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

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

Volume 9, Number 1, 2023



Experimental investigation of the laser coating process of the inconel 718 powder on the H13 steel

M. Safari*, A. Ahadi
Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Received 7 February 2023 ; Accepted 20 May 2023

Abstract

In the present research, the coating process of Inconel 718 powder on the H13 steel substrate by direct powder deposition method with the help of 1 KW continuous fiber laser has been investigated. Hence, the effects of process parameters such as laser power, powder feed rate and laser scanning speed on the geometrical characterstics of the clad such as height and width of the clad are examined. In order to perform a comprehensive investigation on the effect of input parameters and their interactions on the height and width of the clad, design of experiment method based on response surface methodology is employed. The results show that the laser scanning speed and powder feed rate are as the important factors affecting the clad height, so that the clad height increases with increasing powder feed rate and decreasing laser scanning rate. Also, it is proved that by increasing the laser power and decreasing the laser scanning speed the width of the clad is increased.

Keywords: Laser coating process, Laser power, Powder feed rate, Laser scanning speed.

*Corresponding Author m.safari@arakut.ac.ir

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



بررسی تجربی فرایند پوشش‌دهی با لیزر پودر اینکونل 718 بر روی فولاد H13

مهدی صفری *، **اکبر احدی**

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

دریافت مقاله: 1401/11/18 ؛ پذیرش مقاله: 1402/02/30

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی پوشش دهی پودر اینکونل 718 بر روی زیرلایه فولاد H13 به روش رسوب مستقیم پودر به کمک لیزر فیبری یک کیلو وات پیوسته پرداخته شده است. بنابراین، اثرات پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، نرخ تغذیه پودر و سرعت روبش لیزری بر مشخصات هندسی پوشش شامل ارتفاع و عرض پوشش بررسی می‌شود. به منظور بررسی جامع‌تر اثر هر یک از پارامترهای ورودی و بر هم کنش آن‌ها بر ارتفاع و عرض پوشش از روش طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش سطح پاسخ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند پارامترهای سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر به عنوان عوامل مهم اثرگذار بر ارتفاع پوشش هستند به نحوی که با افزایش نرخ تغذیه پودر و کاهش سرعت روبش لیزری ارتفاع پوشش افزایش پیدا می‌کند. همچنین ثابت می‌شود که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش لیزر عرض پوشش افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فرایند پوشش دهی با لیزر، توان لیزر، نرخ تغذیه پودر، سرعت اسکن لیزر.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.safari@arakut.ac.ir

1- مقدمه

با رشد علم و فناوری‌های مختلف در صنعت استفاده از لیزر اهمیت زیادی در صنایع مختلف به دست آورده است. امروزه لیزر ابزاری ارزشمند و پرکاربرد درعلوم مختلف به شمار می‌رود. می‌توان گفت یکی ازپرکاربردترین استفاده‌های لیزر، استفاده درعلوم فنی مهندسی است. با توجه به این که اغلب قطعات صنعتی در شرایط سایشی استفاده می‌شوند، به‌علت از دست دادن خواص مکانیکی سطح خود بعد از مدتی کارکرد نیاز به تعویض‌دارند. بنابراین سالانه هزینه زیادی‌صرف تعویض و جایگزینی قطعات فرسوده می‌شود. همچنین خسارت‌های حاصل از خوردگی فلزات در صنعت، هزینه فراوانی در بردارد، چرا که حدود نیمی از تولید سالانه فولاد برای تعویض قطعات مکانیکی خورده شده به کار می‌رود. بدین دلیل صنایع مختلف در صدد یافتن روش‌هایی جهت تولید قطعات با خواص سطحی مورد نیاز شده‌اند. یکی از این روش‌ها، بهبود خواص سطحی قطعات با استفاده از لیزر است که استفاده صحیح از آن

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

باعث افزایش طول عمر قطعات، کاهش هزینه‌های تولید و کاهش زمان تولید خواهد شد. بهبود خواص سطحی با استفاده از پرتو لیزر به‌عنوان منبع حرارتی در سال‌های اخیر و در کاربردهای مختلف روند رو به رشدی داشته است. از جمله این روش‌ها عملیات حرارتی سطحی، آلیاژسازی سطحی و پوشش‌کاری سطحی جهت افزایش مقاومت به سایش، حرارت و خوردگی با استفاده از لیزر است. در واقع با استفاده از این روش‌ها می‌توان بدون صرف هزینه‌ی بالا در انتخاب مواد، خواص مورد نظر را در محل‌های مورد نیاز ایجاد کرد. روش‌هایی که از پرتو لیزر به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌کنند، دارای سرعت گرمایش و سرمایش بالا هستند؛ بنابراین منجر به ایجاد لایه‌های سخت و مقاوم به سایش در محل‌های مورد استفاده می‌شوند. می توان گفت پوشش‌کاری لیزری به اعمال پرتو لیزر پر انرژی به عنوان منبع حرارتی به آلیاژ مخصوص پوشش‌کاری و ذوب آن، سپس انجماد آلیاژ مایع بر روی زیر لایه گفته می‌شود. همچنین پرتو لیزر سبب ذوب سطحی زیرلایه و ایجاد پیوند متالورژیکی قوی بین ماده پوشش و زیرلایه که با درصد رقیق شدگی پایین مد نظراست، می‌شود. هدف از پوشش‌کاری لیزری می‌تواند ایجاد سختی در سطح قطعات حساس به سایش، خوردگی، اکسیداسیون و یا تلفیقی ازاین خواص باشد. از این روش برای ترمیم برخی عیوب هندسی قطعات نیز استفاده می‌شود. پوشش‌کاری لیزری بر روی قطعات فرسوده به منظور ترمیم و همچنین قطعات نو به منظور ایجاد ویژگی‌های خاص سطحی به کار می‌رود. حرارت ورودی کم در پوشش‌کاری لیزری منجر به آمیختگی حداقلی پوشش و زیرلایه شده و منطقه متاثر از حرارت باریکی در زیرلایه ایجاد می‌کند که خود سبب به حداقل رسیدن پیچیدگی و اعوجاج می‌شود. تاکنون گستره وسیعی از مواد نظیر فلزات، سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های فلز/سرامیک دراین روش مورد برسی قرار گرفته‌اند. از کاربردهای فراوان این روش درصنایع مختلف می‌توان به پوشش دهی و تعمیر پره‌های توربین بخار، پوشش‌کاری برنز نیکل/آلومینیوم جهت تعمیر قطعات دریایی و پوشش سوپرآلیاژها روی قطعات موتور اشاره کرد. برای فرایند پوشش کاری با لیزر دو روش اصلی وجود دارد. پوشش‌کاری لیزری یک مرحله‌ای که در آن اعمال پرتو لیزر و اضافه شدن ماده آلیاژی به طور همزمان صورت گرفته، و ماده آلیاژی به صورت تغذیه پودر، تغذیه سیم و خمیر دراین فرایند به کار می‌رود. پوشش‌کاری لیزری دو مرحله‌ای که مرحله اول به قرار گیری لایه‌ای از مواد پوششی بر روی زیر لایه قبل از تابش پرتو لیزر اختصاص می‌گیرد. و در مرحله دوم اعمال پرتو لیزر سبب ذوب ماده پوششی قرار گرفته بر روی زیرلایه می‌شود. تاکنون تحقیقاتی در زمینه پوشش کاری با لیزر توسط محققین انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می شود. فشارکی و همکاران [1] در سال 2018 به بررسی ریزساختار پوشش اینکونل 625 به دست آمده با استفاده از روش‌های پوشش‌دهی لیزر و پوشش تیگ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پوشش لیزر به دلیل انرژی ورودی کمتر و بالاتر بودن سرعت خنک‌کاری دارای ریزساختار ظریف‌تر است. لو و همکاران [2] در سال 2019 به بررسی ریزساختار و میکروسختی پوشش چند لایه ازجنس پودرآهن مخلوط با نیکل و مولیبدن برروی زیرلایه ازجنس فولاد H13K پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماتریس دندریت وساختار یوتکتیکی خالص مانند دندریت داخلی درلایه پوشش پیدا شد. علاوه براین منطقه پیوند به دلیل ذوب و گرمایش مجدد از دندریت‌های درشت تشکیل شده است. گو و همکاران [3] در سال 2012 به بررسی ویژگیهای پوشش لیزری کامپوزیت NiCrBSi/WC-Ni بر روی فولاد زنگ نزن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میکروسختی و مقاومت سایشی پوشش‌های پایه نیکل پس از اضافه شدن ذراتWC-Ni تا حد زیادی افزایش می‌یابد.

شنگ و همکاران [4] در سال 2021 به بررسی پوشش دهی آلیاژ آنتروپی بالای AlCoNiCrFe-WC-WS2 بر روی سطح چدن به روش لیزری پرداختند. آن‌ها با بررسی اثر پارامترهای فرایند دریافتند که با افزایش قدرت لیزر، به تدریج مقدار پودر ذوب نشده، ترک و حفره‌ها در داخل پوشش کاهش، و همچنین ضخامت و چگالی افزایش می‌یابد. عقیلی و همکاران [5] درسال2019 به بررسی‌پوشش‌لیزری‌مخلوط پودر NiCr-Cr3C2

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

بر روی زیرلایه آلومینید تیتانیوم پرداختند و اثر پارامترهای توان لیزر، میزان تغذیه پودر و سرعت اسکن بر خصوصیات هندسی پوشش را بررسی کردند. کاتیر و همکاران [6] در سال 2015 به بررسی خصوصیات پوشش لیزری CPM 9V بر روی فولاد ابزار H13 که جهت ترمیم قالب اعمال شده است پرداختند. اثر پارامترهای لیزر بر هندسه و کیفیت پوشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که ارتفاع پوشش با افزایش سرعت اسکن کاهش و با افزایش سرعت تغذیه پودر افزایش می‌یابد. ژو و همکاران [7] در سال2020 به بررسی و مطالعه بازسازی چرخ‌دنده فولادی شکسته شده با استفاده از پودر فولاد H13 براساس فناوری پوشش لیزری پرداختند. آنها دریافتند که در مقایسه با دندانه اصلی، دندانه بازسازی شده دارای خاصیت کششی کمتر، اما سختی و مقاومت به سایش بهتر است. جاوید [8] در سال 2020 به مطالعه فرایند پوشش لیزری کاربید تنگستن بر روی اینکونل 718 پرداخت.

نتایج او نشان داد که قدرت لیزر عامل مؤثر بر رقت و عرض پوشش است، در حالی‌که تخلخل و ترک‌ها به شدت تحت تاثیر سرعت اسکن قرار دارند. خرم و همکاران [9] در سال 2019 به بررسی پوشش لیزری اینکونل 718 با پودر (20Cr Ni 80)25 + 75Cr3C2 به روش طراحی آزمایش پرداختند. فرکانس لیزر، عرض پالس و سرعت اسکن به عنوان متغیرهای ورودی و هندسه پوشش به عنوان پاسخ خروجی در نظر گرفته شدند. مشخص شد که فرکانس لیزر و عرض پالس تأثیر مثبتی بر عرض، زاویه پوشش و نسبت رقت دارند اما تأثیر منفی بر ارتفاع و سختی پوشش دارند.

کوی و همکاران [10] در سال 2011 به بررسی پوشش آلیاژی پایه کبالت بر روی فولاد ابزار T10 توسط تغذیه پودر و لیزر پیوسته دی اکسید کربن پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در مقایسه با زیرلایه فولادی، ریزسختی کامپوزیت تقویت شده مبتنی بر کبالت به طور قابل توجهی افزایش یافته و حداکثر مقدار ریزسختی در وسط پوشش وجود دارد. وردی و همکاران [11] در سال 2015 ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار سایش موضعی در پاسخ به افزودن ذرات سرامیکی Cr3C2 به آلیاژ اینکونل625 که با پوشش لیزری بر روی یک بستر فولادی فریتی رسوب داده شده بود، بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که پوشش‌هایی با پیوند متالورژیکی بالا، بدون ترک یا لایه‌لایه شدن در فصل مشترک پوشش و بسترتشکیل شد. وو و همکاران [12] در سال 2013 ریزساختار و رفتار سایش پوشش‌لیزری سرامیکی CV-Cr7C3 بر روی بستر فولادی را بررسی کردند. نمونه‌های پوشش‌لیزری را تحت آزمایش‌های مختلف ریزساختار، میکروسختی و تست‌های سایش قرار دادند. آنها دریافتند که پوشش بدون نقص با اتصال متالورژیکی به زیرلایه فولادی به دست آمده و مقدار ذرات CV-Cr7C3 به تدریج از پایین به بالای پوشش افزایش پیداکرده و میانگین سختی پوشش تا 1050HV به طور قابل توجهی بیشتر از زیرلایه 150HV شد. گوتام وهمکاران [13] در سال 2020 به بررسی تجربی پوشش دهی لیزری پودر NiCrBSi + WC بر روی فولاد زنگ نزن 410 پرداختند.

نتایج آنها نشان داد که پوشش لیزری پیوند متالورژیکی خوبی با بستر دارد و تصاویر میکروسکوپی، وجود ساختار دندریت C-Ni و ذرات WC را در ماتریس نیکل نشان دادند. علیزاده و همکاران [14] در سال 2020 ترک خوردگی انجماد در هنگام پوشش لیزری پودر اینکونل 718 بر روی سوپرآلیاژ آهن A-286 که به عنوان آلیاژ حساس به ترک داغ معروف است را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که نسبت رقت، ویژگی اصلی ساختاری حاکم برای جلوگیری از ترک خوردگی انجماد است و پوشش لیزری بدون ترک در منطقه با نسبت رقت کمتر از 10% واقع شد. سعیدی و همکاران [15] در سال 2021 بهینه‌سازی و شناسایی پوشش لیزری پوشش‌های کامپوزیت NiCr و NiCr–TiC بر روی فولاد زنگ‌نزن AISI 410 را مورد مطالعه قراردادند. هدف از این تحقیق، پوشش لیزری پودرهای NiCr و NiCr-TiC و تولید کامپوزیت NiCr-TiC با زمینه فلزی بر روی بستر فولاد زنگ نزن به منظور افزایش صلبیت و مقاومت در برابر فرسایش بود. مشاهده شد که ساختار پوشش از فصل مشترک به بالا از دندریت‌های سلولی، ستونی و هم محور تشکیل شده است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

حبیبی و همکاران [16] در سال 2021 به بررسی اثر گاز محافظ آرگون بر روی پوشش لیزری پودر نانوساختار WC-12Co بر روی زیرلایه فولاد زنگ نزن AISI 321 پرداختند. به منظور ارزیابی اثر گاز محافظ آرگون، فرایند پوشش با حضور و بدون حضور گاز محافظ آرگون انجام شد. خصوصیات ریزساختاری و فازی نشان داد که حضور گاز آرگون می‌تواند کربن زدایی WC را کاهش دهد و کسر نسبی فاز WC در پوشش‌ها را تا 74% برساند. کاظمی و همکاران [17] در سال 2023 یک لایه فولاد ضدزنگ آستنیتی SA240-TP316 بر روی فولاد SA516-GR60 پوشش دادند.

آن‌ها همچنین آزمایش‌هایی را برای مقایسه خواص مکانیکی جوش فولاد زنگ نزن اولیه و فولاد کلد شده SA516-GR60 انجام دادند تا امکان پذیری جایگزینی پوشش ایجاد شده به جای فولاد زنگ نزن SA240-TP316 را بررسی کنند. برهانی و همکاران [18] در سال 2023 به بررسی روکش‌کاری لیزری پودرهای استلایت6 و فولاد زنگ‌نزن بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌نزن و بررسی ریزساختار انجمادی آن‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد ریزساختار پوشش استلایت6 دارای فاز زمینه محلول جامد کبالت با ساختار FCC و کاربیدهای Cr7C3 و Cr23C6 است. همچنین مقادیر فاصله دندریت اولیه و فاصله بازوی ثانویه دندریت با دور شدن از فصل مشترک کاهش یافته است.

در این پژوهش ایجاد پوشش اینکونل 718 بر روی زیرلایه‌ای از جنس فولاد ابزار H13 به کمک فرایند پوشش دهی لیزری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به منظور بررسی جامع اثر پارامترهای فرایند با در نظر گرفتن بر هم کنش آن‌ها از روش طراحی آزمایش استفاده می شود. توان لیزر، سرعت حرکت لیزر نسبت به قطعه کار و نرخ تغذیه پودر به عنوان پارامترهای ورودی و ویژگی‌های هندسی پوشش شامل عرض و ارتفاع پوشش به عنوان پارامتر خروجی مد نظر قرار می‌گیرند. همچنین اثر هر پارامتر و همچنین برهم کنش پارامترها به همراه معادله رگرسیون برای عرض و ارتفاع پوشش با استفاده از تحلیل های آماری ارائه می‌شوند.

2- مواد و روش پژوهش

زیرلایه مورد استفاده در این پژوهش فولاد ابزار گرم‌کار H13 می‌باشد. فولادهای ابزار گرم‌کار در مواقعی‌که قطعه در درجه حرارت‌های بالا (600-1100 درجه سانتی‌گراد) کار می‌کند مورد استفاده قرار می‌گیرند. فولادهای ابزار کروم دار مقاومت بیشتری در مقابل تنش‌های متناوب و بروز ترک‌های حرارتی بر اثر استفاده از مایعات خنک کننده و در نتیجه تغییر سریع درجه حرارت از خود نشان می‌دهد. فولاد H13 یکی از مهم‌ترین فولادهای ابزار گرم‌کار کروم‌دار است که مهم‌ترین عناصر آلیاژی آن شامل کروم، مولیبدن و وانادیوم می‌باشد. ترکیب شیمیایی فولاد ابزار گرمکار H13 در جدول (1) آورده شده است. مهم‌ترین ویژگی‌های این فولاد که سبب کاربرد آن در صنعت شده است عبارتند از: مقاومت به سایش در دماهای بالا و پایین، چقرمگی و انعطاف‌پذیری خوب، قابلیت تراشکاری و پولیش‌کاری عالی، استحکام خوب در دماهای بالا، مقاومت به خستگی حرارتی، سختی‌پذیری عالی، اعوجاج کم در عملیات حرارتی و سخت‌کاری و مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی. این ویژگی‌ها سبب می‌شود تا فولاد ابزار گرمکار H13 کاربرد وسیعی در ساخت اجزا و قالب‌های اکستروژن و ریخته‌گری تحت فشار فلزات غیرآهنی مثل آلومینیوم، منیزیم، روی و مس، قالب‌های آهنگری سرد و داغ، کله‌زنی سرد و داغ، پین‌های بیرون انداز، محفظه‌های انتقال، میله‌های تزریق ریخته‌گری، شکل‌دهی و بسیاری کاربردهای صنعتی دیگرداشته باشد.

همچنین در این پژوهش از پودر اینکونل 718 به عنوان ماده پوششی استفاده شده است. اینکونل 718 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل می‌باشد که استحکام و چقرمگی خود را تا دمای حدود 500 درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کند. آلیاژهای پایه نیکل خواص مکانیکی خود را تا دماهای بالا حفظ می‌کنند و مقاوم به خوردگی هستند. بنابراین، این مواد برای کاربرد در محل‌هایی که در شرایط خوردگی و سایش دما بالا هستند، مناسب هستند. به دلیل خواص دمای بالا خوب به طور گسترده در کاربردهای هوافضا و هسته‌ای استفاده می‌شود. در شکل(1) مورفولوژی پودر اینکونل 718 به صورت تقریباً کروی با اندازه حدود

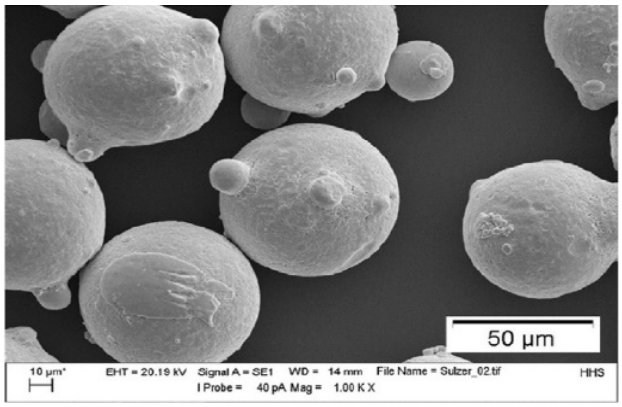
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد ابزار H13.

عنصر (درصد وزنی)	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Mo	Ni
کمینه	۰/۳۲	۰/۲	–	–	۰/۸	۴/۷۵	۰/۸	۱/۱۰	–
بیشینه	۰/۴۵	۰/۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۲۶	۵/۵	۱/۲	۱/۷۵	۰/۳۰

60-90 میکرومتر نشان داده شده است که جهت انجام فرایند پوشش‌کاری لیزری مناسب می‌باشد.



شکل 1- تصویر مورفولوژی پودر اینکونل 718 به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)

لیزری مورد استفاده در انجام این پژوهش، لیزر فیبری با حداکثر توان 1000 وات و موج پیوسته می باشد. دستگاه تغذیه کننده پودر که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته به صورت دوقلو بوده که این امکان را فراهم می‌کند دو پودر مجزا را همزمان بتوان استفاده کرد. درصد ترکیب پودرهای هر سیلندر توسط اپراتور و به کمک نرم افزار کامپیوتری موجود قابل تنظیم و کنترل است. پودر موجود در مخازن به کمک گردش دیسک پودر پاش منتقل می شود.

2-1- روش طراحی آزمایش

در تحلیل مسائل مهندسی از جمله انجام آزمایش‌های تجربی که در آن‌ها پاسخ خروجی مسئله تحت تأثیر متغیرهای مختلف ورودی است، بهره‌گیری از روش‌های آماری آزمایش‌ها کمک شایانی به طراحی، مدل‌سازی و تحلیل دقیق این فرایندها می‌نماید. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب ترین روش‌ها برای محققین در بهبود و اصلاح و صرفه جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آن‌ها می‌باشد. یکی از بهترین روش‌های آماری در طراحی آزمایش‌ها، روش سطح پاسخ است. تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارائه نمودارهای برهم‌کنش‌متغیرهای‌ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها از مزایای مهم روش سطح پاسخ است. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه متغیرها و بر هم‌کنش‌های مؤثر به صورت معادله1 می‌باشد[20].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon$$
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i} \sum_{j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

با توجه به توضیحاتی‌که در بخش مقدمه در رابطه با پارامترهای مهم فرایند پوشش‌کاری لیزری ارائه شد و همچنین مطالعات صورت گرفته در مقالات و پژوهش‌های پیشین، در این پژوهش سه پارامتر توان لیزر، سرعت روبشی و همچنین نرخ تغذیه پودر در فرایند پوشش‌کاری لیزری به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین با انجام آزمایش‌های سعی و خطا، برای هر پارامتر حدود بالا و پایین تعیین شده است. در جدول (2)، لیست آزمایش‌های پوشش‌دهی لیزری مورد بررسی در این پژوهش براساس روش سطح پاسخ نشان داده شده است.به منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا زیرلایه مورد نظر از جنس فولاد گرمکار H13 تهیه می‌شود. سپس به صورت بلوک‌هایی در ابعاد 8×25×60 میلی‌متر برش داده شده و به منظور ایجاد سطح صاف و یکنواخت، سطح نمونه‌ها سنگ زده می شوند. همچنین سطح قطعه زیرلایه به منظور پاک‌سازی از روغن و سایر آلودگی‌ها توسط الکل و سپس آب مقطر شستشو می‌شوند. پودر اینکونل تهیه شده نیز که اصالت آن به کمک آنالیزشیمیایی مورد تایید قرارگرفته است قبل از شروع فرایند پوشش‌کاری به منظور از بین بردن رطوبت احتمالی در دمای 100 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در کوره حرارتی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

قرار داده می‌شود. سپس سیلندر دستگاه پودرپاش از پودر پرمی‌شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در این پژوهش توان لیزر، سرعت روبشی و نرخ تغذیه پودر به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. پارامترهای ثابت این پژوهش نیز دبی گازمحوری (محافظ)، دبی گازحامل پودر، فاصله نازل از سطح قطعه کار و همچنین موقعیت کانونی لیزر بوده که مقادیر آن‌ها به ترتیب 3 لیتر بر دقیقه، 1/5 لیتر بر دقیقه، 15 میلی‌متر و 4- میلی‌متر می باشد.

جدول 2- لیست آزمایش‌های پوشش دهی لیزری مورد بررسی در این پژوهش بر اساس روش سطح پاسخ.

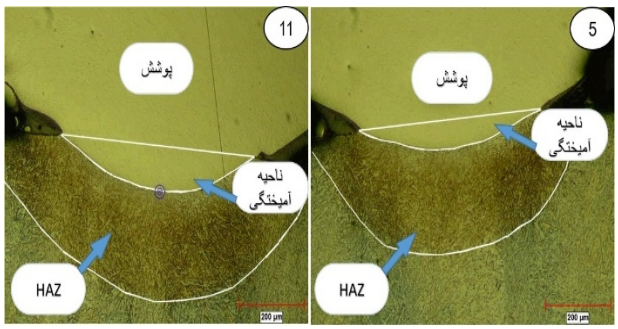
شماره آزمایش	توان لیزر(وات)	سرعت روبش لیزر (میلی متر بر ثانیه)	نرخ تغذیه پودر (گرم بر دقیقه)
1	200	3	12/64
2	350	2/5	17/94
3	250	2/5	17/94
4	250	2/5	17/94
5	250	2/5	8/27
6	250	2/5	28/52
7	300	2	23/28
8	300	2	12/64
9	200	2	23/28
10	200	2	12/64
11	300	3	12/64
12	250	2/5	17/94
13	250	3/5	17/94
14	300	3	23/28
15	150	2/5	17/94
16	250	1/5	17/94
17	200	3	23/28

همچنین در این پژوهش از گاز آرگون به عنوان گازهای محافظ و حامل پودر استفاده شده است که از دو مخزن مجزا تغذیه می‌شوند. در شکل(2) برخی از پوشش‌های لیزری ایجاد شده بر روی قطعه زیر لایه نشان داده شده است.

پس از انجام فرایند پوشش دهی لیزری، به منظور بررسی هندسه پوشش و اندازه‌گیری عرض و ارتفاع پوشش، نمونه‌های پوشش‌دهی شده به کمک دستگاه وایرکات برش داده می شوند. سپس نمونه های برشکاری شده مانت شده و پس از آن فرایند سمباده زنی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. همچنین به منظور آشکارسازی ریزساختار جهت اندازه گیری ابعاد پوشش، زیرلایه به کمک معرف نایتال و پوشش اینکونل 718 به وسیله گلیسیراژ به صورت شیمیایی اچ می‌شوند. تصاویر مورد نظر از قسمت‌های مختلف پوشش شامل زیرلایه و پوشش ایجاد شده توسط میکروسکوپ نوری استخراج شده و در شکل(3) تصاویر مقطع برش، ناحیه آمیختگی و HAZ نمونه‌های پوشش‌دهی شده مربوط به تست‌های شماره 5 و 11 از جدول(2) نشان داده شده اند.



شکل 2 - برخی از پوشش‌های لیزری ایجاد شده بر روی قطعه زیر لایه.



شکل 3-تصاویر مقطع برش، ناحیه آمیختگی و HAZ در نمونه‌های 5 و 11.

3- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی اثر پارامترهای ورودی فرایند پوشش‌دهی لیزری بر هندسه پوشش ایجاده شده پرداخته می‌شود. دامنه تغییرات پارامترهای ورودی شامل توان لیزر350-150 وات، سرعت روبش لیزر: 1/5 – 3/5 میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر 8/28 – 27/52 گرم بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

جدول3– نتایج آنالیز واریانس برای ارتفاع پوشش های لیزری ایجاد شده بر روی زیرلایه.

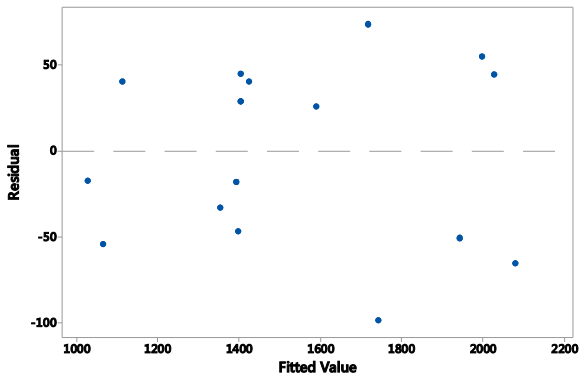
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	1791827	255975	55.74	0.000
Linear	3	1518189	506063	110.21	0.000
power	1	125493	125493	27.33	0.001
s.s	1	932673	932673	203.11	0.000
p.f	1	460023	460023	100.18	0.000
Square	2	201716	100858	21.96	0.000
power*power	1	189240	189240	41.21	0.000
s.s*s.s	1	53014	53014	11.54	0.008
2-Way Interaction	2	71922	35961	7.83	0.011
power*p.f	1	43956	43956	9.57	0.013
s.s*p.f	1	27966	27966	6.09	0.036
Error	9	41327	4592		
Lack-of-Fit	7	41157	5880	68.90	0.084
Pure Error	2	171	85		
Total	16	1833154			

3-1- ارتفاع پوشش

در جدول (3)، نتایج آنالیز واریانس برای ارتفاع پوشش‌های لیزری ایجاد شده بر روی زیرلایه نشان داده شده است. در این جدول توان با علامت power، سرعت روبشی با علامت s.s و نرخ تغذیه پودر با عنوان p.f ارائه شده اند.

با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P-Value کمتر از 0/05 به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که مقدار P-Value کمتر از 0/05 باشد نشان دهنده موثر بودن پارامتر مورد نظر بر هندسه پوشش است. با درنظر گرفتن مقادیر R-sq= 97.75 % و R-sq (adj)= 95.99 % و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل(4) می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت‌گرفته از دقت بسیارخوب و مناسبی برخوردار است.

مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نموده و در مبحث طراحی آزمایش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مولفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل بدست آمد.

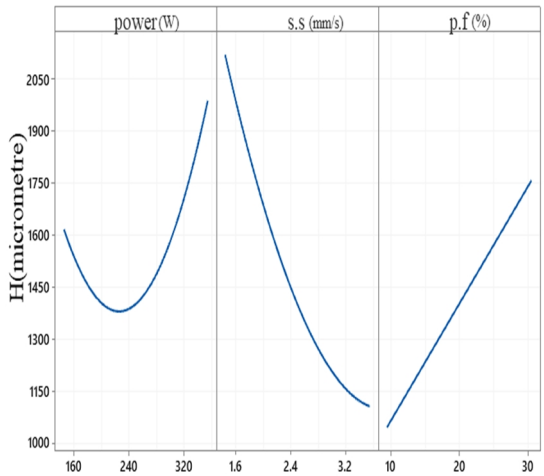


شکل 4- پراکندگی باقیمانده‌ها در آزمایش نسبت به مدل به دست آمده توسط نرم افزار Minitab برای ارتفاع پوشش.

معادله(2) معادله رگرسیون حاکم بر رابطه پارامترهای ورودی و ارتفاع پوشش را نشان می‌دهد :

$$h=2296 - 10.46\ power - 971\ s.s + 167.2\ p.f + 0.03633\ power*power + 192.3\ s.s*s.s - 0.2965\ power*p.f - 23.65\ s.s*p.f \quad (2)$$

شکل(5) رفتار ارتفاع پوشش را براساس متغیرهای ورودی فرایند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ نشان می دهد.



شکل 5- رفتار ارتفاع پوشش را براساس متغیرهای ورودی فرایند طبق مدل-سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ

به منظور پیدا کردن میزان تاثیر هر پارامتر موثر بر ارتفاع پوشش به شیب نمودار حاصل از اثر آن پارامتر بر ارتفاع پوشش توجه می‌شود، هرچه شیب نمودار بیشتر باشد نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر بر ارتفاع پوشش می‌باشد.

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

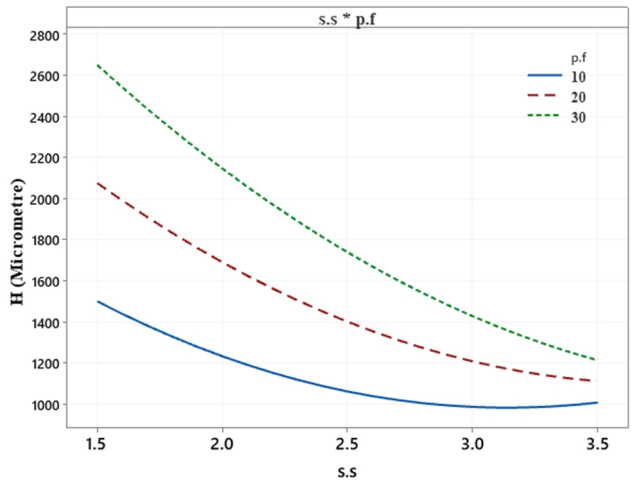
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

روش دیگر جهت پیدا کردن میزان تاثیر هر پارامتر بر ارتفاع پوشش از طریق تقسیم کردن مقدار عبارت(Adj SS) هر پارامتر بر مقدار (Total- AdjSS) در جدول آنالیز واریانس بدست می‌آید. براساس آنالیز صورت گرفته، درصد تاثیر توان لیزر6/84%، سرعت روبش لیزری 50/88% و نرخ تغذیه پودر 25/09% بدست می‌آید که خود نشان دهنده تاثیر بالای تغییرات سرعت روبش لیزری بر ارتفاع پوشش نسبت به تغییرات نرخ تغذیه پودر و توان لیزر است. همچنین تاثیرتغییرات نرخ تغذیه پودر نسبت به توان لیزر به مراتب بالاتر می‌باشد. پس توان لیزر تاثیر کمتری نسبت به سایر عوامل بر ارتفاع پوشش دارد. می‌توان این‌گونه بیان کرد که سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر به عنوان عوامل اصلی بیشترین تاثیر را بر ارتفاع پوشش دارند. همان‌گونه که از شکل (5) مشاهده می‌شود با افزایش نرخ تغذیه پودر و همچنین کاهش سرعت روبش لیزری ارتفاع پوشش‌ها افزایش پیدا می‌کند.

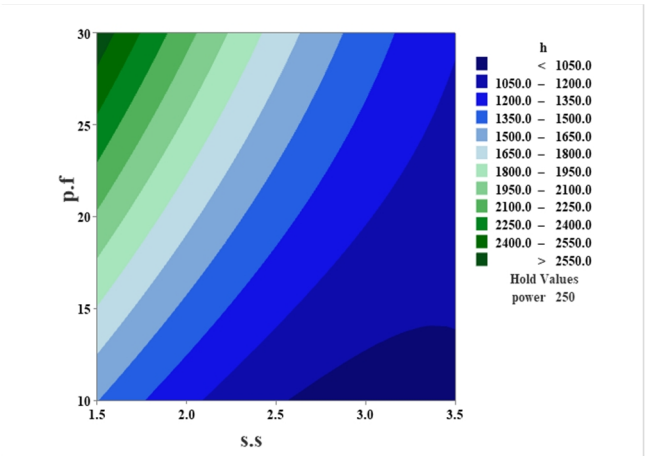
با افزایش نرخ تغذیه پودر مقدار پودر بیشتری به نمونه می‌رسد در نتیجه انرژی توسط پودر بیشتری جذب شده و پودر ذوب شده بیشتری داخل حوضچه مذاب وارد می‌شود بنابراین ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد، از طرفی وقتی سرعت روبش کاهش می‌یابد مدت زمان برهم‌کنش لیزر با مواد افزایش می‌یابد و مقدار بیشتری از پودرهای وارد شده به نقطه ذوب رسیده و ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد. همچنین باید در نظر داشت که پودر با نازل در حرکت است و با کاهش سرعت روبش لیزر نرخ تغذیه پودر حوضچه مذاب بیشتر می‌شود که همین عامل نیز سبب افزایش ارتفاع پوشش می‌شود. تاثیر توان لیزر را می‌توان اینگونه تحلیل کرد که با افزایش توان لیزر دمای ایجاد شده نیز افزایش می یابد و در نتیجه پودر بیشتری ذوب می‌شود و ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد.

در شکل(6)، برهم‌کنش دو پارامتر اصلی سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر به عنوان پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر ارتفاع پوشش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در یک سرعت روبش مشخص با افزایش نرخ تغذیه پودر، ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد.

با بررسی نمودار دو بعدی ارتفاع پوشش برحسب سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر در شکل(7) می‌توان دریافت زمانی بیشترین ارتفاع پوشش حاصل می‌شود که سرعت روبش لیزری در پایین‌ترین سطح خود یعنی 1/5 میلی‌متر برثانیه و نرخ تغذیه پودر در بالاترین سطح خود یعنی 28/52 گرم بر دقیقه قرار داشته باشد.



شکل 6- اثرات متقابل دو پارامتر سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر بر ارتفاع پوشش.



شکل 7- نمودار دو بعدی ارتفاع پوشش برحسب سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر به عنوان متغیرهای ورودی.

با تغییر مقدار سرعت روبش از 1/5 به 3/5 میلی‌متر بر ثانیه زمان تعامل پرتو لیزر با ذرات پودر کاهش پیدا کرده و مقدار کمتری انرژی توسط ذرات پودر جذب شده که سبب کاهش ارتفاع پوشش می‌شود. ذرات پودر خارج شده از نازل در اثر برخورد با پرتو لیزر انرژی جذب کرده و ذوب می‌شوند با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

کاهش جذب انرژی توسط ذرات پودر که بر اثر افزایش سرعت روبش لیزر حاصل شده است، مقدار پودر ذوب شده که وارد حوضچه مذاب می‌شود کاهش پیدا می‌کند درنتیجه ارتفاع پوشش کاهش پیدا می‌کند.

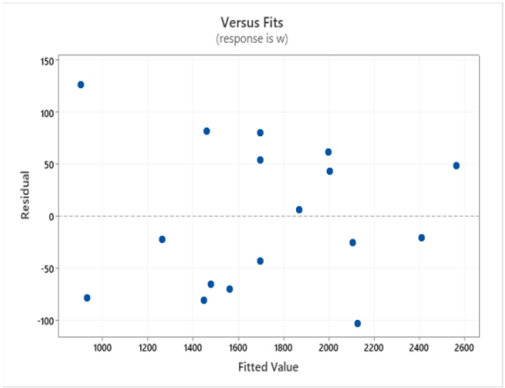
3-2- عرض پوشش

عرض پوشش ازجمله پارامترهای مهمی است که میزان بازدهی فرایند را تعیین می‌کند، با افزایش عرض پوشش، تعداد پاس‌های لیزری لازم جهت پوشش دادن کل سطح کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه زمان کلی فرایند کاهش می‌یابد. در جدول(4) ، نتایج آنالیز واریانس برای عرض پوشش‌های لیزری ایجاد شده بر روی زیرلایه نشان داده شده است. در این جدول توان با علامت power، سرعت روبشی با علامت s.s و نرخ تغذیه پودر با عنوان p.f ارائه شده اند.

جدول4– نتایج آنالیز واریانس برای عرض پوشش‌های لیزری ایجاد شده بر روی زیرلایه.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	3400311	566719	74.98	0.000
Linear	3	3055596	1018532	134.75	0.000
power	1	1132628	1132628	149.85	0.000
s.s	1	1177768	1177768	155.82	0.000
p.f	1	745201	745201	98.59	0.000
Square	2	313340	156670	20.73	0.000
power*power	1	76919	76919	10.18	0.010
s.s*s.s	1	150434	150434	19.90	0.001
2-Way Interaction	1	31375	31375	4.15	0.069
power*p.f	1	31375	31375	4.15	0.069
Error	10	75584	7558		
Lack-of-Fit	8	67180	8397	2.00	0.376
Pure Error	2	8405	4202		
Total	16	3475896			

با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P-Value کمتر از 0/05 به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که مقدار P-Value کمتر از 0/05 باشد نشان دهنده موثر بودن پارامتر مورد نظر بر هندسه پوشش است. با درنظر گرفتن مقادیر R-sq= 97.83 % و R-sq(adj)= 96.52 % و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل(8) می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت‌گرفته از دقت بسیارخوب و مناسبی برخوردار است. مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نموده و در مبحث طراحی آزمایش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.



شکل 8- پراکندگی باقیمانده‌ها در آزمایش نسبت به مدل به دست آمده توسط نرم افزار Minitab برای عرض پوشش.

هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مولفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل بدست آمد. معادله (3) معادله رگرسیون حاکم بر رابطه پارامترهای ورودی و عرض پوشش را نشان می‌دهد:

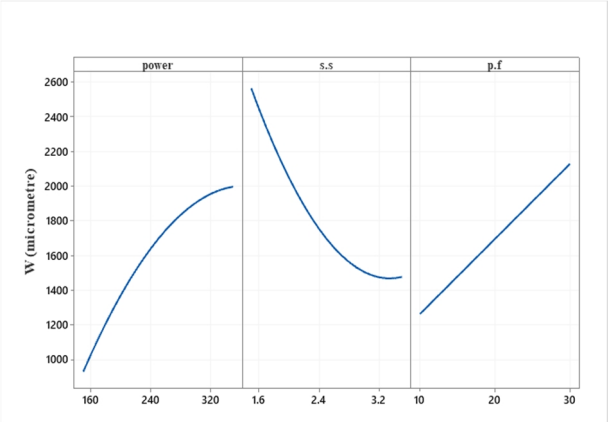
$$w=185+21.91\,power-2162\,s.s+105.8\,p.f-0.02316\,power*power+323.9\,s.s*s.s-0.250\,power*p.f \quad (3)$$

شکل(9) رفتار عرض پوشش را براساس متغیرهای ورودی فرایند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ نشان می دهد.

به منظور پیدا کردن میزان تاثیر هر پارامتر موثر بر عرض پوشش به شیب نمودار حاصل از اثر آن پارامتر بر عرض پوشش توجه می‌شود، هرچه شیب نموار بیشتر باشد نشان دهنده تاثیر بیشترآن پارامتر بر عرض پوشش می‌باشد. روش دیگر جهت پیدا کردن میزان تاثیر هر پارامتر بر ارتفاع پوشش از طریق

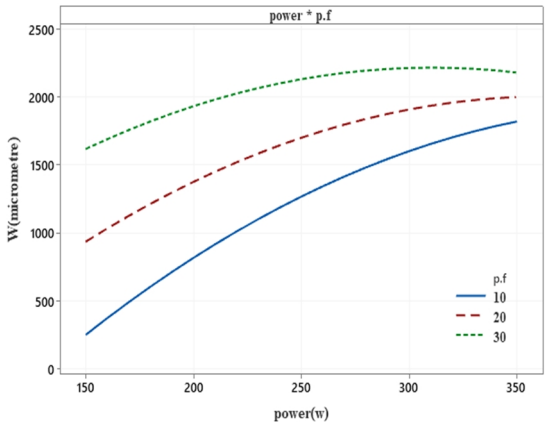
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

تقسیم کردن مقدار عبارت(Adj SS) هر پارامتر بر مقدار (Total- Adj SS) در جدول آنالیز واریانس بدست می‌آید.
براساس آنالیز صورت گرفته، درصد تاثیر توان لیزر 32/58%، سرعت روبش لیزری 33/88% و نرخ تغذیه پودر21/43% بدست می‌آید.



شکل 9- رفتار عرض پوشش براساس متغیرهای ورودی فرایند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ

همانطور که از شکل(9) مشاهده می‌شود عرض پوشش با افزایش توان لیزر افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت روبش لیزری نیز عرض پوشش افزایش یافته است. نرخ تغذیه پودر اثر کمتری روی تغییر عرض پوشش دارد. در فرایندهای جوشکاری لیزری و پوشش‌کاری لیزری، نیروهای خارجی و نیروهای داخلی در شکل‌دادن به حوضچه مذاب در حین فرایند دخالت دارند. نیروهای خارجی عمدتاً به طراحی نازل، تنظیمات جریان پودر و فشار گازهای حامل و محافظ بستگی دارد. نیروهای داخلی نیز در حوضچه مذاب معمولاً ترکیبی از دو نیروی شناوری و مارانگونی می‌باشد. شناوری به تفاوت چگالی در حوضچه مذاب و نیروی مارانگونی در غیاب عامل فعال سطحی به گرادیان کشش سطحی ناشی از گرادیان دمایی موجود در حوضچه مذاب وابسته است. کشش سطحی با افزایش دما کاهش می یابد، در فرایند پوشش‌کاری حضور لیزر به عنوان منبع حرارتی در مرکز حوضچه مذاب سبب می‌شود سطح مرکز حوضچه مذاب نسبت به سطوح کناری حوضچه گرم‌تر شود. با توجه به اینکه فلز گرم‌تر در مرکز دارای کشش سطحی کمتری است، مذاب از مرکز به سمت کناره‌های سردتر با کشش سطحی بیشتر حرکت می‌کند این گرادیان کشش سطحی در سطح حوضچه ذوب می‌تواند سبب ایجاد یک تنش برشی در سطح مذاب از مرکز به سمت کناره‌ها شود در ناحیه زیر سطح مذاب جریان به صورت عکس از کناره‌ها به سمت مرکز جریان دارد.

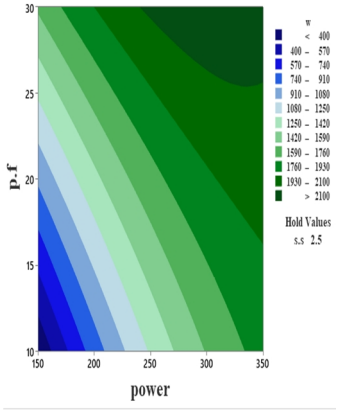


شکل 10- اثرات متقابل دو پارامتر توان لیزر و نرخ تغذیه پودر بر عرض پوشش.

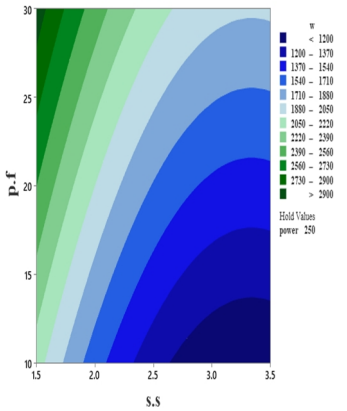
با افزایش توان لیزر در نمونه‌ها حرارت در مرکز حوضچه مذاب بیشتر از کناره‌ها بوده و با ایجاد گرادیان کشش سطحی، مذاب درسطح به سمت کناره‌ها حرکت کرده است. در نتیجه با افزایش توان لیزر پهنای ناحیه پوشش افزایش یافته است. با کاهش سرعت روبش لیزری نیز زمان واکنش بین پرتو لیزر و مواد پوشش‌کاری لیزری افزایش می‌یابد در نتیجه انرژی ورودی افزایش یافته و با توجه به توضیحات فوق ایجاد گرادیان کشش سطحی بین مرکز و کناره‌ها سبب ایجاد تنش کششی از مرکز به سمت کناره و در نتیجه گسترش حوضچه به سمت کناره‌ها و افزایش پهنای حوضچه می‌شود. درشکل (10)، برهم‌کنش دو پارامتر اصلی توان لیزر و نرخ تغذیه پودر به عنوان پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر عرض پوشش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در یک توان لیزر مشخص با افزایش نرخ تغذیه پودر، عرض پوشش افزایش می‌یابد.
با بررسی نمودار دو بعدی عرض پوشش برحسب توان لیزر، سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر در شکل(11) می‌توان دریافت که بیشترین مقدار عرض پوشش زمانی حاصل می‌شود که نرخ تغذیه پودر در بالاترین سطح خود یعنی 28/52 گرم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

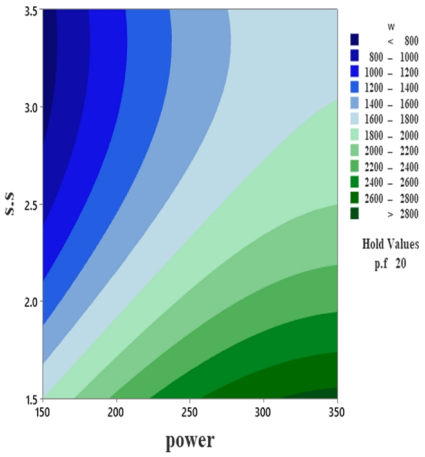
بردقیقه، توان لیزری نیز بیشینه مقدار خود یعنی 350 وات و سرعت روبش لیزری در حالت کمینه خود یعنی 1/5 میلی‌متر بر ثانیه باشد.



الف



ب



ج

شکل 11- نمودار دو بعدی عرض پوشش بر حسب پارامترهای لیزر به عنوان متغیرهای ورودی: الف- توان لیزر و نرخ تغذیه پودر، ب- سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر، ج- توان لیزر و سرعت روبش لیزر.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی پوشش‌دهی لیزری اینکونل 718 بر روی فولاد گرم‌کار H13 پرداخته شد. بدین‌منظور اثر پارامترهای لیزر شامل توان لیزر، نرخ تغذیه پودر و سرعت اسکن لیزر بر مشخصات هندسی پوشش ایجاد شده شامل ارتفاع و عرض پوشش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی جامع اثر هر یک از پارامترهای ورودی و برهم‌کنش آن‌ها بر مشخصات هندسی پوشش، از روش طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش سطح پاسخ استفاده شد و تحلیل‌های آماری مناسبی نیز در این زمینه انجام شد. نتایج نشان دادند که توان لیزر مهم‌ترین عامل بر روی تغییرات عرض پوشش و همچنین پارامتر تاثیرگذار (با درصد کمی) بر روی ارتفاع پوشش می‌باشد. به نحوی که با افزایش توان لیزر عرض و ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که کاهش سرعت روبش لیزر سبب افزایش میزان گرمای ورودی در فرایند شده که به عنوان پارامتر مهم سبب افزایش عرض و همچنین ارتفاع پوشش می‌شود. ثابت شد که افزایش میزان تغذیه پودر به دلیل انتقال حجم بیشتر ماده پوشش به حوضچه مذاب سبب افزایش ارتفاع و همچنین عرض پوشش می‌شود.

منابع

1- M. N. Fesharaki, R. Shoja-Razavi, H. A. Mansouri, and H. Jamali, "Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods," *Surface and Coatings Technology*, vol. 353, pp. 25-31, 2018.

2- K. Luo, X. Xu, Z. Zhao, S. Zhao, Z. Cheng, and J. Lu, "Microstructural evolution and characteristics of bonding zone in multilayer laser cladding of Fe-based coating," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 263, pp. 50-58, 2019.

3- C. Guo, J. Chen, J. Zhou, J. Zhao, L. Wang, Y. Yu, *et al.*, "Effects of WC–Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating," *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, pp. 2064-2071, 2012.

4- L. De-sheng, C. Ke, F. Xiu-qing, K. Min, H. Zi-xuan, and W. Xian-fa, "Effect of process parameters on microstructure and properties of AlCoCrFeNi-WC-WS2 composite coating prepared by laser cladding,

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]

12- Q. Wu, W. Li, N. Zhong, W. Gang, and W. Haishan, "Microstructure and wear behavior of laser cladding VC–Cr7C3 ceramic coating on steel substrate," *Materials & design,* vol. 49, pp. 10-18, 2013.

13- A. Gowtham, G. Chaitanya, J. K. Katiyar, A. Chandak, and T. Gupta, "Experimental Investigations on laser cladding of NiCrBSi+ WC Coating on SS410," *Materials Today: Proceedings,* vol. 27, pp. 1984-1989, 2020.

14- M. Alizadeh-Sh, S. Marashi, E. Ranjbarnodeh, and R. Shoja-Razavi, "Laser cladding of Inconel 718 powder on a non-weldable substrate: Clad bead geometry-solidification cracking relationship," *Journal of Manufacturing Processes,* vol. 56, pp. 54, 2020.

15- R. Saeedi, R. S. Razavi, S. R. Bakhshi, M. Erfanmanesh, and A. A. Bani, "Optimization and characterization of laser cladding of NiCr and NiCr–TiC composite coatings on AISI 420 stainless steel," *Ceramics International,* vol. 47, pp. 4097, 2021.

16- A. H. Habibi, R. S. Razavi, G. H. Borhani, and M. Erfanmanesh, "Effect of Argon Shroud Protection on the Laser Cladding of Nanostructured WC-12Co Powder," *Journal of Materials Engineering and Performance,* pp. 1-8, 2021.

17- Kazemi S, Khalaf G, Afsari A, Marzban M. Investigation of Mechanical Properties in Welding of Stainless Steel SA240-TP316 and Steel SA516-GR60 Cladded with Stainless Steel SA240-TP316. Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2023; 8 (2) :53-68

18- 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. Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2023; 8 (2) :69-81

"*International Journal of Electrochemical Science,* vol. 16, 2021.

5- S. Aghili and M. Shamanian, "Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides single-tracks on titanium aluminide substrate," *Optics & Laser Technology,* vol. 119, p. 105652, 2019.

6- P. Kattire, S. Paul, R. Singh, and W. Yan, "Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications," *Journal of Manufacturing Processes,* vol. 20, pp. 492-499, 2015.

7- L. Zhu, S. Wang, H. Pan, C. Yuan, and X. Chen, "Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology," *Journal of Manufacturing Processes,* vol. 49, pp. 344, 2020.

8- Y. Javid, "Multi-response optimization in laser cladding process of WC powder on Inconel 718," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* vol. 31, pp. 406-417, 2020.

9- 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.

10- C. Y. Cui, X. G. Cui, Y. K. Zhang, Q. Zhao, and J. Z. Lu, "Study on the Properties of the Laser Cladded Cobalt-Based Alloy Coating on T10 Tool Steel," in *Key Engineering Materials*, 2011, pp. 686-689.

11- D. Verdi, M. Garrido, C. J. Múnez, and P. Poza, "Cr3C2 incorporation into an Inconel 625 laser cladded coating: effects on matrix microstructure, mechanical properties and local scratch resistance," *Materials & Design,* vol. 67, pp. 20-27, 2015.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.10]