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

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

Volume 11, Number 1, 2025

Experimental-statistical analysis for laser cladding of 2507 duplex steel wire on VCN200 steel by response surface methodology

B. Agharazi, S. R. Shoja Razavi*, S.M. Barekat, M. R. Borhani, M. Erfanmanesh
Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Received 10 Februaryl 2025 ; Accepted 24 May 2025

Abstract

This experimental-statistical study investigates the influence of laser cladding parameters—laser power (700–900 W), scanning speed (6–8 mm/s), and wire feed rate (70–80 mm/min)—on the geometric characteristics of single-pass coatings of 2507 duplex stainless steel on a VCN200 substrate. Experimental data were analyzed using Response Surface Methodology (RSM) with a three-factor, four-level design matrix. Measurements including clad width (W), height (H), penetration depth (b), wettability angle (Z), and dilution percentage (D) were obtained via ImageJ software. Results indicated that increasing laser power from 700 to 900 W led to a 14% increase in clad width (from 1417 to 1744 µm), a 33% rise in clad height (from 450 to 594 µm), a 6% increase in penetration depth (from 88 to 93 µm), and a 3% improvement in wettability angle (from 71° to 69°). In contrast, increasing scanning speed from 6 to 8 mm/s reduced clad width by 12% (from 1513 to 1787 µm), clad height by 31% (from 650 to 573 µm), and wettability angle by 15% (from 67° to 78°), while enhancing penetration depth by 4% (from 85 to 84 µm) and dilution by 19% (from 58% to 53%). Moreover, raising the wire feed rate from 70 to 80 mm/min increased clad height by 13% (from 502 to 747 µm) and wettability angle by 4% (from 75° to 78°), but decreased dilution by 19% (from 59% to 48%).

Keywords: Laser Cladding, 2507 Duplex stainless steel, Process optimization, Response surface methodology, Geometric properties.

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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404

تحلیل تجربی-آماری برای روکش‌کاری لیزری سیم فولاد دوفازی2507 روی فولاد VCN200 به روش سطح پاسخ

بهراد آقارضی، سید رضا شجاع رضوی*، سید مسعود برکت، محمدرضا برهانی، محمد عرفان منش

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

دریافت مقاله: 1403/11/22 ؛ پذیرش مقاله: 1404/03/03

چکیده

این مطالعه به‌صورت تجربی- آماری به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری شامل توان لیزر (700 تا 900 وات)، سرعت روبش لیزر (6 تا 8 میلی‌متر بر ثانیه) و نرخ تغذیه سیم (70 تا 80 میلی‌متر بر دقیقه) بر خواص هندسی روکش تک‌پاس از جنس فولاد داپلکس 2507 روی زیرلایه VCN200 پرداخته است. در این راستا، آزمایش‌ها براساس روش سطح پاسخ (RSM) با طرح سه عاملی و در چهار سطح انجام شد و در ادامه، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی شامل عرض روکش (W)، ارتفاع روکش (H)، عمق نفوذ (b)، زاویه ترشوندگی (Z) و درصد آمیختگی (D) با استفاده از نرم‌افزار ImageJ استخراج شد. نتایج نشان داد که افزایش توان لیزر از 700 به 900 وات منجر به افزایش 14درصدی در عرض روکش (از 1417 به 1744 میکرومتر)، 33% در ارتفاع روکش (از 450 به 594 میکرومتر)، 6% در عمق نفوذ(از 88 به 93 میکرومتر) و 3% در زاویه ترشوندگی (از 71 به 69 درجه) شد. در مقابل، افزایش سرعت روبش از 6 به 8 میلی‌متر بر ثانیه سبب کاهش 12% در عرض روکش (از 1513 به 1787 میکرومتر)، 31% در ارتفاع (از 650 به 573میکرومتر) و 15% در زاویه ترشوندگی (از 67 به 78 درجه) شد؛ در حالی‌که عمق نفوذ 4% (از 85 به 84 میکرومتر) و درصد آمیختگی 19% افزایش یافت. همچنین، افزایش نرخ تغذیه سیم از 70 به 80 میلی‌متر بر دقیقه باعث افزایش 13درصدی در ارتفاع روکش(از 502 به 747 میکرومتر)، 4% در زاویه ترشوندگی (از 75 به 78 درجه) و همچنین کاهش 19 درصدی میزان آمیختگی شد.

کلمات کلیدی: روکش‌کاری لیزری، فولاد داپلکس 2507، بهینه‌سازی فرایند، روش سطح پاسخ، خواص هندسی.

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

1- مقدمه

روکش‌کاری لیزری، یک فناوری بین‌رشته‌ای است که از فناوری لیزر، طراحی و تولید به کمک رایانه، ربات و حسگرها بهره‌گیری می‌کند. این فرایند از منبع حرارتی لیزر برای نشاندن لایه‌ای نازک روی فلزپایه بهره می‌گیرد [1-4]. توان لیزر، سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه از پارامترهای اصلی فرایند روکش‌کاری لیزری هستند که بر خواص، ریزساختار لایه ایجادشده اثرگذارند [7-5]. این پارامترهای فرایند با مقادیر مختلف می‌توانند لایه‌هایی با ویژگی‌های هندسی و ریزساختارهای متفاوت ایجاد کنند؛ لذا بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و پیش‌بینی خواص و هندسه پوشش چالش‌برانگیز است [9-8]. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری جهت بررسی اثر پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی لایه انجام شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

بااین‌حال این فرایند شامل فعل‌وانفعالات فیزیکی میان پرتو لیزر، سیم، زیرلایه است که یافتن اثر هم‌افزایی در فرایند روکش‌کاری لیزری را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین با انجام تست‌های روی فولاد داپلکس2507 به‌عنوان ماده پوششی و زیرلایه VCN200 یکسری نتایج درباره تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های هندسی به دست آمد. فولاد آلیاژیVCN 200 دارای عناصر وانادیم، کروم، نیتروژن و کربن است و ازجمله فولادهای آلیاژی پرکاربرد در شاسی اتومبیل، شافت لوکوموتیو و زیردریایی به‌حساب می‌آید.

این فولادها قابلیت بالای ماشین‌کاری، مقاومت در برابر نیروهای خمشی، پیچشی و کششی، انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت به شکست و ضربه و همچنین مقاومت سایشی مطلوب دارند. در صنعت قطعه‌سازی جهت ساخت میل‌لنگ‌ها، محورهای غیر هم‌مرکز، اجزاء و قطعات دندانه‌دار، شاسی اتومبیل، صفحه دیسک، شافت لوکوموتیوها و به‌خصوص در شافت‌های زیردریایی استفاده می‌شود. گستردگی استفاده، عدم دسترسی و گران بودن تعویض این قطعات باعث شده است تا در صورت معیوب شدن قطعه، هزینه تعمیر آن‌ها به صرفه‌تر از جایگزینی باشد. به همین دلیل، تحقیقات مختلفی روی پوشش‌دهی و بازسازی قطعات معیوب از جنس آلیاژ مذکور متمرکز شده است. به‌منظور جلوگیری و یا کاهش صدمات قطعات فولادی مذکور می‌توان آن‌ها را با پوشش‌های مقاوم به خوردگی بالا همچون فولاد داپلکس2507 پوشش‌دهی نمود.

این فولاد زنگ‌نزن دوفازی دارای ساختار ترکیبی آستنیت- فریتی است. ساختار دوفازی بلوری فولاد 2507 سبب آن شده است که علاوه بر دارا بودن مقاومت به خوردگی مناسب فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، از استحکام مکانیکی فولادهای زنگ‌نزن فریتی نیز برخوردار باشد. علاوه بر درصد کروم بالا، وجود عناصر آلیاژی مولیبدن و نیتروژن در ساختار آلیاژی این فولاد داپلکس، منجر به ایجاد مقاومت به خوردگی عالی در مقایسه با سایر فولادهای زنگ‌نزن شده است. از همین رو گزینه‌ای کاربردی جهت استفاده در محیط‌های خورنده کلریدی و سولفیدی مطرح می‌شود. فرایند روکش‌کاری لیزری به‌دلیل منطقه متأثر از حرارت پایین‌تر نسبت به سایر فرایندها گزینه مناسبی جهت پوشش‌دهی این ماده می‌باشد. حال تاثیر پارامترهای روکش‌کاری لیزری بر فولاد داپلکس 2507 روی فولاد VCN200 مورد بررسی قرار گرفته است. لیاو و همکاران [10] به بررسی تک‌پاس فولاد داپلکس بر روی سطح فولادQ235 پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش توان لیزر، عرض و ارتفاع عیوب و تخلخل‌ها افزایش می‌یابد و رقت و عمق حوضچه مذاب نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ابعاد فریت به‌تدریج از درشت به باریک و درنهایت به یک شکل ناپیوسته تبدیل می‌شود. مشخص شده است که پوشش حاصل از روکش‌کاری لیزری با توان 2/3 کیلووات دارای ریزسختی بالاتری است و مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر (در حدود 20 برابر بهتر از زیرلایه فولاد کربنی) با پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی آن نشان داد.

وانگ و همکاران [11] آنالیز فازی، ریزساختار، مقاومت در برابر خوردگی الکتروشیمیایی، اصطکاک و مقاومت در برابر سایش لایه‌های روکش لیزری را موردبررسی قراردادند. با تغییر پارامترهای اصلی لیزر، تغییراتی در ویژگی‌های هندسی لایه ایجاد شده مشاهده شد. لایه‌های روکش لیزری چند پاسی شامل فازهای γ-Fe و α-Fe بودند. با توجه به توان لیزر بهینه در 2/3کیلووات، ریزساختار لایه روکش‌کاری شده با لیزر از تعداد زیادی کریستال هم‌محور و تعداد کمی کریستال سلولی آماده شده تشکیل شده است که به مقاومت در برابر خوردگی خوب آن کمک می‌کند. این پژوهش با بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی فرایند روکش‌کاری لیزری، نوآوری اساسی را معرفی می‌کند. تحلیل جامع از تاثیرات متقابل توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تزریق سیم بر ویژگی‌های هندسی روکش (ارتفاع، عرض، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی) که به بهینه‌سازی کیفیت روکش در ترکیب فولاد داپلکس 2507 و VCN200 کمک می‌کند. این یافته‌ها، چارچوبی نوین برای طراحی پارامترهای فرایندی در کاربردهای صنعتی را فراهم می‌کند.

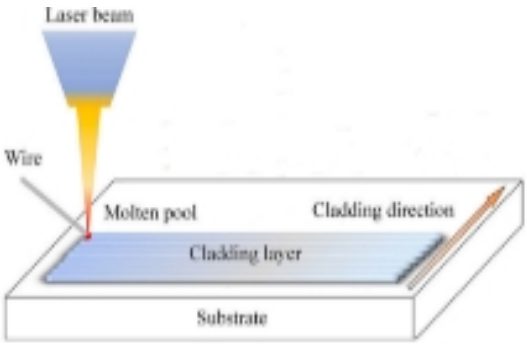
2-مواد و روش تحقیق

در آزمایش حاضر از یک دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری فیبری پیوسته با طول موج 1084 نانومتر، حداکثر توان لیزر یک کیلووات، سیستم تزریق سیم و سیستم خنک‌کننده آبی استفاده شد. طرح‌واره فرایند روکش‌کاری لیزری در شکل(1) نشان داده شده است در شکل(2) نمای از دستگاه رسوب نشانی و هم‌چنین تزریق کننده سیم و هد دستگاه مشخص است. آرگون به‌عنوان گاز محافظ و حامل استفاده شد. زیرلایه مورداستفاده در این مطالعه فولاد VCN200 سیم فولادی داپلکس2507 به قطر 0/9 میلی‌متر به‌عنوان ماده پوشش استفاده شد. ابتدا سطح زیرلایه با سمباده پرداخت‌شده و سپس سطح با استون تمیز شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه و سیم در جدول(1و2)

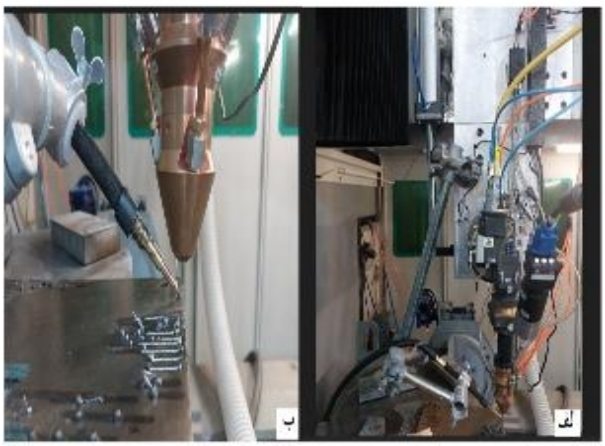
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

ارائه شده است. همچنین نمودارهای EDS پوشش فولاد داپلکس2507 و زیرلایه VCN200 به همراه تصویر SEM تک پاس بهینه در شکل(3) مشخص هستند.



شکل1- طرح‌واره فرایند روکش‌کاری لیزری مورد استفاده در این تحقیق.



شکل2-الف- نمایی کلی از دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری و ب- سامانه تزریق سیم و هد دستگاه

جدول1- ترکیب شیمیایی VCN200

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
کربن	0/34	کروم	2/2
منگنز	0/8	نیکل	2/2
فسفر	0/25	مولیبدن	0/5
سیلیسیم	0/40	نیتروژن	0/35

جدول2- ترکیب شیمیایی فولاد 2507

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
کربن	0/03	کروم	24-26
منگنز	1/2	نیکل	6-8
فسفر	0/035	مولیبدن	3-5
سیلیسیم	0/8	نیتروژن	0/24-0/32

بررسی هندسه روکش تک‌پاس و اثر پارامترهای فرایند بر آن برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی روکش تک‌پاس، بر اساس روش سطح پاسخ، توان لیزر (P)، سرعت روبش (V) و نرخ تغذیه پودر (F) به‌عنوان متغیرهای مستقل و عرض لایه (W)، ارتفاع لایه(H)، عمق نفوذ (b) و درصد آمیختگی(D) به‌عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند؛ بنابراین از نرم‌افزار طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ برای ایجاد یک ماتریس سه عاملی و چهار سطحی با دوازده نقطه محوری و یک نقطه مرکزی استفاده شد. درمجموع سیزده گروه آزمایشی براساس پارامترهای مستقل و پاسخ طراحی شد. بر همین اساس روکش‌کاری لیزری سیم فولادی داپلکس2507روی زیرلایه فولادیVCN200 به‌صورت تک‌پاس انجام شد. در مرحله بعد، 13 نمونه تک‌پاس پس از مقطع‌زنی براساس استاندارد ASTM E3-17 آماده‌سازی و با محلول نایتال 5% به‌صورت شیمیایی اچ شد. به‌دلیل نوین بودن این روش روکش‌کاری لیزری که با تزریق سیم انجام می‌شد و به دلیل این‌که نمونه‌ای در مقالات و پایان‌نامه‌ها برای شناسایی بهتر پارامترها نبود و آشنایی بهتر با عوامل مختلف تاثیرگذار روی نتایج بدست آمده، آزمون‌های قبل از انجام بهینه سازی پارامترها انجام شد. توان دستگاه لیزر 100 تا1000 وات می‌باشد. به‌همین دلیل در توان‌های مختلف آزمون‌های انجام شد. که نشان داد از توان 100تا 700 وات کیفیت ذوب، چسبندگی و امتداد ذوب وجود نداشت و سبب کنار گذاشتن این توان‌ها شد. روی دو پارامتر دیگر یعنی سرعت روبش و نرخ تزریق سیم هم به همین شکل آزمون‌های انجام شد. که نشان داد در سرعت‌های پایین‌تر از 5 و بالاتر از 7mm/s، ذوب سطحی کامل انجام نمی‌شود همچنین باعث نازک شدن عرض پاس می‌شود. همچنین در نرخ تزریق‌های کمتر از 70 و بیشتر از80 میلی‌متر بر دقیقه، باعث گلوله گلوله شدن سیم هنگام ذوب می‌شد. گاز محافظ هم جزء عوامل تاثیرگذار روی کیفیت ذوب و چسبندگی سیم روی زیرلایه داشت، مقدار تزریق گاز محافظ در آزمون‌های مختلف بررسی شد، که در نتیجه بهترین دبی 20 لیتر بر دقیقه محاسبه شد. انجام این آزمون‌ها سبب شد که برای بهینه سازی بهتر داده‌های استفاده شود که نتایج بهتری داشته‌باشند.

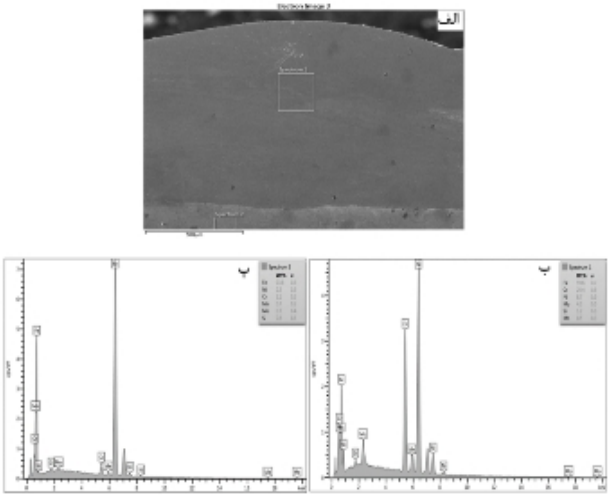
3-نتایج و بحث

پارامترهای پاسخ (عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی) با استفاده از نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد (جدول3). ویژگی‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

هندسی در شکل(4) برای یک روکش تک‌پاس و تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه‌های تک‌پاس در شکل(5) نشان داده شده است.



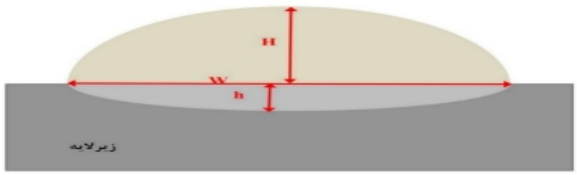
شکل3-الف-تصویر میکروسکوپی الکترونی از تک پاس بهینه ب-ترکیب شیمیایی (Wt%) سیم فولاد داپلکس 2507 و پ-ترکیب شیمیایی زیرلایه فولاد VCN 200 مورد استفاده در این تحقیق.

افزایش نرخ روبش سطح توسط لیزر سبب افزایش زمان برهمکنش بین زیرلایه و لیزر می‌شود. حداقل توانی که برای ذوب زیرلایه به‌دست آمده است، با مجذور زمان برهمکنش بین زیرلایه و پرتو لیزر رابطه عکس دارد. پس حداقل توان لازم برای ذوب زیرلایه نیز افزایش می‌یابد و ازآنجاکه توان به نسبت پایین است، در توان‌های کمتر از 500 وات هیچ روکشی ایجاد نشده است. از طرف دیگر، حداقل توان برای ذوب فیلر نیز در مدل فوق محاسبه شده است.

افزایش نرخ تزریق فیلر سبب می‌شود، که انرژی بیشتری برای ذوب فیلر و درنهایت تشکیل روکش موردنیاز باشد. به‌نظر می‌رسد که در این توان و با افزایش هم‌زمان نرخ تزریق فیلر و نرخ روبش سطح، توان موردنیاز برای ذوب فیلر نیز مانند توان موردنیاز برای ذوب زیرلایه فراهم نشده است. در توان‌های دیگر به‌نظر می‌رسد. باوجود افزایش زمان برهمکنش بین زیرلایه و لیزر، حداقل توان برای ذوب زیرلایه نیز فراهم شده است. از طرفی با افزایش نرخ تزریق فیلر، مقدار فیلر بیشتری وارد نازل لیزر می‌شود و درنتیجه ذرات بیشتری ذوب می‌شوند. پس حداقل توان لازم برای ذوب فیلر نیز در این توان‌ها ایجاد می‌شود. همان‌طور که از شکل(4) قابل مشاهده است، پارامترهای اصلی روکش‌کاری لیزری ازجمله توان لیزر، نرخ روبش سطح و نرخ تزریق فیلر روی مشخصات هندسی روکش اثر بسیار قابل‌توجهی دارند.

ارتفاع روکش (h)، پهنای روکش (w)، نرخ نفوذ روکش در زیرلایه (b)، درصد آمیختگی (D)و زاویه ترشوندگی (θ) با پارامترهای روکش‌کاری لیزری تغییر یافتند. قابل مشاهده است که افزایش در توان لیزر سبب افزایش در ارتفاع روکش، پهنای روکش، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی شده است. همچنین نرخ روبش سطح توسط لیزر روی مشخصات هندسی اثرات مختلفی داشته است.

افزایش نرخ روبش سطح سبب کاهش در ارتفاع روکش، افزایش عمق نفوذ در زیرلایه، افزایش آمیختگی روکش با زیرلایه و کاهش زاویه ترشوندگی شده است. به‌همین ترتیب نرخ تزریق فیلر نیز اثرات متفاوتی را روی مشخصات هندسی روکش از خود نشان داد. اثر پارامترها روی مشخصات هندسی نمونه‌های تک‌پاس به‌طورکلی در مباحث پیشرو موردبررسی قرار گرفته است.



شکل4-ویژگی‌های هندسی برای یک روکش تک‌پاس.

3-1-عرض روکش‌های تک‌پاس

میزان تغییرات عرض پاس رابطه مستقیم با تغییر توان لیزر دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که درنتیجه افزایش سرعت روبش، عرض پاس کاهش‌یافته است. بنابراین سرعت روبش دارای تأثیر معکوس بر عرض پاس است. افزایش سرعت روبش باعث کاهش زمان تأثیر لیزر بر ماده می‌شود. هم‌چنین با افزایش سرعت روبش، میزان انرژی ورودی در واحد سطح کاهش می‌یابد. لذا عرض پاس کاهش می‌یابد. روی‌هم قرار گرفتن و یا فاصله گرفتن نقاط با سرعت روبش در یک توان ثابت، تعیین‌کننده تأثیر پارامتر فرایندی سوم یعنی نرخ تزریق سیم است. با توجه به همپوشانی نقاط در سرعت روبش و توان ثابت می‌توان نتیجه گرفت که نرخ تزریق سیم، کمترین تأثیر را بر عرض پاس داشته است. شکل(6) میزان تأثیر سه پارامتر اصلی توان (A)، سرعت (B) و نرخ تزریق سیم (C) بر عرض تک‌پاس را نشان می‌دهد مطابق شکل توان بیشترین تأثیر و نرخ تزریق سیم ورودی کمترین اثر را در تغییر عرض تک‌پاس دارد. شکل(7) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها را با نرخ ثابت 75 میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. طبق شکل با افزایش توان و کاهش سرعت، سطح پاسخ مربوط به عرض افزایش می‌یابد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

جدول3- مقادیر اندازه‌گیری شده(تجربی) ویژگی‌های هندسی نمونه‌های تک‌پاس

پارامترهای مستقل				پارامترهای پاسخ			
کد نمونه	P(w)	F(mm/min)	V(mm/s)	W(µm)	H(µm)	b(µm)	D(%)	Z(°)
1	700	70	7	1869	502	83	53	78
2	700	75	6	1513	650	85	58	67
3	700	75	8	1787	573	84	53	78
4	700	80	7	1612	747	84	59	75
5	800	70	6	1417	622	88	50	71
6	800	70	8	1685	450	90	52	79
7	800	75	7	1805	501	90	43	70
8	800	80	6	1697	731	89	47	76
9	800	80	8	1916	507	92	57	70
10	900	70	7	1744	594	93	54	69
11	900	75	6	2017	507	91	49	73
12	900	75	8	1926	713	98	59	68
13	900	80	7	1822	546	95	48	69

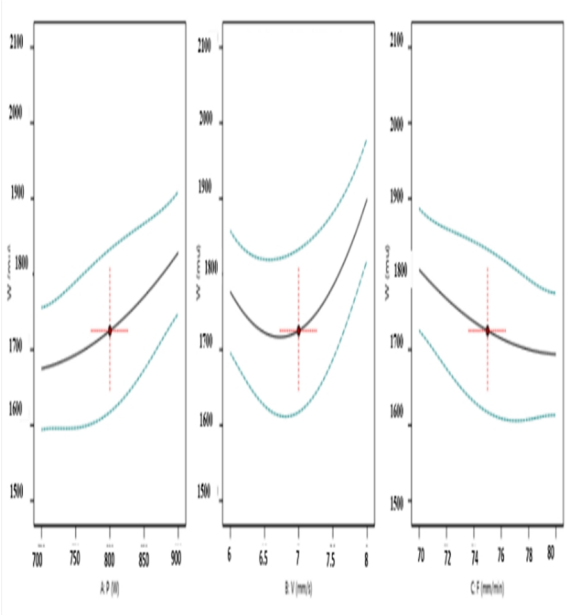
شکل5-تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه‌های تک‌پاس

می‌توان معادله (1) را معادله رگرسیون برای رابطه بین عرض روکش وپارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

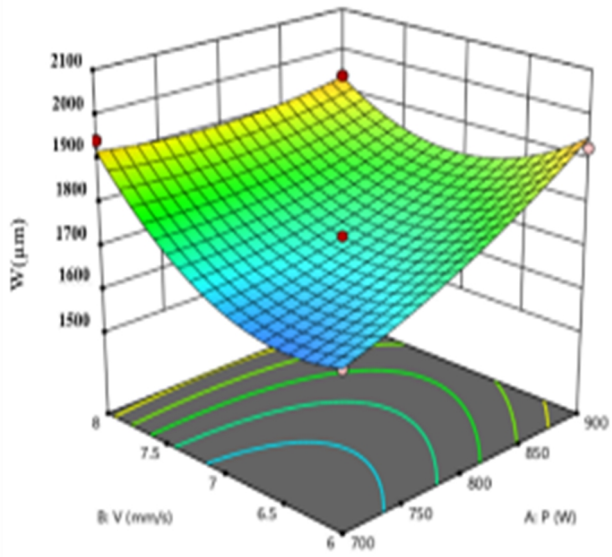
$$W= 65387.0+(-31.11750\ P) + (1007.60V) + (-866.0F) + 0.513500P*V+(-3.47750P*F) + (-26.650V*F) + (0.013013P^2)+(4.845V^2)+(568.125F^2) \quad (1)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]



شکل6- رابطه پارامترهای اصلی با میزان تغییرات عرض تک‌پاس.



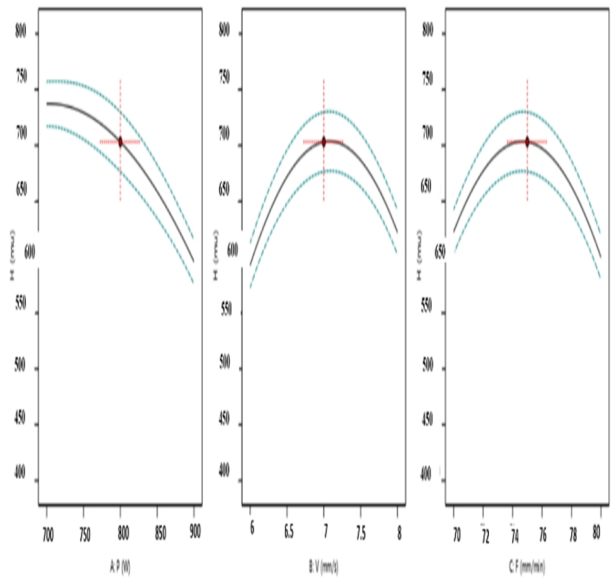
شکل 7- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ عرض تک‌پاس با تغییرات توان لیزر و سرعت روبش.

3-2-بررسی ارتفاع روکش تک‌پاس

با افزایش نرخ تزریق سیم، ارتفاع تک‌پاس افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ تزریق سیم، میزان سیم واردشده به حوضچه مذاب در واحد سطح افزایش می‌یابد و باعث صرف انرژی بیشتر لیزر جهت ذوب سیم و ایجاد رسوب می‌شود؛ همچنین با توجه به این‌که در این حالت انرژی کمتری به زیرلایه می‌رسد، ذوب کمتری در زیرلایه اتفاق خواهد افتاد.

شکل(8) میزان تأثیرگذاری توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تزریق سیم را بر ارتفاع تک‌پاس را نشان می‌دهد. مطابق این شکل درنتیجه تغییر توان، تغییر قابل‌توجهی در ارتفاع پاس رخ نمی‌دهد، که این امر نشان‌دهنده تأثیر بسیارکم توان بر ارتفاع پوشش است. شکل (9) تصـــویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با تـوان ثـابت 800 وات را نشـان می‌دهد. طبق شکل با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش سطح پاسخ مربوط به ارتفاع افزایش می‌یابد. می‌توان معادله(2) را معادله رگرسیون برای رابطه بین ارتفاع روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$H= -73401.8+(4.70*P) + (1723.98*V)+ (3070.75*F) + (0.266\ P*V) + (-0.5775\ P*F) + (37.45\ V*F) + (-0.01465\ *P^2) + (-14.72\ *V^2) + (-382.75\ *F^2) \quad (2)$$



شکل8- رابطه پارامترهای اصلی با ارتفاع تک‌پاس.

3-3-بررسی زاویه ترشوندگی روکش تک‌پاس

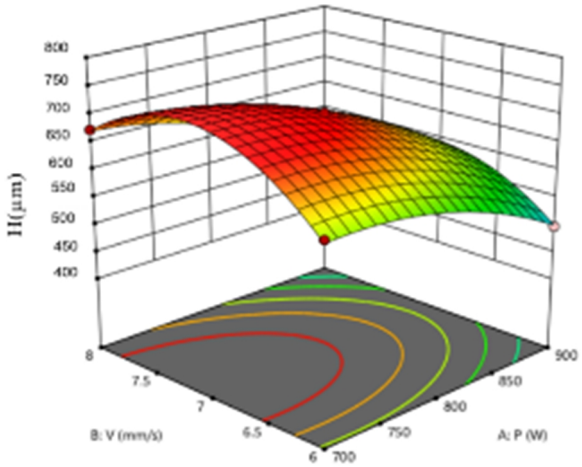
با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش، زاویه ترشوندگی افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش باعث افزایش اندک زاویه ترشوندگی خواهد شد. افزایش نرخ تزریق سیم منجر به تأثیر بیشتر لیزر بر سیم و درنتیجه منجر به افزایش ارتفاع می‌شود و این مسئله باعث افزایش زاویه ترشوندگی خواهد شد. همچنین در نرخ تزریق سیم ثابت، کاهش سرعت تأثیر مشابهی دارد و زاویه ترشوندگی را افزایش می‌دهد. شکل(10) میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر زاویه ترشوندگی را نشان می‌دهد. با توجه به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

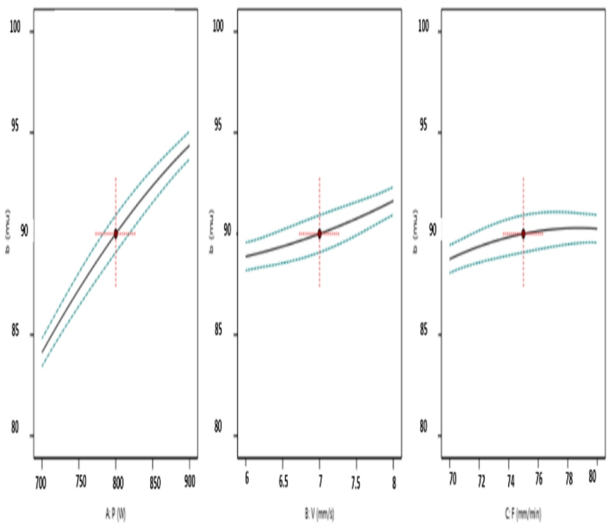
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

شکل، سرعت روبش، بیشترین تأثیر و توان کمترین تأثیر را بر میزان زاویه ترشوندگی دارد. شکل(11) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با نرخ تزریق ثابت 75 میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. طبق شکل با کاهش سرعت روبش، سطح پاسخ مربوط به زاویه ترشوندگی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل تأثیر توان بر زاویه ترشوندگی ناچیز و قابل صرف‌نظراست. شکل(12) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با توان ثابت 800 وات را نشان می‌دهد. طبق شکل با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش سطح پاسخ مربوط به زاویه ترشوندگی افزایش می‌یابد. می‌توان معادله (3) را معادله رگرسیون برای رابطه بین ارتفاع روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$Z=(-403.83)+(0.143*P) +(3.525 * V) +(85.5 * F) + (0.0015 * P * V) +(-0.04 * P * F) +(-0.7 * V * F) \quad (3)$$



شکل9- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ ارتفاع تک‌پاس

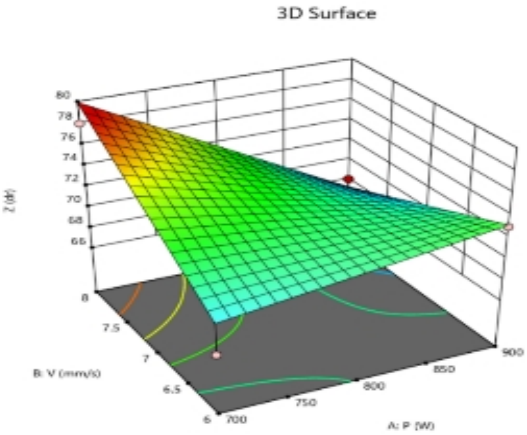


شکل10-رابطه پارامترهای اصلی و زاویه ترشوندگی.

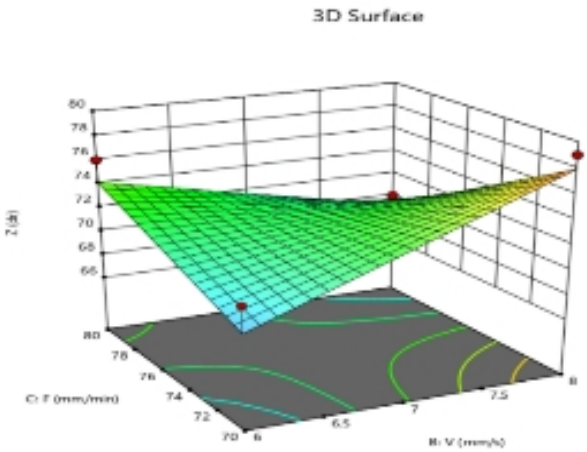
3-4-بررسی آمیختگی روکش تک‌پاس

با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت، آمیختگی کاهش می‌یابد. افزایش نرخ تزریق سیم باعث کاهش میزان برهم‌کنش با زیرلایه می‌شود. درنتیجه کاهش میزان برهم‌کنش لیزر آمیختگی کاهش خواهد یافت. شکل(13) میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر آمیختگی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نرخ تزریق سیم بیشترین تأثیر و توان کمترین تأثیر را بر میزان آمیختگی دارد. شکل(14) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با توان ثابت 800وات را نشان می‌دهد. طبق شکل با کاهش سرعت و افزایش نرخ تزریق سیم سطح پاسخ مربوط به آمیختگی کاهش می‌یابد. می‌توان معادله (4) را معادله رگرسیون برای رابطه بین آمیختگی روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$D=1591+(-0.928*P) + (-19.7 * V) + (-126.125 * F) + (-0.006 * P * V) + (0.0375 * P * F) +(0.4 * V * F) + (0.0006875 * P^2)+ (0.145 * V^2) + (4.875 * F^2) \quad (4)$$



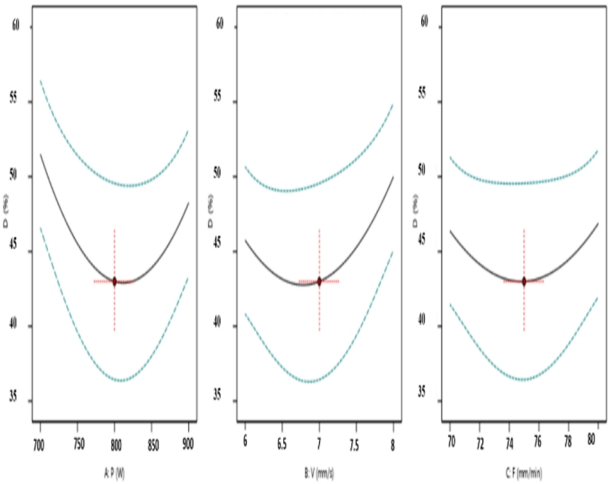
شکل11- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ زاویه ترشوندگی با تغییرات در توان و سرعت روبش در نرخ تزریق سیم ثابت 75 میلی‌متر بر دقیقه.



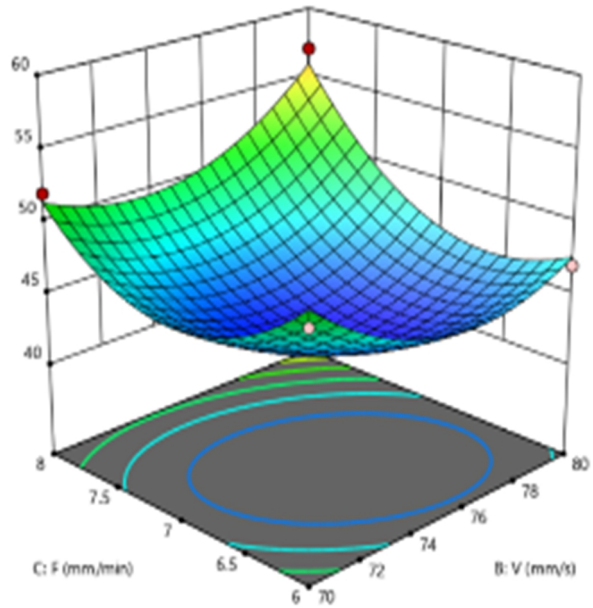
شکل 12- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ زاویه ترشوندگی برحسب نرخ تزریق و سرعت روبش در توان ثابت 800 وات.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]



شکل13- رابطه پارامترهای اصلی با میزان آمیختگی تک‌پاس.



شکل 14- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ آمیختگی با تغییرات نرخ تزریق سیم و سرعت روبش.

4-نتیجه‌گیری

- تأثیر توان لیزر، افزایش توان از 700 به 900 وات منجر به افزایش 14% در عرض، 33% در ارتفاع و 3% در زاویه ترشوندگی شد. افزایش توان لیزر باعث افزایش ارتفاع، پهنای روکش، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی شد.

- تأثیر سرعت روبش: افزایش سرعت از 6 به 8 میلی‌متر برثانیه سبب کاهش 12% در عرض، 31% در ارتفاع و 15% در زاویه ترشوندگی، در حالی‌که عمق نفوذ 4% و آمیختگی 16% افزایش یافت. کاهش سرعت روبش منجر به افزایش انرژی ورودی به واحد سطح و افزایش عمق نفوذ در زیرلایه و افزایش آمیختگی روکش با زیرلایه می‌شود. سرعت روبش تأثیر معکوس بر عرض پاس دارد.

- تأثیر نرخ تغذیه سیم: افزایش نرخ تغذیه از 70 به 80 میلی‌متر بر دقیقه باعث افزایش 13% در ارتفاع و 4% در زاویه ترشوندگی، اما آمیختگی19% کاهش یافت. افزایش نرخ تزریق سیم منجر به افزایش ارتفاع روکش و زاویه ترشوندگی می‌شود. این پارامتر کمترین تأثیر را بر عرض پاس دارد، اما بیشترین تأثیر را بر آمیختگی دارد.

منابع

1 - Zhu L, Xue P, Lan Q, Meng G. Ren Y, Yang Z, Xu P, Liu 7. " Recent research and development status of laser cladding A review. " Optics & Laser Technology. 2023.

2- Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.F., Laser cladding CRC press. 2024.

3- Silvello A, Perrone A. " Laser Cladding of Metals. " Cavaliere P, editor. Springer; 2022.

4-Borhani M, Shoja Razavi S, Kermani F, Erfan Manesh M, Barekat S, Naderi Samani H et al . Investigating the microstructure and hardness of 17-4PH steel and Stellite cladded by direct laser deposition process on 17-4PH steel substrate. JWSTI 2023; 8 (2) :69-81.

5-Shoja Razavi, S.R."Laser Cladding", Malek-Ashtar University of Technology Publications, 2019.

6-Hashemi S H, Vafaei R, Shoja-Razavi R. Microstructural characterization of the effect of energy density on direct laser deposition of stellite 6 on 316 stainless steel. JWSTI 2024; 9 (2) :129-141.

7- Chai Q, Wang Z, Fang C, Xing Y, Qiu X, Zhou Z " Numerical and experimental study on the profile of metal alloys formed on the inclined substrate by laser cladding. " Surface and Claddings Technology 2022 Sep 25.

8- Nabhani M, Razavi RS. Barekat M. " An empirical - statistical model for laser cladding of Ti - 6Al - 4V powder on Ti - 6Al - 4V substrate. " Optics & Laser Technology, 2022 Mar1.

9 - Zhang J, Zhang Q. Chen Z, Li D, Tong W, Yao J, Kovalenko V. " Experimental and statistical analyses of geometry characteristics of Inconel 718 laser clad layer with response surface methodology. " Journal of Laser Applications 2021.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]

10- Javid Y. " Multi - response optimization in laser cladding process of WC powder on Inconel 718. " CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020 Nov 1; 31: 406-17.

11- E.Liu, Dr.F. Huang, F.Bao, Dr. Y. Xue, Dr. H. Wang, Prof. Y. Jin. "Microstructure and Electrochemical Corrosion Behaviors of Laser-Cladded 2205 Duplex Stainless Steel" National Center for Materials Service Safety University of Science and Technology Beijing 2020.

12-F. Huang, E. Liu, Y. Qin, Wang, Q. Jin, Y.; Wen, L. Chang, H. "A Study of Multi-Pass Laser-Cladding 2205 Duplex Stainless Steel Cladding: Microstructure, Electrochemical Corrosion Behavior, and Wear-Resistance", Properties Journal of Materials and Design, 2022.

13-M.Barekat , R.ShojaRazavi , A.Ghasemi , " Nd : YAG laser cladding of Co Cr - Mo alloy on y - TiAl substrate . " Journal of Optics and Laser Technology, 80, 145-152, 2016.

14- M. Ansari a, R. Shoja Razavi, M. Barekat, " An empirical - statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAIY powder on Inconel 738 superalloy. " Journal of Optics and Laser Technology, 86,136- 144, 2016.

15-M.Erfanmanesh,H.Abdollah- Pour,H. Mohammadian -Semnani, R.Shoja - Razavi," An empirical- statistical model for laser cladding of WC - 12Co powder on AISI 321 stainless steel . " Journal of Optics and Laser Technology,97,180-186,2017.

16- Mohammadian - Semnani , R.Shoja - Razavi , " An empirical- statistical model for laser cladding of WC - 12Co powder on AISI 321 stainless steel . " Journal of Optics and Laser Technology, 97, 180-186, 2017.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.22]