل توجه این فرایند، کیفیت نهایی قطعات SLM شده به‌شدت به انتخاب پارامترهای فرایندی وابسته است؛ به‌گونه‌ای که تنظیم نامناسب توان لیزر و سرعت روبش می‌تواند منجر به بروز عیوبی نظیر تخلخل، عدم ذوب کامل، نفوذ بیش از حد و ناپایداری حوضچه مذاب شود [3-4]. ازاین‌رو، درک رفتار تک‌پاس به‌عنوان واحد پایه ساخت در SLM نقشی کلیدی در کنترل عیوب و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند دارد.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر بررسی رفتار آلیاژهای مختلف در فرایند SLM، از جمله فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای حافظه‌دار NiTi و آلیاژهای آلومینیوم تمرکز داشته‌اند [3-6]. در میان آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژ IN738LC به‌دلیل کاربرد گسترده در قطعات دمابالای توربین‌های گازی و دارا بودن استحکام خزشی، پایداری حرارتی و مقاومت به اکسیداسیون، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [7-11].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

خواص مطلوب این آلیاژ عمدتاً ناشی از حضور فاز تقویتی گاماپرایم در زمینه γ و همچنین کاربیدهای پایدار در مرزدانه‌ها است. با این حال، رفتار انجمادی سریع و شرایط حرارتی شدید حاکم بر SLM می‌تواند ریزساختار و کیفیت نهایی این آلیاژ را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد[15-12].

برخی از محققان تشکیل تک پاس های آلیاژهای مختلفی همچون فولاد زنگ نزن 316L، آلیاژ الومینیوم، AlSi10Mg و انواع مختلف سوپرآلیاژها را مورد مطالعه قرار دادند. یادرویتسو و همکاران [16] به بررسی ریزساختار و هندسه تک پاس‌های ایجاد شده با آلیاژ فولاد زنگ نزن 316L با متغیر هایی همچون دماهای پیش گرمایش و سرعت های روبش لیزر در توان لیزر ثابت پرداختند. در این تحقیق به مطالعه و بررسی خواص مکانیکی پرداخته نشده است. ابوبکار و همکاران [17] به بررسی عیوب ایجاد شده در مقیاس تک پاس و تک لایه آلیاژ AlSi10Mg در ضخامت های لایه مختلف پرداختند و در نتایج این گزارش به دست آمد که با افزایش ضخامت هر لایه، احتمال تشکیل عیوب بیشتر می‌شود. در این تحقیق به بررسی و مقایسه نانو سختی تک‌پاس‌های تشکیل شده و زیرلایه ریختگری نیز پرداخته‌شد که در آخر مشخص شد نانو سختی در تک‌پاس‌ها بالاتر و یکنواخت‌تر از زیر لایه ریختگری بوده است. ممتاز و هاپکینز [18] نیز به بررسی ریزساختار تک‌پاس‌های آلیاژ اینکونل 625 در سرعت‌های روبش لیزر ثابت با استفاده از لیزر پالسی پرداختند. دیندا و همکاران [19] به بررسی ریزساختاری دندریت‌ها در حوضچه مذاب تک‌پاس آلیاژ اینکونل 625 در دماهای مختلف عملیات آنیلینگ پرداختند. در نتایج به دست آمده از این تحقیق، عملکرد قطعه متاثر از عواملی همچون هندسه (عرض، ارتفاع، عمق و زاویه ترشوندگی)، همجوشی با زیرلایه و ریزساختار هر تک پاس بیان شد.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که بخش عمده تحقیقات انجام‌شده بر روی IN738LC تولیدشده به روش SLM، معطوف به نمونه‌های چندلایه یا بالک و بررسی خواص مکانیکی، دانسیته و ریزساختار کلی آن‌ها بوده است [4]. در حالی که مطالعات سیستماتیک و مبتنی بر مدل‌سازی از رفتار تک‌پاس به‌عنوان پایه‌ای‌ترین واحد ساخت در SLM، به‌ویژه در ارتباط مستقیم با استخراج نقشه فرایندی، به‌طور محدود گزارش شده‌اند. این مسئله باعث شده است که در بسیاری از تحقیقات، انتخاب پارامترهای فرایندی بیشتر مبتنی بر آزمون و خطا باشد تا یک رویکرد تحلیلی و قابل پیش‌بینی.

از سوی دیگر، اگرچه مدل‌های فیزیکی–عددی پیچیده قادر به شبیه‌سازی رفتار حوضچه مذاب هستند، اما این مدل‌ها معمولاً هزینه محاسباتی بالا داشته و برای کاربردهای عملی و صنعتی، به‌ویژه در مرحله انتخاب سریع پارامترها، چندان کارآمد نیستند[21-20]. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های آماری ساده اما مؤثر می‌تواند ابزاری مناسب برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس و استخراج نواحی بهینه فرایندی باشد. رگرسیون خطی، به‌دلیل شفافیت، قابلیت تفسیر فیزیکی و نیاز محدود به داده‌های آزمایشگاهی، یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی روابط بین پارامترهای فرایندی و پاسخ‌های هندسی در فرایندهای ساخت افزایشی است.

با این حال، مدل‌های آماری به‌تنهایی قادر به تعیین ترکیب بهینه پارامترها در یک فضای چندمتغیره نیستند. در این راستا، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای جستجوی نواحی بهینه در مسائل غیرخطی و چندهدفه شناخته می‌شوند. ترکیب رگرسیون خطی با الگوریتم ژنتیک، این امکان را فراهم می‌کند که ضمن حفظ سادگی مدل، دقت پیش‌بینی افزایش یافته و تعداد آزمایش‌های تجربی کاهش یابد.

اگرچه تعیین کمی مستقیم تجربی (G) و (R) فراتر از محدوده مطالعه فعلی بود، اما گذارهای ریزساختاری مشاهده‌شده را می‌توان از طریق چارچوب‌های نظری تثبیت‌شده درک کرد. طبق معیار فوق سرمایش ساختاری هانت و اصلاحات بعدی آن توسط کورز-فیشر، گذار از انجماد ستونی به انجماد هم‌محور زمانی رخ می‌دهد که نسبت G/R از یک مقدار بحرانی، معمولاً به صورت $\frac{G}{R} < \frac{\Delta T_0 . k}{D_l}$ کاهش یابد. بر این اساس، خلأ اصلی تحقیق حاضر، عدم وجود یک چارچوب منسجم مبتنی بر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

مدل‌سازی آماری–بهینه‌سازی برای پیش‌بینی هندسه تک‌پاس، استخراج نقشه فرایندی و اعتبارسنجی ریزساختاری آن در آلیاژ IN738LC تولیدشده به روش SLM است. ازاین‌رو، هدف این پژوهش ارائه مدلی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس بر اساس توان لیزر و سرعت روبش، استخراج نقشه فرایندی بهینه با استفاده از رگرسیون خطی و الگوریتم ژنتیک، و در نهایت بررسی کیفی ریزساختار تک‌پاس بهینه در نواحی مختلف حوضچه مذاب است. تمرکز این مطالعه بر تک‌پاس به‌عنوان واحد پایه فرایند، امکان درک بهتر ارتباط میان پارامترهای فرایندی، هندسه حوضچه مذاب و ریزساختار حاصل را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای توسعه ساخت چندلایه و قطعات بالک در تحقیقات آینده باشد.

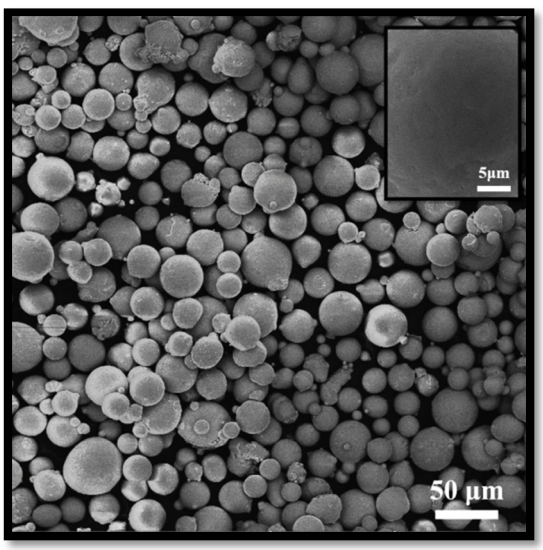
2- روش تحقیق

در این تحقیق از یک زیرلایه از جنس اینکونل 738 ریختگری با ابعادی به ضخامت 10 mm، طول 50 mm و عرض 50 mm استفاده شد. زیرلایه با استفاده از الکل برای از بین بردن آلودگی و چربی و گرد و غبار کاملا تمیز شد. برای به دست آوردن ترکیب شیمیایی زیرلایه، از دستگاه طیف سنجی جرقه‌ای (SES) مدل FOUNDRYMASTER Smart ساخته شرکت HITACHI HIGHTECH استفاده شد. پودر IN738LC از شرکت سولزر متکو که با اتمیزاسیون گازی فراوری شده‌است تامین شد. پودر IN738LC دارای اندازه پودرهایی با 99/5 درصد وزنی با ابعاد 45 میکرومتر و تنها 0/82 درصد وزنی با ابعاد 25 میکرومتر بودند که توسط EDS انجام گرفته از پودر، ترکیب شیمیایی آن گزارش شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه و پودر در جدول(1) ارائه شده‌است. مورفولوژی پودر IN738LC که در شکل(1) نیز مشاهده می‌شود، کاملا کروی بوده که یک کاندید عالی برای فرایند SLM می‌باشد.

تعریف جامع فرایند SLM پیچیده است زیرا پارامترهای مختلفی مانند نوع لیزر، مشخصات پرتوی لیزر، اندازه لکه لیزر، ویژگی های گاز محافظ و مکانیسم روبش پودر در آن نقش دارند [15]. آزمایش SLM تک‌پاس بر روی یک سیستمی شامل لیزر فیبری، هد لیزر اسکن‌لب، چیلر، استبلایزر و یک سیستم جریان گاز محافظ بی اثر آرگون بود. لیزر مورد استفاده با مشخصات 500 وات فیبری پیوسته با طول موج 1080 نانومتر بوده‌است. به وسیله تنظیمات سیستمی، قطر پرتو در نقطه کانونی 72 میکرومتر و اندازه فیبر نوری قطر هسته به میزان 50 میکرومتر برای تمامی نمونه‌ها تنظیم شد. علاوه بر این، از روبشگر فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 316L برای ایجاد یک لایه پودری ثابت بر روی زیرلایه استفاده شد که موتور محور Z قادر به ایجاد پودر با وضوح 2 میکرومتر روی زیرلایه است.

جدول1- ترکیب شیمیایی پودر IN738LC و زیرلایه.

عناصر	IN738LC	زیرلایه
Ni	balance	balance
Cr	15/76	14/27
Mo	1/76	1/43
Ti	3/38	2
Nb	0/78	0/81
W	2/68	1/43
Co	8/47	9/18
Ta	1/63	1/57
Al	3/38	3/22
C	0/13	0/16
B	0/0089	0/0056
Zr	0/058	0/049



شکل1- تصاویر SEM از سطح ذرات پودر IN738LC.

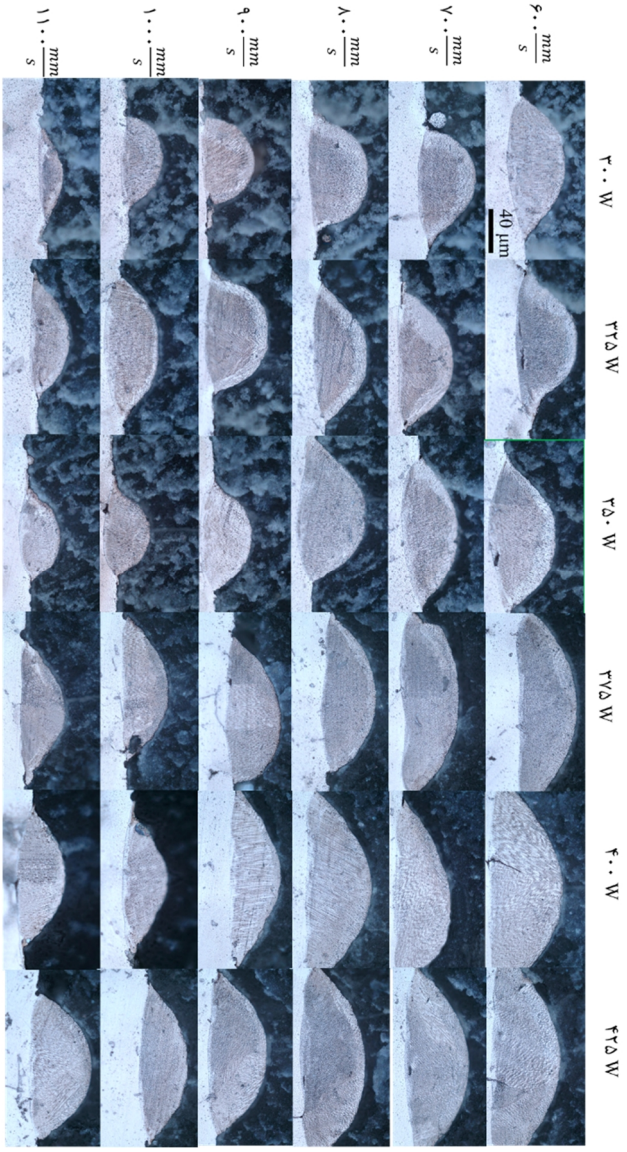
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

ابتدا محفظه دستگاه تا فشار 1- بار خلا شد و گاز محافظ آرگون با دبی 18 L/min به درون محفظه برای جلوگیری از اکسید شدن حوضچه مذاب تک‌پاس تزریق شد و فشار محفظه را به 0/3 بار رساند. جریان گاز محافظ توسط یک تنظیم کننده دمیده شد که تاثیری بر میزان ضخامت پودرهای فلزی نداشته باشد. پس از 10 دقیقه از باز شدن شیرهای خروجی که گاز آرگون اضافی را از محفظه خارج می‌کند تست انجام گرفت. این کار به کاهش میزان اکسیژن محفظه کمک می‌کند.

پارامترهای توان لیزر(W)(P)، سرعت روبش لیزر(mm/s)(V) و میزان ضخامت لایه پودر(µm)(T) بیشترین تاثیر را بر روی LPBF دارند. این پارامترها بر ویژگی‌های هندسی تک‌پاس ایجاد شده بر روی زیرلایه تأثیر می‌گذارند و برای بررسی این تأثیر، یک طرح فاکتوریل کامل آزمایش (DOE) بر اساس توان و سرعت روبش لیزر انجام شد. شش سطح به پارامترهای توان لیزر و شش سطح به پارامتر سرعت روبش لیزر اختصاص داده شد و با در نظر گرفتن DOE کامل فاکتوریل، 36 تک پاس انجام گرفت. لازم به ذکر است که ضخامت لایه 70 µm ثابت درنظر گرفته شد. انتخاب متغیر بودن دو پارامتر و ثابت بودن یک پارامتر، به علت پیچیدگی سیستم ومحدودیت های عملی بوده است.

ارزیابی ویژگی‌های هندسی تک پاس ها شامل مواردی همچون عمق نفوذ، ارتفاع، عرض، زاویه تر شدن و آمیختگی می‌شود. تک‌پاس‌های ایجاد شده بر روی زیرلایه را از طریق ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) برش داده می‌شوند و سپس متالوگرافی می‌شوند. برای ایجاد کردن سطحی صاف و صیقلی برای نمونه‌ها، از کاغذهای کاربید سیلیکون با سطوح خشن 1500 تا 4500 استفاده شد. پس از پولیش، نمونه‌ها با محلول کالینگ شماره 2 (مقادیر 5 گرم $CuCl_2$، 100 میلی‌لیتر اسید HCl و 100 میلی‌لیتر اتانول) در مدت زمان 60 ثانیه اچ شدند. انتخاب این نوع اچ به علت نمایش ریزساختار تشکیل شده، فازهای مختلف و همچنین بررسی ویژگی‌های هندسی انتخاب شده است. در شکل(2) تصاویر از سطح نمونه‌های آماده شده در پارامترهای مختلف فرایند با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل HR3-TRF-P ساخت شرکت HUVITZ گرفته شد. بررسی اولیه تصاویر نیز تاثیر کمی و کیفی پارامترهای مختلف فرایند بر هندسه نهایی تک‌پاس‌ها را نشان می‌دهند و ویژگی های هندسی به طور دقیق اندازه‌گیری و محاسبه شدند.

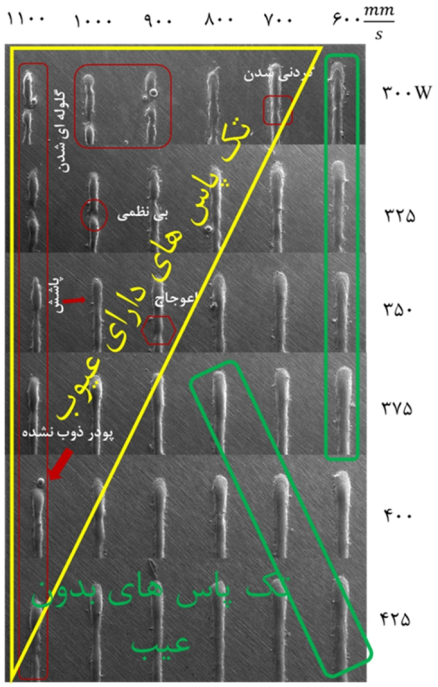


شکل2-تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع تک‌پاس‌ها.

شکل(3) تصاویری از نمای بالای سطح تک‌پاس‌های تشکیل شده را در توان و سرعت‌های روبش لیزر مختلف نشان می‌دهد. از تصاویر نتیجه می‌شود که تشکیل تک‌پاس‌های پیوسته و ناپیوسته، بسیار به پارامترهای پردازش بستگی دارند. در پارامتر 300 W و 1100 mm/s، مشاهده می‌شود که تک پاس به صورت کروی و قطره‌ای روی زیرلایه تشکیل شده است.

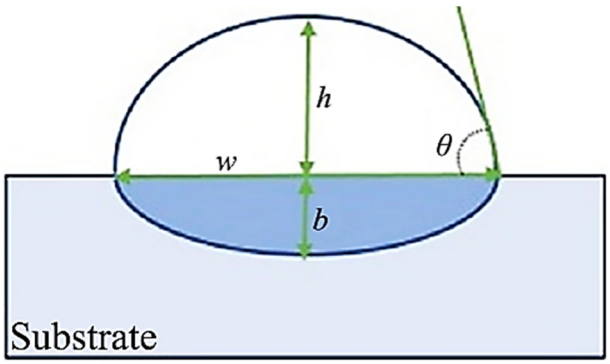
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

بیشتر نمونه‌های تک‌پاس تحت پارامترهای مختلف پردازش، به صورت پیوسته تشکیل شده‌اند. در توان لیزر ثابت 425 W، همگی تک‌پاس‌ها پیوسته تشکیل شدند. این نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر به تشکیل تک‌پاس‌های پیوسته کمک می‌کند. تک‌پاس‌های پیوسته به دلیل ایجاد پیوند مناسب در کنار تک‌پاس‌های مجاور، یک ساختار کاملا متراکم را برای قطعات فراهم می‌کنند. در صورت تشکیل مسیرهای ناپیوسته، یک ناپایداری ذاتی Plateau-Rayleigh ایجاد می‌شود که باعث ایجاد ایجاد نقص در بالک نمونه می‌کند. به علت ناپایداری حوضچه مذاب، پدیده‌هایی همچون گلوله‌ای شدن، پاشش، بی‌نظمی، وجود ذرات ذوب نشده و اعوجاج در تصاویر مشاهده می-شود. با افزایش سرعت روبش لیزر و کاهش توان لیزر، عرض تک‌پاس تشکیل شده کاهش می‌یابد و اگر این کاهش بسیار زیاد باشد باعث ایجاد نقص گلوله‌ای شدن می‌شود. علت تشکیل این نقص نیز کاهش انرژی ورودی لیزر در سرعت‌های روبش بالا و توان لیزر کم بوده است که توانایی تر شوندگی در نقطه شروع را کاهش می دهد. برای رفع این عیب، می توان سرعت روبش لیزر را کاهش داد که در واقع همان افزایش مقدار LED مطرح می‌شود.



شکل3- مورفولوژی سطحی تک‌پاس‌های ساخته شده تحت توان و سرعت‌های مختلف روبش.

با استفاده از نرم افزار Image J، اندازه‌گیری و ارزیابی ویژگی‌های هندسی تک پاس ها همچون عمق نفوذ(b)، ارتفاع(h)، عرض(w) و زاویه تر شدن(θ) انجام شد. ویژگی هندسی دیگر همچون آمیختگی($\frac{b}{b+h}$) نیز بر اساس عمق نفوذ و ارتفاع محاسبه می‌شود. شکل(4) نمای شماتیک از کل پارامترهایی است که به شکل گیری تک پاس کمک می‌کنند.



شکل4- نمای شماتیک از ویژگی‌های هندسی تک‌پاس.

زاویه تر شدن تک‌پاس ایجاد شده بر روی زیرلایه با فرض این که به صورت نیم کره تشکیل شود را نیز می‌توان با استفاده از معادله (1) محاسبه کرد [22]. w و h موجود در معادله به ترتیب عرض و ارتفاع تک‌پاس تشکیل شده‌هستند. جدول(2)، کل پارامترهای فرایند و ویژگی‌های هندسی تک پاس‌های مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$\theta = 2\tan^{-1}(\frac{2h}{w}) \quad (1)$$

با توجه به این که تمامی پارامترهای فرایند SLM بر ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌های ایجاد شده تاثیر دارند، ضروری است که تمامی این پارامترها در قالب یک پارامتر ترکیبی در نظر گرفته شوند. این پارامتر ترکیبی قادر به پیش بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها می‌شود. از رگرسیون خطی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تک‌پاس‌ها با توجه به زیاد بودن پارامترهای فرایند و نیازهای آزمایشی گسترده استفاده‌شد.

در معادله (2)، پارامترهای a و b ضرایب معادله، Y نشان دهنده مشخصه هندسی در حال بررسی و X پارامتر ترکیبی مربوط به $P^{\alpha}V^{\beta}$ است.

$$Y = aX + b \quad (2)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

جدول2-پارامترها و مشخصات هندسی تک‌پاس‌ها.

	پارامترهای فرایند		مشخصات هندسی				
	P (W)	S (mm/os)	عرض (µm)	ارتفاع (µm)	عمق نفوذ (µm)	زاویه تر شوندگی (θ)	آمیختگی (%)
1	300	600	163	55	11	44	17,52
2	300	700	141	53	12	54	17,54
3	300	800	132	42	11	60	18,93
4	300	900	140	42	7	64	15,53
5	300	1000	110	36	5,3	63	12,69
6	300	1100	98	34	5/5	72	14,59
7	325	600	158	63	13	41	17,89
8	325	700	165	53	9	47	15,59
9	325	800	157	51	10	55	14,78
10	325	900	137	48	7	56	14,53
11	325	1000	138	41	8	59	14,84
12	325	1100	136	36	6	67	11,89
13	350	600	172	61	15	41	21,34
14	350	700	170	56	12	49	19,09
15	350	800	143	53	11	51	18,85
16	350	900	150	51	9	58	16,91
17	350	1000	132	38	9	52	21,31
18	350	1100	127	32	10	57	20,91
19	375	600	219	63	16	37	20,68
20	375	700	210	53	13	42	17,41
21	375	800	179	52	12	46	16,89
22	375	900	168	51	11	51	15,59
23	375	1000	165	46	7	51	14,79
24	375	1100	164	42	8	47	14,31
25	400	600	241	63	21	37	23,54
26	400	700	229	53	15	43	21,36
27	400	800	221	53	12	48	16,96
28	400	900	207	52	11	48	16,69
29	400	1000	152	51	7	43	13,35
30	400	1100	150	53	8	41	11,87
31	425	600	253	70	14	36	17,89
32	425	700	237	65	12	38	16,89
33	425	800	219	61	11	48	16,93
34	425	900	226	57	12	46	17,68
35	425	1000	191	58	11	47	14,94
36	425	1100	173	43	10	48	20

پارامتر ترکیبی شامل دو پارامتر اصلی یعنی توان لیزر و سرعت روبش لیزر بوده است که توسط یک الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌است. در این الگوریتم هدف به حداقل رساندن خطای رگرسیون خطی بوده‌است و α و β پارامترهای طراحی در نظر گرفته شدند. این الگوریتم تا جایی ادامه می‌یابد که خطای رگرسیون را به حداقل برساند و به توان بهینه برسد.

پس از آن که برای ویژگی‌های هندسی به یک پارامتر ترکیبی بهینه دستیابی حاصل شد، می‌توان معادله (2) را با توجه به ویژگی‌هایی که قبلا ذکر شده‌است، تعیین کرد. با استفاده از پارامترهای ترکیبی و معادلات خطی به دست آمده می‌توان همبستگی بین توان لیزر(P) و سرعت روبش لیزر(V) را برای هر یک از ویژگی‌های هندسی به دست آورد. یک مدل پیش‌بینی که به آن نقشه فرایندی می‌گویند نیز بر اساس گسترش همبستگی بین توان لیزر و سرعت روبش لیزر به دست می‌آید. پارامترهای فرایند مربوطه را می‌توان با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی از نقشه فرایندی به دست آورد.

از تک پاس های تشکیل شده آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD) انجام گرفت. دستگاه آنالیز XRD از مدل EXPLORER بوده است و برای انجام این تست، از تک‌پاس‌هایی که به صورت گلوله‌ای درآمده اند و به آسانی از سطح جدا می‌شوند استفاده شد. پس از آن که نقشه فرایندی به دست آمد، از یک تک‌پاس مشخص شده در ناحیه‌های مختلف، تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی(FESEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN، گرفته شد. در تصاویر FESEM، بررسی دقیق ویژگی‌های هندسی، ریزساختار و کیفیت تک‌پاس صورت گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج رگرسیون خطی ویژگی‌های هندسی

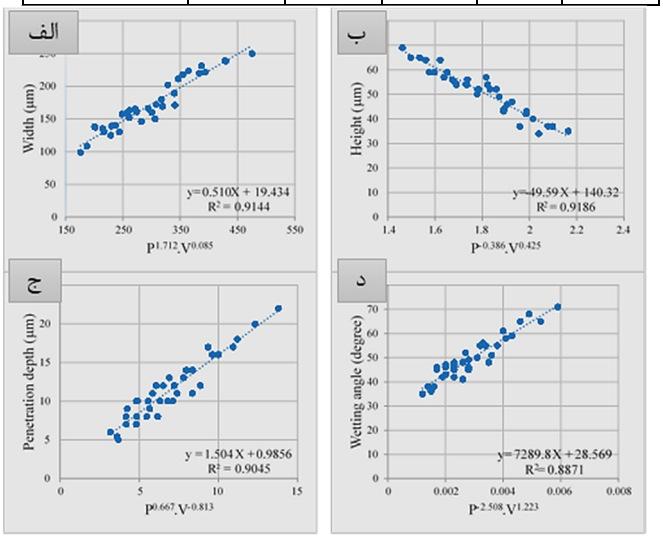
ضرایب رگرسیون خطی و پارامترهای ترکیبی به دست آمده برای عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه تر شدن تک‌پاس‌ها در جدول(3) ارائه شده است. با توجه به جدول ارائه شده، مقادیر بالای R^2 برای رگرسیون خطی، نشان دهنده اثر بخش بودن و دقت بالای الگریتم بهینه‌سازی انرژی دارد. در شکل(5) نیز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

نمودارهای رگرسیون خطی نشان داده شده‌است و خط کشیده شده از میان نقاط همگرا در این نمودارها نشانه‌ی بصری از دقت مدل ارائه‌شده می‌باشد. مقایسه پارامترهای ترکیبی و ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی ارائه شده تا چه اندازه توانسته‌است میزان و نوع تاثیر پارامترهای فرایند را بر آن‌ها تعیین کند.

جدول 3- پارامترهای ترکیبی و ضرایب رگرسیون خطی.

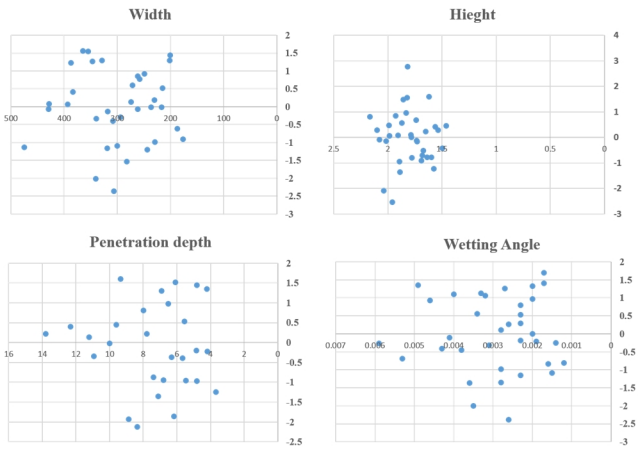
G.C.	R.P.				
	a	b	X		R^2
			α	β	
عرض	0/510	19/434	1/712	0/085	0/9144
ارتفاع	-49/59	140/32	-0/386	0/425	0/9186
عمق نفوذ	1/504	0/9856	0/667	0/813	0/9045
زاویه تر شوندگی	7289/8	28/569	-2/508	1/223	0/8871



شکل5-نمودارهای رگرسیون خطی برای الف- عرض، ب- ارتفاع، ج- عمق نفوذ، و د- زاویه ترشوندگی.

3-2- تحلیل خطا و اعتبارسنجی مدل

اگرچه رفتار حوضچه مذاب در فرایند ذوب انتخابی لیزری ذاتاً غیرخطی بوده و تحت تأثیر هم‌زمان پدیده‌های انتقال حرارت، دینامیک حوضچه و برهم‌کنش لیزر–ماده قرار دارد، هدف این پژوهش توسعه یک مدل مهندسی ساده، پایدار و قابل استفاده صنعتی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها با حداقل پیچیدگی محاسباتی بوده است. به همین دلیل از رگرسیون خطی همراه با تعریف پارامتر ترکیبی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا بخشی از رفتار غیرخطی سیستم در توان‌های مختلف لیزر و سرعت‌های روبش در قالب ضرایب توان‌دار لحاظ شود. با توجه به شکل(5) پس از تعیین پارامترهای بهینه α و βبرای هر ویژگی هندسی، مدل‌های رگرسیون خطی با ضریب تعیین(R2) برای عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی به ترتیب مقادیر بالاتری از 0/88 به‌دست آورد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی است. این مقادیر بیانگر آن است که بخش عمده واریانس داده‌ها توسط مدل توضیح داده می‌شود، هرچند وجود خطای پیش‌بینی به دلیل ساده‌سازی‌های اعمال‌شده اجتناب‌ناپذیر است. به‌منظور بررسی اعتبار فرض خطی بودن مدل و ارزیابی توزیع خطاها، نمودارهای باقیمانده برای هر یک از ویژگی‌های هندسی تک‌پاس شامل عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی رسم شد (شکل 6). در این نمودارها، باقیمانده‌ها به صورت اختلاف بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل تعریف شده‌اند.



شکل6- نمودارهای باقیمانده برای الف) عرض، ب) ارتفاع، ج) عمق نفوذ، و د) زاویه ترشوندگی.

نتایج نشان داد باقیمانده‌ها به صورت تصادفی در اطراف مقدار صفر توزیع شده‌اند و الگوی سیستماتیک یا روند مشخصی مشاهده نمی‌شود؛ عدم مشاهده الگوهای قیفی‌شکل یا ساختارهای منظم در توزیع باقیمانده‌ها بیانگر نبود ناهمسان‌واریانس شدید در داده‌ها است؛ توزیع نسبتاً متقارن

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

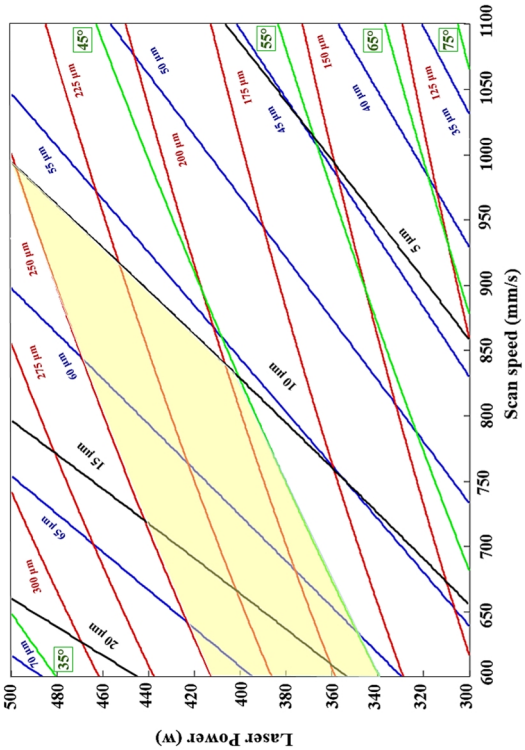
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

خطاها نشان می‌دهد که مدل رگرسیون دچار بیش‌برازش یا کم‌برازش شدید نشده است؛ بنابراین به‌رغم ماهیت غیرخطی فرایند SLM، مدل خطی ارائه‌شده پس از اعمال پارامتر ترکیبی بهینه، قادر به توصیف مناسب رفتار کلی سیستم در بازه پارامترهای مورد بررسی است.

3-3- نقشه فرایندی

بر اساس همبستگی که بین توان لیزر(P) و سرعت روبش لیزر(V) وجود دارد، با استفاده از پارامترهای ترکیبی و معادلات خطی به دست آمده می‌توان ویژگی هندسی تک‌پاس‌ها را به دست آورد. معادلات به دست آمده از جدول(3)، باعث رسم نقشه فرایندی می‌شود که تغییرات ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها را بر اساس مقادیر مختلف پارامترهای توان لیزر و سرعت روبش لیزر نشان می دهد. در شکل(7) مشاهده می‌شود که نقشه فرایندی تک‌پاس‌های آلیاژ IN738LC بر روی زیرلایه اینکونل 738 ریختگری دارای خطوطی بوده‌است که هر کدام از این خطوط یک ویژگی هندسی خاص با مقدار ثابت عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی تک‌پاس‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نقشه فرایندی یک ابزار قوی برای پیش بینی به دست آوردن تک‌پاس‌های مطلوب بر اساس ویژگی‌های هندسی بوده و پارامترهای هر کدام از این تک‌پاس‌ها را به درستی بیان می‌کند. در تحقیقات انجام گرفته، نقشه فرایندی برای تک‌پاس‌های بهینه در فرایند رسوب نشانی مستقیم لیزری(DLD) انجام شده‌است[28-23].

با همبستگی که بین پارامتر ترکیبی $P^{1/712}.V^{0/085}$ و عرض تک‌پاس‌ها بر روی نقشه فرایندی وجود دارد خطوط قرمز رنگی از 125 µm تا 300 µm رسم شدند. علاوه بر این، خطوط آبی رنگ نیز نشان دهنده همبستگی پارامتر ترکیبی P^{-} $^{0.425}.V^{0.386}$و ارتفاع تک‌پاس‌ها بوده‌است و از 35 µm تا 75 µm بر روی نقشه فرایندی رسم شده‌است. خطوط مشکی رنگ نیز بر اساس همبستگی پارامتر ترکیبی $P^{0/667}.V^{-0/813}$ و عمق نفوذ تک‌پاس‌ها از 5 µm تا 20 µm بر روی نقشه فرایندی رسم شد. در آخر نیز خطوط سبز رنگ براساس همبستگی پارامتر ترکیبی $P^{-2/508}.V^{1/223}$ و زاویه ترشوندگی تک‌پاس‌ها با زیرلایه، از 35 تا 75 درجه بر روی نقشه فرایندی رسم شد.



شکل7-نقشه فرایند تک‌پاس‌های ایجاد شده با استفاده از فرایند SLM

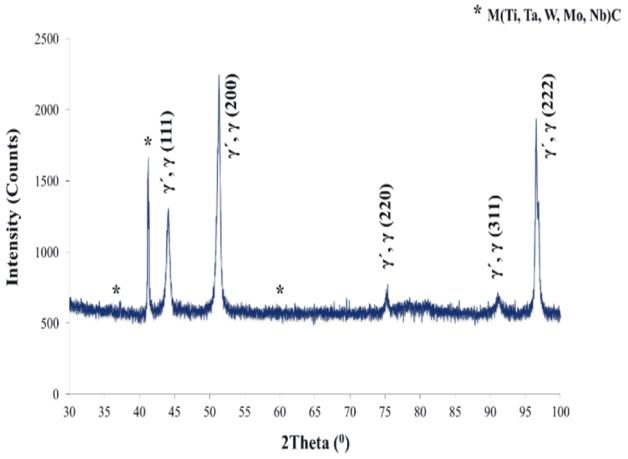
بر اساس مقالات و تحقیقات انجام شده، پارامترهای ارتفاع، عرض، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی به عنوان پارامترهای تعیین‌کننده برای تعیین ناحیه بهینه در نقشه فرایند در نظر گرفته‌می‌شوند[25-20]. طبق مطالعات و نتایج به دست آمده، پارامترهای زاویه ترشوندگی کمتر از 45 درجه، عمق نفوذ بین 10 µm تا 20 µm و عرض بین 175 µm تا 250 µm می‌توانند منجر به تک‌پاس‌های بهینه و ایجاد ناحیه بهینه (ناحیه زرد رنگ در شکل 7) شوند. در واقع می‌توان گفت که در ناحیه زرد رنگ، هر تک پاس ایجاد شده در توان و سرعت‌های روبش مختلف چه مشخصات هندسی دارد.

3-4- آنالیز فازی

شکل(8) نمودار XRD از تک‌پاس‌ها را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش در زاویه‌های 43/5، 51/7، 75/6، 91/5 و 97 درجه مربوط به فاز زمینه γ با صفحات پراش (111)،(200)،(220)،(311) و (222) بوده‌است. با توجه به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

تفاوت بسیار کم در پارامتر شبکه سوپرآلیاژ IN738LC، تمایز بین γ' و γ بسیار دشوار خواهد بود. بر اساس جدایش عناصر Al و Ti از زمینه γ، فاز γ' که یک رسوب منظم است تشکیل می‌شود. برای نشان دادن رشد ترجیهی کریستال‌ها مشاهده می‌شود که در زاویه 51/7 درجه، بافت پیک(200) بسیار قوی وجود دارد. در ادامه بررسی XRD، وجود فاز کاربید M(Ta, Ti, W, Nb, Mo)C نیز تایید شد.



شکل 8- نمودار XRD از تک‌پاس‌های IN738LC.

3-5- آنالیز ریزساختاری تک‌پاس

رابطه بین سرعت روبش تک‌پاس (V) و سرعت رشد دندریت(R) به صورت معدله (3) بیان می‌شود[29]:

$$R = \frac{V\ Cos\ \alpha}{Cos\ (\alpha - \beta)} \quad (3)$$

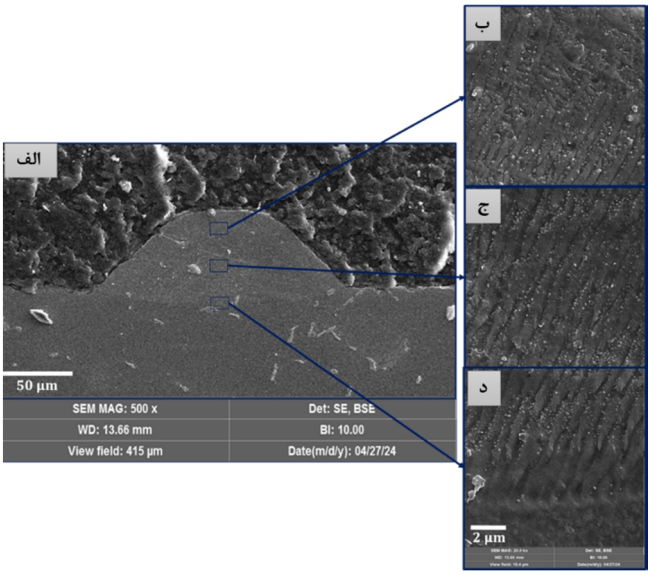
در معادله بالا، زاویه بین جهت تک‌پاس و جهت عمود بر حوضچه مذاب را α و زاویه بین جهت تک‌پاس و جهت رشد یک ساختار دندریتی را β در نظر می گیرند. به دلیل تفاوت کمی که بین α و β وجود دارد می‌توان $\cos(\alpha-\beta)$ را نادیده گرفت که باعث می‌شود معادله به صورت $R = V \cos \alpha$ در نظر گرفته‌شود. در صورت نیم‌کره بودن حوضچه مذاب در فصل مشترک تک‌پاس و زیرلایه، نتایج $\cos \alpha = 0$ و $R = 0$ به دست می‌آید. با فاصله گرفتن از سطح مشترک به سمت سطح تک پاس، مقدار R افزایش می‌یابد و در سطح مقادیر $\cos \alpha = 1$ و $R \approx V$ نتیجه می‌شود.

شکل 9 الف ریزساختار از نمونه تک پاس شماره 9 در مقطع عرضی را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است، ریزساختار از سه ناحیه مختلف تشکیل شده است. ساختارهای ناحیه بالایی(شکل 9 ب) شامل دندریتی هم محور، ناحیه میانی(شکل 9 ج) دندیتی ستونی و ناحیه نزیک به فصل مشترک(شکل 9 د) عمدتا سلولی بسیار باریک بوده‌است. در طول فرایند انجماد تک‌پاس، سرعت انجماد در قسمت پایین تک‌پاس بیشتر از قسمت بالای تک‌پاس بوده است [29-34]. بنابراین از پایین به بالای حوضچه مذاب تک‌پاس، ریزساختار از حالت کاملا سلولی به دندریتی ستونی و دندریتی هم محور تغییر می‌کند. در قسمت پایین حوضچه مذاب، گرادیان دمایی (G) بیشترین مقدار را دارد و با نزدیک شدن به سطح حوضچه، گرادیان دمایی کاهش می‌یابد. R کمترین مقدار را در سطح مشترک حوضچه و زیرلایه دارد و بالاترین مقدار مربوط به بالای سطح تک پاس ایجاد شده‌است. بنابراین نسبت G/R از سطح تک‌پاس به سطح مشترک با زیرلایه افزایش می‌یابد. در سرتاسر ناحیه همجوشی، حالت انجماد از حالت صفحه‌ای که نیاز به G/R خیلی بالایی دارد به سلولی و سپس به دندریتی ستونی و دندریتی هم محور تغییر می کند. تغییرات G/R در ناحیه فصل مشترک بسیار زیاد است که باعث می‌شود ناحیه سلولی بسیار نازک شود. تغییرات G/R با نزدیک شدن به سطح کاهش می‌یابد که باعث می‌شود ساختار حوضچه مذاب دندریت ستونی و دندریتی هم محور شود. شکل(9-د) تصویر SEM از فصل مشترک و زیرلایه را به اندازه 4 µm نشان می‌دهد. به دلیل یکسان بودن ترکیب شیمیایی تک‌پاس و زیرلایه، ساختار کریستالی آن‌ها یکسان است و مشاهده می‌شود که رشد اپیتاکسیال در فصل مشترک تک‌پاس و زیرلایه رخ داده‌است. دانه‌های زیرلایه در دمای انجماد به عنوان زمینه برای هسته‌زایی عمل می‌کنند. پودر ذوب شده در حوضچه مذاب در تماس با سطح زیرلایه است و دانه‌ها را کاملا مرطوب می‌کند، بنابراین کریستال‌ها به راحتی روی زیرلایه هسته می‌گیرند. در ناحیه اتصال تک‌پاس‌ها به زیرلایه(شکل 9-د)، یک ساختار دندریتی ستونی بسیار باریک با انجماد مسطح ایجاد می‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

رشد اپیتکسیال در تمامی نمونه‌ها، در سطح زیرلایه و تک‌پاس‌ها رخ داده‌است. در ادامه رشد تا میانه تک پاس(شکل 9-ج)، ساختار دندریتی ستونی ادامه پیدا کرده است و در بالاترین قسمت تک‌پاس(شکل 9-ب) نیز چون انتقال حرارت در همه جهات اتفاق افتاده است، ساختار در حال تغییر از دندریتی ستونی به ساختار دندریتی هم محور بوده‌است.



شکل 9- تصاویر SEM از ریزساختار نمونه تک‌پاس ساخته شده با پارامتر توان w 325 وات و سرعت mm/s 800. (الف) شکل کلی تک‌پاس، (ب) قسمت بالایی تک‌پاس، (ج) قسمت میانی و (د) ناحیه اتصال به زیرلایه.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور تعیین پارامترهای بهینه فرایند ذوب انتخابی لیزری (SLM) برای آلیاژ IN738LC، تعداد 36 **نمونه تک‌پاس** بر روی زیرلایه ریختگی IN738 تولید شد. به‌منظور استخراج نقشه فرایندی و پیش‌بینی رفتار هندسی تک‌پاس‌ها، از مدل‌سازی رگرسیون خطی به همراه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده گردید. بر اساس روابط استخراج‌شده، ناحیه بهینه فرایندی شناسایی شد. علاوه بر این، تغییرات ریزساختاری تک‌پاس‌ها در نواحی مختلف مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌ها به شرح زیر ارائه می‌شود:

- نتایج نشان داد که به‌کارگیری هم‌زمان روش رگرسیون خطی و الگوریتم ژنتیک قابلیت بالایی در پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها از جمله عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی دارد. ضریب تعیین (R^2) مدل‌های ارائه‌شده برای تمامی پاسخ‌ها بیش از 0/89 به‌دست آمد که بیانگر دقت مناسب و قابلیت اطمینان بالای مدل‌های توسعه‌یافته است.

-بر اساس نقشه فرایندی استخراج‌شده، ناحیه بهینه فرایند با اعمال قیود هندسی مشخص گردید. در این ناحیه، زاویه ترشوندگی کمتر از 45 درجه، عمق نفوذ در بازه 10 تا 20 میکرومتر و عرض تک‌پاس بین 175 تا 250 میکرومتر حاصل شد که این محدوده شرایط مطلوبی از نظر پایداری پاس، چسبندگی مناسب به زیرلایه و کیفیت هندسی را فراهم می‌کند.

-بررسی ریزساختار تک‌پاس‌ها نشان داد که ساختارهای تشکیل‌شده شامل ساختار سلولی، دندریتی ستونی و دندریتی هم‌محور هستند. در نواحی بالایی تک‌پاس، به دلیل کاهش نسبت گرادیان دمایی به نرخ رشد(G/R)، ریزساختار از حالت دندریتی ستونی به سمت دندریتی هم‌محور تغییر یافته است. این تغییر ریزساختاری بیانگر تأثیر مستقیم شرایط حرارتی حاکم بر حوضچه مذاب در فرایند SLM بر مورفولوژی دانه‌ها است.

منابع

1-Mumtaz, K. A., Erasenthiran, P., & Hopkinson, N. (2008). High density selective laser melting of Waspaloy®. Journal of materials processing technology, 195(1-3), 77-87.
2- Levy, G. N. (2010). The role and future of the laser technology in the additive manufacturing environment. Physics Procedia, 5, 65-80.
3- Yasa, E., Deckers, J., Craeghs, T., Badrossamay, M., & Kruth, J. P. (2009). International Solid Freeform Fabrication Symposium.
4- Rickenbacher, L., Etter, T., Hövel, S., & Wegener, K. (2013). High temperature material properties of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) technology. Rapid Prototyping Journal, 19(4), 282-290.
5-Bormann, T., Schumacher, R., Müller, B., Mertmann, M., & De Wild, M. (2012). Tailoring selective laser melting process parameters for NiTi implants. Journal of Materials Engineering and Performance, 21, 2519-2524.
6-Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., & Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. Materials & Design, 34, 159-169.
7-Wang, H., Zhang, X., Wang, G. B., Shen, J., Zhang, G. Q., Li, Y. P., & Yan, M. (2019). Selective laser melting of the hard-to-weld IN738LC superalloy: Efforts to mitigate defects and the resultant microstructural and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

stability. Materials Science and Engineering: A, 509(1-2), 98-104.
20-Sadowski, M., Ladani, L., Brindley, W., & Romano, J. (2016). Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process. Additive Manufacturing, 11, 60-70.
21-Li, C., Guo, Y. B., & Zhao, J. B. (2017). Interfacial phenomena and characteristics between the deposited material and substrate in selective laser melting Inconel 625. Journal of Materials Processing Technology, 243, 269-281.
22-Liu, S., & Kovacevic, R. (2014). Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74, 867-878.
23-Ilanlou, M., Razavi, R. S., & Borhani, M. (2024). Additive manufacturing of functionally graded Stellite6/17-4PH fabricated via direct laser deposition. Journal of Materials Research and Technology.
24-Barekat, M., Razavi, R. S., & Ghasemi, A. (2016). Nd: YAG laser cladding of Co–Cr–Mo alloy on γ-TiAl substrate. Optics & Laser Technology, 80, 145-152.
25-Ilanlou, M., Razavi, R. S., Haghighat, S., & Nourollahi, A. (2023). Multi-track laser metal deposition of Stellite6 on martensitic stainless steel: geometry optimization and defects suppression. Journal of Manufacturing Processes, 86, 177-186.
26-M. Sadowski, L. Ladani, W. Brindley, J. Romano, Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process, Addit. Manuf. 11 (2016) 60–70.
27-C. Li, Y.B. Guo, J.B. Zhao, Interfacial phenomena and characteristics between the deposited material and substrate in selective laser melting Inconel 625, J. Mater. Process. Technol. 243 (2017) 269–281.
28-Kou, S. (2003). Welding metallurgy. New Jersey, USA, 431(446), 223-225.
29-Jia, Q., & Gu, D. (2014). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. Journal of Alloys and Compounds, 585, 713-721.
30-Xu, Jiayu, Yubi Gao, Bo Liu, Shengbing Xue, Yong Hu, Yutian Ding, Dong Zhang, Sujun Lu, and Xu Song. "Improving printability of LPBF-built Inconel 738 superalloy via B-modification and high-quality powder." *Materials Today Communications* (2025): 113058.
31-Lerda, S., B. Luo, G. Marchese, X. Zhao, S. Biamino, and S. Dadbakhsh. "Role of the preheating temperature during electron beam powder bed fusion (PBF-EB/M) in precipitation of γ'and carbides in Inconel 738 superalloy." *Journal of Materials Research and Technology* (2025).
32-Tian, Ziyu, Yi Zheng, Haodong Wang, Shuai Wang, Junmei Chen, Huabin Chen, Chun Yu, Jijin Xu, and Hao Lu. "Crack inhibition of non-weldable Inconel 738 alloy in ultrasound-assisted laser directed energy mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds, 807, 151662.
8- Chen, C., Wu, H. C., & Chiang, M. F. (2008). Laser cladding in repair of IN738 turbine blades. International Heat Treatment and Surface Engineering, 2(3-4), 140-146.
9- Arjakine, N., Bruck, J., Gru¨ ger, B., Seeger, D. M., & Wilkenhoener, R. (2008, January). Advanced weld repair of gas turbine hot section components. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 43116, pp. 559-564).
10-Linn, S., Scholz, A., Oechsner, M., Berger, C., & Luesebrink, O. (2011). Evaluation of property scatter of Ni-base alloy in 738 LC. Materials Science and Engineering: A, 528(13-14), 4676-4682.
11-Egbewande, A. T., Zhang, H. R., Sidhu, R. K., & Ojo, O. A. (2009). Improvement in laser weldability of INCONEL 738 superalloy through microstructural modification. Metallurgical and Materials Transactions A, 40, 2694-2704.
12- Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., ... & Attallah, M. M. (2015). Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A, 628, 188-197.
13-Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A., & King, W. E. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. Acta Materialia, 108, 36-45.
14-Qiu, C., Panwisawas, C., Ward, M., Basoalto, H. C., Brooks, J. W., & Attallah, M. M. (2015). On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. Acta Materialia, 96, 72-79.
15-Wang, J., Zhu, R., Liu, Y., & Zhang, L. (2023). Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single-and multi-track melt pools for process optimization. Advanced Powder Materials, 2(4), 100137.
16-Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Johansson, S., & Smurov, I. (2013). Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. Journal of Materials Processing Technology, 213(4), 606-613.
17-Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., & Everitt, N. M. (2016). On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology, 230, 88-98.
18-Mumtaz, K., & Hopkinson, N. (2009). Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, 15(2), 96-103.
19-Dinda, G. P., Dasgupta, A. K., & Mazumder, J. (2009). Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]

deposition." *Materials Science and Engineering: A* 921 (2025): 147607.
33-Borhani, M.R.; Kermani, F.; Razavi, R.S.; Erfanmanesh, M.; Barekat, M.: A comparative study on corrosion and mechanical properties of laser-cladded X2CrNiMoN22–5–3 duplex stainless steel on 42CrMo4 steel substrate. Heliyon 10(19), e38353 (2024).
34-Kermani, F.; Momeni, H.; ShojaRazavi, R.; Borhani, M.: Induction-Assisted Direct Laser Deposition of Inconel 625 on DS Rene125: Microstructure, Texture, and Porosity Control.” J. Mater. Res. Technol. (2025).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.15]