

Sensitivity Analysis of the Influential Parameters on the Geometric Properties of Laser Cladding on a Hastelloy X Superalloy Substrate Using NiCoCrAlY Powder

Amin Alimohammadi^{*}, Alireza Araee

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: March 20, 2026
Revised: May 29, 2026
Accepted: June 01, 2026
ePublished: July 26, 2026

ABSTRACT

NiCoCrAlY coatings are widely used in aerospace industries and gas turbines due to their exceptional resistance to high-temperature oxidation and corrosion. Despite this significance, the quantitative analysis of the influence of laser cladding process parameters on the geometrical characteristics of these coatings, particularly using sensitivity analysis methods, remains a research gap. In this study, the effects of laser power, duty cycle, and scanning speed on the coating height, width, angle, and dilution produced by laser cladding were investigated. For this purpose, a fiber laser with a maximum power of 1 kW was utilized. RSM developed regression models, and ANOVA confirmed that the models were significant, with a high R^2 and a non-significant lack of fit. The results of Sobel sensitivity analysis revealed that scanning speed has a dominant effect on height, angle, and dilution, contributing more than 80% (88.8%, 80.7%, and 81.8%, respectively). In contrast, laser power exhibited a minor to moderate influence (3.9%, 16.3%, and 13.3%, respectively), while the duty cycle, with contributions of 7.3%, 3%, and 4.9%, was the least significant control parameter for these three output responses. For coating width, laser power (51.3%) was more than twice as influential as duty cycle (25.8%) or scanning speed (22.9%). The complete consistency in the ranking of effective factors between the Sobel method and RSM confirms the validity of the results. This study demonstrates that Sobel sensitivity analysis, by quantitatively decomposing the contribution of each parameter, serves as a powerful tool for the optimal design of the laser cladding process.

Keywords: Laser cladding, Superalloy, Response Surface Methodology, Sobel sensitivity analysis, Central Composite Design

How to cite this article

Alimohammadi A, Araee A.R, Sensitivity Analysis of the Influential Parameters on the Geometric Properties of Laser Cladding on a Hastelloy X Superalloy Substrate Using NiCoCrAlY Powder. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(10):781-794

*Corresponding author's email: amin.alimohamadi@ut.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0009-0003-4861-1652



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



تحلیل حساسیت عامل‌های مؤثر بر خواص هندسی روکش‌کاری لیزری بر بستر سوپرآلیاژ Hastelloy X با پودر NiCoCrAlY

امین علی‌محمدی* ^{ID}، علیرضا آرای

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پوشش‌های NiCoCrAlY به دلیل مقاومت استثنایی در برابر اکسیداسیون دما بالا و خوردگی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا و توربین‌های گازی دارند. باوجود این اهمیت، تحلیل کمی تأثیر پارامترهای فرآیند روکش‌کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی این پوشش‌ها به‌ویژه با استفاده از روش‌های حساسیت‌سنجی همچنان به‌عنوان یک شکاف تحقیقاتی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر توان لیزر، ضریب کار و سرعت روبش بر ارتفاع، عرض، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی پوشش ایجادشده به روش روکش‌کاری لیزری بررسی شد. برای این منظور، از یک دستگاه لیزر فیبری با حداکثر توان ۱ کیلووات استفاده گردید. مدل‌های رگرسیونی به روش سطح پاسخ توسعه یافتند و تحلیل واریانس نشان داد که این مدل‌ها معنادار، با ضریب تعیین بالا و عدم برازش غیرمعنادار هستند. نتایج تحلیل حساسیت سوبل نشان داد که سرعت روبش با سهم بیش از ۸۰ درصد (به ترتیب ۸۸/۸، ۸۰/۷ و ۸۱/۸ درصد) تأثیر غالب بر ارتفاع، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی پوشش دارد. در مقابل، توان لیزر تأثیر کمی تا متوسط (به ترتیب ۳/۹، ۱۶/۳ و ۱۳/۳ درصد) و ضریب کار با سهم ۷/۳، ۳ و ۴/۹ درصد کم‌اهمیت‌ترین عامل کنترلی بر این سه خروجی محسوب می‌شود. اما در مورد عرض پوشش، توان لیزر با ۵۱/۳ درصد بیش از دو برابر ضریب کار (۲۵/۸ درصد) و سرعت روبش (۲۲/۹ درصد) تأثیرگذار است. همسانی کامل رتبه‌بندی عوامل مؤثر بین روش سوبل و سطح پاسخ، اعتبار نتایج را تأیید کرد. این تحقیق نشان داد که تحلیل حساسیت سوبل با تفکیک کمی سهم هر یک از عامل‌ها، ابزاری قدرتمند برای طراحی بهینه فرآیند روکش‌کاری لیزری محسوب می‌شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴

کلیدواژه‌ها: روکش‌کاری لیزری، سوپرآلیاژ، روش سطح پاسخ، تحلیل حساسیت سوبل، طراحی مرکب مرکزی

نحوه ارجاع به این مقاله

علی‌محمدی امین، آرای علیرضا، تحلیل حساسیت عامل‌های مؤثر بر خواص هندسی روکش‌کاری لیزری بر بستر سوپرآلیاژ Hastelloy X با پودر NiCoCrAlY، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۹۴-۷۸۱-۱۰(۲۶):۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.alimohamadi@ut.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۱۶۵۲-۴۸۶۱-۳-۰۰۰۹-۰۰۰۹



۱- مقدمه

افزایش عمر مفید قطعات مهندسی و بازیابی قطعات مستعمل، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان بوده است. فرآیندهای بهبود سطح باید بتوانند لایه‌ای با چسبندگی بالا، تخلخل کم و حداقل تغییرات در زیرلایه ایجاد کنند. روش روکش‌کاری لیزری شامل رسوب مواد بر روی یک زیرلایه با استفاده از پرتو لیزر متمرکز است که به دلیل نرخ سرمایش سریع و کنترل‌پذیری بالا، یکی از مؤثرترین فرآیندهای ساخت افزایشی و ترمیم محسوب می‌شود. برتری این روش در مقایسه با سایر روش‌ها را می‌توان به ناحیه متأثر از حرارت (Heat Affected Zone-HAZ) کم، ایجاد پوشش متراکم و بدون ترک، و حداقل اعوجاج نسبت داد [۱-۴]. لیزرها دو حالت عملیاتی دارند: حالت موج پالسی (Pulsed Wave) و حالت موج پیوسته (Continuous Wave). اغلب بررسی‌ها روکش‌کاری لیزری بر روی لیزرهای موج پیوسته متمرکز شده‌اند، اما لیزرهای موج پالسی در حال حاضر به دلیل خواص مفیدشان در روکش‌کاری لیزری، توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. روکش‌کاری لیزری پالسی به دلیل ویژگی کنترل دقیق توان لیزر آن، نسبت به روکش‌کاری لیزری پیوسته ترجیح داده می‌شود. این ویژگی، ورودی گرما را کاهش می‌دهد که به‌ویژه برای زیرلایه‌های نازک‌تر مفید است. علاوه بر این، روکش‌کاری لیزری پالسی سرعت خنک‌سازی سریعی را فراهم می‌کند که منجر به ریزساختاری ظریف می‌شود که مقاومت در برابر سایش و فرسایش را بهبود می‌بخشد. به‌طورکلی، لیزرهای موج پالسی در مقایسه با لیزرهای موج پیوسته، تجمع گرمای کمتر، ناحیه متأثر از حرارت کوچک‌تر، نرخ رقیق‌سازی کمتر، تشکیل تخلخل و ترک کمتر، سرعت خنک‌سازی بالاتر، ریزساختارهای ظریف‌تر و خواص مکانیکی بهتری ارائه می‌دهند [۵-۷].

آلیاژ هستلوی ایکس (Hastelloy X) به طور گسترده‌ای به‌عنوان ماده‌ای برای اجزای مختلف هواپیما، از جمله پره‌های توربین، لوله‌های خروجی موتور جت، پره‌ها و پس‌سوزها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هستلوی ایکس یک آلیاژ پایه آهن - نیکل است که از طریق محلول جامد تقویت شده است. از ویژگی‌های این آلیاژ می‌توان به استحکام استثنایی، مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اشاره کرد [۸]. صنعت هوافضا به طور مداوم در حال توسعه روش‌هایی برای افزایش عمر مفید قطعات توربین‌های گازی است. در این میان، دمای احتراق یا ورودی توربین، نقش مهمی در تعیین راندمان آن ایفا می‌کند. تأثیر افزایش دما در توربین گازی را می‌توان با بهبود سامانه‌های حفاظتی اجزا تسهیل نمود. از جمله رویکرد برای افزایش طول عمر و کارایی اجزای توربین گازی، اعمال پوشش‌ها، به‌ویژه پوشش‌های NiCoCrAlY است. پوشش‌های NiCoCrAlY به طور گسترده در حفاظت از اجزای توربین گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پوشش‌ها مقاومت استثنایی در برابر اکسیداسیون

و خوردگی داغ در دماهای بالا از خود نشان می‌دهند [۹]. مزایای روش روکش‌کاری لیزری و همچنین ویژگی‌های پوشش‌های NiCoCrAlY، آن‌ها را به گزینه‌های مناسبی جهت بهبود عملکرد اجزای توربین تبدیل کرده است. متغیرهای فرآیند روکش‌کاری لیزری تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های هندسی پوشش تک‌لایه در بازسازی قطعات دارند. روکش‌کاری لیزری یک فرآیند پیچیده است و کنترل عوامل مؤثر بر این روش برای دستیابی به یک لایه روکش‌کاری بهینه بسیار مهم است [۱۰]. ایجاد یک توصیف جامع از این روش به دلیل تعاملات بین لیزر، پودر و زیرلایه و پدیده‌های فیزیکی در طول فرآیند، پیچیده بوده است؛ بنابراین، ایجاد یک مدل فیزیکی به طور خاص دشوار است. در نتیجه، مدل‌سازی تجربی - آماری برای توصیف تجربی روش روکش‌کاری لیزری توسعه‌یافته است [۱۱، ۱۲]. روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology-RSM) مبتنی بر رگرسیون مرتبه دوم، یک رویکرد برجسته برای مدل‌سازی تأثیر عامل‌های فرآیند روکش‌کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی به شمار می‌آید. در پژوهش‌های مختلف، مدل‌سازی تجربی - آماری برای پیش‌بینی خواص هندسی از طریق RSM به کار گرفته شده است که متعاقباً با استفاده از روش تحلیل واریانس (ANOVA) تجزیه و تحلیل شده‌اند. پژوهش‌ها پیشین نشان داده‌اند که مدل ریاضی تولید شده با استفاده از RSM جهت توصیف ویژگی‌های هندسی پوشش مناسب است [۱۲، ۱۳]. در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی آماری، RSM می‌تواند همبستگی دقیق‌تری بین عوامل مؤثر و اهداف موردنظر ارائه دهد و به آزمایش‌های کمتری نیاز دارد [۱۴]. ونوبولو و همکاران [۱۵] تأثیر عوامل فرآیند بر زاویه پوشش در روکش‌کاری لیزری را بررسی کردند. مدل زاویه پوشش از طریق RSM و با در نظر گرفتن عواملی مانند نرخ جریان جرمی پودر، سرعت روبش و توان لیزر توسعه داده شد. کفایت مدل پیش‌بینی با استفاده از تحلیل واریانس آزمایش و کافی تشخیص داده شد. سان و هائو [۱۰] تأثیر نرخ جریان جرمی پودر، سرعت روبش و توان لیزر را بر ضریب شکل و هندسه پوشش در مورد تزریق پودر Ti6Al4V بر روی زیرلایه Ti6Al4V بررسی کردند. آنها از روش روبه پاسخ با رویکرد طراحی مکعب مرکزی (Central Composite Design-CCD) برای تولید مدل ریاضی استفاده کردند. نتایج فرآیند اعتبارسنجی، سطح بالایی از همبستگی را بین نتایج پیش‌بینی‌شده و پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهد. لیو و کووچویچ [۱۶] تأثیر عوامل ورودی فرآیند (نرخ جریان جرمی پودر، نرخ جریان گاز حامل، توان لیزر و فاصله ایستادن نازل) را بر پاسخ خروجی (عرض، ارتفاع و بازده پوشش پودر) بررسی کردند. آنها یک ماتریس تجربی طراحی کردند، یک مدل رگرسیون درجه دوم با استفاده از RSM توسعه دادند و آن را با روش ANOVA تجزیه و تحلیل و مورد بحث قرار دادند. این مطالعه تطابق قوی بین نتایج تجربی و مدل

روکش کاری لیزری از طریق سیم داغ نشان می‌دهد و می‌تواند به طور بالقوه به روکش‌های چند مسیری گسترش یابد. لانگ و همکاران [۲۳] مطالعه‌ای را بر روی روکش لیزری فولاد #۴۵ با استفاده از پودر آلایژ NiCrBSi از طریق RSM انجام دادند. در این تحقیق، نرخ رقیق‌شدگی، نسبت ابعاد و زاویه تماس به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی تعیین شدند. مدل توسعه‌یافته، همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشت و نشان داد افزایش سرعت روبش و کاهش توان لیزر، نرخ رقیق‌شدگی را کم و افزایش توان لیزر و سرعت روبش، نسبت ابعاد و زاویه تماس را افزایش می‌دهد.

همان‌طور که پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند، در روکش کاری لیزری، درک دقیق میزان تأثیر عوامل ورودی بر خواص هندسی پوشش برای دستیابی به پوشش‌هایی با کیفیت و بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است. با وجود تلاش‌های انجام‌شده، هنوز درک جامعی از این مسئله وجود ندارد و رفع این کاستی ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف بررسی کمی و کیفی تأثیر عوامل ورودی شامل ضریب‌کار، توان لیزر و سرعت روبش بر ویژگی‌های هندسی و نرخ رقیق‌شدگی پوشش‌های ایجادشده به‌وسیله روکش کاری لیزری با پودر NiCoCrAlY روی زیرلایه Hastelloy X انجام شده است. هدف اصلی، تحلیل حساسیت این عوامل ورودی نسبت به خواص هندسی و نرخ رقیق‌شدگی و نیز مقایسه نتایج با نتایج حاصل از روش سطح پاسخ است. برای نیل به این هدف، از روش تحلیل حساسیت سوپل استفاده گردید تا سهم هر یک از عوامل ورودی به‌صورت کمی و کیفی بر ویژگی‌های خروجی تعیین شود. در پایان، سهم هر عامل ورودی در شکل‌گیری پاسخ‌های خروجی مشخص و با نتایج روش سطح پاسخ مقایسه شد.

۲- مواد و روش

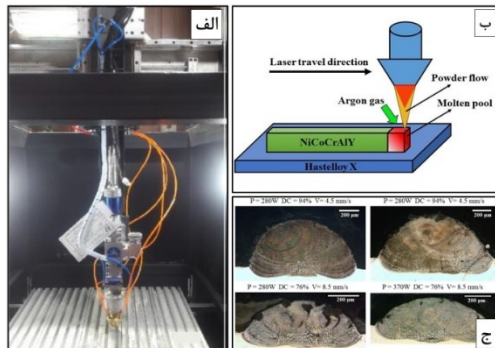
در مطالعه حاضر، از سوپرآلیاژ Hastelloy X به‌صورت ورق‌هایی با ضخامت ۱ میلی‌متر به‌عنوان بستر استفاده گردید. پیش از انجام فرآیند، سطح بستر با استون، به‌منظور حذف چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی، تمیزسازی شد. همچنین، پودر Amdry 365 با توزیع اندازه ذرات در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ میکرومتر به‌عنوان ماده پوشش انتخاب گردید. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی پودر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان‌داده شده است، برای انجام پوشش‌دهی از یک دستگاه لیزر فیبری (مدل FLC-1000، ساخت شرکت Demark Technology Co) با حداکثر توان ۱ کیلووات و طول موج ۱۰۶۰ نانومتر استفاده شد. یک سامانه تغذیه، پودر را به طور پیوسته با نرخ جریان ۸/۳ گرم بر دقیقه به درون حوضچه مذاب تزریق کرد. گاز آرگون به‌عنوان گاز حامل و محافظ به کار رفت؛ نرخ جریان گاز حامل ۱۰ لیتر بر دقیقه و گاز محافظ ۱۵ لیتر بر دقیقه بود. همچنین، اندازه لکه لیزر و بسامد (فرکانس) به ترتیب بر روی ۱ میلی‌متر و ۵۰۰۰ هرتز تنظیم شدند. همچنین

پیش‌بینی‌شده را نشان داد. عالم و همکارانش [۱۷] سختی و هندسه پوشش روکش لیزری تک مسیر AISI 1018 را با استفاده از پودر فولاد ضدزنگ AISI 420 بررسی کردند. آنها از تجزیه و تحلیل RSM با رویکرد CCD استفاده کردند و دریافته‌اند که این روش به طور مؤثر یک مدل پیش‌بینی قابل‌اعتماد با عوامل ورودی چندگانه برای پاسخ‌ها ایجاد می‌کند. لیان و همکارانش [۱۸] از RSM برای بررسی تأثیر عوامل مختلف فرآیند، از جمله توان لیزر، سرعت روبش، جریان گاز و نرخ همپوشانی بر عرض روکش چندمسیره، صافی و رقیق‌شدگی پوشش استفاده کردند. در مطالعه آنها، اعتبارسنجی مدل با استفاده از تحلیل واریانس و آزمون‌های معنی‌داری انجام شد. آنها گزارش دادند که مدل ریاضی مشتق شده از RSM می‌تواند به طور مؤثر برای کنترل خواص هندسی روکش چندمسیره، پیش‌بینی عملکرد آن و بهینه‌سازی عوامل فرآیند مورداستفاده قرار گیرد. ژانگ و همکارانش [۱۹] تأثیر نرخ تغذیه پودر، سرعت روبش، و توان لیزر را بر ویژگی‌های رسوب یافته از پودر اینکونل ۷۱۸ بر بستر آلایژ اینکونل ۷۱۸ بررسی کردند. در این پژوهش، مدل‌های ریاضی به کمک روش RSM برای ارزیابی ویژگی‌های هندسی ساخته شد و تحلیل واریانس ANOVA برای تحلیل آنها به کار رفت. آنها دریافته‌اند که عرض روکش با سرعت روبش سریع‌تر کاهش می‌یابد و با توان لیزر بالاتر افزایش می‌یابد. خرم و همکاران [۱۱] از RSM برای بررسی روکش لیزری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با پودر 75Cr3C2 (80Ni20Cr) +25 استفاده کردند. یافته‌های این مطالعه همبستگی مثبتی را بین سرعت روبش لیزری و ارتفاع و ریز سختی روکش نشان داد. پانت و همکاران [۲۰] از روش RSM برای بهبود یک مدل رگرسیون استفاده کردند. این مدل شامل نرخ تغذیه پودر، سرعت روبش و توان لیزر به‌عنوان عوامل فرآیند بود. نتایج این بررسی نشان داد که این مدل توسعه‌یافته، اطلاعات مفیدی را برای کنترل فرآیند و حصول اطمینان از ایجاد ارتفاع لایه پوششی مطلوب، مطابق با نیازهای نمونه‌سازی، فراهم می‌کند. خرم و همکاران [۲۱] روکش لیزری آلایژ اینکونل ۷۱۳ را با استفاده از پودر استلایت (Stellite) بررسی کردند. این مطالعه از RSM برای بررسی تأثیر عوامل ورودی مانند سرعت روبش، عرض پالس و بسامد لیزر بر پاسخ خروجی، از جمله هندسه پوشش، سختی، و نرخ رقیق‌شدگی استفاده کرد. این مطالعه نشان داد که افزایش سرعت لیزر، رقیق‌شدگی و پهنای روکش را افزایش می‌دهد. یائو و همکارانش [۲۲] از RSM برای تجزیه و تحلیل همبستگی آماری بین عوامل فرایندی (توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه سیم داغ) و پاسخ‌ها (ارتفاع، عرض روکش و نرخ رقیق‌شدگی) با استفاده از لیزر دیود مستقیم با توان بالا استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که تفاوت بین نتایج پیش‌بینی‌شده و تجربی نمونه بهینه زیر ۱۰ درصد است. در نتیجه، آنها گزارش دادند که این مدل دقت پیش‌بینی قابل‌توجهی را برای عوامل فرآیند

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی سوپرآلیاژ Hastelloy X و پودر Amdry 365.

Table 1 Chemical compositions of Hastelloy X superalloy and Amdry 365 powder.

Element (W%)	Ni	Co	Al	Cr	Y	MO	Fe	C
Amdry 365	Balance	28-18	15-10	21-18	1-0.1	-	-	-
Hastelloy X	Balance	-	8-4	25-20	3-1	12-8	15-12	12-10

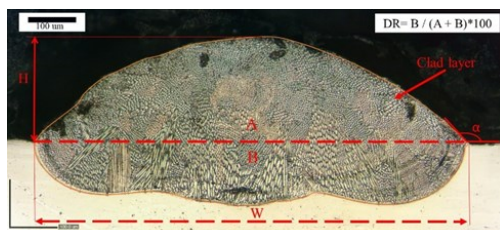


شکل ۱ (الف) تصویر لیزر مورد استفاده در پژوهش، (ب) شماتیک فرآیند روکش‌کاری لیزری، (ج) تصویر میکروسکوپ نوری برخی از پوشش‌های ایجاد شده به روش روکش‌کاری لیزری.

Fig. 1 (a) Image of the laser used in the study, (b) Schematic of the laser cladding process, (c) Optical microscopy image of some of coatings produced by the laser cladding.

فاکتوریل واقع در رئوس یک مکعب و شش نقطه مرکزی بود [۱۴، ۲۴]. جزئیات طراحی آزمایش، نتایج آزمون‌ها و متغیرهای ورودی بررسی شده در این تحقیق در

جدول ۳ به تفصیل آمده است. دلیل انتخاب این عوامل به عنوان عوامل ورودی، تأثیر قابل توجه آنها بر نتیجه فرآیند روکش‌کاری لیزری است. علاوه بر این، در ارزیابی‌های پیشین تنها بررسی‌های محدودی درباره تأثیر این عوامل بر پاسخ روکش‌کاری لیزری انجام شده است. دلیل انتخاب توان لیزر، ضریب کار و سرعت روبش به عنوان متغیرهای ورودی، نقش تعیین‌کننده‌ی آنها در نتایج فرایند روکش‌کاری لیزری است. از طرف دیگر، متغیرهای خروجی (هندسه روکش و نرخ رقیق‌شدگی) از آن‌رو برگزیده شدند که به طور مستقیم بر استحکام پوشش، دقت ابعادی، عیوب بالقوه و راندمان پوشش‌دهی مؤثرند. لازم به ذکر است که در ارزیابی‌های گذشته، تأثیر متغیرهای ورودی یادشده بر پاسخ‌های موردنظر تنها به صورت محدود بررسی گردیده است.



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع و ویژگی‌های هندسی پوشش.

Fig. 2 Optical microscopy image of the cross-section and geometrical features of the cladding.

فاصله کانونی بر روی سطح بستر در نظر گرفته شد. قابل ذکر است محدوده هر یک از عوامل فرآیند بر اساس آزمون‌های مقدماتی (روش آزمون و خطا) تعیین گردید. هدف از این آزمون‌ها، دستیابی به پوششی با چسبندگی مطلوب به بستر و جلوگیری از عیوب احتمالی نظیر تخلخل بالا، اکسیدشدگی و عدم ذوب کامل پودر بود. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که محدوده انتخابی، پایدارترین فرآیند و بهترین کیفیت پوشش را به همراه دارند. شکل ۱- ب شماتیک فرآیند روکش‌کاری لیزری صورت گرفته را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱- ج نشان داده شده است، پس از انجام فرآیند پوشش‌دهی لیزری، نمونه‌ها در جهت مقطع عرضی با استفاده از دستگاه وایرکات برش داده شدند تا سطح مقطع مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی سطح مقطع عرضی، نمونه‌ها با کاغذ سنباده SiC با دانه‌بندی ۱۸۰ تا ۳۰۰۰ مش سنباده‌کاری و سپس به صورت مکانیکی صیقل داده شدند. همچنین، جهت اچینگ (Etching) شیمیایی سطح مقطع پوشش از محلول کالینگ (Kalling's solution) استفاده گردید. جهت بررسی دقیق ویژگی‌های هندسی پوشش از میکروسکوپ نوری مدل BH2-UMA ساخت شرکت Olympus استفاده شد. مطابق با شکل ۲، اندازه‌گیری‌های عرض (W)، ارتفاع (H)، زاویه پوشش (α) و نرخ رقیق‌شدگی (DR) از طریق تصاویر میکروسکوپ نوری با استفاده از نرم افزار Image J به دست آمد.

۳- طراحی آزمایش و مدل سازی

جهت طراحی آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ با رویکرد مکعب مرکزی استفاده شد. روش سطح پاسخ، یک رویکرد ریاضی-آماري است که به منظور بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها، به ویژه در صنایعی که چندین متغیر ورودی بر عملکرد محصول یا فرآیند تأثیر می‌گذارند، کاربرد دارد. طراحی مرکب مرکزی نیز یکی از رایج‌ترین رویکردها برای تعیین تعداد آزمایش‌های لازم جهت برآزش یک مدل درجه دوم است و به طور گسترده به عنوان روشی مؤثر در این زمینه شناخته می‌شود [۱۴، ۲۴]. معادله نشان داده شده در رابطه (۱) از مرتبه دوم است:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

متغیرهای این معادله شامل y هستند که نشان‌دهنده پاسخ پیش‌بینی شده است؛ x ، متغیر ورودی مستقل؛ و β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} و ε که به ترتیب نشان‌دهنده ضریب ثابت، ضریب خطی، ضریب درجه دوم، ضریب تعامل و خطای باقیمانده هستند. این مدل انعطاف‌پذیری قابل توجهی را ارائه می‌دهد، زیرا یک مدل مرتبه دوم قادر به تولید سطوح پاسخ متمایز و نمودارهای کانتور مختلف است. در این مطالعه، آزمایش‌ها با استفاده از طرح مرکب مرکزی با پنج سطح، همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، طراحی شدند. با پیروی از روش CCD، تنظیمات آزمایش شامل ۲۰ آزمایش بود که شامل شش نقطه محوری، هشت نقطه

جدول ۲ متغیر ورودی برای فرآیند روکش کاری لیزری با سطوح طراحی.

Table 2 Input variables for the laser cladding process with design levels.

Input parameter	Symbol	Unit	-1.68	-1	0	1	1.68
Laser power	P	W	250	280	325	370	400
Duty cycle	DC	%	70	76	85	94	100
Scanning speed	V	mm/s	3	4.5	6.5	8.5	10

جدول ۳ طراحی آزمایش و پاسخ آزمایش‌ها.

Table 3 Experimental design and experimental responses.

Number	Input parameter			Output response			
	Scanning speed (mm/s)	Duty cycle (%)	Laser power (W)	Height (μm)	Width (μm)	Angle (deg)	Dilution (%)
1	4.5	76	280	340.3	814.7	110	26.7
2	4.5	76	370	452.6	1054.9	115	25.3
3	4.5	94	280	489.5	1047	114	21.07
4	4.5	94	370	510.7	1203.1	125	33.09
5	8.5	76	280	217.4	765.3	133	34.1
6	8.5	76	370	217.5	888.4	139	42.2
7	8.5	94	280	212.4	874	129	41.6
8	8.5	94	370	210.3	1035	148	53.1
9	6.5	85	250	267.7	767.4	118	31.7
10	6.5	85	400	297.7	1049	128	42.9
11	6.5	70	325	261.4	827.3	126	34.3
12	6.5	100	325	312.1	1072.9	133	39.9
13	3	85	325	625.1	1122.7	109	20.5
14	10	85	325	180.3	893.4	148	47.5
15	6.5	85	325	283	962.1	131	36.6
16	6.5	85	325	274.8	989.8	137	41.5
17	6.5	85	325	288.5	998.2	130	37.3
18	6.5	85	325	265.9	956.8	135	40.3
19	6.5	85	325	282.9	961	133	37.1
20	6.5	85	325	280.2	1003.3	136	42.6

۴- بررسی روش‌های تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی مدل‌های ریاضی، شبیه‌سازی و آماری به شمار می‌آید که به بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی‌های مدل می‌پردازد. این فرآیند به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود: (۱) روش‌های غربالگری، (۲) روش‌های تحلیل حساسیت محلی، و (۳) روش‌های تحلیل حساسیت کلی. در میان این رویکردها، تحلیل حساسیت کلی یا جامع به دلیل توانایی خود در ارزیابی تأثیر متغیرها در سراسر دامنه تغییرات آن‌ها و شناسایی تعاملات غیرخطی و پیچیده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل حساسیت جامع به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها در این حوزه شناخته می‌شود، زیرا قادر است علاوه بر سنجش تأثیر منفرد هر عامل، تعاملات میان عوامل را نیز به طور کامل بررسی کند. اگرچه این روش‌ها معمولاً با هزینه محاسباتی بالا و پیچیدگی پیاده‌سازی همراه هستند، اما در مدل‌های غیرخطی و پیچیده، نتایج حاصل از آن‌ها به‌مراتب قابل اطمینان‌تر از نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های محلی و غربالگری است. در این میان، روش‌های واریانس محور به‌عنوان دقیق‌ترین و جامع‌ترین رویکردهای تحلیل حساسیت شناخته می‌شوند. هدف اصلی این روش‌ها کمی‌سازی سهم هر عامل ورودی در واریانس خروجی مدل است. این دسته از روش‌ها، با قابلیت بررسی تأثیر منفرد و تعاملات میان عوامل ورودی،

به‌ویژه در مدل‌های پیچیده و غیرخطی، کاربرد گسترده‌ای دارند. از میان روش‌های واریانس محور، دو روش تحلیل حساسیت سوبل (Sobel Sensitivity Analysis) و آزمون حساسیت دامنه فوریه (Fourier Amplitude Sensitivity Test-FAST) به‌عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها مطرح هستند [۲۵].

۴-۱- تحلیل حساسیت سوبل

تحلیل حساسیت سوبل، روشی آماری و مستقل از مدل است که بر اساس تجزیه واریانس به ارزیابی اهمیت متغیرهای ورودی و تأثیر آن‌ها بر پاسخ خروجی می‌پردازد. این روش در تعیین معادلات حاکم بر سیستم، بهینه‌سازی و بررسی بر همکنش متغیرهای ورودی با دقت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش برای مدل تعریف شده با تابع $Y = F(X)$ که Y خروجی مدل و $X(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ بردار عوامل ورودی است، واریانس خروجی مدل (V) به‌صورت مجموع واریانس‌های هر عبارت تجزیه شده به‌صورت رابطه (۲) است:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1, \dots, n} \quad (2)$$

که در آن V_i تأثیر مرتبه اول برای هر فاکتور ورودی x_i ($V_i = V[E(Y | x_i)]$) و V_{ij} تا $V_{1, \dots, n}$ برهم‌کنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند ($V_{ij} = V[E(Y | x_i, x_j)] - V_i - V_j$).

شاخص‌های حساسیت به‌صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند. $S_i = V_i/V$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول، $S_{ij} = V_{ij}/V$ شاخص حساسیت مرتبه دوم و ... [۲۶]. شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر عامل به‌صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن عامل به‌صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$ST_i = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \dots \quad (3)$$

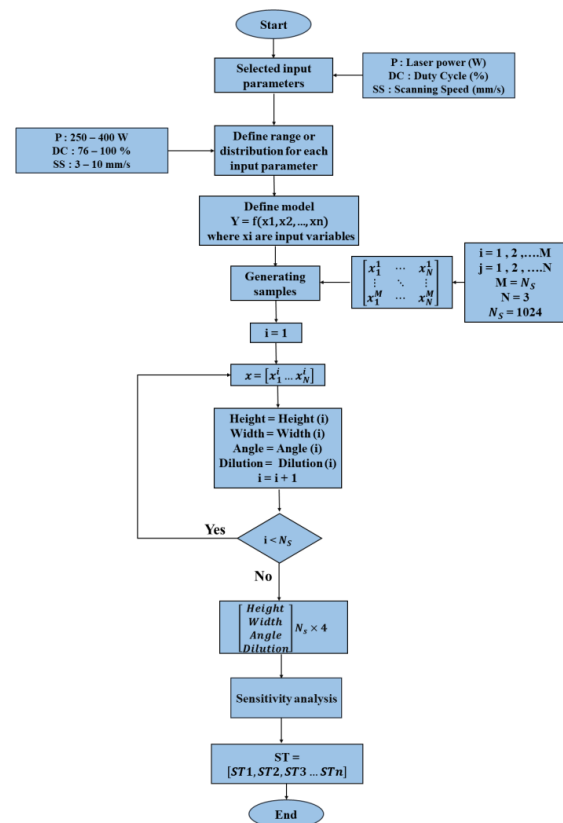
شکل ۳ الگوریتم کلی تحلیل حساسیت انجام‌شده در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار پایتون را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ابتدا لازم است عوامل ورودی تعریف گردند سپس دامنه تغییرات عوامل ورودی انتخاب می‌شود که این دامنه در شکل ۳ مشخص شده است. پس از انتخاب دامنه عوامل ورودی، فرآیند تولید نمونه‌ها آغاز می‌گردد و پس از تولید نمونه‌ها، عوامل خروجی بر اساس معادله رگرسیون محاسبه خواهند شد. معادله رگرسیون موجود از طریق مدل‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ به‌دست‌آمده است که در بخش‌های قبلی به آن پرداخته شده است. در نهایت، با بهره‌گیری از روش سوبل، به تولید اندیس‌های حساسیت پرداخته می‌شود و تحلیل حساسیت به پایان می‌رسد.

از ۲۰ درصد بوده و نسبت سیگنال به نویز (S/N) برابر ۷۴/۳ (به‌مراتب بیشتر از ۴) نشان‌دهنده دقت کافی و قدرت پیش‌بینی بالای مدل است. در تحلیل واریانس عرض روکش بر اساس جدول ۵، عامل‌های معنادار شامل P، DC، V و جمله درجه دوم P^2 بودند. مدل با F-value برابر ۸۱/۷۷ و p-value کمتر از ۰/۰۵ از نظر آماری معنادار بود. بر اساس مقادیر F-value، توان لیزر مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده عرض روکش شناخته شد. عدم انطباق مدل معنی‌دار نبود ($p\text{-value} > 0.05$) و ضریب تعیین $R^2 = 0.95$ بیانگر دقت بسیار بالای مدل است. مقدار دقت کفایت (S/N) برابر ۳۳/۲۲ بوده که بیانگر سیگنال کافی و کارایی مناسب مدل است. نتایج جدول ۶ تحلیل واریانس زاویه روکش را نشان می‌دهد که مدل و عبارت‌های P، DC، V و P^2 معنادار هستند. مقدار p-value عدم انطباق برابر ۰/۲۱ (غیرمعنادار) حاکی از برازش خوب است. بالاترین مقادیر F-value به ترتیب به سرعت روبش، توان لیزر و ضریب‌کار تعلق داشت که سرعت روبش را به‌عنوان مؤثرترین عامل در کنترل زاویه روکش معرفی می‌کند. ضریب تعیین $R^2 = 0.91$ همبستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و تجربی را نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز برابر ۲۱/۵۷ ($F < 4$) حاکی از دقت کافی مدل است. نهایتاً، جدول ۷ تحلیل واریانس نرخ رقیق‌شدگی را نشان می‌دهد که مدل و عبارت‌های P، DC، V و V^2 معنادار بودند. مقدار F-value مدل برابر ۲۸/۱۰ بود که معناداری آماری آن را تأیید می‌کند. بر اساس F-value، سرعت روبش لیزری بیشترین تأثیر و ضریب‌کار کمترین تأثیر را بر رقیق‌شدگی داشتند. ضریب تعیین $R^2 = 0.88$ حاکی از همبستگی بسیار قوی است. دقت کفایت با مقدار ۱۹/۰۶ به طور قابل‌توجهی بالاتر از ۴ بوده و بیانگر توانایی بالای مدل در تمایز سیگنال از نویز است. مقدار F-value عدم انطباق برابر ۱/۹۱ بوده که در مقایسه با خطای خالص ناچیز است و تأیید می‌کند که مدل داده‌ها را به خوبی توصیف می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مدل ریاضی ارتفاع، عرض، زاویه، نرخ رقیق‌شدگی پوشش برحسب متغیرهای ورودی فرآیند روکش‌کاری لیزری به‌صورت روابط ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شد.

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس ارتفاع پوشش.

Table 4 ANOVA results of the coating height.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2.651E+05	7	37877.52	394.38	< 0.0001	significant
P	1475.51	1	1475.51	15.36	0.0020	
DC	4230.57	1	4230.57	44.05	< 0.0001	
V	2.175E+05	1	2.175E+05	2264.84	< 0.0001	
P × DC	2221.11	1	2221.11	23.13	0.0004	
P × V	3850.03	1	3850.03	40.09	< 0.0001	
DC × V	8417.53	1	8417.53	87.64	< 0.0001	
V^2	27426.02	1	27426.02	285.56	< 0.0001	
Residual	1152.51	12	96.04			
Lack of Fit	840.65	7	120.09	1.93	0.2442	not significant
Pure Error	311.87	5	62.37			
Cor Total	2.663E+05	19				
$R^2 = 0.995$				Adjusted $R^2 = 0.993$		
				Predicted $R^2 = 0.978$		



شکل ۳ الگوریتم کلی تحلیل حساسیت.

Fig. 3 General algorithm of sensitivity analysis.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تحلیل واریانس و مدل ریاضی

به‌منظور تعیین معنی‌داری آماری مدل‌های ریاضی (با استفاده از p-value و F-value)، شناسایی ضرایب تأثیرگذار (شامل خطی، درجه دوم و اندرکنش‌ها)، محاسبه ضرایب تعیین (R^2) و ارزیابی عدم انطباق یا برازش (Lack-of-fit)، چهار جدول تحلیل واریانس برای متغیرهای پاسخ شامل ارتفاع، عرض، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی تحلیل‌ها، سطح معنی‌داری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد؛ به‌این‌ترتیب که هر عاملی با p-value کمتر از ۰/۰۵ معنادار و با p-value بیشتر از ۰/۱ غیرمعنادار تلقی گردید. همچنین آزمون عدم انطباق زمانی مطلوب ارزیابی شد که مقدار p-value آن بیشتر از ۰/۰۵ باشد، بیانگر برازش مناسب مدل با داده‌های تجربی در نظر گرفته شد.

جدول ۴ تحلیل واریانس ارتفاع پوشش را ارائه می‌دهد. بر اساس این جدول، مدل و تمامی عبارت‌های اصلی شامل P، DC، V و اثرات متقابل $P \times V$ ، $P \times DC$ ، $DC \times V$ و جمله درجه دوم V^2 معنادار هستند. بالاترین مقدار F-value متعلق به سرعت روبش لیزری بود که آن را مؤثرترین عامل بر ارتفاع معرفی می‌کند. مقدار p-value عدم انطباق برابر با ۰/۲۴۴ (بیشتر از ۰/۰۵) حاکی از انطباق خوب مدل است. اختلاف بین R^2 تنظیم‌شده و R^2 پیش‌بینی‌شده کمتر

$$Dilution = -55.66 - 0.079 P - 0.24 DC + 10.35 V - 0.48 V^2 \quad (V)$$

۵-۲- نتایج تحلیل حساسیت

در این بخش، فرآیند ارزیابی و تحلیل حساسیت به دو مرحله مجزا تقسیم شده است تا تأثیر متغیرها با دقت و جامعیت بیشتری سنجیده شود. در گام نخست، با استفاده از تحلیل حساسیت، تأثیر کیفی هر یک از عوامل ورودی به صورت مستقل و مجزا بر متغیرهای خروجی پوشش بررسی می‌شود. این تحلیل بر پایه معادله رگرسیون ارائه شده استوار است و هدف آن شناسایی جهت و شدت کیفی رابطه بین ورودی‌ها و خروجی است. در گام دوم، برای عبور از تحلیل کیفی و رسیدن به سنجش کمی دقیق‌تر، از تحلیل حساسیت سوبل بهره گرفته می‌شود. این روش امکان ارزیابی تغییرات جزئی در پاسخ‌های خروجی را در قبال تغییرات اندک در متغیرهای ورودی فراهم می‌آورد و به ما کمک می‌کند تا حساسیت مدل را نسبت به تغییرات ورودی‌ها به طور عددی و دقیق‌تر درک کنیم.

۵-۲-۱- بررسی تأثیر عوامل ورودی بر ارتفاع پوشش

شکل ۴ تأثیر هر یک از عوامل ورودی بر ارتفاع پوشش را در فضای تعریف شده آن‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش توان لیزر ارتفاع پوشش افزایش یافته است. افزایش توان لیزر، به دلیل رابطه مستقیم با حرارت ورودی و چگالی توان، باعث ذوب بیشتر پودر و رسوب آن بر بستر شده و در نهایت، ارتفاع پوشش را افزایش می‌دهد [۳]. علاوه بر این، ضریب‌کار نیز روند مشابهی با توان لیزر دارد؛ بدین معنا که با افزایش ضریب‌کار، ارتفاع پوشش افزایش یافته است. این پدیده را می‌تواند به افزایش زمان روشنایی پالس نسبت داد که منجر به افزایش انرژی بیشتری به پودر می‌شود و به تبع آن، پودر ذوب شده بیشتری بر بستر رسوب کرده و ارتفاع پوشش را افزایش می‌دهد [۱۳]. همچنین از شکل ۴ می‌توان دریافت با افزایش سرعت روبش لیزر، ارتفاع پوشش کاهش یافته است. با افزایش سرعت روبش، به دلیل رابطه معکوس با حرارت ورودی و زمان تعامل لیزر و پودر، میزان گرمای منتقل شده به پودر و مدت زمان تابش لیزر کاهش می‌یابد. از این رو، میزان پودر ذوب شده‌ای که بر روی سطح بستر رسوب می‌کند، کمتر خواهد بود و در نتیجه، ارتفاع پوشش کاهش می‌یابد [۱۹].

۵-۲-۲- بررسی تأثیر عوامل ورودی بر عرض پوشش

در این بخش، با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت آماری، تأثیر هر یک از عوامل ورودی به صورت جداگانه و دقیق بر عرض پوشش بر اساس معادله رگرسیون (۵) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ تأثیر هر یک از عوامل ورودی را در فضای تعریف شده آن‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵

Adeq Precision = 74.30

جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس عرض پوشش.

Table 5 ANOVA results of the coating width.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2.515E+05	4	62863.27	81.77	< 0.0001	significant
P	97511.44	1	97511.44	126.85	< 0.0001	
DC	80551.70	1	80551.70	104.78	< 0.0001	
V	65063.37	1	65063.37	84.64	< 0.0001	
P ²	8326.56	1	8326.56	10.83	0.0049	
Residual	11531.04	15	768.74			
Lack of Fit	9354.13	10	935.41	2.15	0.2062	not significant
Pure Error	2176.91	5	435.38			
Total	2.630E+05	19				
R ² = 0.956				Adjusted R ² = 0.944		
				Predicted R ² = 0.92		
Adeq Precision = 33.22						

جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس زاویه پوشش.

Table 6 ANOVA results of the coating angle.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2151.13	4	537.78	40.05	< 0.0001	significant
P	244.78	1	244.78	18.23	0.0007	
DC	69.34	1	69.34	5.16	0.0382	
V	1660.51	1	1660.51	123.66	< 0.0001	
P ²	176.50	1	176.50	13.14	0.0025	
Residual	201.42	15	13.43			
Lack of Fit	162.09	10	16.21	2.06	0.2199	not significant
Pure Error	39.33	5	7.87			
Total	2352.55	19				
R ² = 0.914				Adjusted R ² = 0.891 Predicted R ² = 0.837		
Adeq Precision = 21.57						

جدول ۷ نتایج تحلیل واریانس نرخ رقیق‌شدگی پوشش.

Table 7 ANOVA results of the dilution ratio.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1187.55	4	296.89	28.10	< 0.0001	significant
P	176.21	1	176.21	16.68	0.0010	
DC	65.80	1	65.80	6.23	0.0247	
V	890.01	1	890.01	84.23	< 0.0001	
V ²	55.53	1	55.53	5.25	0.0368	
Residual	158.50	15	10.57			
Lack of Fit	125.67	10	12.57	1.91	0.2455	not significant
Pure Error	32.83	5	6.57			
Total	1346.05	19				
R ² = 0.882				Adjusted R ² = 0.850		
				Predicted R ² = 0.783		
Adeq Precision = 19.06						

$$Height = -1739.62 + 5.31 P + 27.04 DC + 28.79 V - 0.041 P \times DC - 0.24 P \times V - 1.80 DC \times V + 10.8 V^2 \quad (4)$$

$$Width = -1373.19 + 9.52 P + 8.53 DC - 34.51 V - 0.011 P^2 \quad (5)$$

$$Angle = -137.37 + 1.2 P + 0.25 DC + 5.51 V - 0.0017 P^2 \quad (6)$$

ورودی را افزایش می‌دهد، و افزایش ضریب‌کار نیز عرض پالس را بیشتر می‌کند. این عوامل، منجر به شکل‌گیری حوضچه مذاب وسیع‌تری با دمای بالاتر می‌شوند. دمای بالای حوضچه مذاب، ویسکوزیته فلز مایع را کاهش می‌دهد. در نتیجه، مواد مذاب تمایل به پخش گسترده‌تری بر روی بستر دارند که به نوبه خود موجب افزایش زاویه پوشش می‌گردد [۲۷، ۲۸]. همچنین، شکل ۶ نشان داد که افزایش سرعت روبش باعث افزایش زاویه پوشش گردید. هنگامی که سرعت روبش افزایش می‌یابد، مدت زمان عمل لیزر در واحد زمان کاهش می‌یابد. این امر منجر به افزایش سرعت خنک‌شدن حوضچه ذوب شده و همرفت داخلی برای مدت زمان کمتری رخ می‌دهد. در نتیجه، جریان در نیمه بالایی حوضچه مذاب کاهش یافته و این امر به افزایش زاویه پوشش منجر می‌شود [۲۸، ۲۹].

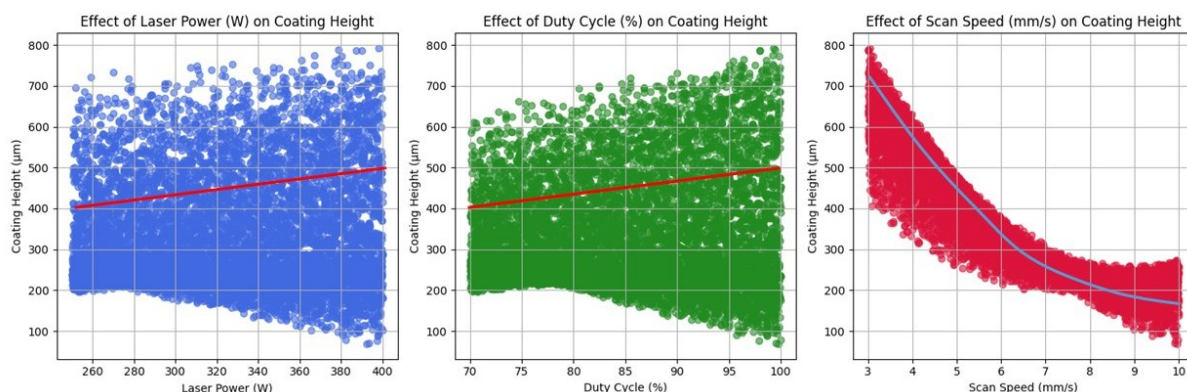
۵-۲-۴- بررسی تأثیر عوامل ورودی بر نرخ رقیق‌شدگی پوشش

در این بخش، با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت آماری و بر مبنای معادله رگرسیون (۷)، تأثیر هر یک از عوامل ورودی بر نرخ رقیق‌شدگی پوشش به طور مجزا و دقیق بررسی شده است. شکل ۷ تأثیر توان لیزر، ضریب‌کار و سرعت روبش لیزر را در فضای تعریف‌شده آن‌ها بر نرخ رقیق‌شدگی پوشش نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۷، تمامی عوامل ورودی تأثیر مثبتی بر نرخ رقیق‌شدگی دارند. به این معنی که افزایش هر یک از این عوامل، منجر به افزایش نرخ رقیق‌شدگی شد. به‌طورکلی، نرخ رقیق‌شدگی به ارتفاع پوشش و عمق مذاب وابسته است و در نتیجه، روند تغییرات رقیق‌شدگی پوشش را می‌توان با در نظر گرفتن این عوامل توضیح داد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، افزایش توان لیزر منجر به افزایش گرمای ورودی و چگالی توان می‌شود و افزایش ضریب‌کار نیز باعث افزایش عرض پالس می‌گردد. این افزایش‌ها، انتقال انرژی لیزر بیشتری به پودر و فلز پایه را به دنبال دارد و در نهایت، باعث افزایش ارتفاع روکش و عمق مذاب می‌شود [۱۱، ۱۹].

نشان داده شده است، افزایش توان لیزر موجب افزایش عرض پوشش گردید. افزایش توان لیزر، منجر به افزایش چگالی توان و گرمای ورودی می‌شود. با افزایش چگالی توان و گرمای ورودی، یک حوضچه مذاب بزرگ‌تر ایجاد می‌شود و در نتیجه عرض پوشش وسیع‌تری حاصل می‌گردد. علاوه بر این، شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش ضریب‌کار موجب افزایش عرض پوشش شد. افزایش ضریب‌کار باعث افزایش عرض پالس شده و می‌تواند منجر به انتقال مقدار زیادی انرژی لیزر به پودر و فلز پایه گردد. این امر منجر به گرم شدن بیشتر مرکز حوضچه مذاب نسبت به اطراف آن می‌شود. از آنجایی که کشش سطحی فلز داغ در مرکز حوضچه مذاب کمتر از فلز در نواحی اطراف آن است، فلز مذاب از مرکز به مناطق خنک‌تر حوضچه مذاب با کشش سطحی بالاتر حرکت می‌کند که منجر به حوضچه مذاب گسترده‌تر می‌گردد [۱۱]. همچنین، شکل ۵ نشان داد که با کاهش سرعت روبش لیزر، عرض پوشش افزایش یافت. به دلیل کاهش سرعت روبش لیزری، چگالی توان و گرمای ورودی افزایش می‌یابد. این تغییرات، منجر به تشکیل حوضچه مذاب بزرگ‌تری شده و در نهایت، روکش گسترده‌تری ایجاد می‌کند. علاوه بر این، کاهش سرعت روبش باعث افزایش زمان تعامل لیزر و جذب انرژی توسط پودر و بستر می‌شود. در نتیجه، این امر منجر به دمای بالاتر در حوضچه ذوب و به دنبال آن یک پوشش گسترده‌تر می‌گردد [۱۳، ۱۹، ۲۷].

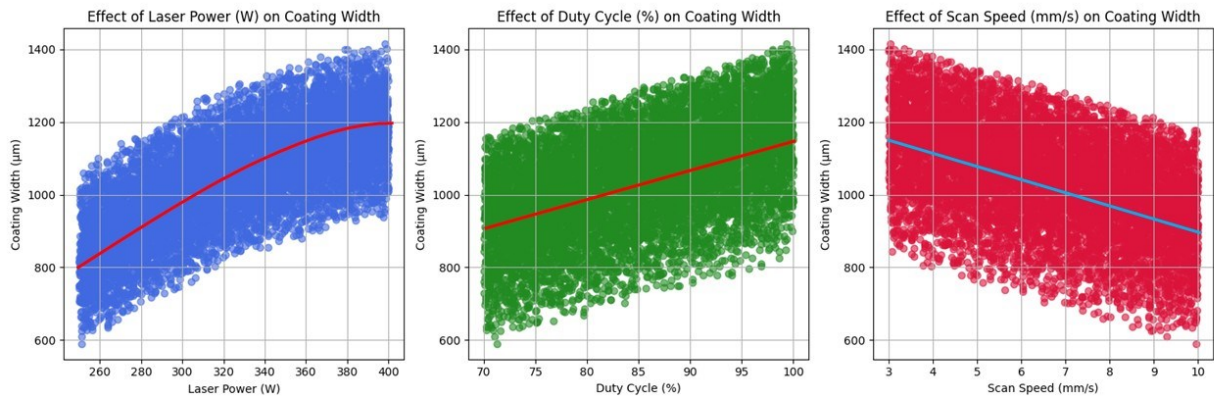
۵-۲-۳- بررسی تأثیر عوامل ورودی بر زاویه پوشش

در این بخش، تأثیر هر یک از عوامل ورودی بر زاویه پوشش به طور جداگانه و دقیق با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری بر اساس معادله رگرسیون (۶) بررسی شده است. شکل ۶ تأثیر توان لیزر، ضریب‌کار و سرعت روبش لیزر را در فضای تعریف‌شده آن‌ها بر زاویه پوشش نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، افزایش توان لیزر و ضریب‌کار منجر به افزایش زاویه پوشش گردید. افزایش توان لیزر، چگالی توان و گرمای



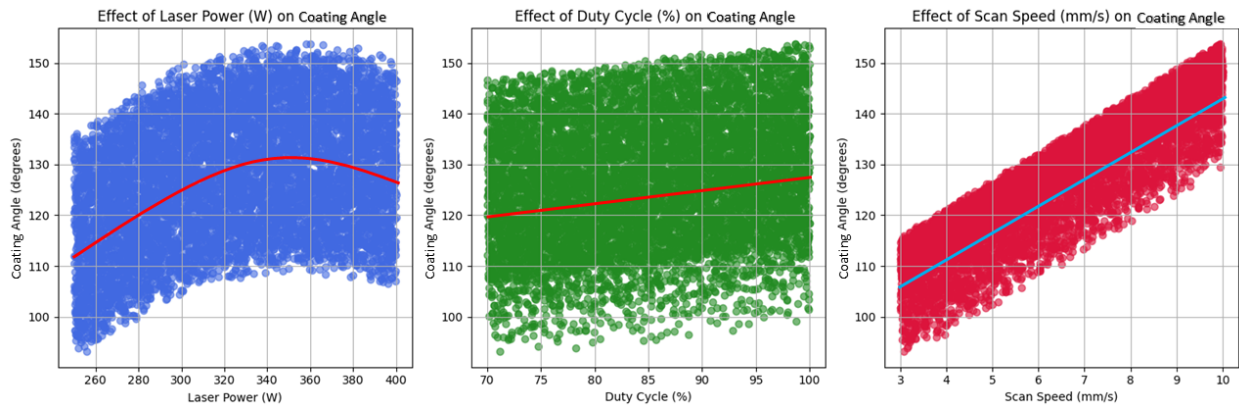
شکل ۴ اثر توان لیزر، ضریب‌کار و سرعت روبش بر ارتفاع پوشش.

Fig. 4 Effect of laser power, duty cycle, and scanning speed on coating height.



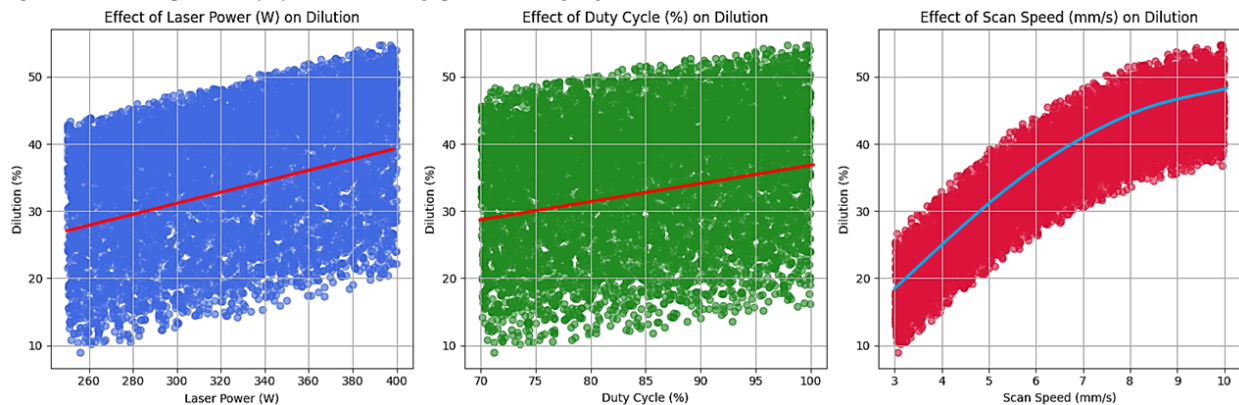
شکل ۵ اثر توان لیزر، ضریب کار، سرعت روبش بر عرض پوشش.

Fig. 5 Effect of laser power, duty cycle, and scanning speed on coating width.



شکل ۶ اثر توان لیزر، ضریب کار، سرعت روبش بر زاویه پوشش.

Fig. 6 Effect of laser power, duty cycle, and scanning speed on coating angle.



شکل ۷ اثر توان لیزر، ضریب کار، سرعت روبش بر نرخ رقیق‌شدگی پوشش.

Fig. 7 Effect of laser power, duty cycle, and scanning speed on dilution ratio.

۵-۲-۵- تحلیل حساسیت کمی عوامل ورودی بر پاسخ خروجی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این مقاله برای تحلیل حساسیت عوامل ورودی مؤثر بر پاسخ فرآیند، از روش آماری سوبل بهره‌گیری شده است. به‌منظور ارزیابی هم‌زمان اثر کیفی و کمی متغیرهای ورودی بر رفتار پاسخ‌های خروجی، تحلیل حساسیت سوبل با استفاده از نرم‌افزار پایتون به کار گرفته شد. نتایج کمی تأثیر متغیرهای ورودی بر ارتفاع پوشش با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل در شکل ۸- الف نشان داده شده است که به ترتیب میزان تأثیر توان لیزر ۳/۹ درصد، ضریب کار

از آنجایی که نرخ افزایش ارتفاع روکش کمتر از نرخ افزایش عمق مذاب است، این امر به افزایش نرخ رقیق‌شدگی پوشش منجر می‌شود. همچنین بر اساس شکل ۷، کاهش سرعت روبش باعث ایجاد پوشش با نرخ رقیق‌شدگی کمتر شد. این پدیده به دلیل تشکیل حوضچه مذاب عمیق‌تر و روکش ضخیم‌تر رخ می‌دهد. کاهش سرعت روبش، افزایش ارتفاع روکش را سریع‌تر از عمق مذاب پیش می‌برد و در نتیجه، نرخ رقیق‌شدگی پوشش کاهش می‌یابد [۱۱].

جدول ۸ مشاهده می‌شود، اگرچه درصد تأثیر عوامل در این دو روش اندکی متفاوت است، اما هر دو روش، عوامل با کمترین و بیشترین تأثیر را کاملاً یکسان معرفی کرده‌اند. این همسانی کامل در رتبه‌بندی، اعتبار نتایج را تأیید کرده و نشان‌دهنده سازگاری کلی دو روش در تحلیل رفتار سیستم است. ازسوی دیگر، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تحلیل حساسیت سوبل با قابلیت تفکیک کمی سهم هر یک از عوامل، ابزاری قدرتمند برای طراحی بهینه فرآیند روکش‌کاری لیزری محسوب می‌شود.

۶- جمع‌بندی

پژوهش حاضر با هدف بررسی کمی و کیفی تأثیر عوامل ورودی فرآیند روکش‌کاری لیزری (توان لیزر، ضریب‌کار و سرعت روبش) بر ویژگی‌های هندسی پوشش‌های NiCoCrAlY بر بستر Hastelloy X انجام شد. با استفاده از طرح مرکب مرکزی، داده‌ها جمع‌آوری و با روش سطح پاسخ، مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی این ویژگی‌ها ایجاد گردید. در نهایت، تحلیل حساسیت سوبل برای تعیین سهم کمی هر عامل در تغییرات پاسخ‌ها به کار گرفته شد. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

۱. تمامی چهار مدل توسعه‌یافته برای پیش‌بینی ارتفاع، عرض، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی روکش از نظر آماری معنادار بودند ($p\text{-value} < 0.05$). مقادیر بالای ضریب تعیین (R^2) در همه موارد همبستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی را نشان داد. همچنین آزمون عدم انطباق در هیچ یک از مدل‌ها معنادار نبوده که حاکی از برازش مناسب و عدم وجود کم‌برازشی یا بیش‌برازشی قابل‌توجه است. این نتایج ثابت می‌کند که مدل‌های توسعه‌یافته، ابزارهایی قابل‌اعتماد برای توصیف رفتار هندسی فرآیند روکش‌کاری لیزری هستند.
۲. نتایج نشان داد که توان لیزر و ضریب‌کار بر همه پاسخ‌ها اثر افزایشی دارند، درحالی‌که سرعت روبش بسته به ویژگی هدف می‌تواند اثر افزایشی (بر زاویه و رقیق‌شدگی) یا کاهش‌ی (بر ارتفاع و عرض) داشته باشد. این رفتار به سازوکارهای حرارتی، زمان تعامل و دینامیک حوضچه مذاب نسبت داده شد.
۳. تحلیل حساسیت سوبل نشان می‌دهد که سرعت روبش با سهم ۸۸/۸، ۸۰/۷ و ۸۱/۸ درصد به ترتیب بیشترین تأثیر را در تعیین ارتفاع، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی پوشش دارد، به‌گونه‌ای که تنظیم آن به‌تنهایی قادر است بیش از ۸۰ درصد تغییرات این سه خروجی را کنترل کند. در مقابل، توان لیزر نقشی جزئی تا متوسط (۳/۹، ۱۶/۳ و ۱۳/۳ درصد) ایفا می‌کند و ضریب‌کار با سهم‌های ۷/۳، ۳ و ۴/۹ درصد کم‌تأثیرترین عامل بر این سه مشخصه است. اما در تعیین عرض پوشش، وضعیت کاملاً متفاوت است و توان لیزر با ۵۱/۳ درصد بیشترین تأثیر را دارد، به‌طوری که بیش از دو

۷/۳ درصد، سرعت روبش ۸۸/۸ درصد است. مطابق با این نتایج، سرعت روبش بیشترین تأثیر را بر ارتفاع پوشش دارد و پس از آن، ضریب‌کار و در نهایت، کمترین تأثیر بر ارتفاع پوشش به توان لیزر مربوط می‌شود. شکل ۸ - ب نتایج کمی تأثیر عوامل ورودی بر عرض پوشش با استفاده از تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ - ب مشاهده می‌شود، به ترتیب میزان تأثیر توان لیزر ۵۱/۳ درصد، ضریب‌کار ۲۵/۸ درصد و سرعت روبش لیزر ۲۲/۹ درصد است. باتوجه‌به این نتایج، توان لیزر به‌عنوان مهم‌ترین عامل، بیشترین تأثیر را بر عرض پوشش دارد. پس از آن، ضریب‌کار در تعیین عرض پوشش مؤثر بوده و در نهایت، سرعت روبش کمترین سهم را در این خصوص داشته است. شکل ۸ - ج نتایج کمی تأثیر متغیرهای ورودی بر زاویه پوشش را با استفاده از تحلیل حساسیت ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ - ج مشاهده می‌شود، در رابطه با زاویه پوشش تأثیر کمی توان لیزر ۱۶/۳ درصد، ضریب‌کار ۳ درصد و سرعت روبش لیزر ۸۰/۷ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که سرعت روبش بیشترین تأثیر و ضریب‌کار کمترین تأثیر را در کنترل زاویه پوشش دارند. شکل ۸ - د نتایج کمی تأثیر متغیرهای ورودی بر نرخ رقیق‌شدگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ - د مشاهده می‌شود، سرعت روبش با ۸۱/۸ درصد بیشترین تأثیر را دارد، درحالی‌که توان لیزر با ۱۳/۳ درصد و در نهایت ۴/۹ درصد کمترین تأثیر را بر نرخ رقیق‌شدگی نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان گفت، نتایج تحلیل حساسیت سوبل نشان داد که تأثیر متغیرهای ورودی به‌شدت به مشخصه خروجی پوشش وابسته است. سرعت روبش با سهمی بیش از ۸۰ درصد در ارتفاع، زاویه و نرخ رقیق‌شدگی، نقش غالب و تعیین‌کننده‌ای دارد؛ بنابراین برای کنترل این سه عامل، تنظیم سرعت روبش حیاتی‌ترین اقدام محسوب می‌شود. در مقابل، توان لیزر بیشترین تأثیر را بر عرض پوشش دارد (بیش از ۵۰ درصد) و پس از آن ضریب‌کار و سرعت روبش در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نکته قابل‌توجه اینکه ضریب‌کار تقریباً در تمام خروجی‌ها کمترین سهم را دارد (از ۳ درصد برای زاویه تا حدود ۲۶ درصد برای عرض) و بنابراین کم‌اهمیت‌ترین عامل کنترلی به شمار می‌رود. در نتیجه، بسته به اولویت اهداف فرآیند، یا سرعت روبش (برای کنترل ارتفاع، زاویه و رقیق‌شدگی) و یا توان لیزر (برای کنترل عرض پوشش) باید به‌عنوان متغیر اصلی بهینه‌سازی انتخاب شود.

جدول ۸. مقایسه کمی تأثیر هر عامل ورودی بر خروجی را بر اساس دو روش سطح پاسخ و سوبل نشان می‌دهد. دقت شود که در سطح پاسخ به دلیل دو بار شمردن اندرکنش‌ها، مجموع سهم عامل‌ها از ۱۰۰ درصد فراتر می‌رود، اما شاخص کل سوبل با تفکیک صحیح، جمع سهم‌ها را به ۱۰۰ درصد محدود می‌کند. همان‌طور که در

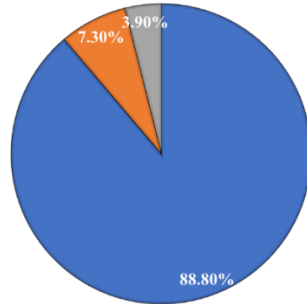
این همسانی کامل در رتبه‌بندی، اعتبار و سازگاری دو روش در تحلیل رفتار سیستم را تأیید کرد. افزون بر این، روش سوبل به دلیل توانایی در تفکیک کمی دقیق سهم هر عامل، ابزاری برتر و قدرتمندتر برای طراحی بهینه فرآیند روکش‌کاری لیزری محسوب می‌شود.

برابر ضریب‌کار (۲۵/۸ درصد) و سرعت روبش (۲۲/۹ درصد) عمل می‌کند.

۴. مقایسه نتایج روش سطح پاسخ و سوبل نشان داد که اگرچه درصد تأثیر کمی هر عامل ورودی در این دو روش تفاوت جزئی دارد، اما هر دو روش به طور کاملاً یکسان، عوامل با کمترین و بیشترین تأثیر بر خروجی را رتبه‌بندی کرده‌اند.

Percentage impact of input factors on clad height.

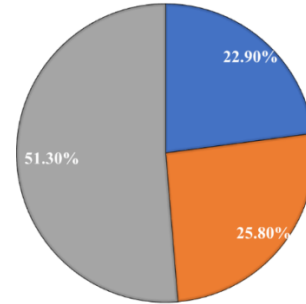
■ Scanning speed ■ Duty cycle ■ Laser power



(a)

Percentage impact of input factors on clad width.

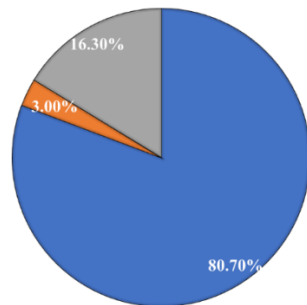
■ Scanning speed ■ Duty cycle ■ Laser power



(b)

Percentage impact of input factors on clad angle.

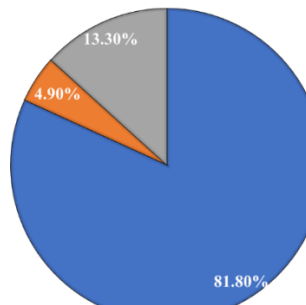
■ Scanning speed ■ Duty cycle ■ Laser power



(c)

Percentage impact of input factors on dilution ratio.

■ Scanning speed ■ Duty cycle ■ Laser power



(d)

شکل ۸ سهم هر یک از عوامل ورودی بر پاسخ خروجی (الف) ارتفاع (ب) عرض (ج) زاویه (د) نرخ رقیق‌شدگی پوشش.

Fig. 8 Contribution of each input parameter to the output parameters: (a) Height, (b) Width, (c) Angle, (d) dilution rate.

جدول ۸ مقایسه ضریب حساسیت روش سوبل و RSM.

Table 8 Comparison of Sobel sensitivity and RSM.

Comparison of Sobel sensitivity coefficient and RSM in clad height.				Comparison of Sobel sensitivity coefficient and RSM in clad width.			
Sensitivity coefficient (%)	Scanning speed (mm/s)	Duty cycle (%)	Laser power (W)	Sensitivity coefficient (%)	Scanning speed (mm/s)	Duty cycle (%)	Laser power (W)
Sobel sensitivity method	88.8	7.3	3.9	Sobel sensitivity method	22.9	25.8	51.3
Response Surface Methodology	96.6	5.5	2.8	Response Surface Methodology	24.7	30.6	40.2
Erorr	7.8	1.8	1.1	Erorr	1.8	4.8	11.1
Comparison of Sobel sensitivity coefficient and RSM in clad angle.				Comparison of Sobel sensitivity coefficient and RSM in dilution ratio.			
Sensitivity coefficient (%)	Scanning speed (mm/s)	Duty cycle (%)	Laser power (W)	Sensitivity coefficient (%)	Scanning speed (mm/s)	Duty cycle (%)	Laser power (W)
Sobel sensitivity method	80.7	3	16.3	Sobel sensitivity method	81.8	4.9	13.3
Response Surface Methodology	70.5	2.9	10.4	Response Surface Methodology	70.2	4.8	13.9
Erorr	10.2	0.1	5.9	Erorr	11.6	0.1	0.6

- [8] C. Nickel, "ASM Specialty Handbook," ASM International Materials Park, OH, vol. 22, pp. 44073-0002, 2000. doi: [10.5860/choice.38-6206](https://doi.org/10.5860/choice.38-6206).
- [9] G. Injeti, Gas Turbines: Materials, Modeling and Performance. BoD-Books on Demand, 2015. doi: [10.5772/58504](https://doi.org/10.5772/58504).
- [10] Y. Sun and M. Hao, "Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd: YAG laser," Optics and Lasers in Engineering, vol. 50, no. 7, pp. 985-995, 2012. doi: [10.1016/j.optlaseng.2012.01.018](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.01.018).
- [11] A. Khorram, A. D. Jamaloei, M. Paidar, and X. Cao, "Laser cladding of Inconel 718 with 75Cr3C2+ 25 (80Ni20Cr) powder: Statistical modeling and optimization," Surface and Coatings Technology, vol. 378, p. 124933, 2019. doi: [10.1016/j.surfcoat.2019.124933](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124933).
- [12] A. Alimohammadi, A. Khorram, and A. Araee, "Laser alloying of Hastelloy X with Metco 204 NS powder: statistical modeling and optimization," Physica Scripta, vol. 100, no. 8, p. 085018, 2025. doi: [10.1088/1402-4896/adf403](https://doi.org/10.1088/1402-4896/adf403).
- [13] M. Hajiahmadi, A. Khorram, and M. Ghoreishi, "Statistical modeling and optimization of clad geometry in laser cladding of Amdry 961 on Inconel 713LC superalloy with response surface methodology," Journal of Laser Applications, vol. 36, no. 2, 2024. doi: [10.2351/7.0001364](https://doi.org/10.2351/7.0001364).
- [14] A. I. Khuri and S. Mukhopadhyay, "Response surface methodology," Wiley interdisciplinary reviews: Computational statistics, vol. 2, no. 2, pp. 128-149, 2010. doi: [10.1002/wics.73](https://doi.org/10.1002/wics.73).
- [15] G. C. Onwubolu, J. P. Davim, C. Oliveira, and A. Cardoso, "Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search," Optics & Laser Technology, vol. 39, no. 6, pp. 1130-1134, 2007. doi: [10.1016/j.optlastec.2006.09.008](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.09.008).
- [16] S. Liu and R. Kovacevic, "Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 74, no. 5, pp. 867-878, 2014. doi: [10.1007/s00170-014-6041-y](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6041-y).
- [17] M. K. Alam, R. J. Urbanic, N. Nazemi, and A. Edrissy, "Predictive modeling and the effect of process parameters on the hardness and bead characteristics for laser-cladded stainless steel," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,
- تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.
- بیانیه هوش مصنوعی: از هوش مصنوعی در تولید محتوای علمی مقاله استفاده نشده است و کلیه مطالب، تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌ها توسط نویسندگان انجام شده است.
- حامی مالی: این پژوهش فاقد حامی مالی است.
- نقش نویسندگان: نویسنده اول (۵۰٪) - روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس؛ نویسنده دوم (۵۰٪) - نظارت و ویرایش نهایی.
- تعارض منافع: هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

مراجع

- [1] R. Vilar, "Laser cladding," Journal of laser applications, vol. 11, no. 2, pp. 64-79, 1999. doi: [10.2351/1.521888](https://doi.org/10.2351/1.521888).
- [2] E. Toyserkani, A. Khajepour, and S. F. Corbin, Laser cladding. CRC press, 2004. doi: [10.1201/9781420039177](https://doi.org/10.1201/9781420039177).
- [3] A. Alimohammadi, A. Khorram, and A. Araee, "Statistical modeling and optimization of clad geometry in laser cladding of Amdry 365 on Hastelloy X superalloy with response surface methodology," Vacuum, vol. 230, p. 113665, 2024. doi: [10.1016/j.vacuum.2024.113665](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113665).
- [4] A. Alimohammadi, A. Khorram, and A. Araee, "Microstructural evolution of laser clad amdry 365 powder on Hastelloy X superalloy," Sādhanā, vol. 50, no. 2, p. 114, 2025. doi: [10.1007/s12046-025-02776-0](https://doi.org/10.1007/s12046-025-02776-0).
- [5] S. Li et al., "Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel 718 during pulsed-and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study," Materials & design, vol. 119, pp. 351-360, 2017. doi: [10.1016/j.matdes.2017.01.065](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.065).
- [6] H. Zhang, Y. Zou, Z. Zou, and W. Zhao, "Comparative study on continuous and pulsed wave fiber laser cladding in-situ titanium-vanadium carbides reinforced Fe-based composite layer," Materials Letters, vol. 139, pp. 255-257, 2015. doi: [10.1016/j.matlet.2014.10.102](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.102).
- [7] S. Sun and M. Brandt, "Comparison between continuous wave and pulsed Nd: YAG laser cladding of stellite 6," in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2004, vol. 2004, no. 1: Laser Institute of America, p. 901. doi: [10.2351/1.5060303](https://doi.org/10.2351/1.5060303).

- [27] S. H. Hashemi, R. Vafaei, and R. S. Razavi, "Statistical-experimental modeling of the effect of process parameters on geometric characteristics of laser cladding of stellite 6 on SS316 using second-order regression," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 2727-2739, 2024. doi: [10.1016/j.jmrt.2023.12.201](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.201).
- [28] T. Li et al., "Multi-objective optimization of process parameters of 45 steel laser cladding Ni60PTA alloy powder," *Coatings*, vol. 12, no. 7, p. 939, 2022. doi: [10.3390/coatings12070939](https://doi.org/10.3390/coatings12070939).
- [29] Y. Huang et al., "Multi-objective optimization of process parameters in laser cladding CoCrCuFeNi high-entropy alloy coating," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 1985-2000, 2022. doi: [10.1007/s11666-022-01408-x](https://doi.org/10.1007/s11666-022-01408-x).
- vol. 94, no. 1, pp. 397-413, 2018. doi: [10.1007/s00170-017-0898-5](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0898-5).
- [18] G. Lian, M. Yao, Y. Zhang, and C. Chen, "Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 5, pp. 2397-2407, 2018. doi: [10.1007/s00170-018-2107-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2107-6).
- [19] J. Zhang et al., "Experimental and statistical analyses of geometry characteristics of Inconel 718 laser clad layer with response surface methodology," *Journal of Laser Applications*, vol. 31, no. 3, 2019. doi: [10.2351/1.5098044](https://doi.org/10.2351/1.5098044).
- [20] P. Pant, D. Chatterjee, T. Nandi, S. K. Samanta, A. K. Lohar, and A. Changdar, "Statistical modelling and optimization of clad characteristics in laser metal deposition of austenitic stainless steel," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 7, p. 283, 2019. doi: [10.1007/s40430-019-1784-x](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1784-x).
- [21] A. Khorram, M. Taheri, and M. Fasahat, "Laser cladding of Inconel 713 LC with Stellite 31 powder: Statistical modeling and optimization," *Laser Physics*, vol. 31, no. 9, p. 096001, 2021. doi: [10.1088/1555-6611/ac1920](https://doi.org/10.1088/1555-6611/ac1920).
- [22] M. Yao, X. Chen, F. Kong, and W. Tong, "Process optimization of laser hot-wire cladding with high-power direct diode laser via the response surface methodology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 11, pp. 8089-8103, 2022. doi: [10.1007/s00170-022-09300-2](https://doi.org/10.1007/s00170-022-09300-2).
- [23] H. Long, T. Li, H. Shi, Y. Gui, and C. Qiu, "Experimental study of laser cladding Ni-based coating based on response surface method," *Coatings*, vol. 13, no. 7, p. 1216, 2023. doi: [10.3390/coatings13071216](https://doi.org/10.3390/coatings13071216).
- [24] D. C. Montgomery, "Montgomery: design and analysis of experiments," John Wiley & Sons, vol. 27, 2017. doi: [10.2307/1269713](https://doi.org/10.2307/1269713).
- [25] J. Rezaeian, S. Jahanbakhshi, and S. J. Jamshidi, "Sensitivity Analysis of Production Parameters of an Iranian Oilfield Using Sobol Method," *J. Pet. Res.*, vol. 30, pp. 37-46, 2020. doi: [10.2118/214329-pa](https://doi.org/10.2118/214329-pa).
- [26] I. M. Sobol, "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models," *Math. Model. Comput. Exp.*, vol. 1, no. 4, pp. 407-414, 1993. doi: [10.1016/s0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/s0378-4754(00)00270-6).