

## Multiple regression analysis between key variables of direct laser deposition process and geometry of Inconel 718 superalloy clads on 316 stainless steel substrate

Milad Karimi<sup>1</sup>, \*Mahmoud Sarkari Khorrami<sup>2</sup>, Ghasem Azimi-Roeen<sup>3</sup>, Seyyed Farshid Kashani-Bozorg<sup>4</sup>

1- MSc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Center of Engineering and Technical Skills Training, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

4- Professor, Center of Engineering and Technical Skills Training, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

**Citation:** Karimi M, Sarkari Khorrami M, Azimi-Roeen Gh, Kashani-Bozorg S.F. Multiple regression analysis between key variables of direct laser deposition process and geometry of Inconel 718 superalloy clads on 316 stainless steel substrate. Metallurgical Engineering 2024; 27(1): 52-61 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.1983169.1371>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.1983169.1371>

### **ABSTRACT**

One of the additive manufacturing methods is deposition with direct energy, which is used to produce and repair complex parts in industries. This method includes a set of variables that significantly affect the geometry of deposited layers. In this research, the effect of power and laser scanning speed on the geometrical features (width, height, and wetting angle) of Inconel 718 clads on 316 stainless steel substrate has been investigated. Based on the experimental results, the mathematical equations for the relationship between the crucial variables of the process and the geometry of the clads were established by the method of multiple regression analysis, and the results showed that the measured data is consistent with the predicted one. Based on the equations, it was predicted that the laser scanning speed has a decreasing effect on all the investigated geometric features of the clads while the laser power has an increasing effect on the width and height of the clads and a decreasing effect on the wetting angle.

**Keywords:** Additive manufacturing; Deposition with direct laser energy, Inconel 718, Clad geometry characteristics, Regression analysis.

Received: 20 December 2022

Accepted: 13 November 2023

■ ..... ■

\* *Corresponding Author:*

**Mahmoud Sarkari Khorrami, PhD**

**Address:** School of Metallurgy and Materials Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

**Tel:** +98 (21) 82084618

**E-mail:** m.khorrami@ut.ac.ir

## تحلیل وایازشی چندگانه بین متغیرهای کلیدی فرایند لایه‌نشانی مستقیم با لیزر و هندسه روکش‌های ایجادشده ابرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

میلاذ کریمی<sup>۱</sup>، محمود سرکاری خرمی<sup>۲</sup>، قاسم عظیمی رویین<sup>۲</sup>، سید فرشید کاشانی بزرگ<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، مرکز آموزش مهارت‌های فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
- ۴- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

یکی از روش‌های ساخت افزایشی، لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم است که برای تولید و ترمیم قطعات پیچیده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش شامل مجموعه‌ای از متغیرها است که تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات هندسی لایه‌های نشانداده شده دارد. در این پژوهش تأثیر توان و سرعت روبش لیزر بر خصوصیات هندسی (پهنا، ارتفاع و زاویه ترشوندگی) روکش‌های اینکونل ۷۱۸ لایه‌نشانی شده بر زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ بررسی شده است. بر اساس نتایج تجربی، معادلات ریاضی برای ارتباط بین متغیرهای کلیدی فرایند و مشخصات هندسی روکش‌ها به‌وسیله روش تجزیه و تحلیل وایازشی چندگانه برقرار شده و نتایج حاصل نشان داد که داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش‌بینی‌شده تطابق دارد و بر اساس معادله‌ها پیش‌بینی شد که سرعت روبش لیزر بر تمامی مشخصات هندسی مورد بررسی روکش‌ها اثر کاهشی دارد، در حالی که توان لیزر بر پهنا و ارتفاع روکش‌ها اثر افزایشی و بر زاویه ترشوندگی اثر کاهشی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** ساخت افزایشی، لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم لیزر، اینکونل ۷۱۸، مشخصات هندسی روکش، تجزیه و تحلیل وایازشی.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹ | پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

### ۱. مقدمه

حال حاضر تمرکز ساخت افزایشی برای تولید اجزای فلزی و آلیاژی است تا نیازهای صنایع دفاعی، پزشکی، خودروبی و هوافضا را برآورده کند [۱].

یکی از روش‌های ساخت افزایشی لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم<sup>۲</sup> (DED) است که در آن پودرهای افزودنی به طور هم‌زمان با تابش لیزر به داخل حوضچه مذاب تغذیه می‌شوند تا پودرها بر زیرلایه ذوب شده و یک لایه جدید را تشکیل دهند. منابع انرژی مختلفی برای ذوب زیرلایه و لایه‌نشانی در این روش استفاده می‌شود؛ ولی در بین آنها، پرتو لیزر به‌عنوان یک منبع انرژی، بیشترین استفاده را دارد. از آنجا که پرتو لیزر منطقه متأثر از حرارت و میزان اعوجاج روی سطح زیرلایه را محدود می‌کند، این روش در ساخت

فناوری ساخت افزایشی<sup>۱</sup> (AM) یکی از روش‌های چاپ سه‌بعدی است که اجزای قطعات به‌وسیله رسوب لایه به لایه شکل می‌گیرد و توانایی به کارگیری بر طیف گسترده‌ای از مواد همچون فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها را دارد. این فناوری به دلیل ماهیت ساخت لایه به لایه قطعات قادر به ایجاد اشکال پیچیده است [۱، ۲]. ساخت افزایشی در سال‌های اخیر توجه بسیاری از صنایع مختلف را به خود جلب کرده است. این فناوری در مقایسه با فرایندهای تولید سنتی دارای مزیت‌های قابل توجهی از جمله کاهش میزان زمان و مداخله انسان در فرایند تولید است. همچنین با کاهش ضایعات مواد اولیه باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید می‌شود [۳]. در

2. Directed Energy Deposition (DED)

1. Additive Manufacturing (AM)

\* نویسنده مسئول:

دکتر محمود سرکاری خرمی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۸۲۰۸۴۶۱۸ (۲۱) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: m.khorrami@ut.ac.ir

در سال‌های اخیر، بسیاری از پژوهشگران برای بررسی ارتباط بین متغیرهای فرایند و مشخصات هندسی پوشش‌ها، الگوهای فیزیکی مختلفی را توسعه داده‌اند [۱۴]. به دلیل پیچیدگی‌های تجزیه و تحلیل الگوهای فیزیکی، می‌توان از الگوهای تجربی- آماری<sup>۴</sup> استفاده کرد که به طور اساسی تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد. بیشتر این الگوهای آماری با استفاده از روش‌های وایازش<sup>۵</sup> خطی ارائه شده‌اند که به وسیله ضریب وایازش و نمودار توزیع باقیمانده<sup>۶</sup>، صحت‌سنجی آنها بررسی می‌شود. همچنین اطلاعات به‌دست‌آمده از طریق الگوهای تجربی- آماری قادر است متغیرهای بهینه مناسب را انتخاب کرده و هندسه حوضچه جوش نهایی را پیش‌بینی کند [۱۵].

سابق<sup>۷</sup> و همکاران [۱۶] با استفاده از لایه‌نشانی پودرهای فولادی روی صفحات فولاد کم‌کربن، روکش‌هایی به صورت تک‌مسیر و هم‌پوشانی ایجاد کردند و برای پیش‌بینی و ارتباط بین هندسه روکش‌های ایجادشده توسط لیزر با متغیرهای فرایند، چندین الگو را ارائه و بر اساس تجزیه و تحلیل الگوها دریافتند که بهترین الگو پیش‌بینی با رویکرد شبکه عصبی مصنوعی<sup>۸</sup> حاصل می‌شود. همچنین در پژوهش دیگری از همین رویکرد استفاده نموده و با ارائه الگوی چگالی پوشش‌های لایه نشانی شده توسط لیزر را پیش‌بینی کردند [۱۷]. داویم<sup>۹</sup> و همکاران [۱۸] با تجزیه و تحلیل وایازش چندگانه<sup>۱۰</sup>، مشخصات هندسی روکش‌های ایجادشده به‌وسیله فرایند لایه‌نشانی توسط لیزر را پیش‌بینی نموده و تأثیر متغیرهای اصلی فرایند را بر هندسه روکش‌های لایه‌نشانی‌شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی‌شده با دقت قابل قبولی مورد پیش‌بینی قرار گرفته است. لیان<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۹] برای بهینه‌سازی متغیرهای پردازش و پیش‌بینی کیفیت شکل‌گیری روکش‌های چندگذره<sup>۱۲</sup> که توسط لیزر فیبری ایجاد شده بود، الگوی را پیشنهاد دادند و بر اساس این الگو دریافتند که با کاهش نرخ تغذیه سیم و افزایش توان لیزر و سرعت رویش می‌توان به روکش‌هایی با کیفیت و سطح مناسب و رقت کم دست پیدا کرد. علیزاده و همکاران [۲۰] الگوی بر اساس تجزیه و تحلیل تجربی- آماری برای پیش‌بینی ترک انجمادی در هنگام لایه‌نشانی پودر اینکونل ۷۱۸ بر زیرلایه فولادی پیشنهاد دادند و شرایط لازم برای حصول روکش‌های بدون ترک را ارزیابی کردند و دریافتند که

قطعات فلزی بادقت بالا و هندسه‌های پیچیده کارا و مورد توجه است [۲-۵]. لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم یکی از پیشرفته‌ترین و قابل اعتمادترین روش‌ها برای تعمیر و بازسازی قطعات معیوب و آسیب دیده است و علاوه بر آنها در مواردی برای پوشش‌های مقاوم به سایش نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

اینکونل ۷۱۸ یک دسته از ابر آلیاژهای پایه نیکل است که به دلیل خاصیت مکانیکی عالی و مقاومت در برابر خوردگی و اکسایش دمای بالا به طور گسترده در هوافضا، پتروشیمی، توربین‌های گازی و سایر زمینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی در صنایع هوافضا، حدود ۵۰٪ از موتورهای توربین گازی از ابرآلیاژها تشکیل می‌شود [۷]. بیشتر قطعاتی که از جنس اینکونل ۷۱۸ در صنایع هوافضا به کار برده می‌شود از نظر شکل هندسی پیچیده بوده و به طور پیوسته در معرض محیط‌های خورنده دمای بالا قرار می‌گیرند. علاوه بر این اتصال غیرهمجنس اینکونل ۷۱۸ با فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کاربردهای متعددی در بخش هوافضا و نیروگاه‌های هسته‌ای دارد. به عنوان مثال در چرخانه دستگاه متراکم کننده GT10B، مهره‌های اینکونل ۷۱۸ روی محور مرکزی از جنس فولاد آستنیتی جوش داده می‌شوند [۸]. با این تفاسیر، تولید و به‌خصوص تعمیر و بازسازی اجزای این قطعات توسط روش‌های معمولی بسیار دشوار است ولی می‌توان با استفاده از روش لایه نشانی از طریق انرژی مستقیم بر این مشکلات غلبه کرد. وقتی صحبت ساخت و ترمیم قطعاتی از جنس اینکونل ۷۱۸ مطرح می‌شود، مهم‌ترین ویژگی مد نظر، دستیابی به یک ساختار یکنواخت و بدون عیوب است [۹].

مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی‌شده تأثیر زیادی بر خواص نهایی و تشکیل نقص‌های مختلف در آنها دارد. بنابراین برای تعیین کیفیت و خواص باید مشخصات هندسی از جمله پهنا، ارتفاع و زاویه ترشوندگی روکش‌های تک مسیر<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گیرد. از طرف دیگر این مشخصات هندسی به‌شدت به متغیرهای فرایند لایه‌نشانی که تعدادشان بسیار زیاد است، بستگی دارد؛ البته باید در نظر داشت که در فرایند لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم، توان لیزر، سرعت رویش لیزر و نرخ تغذیه پودر مهم‌ترین متغیرهایی هستند که بیشترین تأثیر را بر کیفیت نهایی و ریزساختار روکش‌ها دارند. به همین ترتیب ترکیب‌های متفاوت از این متغیرهای اصلی فرایندی، تشکیل روکش‌هایی با هندسه‌های مختلف را باعث می‌شوند؛ بنابراین، پیش‌بینی مشخصات هندسی روکش‌ها و بهینه‌سازی متغیرهای فرایند پر از چالش است که با برقراری ارتباط بین متغیرهای کلیدی فرایند لایه‌نشانی از جمله توان لیزر، سرعت رویش لیزر و نرخ تغذیه پودر با مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی‌شده، می‌توان متغیرهای فرایند را بهینه‌سازی کرد [۱۰-۱۳].

4. Empirical-statistical

5. Regression

6. Residuals distribution

7. Saqib

8. Artificial Neural Networks (ANN)

9. Davim

10. Multiple Linear Regression

11. Lian

12. Multipass cladding

3. Single track

پردازش مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بعد از لایه‌نشانی، مقاطع عرضی لایه‌های روکشی تشکیل شده به وسیله دستگاه برش با سیم برش تهیه و به صورت متوالی با استفاده از سنباده‌های شماره ۳۲۰ تا ۵۰۰۰ مسطح و به وسیله محلول ذرات معلق آلومینای ۰/۳ میکرومتر در آب مقطر، برای دستیابی به سطحی براق و عاری از خط‌وخش جلا داده شده و در نهایت با استفاده از محلول ماربل (۱۰ گرم سولفات سدیم، ۵۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر) به مدت ۳۰ ثانیه، مورد حکاکی قرار گرفته تا ریزساختار حوضچه جوش نمایان شود.

از نرم‌افزار IMAGE-J برای اندازه‌گیری مشخصات هندسی روکش‌ها (پهنا، ارتفاع و زاویه ترشوندگی) استفاده شد. مشخصات هندسی یک مسیر لایه‌نشانی شده به صورت طرحواره در شکل ۲ نشان داده شده که H ارتفاع روکش از سطح زیرلایه، W پهنای روکش و  $\theta$  زاویه ترشوندگی است. نمونه‌های مقاطع عرضی که با متغیرهای مختلف پردازش شده‌اند، با میکروسکوپ نوری الیمپوس<sup>۱۴</sup> مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین جدول ۴ مشخصات هندسی روکش‌ها را نشان می‌دهد.

برای پیش‌بینی مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی شده بر اساس متغیرهای اصلی فرایند و هم‌چنین میزان تطابق داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی (حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی) از تجزیه و تحلیل وایزش چندگانه استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، رابطه خطی بین مشخصات هندسی روکش (Y) و متغیرهای اصلی فرایند (P: توان لیزر و V: سرعت روبش) بر اساس معادله ۱ برقرار می‌شود. مشخصه‌های هندسی و اصلی فرایند به ترتیب متغیر وابسته و مستقل هستند که در تجزیه و تحلیل وایزش چندگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معادله ۱

$$Y = a_1 \times P + a_2 \times V + b$$

در این معادله Y متغیر وابسته است که هدف این پژوهش پیش‌بینی مقدار آن است و متغیرهای مستقل معادله یعنی P و V به عنوان ورودی‌های معادله شناخته می‌شود. ضرایب معادله  $a_1, a_2$  و ثابت b ارتباط بین متغیر مستقل بر متغیر وابسته را برقرار می‌نماید و هدف از تخمین این ضرایب بررسی میزان اثر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است. برای تخمین ضرایب این معادله از روش کمینه‌سازی مربعات خطا<sup>۱۵</sup> (اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی) استفاده می‌شود. در این روش مقادیر ضرایب به نحوی انتخاب می‌شوند که مجموع خطا به حداقل برسد. در وایزش چندگانه معادله خطای مرتبط به کمترین مربعات بر اساس معادله ۲ برقرار می‌شود.

میزان رقت نسبت به سایر متغیرها بر ترک انجمادی اثرگذاری بیشتری دارد. منگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۱] به منظور بهینه‌سازی متغیرهای پردازش فرایند و خصوصیات مکانیکی روکش‌های ماده مرکب اینکونل ۷۱۸-کاربید تیتانیوم، الگو آماری بین متغیرهای پردازش شده و مشخصات روکش‌ها (ریزسختی، میزان رقت و نسبت پهنا به طول روکش‌ها) ارایه کردند و بر اساس تجزیه تحلیل‌های انجام شده دریافتند که سرعت روبش لیزر مهم‌ترین عامل اثرگذاری بر ریزسختی و میزان رقت روکش‌ها است. علاوه بر این با بررسی ریزساختاری مشاهده کردند که با کاهش سرعت روبش و افزایش توان لیزر، فاصله بازوهای دندریت اولیه افزایش پیدا کرده است و با اعتبارسنجی الگو ایجاد شده دریافتند که خطای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده کمتر از ۱۰٪ است.

با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان بیان نمود که ارتباط بین متغیرهای اصلی فرایند لایه نشانی با لیزر و هندسه روکش‌های لایه نشانی شده اینکونل ۷۱۸ بر زیرلایه ۳۱۶ به طور کامل مشخص نشده است. منابع موجود نشان می‌دهند که بدلیل پیچیدگی فرایند و تعداد بالای متغیرها و تأثیرات متقابل آن‌ها، درک ارتباط دقیق میان آن‌ها مشکل است. این موضوع به ویژه در پیش‌بینی مشخصات هندسی روکش‌ها چالش‌هایی را به وجود آورده است. بنابراین، این پژوهش با هدف ایجاد الگوهای وایزش چندگانه، سعی در برقراری ارتباط دقیق‌تر بین متغیرهای اصلی فرایند و لایه‌نشانی اینکونل ۷۱۸ بر زیرلایه ۳۱۶ دارد. با استفاده از این روش هم‌چنین امکان پیش‌بینی دقیق‌تر مشخصات هندسی روکش فراهم می‌شود که این امر به بهینه‌سازی و بهبود کارایی فرایند لایه‌نشانی مستقیم با لیزر کمک شایانی می‌نماید. از این رو در پژوهش حاضر، اینکونل ۷۱۸ به صورت تک مسیر با ترکیب مختلفی از متغیرهای فرایند بر زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ لایه نشانی شده و روش تجزیه و تحلیل وایزشی چندگانه خطی، برای برقراری رابطه آماری بین متغیرهای اصلی فرایند (توان و سرعت روبش لیزر) با مشخصات هندسی روکش‌ها (پهنا، ارتفاع و زاویه ترشوندگی) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

قطعات فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با ابعاد  $30 \times 10 \times 5$  cm<sup>۳</sup> به عنوان زیرلایه و پودر کروی اینکونل ۷۱۸ برای لایه‌نشانی بر زیرلایه انتخاب شد. ترکیب‌های شیمیایی نمونه پودر و زیرلایه به ترتیب در جداول ۱ و ۲ درج شده است. در ابتدا سطح زیرلایه جهت زدودن آلودگی‌ها با الکل مورد شستشو قرار گرفت و بعد از خشک شدن، فرایند لایه نشانی از طریق انرژی مستقیم به وسیله دستگاه لیزر فیبر ایتربیوم با حداکثر توان ۱/۵ kW و قطر پرتو لیزر ۱ mm انجام شد. طرحواره فرایند لایه‌نشانی در شکل ۱ ارائه شده است. جدول ۳ متغیرهای

14. Olympus

15. Ordinary Least Square

13. Meng

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه پودر اینکونل ۷۱۸.

عنصر	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Si
درصد وزنی	۵۴/۱۳	۱۸/۱۲	۱۷/۹	۵/۴	۳/۰۴	۱/۰۹	۰/۳۲

جدول ۲. ترکیب شیمیایی نمونه زیر لایه فولاد زنگ نزن ۳۱۶.

عنصر	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu
درصد وزنی	۶۷/۰۱	۰/۰۷۶۹	۱۷/۴	۱۰/۷	۳/۰۶	۱/۶۲	۰/۱۳

جدول ۳. متغیرهای پردازش فرایند برای لایه نشانی.

متغیر فرایند	نماد متغیر (واحد)	سطح تغییرات
توان لیزر	P(W)	۱۱۰۰، ۱۰۰۰، ۹۰۰، ۸۰۰، ۷۰۰
سرعت روبش لیزر	V(mm/min)	۷۰۰، ۶۵۰، ۵۵۰
نرخ تغذیه پودر	F(g/min)	۹

معادله ۲

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

در اینجا  $y_i$  مقدار واقعی متغیر وابسته،  $\hat{y}_i$  مقدار پیش بینی شده توسط الگو و N تعداد داده ها را نشان می دهد. برای بدست آوردن تخمین های بهینه، از معادله خطا نسبت به ضرایب  $(a_1, a_2)$  مشتق گیری و برابر صفر قرار داده می شود و با حل معادلات بدست آمده مقدار بهینه ضرایب معادله وایازش چندگانه محاسبه می شود. تمام این محاسبات بوسیله نرم افزار SPSS<sup>۱۶</sup> با ورود داده های اندازه گیری شده در جدول ۴ انجام می شود و ضرایب معادله وایازش را محاسبه می کند به نحوی که بیشترین تناسب بین متغیرهای وابسته و مستقل برقرار شده باشد. معادله های ۳، ۴ و ۵ مشخصات هندسی روکش ها را به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی فرایند پیش بینی می کند و قابل قبول بودن الگوهای پیش بینی شده به وسیله ضریب تعیین<sup>۱۷</sup> و وایازش ( $R^2$ ) ارزیابی می شود. در واقع مقدار  $R^2$  تطابق بین داده های پیش بینی و اندازه گیری شده را توصیف می کند و هر چه مقدار  $R^2$  به ۱ نزدیک تر باشد تطابق دو مجموعه داده نسبت به یکدیگر بیشتر است.

بطور کلی مدل وایازشی استفاده شده در این پژوهش برای جنس های مختلف روکش و زیر لایه قابل استفاده است؛ با این حال، ضرایب معادلات وایازش تابع مشخصات هندسی روکش ها شده است و مشخصات هندسی روکش ها تابع جنس ماده روکش و زیر لایه است. بنابراین ضرایب بدست آمده در این پژوهش برای محدوده کاری لایه نشانی اینکونل ۷۱۸ بر زیر لایه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ معتبر خواهد بود.

معادله ۳:

$$R^2 = 0.977$$

$$W = 0.0114 \times P - 0.0101 \times V + 1.2909$$

معادله ۴:

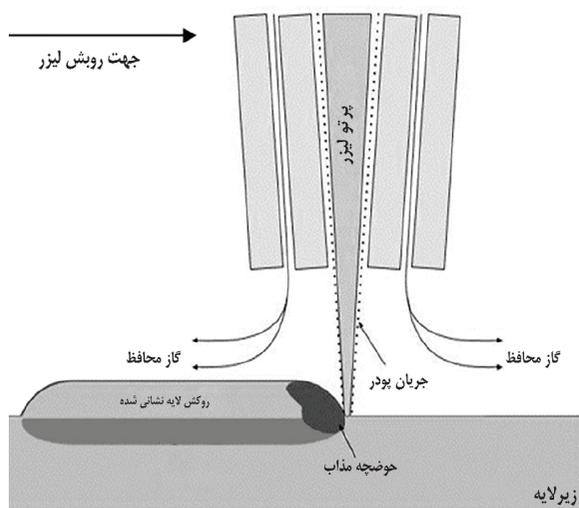
$$R^2 = 0.963$$

$$H = 0.0023 \times P - 0.0113 \times V + 1.17041$$

معادله ۵:

$$R^2 = 0.935$$

$$\theta = -0.01566 \times P - 0.0228 \times V + 130.6143$$



شکل ۱. فرایند لایه نشانی از طریق انرژی مستقیم [۲۲].

16. Statistical Package for the Social Sciences

17. Coefficient of Determination

جدول ۴. مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی‌شده.

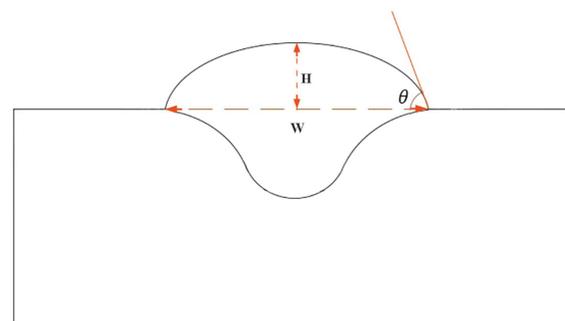
نمونه	P(W)	V(mm/min)	W(mm)	H(mm)	$\theta^\circ$
S1	۷۰۰	۵۵۰	۱/۵۱۴	۰/۷۱۰	۸۶
S2	۸۰۰	۵۵۰	۱/۶۳۱	۰/۷۵۵	۸۶
S3	۹۰۰	۵۵۰	۱/۷۸۹	۰/۷۷۴	۸۲
S4	۱۰۰۰	۵۵۰	۱/۸۵۱	۰/۷۸۸	۸۱
S5	۱۱۰۰	۵۵۰	۲/۰۶۰	۰/۷۹۲	۷۷
S6	۷۰۰	۶۵۰	۱/۴۶۰	۰/۵۷۴	۷۷
S7	۸۰۰	۶۵۰	۱/۵۳۰	۰/۶۰۱	۷۶
S8	۹۰۰	۶۵۰	۱/۶۷۳	۰/۶۱۶	۷۶
S9	۱۰۰۰	۶۵۰	۱/۷۶۵	۰/۶۷۲	۷۵
S10	۱۱۰۰	۶۵۰	۱/۸۷۴	۰/۷۰۰	۷۴
S11	۷۰۰	۷۰۰	۱/۴۰۰	۰/۵۶۵	۷۶
S12	۸۰۰	۷۰۰	۱/۵۱۰	۰/۵۷۲	۷۶
S13	۹۰۰	۷۰۰	۱/۶۵۰	۰/۵۹۵	۷۳
S14	۱۰۰۰	۷۰۰	۱/۷۰۰	۰/۶۲۰	۷۱
S15	۱۱۰۰	۷۰۰	۱/۸۳۷	۰/۶۳۷	۷۰

### تأثیر متغیرهای فرایند بر مشخصات هندسی روکش‌های ایجادشده

همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است تغییرات متغیرهای اصلی فرایند لایه نشانی اثر قابل توجهی بر هندسه روکش‌ها دارد که با استفاده از تصاویر ارائه شده در این شکل می‌توان به صورت کیفی تأثیر متغیرهای فرایند را بر هندسه روکش‌ها تشریح کرد؛ با حرکت از بالا به پایین مقطع نمونه‌ها، توان لیزر افزایشی است که به تبع آن پهنای روکش لایه نشانی شده افزایش پیدا کرده است و با حرکت از سمت چپ به راست با افزایش سرعت روبش لیزر و ثابت بودن نرخ تغذیه پودر، ارتفاع روکش‌ها و زاویه ترشوندگی کاهش می‌یابد. برای تجزیه و تحلیل کمی از وایازش چندگانه استفاده شده تا بین متغیرهای اصلی فرایند و مشخصات هندسی روکش‌ها ارتباط برقرار شود

### پهنای روکش

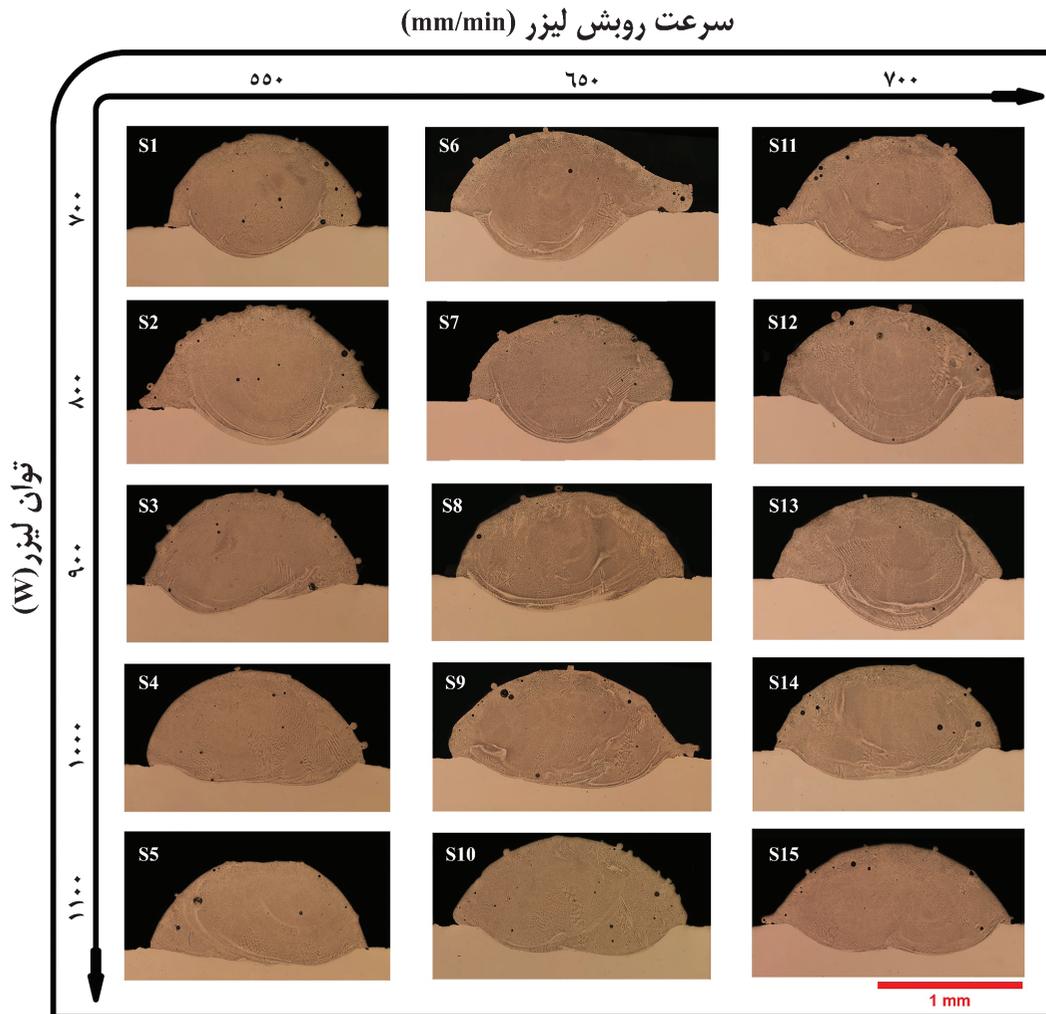
پهنای روکش به وسیله معادله ۳ پیش‌بینی می‌شود و می‌توان دریافت که توان لیزر اثر افزایشی بر پهنای روکش و سرعت روبش لیزر اثر کاهشی بر آن دارد. با توجه به ضرایب معادله، مشخص می‌شود که توان لیزر تأثیر افزایشی قابل توجهی بر پهنای روکش دارد. بدیهی است که با افزایش توان لیزر، حرارت ورودی بیشتری فراهم شده که منجر به افزایش حوضچه مذاب و در نتیجه افزایش پهنای روکش می‌شود. علاوه بر این در توان‌های بالای لیزر، حداکثر دما در مرکز



شکل ۲. طرحواره مشخصات هندسی روکش تک مسیر.

### ۳. نتایج و بحث

اینکونل ۷۱۸ به صورت تک‌گذره بر زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به کمک روش لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم روکش شد. بررسی‌های با چشم غیرمسلح هیچ ترکی را در روکش‌ها نشان نداد. مقاطع عرضی کامل لایه‌های نشانداده شده مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در تصاویر قابل مشاهده است اتصال لایه با زیرلایه به خوبی شکل گرفته و حوضچه جوش تقریباً به صورت نیم‌کره بر زیرلایه تشکیل شده است. همچنین تخلخل‌های کروی شکل در روکش‌ها مشاهده می‌شود که به حبس گازها حین انجماد نسبت داده می‌شود.



شکل ۳. مقاطع عرضی لایه‌های نشاندهنده شده تحت متغیرهای فرایندی مختلف.

اثر متقابل توان و سرعت روبش لیزر بر پهنای روکش لایه‌نشانی‌شده در شکل ۴-د نمایش داده شده است. تغییر در توان لیزر اثر قابل توجه بر پهنای روکش دارد و در مقابل تغییرات سرعت روبش لیزر اثر کمتری دارد که نشان‌دهنده نقش مهم توان لیزر بر پهنای روکش است.

#### ارتفاع روکش

معادله ۴ ارتباط بین ارتفاع روکش و متغیرهای فرایند را نشان می‌دهد. ضریب منفی در سرعت روبش لیزر نشانگر کاهش ارتفاع روکش با افزایش سرعت روبش است و همچنین توان لیزر اثر افزایشی بر ارتفاع روکش دارد. در سرعت‌های بالای روبش لیزر، زمان لازم برای تعامل پرتو با سطح زیر لایه کاهش پیدا می‌کند و انرژی کمتری را می‌تواند به زیر لایه منتقل کند. این کاهش انرژی فقط می‌تواند بخش کمی از پودر تغذیه‌شده بر زیر لایه را ذوب کند و در نتیجه ارتفاع روکش با افزایش سرعت روبش لیزر، کاهش می‌یابد. این در حالی است که

حوضچه جوش ایجاد می‌شود و در نتیجه، اختلاف دما بین مرکز حوضچه جوش و لبه‌های آن رخ می‌دهد که منجر به اختلاف تنش سطحی بین آن‌ها شده و پهنای حوضچه جوش را افزایش می‌دهد.

شکل ۴-الف مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده پهنای روکش لایه‌نشانی‌شده را نمایش می‌دهد که با توجه به مقدار  $R^2$  معادله انتخاب شده برای پیش‌بینی مناسب است.  $R^2$  یکی از مهم‌ترین داده‌هایی است که با آن الگو وایازشی به دست آمده سنجیده شده و مبین کارکرد صحیح معادله به دست آمده است. همچنین معادله وایازشی زمانی مناسب است که توزیع باقیمانده داده‌ها عادی باشد [۲۳]. نمودار پیشینه نمای باقیمانده داده‌ها در شکل ۴-ب ترسیم شده که نشان‌دهنده عادی بودن توزیع داده است. شکل ۴-ج نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده بر اساس متغیر وابسته ترسیم شده که نقاط این نمودار رفتار تصادفی و به دور از نظم و الگو خاصی هستند که بیانگر برازش مناسب معادله پیش‌بینی شده بر داده‌های تجربی است

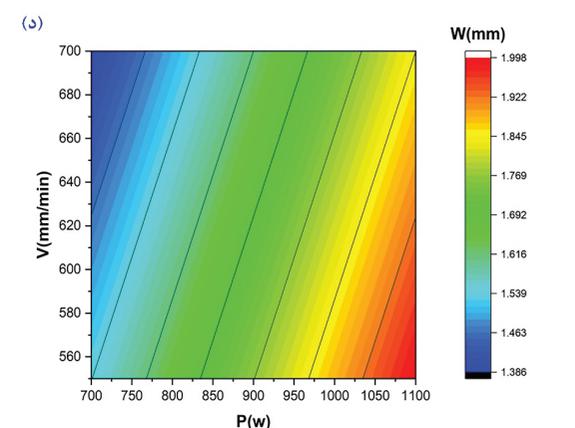
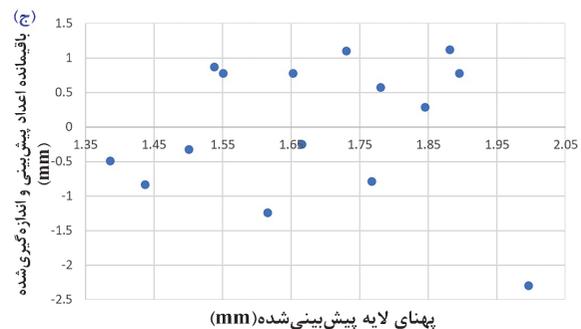
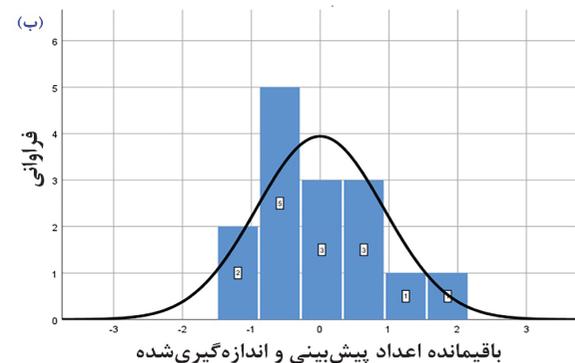
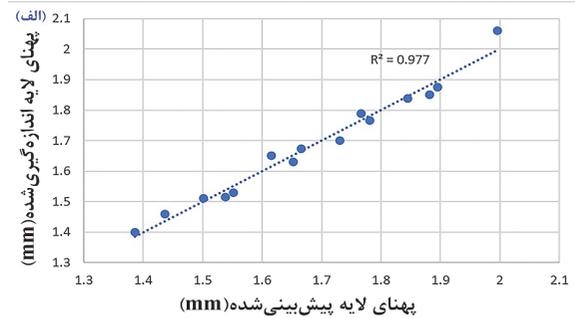
افزایش توان لیزر منجر به افزایش حرارت ورودی به سطح زیرلایه شده و توانایی بیشتری برای ذوب پودرهای تغذیه شده دارد و در نتیجه سبب افزایش ارتفاع روکش می‌شود. از این رو بیشترین ارتفاع روکش در توان‌های بالای لیزر و سرعت کم رویش لیزر قابل مشاهده است. شکل ۵-الف نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده به خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت دارند و توزیع عادی باقیمانده داده‌ها بیانگر درستی معادله وایزشی است که در شکل‌های ۵-ب و ج ترسیم شده است. همچنین اثر متقابل توان و سرعت رویش لیزر بر ارتفاع روکش در شکل ۵-د نمایش داده شده که دال بر ارتباط بیشترین ارتفاع به کمترین سرعت و بیشترین توان لیزر دارد

### زاویه ترشوندگی روکش

بر اساس تجزیه و تحلیل وایزشی چندگانه، معادله ۵ برای ارتباط زاویه ترشوندگی با متغیرهای اصلی فرایند لایه‌نشانی تهیه شده است. ضریب منفی در توان و سرعت رویش لیزر یک اثر وارون را نشان می‌دهد که نشانگر کاهش زاویه ترشوندگی با افزایش توان و سرعت رویش لیزر است. این موارد تطابق با سایر پژوهش‌های انجام شده دارد [۲۴، ۲۵]. در توان بالای لیزر به دلیل ایجاد حرارت ورودی زیاد، پهنای حوضچه مذاب افزایش می‌یابد که سبب پخش مذاب بر سطح زیرلایه می‌شود. این امر باعث کاهش زاویه ترشوندگی با افزایش توان لیزر می‌شود، در حالی که در سرعت بالای رویش لیزر، به دلیل کاهش زمان تعامل لیزر با زیرلایه، حرارت ورودی کمتری به سطح زیرلایه وارد شده و منجر به ذوب بخش کمی از پودر و زیرلایه می‌شود. از این رو زاویه ترشوندگی با افزایش سرعت رویش کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های ۶-الف، ب و ج برای بررسی صحت معادله پیش‌بینی شده ترسیم شده که تطابق خوب داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده و همچنین توزیع عادی باقیمانده داده‌ها را نشانگر است. تأثیر توان و سرعت رویش لیزر بر زاویه ترشوندگی روکش در شکل ۶-د ترسیم شده که نشان‌دهنده نقش مهم دو متغیر در تغییر زاویه ترشوندگی است. زمانی که سرعت رویش و توان لیزر پایین است، زاویه ترشوندگی روکش بیشترین مقدار ممکن را دارد.

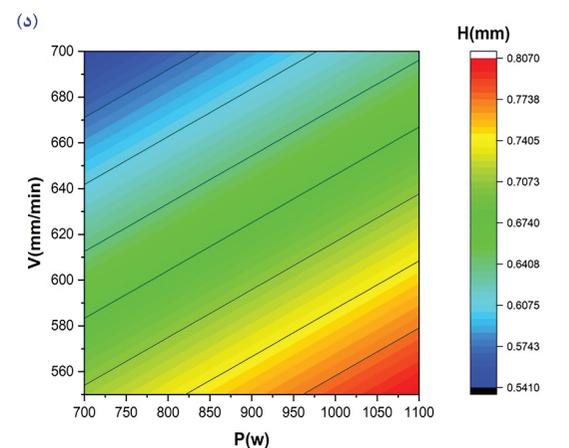
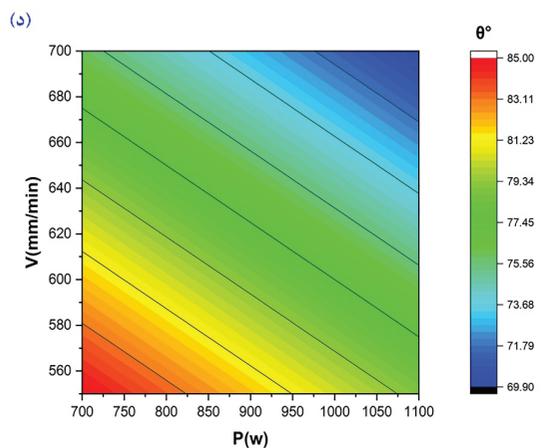
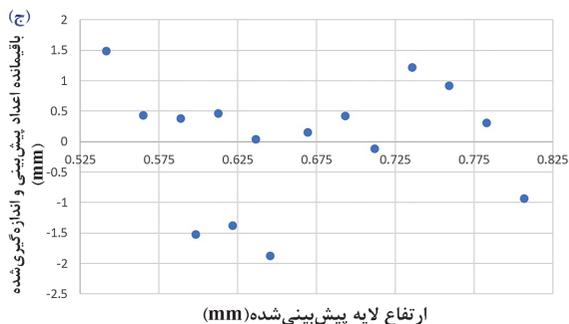
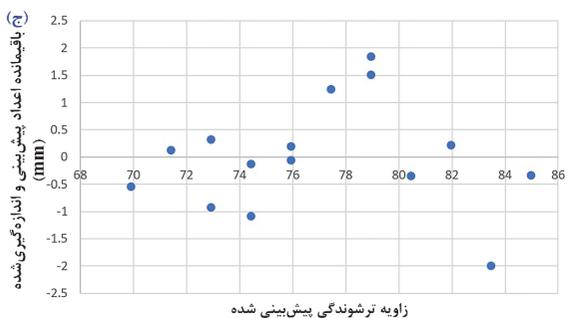
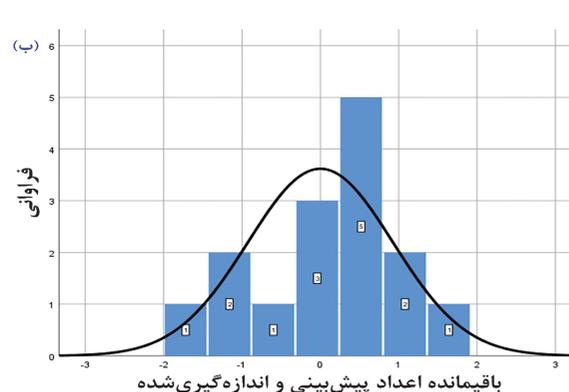
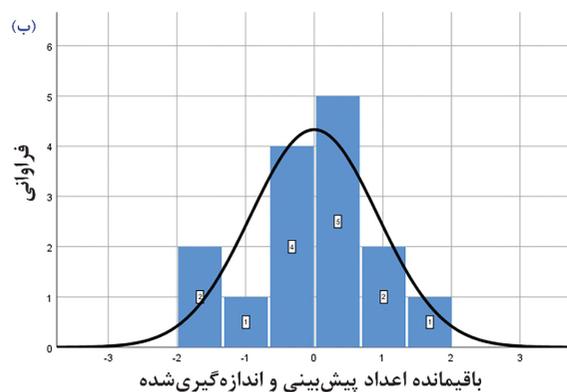
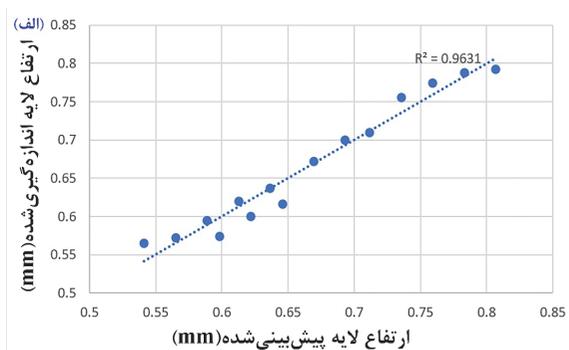
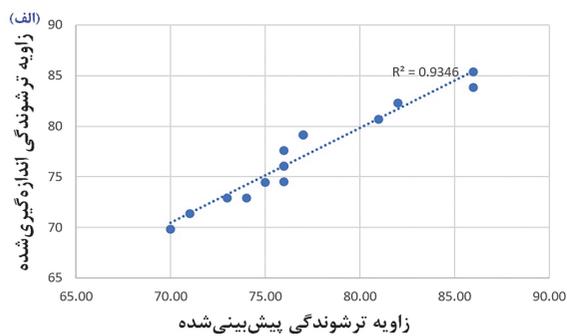
### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای اصلی فرایند بر مشخصات هندسی روکش اینکونل ۷۱۸ که توسط روش لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم لیزر بر زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. از داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده، معادله‌های آماری تهیه شد که توانایی پیش‌بینی مشخصات هندسی روکش‌ها را به‌وسیله متغیرهای کلیدی فرایند با استفاده از روش تجزیه و تحلیل



شکل ۴. الف) مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده پهنای روکش لایه‌نشانی شده ب) نمودار پیشینه نمای<sup>۱</sup> توزیع باقیمانده ج) پراکنش مقادیر باقیمانده بر اساس پهنای لایه پیش‌بینی شده د) کران‌ها یا ترازهای<sup>۲</sup> توان و سرعت رویش لیزر.

1. histogram
2. Contour



شکل ۵. الف) مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده ارتفاع روکش لایه‌نشانی شده (ب) نمودار پیشینه نمای توزیع باقیمانده (ج) پراکنش مقادیر باقیمانده بر اساس زاویه ترشوندگی لایه پیش‌بینی شده (د) کران‌ها یا ترازهای توان و سرعت روبش لیزر.

شکل ۶. الف) مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده ارتفاع روکش لایه‌نشانی شده (ب) نمودار پیشینه نمای توزیع باقیمانده (ج) پراکنش مقادیر باقیمانده بر اساس ارتفاع لایه پیش‌بینی شده (د) کران‌ها یا ترازهای توان و سرعت روبش لیزر.

- [10] Sreekanth S, Ghassemali E, Hurtig K, Joshi S, Andersson J. Effect of direct energy deposition process parameters on single-track deposits of alloy 718. *Metals*. 2020;10(1):96.
- [11] Lee EM, Shin GY, Yoon HS, Shim DS. Study of the effects of process parameters on deposited single track of M4 powder based direct energy deposition. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017;31(7):3411-8.
- [12] 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*. 2018;100:265-71.
- [13] Sun Y, Hao M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd: YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012;50(7):985-95.
- [14] Pinkerton AJ. Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of laser applications*. 2015;27(S1):S15001.
- [15] Ansari M, Razavi RS, Barekat M. An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2016;86:136-44.
- [16] Saqib S, Urbanic R, Aggarwal K. Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths. *Procedia Cirp*. 2014;17:824-9.
- [17] Marko A, Schafner A, Raute J, Rethmeier M. Relative density prognosis for directed energy deposition with the help of artificial neural networks. *Material Testing*. 2021;63(1):41-7.
- [18] Davim JP, Oliveira C, Cardoso A. Predicting the geometric form of clad in laser cladding by powder using multiple regression analysis (MRA). *Materials & Design*. 2008;29(2):554-7.
- [19] Lian G, Yao M, Zhang Y, Chen C. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(5):2397-407.
- [20] Alizadeh-Sh M, Marashi S, Ranjbarnodeh E, Shoja-Razavi R, Oliveira J. Prediction of solidification cracking by an empirical-statistical analysis for laser cladding of Inconel 718 powder on a non-weldable substrate. *Optics & Laser Technology*. 2020;128:106244.
- [21] Meng G, Zhu L, Zhang J, Yang Z, Xue P. Statistical analysis and multi-objective process optimization of laser cladding TiC-Inconel718 composite coating. *Optik*. 2021;240:166828.
- [22] Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*. 2019;9(16):3316.
- [23] Yan X, Su XG. *Linear regression analysis. Theory and Computing*. 2003.
- [24] Ilanlou M, Razavi RS, Nourollahi A, Hosseini S, Haghghat S. Prediction of the geometric characteristics of the laser cladding of Inconel 718 on the Inconel 738 substrate via genetic algorithm and linear regression. *Optics & Laser Technology*. 2022;156:108507.
- [25] Gullipalli C, Thawari N, Chandak A, Gupta T. Statistical Analysis of Clad Geometry in Direct Energy Deposition of Inconel 718 Single Tracks. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022:1-11.

وایزشی چندگانه ارائه می‌کند. همه مقادیر  $R^2$  به دست آمده از نتایج نزدیک به عدد ۱ است که حاکی از تطابق مناسب معادله‌های پیش‌بینی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. اعتبار معادله‌های ایجادشده از طریق مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده و توزیع عادی باقیمانده داده‌ها صورت پذیرفت. مشخصات هندسی روکش‌های لایه‌نشانی شده تحت تأثیر متغیرهای فرایند قرار گرفت که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش لیزر، پهنا و ارتفاع روکش‌های لایه‌نشانی شده افزایش پیدا کرد در حالی که افزایش توان و سرعت روبش لیزر اثر وارون بر زاویه ترشوندگی روکش‌ها داشت و با افزایش این متغیرها، زاویه ترشوندگی کاهش یافت.

## قدردانی و تشکر

بدینوسیله از دکتر سعید لطفیان از دانشگاه استراسکلاید بریتانیا به خاطر در اختیار قراردادن مواد اولیه و انجام فرایند لایه‌نشانی از طریق انرژی مستقیم لیزر تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

## References

- [1] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;143:172-96.
- [2] Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *Additive Manufacturing Handbook*. 2017:149-68.
- [3] Ahn D-G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2021;8(2):703-42.
- [4] Wilson JM, Piya C, Shin YC, Zhao F, Ramani K. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2014;80:170-8.
- [5] Dass A, Moridi A. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*. 2019;9(7):418.
- [6] Marya M, Singh V, Hascoet J-Y, Marya S. A metallurgical investigation of the direct energy deposition surface repair of ferrous alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018;27(2):813-24.
- [7] Ezugwu E, Okeke C. Behavior of coated carbide tools in high speed machining of a nickel base alloy. *Tribology Transactions*. 2002;45(1):122-6.
- [8] Henderson M, Arrell D, Larsson R, Heobel M, Marchant G. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Science and technology of welding and joining*. 2004;9(1):13-21.
- [9] Onuikwe B, Bandyopadhyay A. Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Materials Letters*. 2019;252:256-9.