



In-Situ Monitoring of Melt Pool Dynamics in Laser Cladding using Numerical Simulation and Spectral Diagnostics

Ebrahim Gholami¹, Saeed Batebi^{1*}, M.J. Torkamany²

¹ Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Iran

² Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Online Monitoring and Control of melt pool dynamics play a crucial role in determining the quality of clad layers in laser additive manufacturing processes. This study presents a hybrid approach that combines numerical simulation using the Goldak model with real-time monitoring via Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) in the laser cladding process of Inconel 718 alloy on 304 stainless steel substrate. The precise modeling of the thermal dynamics of the melt pool was performed on 64 cladding samples, and the cross-sectional dimensions and dilution percentage were validated against experimental measurements. To minimize model error, spectral characterization was employed for real-time monitoring of melt pool variations, providing highly accurate data on local melt pool temperature and elemental composition. The plasma temperature extracted from chromium emission lines in the spectral window of 400 to 500 nm effectively tracked the melt pool temperature variations based on input parameters, while the intensity ratio of nickel (wavelength 361.93 nm) to iron (wavelength 382.94 nm) quantified the dilution of the clad layer. This approach enables dynamic calibration of process input parameters, ensuring uniform clad quality through real-time control of the melt pool.

Review History:

Received: Sep. 07, 2024

Revised: Dec. 30, 2024

Accepted: Jan. 26, 2025

Available Online: Feb. 07, 2025

Keywords:

Online Monitoring

Laser Additive Manufacturing

Laser Cladding

Melt Pool Dynamics

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

1- Introduction

Monitoring melt pool dynamics is critical in laser-based processes such as laser cladding (LC). Both ex-situ and in-situ control methods are used to optimize melt pool stability, improve clad uniformity, and reduce defects. Numerical simulation, as an out-of-process method, can help in understanding and optimizing the effects of input parameters [1]. The Goldak heat source model is one of the most widely used thermal models in LC simulations due to its ability to accurately approximate heat distribution in the molten pool. Additionally, real-time monitoring techniques, [2], such as laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), provide instant and precise data on the molten pool's temperature, geometry, and chemical composition. Combining accurate simulation using with real-time monitoring [3], allows for continuous calibration and real-time adjustment of process parameters, improving clad uniformity and quality while reducing errors. This integrated approach enhances additive manufacturing by enabling better process control and optimization.

2- Methodology

In this study, a laser cladding system (Figure 1) was used, consisting of a 2kW-CW fiber laser, to deposit Inconel 718

powder onto SS304 substrate samples. The LIBS system was based on a nanosecond Nd: YAG laser and was set with laser energy of 100 mJ, a pulse duration of 10 ns, and a repetition rate of 10 Hz.

In the experimental design, the focus was on three key input parameters: laser power (LP), scan speed (SS), and powder feed rate (PFR). Each of these parameters was adjusted at four distinct levels, as detailed in Table 1.

3- Discussion and Results

A heat transfer model was developed in COMSOL software, incorporating a moving mesh feature to simulate melt pool dynamics and temperature distribution during the LC process. The simulation results are presented in Figure 2.

In LC process, laser energy heats the powder and substrate, raising the temperature above 1723 K (melt point of the substrate). As shown in Figure 3, increasing laser power enhances energy density, resulting in a higher process temperature and larger layer dimensions. In contrast, a higher scanning speed reduces clad layer dimensions and lowers the melt pool temperature. On the other hand, an increased powder feed rate raises the clad layer height and melt pool temperature. These factors play a crucial role in influencing

*Corresponding author's email: s_batebi@guilan.ac.ir



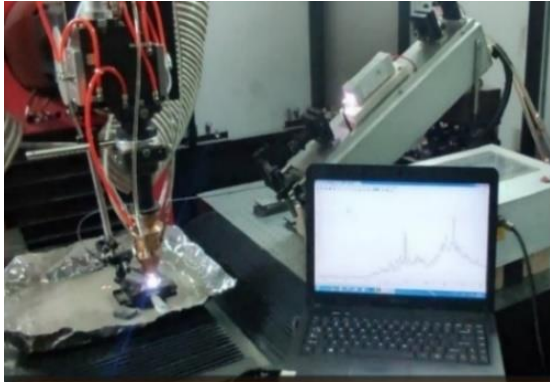


Fig. 1. Laser cladding system with LIBS setup

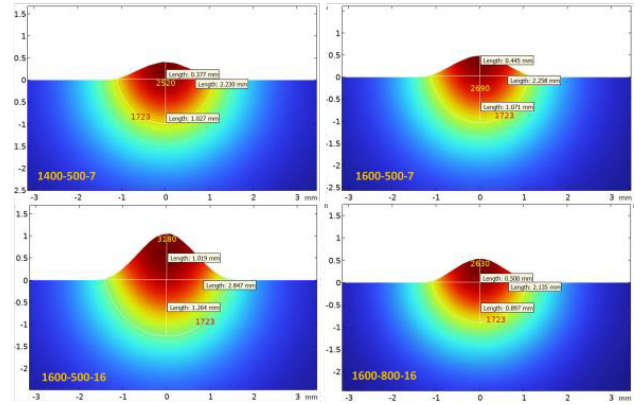


Fig. 3. Effect of input parameters on melt pool dynamics

Table 1. Input parameters and their variation levels.

Parameter	Level			
LP (W)	1000	1200	1400	1600
SS (mm/min)	500	800	1200	1500
PFR (gr/min)	7	10	13	16

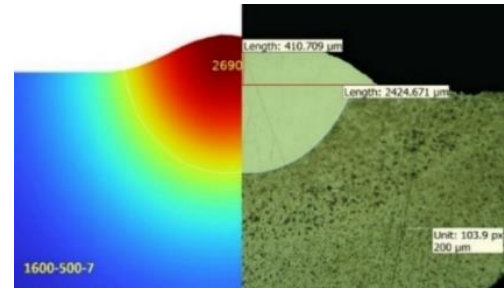


Fig. 4. Comparison of a clad cross-section

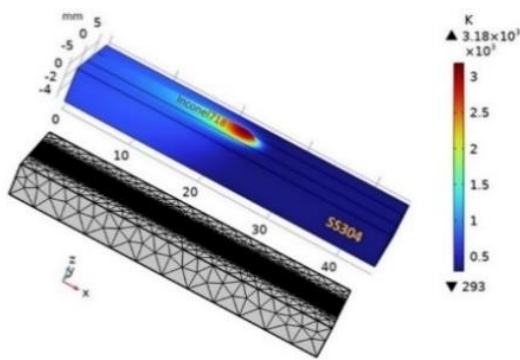


Fig. 2. Simulation of the LC model with mesh geometry

melt pool dynamics, clad quality, and thermal stability.

Additionally, the simulation results show that increasing laser power or decreasing scanning speed which raises input energy density causes more energy to be absorbed by the powder and substrate, leading to a higher dilution rate. It is also observed that as the powder feed rate increases, both the temperature and the clad layer height rise. This results in reduced penetration into the substrate, thereby lowering the dilution percentage.

Figure 4 presents the cross-sectional image of a clad line

sample, clearly demonstrating a strong correlation between the simulation and experimental measurements. This agreement is evident in both the geometrical properties and the observed temperature distribution. The simulation results provide an accurate representation of the melt pool's geometry and temperature, as well as the variations in dilution ratio based on the process input parameters.

The LC process of depositing Inconel 718 onto SS304 produces a composite material that combines the properties of both the substrate and the clad powder. In the provided spectrum (Figure 5), the emission lines corresponding to the substrate and the melt pool are shown separately. A comparison of these spectra indicates that the emission line intensity from the melt pool is higher than that from the substrate.

The plasma temperature derived from the Cr lines marked in Figure 5 can serve as an indicator of the local melt pool temperature at the sampling point. Consequently, LIBS at various locations within the melt pool can be utilized to understand the temperature distribution. This approach provides a more accurate estimation of the melt pool temperature, as it directly measures the high-temperature

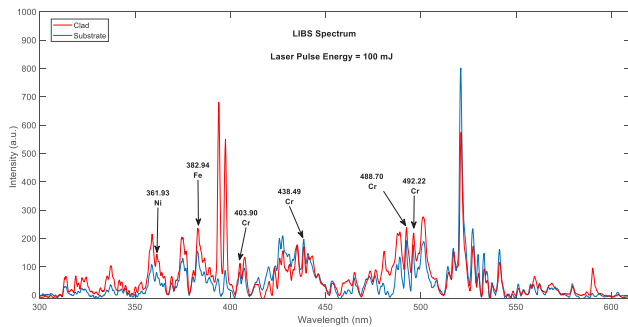


Fig. 5. LIBS spectrum of the substrate and clad layer

plasma and is validated against surface temperature measurements. By using the obtained spectral characterization, the intensity of elements present in the melt pool can be analyzed in real time, providing indirect information about the geometry and dilution percentage of the clad layer based on their intensity ratio. The intensity ratio of nickel to iron in the spectrum directly reflects the relative amounts of these elements, and this ratio changes with input process parameters, such as laser power, scan speed, and powder feed rate, which are key factors influencing temperature and clad layer geometry. Through spectral analysis, the ratio of nickel intensity at a wavelength of 361.92 nm to that of iron at 382.94 nm was used to monitor changes in the clad line with respect to dilution degree. The results, shown in Figure 6, demonstrate that variations in the ratio of selected line intensities are inversely related to changes in dilution rates. Monitoring these intensity ratios allows for real-time control of input parameters, ensuring the production of a high-quality clad layer with the desired dilution degree.

4- Conclusions

The combination of accurate simulation data for the laser cladding process and real-time spectroscopy offers a deeper understanding of the thermal behavior and heat distribution within the melt pool. This approach can also be applied to measure and monitor other qualitative and quantitative

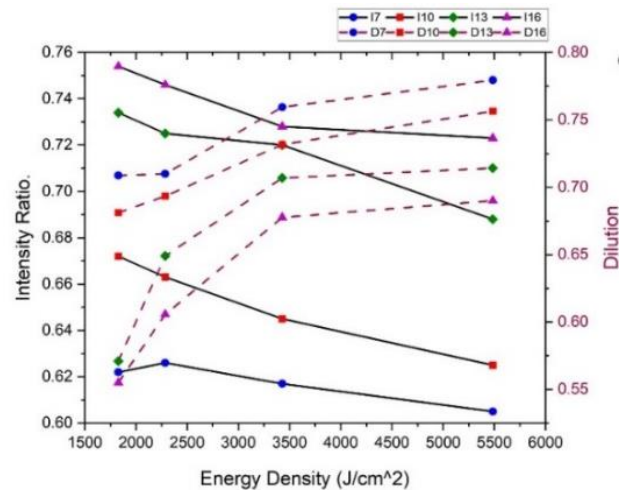


Fig. 6. Line intensity ratio and dilution vs. energy density

properties of the clad layer, such as hardness, residual stress, and microstructure, ultimately ensuring the production of high-quality and uniform-clad layers in laser additive manufacturing.

References

- [1] C. Kusuma, The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting, (2016).
- [2] V. Lednev, P. Sdvizhenskii, A.Y. Stavertiy, M.Y. Grishin, R. Tretyakov, R. Asyutin, S. Pershin, Online and in situ laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 175 (2021) 106032.
- [3] T. Moges, Z. Yang, K. Jones, S. Feng, P. Witherell, Y. Lu, Hybrid modeling approach for melt-pool prediction in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(5) (2021) 050902.



پایش برخط دینامیک حوضچه مذاب در روکش کاری لیزری با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مشخصه‌یابی طیفی

ابراهیم غلامی^۱، سعید باطبی^{۱*}، محمدجواد ترکمنی^۲

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:

پایش برخط
ساخت افزایشی لیزری
روکش کاری لیزری
دینامیک حوضچه مذاب
طیف‌سنجی

خلاصه: پایش برخط و کنترل دینامیک حوضچه مذاب، نقش کلیدی در تعیین کیفیت لایه‌های روکش شده در فرایندهای ساخت افزایشی لیزری ایفا می‌کند. این پژوهش رویکردی ترکیبی از شبیه‌سازی عددی با مدل گلداک و پایش لحظه‌ای با طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری را در فرایند روکش کاری لیزری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه استیل ۳۰۴ ارائه می‌دهد. مدل‌سازی دقیق دینامیک حرارتی حوضچه مذاب در ۶۴ نمونه روکش انجام شده و ابعاد سطح مقطع روکش و درصد آمیختگی با اندازه‌گیری‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. جهت کاهش خطای مدل، از مشخصه‌یابی طیفی برای پایش لحظه‌ای تغییرات حوضچه مذاب استفاده شد که اطلاعات دقیقی از دمای موضعی حوضچه مذاب و همچنین ترکیب عناصر آن را ارائه داد. دمای پلاسمای استخراج شده از خطوط کروم در پنجره طیفی ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر، بطور موثر تغییرات دمای حوضچه مذاب را بر اساس پارامترهای ورودی ردیابی کرده، درحالی‌که نسبت شدت نیکل (طول موج ۳۶۱/۹۳ نانومتر) به آهن (طول موج ۳۸۲/۹۴ نانومتر) آمیختگی لایه روکش را کمی‌سازی نمود. این رویکرد، امکان کالیبراسیون پویای پارامترهای ورودی فرایند را فراهم کرده و کیفیت یکنواخت لایه روکش را بر اساس کنترل لحظه‌ای تغییرات دمای حوضچه مذاب و درجه آمیختگی تضمین می‌کند.

۱- مقدمه

قرارداد. تغییرات این پارامترها می‌توانند منجر به تغییرات در ابعاد حوضچه مذاب، سرعت انجماد، و جریان سیال شوند که در نهایت بر یکنواختی و کیفیت لایه روکش تأثیر می‌گذارند. شبیه‌سازی‌های عددی، از جمله تحلیل المان محدود و تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی، نقش بسیار مهمی در مطالعه دینامیک حوضچه مذاب ایفا می‌کنند. این شبیه‌سازی‌ها درک عمیقی از چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ جریان پودر بر ویژگی‌های حوضچه مذاب را ارائه می‌دهند [۱]. در نهایت، این اطلاعات به بهینه‌سازی فرایند و افزایش کیفیت محصول کمک می‌کنند. این رویکردهای عددی نه تنها زمان و هزینه‌های آزمایشات تجربی را کاهش می‌دهند بلکه دقت نتایج را نیز افزایش می‌دهند. با این حال، مدل‌های عددی به دلیل فرضیات ساده شده و محدودیت‌های محاسباتی ممکن است در برخی موارد با نتایج تجربی فاصله داشته باشند. از این رو شبیه‌سازی با مدل‌های دقیق نقش مهمی در درک و کنترل فرایندهای حرارتی در روکش کاری لیزری ایفا می‌کند.

روکش کاری لیزری یا رسوب‌گذاری فلز با لیزر یک فرایند ساخت‌افزایشی است که کنترل بهینه‌ای بر رسوب مواد در ایجاد ساختارهای پیچیده ارائه می‌دهد. در فرایند روکش کاری لیزری در اثر تابش لیزر، هر دو ماده زیرلایه و ماده افزودنی (به شکل پودر یا سیم) ذوب شده و حوضچه مذاب ایجاد می‌شود. حرارت ایجاد شده می‌تواند گازهای محیط را نیز یونیزه کرده و به تشکیل پلاσμα در بالای حوضچه مذاب منجر شود که می‌تواند بر دینامیک انتقال حرارت تأثیر بگذارد. روکش کاری لیزری به‌رغم مزایای متعدد، با چالش‌های مهمی روبه‌رو است که کیفیت و کارایی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از مسائل مهم، مدیریت حرارتی است، زیرا گرمای تولید شده می‌تواند منجر به تغییرات حرارتی و ایجاد تخلخل و ترک شود. پیچیدگی رفتار دینامیکی حوضچه مذاب یکی از مشکلات اساسی در کنترل حرارت تولیدشده در فرایند روکش کاری لیزری است، زیرا این رفتار به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای ورودی مختلف مانند توان لیزر، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر و گاز محافظ

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s_batebi@guilan.ac.ir

برای پایش برخط دمای زمینه حرارتی و پلوم^۸ پلاسما استفاده کرده و آن را با پردازش تصویر ترکیب کردند تا به طور هم‌زمان دمای حوضچه مذاب و ابعاد روکش را پایش کنند. اشمیت و همکاران^۹ [۱۷] از طیف‌سنجی پلاسمای گسیلی در فرایند رسوب مستقیم فلز لیزری بصورت داخل خطی جهت مشخص کردن تاثیر پارامترهای ورودی فرایند استفاده کردند و در تحقیقی دیگر، والدیان^{۱۰} و همکاران [۱۸] رویکرد جامعی را برای ارتباط تحلیل طیف گسیل شده با کیفیت لایه‌های پوشش داده شده در طی فرایند رسوب‌گذاری فلز لیزری ارائه دادند. مزیت این نوع طیف‌سنجی، در توانایی آن برای نظارت بر رفتار نواحی با دمای بالا همچون ناحیه پلاسما است. اما این روش با چالش‌هایی مانند طیف‌های ضعیف پلاسما در چگالی توان‌های پایین لیزر مواجه است که مشخصه‌یابی طیف را بخصوص در تعیین ترکیب عناصر با مشکل مواجه می‌کند.

روش طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، به عنوان یک تکنیک پیشرفته در پایش برخط فرایندهای ساخت افزایشی بر پایه لیزر، به دلیل توانایی آن در ارائه اطلاعات در لحظه و دقیق درباره ترکیب شیمیایی و وضعیت حوضچه مذاب، اهمیت زیادی دارد. لدنف^{۱۱} و دیگران [۱۹] از این روش جهت پایش برخط جوشکاری لیزری و در پژوهشی دیگر [۲۰] آن را جهت بررسی فرایند ساخت افزایشی بکار بردند و تصویری جامع از وضعیت حرارتی و شیمیایی فرایند ارائه دادند. همچنین وانگ^{۱۲} و همکاران [۲۱] از این نوع طیف‌سنجی برای اندازه‌گیری دمای موضعی حوضچه مذاب و ترکیب عناصر آن استفاده کردند و دقت بالای آن را در تشخیص‌های برخط عیوب آشکار ساختند. این مطالعات تنوع و پتانسیل طیف‌سنجی را برای بهبود شناسایی عیوب و کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جهت رسیدن به یک روکش با کیفیت در روکش‌کاری لیزری برجسته می‌کند.

در تحقیقات اخیر [۲۲-۲۴] محققان بر روی ترکیب روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی و تجربی در قالب روش‌های هیبریدی تمرکز کرده‌اند تا بتوانند مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تری از دینامیک حوضچه مذاب را بوجود آورند. ترکیب شبیه‌سازی دقیق فرایند و پایش برخط دینامیک آن، رویکردی تازه جهت کنترل و بهینه‌سازی فرایند روکش‌کاری لیزری است که دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار حرارتی و شیمیایی حوضچه مذاب ارائه می‌دهد. مدل گلداک با شبیه‌سازی دقیق توزیع حرارت حوضچه مذاب، دما، ابعاد و

در میان مدل‌های عددی مختلف بکار برده شده [۲-۵]، مدل منبع حرارتی گلداک [۶] به‌عنوان یک مدل حرارتی بیضوی دوگانه، به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی فرایندهای برهم‌کنش لیزر استفاده شده و اثربخشی آن در کاربردهای مختلف نشان داده شده است. کیک^۲ و همکاران [۷] از این مدل برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزری استفاده کرده و بر پیش‌بینی پروفایل‌های حرارتی و ناحیه تحت تأثیر حرارت تمرکز کرده و به توافق بالایی با نتایج تجربی دست یافتند. در همین زمینه، لی^۳ و همکاران [۸] یک مطالعه مقایسه‌ای از مدل‌های منبع حرارتی در جوشکاری لیزری انجام دادند و نتیجه گرفتند که نمایش سه بعدی مدل گلداک تطابق بهتری با هندسه‌های جوش تجربی نسبت به مدل‌های منبع حرارتی گاوسی ارائه می‌دهد. دریک کاربرد مشابه، ژانگ^۴ و همکاران [۹] مدل گلداک را برای تحلیل حرارتی گذرا در سوراخکاری لیزری به کار بردند و بر دقت بالای آن در ثبت توزیع دما و آستانه‌های حذف ماده تأکید کردند. در زمینه ساخت افزایشی، میر کوهی و همکاران [۱۰] مدل مذکور را جهت شبیه‌سازی فرایند ذوب انتخابی بکار برده و در کاری مشابه، کیران^۵ و همکاران [۱۱] از مدل گلداک برای شبیه‌سازی منبع حرارتی و توزیع تنش پسماند ایجادشده در فرایند رسوب مستقیم لیزری استفاده کردند و بینش‌هایی در مورد توزیع حرارت لایه به لایه ارائه دادند. به‌طور کلی، این مطالعات قابلیت انطباق و دقت مدل گلداک را در شبیه‌سازی برهم‌کنش پیچیده لیزر- ماده در ناحیه حوضچه مذاب در فرایندهایی همچون روکش‌کاری لیزری و ساخت افزایشی برجسته می‌کند.

در کنار مدل سازی فرایند که با چالش‌هایی مرتبط با پیچیدگی پارامترها، محدودیت‌های شبکه‌بندی (مش) و نیازهای اعتبارسنجی مواجه است، پایش تغییرات دینامیک حوضچه مذاب در زمان واقعی یا برخط به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل فرایندی که به بهبود کیفیت و کارایی لایه‌های روکش شده منجر می‌شود، مطرح شده است. در کنار روش رایج تصویربرداری جهت پایش لحظه‌ای دما و میکروساختار و کنترل کیفی فرایند [۱۲، ۱۳]، یکی دیگر از تکنیک‌های پرکاربرد در این زمینه، طیف‌سنجی اپتیکی است که شامل طیف‌سنجی پلاسمای نشری^۶ [۱۴] و طیف‌سنجی فرو شکست القایی لیزری^۷ [۱۵] است. ژانگ و همکاران [۱۶] از طیف‌سنجی پلاسمای گسیلی

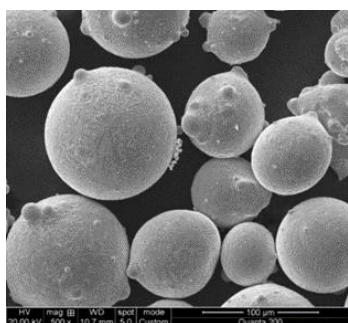
8 Plume
9 Schmidt
10 Valdiande
11 Lednev
12 Wang

1 Goldak
2 Kik
3 Li
4 Zhang
5 Kiran
6 Plasma Emission Spectroscopy (PES)
7 Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

جدول ۱. ترکیب پودر اینکونل ۷۱۸

Table 1. Composition of Inconel 718 powder

ماده	کربن	کروم	فسفر	نیتروژن	نیکل	آهن	منگنز	سولفور	نیبیدیم	آلومینیوم	تیتانیوم
اینکونل ۷۱۸	۳/۸۸	۲۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۱	۵۰/۱۲	۱۵/۸۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۴/۰۵	۲/۵۰	۲/۳۹



شکل ۱. مورفولوژی پودر اینکونل ۷۱۸

Fig. 1. Morphology of Inconel 718 powder

درصد آمیختگی روکش را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که طیف‌سنجی به‌طور هم‌زمان دمای حوضچه مذاب، درصد آمیختگی و ترکیب شیمیایی را در زمان واقعی پایش می‌کند. این روش باعث کالیبراسیون مداوم مدل شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی ناشی از مشخصه یابی طیفی می‌شود، که در نتیجه دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و تنظیم لحظه ای پارامترهای فرآیند را برای بهبود کیفیت روکش امکان‌پذیر می‌سازد. این رویکرد جدید علاوه بر کاهش خطا، یکنواختی و کیفیت لایه روکش را بهبود داده و تولید قطعات پیشرفته را در صنایع ساخت افزایشی تسهیل می‌بخشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این تحقیق، پودر اینکونل ۷۱۸^۱ بر روی زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴^۲ پوشش داده شده است. این آلیاژ پایه نیکل به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف با دمای بالا، نظیر توربین‌های گازی، ابزارآلات، نیرو و قطعات صنایع فرایندی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵]. شکل میکروسکوپی پودر اینکونل ۷۱۸ استفاده شده با اندازه دانه‌ای بین ۳۵ تا ۱۰۰ میکرون در شکل ۱ و مشخصات ترکیبی آن در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- مدل سازی میدان دما

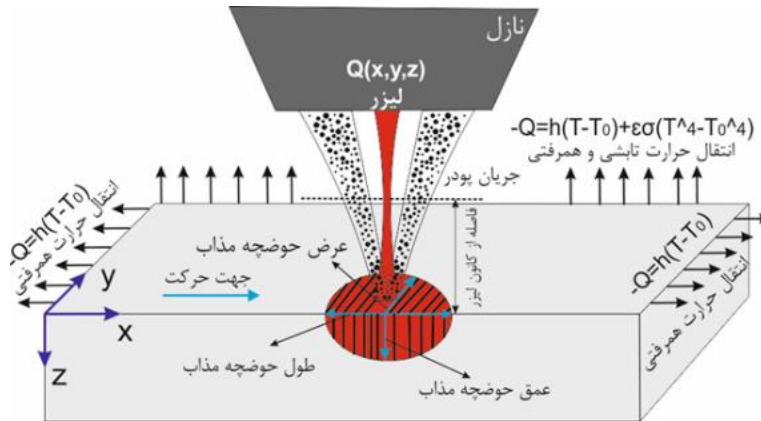
بخش مهمی از مدل‌سازی فرایندهای تولید افزودنی، پیش‌بینی میدان دمایی است که توسط لیزر اعمال می‌شود. در فرایند روکش‌کاری لیزری، برهم‌کنش بین لیزر و مواد اتفاق افتاده و لیزر حرارت مورد نیاز برای ذوب پودرها را فراهم می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، لیزر در جهت محور t حرکت کرده و پودر انرژی آن را در طول فرایند روکش‌کاری جذب می‌کند.

در تجزیه و تحلیل حرارتی، میدان حرارتی گذرا ناحیه روکش فلزی توسط زمان اثر لیزر t و سیستم مختصات فضایی (x, y, z) تعیین می‌شود. معادله انتقال حرارت غیر خطی زیر توزیع گرما را در طول فرآیند تعریف می‌کند:

$$\frac{\partial u \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho h V}{\partial x} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

که در آن $V, T, \dot{q}, k, \rho, h, u$ به ترتیب انرژی داخلی، آنتالپی، چگالی، هدایت گرمایی، منبع حرارت حجمی، دما و سرعت منبع گرما را نشان می‌دهند. در تحلیل حرارتی که رسوب‌گذاری در آن انجام می‌شود، دمای منطقه‌ای تحت تأثیر زمان t و مختصات فضایی (x, y, z) سیستم قرار دارد. انتقال حرارت در فرآیند با استفاده از معادله غیرخطی زیر تعریف می‌شود [۲۷].

1 Inconel 718
2 SS304



شکل ۲. نحوه انتقال گرما در فرایند روکش کاری لیزری [۲۶]

Fig. 2. Heat transfer mechanism in the LC process [26]

مورد استفاده قرار میگیرد. این مدل یک منبع حرارت ترکیبی متشکل از دو منبع بیضی شکل را در نظر میگیرد (شکل ۳). گرما به روش گاوسی بر روی این مناطق نیمه بیضی که در یک سیستم مختصات محلی تعریف شده اند به شکل رابطه (۴) توزیع می شود. در رابطه مذکور، $q(x, y, z, t)$ به معنای چگالی توان لیزر (توان لیزر به ازای واحد سطح) در نقطه (x, y, z) در زمان t است. P توان لیزر، η جذب لیزر، V سرعت حرکت لیزر و a, b, c_f, c_r شعاعهای مربوطه بیضی هستند که در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}\eta P}{ab\pi\sqrt{\pi}} \begin{cases} \frac{f_f}{c_f} e^{\left(\frac{3(x-Vt)^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right)} & \text{for } x \geq Vt \\ \frac{f_r}{c_r} e^{\left(\frac{3(x-Vt)^2}{c_r^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right)} & \text{for } x < Vt \end{cases} \quad (4)$$

برخی از محققین [۲۸، ۲۹] سعی کردند متغیرهای معادله فوق را با اعمال محدودیتی به شکل زیر کاهش دهند:

$$\frac{f_f}{c_f} = \frac{f_r}{c_r} \quad (5)$$

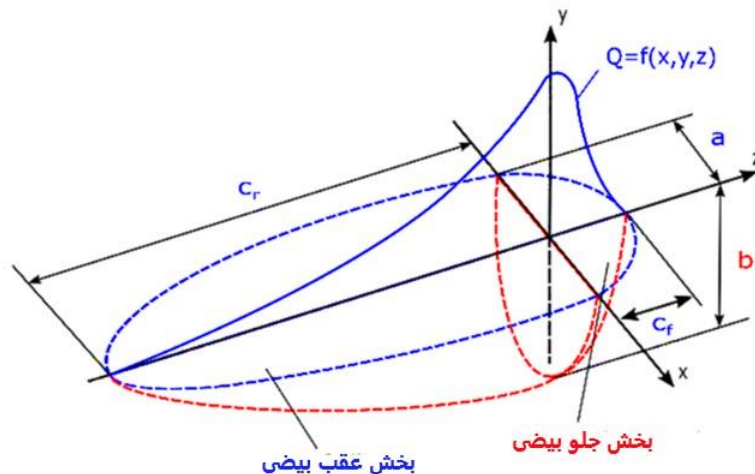
$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q(r, t) + Q(r, t) \quad (2)$$

در اینجا T به دما (متغیر وابسته)، ρ به چگالی ماده، به ظرفیت گرمایی ویژه و Q به شارش حرارتی منبع لیزر اشاره دارد. در معادله مذکور q به صورت زیر محاسبه می شود که $k(T)$ هدایت حرارتی ماده را نشان می دهد.

$$q = -k(T)\nabla T \quad (3)$$

معادله (۲) به بررسی انتقال حرارت گذرا در ناحیه روکش می پردازد، جایی که $\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t}$ نشان دهنده نرخ تغییر دما در طول زمان و $\nabla \cdot (k\nabla T)$ جریان حرارت ناشی از هدایت حرارتی را توصیف می کند. حل این معادله توزیع دمای گذرا را در طول زمان و فضا در فرایند روکش کاری لیزری ارائه می دهد و این امکان را فراهم می سازد که پروفایل های دما و رفتار حرارتی در طول عملیات ساخت افزایشی تجزیه و تحلیل شوند.

در این پژوهش، برای توصیف منبع حرارتی لیزری، مدل منبع حرارتی سه بعدی بیضوی دوگانه که توسط گلداک به شرح زیر توسعه داده شده،



شکل ۳. منبع حرارتی بیضوی دوگانه سه بعدی [۷]

Fig. 3. Three-dimensional dual elliptical heat source [7]

جدول ۲. پارامترهای مدل سازی منبع لیزر

Table 2. Parameters for laser source modeling

۰/۷۵ میلی متر (شعاع باریکه لیزر در کانون)	a
متغیر بر اساس پارامترهای ورودی	b
۰/۶	f_f
۱/۴	f_r
۰/۹۳ میلی متر	c_r
۰/۴ میلی متر	c_f

در اینجا h ضریب انتقال حرارت جابه جایی، T دمای سطح لایه روکش و T_0 دمای محیط را نشان می دهد. مدل حاضر می تواند برای شبیه سازی تغییر شکل حوضچه مذاب و هندسه نهایی لایه روکش به کار رود. در این مدل، اثر ذوب گرمای نهان محاسبه شده با ظرفیت گرمای ویژه اصلاح شده، مطابق معادله زیر به دست می آید:

$$C_p^m = C_p(T) + L_f \frac{\partial f}{\partial T_n} \quad (7)$$

زمانی که داده های تجربی کافی در دسترس نیست، مطابق پیشنهاد گلداک و همکارانش باید f_f برابر ۰/۶ به عنوان یک مقدار پیش فرض استفاده شود. جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز و نحوه تعیین آن ها را برای شبیه سازی منبع لیزر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

با در نظر گرفتن تابش از لایه روکش و تبادل حرارت با محیط از طریق همرفت، می توان شرایط مرزی را به صورت زیر به دست آورد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} = q(x, y, t) - h(T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

جدول ۳. خصوصیات وابسته به دمای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ [۳۱، ۳۰]

Table 3. Temperature-dependent properties of Inconel 718 alloy [30,31]

پارامتر	عبارت
هدایت گرمایی (W/m ⁰ C)	$K^*(T) = \begin{cases} 0.0151T + 5.2465 & T < T_L \\ 2.5 \times (0.0151T + 5.2465) & T \geq T_L \end{cases}$
ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg ⁰ C)	$C(T) = \begin{cases} 0.362T + 2.118 \times 10^{-4} & T < T_s \\ -0.946 + 0.295 \times 10^{-2}T - 1.379 \times 10^{-6}T^2 & T_s \leq T \leq T_L \\ 0.639 - 3.355 \times 10^{-6}T & T_L < T \end{cases}$
مدول الاستیسیته E(GPa)	$E(T) = 205 - 0.055T$
ضریب انبساط گرمایی (μm/m ⁰ C)	$\alpha(T) = 12.8 + 0.0026T$
ضریب پواسون	$\nu(T) = 0.029 + 0.00005T$
چگالی (Kg/m ³)	$\rho = 8190$

است، توزیع انتقال حرارت به دلیل جریان سیال حوضچه مذاب و تأثیر نیروهای مارانگونی^۱ متغیر است. برای در نظر گرفتن این اثر و اجتناب از پیچیدگی تحلیل، رسانایی حرارتی معادل برای توزیع انتقال حرارت مطابق معادله (۱۰) استفاده می‌شود.

$$k^*(T) = \begin{cases} k(T) & T < T_L \\ k(T) \times 2.5 & T \geq T_L \end{cases} \quad (10)$$

در ادامه جهت مدل‌سازی فرایند خصوصیات وابسته به دمای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در جدول ۳ آورده شده است.

در مدل حاضر می‌توان از شبیه‌سازی توزیع دمای حوضچه مذاب، ابعاد و هندسه لایه روکش را اندازه‌گیری کرد. به‌طور کلی سطح مقطع عرضی لایه روکش دارای شکلی بیضوی است که عمق و عرض مشخصی دارد که در شکل ۴ قابل مشاهده است. پارامترهای کلیدی شامل عرض W_c ، ارتفاع

که در آن $C_p(T)$ گرمای ویژه وابسته به دما، $L_f \frac{\partial f}{\partial T_n}$ گرمای نهان ذوب و f نسبت مایع است که می‌توان آن را از معادله زیر محاسبه کرد:

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (8)$$

که T_L, T_s به ترتیب دمای جامد و مایع هستند. همچنین f_r, f_f به ترتیب بخشی از گرمای رسوب شده در بیضی عقب و جلو هستند که داریم:

$$f_r + f_f = 2 \quad (9)$$

به منظور تطبیق نتایج با داده‌های تجربی، کالیبراسیون مدل منبع حرارت بیضوی دوگانه نیاز به تنظیم پارامترها a, b, c_r, c_f, f_r دارد. لازم بذکر

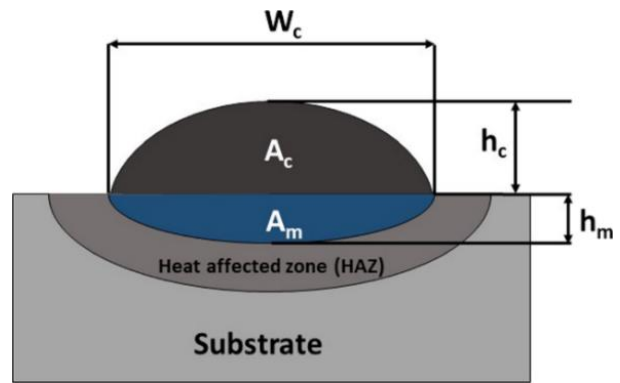
1 Marangoni

۲-۳- طیف سنجی حوضچه مذاب

در این تحقیق، جهت بررسی آزمایشگاهی دینامیک حوضچه مذاب از روش طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری استفاده می‌کنیم. در این روش از یک لیزر نانو ثانیه پالسی برای ایجاد پلازما در محل حوضچه مذاب کمک گرفته می‌شود. در این فرایند بعد از برخورد باریکه لیزر به سطح هدف، دمای سطحی به سرعت تا دمای بیش از دمای تبخیر بالا می‌رود. پیش از تبخیر لایه‌های سطحی، مواد زیرین سطح به دما و فشار بحرانی رسیده و باعث کندگی^۱ سطح می‌شوند. سپس برهم‌کنش بخش‌های بعدی باریکه لیزر با مواد تبخیر شدن در مجاورت سطح هدف، سبب یونش بخار و تشکیل پلازما می‌شود. این روش این امکان را فراهم می‌کند که پلاسمای موضعی تشکیل شده در زمان انجام فرایند در محل حوضچه مذاب را تحلیل و بررسی کنیم و با استفاده از آن اطلاعاتی درباره ترکیب، دما و سایر ویژگی‌های حوضچه مذاب به دست آوریم [۳۳]. با توجه به توزیع ناهمگن دمای پلاسمای القایی لیزر و دمای بالای مرکز پلازما و همچنین کوتاه بودن طول عمر آن، برای اندازه‌گیری دما، باید شرایط تعادل دمایی موضعی [۳۴] برقرار باشد که به‌طور معمول پس از تعداد کافی برخورد و به‌طور متوسط در زمان حدود یک میکروثانیه پس از تولید پلازما این شرایط رخ می‌دهد [۳۵]. شکلی شماتیک از سیستم مورد نظر و موقعیت پروب آن نسبت به هد روکش و میز در شکل ۵ آورده شده است.

۲-۴- چیدمان آزمایشگاهی

در این فرایند، از یک سیستم روکش کاری لیزری ساخت مرکز ملی لیزر ایران (شکل ۶) که شامل یک لیزر فیبر پیوسته با توان ۲ کیلووات و قطر باریکه ۱/۵ میلی‌متر در کانون، برای رسوب‌گذاری پودر اینکونول ۷۱۸ بر روی نمونه‌های زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ استفاده گردید. برای دستیابی به توزیع یکنواخت پودر، از یک سیستم تغذیه پودر تک کاناله و نازل پودر هم محور و همچنین از گاز آرگون به عنوان گاز کمکی در این فرآیند بهره گرفته شده است. هدروکش کاری لیزری به گونه‌ای طراحی شده است که پودر روکش را به صورت متقارن و یکنواخت، درست در امتداد محور پرتو لیزر به حوضچه مذاب هدایت کند. برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر نتایج روکش کاری، از یک میز سه محوره کارت‌زین برای انجام روکش کاری با سرعت‌های روبش متفاوت استفاده شده است. تنظیم پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، فاصله کانونی، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر و موقعیت



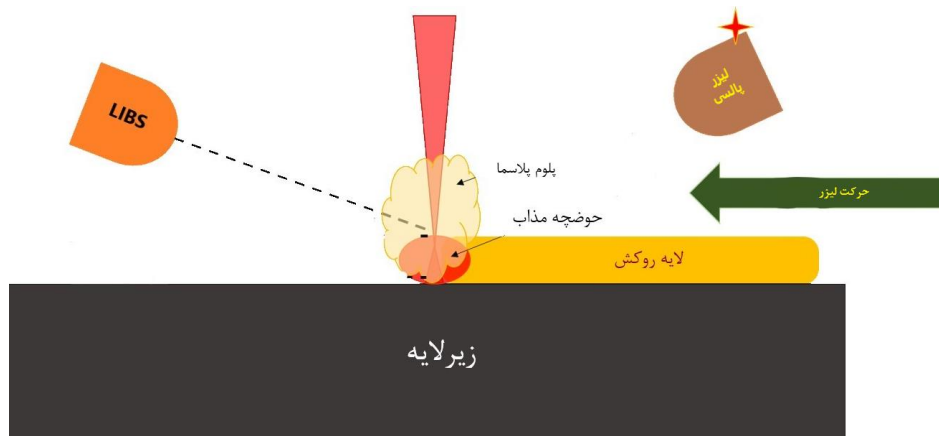
شکل ۴. سطح مقطع روکش و پارامترهای آن [۳۲]

Fig. 4. Cross-section of the cladding and its parameters [32]

h_c و نفوذ یا عمق روکش h_m و همچنین مساحت ناحیه روکش A_c و ناحیه آمیختگی A_m در شکل ۴ مشخص شده اند.

در روکش کاری لیزری، آمیختگی به میزان مخلوط شدن مواد زیرلایه با مواد روکش در طول فرایند اشاره دارد. معمولاً به‌صورت درصد بیان می‌شود و برای تعیین ویژگی‌های لایه روکش شده به‌دست‌آمده بسیار مهم است. باتوجه به شکل ۴، درصد آمیختگی را می‌توان از رابطه (۱۱) محاسبه کرد. درصد آمیختگی میزان درصد نفوذ لیزر در زیر لایه را نشان می‌دهد و اینکه چه مقدار از ماده زیرلایه با ماده روکش جهت ایجاد لایه روکش نهایی ترکیب شده است. این فاکتور تحت تأثیر پارامترهای ورودی مانند توان لیزر، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر، اندازه پودر و نوع گاز محافظ قرار دارد. تعیین درصد آمیختگی در روکش کاری لیزری از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا به طور مستقیم بر خواص مکانیکی و کیفیت روکش تأثیر می‌گذارد. آمیختگی بیش از حد می‌تواند خواص ماده روکش را تضعیف کرده و آن را به خواص زیرلایه نزدیک کند، درحالی‌که آمیختگی بسیار کم نیز ممکن است به اتصال ضعیف و چسبندگی ناکافی روکش منجر شود؛ بنابراین، کنترل و بهینه‌سازی درصد آمیختگی برای دستیابی به اتصالی قوی و خواص مطلوب در محصول نهایی ضروری است.

$$\gamma = \frac{h_m}{h_c + h_m} \equiv \frac{A_m}{A_c + A_m} \quad (11)$$



شکل ۵. طیف سنجی پلاسمای گسیلی در فرایند روکش کاری لیزری

Fig. 5. Emission plasma spectroscopy in the LC process



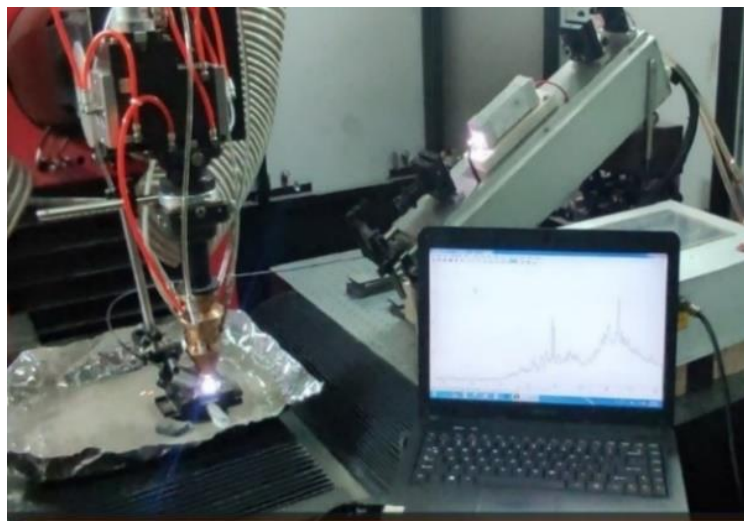
شکل ۶. سیستم روکش کاری لیزری و اجزای اصلی آن با یک سری خطوط روکش

Fig. 6. LC system and its main components with a clad lines set

جدول ۴. پارامترهای ورودی و سطوح تغییر آنها

Table 4. Input parameters and their variation levels

سطح تغییر				پارامتر	
۴	۳	۲	۱		
۱۶۰۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰	(وات)	توان لیزر
۱۵۰۰	۱۲۰۰	۸۰۰	۵۰۰	(میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت روبش
۱۶	۱۳	۱۰	۷	(گرم بر دقیقه)	نرخ تغذیه پودر



شکل ۷. سیستم طیف‌سنجی جهت پایش برخط فرایند روکش کاری لیزری

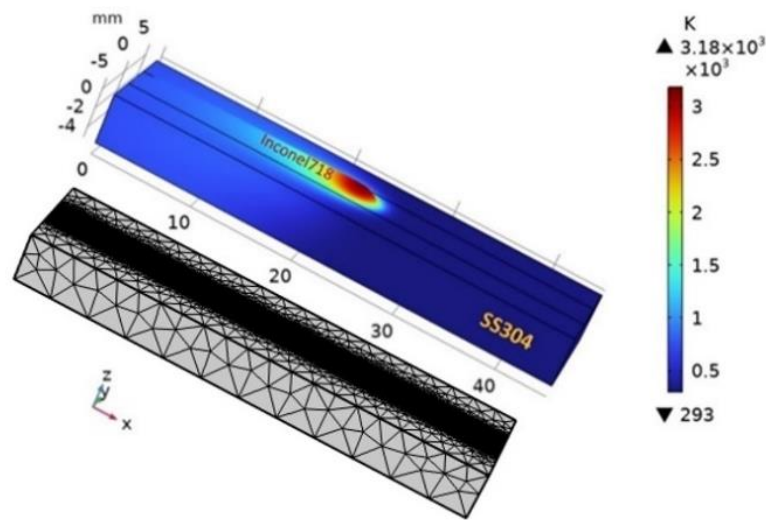
Fig. 7. Spectroscopy system for real-time monitoring of the LC process

کالیبراسیون میز بکار برده شده سرعت روبش از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. باتوجه‌به نوع پودرپاش مورد استفاده و اطمینان از رسیدن پودر کافی به محل حوضچه مذاب، نرخ تغذیه پودر نیز در محدوده ۷ تا ۱۶ گرم بر دقیقه در نظر گرفته شده است که خطوط روکش یکنواختی به دست آید.

سیستم طیف‌سنجی بر پایه یک لیزر پالسی نانو ثانیه طراحی شده است که در شکل ۷ به نمایش درآمده است. این لیزر به صورت پمپاژ لایمی و بالترژی ۱۰۰ میلی ژول، پهنای پالس ۱۰ نانوثانیه و نرخ تکرار ۱۰ هرتز تنظیم شده است. باریکه لیزر به کمک یک عدسی ۳۰ سانتی‌متری به یک باریکه بیضوی در محل برهم‌کنش لیزر با ماده متمرکز می‌شود که اندازه

قطعه کار بر عهده بخش کنترلر دستگاه است.

در طراحی آزمایش فرایند، بر روی سه پارامتر ورودی توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر تمرکز شده که بیشترین تأثیر را بر روی دینامیک حوضچه مذاب دارند. هر کدام از پارامترها در ۴ سطح مختلف طبق جدول ۴ تغییر می‌کنند. با در نظر گرفتن حالت فاکتوریل کامل، ۶۴ آزمایش در نظر گرفته شده تا تأثیرات متقابل این پارامترها با دقت بالایی بررسی شوند. باتوجه‌به مواد استفاده شده و خطوط روکش اولیه، توان لیزر در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ وات در نظر گرفته شده که علاوه بر ذوب کامل پودر و نفوذ در زیر لایه از ذوب بیش از حد زیر لایه نیز جلوگیری شود. از طرف دیگر سرعت روبش تأثیر زیادی بر توزیع حرارت و زمان تماس لیزر با سطح دارد که بر طبق



شکل ۸. شبیه سازی مدل روکش کاری لیزری و هندسه شبکه بندی آن

Fig. 8. Simulation of the LC model and mesh geometry

به طور خاص برای رسوب گذاری یک نوار تک لایه از اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه استیل ۳۰۴ طراحی شده است. در شبیه سازی های انجام شده، از دو نوع المان چهار گوش شش وجهی و سه گوش چهاروجهی استفاده می شود. از المان های چهارگوش شش وجهی برای روکش و المان های سه گوش چهاروجهی برای زیرلایه بهره گرفته شده است. باهدف افزایش دقت نتایج، شبکه بندی ریزتر در ناحیه اطراف پوشش و ناحیه متأثر از شار حرارتی ناشی از لیزر و برای کاهش زمان تحلیل، شبکه بندی درشت تر در بقیه نقاط به کار می رود. هندسه و جزئیات مدل به همراه توزیع دمای یک خط روکش در شکل ۸ آورده شده است.

هنگامی که فرایند روکش کاری لیزری شروع می شود، انرژی لیزر توسط مواد پودر و زیرلایه جذب شده و دمای آن از دمای نقطه ذوب زیرلایه (۱۷۲۳ درجه کلوین) فراتر رفته و گرما تولید می شود. خط ذوب ۱۷۲۳ در شکل ها مرز بین منطقه مذاب و لایه روکش منجمد شده را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۹-الف مشاهده می شود، برای حالت با توان ۱۲۰۰ وات، سرعت روبش ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه و نرخ تغذیه پودر ۱۶ گرم بر دقیقه (شماره نمونه به شکل توان لیزر- سرعت روبش - نرخ تغذیه پودر نامگذاری شده است)، در جهت روکش گرما از مرکز حوضچه مذاب به سمت لبه ها منتقل می شود و مطابق با شکل ۹-ب، در حالت عمود بر آن، پروفایل حرارتی گاوسی متقارن در عرض روکش گسترش یافته و به عمق زیرلایه نفوذ

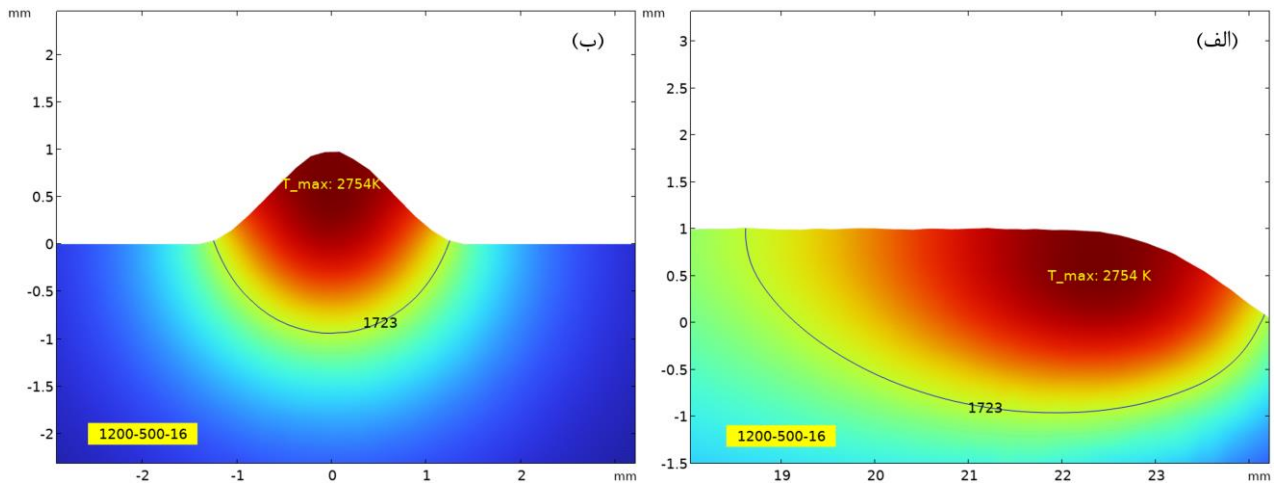
تقریبی قطر برایکه لیزر در موقعیت قطعه ۵۰۰ در ۷۰۰ میکرومتر است. در این چیدمان جهت جمع آوری حداکثر نور منتشر شده، موازی ساز مربوط به طیف سنج در زاویه ۴۵ درجه نسبت به هد روکش قرار دارد. عرض ناحیه حوضچه مذاب به حدود ۳/۵ میلی متر در ناحیه برخورد لیزر با ماده می رسد و در نتیجه باریکه لیزر پالسی که دارای عرضی کمتر است در این ناحیه قرار می گیرد. لازمه این امر مستلزم تنظیم دقیق محل برخورد باریکه لیزر پالسی با منطقه حوضچه مذاب است..

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه سازی دینامیک حوضچه ذوب

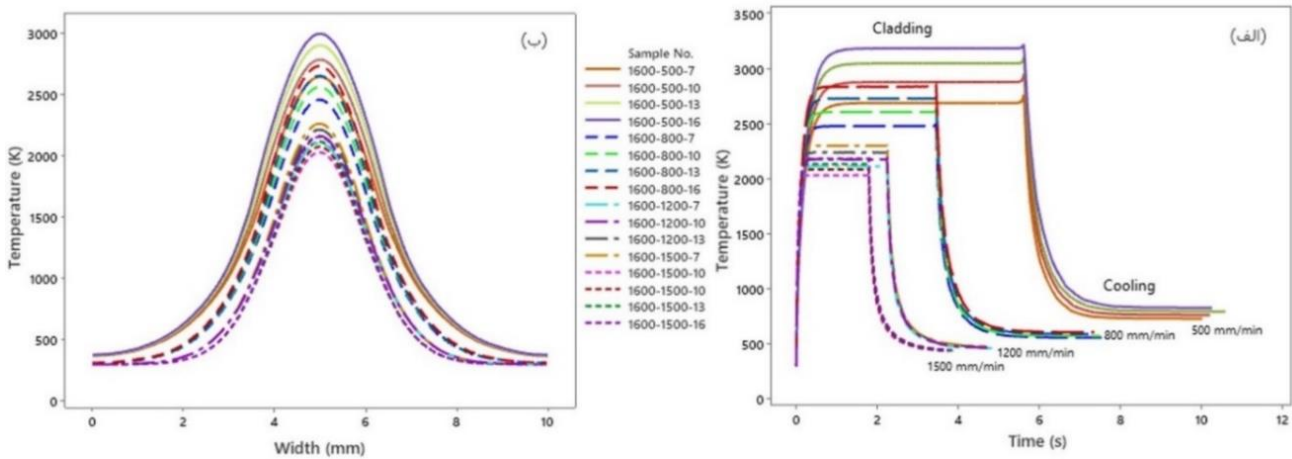
شبیه سازی مدل حرارتی مقاله حاضر با بهره گیری از شبکه بندی متحرک در نرم افزار محاسباتی کامسول انجام گرفته است. حوزه محاسباتی در این پژوهش شامل یک رابط مایع یا جامد متحرک است که به طور صریح با استفاده از روش اویلری - لاگرانژی دلخواه^۱ ردیابی می شود. در این روش، جابه جایی گره های مرزی توسط پدیده های مکانیک سیالات کنترل می شود و با توصیف لاگرانژی بیان می شود در حالی که گره های دامنه از توصیف اویلری پیروی می کنند. گره های داخلی با این وجود برای جلوگیری از ناپایداری های عددی هنگام محاسبه جابه جا می شوند. محاسبات ارائه شده در این پژوهش با استفاده از روش لاپلاس انجام شده است. این مدل سازی

1 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)



شکل ۹. نحوه توزیع گرما در سطح مقطع روکش (الف) در جهت حرکت لیزر (ب) در جهت عمود بر آن

Fig. 9. Heat distribution in the clad cross-section: (a) along the direction of laser movement, and (b) across it perpendicular to the movement



شکل ۱۰. (الف) - تغییر دما بر حسب زمان در طول خط روکش (ب) - تغییر دما در عرض روکش برای توان ۱۶۰۰ وات

Fig. 10. (a) Temperature variation over time along the cladding, and (b) temperature fluctuations across the clad line

دمای ذوب زیرلایه فراتر رفته و بعد از خاموشی لیزر و خنک شدن زیرلایه به تدریج دمای آن پایین می‌آید. شکل ۹-ب، تغییر دما برای این حالات را عمود بر جهت حرکت لیزر و سطح روکش نشان می‌دهد.

جهت بررسی همگرایی و اطمینان از پایداری نتایج به دست آمده، تغییرات نتایج را بر اساس تغییر اندازه شبکه (مش) بررسی می‌کنیم. همان طور که گفته شد، مدل شبکه‌بندی از دو اندازه مختلف تشکیل شده است: قسمت

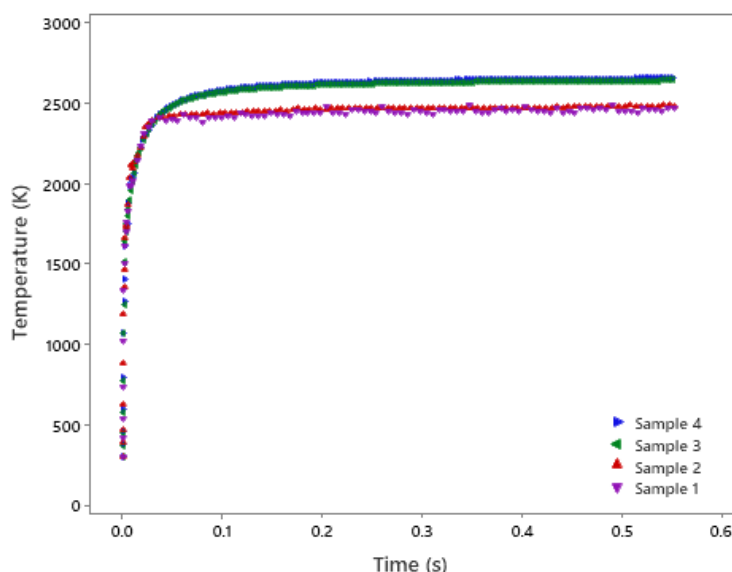
می‌کند. تفاوت‌های موجود در خواص حرارتی مواد روکش و زیرلایه، تأثیر زیادی بر روی نحوه انتقال حرارت و کیفیت نهایی روکش دارد.

نحوه توزیع گرما در شکل ۱۰-الف برای حالت‌های مربوط به توان ۱۶۰۰ وات در سرعت‌های رویش و نرخ تغذیه پودرهای مختلف در جهت روکش بر حسب زمان نشان داده شده است. در این حالت برای هر نمونه مشاهده می‌شود که با شروع فرایند، دمای خط روکش بلافاصله بالا رفته و از

جدول ۵. آنالیز مربوط به اندازه‌های مختلف شبکه بندی

Table 5. Analysis of different mesh sizes

اندازه کوچک‌ترین عنصر (میلی‌متر)	اندازه بزرگ‌ترین عنصر (میلی‌متر)	شماره آزمون
۳۰	۴۰۰	۱
۳۰	۳۰۰	۲
۱۰	۲۰۰	۳
۱۰	۱۰۰	۴



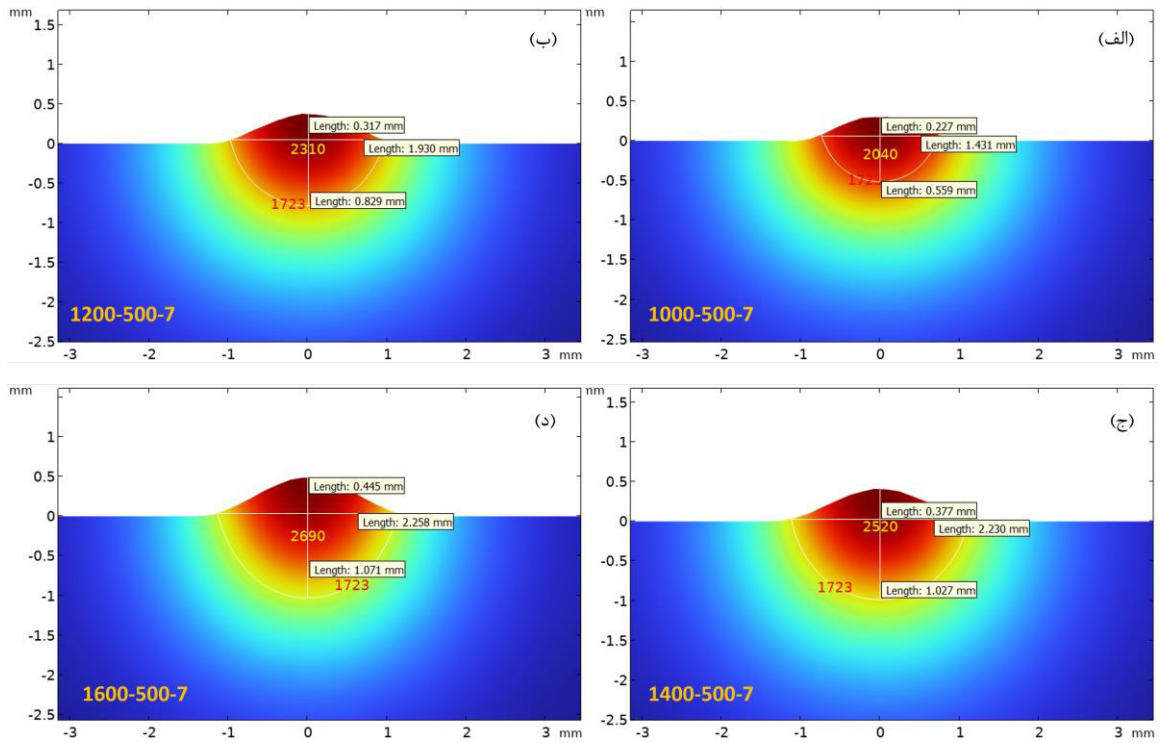
شکل ۱۱. دما بر حسب زمان در طول روکش برای شبکه بندی‌های مختلف

Fig. 11. Temperature vs. time along the cladding for different mesh configurations

و مطابق نمونه ۳ در نظر گرفته شده است.

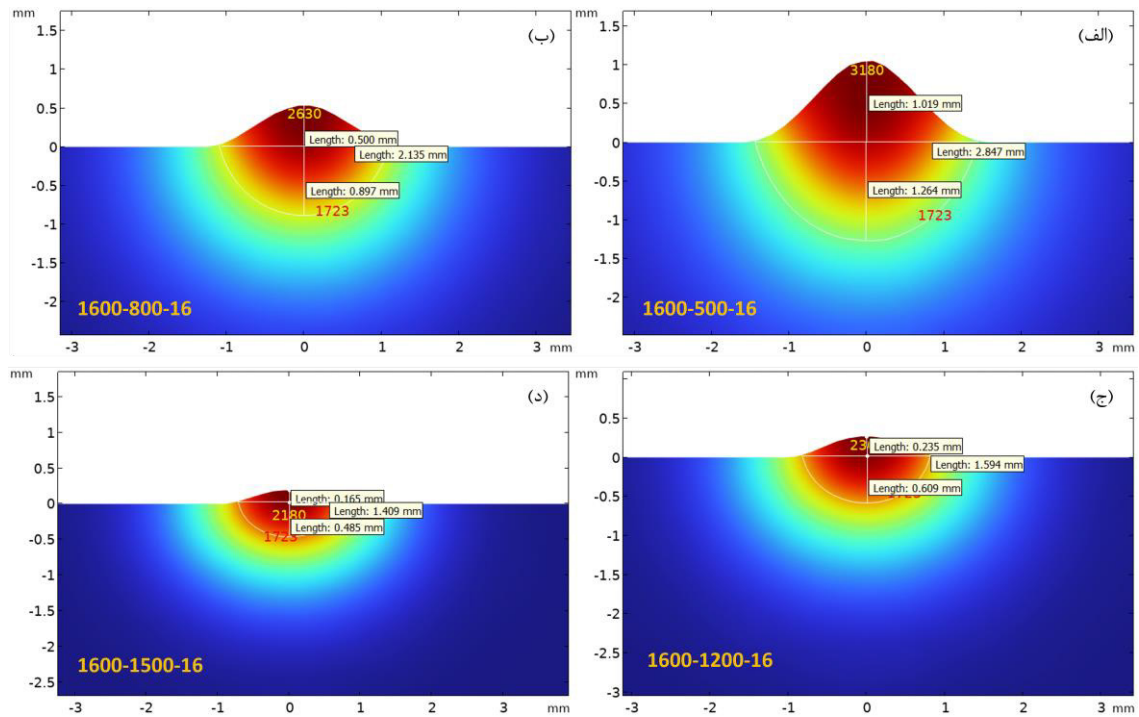
نمایه روکش برای پارامترهای ورودی مختلف، نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر به طور مستقیم با افزایش چگالی انرژی لیزر مرتبط است؛ بنابراین دمای کلی فرایند در این حالت افزایش پیدا می‌کند. وقتی توان لیزر از ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ وات افزایش می‌یابد، عرض روکش به مقدار زیاد و ارتفاع آن به میزان کمتری افزایش می‌یابد. گسترش ابعاد حوضچه مذاب بر حسب توان لیزر ورودی را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد؛ جایی که دمای حوضچه مذاب از ۲۰۴۰ درجه کلوین تا ۲۶۹۰ درجه کلوین افزایش پیدا می‌کند. برخلاف وضعیت قبلی، شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در توان لیزر و نرخ تغذیه پودر ثابت، افزایش سرعت رویش

داخلی (نزدیک‌ترین محدوده به مسیر باریکه لیزر) و ناحیه بیرونی قطعه‌کار. برای هر یک از این دو قسمت چهار اندازه شبکه متفاوت مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده و تجزیه و تحلیل نحوه انتقال حرارت برای هر یک انجام شده است. با استفاده از چهار آنالیز با اندازه شبکه‌بندی‌های مختلف و بررسی تغییرات دما و زمان، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، یک مدل المان محدود مستقل از شبکه بندی به دست آمده است بطوریکه مدل‌های شماره ۳ و ۴ با شبکه بندی ریزتر مدل دقیق‌تری را به نمایش می‌گذارند. با توجه به نزدیکی نتایج نمونه ۳ و ۴ جهت کاهش تعداد شبکه و انجام محاسبات، مدل شبکه بندی ۳ انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که پس از این مرحله اندازه عناصر و تعداد گره‌ها در تمامی شبیه‌سازی‌ها یکسان



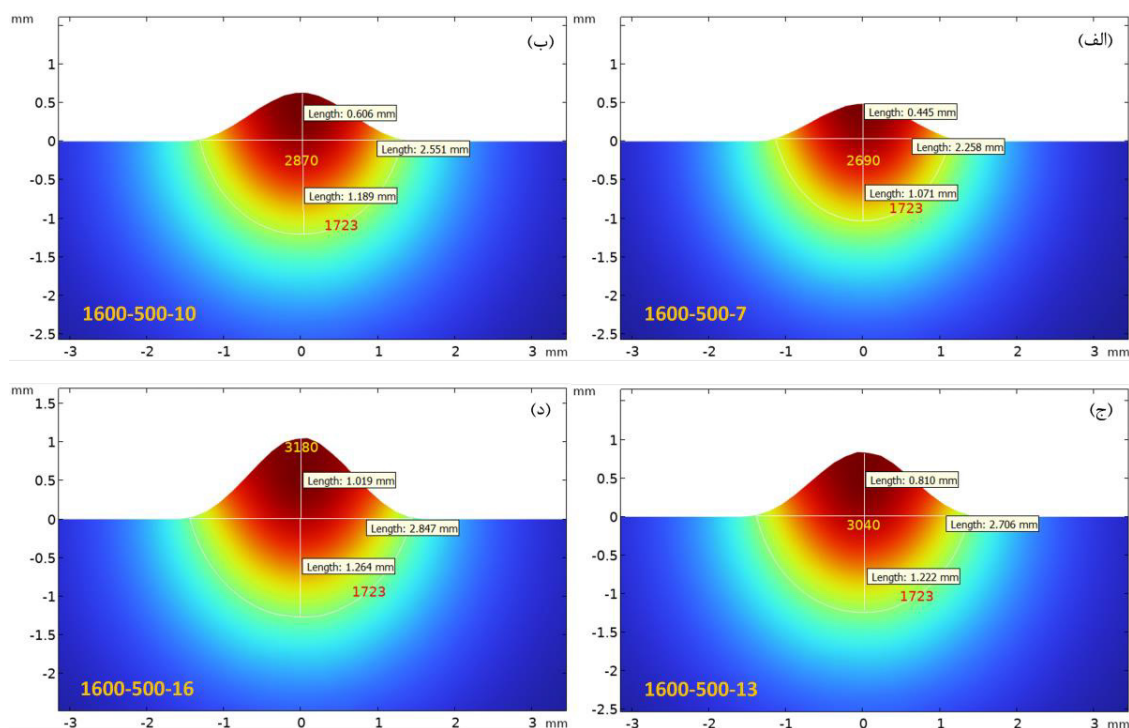
شکل ۱۲. سطح مقطع روکش برای توان لیزر (الف) ۱۰۰۰ (ب) ۱۲۰۰ (ج) ۱۴۰۰ (د) ۱۶۰۰ وات

Fig. 12. Cross-section of the cladding for laser powers: (a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, and (d) 1600 W



شکل ۱۳. سطح مقطع روکش برای سرعت روبش (الف) ۵۰۰ (ب) ۸۰۰ (ج) ۱۲۰۰ (د) ۱۵۰۰ میلی متر بر دقیقه

Fig. 13. Cross-section of the cladding for scan speeds: (a) 500, (b) 800, (c) 1200, and (d) 1500 mm/min



شکل ۱۴. سطح مقطع روکش برای نرخ تغذیه پودر (الف) ۷ (ب) ۱۰ (ج) ۱۳ (د) ۱۶ گرم بر دقیقه

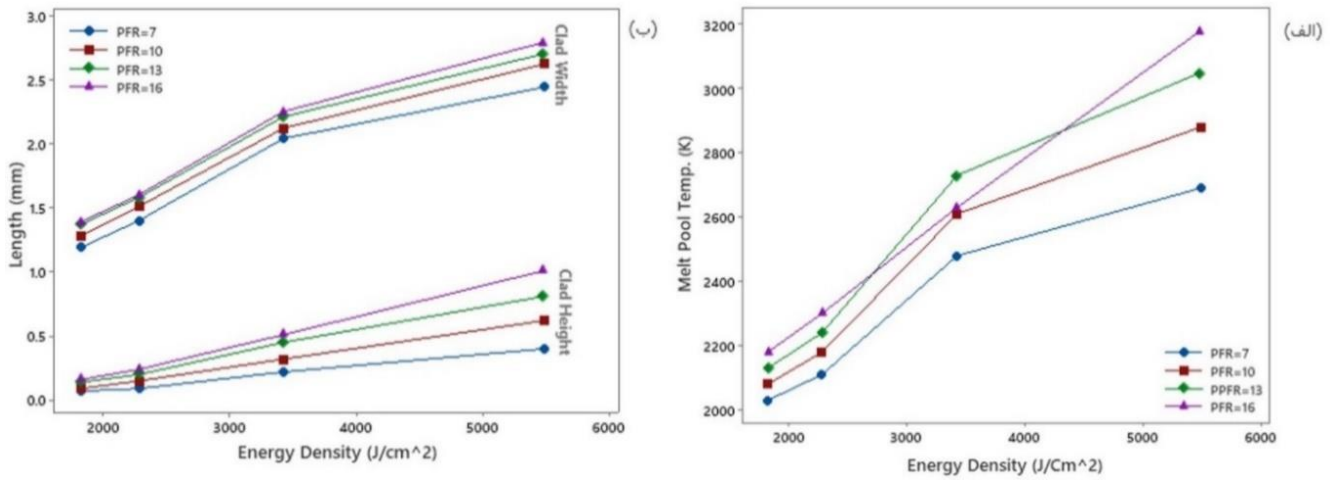
Fig. 14. Cross-section of the cladding for powder feed rates (PFR): (a) 7, (b) 10, (c) 13, and (d) 16 gr/min

در زیر لایه تأثیر می‌گذارند. برای درک بیشتر موضوع، تأثیر توان لیزر و سرعت روبش را در یک پارامتر به صورت چگالی انرژی که به صورت زیر تعریف می‌شود، خلاصه می‌کنیم که در آن LP توان لیزر، SS سرعت روبش و D قطر باریکه لیزر تعریف شده‌اند.

$$E.D. = \frac{LP}{SS * D} \quad (۱۲)$$

نتایج شبیه‌سازی مربوط به توان لیزر ۱۶۰۰ وات که در شکل ۱۵ آورده شده نشان می‌دهند که با کاهش سرعت روبش که منجر به افزایش چگالی انرژی ورودی شده، مقدار انرژی جذب شده توسط پودر و زیر لایه بیشتر شده و این باعث افزایش دما و افزایش عرض و ارتفاع روکش با نرخ‌های مختلف و نفوذ بیشتر در زیر لایه می‌شود. به بیان بهتر، در این حالت به دلیل انتقال بیشتر انرژی به زیر لایه، نرخ آمیختگی نیز بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ تغذیه پودر علاوه بر افزایش دما، ارتفاع روکش به

منجر به کاهش قابل توجهی در ابعاد لایه روکش می‌شود. این کاهش در ابعاد حوضچه مذاب همراه با کاهش دمای حوضچه مذاب است. این نتیجه قابل انتظار بود، زیرا افزایش سرعت برهم‌کنش لیزر با مواد باعث کاهش گرمای تولید شده در طول فرآیند روکش‌کاری می‌شود. علاوه بر نتایج فوق می‌توان مشاهده کرد، با افزایش نرخ تغذیه پودر، مقدار پودر فلز وارد شده به حوضچه مذاب افزایش می‌یابد؛ بنابراین ارتفاع لایه روکش به طور طبیعی افزایش پیدا می‌کند. این به نوبه خود باعث افزایش دمای حوضچه مذاب می‌شود. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزایش نرخ تغذیه پودر از ۷ گرم در دقیقه به ۱۶ گرم در دقیقه به طور قابل توجهی دمای حوضچه مذاب را از ۲۶۹۰ درجه کلین به ۳۱۸۰ درجه کلین می‌رساند. این افزایش در نرخ تغذیه پودر همچنین منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع روکش و به مقدار کمتری عرض روکش می‌شود. همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، پارامترهای ورودی فرآیند بر دما و ابعاد حوضچه مذاب و همچنین میزان نفوذ آن



شکل ۱۵. (الف) - تغییر دمای حوضچه مذاب (ب) - تغییر عرض و ارتفاع روکش بر حسب چگالی انرژی ورودی

Fig. 15. (a) Variation of melt pool temperature (b) variation of clad width & height vs. input energy density

بر حسب پارامترهای ورودی است. برای مقایسه بهتر، نتایج شبیه‌سازی و تجربی یک نمونه خط روکش در شکل ۱۸ با ابعاد آن نشان داده شده است. مقدار خطای موجود بین نتایج در بعضی از نمونه‌ها به دلیل تغییر لحظه‌ای پارامترهای تنظیم شده ورودی و اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، بدون انجام فرایند اندازه‌گیری برای هر لایه روکش که فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است، با شبیه‌سازی انجام شده می‌توان با دقت قابل‌قبولی هندسه روکش شامل عرض، ارتفاع و نفوذ روکش در زیرلایه را پیش‌بینی کرد.

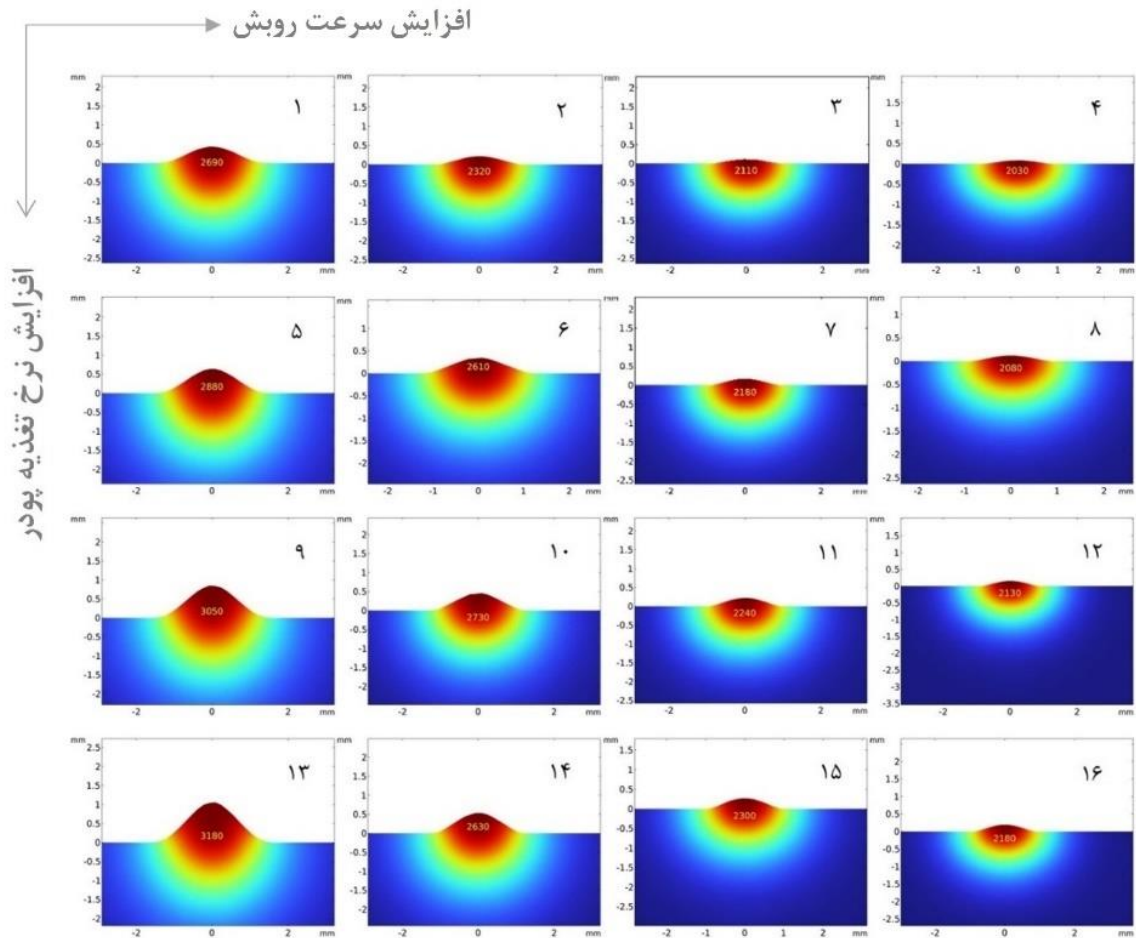
در ادامه جهت به‌دست‌آوردن ضرایب همبستگی بین پارامترهای مختلف از نمودار همبستگی پیرسون^۱ کمک گرفته شده که با ضرایب آماری به‌دست‌آمده در جدول ۶ نمودار شکل ۱۹ حاصل می‌شود.

با مشاهده نمودار شکل ۱۹ می‌توان مشاهده کرد که تاثیر توان لیزر بر روی عرض، ارتفاع و عمق نفوذ روکش به ترتیب دارای ضرایب همبستگی ۰/۲۱، ۰/۵۴ و ۰/۶۴ است که نشان دهنده تاثیر بیشتر توان لیزر بر عرض و نفوذ در زیرلایه نسبت به ارتفاع روکش است. از طرفی دیگر، سرعت روکش بر روی عرض، ارتفاع و عمق نفوذ روکش دارای ضرایب همبستگی منفی بوده که تاییدی بر تاثیر عکس آن است. لازم بذکر است نرخ تغذیه پودر دارای تاثیر زیاد بر روی ارتفاع روکش با ضریب همبستگی ۰/۳۸ است. در

مقدار زیاد و عرض روکش به مقدار کمتر افزایش پیدا می‌کند. این افزایش ارتفاع روکش و نفوذ کمتر در زیر لایه منجر به کاهش درصد آمیختگی می‌شود. علت این است که در این حالت با ورود پودرهای بیشتر انرژی کمتری به زیرلایه رسیده و میزان نفوذ آن در زیرلایه کم شده و در نتیجه میزان آمیختگی کاهش پیدا می‌کند.

پروفایل توزیع گرمای سطح مقطع حوضچه مذاب برای کلیه حالات مربوط به ۱۶۰۰ وات (۱۶ نمونه روکش) در شکل ۱۶ آورده شده است. در این اشکال، تغییر در ابعاد لایه روکش و حداکثر دمای حوضچه مذاب را می‌توان با تغییر در سرعت روکش در جهت (x) و تغییر در نرخ تغذیه پودر در جهت (y) مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر سرعت روکش تاثیر زیادی بر ابعاد روکش داشته و تاثیر بیشتر نرخ تغذیه پودر بر ارتفاع روکش است. در روش تجربی، ابعاد لایه روکش (عرض و ارتفاع) با بررسی سطح مقطع آن تعیین می‌شود. هر نمونه خط روکش، مرحله آماده سازی را طی می‌کند که شامل برش، سنگ زنی و پرداخت سطح است. از تصاویر میکروسکوپی هر نمونه، عرض و ارتفاع لایه روکش اندازه‌گیری می‌شود. نتایج آزمایشگاهی سطح مقطع های اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه های شبیه سازی شده شکل ۱۶ در شکل ۱۷ به نمایش درآمده است. این مقایسه به وضوح نمایانگر روند یکسان تغییر نتایج شبیه سازی و تجربی

1 Pearson correlation



شکل ۱۶. سطح مقطع روکش شبیه سازی شده برای توان لیزر ۱۶۰۰ وات

Fig. 16. Cross-Section of the simulated clad for LP = 1600 W

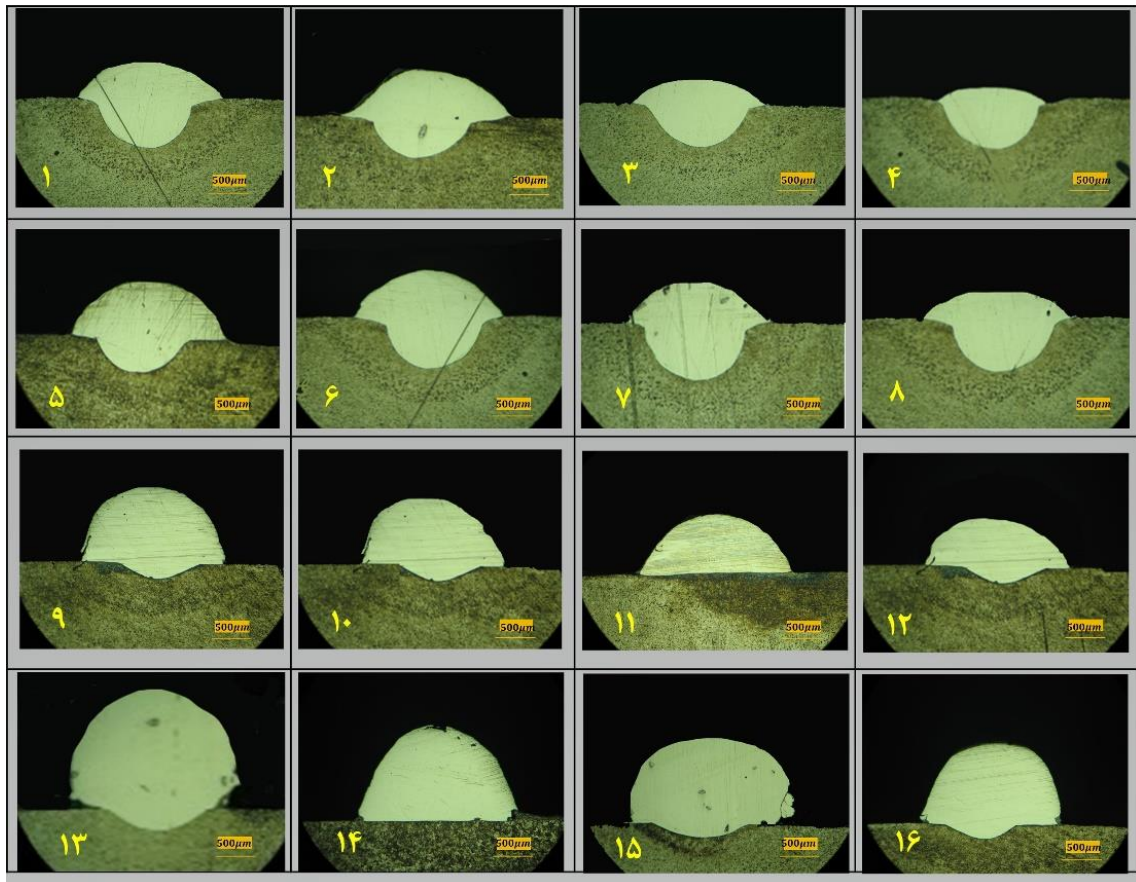
پلازما را با فرکانس ۱۰ هرتز به صورت خودکار ثبت کند. در طیف پلاسمای به دست آمده از روکش، خطوط اتم کروم نسبت به سایر عناصر دارای شدت بیشتری هستند. همچنین مشخص است که بعد از فرایند روکش کاری، شدت خطوط مربوط به نیکل در سطح روکش بیشتر از فلز زیرلایه شده، به همین دلیل، در طیف روکش برخی خطوط اتمی ظاهر می شوند که در طیف زیرلایه وجود ندارند.

دمای پلازما که به طور غیرمستقیم به دمای حوضچه مذاب مرتبط است، می تواند اطلاعات دقیقی در مورد وضعیت حرارتی فرایند و دمای منطقه مذاب به دست دهد. از آنجاکه این روش غیرتماسی است، قادر به اندازه گیری دما در لحظه و در محیط های متغیر و با دمای بالا همچون حوضچه مذاب، بدون آسیب زدن به سطح روکش است. به علاوه، داده های

مورد درصد آمیختگی می توان گفت توان لیزر و سرعت رویش با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۵۵ تاثیر مستقیم بر آن داشته در حالی نرخ تغذیه پودر با ضریب ۰/۶۹ بر روی درصد آمیختگی تأثیری معکوس دارد.

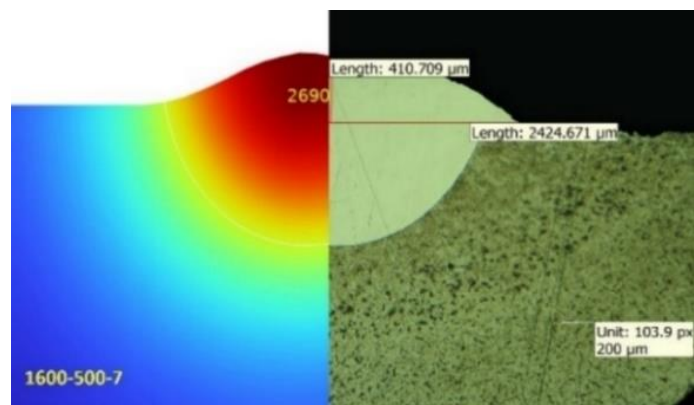
۳-۲- طیف سنجی حوضچه مذاب

در فرایند روکش کاری لیزری اینکونل ۷۱۸ بر روی استیل ۳۰۴، یک آلیاژ ترکیبی به وجود می آید که خواص هر دو زیرلایه و پودر روکش را داراست. در طیف ارائه شده (شکل ۲۰) خطوط تابش مربوط به زیرلایه و حوضچه مذاب به صورت مجزا نمایش داده شده اند. مقایسه این طیف ها نشان می دهد که شدت خطوط تابش ناشی از حوضچه مذاب بیشتر از زیرلایه است. از این رو پروب طیف سنج به نحوی تنظیم می شود که بتواند به صورت پیوسته از داخل ناحیه مذاب خط روکش، نمونه برداری کرده و طیف های



شکل ۱۷. سطح مقطع روکش اندازه گیری شده برای توان ۱۶۰۰ وات

Fig. 17. Measured cross-section of the clad for LP=1600 W



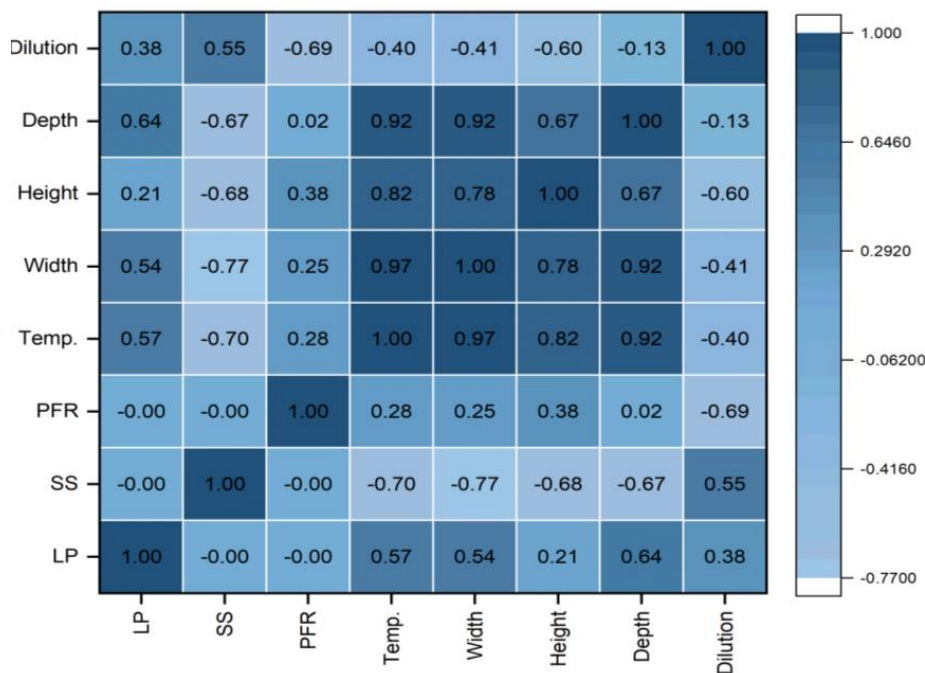
شکل ۱۸. مقایسه سطح مقطع روکش برای نمونه شماره ۱

Fig. 18. Comparison of clad cross-section for the sample no.1

جدول ۶. ضرایب آماری مربوط به داده‌های ورودی و خروجی

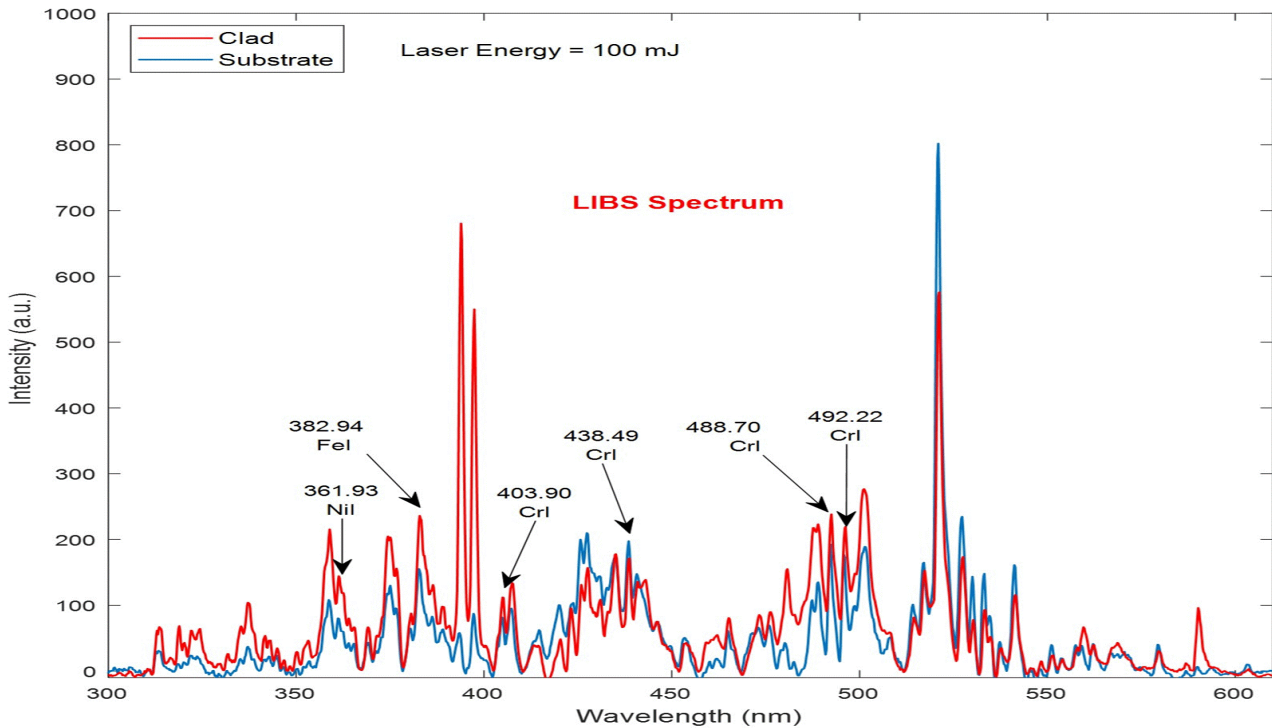
Table 6. Statistical coefficients related to input and output data

عنوان متغیر	نماد	تعداد داده	میانگین	انحراف معیار	مجموع	حداقل	حداکثر
توان لیزر	<i>LP</i>	۶۴	۱۳۰۰	۲۲۵/۳۷	۸۳۲۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰۰
سرعت روبش	<i>SS</i>	۶۴	۱۰۰۰	۳۸۳/۷۹	۶۴۰۰۰	۵۰۰	۱۵۰۰
نرخ تغذیه پودر	<i>PFR</i>	۶۴	۱۱/۵	۳/۳۸	۷۳۶	۷	۱۶
دما	Temp.	۶۴	۲۲۱۶/۴۰	۳۴۴/۴۱	۱۴۱۸۵۰	۱۷۳۰	۳۱۸۰
عرض روکش	Width	۶۴	۱/۴۷	۰/۶۵	۹۴/۳	۰/۳۲	۲/۷۹
ارتفاع روکش	Height	۶۴	۰/۲۷	۰/۲۶	۱۷/۷۹	۰/۰۲	۱/۰۲
نفوذ روکش	Depth	۶۴	۰/۴۷	۰/۳۲	۳۰/۱۷	۰/۰۷	۱/۲۶
آمیختگی	Dilution	۶۴	۰/۶۷	۰/۱۱	۴۳/۰۷	۰/۳۸	۰/۸۵



شکل ۱۹. نمودار همبستگی بین داده‌های ورودی و خروجی

Fig. 19. Correlation chart between input and output data



شکل ۲۰. طیف پلاسمای زیر لایه و روکش در انرژی لیزر ۱۰۰ میلی ژول

Fig. 20. Plasma spectrum of the substrate and clad at laser energy of 100 mJ

دمایی به دست آمده از مشخصه‌یابی طیفی، می‌تواند برای کالیبراسیون و بهبود شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گیرند تا دقت مدل‌های پیش‌بینی افزایش یابد. در نتیجه، این روش به کاهش خطا، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و بهبود کیفیت لایه‌های روکش کمک می‌کند. روش نمودار بولتزمن، ابزاری برای تعیین دمای پلازما به وسیله تحلیل طیف‌های تابشی آن در شرایط تعادل گرمایی موضعی است. برای اینکه تحلیل عناصر به طور دقیق و صحیح انجام شود، انتخاب خطوط طیفی شدید و غیر تشدید از منشأ اتمی یا یونی که با یکدیگر تداخل نداشته باشند، بسیار اهمیت دارد. با توجه به کمتر بودن انرژی یونیزاسیون کروم نسبت به نیکل که در جدول ۷ آورده شده، و همچنین چگالی توان نسبتاً پایین لیزر، خطوط طیفی کروم شدت بیشتری دارند؛ بنابراین، یک پنجره طیفی از ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر انتخاب شده که در شکل ۲۰ مشخص شده و مشخصات آنها در جدول ۸ آورده شده است. با استفاده از طیفی با قله‌های مشخص و معادله‌های (۱۳-۱۵)، با رسم

دمایی به دست آمده از مشخصه‌یابی طیفی، می‌تواند برای کالیبراسیون و بهبود شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گیرند تا دقت مدل‌های پیش‌بینی افزایش یابد. در نتیجه، این روش به کاهش خطا، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و بهبود کیفیت لایه‌های روکش کمک می‌کند. روش نمودار بولتزمن، ابزاری برای تعیین دمای پلازما به وسیله تحلیل طیف‌های تابشی آن در شرایط تعادل گرمایی موضعی است. برای اینکه تحلیل عناصر به طور دقیق و صحیح انجام شود، انتخاب خطوط طیفی شدید و غیر تشدید از منشأ اتمی یا یونی که با یکدیگر تداخل نداشته باشند، بسیار اهمیت دارد. با توجه به کمتر بودن انرژی یونیزاسیون کروم نسبت به نیکل که در جدول ۷ آورده شده، و همچنین چگالی توان نسبتاً پایین لیزر، خطوط طیفی کروم شدت بیشتری دارند؛ بنابراین، یک پنجره طیفی از ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر انتخاب شده که در شکل ۲۰ مشخص شده و مشخصات آنها در جدول ۸ آورده شده است. با استفاده از طیفی با قله‌های مشخص و معادله‌های (۱۳-۱۵)، با رسم

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h \nu_{mn} \quad (13)$$

$$\frac{N_m}{N} = \frac{g_m}{Z(T)} \exp(-E_m/kT) \quad (14)$$

$$\ln\left(\frac{I_{mn} \lambda_{mn}^2}{g_m A_{mn}}\right) = \ln \frac{N h c}{Z(T)} - \frac{1}{kT} E_m \quad (15)$$

جدول ۷. انرژی یونش برای عناصر نیکل و کروم

Table 7. Ionization energy for the Nickel and Chromium elements

عنصر	اولین انرژی یونش (کیلوژول بر مول)	دومین انرژی یونش (کیلوژول بر مول)
نیکل	۷۳۷/۱	۱۷۵۳
کروم	۶۵۲/۹	۱۵۹۰/۶

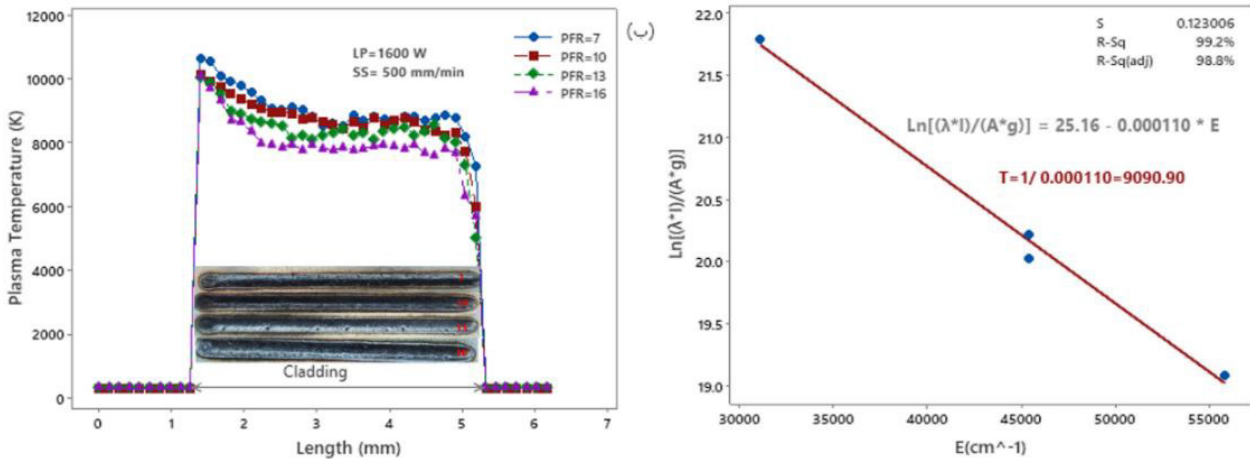
جدول ۸. مشخصات خطوط اتم کروم بر اساس پایگاه داده NIST [۳۶]

Table 8. Characteristics of Cr atomic lines based on NIST database [36]

اتم	طول موج (نانومتر)	احتمال گذار (یک بر ثانیه)	انرژی تراز بالایی	درجه تبهگنی
کروم	۴۰۳/۹۰	۱/۰ e۹	۵۵۷۹۹/۰۱	۱۵
کروم	۴۳۸/۴۹	۲/۴ e۷	۳۱۱۰۶/۳۱	۹
کروم	۴۸۸/۷۰	۳/۵ e۸	۴۵۳۵۴/۱۵	۱۱
کروم	۴۹۲/۲۲	۵/۲ e۸	۴۵۳۴۸/۶۷	۱۳

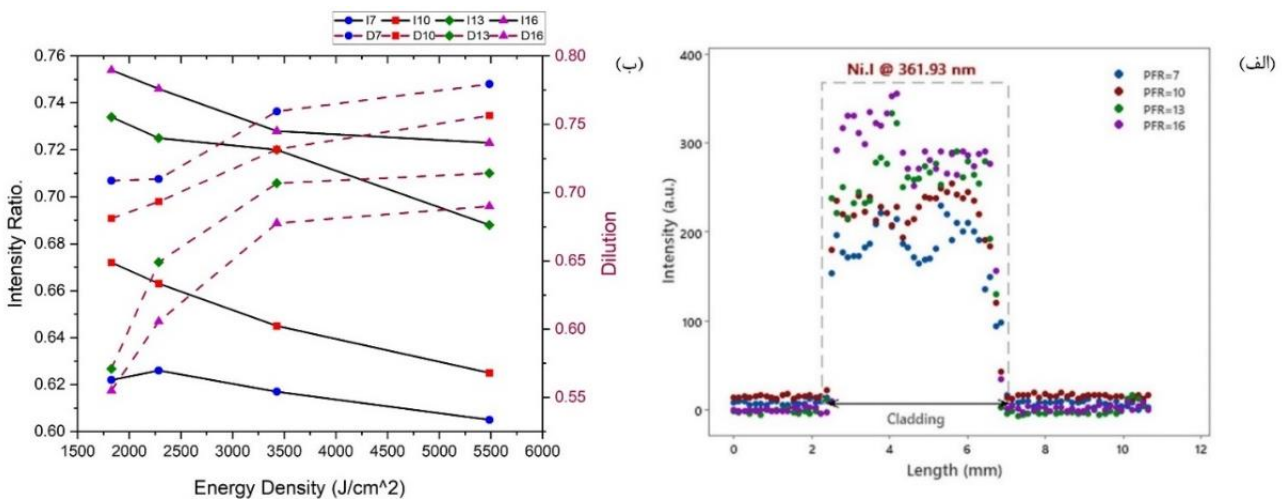
نشان‌دهنده پایداری پارامترهای روکش در این نواحی است. با استفاده از مشخصه‌یابی طیف به‌دست‌آمده، می‌توان شدت عناصر موجود در حوضچه مذاب را به‌صورت برخط تحلیل کرده و از نسبت شدت‌های آنها به‌طور غیرمستقیم اطلاعاتی درباره هندسه و درصد آمیختگی روکش به دست آورد. عنصر اصلی در زیرلایه آهن و در پودر نیکل است. نسبت شدت عنصر نیکل به آهن در طیف می‌تواند مستقیماً مقدار نسبی نیکل را به آهن را منعکس کند. این نسبت با پارامترهای ورودی فرایند شامل توان لیزر، سرعت رویش و نرخ تغذیه پودر که پارامترهای تعیین‌کننده دما و هندسه روکش هستند، تغییر می‌کند. در میان طول‌موج‌های متعدد نمایان شده در طیف، طول‌موج‌هایی را باید در نظر گرفت که اولاً از شدت نسبتاً کافی برخوردار بوده و ثانیاً تا حد امکان به هم نزدیک باشند که اثرات ماتریسی را کاهش داده و رزولوشن طیفی خوبی را حاصل کنند. بر اساس شکل طیف‌های به‌دست‌آمده، طول‌موج ۳۶۱/۹۳ نانومتر برای نیکل و طول‌موج ۳۸۲/۹۴ نانومتر را برای آهن انتخاب شده است. طبق نتایج صورت‌گرفته مشاهده

دمای پلاسما اندازه‌گیری شده برای نمونه با توان ۱۶۰۰ وات، سرعت رویش ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ تغذیه پودر ۷ گرم بر دقیقه در شکل ۲۱-الف، به‌نمایش درآمده است. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که دمای پلاسما ناشی از حوضچه مذاب در برابر تغییر توان لیزر و سرعت رویش مانند دمای حوضچه مذاب رفتاری یکسان داشته؛ ولی در برابر تغییر نرخ تغذیه پودر همان‌طور که در شکل ۲۱-ب، نیز مشخص است، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. صورتی که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت رویش دمای حوضچه مذاب و پلاسما افزایش یافته ولی با افزایش نرخ تغذیه پودر با وجود اینکه دمای حوضچه مذاب افزایش پیدا کرده، دمای پلاسما کاهش پیدا می‌کند. علت این امر این است که با افزایش مقدار تحویل پودر در واحد زمان، درحالی‌که انرژی ورودی ثابت مانده، انرژی بیشتری صرف یونیزاسیون مقدار بیشتری پودر شده این باعث کاهش دمای پلاسما می‌شود. در واقع یک رابطه خطی معکوس بین دمای پلاسما و نرخ تغذیه پودر در اینجا وجود دارد. تغییرات کم‌دمای پلاسما در قسمت‌های میانی خطوط روکش شکل مذکور



شکل ۲۱. (الف) - تابع برازش شده برای اندازه گیری دمای پلاسما (ب) - تغییر دمای پلاسما بر اساس نرخ تغذیه پودر

Fig. 21. (a) The fitted function used to measure plasma temperature, and (b) The relationship between plasma temperature and powder feed rate.



شکل ۲۲. (الف) - تغییر شدت عنصر نیکل در طول روکش (ب) - تغییر نسبت شدت خطوط و نرخ آمیختگی بر اساس چگالی انرژی

Fig. 22. (a) Variation in nickel intensity along the length of the clad, and (b) Line intensity ratio and dilution compared to energy density

۲۲-ب به تصویر کشیده شده است. لازم بذکر است، تغییر نسبت شدت خطوط طیفی بر حسب چگالی انرژی ورودی و نرخ تغذیه عکس تغییرات درصد آمیختگی است که قبلاً از شبیه سازی بدست آمده بود. از آنجاییکه درصد آمیختگی یکی از پارامترهای نشان دهنده کیفیت روکش است؛ نسبت شدت خطوط طیفی می تواند به عنوان یک نشانگر کیفیت روکش در حین فرایند عمل کند.

می شود که با افزایش چگالی انرژی ورودی (افزایش توان لیزر و یا کاهش سرعت روبش)، درصد ترکیب آهن ناشی از زیرلایه در روکش بیشتر شده و از این رو نسبت نیکل به آهن کاهش پیدا می کند و بالعکس. این در حالی است که با افزایش نرخ تغذیه پودر در یک چگالی انرژی ورودی ثابت، همان طور که در شکل ۲۲-الف مشخص است مقدار نیکل بیشتری در حوضچه مذاب وارد شده و این باعث تغییر نسبت شدت نیکل به آهن می شود که در شکل

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، فرایند روکش کاری لیزری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در ۶۴ حالت مختلف توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر انجام گرفته است. شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری بر اساس مدل گلداک و با استفاده از شبکه‌بندی متحرک در محیط نرم‌افزار کامسول انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد، ابعاد سطح مقطع روکش مدل‌سازی شده با اندازه‌گیری‌های واقعی تطابق نزدیکی داشته و تغییرهای مشابهی را بر اساس پارامترهای ورودی فرایند از خود به نمایش می‌گذارند. بنابراین، بدون انجام فرایند اندازه‌گیری برای هر لایه روکش که فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است، با شبیه‌سازی انجام شده می‌توان با دقت قابل‌قبولی هندسه روکش شامل عرض، ارتفاع و نفوذ روکش در زیرلایه و همچنین نرخ آمیختگی را پیش‌بینی کرد.

جهت اندازه‌گیری و پایش دقیق‌تر حوضچه مذاب، سیستم طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، به‌خوبی نحوه توزیع دما در ناحیه حوضچه مذاب را در زمان واقعی بدون تغییر در سطح روکش به نمایش گذاشته و استفاده از آن در نقاط مختلف درون حوضچه مذاب درک بهتری از توزیع دما را به‌صورت موضعی داده و پیش‌بینی دقیق‌تری از تغییرات دمای حوضچه مذاب را در زمان واقعی فرایند به نمایش می‌گذارد. با آنالیز طیفی، از شدت خط طیفی ۳۶۱/۹۳ نانومتر جهت پایش درصد عنصر نیکل درحین فرایند روکش کاری و نرخ وارد شدن آن به حوضچه مذاب و از نسبت شدت خط طیفی مذکور به خط طیفی آهن در طول موج ۳۸۲/۹۴ نانومتر جهت پایش تغییرات روکش از لحاظ درصد آمیختگی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات نسبت شدت خطوط انتخابی برعکس تغییرات نرخ آمیختگی است. این نظارت بر نسبت شدت می‌تواند جهت کنترل لحظه‌ای پارامترهای ورودی فرایند برای رسیدن به یک روکش باکیفیت با درصد آمیختگی مناسب استفاده شود.

ازاینرو، ترکیب داده‌های شبیه‌سازی دقیق فرایند روکش کاری لیزری و طیف‌سنجی در حین فرایند، درک بهتری از رفتار حرارتی فرایند و نحوه توزیع گرما در ناحیه حوضچه مذاب را ایجاد می‌کند. رویکرد حاضر می‌تواند جهت اندازه‌گیری و پایش سایر خواص کیفی و کمی لایه روکش همانند سختی، تنش پسماند و میکروساختار جهت رسیدن به یک روکش باکیفیت و یکنواخت استفاده شود.

۵- فهرست علائم

توان لیزر	LP
سرعت روبش	SS
نرخ تغذیه پودر	PFR
دما	T
انرژی داخلی	u
نسبت مایع	f
چگالی	ρ
هدایت گرمایی	$K(T)$
ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p(T)$
جذب لیزر	η
دمای محیط	T_0
شارش حرارتی	Q
شعاع باریکه لیزر	a
دمای جامد	T_s
دمای مایع	T_L
ضریب انبساط گرمایی	α
نفوذ باریکه لیزر	b
ارتفاع روکش	h_c
نفوذ روکش	h_m
عرض روکش	W_c
مساحت روکش	A_c
مساحت آمیختگی	A_m
آمیختگی	γ
چگالی انرژی	$E.D.$
انرژی تراز m	E_m
قطر باریکه لیزر	D
شدت گذاراز تراز m به n	I_{mn}
احتمال گذاراز تراز m به n	A_{mn}
ثابت پلانک	h
فرکانس گذاراز تراز m به n	ν_{mn}
طول موج گذاراز تراز m به n	λ_{mn}
جمعیت تراز m	N_m
تبهگنی تراز m	g_m

- [10] E. Mirkoohi, D.E. Seivers, H. Garmestani, S.Y. Liang, Heat source modeling in selective laser melting, *Materials*, 12(13) (2019) 2052.
- [11] A. Kiran, Y. Li, J. Hodek, M. Brázda, M. Urbánek, J. Džugan, Heat source modeling and residual stress analysis for metal directed energy deposition additive manufacturing, *Materials*, 15(7) (2022) 2545.
- [12] M.H. Farshidianfar, A. Khajepour, A. Gerlich, Real-time control of microstructure in laser additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (2016) 1173-1186.
- [13] W.-W. Liu, Z.-J. Tang, X.-Y. Liu, H.-J. Wang, H.-C. Zhang, A review on in-situ monitoring and adaptive control technology for laser cladding remanufacturing, *Procedia Cirp*, 61 (2017) 235-240.
- [14] U. Fantz, Basics of plasma spectroscopy, *Plasma sources science and technology*, 15(4) (2006) S137.
- [15] D.W. Hahn, N. Omenetto, Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields, *Applied spectroscopy*, 66(4) (2012) 347-419.
- [16] Y. Zhang, G.S. Hong, D. Ye, K. Zhu, J.Y. Fuh, Extraction and evaluation of melt pool, plume and spatter information for powder-bed fusion AM process monitoring, *Materials & Design*, 156 (2018) 458-469.
- [17] M. Schmidt, P. Huke, C. Gerhard, K. Partes, In-Line Observation of Laser Cladding Processes via Atomic Emission Spectroscopy, *Materials*, 14(16) (2021) 4401.
- [18] J.J. Valdiande, J. Mirapeix, J. Nin, E. Font, C. Seijas, J.M. Lopez-Higuera, Laser metal deposition on-line monitoring via plasma emission spectroscopy and spectral correlation techniques, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(6) (2021) 1-8.
- [19] V. Lednev, P. Sdvizhenskii, A.Y. Stavertiy, M.Y. Grishin, R. Tretyakov, R. Asyutin, S. Pershin, Online and in situ laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring, *Spectrochimica Acta Part B*: [1] C. Kusuma, The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting, (2016).
- [2] S. Liao, S. Webster, D. Huang, R. Council, K. Ehmann, J. Cao, Simulation-guided variable laser power design for melt pool depth control in directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 56 (2022) 102912.
- [3] J. Trejos-Taborda, L. Reyes-Osorio, C. Garza, P. del Carmen Zambrano-Robledo, O. Lopez-Botello, Finite element modeling of melt pool dynamics in laser powder bed fusion of 316L stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(5) (2022) 3947-3961.
- [4] Y. Xu, D. Zhang, J. Deng, X. Wu, L. Li, Y. Xie, R. Poprawe, J.H. Schleifenbaum, S. Ziegler, Numerical simulation in the melt pool evolution of laser powder bed fusion process for Ti6Al4V, *Materials*, 15(21) (2022) 7585.
- [5] X. Kaikai, G. Yadong, Z. Qiang, Numerical simulation of dynamic analysis of molten pool in the process of direct energy deposition, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7) (2023) 2451-2461.
- [6] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*, 15 (1984) 299-305.
- [7] T. Kik, Computational techniques in numerical simulations of arc and laser welding processes, *Materials*, 13(3) (2020) 608.
- [8] P. Li, Y. Fan, C. Zhang, Z. Zhu, W. Tian, A. Liu, Research on heat source model and weld profile for fiber laser welding of A304 stainless steel thin sheet, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1) (2018) 5895027.
- [9] Y. Zhang, S. Li, G. Chen, J. Mazumder, Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics & Laser Technology*, 48 (2013) 405-414.

- (2004) 82.
- [29] A. Lundbäck, H. Alberg, P. Henrikson, Simulation and validation of TIG-welding and post weld heat treatment of an Inconel 718 plate, in: International Seminar on Numerical Analysis of Weldability: 29/09/2003-01/10/2003, Techn. Univ. TYG, 2005, pp. 683-696.
- [30] J. James, J. Spittle, S. Brown, R. Evans, A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures, *Measurement science and technology*, 12(3) (2001) R1.
- [31] A.H. Committee, Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, in, ASM international, 1990.
- [32] D. Raj, S.R. Maity, B. Das, Optimization of process parameters of laser cladding on AISI 410 using MEREK integrated MABAC method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(8) (2024) 10725-10739.
- [33] V.N. Lednev, P.A. Sdvizhenskii, R.D. Asyutin, R.S. Tretyakov, M.Y. Grishin, A.Y. Stavertiy, A.N. Fedorov, S.M. Pershin, In situ elemental analysis and failures detection during additive manufacturing process utilizing laser induced breakdown spectroscopy, *Optics Express*, 27(4) (2019) 4612-4628.
- [34] G. Cristoforetti, A. De Giacomo, M. Dell'Aglio, S. Legnaioli, E. Tognoni, V. Palleschi, N. Omenetto, Local thermodynamic equilibrium in laser-induced breakdown spectroscopy: beyond the McWhirter criterion, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 65(1) (2010) 86-95.
- [35] F. Anabitarte, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera, Laser-induced breakdown spectroscopy: fundamentals, applications, and challenges, *International Scholarly Research Notices*, 2012(1) (2012) 285240.
- [36] G. Dalton, R.A. Dragoset, J.R. Fuhr, D.E. Kelleher, S.A. Kotochigova, W.C. Martin, P.J. Mohr, A. Musgrove, K. Olsen Podobedova, NIST atomic spectra database, NIST SPECIAL PUBLICATION SP, (1998) 12-15.
- Atomic Spectroscopy, 175 (2021) 106032.
- [20] V.N. Lednev, P.A. Sdvizhenskii, R.D. Asyutin, R.S. Tretyakov, M.Y. Grishin, A.Y. Stavertiy, S.M. Pershin, In situ multi-elemental analysis by laser induced breakdown spectroscopy in additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 25 (2019) 64-70.
- [21] R. Wang, D. Garcia, R.R. Kamath, C. Dou, X. Ma, B. Shen, H. Choo, K. Fezzaa, H.Z. Yu, Z. Kong, In situ melt pool measurements for laser powder bed fusion using multi sensing and correlation analysis, *Scientific reports*, 12(1) (2022) 13716.
- [22] T. Moges, Z. Yang, K. Jones, S. Feng, P. Witherell, Y. Lu, Hybrid modeling approach for melt-pool prediction in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(5) (2021) 050902.
- [23] S. Mondal, D. Gwynn, A. Ray, A. Basak, Investigation of melt pool geometry control in additive manufacturing using hybrid modeling, *Metals*, 10(5) (2020) 683.
- [24] P.K. Nalajam, R. Varadarajan, A hybrid deep learning model for layer-wise melt pool temperature forecasting in wire-arc additive manufacturing process, *IEEE Access*, 9 (2021) 100652-100664.
- [25] G. Fuchs, High temperature alloys, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (2000).
- [26] J. Rafiei, A.R. Ghasemi, Development of thermo-mechanical simulation of WC/Inconel 625 metal matrix composites laser cladding and optimization of process parameters, *International Journal of Thermal Sciences*, 198 (2024) 108883.
- [27] M.I. Al Hamahmy, I. Deiab, Review and analysis of heat source models for additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (2020) 1223-1238.
- [28] N. Nguyen, Y. Mai, S. Simpson, A. Ohta, Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate, *Welding journal*, 83(3)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Gholami, S. Batebi, M.J. Torkamany, *In-Situ Monitoring of Melt Pool Dynamics in Laser Cladding using Numerical Simulation and Spectral Diagnostics*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(9) (2024) 1275-1302.

DOI: [10.22060/mej.2025.23511.7774](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23511.7774)

