



علوم و فناوری جوئکاری ایران



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.



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 عموماً 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 تک‌پاس‌های 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 325 W و سرعت روبش لیزر 800 mm/s با توجه به کاهش نسبت G/R، ریزساختار از ناحیه اتصال به زیرلایه تا بالای تک‌پاس، از دندریتی ستونی به دندریتی هم‌محور 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

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 به دلیل 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].

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 به شدت 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]. از این‌رو، درک رفتار

سیستماتیک و مبتنی بر مدل سازی از رفتار تک پاس به عنوان پایه ای ترین واحد ساخت در SLM، به ویژه در ارتباط مستقیم با استخراج نقشه فرایندی، به طور محدود گزارش شده اند. 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 پیش بینی.

از سوی دیگر، اگرچه مدل های فیزیکی عددی پیچیده قادر به شبیه سازی رفتار حوضچه مذاب هستند، اما این مدل ها معمولاً هزینه محاسباتی بالا داشته و برای کاربردهای عملی و صنعتی، به ویژه در مرحله انتخاب سریع پارامترها، چندان کارآمد نیستند [20-21]. در چنین شرایطی، استفاده از مدل های آماری ساده اما مؤثر می تواند ابزاری مناسب برای پیش بینی ویژگی های هندسی تک پاس و استخراج نواحی بهینه فرایندی باشد. رگرسیون خطی، به دلیل شفافیت، قابلیت تفسیر فیزیکی و نیاز محدود به داده های آزمایشگاهی، یکی از روش های پرکاربرد در مدل سازی روابط بین پارامترهای فرایندی و پاسخ های هندسی در فرایندهای ساخت افزایشی است.

با این حال، مدل های آماری به تنهایی قادر به تعیین ترکیب بهینه پارامترها در یک فضای چندمتغیره نیستند. در این راستا، الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، به عنوان ابزارهایی قدرتمند برای جستجوی نواحی بهینه در مسائل غیرخطی و چندهدفه شناخته می شوند. ترکیب رگرسیون خطی با الگوریتم ژنتیک، این امکان را فراهم می کند که ضمن حفظ سادگی مدل، دقت پیش بینی افزایش یافته و تعداد آزمایش های تجربی کاهش یابد.

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

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

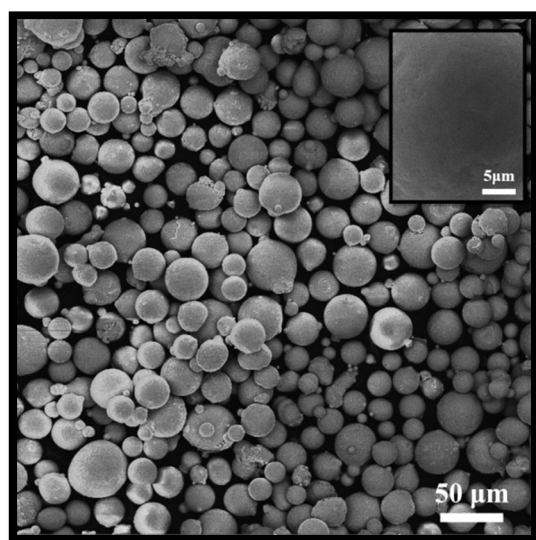
برخی از محققان تشکیل تک پاس های آلیاژهای مختلفی همچون فولاد زنگ نزن 316L، آلیاژ آلومینیوم، AlSi10Mg و انواع مختلف سوپرآلیاژها را مورد مطالعه قرار دادند. یادرویتسو و همکاران [16] به بررسی ریزساختار و هندسه تک پاس های ایجاد شده با آلیاژ فولاد زنگ نزن 316L با متغیرهایی همچون دماهای پیش گرمایش و سرعت های 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 می شود. در این تحقیق به بررسی و مقایسه نانو سختی تک پاس های تشکیل شده و زیرلایه ریختگری نیز پرداخته شد که در آخر مشخص شد نانو سختی در تک پاس ها بالاتر و یکنواخت تر از زیر لایه ریختگری بوده است. ممتاز و هاپکینز [18] نیز به بررسی ریزساختار تک پاس های آلیاژ اینکونل 625 در سرعت های روبش لیزر ثابت با استفاده از لیزر پالسی پرداختند. دیندا و همکاران [19] به بررسی ریزساختاری دندریت ها در حوضچه مذاب تک پاس آلیاژ اینکونل 625 در دماهای مختلف عملیات آنیلینگ پرداختند. در نتایج به دست آمده از این تحقیق، عملکرد قطعه متأثر از عواملی همچون هندسه (عرض، ارتفاع، عمق و زاویه ترشوندگی)، همجواری با زیرلایه و ریزساختار هر تک پاس بیان شد.

مرور ادبیات نشان می دهد که بخش عمده تحقیقات انجام شده بر روی IN738LC تولید شده به روش SLM، معطوف به نمونه های چندلایه یا بالک و بررسی خواص مکانیکی، دانسیته و ریزساختار کلی آن ها بوده است [4]. در حالی که مطالعات

لیزر فیبری، هد لیزر اسکن لب، 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 بوده است. 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.

جدول 1- 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



شکل 1- تصاویر SEM از سطح ذرات پودر IN738LC.

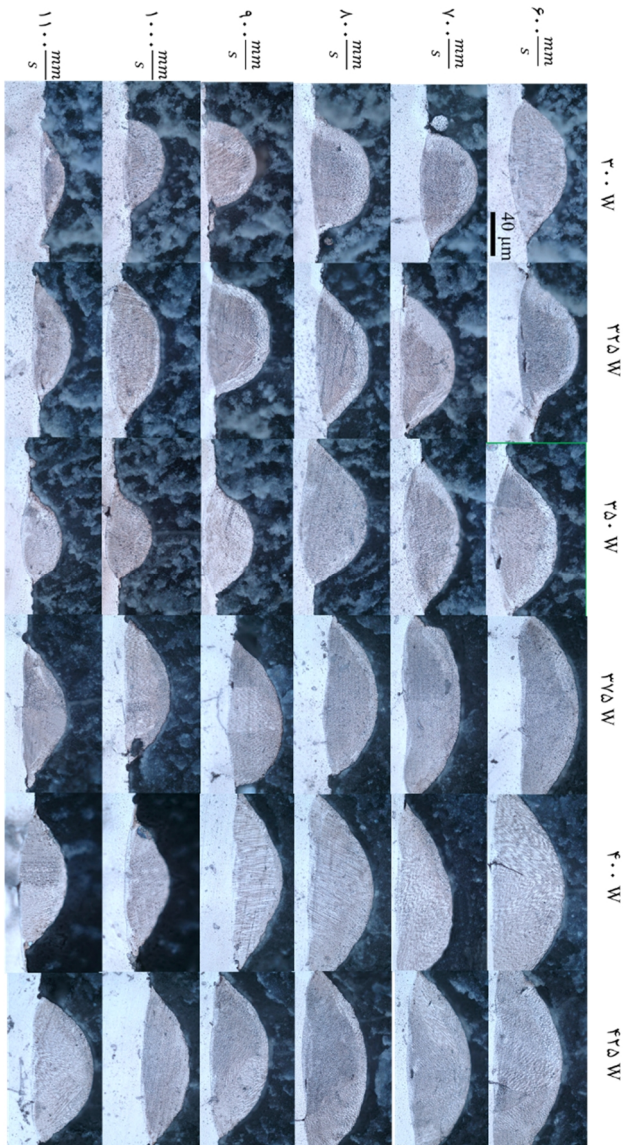
مدل سازی آماری-بهینه سازی برای پیش بینی هندسه تک پاس، استخراج نقشه فرایندی و اعتبارسنجی ریزساختاری آن در آلیاژ IN738LC تولید شده به روش SLM است. از این رو، هدف این پژوهش ارائه مدلی برای پیش بینی ویژگی های هندسی تک پاس بر اساس توان لیزر و سرعت روبش، استخراج نقشه فرایندی بهینه با استفاده از رگرسیون خطی و الگوریتم ژنتیک، و در نهایت بررسی کیفی ریزساختار تک پاس بهینه در نواحی مختلف حوضچه مذاب است. تمرکز این مطالعه بر تک پاس به عنوان واحد پایه فرایند، امکان درک بهتر ارتباط میان پارامترهای فرایندی، هندسه حوضچه مذاب و ریزساختار حاصل را فراهم می کند و می تواند 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 کاملاً تمیز شد. برای به دست آوردن ترکیب شیمیایی زیرلایه، از دستگاه طیف سنجی جرقه ای (SES) مدل FOUNDRYMASTER Smart ساخته شرکت HITACHI HIGHTECH استفاده شد. پودر IN738LC از شرکت سولزر متکو که با اتمیزاسیون گازی فراوری شده است 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 شده است. مورفولوژی پودر IN738LC که در شکل (1) نیز مشاهده می شود، کاملاً کروی بوده که یک کاندید عالی برای فرایند SLM می باشد.

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 تک پاس بر روی یک سیستمی شامل

مدل HR3-TRF-P ساخت شرکت HUVITZ گرفته شد. بررسی اولیه تصاویر نیز تاثیر کمی و کیفی پارامترهای مختلف فرایند بر هندسه نهایی تک پاس ها را نشان می دهند و ویژگی های هندسی به طور دقیق اندازه گیری و محاسبه شدند.



شکل 2- تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع تک پاس ها.

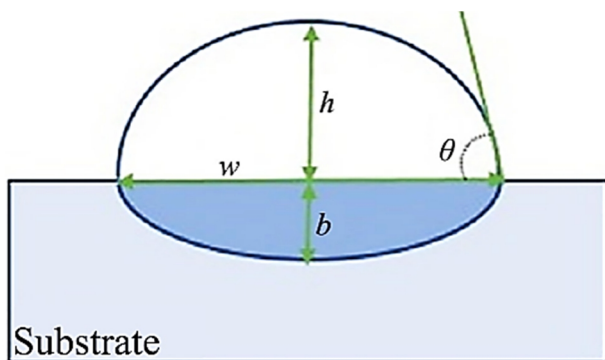
شکل (3) تصاویری از نمای بالای سطح تک پاس های تشکیل شده را در توان و سرعت های روبش لیزر مختلف نشان می دهد. از تصاویر نتیجه می شود که تشکیل تک پاس های پیوسته و ناپیوسته، بسیار به پارامترهای پردازش بستگی دارند. در پارامتر 300 W و 1100 mm/s، مشاهده می شود که تک پاس به صورت کروی و قطره ای روی زیرلایه تشکیل شده است.

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 تک پاس 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 می کند تست انجام گرفت. این کار به کاهش میزان اکسیژن محفظه کمک می کند.

پارامترهای توان لیزر (P)(W)، سرعت روبش لیزر (V)(mm/s) و میزان ضخامت لایه پودر (T)(μm) بیشترین تاثیر را بر روی LPBF دارند. این پارامترها بر ویژگی های هندسی تک پاس ایجاد شده بر روی زیرلایه تاثیر می گذارند و برای بررسی این تاثیر، 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 در نظر گرفته شد. انتخاب متغیر بودن دو پارامتر و ثابت بودن یک پارامتر، به علت پیچیدگی سیستم و محدودیت های عملی بوده است.

ارزیابی ویژگی های هندسی تک پاس ها شامل مواردی همچون عمق نفوذ، ارتفاع، عرض، زاویه تر شدن و آمیختگی می شود. تک پاس های ایجاد شده بر روی زیرلایه را از طریق ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) برش داده می شوند و سپس متالوگرافی می شوند. برای ایجاد کردن سطحی صاف و صیقلی برای نمونه ها، از کاغذهای کاربید سیلیکون با سطوح خشن 1500 تا 4500 استفاده شد. پس از پولیش، نمونه ها با محلول کالینگ شماره 2 (مقادیر 5 گرم CuCl_2 ، 100 میلی لیتر اسید HCl و 100 میلی لیتر اتانول) در مدت زمان 60 ثانیه اچ شدند. انتخاب این نوع اچ به علت نمایش ریزساختار تشکیل شده، فازهای مختلف و همچنین بررسی ویژگی های هندسی انتخاب شده است. در شکل (2) تصاویر از سطح نمونه های آماده شده در پارامترهای مختلف فرایند با استفاده از میکروسکوپ نوری

با استفاده از نرم افزار Image J، اندازه‌گیری و ارزیابی ویژگی‌های هندسی تک پاس‌ها 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.



شکل 4- نمای شماتیک از ویژگی‌های هندسی تک پاس.

زاویه تر شدن تک پاس 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 تک پاس تشکیل شده هستند. جدول (2)، کل پارامترهای فرایند و ویژگی‌های هندسی تک پاس‌های مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد.

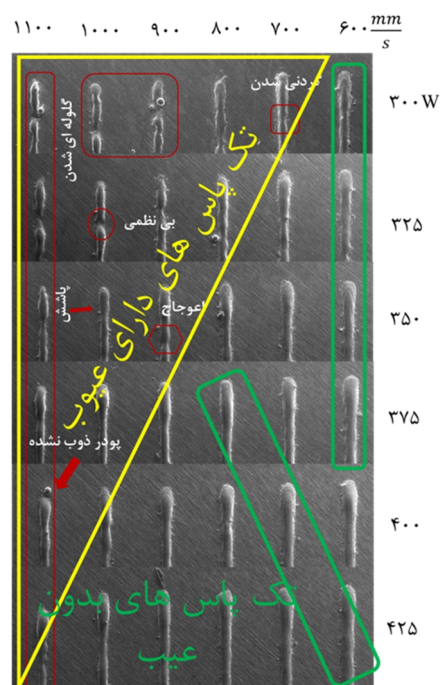
$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{2h}{w} \right) \quad (1)$$

با توجه به این که تمامی پارامترهای فرایند SLM بر ویژگی‌های هندسی تک پاس‌های 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 تک پاس‌ها می‌شود. از رگرسیون خطی برای مدل سازی و پیش بینی تک پاس‌ها با توجه به زیاد بودن پارامترهای فرایند و نیازهای آزمایشی گسترده استفاده شد.

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

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

بیشتر نمونه‌های تک پاس تحت پارامترهای مختلف پردازش، به صورت پیوسته تشکیل شده‌اند. در توان لیزر ثابت 425 W، همگی تک پاس‌ها پیوسته تشکیل شدند. این نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر به تشکیل تک پاس‌های پیوسته کمک می‌کند. تک پاس‌های پیوسته به دلیل ایجاد پیوند مناسب در کنار تک پاس‌های مجاور، یک ساختار کاملاً 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، بی-نظمی، وجود ذرات ذوب نشده و اعوجاج در تصاویر مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت روبش لیزر و کاهش توان لیزر، عرض تک پاس 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 شونده‌گی در نقطه شروع را کاهش می‌دهد. برای رفع این عیب، می‌توان سرعت روبش لیزر را کاهش داد که در واقع همان افزایش مقدار LED مطرح می‌شود.



شکل 3- مورفولوژی سطحی تک پاس‌های ساخته شده تحت توان و سرعت‌های مختلف روبش.

جدول 2- پارامترها و مشخصات هندسی تک پاس ها.

	پارامترهای فرایند		مشخصات هندسی				
	P (W)	S (mm/os)	عرض (μm)	ارتفاع (μm)	عمق نفوذ (μm)	زاویه تر شونده (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 بهینه سازی شده است. در این الگوریتم هدف به حداقل رساندن خطای رگرسیون خطی بوده است و α و β پارامترهای طراحی در نظر گرفته شدند. این الگوریتم تا جایی ادامه می یابد که خطای رگرسیون را به حداقل برساند و به توان بهینه برسد.

پس از آن که برای ویژگی های هندسی به یک پارامتر ترکیبی بهینه دستیابی حاصل شد، می توان معادله (2) را با توجه به ویژگی هایی که قبلاً ذکر شده است، تعیین کرد. با استفاده از پارامترهای ترکیبی و معادلات خطی به دست آمده می توان همبستگی بین توان لیزر (P) و سرعت روبش لیزر (V) را برای هر یک از ویژگی های هندسی به دست آورد. یک مدل پیش-بینی که به آن نقشه فرایندی می گویند نیز بر اساس گسترش همبستگی بین توان لیزر و سرعت روبش لیزر به دست می آید. پارامترهای فرایند مربوطه را می توان با در نظر گرفتن ویژگی های هندسی از نقشه فرایندی به دست آورد.

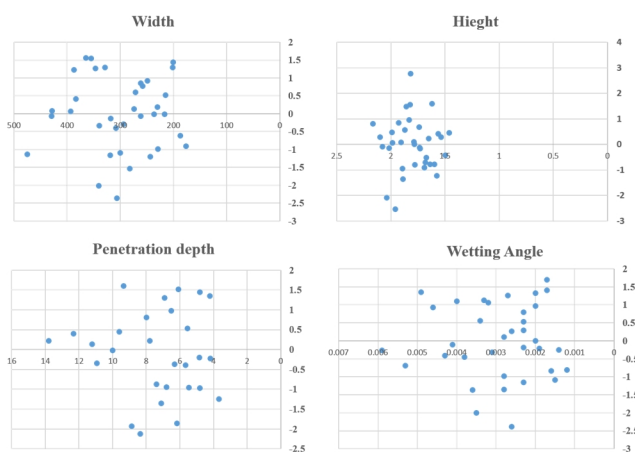
از تک پاس های تشکیل شده آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD) انجام گرفت. دستگاه آنالیز XRD از مدل EXPLORER بوده است و برای انجام این تست، از تک پاس هایی که به صورت گلوله ای درآمده اند و به آسانی از سطح جدا می شوند استفاده شد. پس از آن که نقشه فرایندی به دست آمد، از یک تک پاس مشخص شده در ناحیه های مختلف، تصاویر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

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج رگرسیون خطی ویژگی های هندسی

ضرایب رگرسیون خطی و پارامترهای ترکیبی به دست آمده برای عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه تر شدن تک پاس ها 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 الگوریتم بهینه سازی انرژی دارد. در شکل (5) نیز

خطی همراه با تعریف پارامتر ترکیبی بهینه شده 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 β برای هر ویژگی هندسی، مدل‌های رگرسیون خطی با ضریب تعیین (R^2) برای عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی به ترتیب مقادیر بالاتری از 0/88 به دست آورد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین مقادیر پیش‌بینی شده 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 اعمال شده اجتناب‌ناپذیر است. به منظور 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 پیش‌بینی شده مدل تعریف شده‌اند.



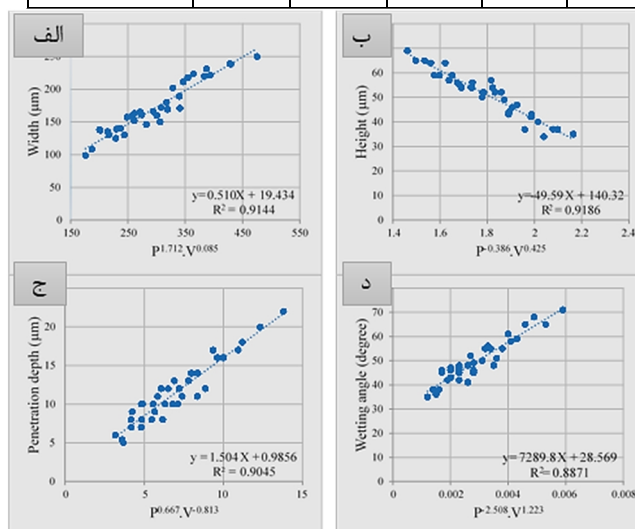
شکل 6- نمودارهای باقیمانده برای الف) عرض، ب) ارتفاع، ج) عمق نفوذ، و د) زاویه ترشوندگی.

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

نمودارهای رگرسیون خطی نشان داده شده است و خط کشیده شده از میان نقاط همگرا در این نمودارها نشانه‌ی بصری از دقت مدل ارائه شده می‌باشد. مقایسه پارامترهای ترکیبی و ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی ارائه شده تا چه اندازه توانسته است 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 ترشوندگی	7289/8	28/569	-2/508	1/223	0/8871

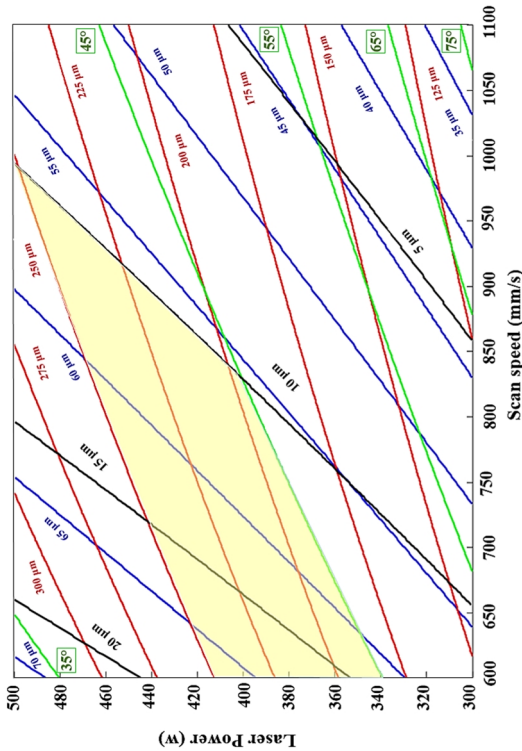


شکل 5- نمودارهای رگرسیون خطی برای الف) عرض، ب) ارتفاع، ج) عمق نفوذ، و د) زاویه ترشوندگی.

2-3- تحلیل خطا و اعتبارسنجی مدل

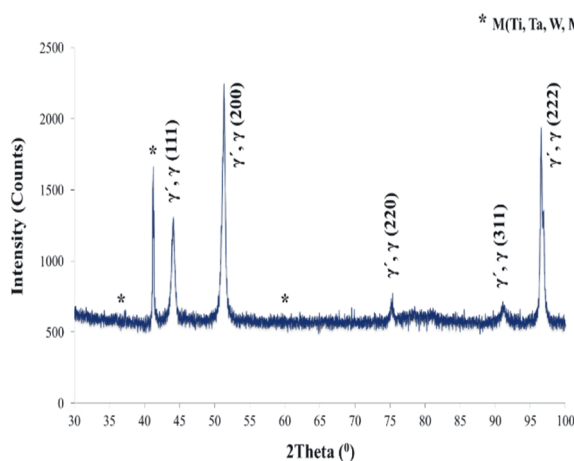
اگرچه رفتار حوضچه مذاب در فرایند ذوب انتخابی لیزری ذاتاً غیرخطی بوده و تحت تاثیر هم‌زمان پدیده‌های انتقال حرارت، دینامیک حوضچه و برهم‌کنش لیزر-ماده قرار دارد، هدف این پژوهش توسعه یک مدل مهندسی ساده، پایدار و قابل استفاده صنعتی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی تک‌پاس‌ها با حداقل پیچیدگی محاسباتی بوده است. به همین دلیل از رگرسیون

$V^{1/223} \cdot P^{-2/508}$ و زاویه ترشوندگی تک پاس ها با زیرلایه، از 35 تا 75 درجه بر روی نقشه فرایندی رسم شد.



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 دندردیتی هم محور، ناحیه میانی (شکل 9 ج) دندردیتی ستونی و ناحیه نزدیک به فصل مشترک (شکل 9 د) عمدتاً سلولی بسیار باریک بوده است. در طول فرایند انجماد تک پاس، سرعت انجماد در قسمت پایین تک پاس بیشتر از قسمت بالای تک پاس بوده است [29-34]. بنابراین از پایین به بالای حوضچه مذاب تک پاس، ریزساختار از حالت کاملاً سلولی به دندردیتی ستونی و دندردیتی 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 شده است. بنابراین نسبت G/R از سطح تک پاس 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 دندردیتی ستونی و دندردیتی هم محور تغییر می‌کند. 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 دندردیتی ستونی و دندردیتی هم محور شود. شکل (9) د تصویر SEM از فصل مشترک و زیرلایه را به اندازه $4 \mu\text{m}$ نشان می‌دهد. به دلیل یکسان بودن ترکیب شیمیایی تک پاس و زیرلایه، ساختار کریستالی آن‌ها یکسان است و مشاهده می‌شود که رشد اپیتاکسیال در فصل مشترک تک پاس و زیرلایه رخ داده است. 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 کاملاً مرطوب می‌کند، بنابراین کریستال‌ها به راحتی روی زیرلایه هسته می‌گیرند. در ناحیه اتصال تک پاس‌ها به زیرلایه (شکل 9-د)، یک ساختار دندردیتی ستونی بسیار باریک با انجماد مسطح ایجاد می‌شود. رشد

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 ترجیحی 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 تک پاس‌های IN738LC.

3-5- آنالیز ریزساختاری تک پاس

رابطه بین سرعت روبش تک پاس (V) و سرعت رشد دندردیت (R) به صورت معادله (3) بیان می‌شود [29]:

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

در معادله بالا، زاویه بین جهت تک پاس و جهت عمود بر حوضچه مذاب را α و زاویه بین جهت تک پاس و جهت رشد یک ساختار دندردیتی را β در نظر می‌گیرند. 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 گرفته شود. در صورت نیم‌کره بودن حوضچه مذاب در فصل مشترک تک پاس 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.

ترشوندگی دارد. ضریب تعیین (R^2) مدل‌های ارائه شده برای تمامی پاس‌ها بیش از 0/89 به دست آمد که بیانگر دقت مناسب و قابلیت اطمینان بالای مدل‌های توسعه یافته است.

بر اساس نقشه فرایندی استخراج شده، 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 تک پاس 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.

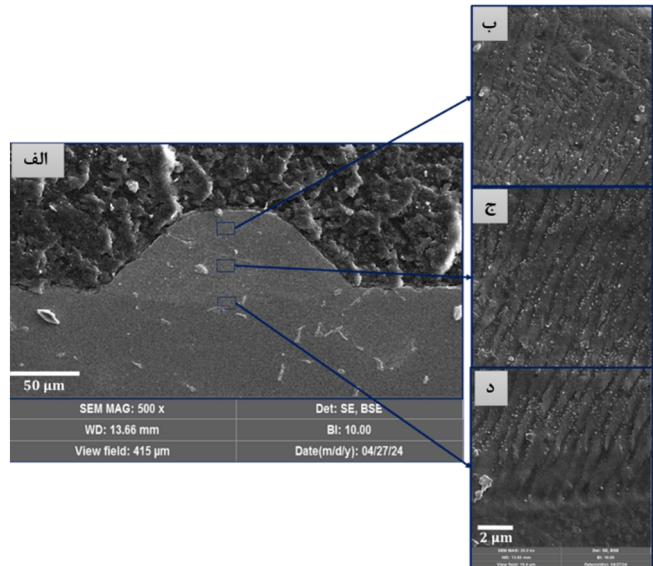
بررسی ریزساختار تک پاس‌ها نشان داد که ساختارهای تشکیل شده شامل ساختار سلولی، دندریتی ستونی و دندریتی هم محور هستند. در نواحی بالایی تک پاس، به دلیل کاهش نسبت گرادیان دمایی به نرخ رشد (G/R)، ریزساختار از حالت دندریتی ستونی به سمت دندریتی هم محور تغییر یافته است.

این تغییر ریزساختاری بیانگر تأثیر مستقیم شرایط حرارتی حاکم بر حوضچه مذاب در فرایند SLM بر مورفولوژی دانه‌ها است.

منابع

- 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.
- Levy, G. N. (2010). The role and future of the laser technology in the additive manufacturing environment. *Physics Procedia*, 5, 65-80.
- Yasa, E., Deckers, J., Craeghs, T., Badrossamay, M., & Kruth, J. P. (2009). *International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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

اپیتکسیال در تمامی نمونه‌ها، در سطح زیرلایه و تک پاس‌ها رخ داده است. در ادامه رشد تا میانه تک پاس (شکل 9-ج)، ساختار دندریتی ستونی ادامه پیدا کرده است و در بالاترین قسمت تک پاس (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 بوده است.



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

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور تعیین پارامترهای بهینه فرایند ذوب انتخابی لیزری (SLM) برای آلیاژ IN738LC، تعداد 36 نمونه تک پاس بر روی زیرلایه ریختگی IN738 تولید شد. به منظور استخراج نقشه فرایندی و پیش بینی رفتار هندسی تک پاس‌ها، از مدل سازی رگرسیون خطی به همراه الگوریتم بهینه سازی ژنتیک استفاده گردید. بر اساس روابط استخراج شده، ناحیه بهینه فرایندی شناسایی شد. علاوه بر این، تغییرات ریزساختاری تک پاس‌ها در نواحی مختلف مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌ها به شرح زیر ارائه می‌شود:

- نتایج نشان داد که به کارگیری هم زمان روش رگرسیون خطی و الگوریتم ژنتیک قابلیت بالایی در پیش بینی ویژگی‌های هندسی تک پاس‌ها از جمله عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه

- 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., Haghghat, 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

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).

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