

## Experimental-statistical analysis for laser coating of NiCoCrAlY powder on CMSX-4 nickel base superalloy by response surface method

Dariush Biranbandi<sup>1</sup>, \*Alireza Mirak<sup>2</sup>, Reza Shoja razavi<sup>3</sup>, Mohamadreza Borhani<sup>4</sup>, Hamed Naderi samani<sup>4</sup>

1- MSc Post graduated, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

3- Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

4- PhD student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

**Citation:** Biranbandi D, Mirak A, Shoja razavi R, Borhani M, Naderi samani H. Experimental-statistical analysis for laser coating of NiCoCrAlY powder on CMSX-4 nickel base superalloy by response surface method, Metallurgical Engineering, 2024; 27(2):101 -114  
<https://doi.org/10.22076/me.2024.2008171.1385>

**doi :** <https://doi.org/10.22076/me.2024.2008171.1385>

### ABSTRACT

This research examines the effect of laser single layer coating process parameters including laser power, scanning speed and powder feeding rate on the geometrical characteristics of the layer (width, height, depth of penetration and fusion) by mathematical and experimental models. The powder used is NiCoCrAlY, which is coated on a substrate of nickel base CMSX-4 superalloy by laser coating process. In order to optimize the parameters and reduce the time spent in repeating the process, Statistical-experimental modeling of single-pass freezing geometry and microstructure was done using response surface method and linear regression analysis. The results showed that the predicted values correspond to the measured values. This review confirms the effectiveness of the models obtained from the regression analysis. Finally, the relationship between the main process parameters and geometrical characteristics were studied. Statistical modeling showed that there is a linear relationship between the geometrical characteristics of single-pass coating and the main parameters of the process. The correlation coefficient for all obtained equations was more than 0.9. The modeling results showed that the laser power has a direct effect on all the geometric features, While the powder feeding rate only affects the thickness and has a negative effect on the width and depth of penetration of the coating layer, The scanning speed has a negative effect. The optimal parameters of the process obtained from the response surface method are the laser power of 850 W, the scanning speed of 15 mm/s and the powder feeding rate of 4 g/min.

**Keywords:** Laser cladding, CMSX-4, geometrical characteristics, response surface method, regression analysis.

Received: August 10, 2023

Accepted: January 24, 2024

■ ..... ■  
**\*Corresponding Author:**

**Alireza Mirak, PhD**

**Address:** Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

**Tel:** +98 (9128044107)

**E-mail:** mirak@just.ac.ir

# تحلیل تجربی - آماری برای روکش کاری لیزری پودر NiCoCrAlY روی سوپرآلیاژ پایه نیکل CMSX-۴ با روش سطح پاسخ

داریوش بیرانوندی<sup>۱</sup>، علیرضا میرک<sup>۲</sup>، رضا شجاع رضوی<sup>۳</sup>، محمدرضا برهانی<sup>۴</sup>، حامد نادری سامانی<sup>۴</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- استاد، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴- دانشجوی دکتری مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

## چکیده

این تحقیق تاثیر پارامترهای فرایند روکش کاری تک لایه لیزری شامل توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر بر ویژگی‌های هندسی تک لایه (عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و آمیختگی) را توسط مدل‌های ریاضی و تجربی بررسی می‌کند. پودر مورد استفاده NiCoCrAlY است که بر روی زیرلایه ای از سوپرآلیاژ پایه نیکل CMSX-۴ توسط فرایند روکش کاری لیزری بررسی شد. به منظور بهینه‌سازی پارامترها و کاهش صرف زمان در تکرار فرایند، مدلسازی آماری-تجربی هندسه و ریزساختار انجمادی تکپاس با استفاده از روش سطح پاسخ و آنالیز رگرسیون خطی انجام شد. مدلسازی آماری نشان داد که رابط‌های خطی بین مشخصات هندسی روکش تکپاس و پارامترهای اصلی فرایند وجود دارد. مقدار ضریب هم‌هنگی برای تمامی معادلات به‌دست آمده بیش از ۰/۹ حاصل شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که توان لیزر بر تمام ویژگی‌های هندسی تاثیر مستقیم دارد، درحالی‌که نرخ تغذیه پودر تاثیر مستقیمی بر ضخامت روکش و اثر معکوس بر مقدار عرض و عمق نفوذ لایه روکش دارد. سرعت روبش نیز تاثیر معکوس بر مقدار عرض، عمق و ارتفاع لایه تکپاس دارد. پارامترهای بهینه فرایند به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ (RSM) عبارت از توان لیزر ۸۵۰ وات، سرعت روبش ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر ۴ گرم در دقیقه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: روکش کاری لیزری، سوپرآلیاژ CMSX۴، ویژگی‌های هندسی، روش سطح پاسخ، تحلیل رگرسیون.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹ | پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴

## ۱. مقدمه

روکش کاری لیزری، یک فناوری بین‌رشته‌ای است که از فناوری لیزر، طراحی و تولید به کمک رایانه، ربات، حسگرها، کنترل و متالورژی پودر بهره‌گیری می‌کند. این فرایند از منبع حرارتی لیزر برای نشان دادن لایه‌ای نازک روی فلز پایه بهره می‌گیرد [۱-۴]. توان لیزر، سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه پودر از پارامترهای اصلی فرایند روکش کاری لیزری هستند اما پارامترهای دیگری از قبیل توزیع انرژی پرتو لیزر، اندازه نقطه اثر پرتو لیزر، نرخ جریان و نوع گازهای حامل و محافظ وجود دارند که بر خواص و ریزساختار لایه ایجادشده اثرگذارند [۵-۷]. این پارامترهای فرایند با مقادیر مختلف می‌توانند لایه‌هایی با ویژگی‌های هندسی مختلف و ریزساختارهای متفاوت ایجاد کنند؛ بنابراین، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و پیش‌بینی خواص و هندسه پوشش چالش برانگیز است [۸-۹]. در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری جهت بررسی اثر پارامترهای

فرایند روکش کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی لایه با توسعه مدل‌های فیزیکی انجام شده است. با این حال، این فرایند شامل فعل و انفعالات فیزیکی میان پرتو لیزر/پودر / زیرلایه است که یافتن اثر هم‌افزایی در فرایند روکش کاری لیزری را بسیار پیچیده می‌کند؛ بنابراین مدل‌های تجربی - آماری مبتنی بر روش‌های رگرسیون خطی برای تحلیل فرایند رسوب‌گذاری معرفی شده است [۱۰-۱۲].

ژانگ و همکاران [۸] اثرات پارامترهای کلیدی فرایند بر ویژگی‌های هندسی لایه ایجادشده توسط فرایند روکش کاری لیزری را مورد مطالعه قرار دادند و ویژگی‌های هندسی لایه را با پارامترهای کلیدی فرایند با استفاده از روش تحلیل رگرسیون پیش‌بینی کردند. داویم و همکاران [۱۲] از روش تحلیل رگرسیون چندگانه برای پیش‌بینی هندسه لایه استفاده کردند که تاثیر پارامترهای کلیدی فرایند را بر هندسه لایه نشان داد. چویی و همکاران [۱۰] آزمایش روکش کاری لیزری آلیاژ پایه کبالت را با استفاده از روش طراحی

\* نویسنده مسئول:

دکتر علی‌رضا میرک

نشانی: مجتمع دانشکاهی مواد و فناوری ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تلفن: (۰۹۱۲۸۰۴۴۱۰۷) ۹۸+

پست الکترونیکی: mirak@just.ac.ir

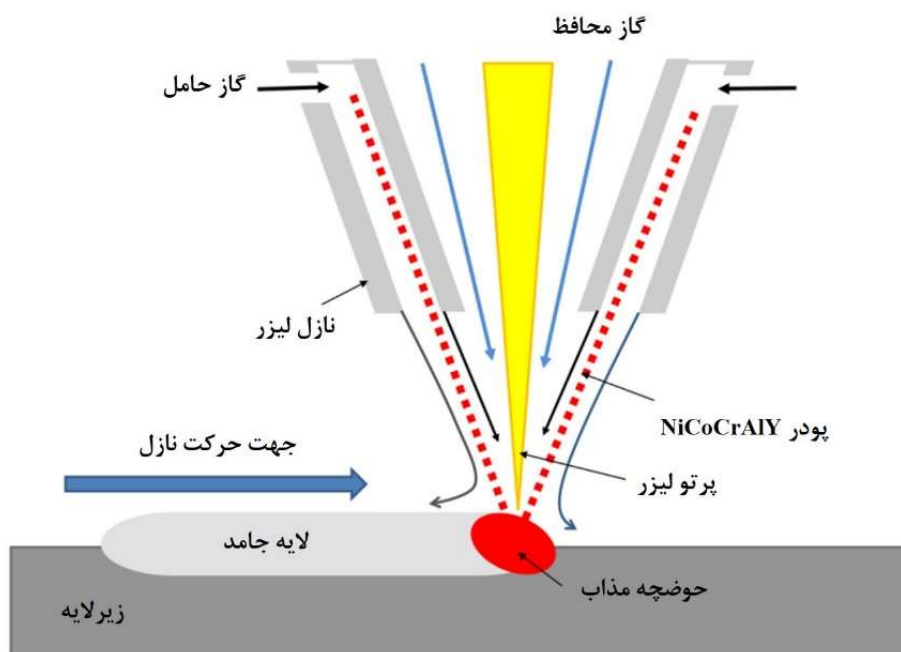
بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون دمای بالا، برای پره‌های توربین استفاده می‌شود. آن‌ها خانواده‌ای از پوشش‌های دمای بالا هستند که در آن M از یک یا ترکیبی از آهن، نیکل و یا کبالت انتخاب می‌شود. وجود مقدار قابل توجهی Cr به این پوشش‌ها مقاومت در برابر خوردگی عالی همراه با مقاومت در برابر اکسیداسیون خوب می‌دهد [۱۸-۱۹].

در طراحی آزمایش<sup>۴</sup> (DOE)، طرح آزمایشی باکس-بنکن یکی از روش‌های سطح پاسخ در تهیه یک مدل ریاضی اعمال شد. مدل ریاضی با روش تحلیل واریانس تأیید شد. رابطه بین پارامترهای فرایند و پاسخ خروجی و تعامل بین پارامترهای فرایند به تفصیل تجزیه و تحلیل و مورد بحث قرار گرفت؛ بنابراین، پژوهش حاضر باهدف بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی لایه پوششی NiCoCrAlY با استفاده از روش‌های سطح پاسخ و تحلیل رگرسیون و سپس توسعه یک مدل تجربی-آماری مورد استفاده برای رسوب پودر NiCoCrAlY از طریق فناوری روکش کاری لیزری انجام شد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در آزمایش حاضر از یک دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری فیبری پیوسته با طول موج ۱۰۸۴ نانومتر، حداکثر توان لیزر یک کیلووات، سیستم پاشش پودر هم‌محور ناپیوسته و سیستم خنک‌کننده چیلر استفاده شد. آرگون به عنوان گاز محافظ و حامل به ترتیب با دبی ۱۵ لیتر در دقیقه و ۱۰ لیتر در دقیقه استفاده شد. طرح‌واره فرایند روکش کاری لیزری در شکل ۱ نشان داده شده است.

باکس-بنکن<sup>۱</sup> طراحی کردند. نتایج تجربی و تحلیلی نشان داد که پارامترهای فرایند ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های هندسی لایه تک‌پاس دارند و استفاده از تحلیل روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> (RSM) و تحلیل واریانس<sup>۳</sup> (ANOVA) برای مدل‌سازی و تحلیل رابطه بین پارامترهای فرایند و ویژگی‌های هندسی هم منطقی و هم امکان‌پذیر است. عرفان‌منش و همکاران [۱۳] و انصاری و همکاران [۱۴] یک پارامتر ترکیبی ( $P^{\alpha}V^{\beta}F^{\gamma}$ ) را برای پیش‌بینی هندسه لایه ایجادشده با فرایند روکش کاری لیزری معرفی کردند. مدل پیشنهادی با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی ارائه شده است و نقشه فرایند می‌تواند ویژگی‌های هندسی یک لایه تک‌پاس را با توجه به پارامترهای اصلی پیش‌بینی کند. آلیاژ CMSX-۴ یک سوپر آلیاژ پایه نیکل است که در صنعت هوایی در بخش پره‌های داغ موتورهای توربین هوایی استفاده می‌شود. مهم‌ترین بخش‌های توربین‌های هوایی، قطعات مسیر داغ آن‌ها است که پره‌های ثابت و متحرک توربین یکی از انواع این قطعات است. پره‌ها که در شرایط شدید دمایی، مکانیکی و خوردگی قرار دارند در معرض انواع آسیب‌ها نظیر خزش، خستگی و خوردگی داغ قرار می‌گیرند [۱۵-۱۷]. حفاظت و مقاوم‌سازی این آلیاژ در برابر اکسیداسیون و خوردگی داغ در دمای کاری توربین هوایی به منظور افزایش طول عمر آن امری ضروری است. در این شرایط کارکردی، حفاظت از پره‌ها را می‌توان با اعمال پوشش تأمین نمود. یکی از مهم‌ترین این پوشش‌ها، پوشش‌های محافظ MCrAlY به‌طور گسترده‌ای به عنوان پوشش میانی بین زیرلایه و پوشش سد حرارتی به کار می‌رود و به دلیل چسبندگی خوب، مدول بالا، مقاومت

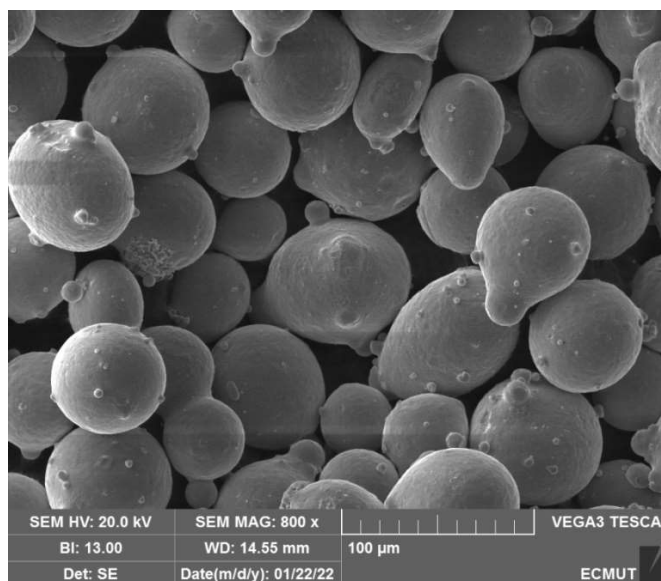


شکل ۱: طرح‌واره فرایند روکش کاری لیزری

- 1 Box-Behnken
- 2 Response Surface Methodology
- 3 Analysis of Variance
- 4 Design of Experiment

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی زیرلایه CMSX-4 و پودر NiCoCrAlY 365-2 (درصد وزنی)

| عنصر    | Ni   | Co  | Cr  | Al   | Y   | Ti | Hf  | W   | Re | Ta  | Mo  |
|---------|------|-----|-----|------|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|
| زیرلایه | Bal. | 9.5 | 6.5 | 5.6  | -   | 1  | 0.1 | 6.4 | 3  | 6.5 | 0.6 |
| پودر    | Bal. | 23  | 17  | 12.5 | 0.7 | -  | -   | -   | -  | -   | -   |



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از موفولوژی پودر NiCoCrAlY 365-2.

سطح پاسخ برای ایجاد یک ماتریس سه عاملی و سه سطحی با ۱۲ نقطه محوری و یک نقطه مرکزی استفاده شد. در مجموع ۱۳ گروه آزمایشی بر اساس پارامترهای مستقل و پاسخ طراحی شد. جدول ۲ پارامترهای مستقل فرایند و سطوح کدگذاری را توصیف می‌کند و جدول ۳ طراحی آزمایش با روش بکس-بنکن را نشان می‌دهد. پارامترهای پاسخ (عرض، ارتفاع و عمق نفوذ) با استفاده از نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد.

برای بررسی ویژگی‌های هندسی لایه‌های تک‌پاس، ۱۳ نمونه متالوگرافی از لایه‌های تک‌پاس NiCoCrAlY ۳۶۵-۲ توسط دستگاه وایرکات از مقطع برش داده شد. سطح هر نمونه پرداخت داده شد و با محلول ماربل<sup>۱۰</sup> ((CuSO<sub>4</sub> (10 g) + HCl (50 ml) + Water (50 ml)) به صورت شیمیایی اچ شد. ویژگی‌های هندسی در شکل ۳ برای یک لایه تک‌پاس و تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع لایه‌های تک‌پاس در شکل ۴ نشان داده شده است. H (mm) ارتفاع لایه تک‌پاس، W (mm) نشان‌دهنده عرض لایه تک‌پاس و h (mm) عمق نفوذ به زیرلایه است. همچنین لازم به ذکر است که درصد آمیختگی D (/) که یک ویژگی هندسی مهم است، با معادله زیر تعریف می‌شود [۵، ۲]:

$$D = \frac{h}{h+H} \times 100\% \quad (1)$$

زیرلایه مورد استفاده در این مطالعه سوپرآلیاژ پایه نیکل CMSX-۴ به شکل استوانه با قطر ۲۰ میلی متر و ضخامت ۵ میلی متر و پودر NiCoCrAlY ۳۶۵-۲ با اندازه ذرات ۷۰-۴۰ میکرون به عنوان ماده پوشش استفاده شد. ابتدا سطح زیرلایه با سمباده پرداخت شده و سپس سطح با استون تمیز شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه و پودر در جدول ۱ ارائه شده است. تصویر میکروسکوپی الکترونی از موفولوژی پودر NiCoCrAlY ۳۶۵-۲ مورد استفاده به عنوان پوشش در شکل ۲ نشان داده شده است. روش سطح پاسخ (RSM) یک روش ریاضی و آماری است که برای ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی مستقل و پاسخ‌ها برای بهینه‌سازی پاسخ هدف استفاده می‌شود. برای ایجاد یک تابع رگرسیون مناسب بین متغیرهای مستقل و متغیرهای پاسخ، از روش بکس-بنکن برای طراحی آزمایش استفاده شد. روش طراحی بکس-بنکن می‌تواند تا حد امکان اثر متغیر تجربی و اطلاعات کلی خطای آزمایش را در کمترین تعداد اجرا استخراج کند و به طور مؤثر اجرا شود [۱۰].

برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری بر ویژگی‌های هندسی لایه تک‌پاس، بر اساس روش سطح پاسخ، توان لیزر (P)، سرعت روبش (V) و نرخ تغذیه پودر (F) به عنوان متغیرهای مستقل و عرض لایه (W)، ارتفاع لایه (H)، عمق نفوذ (h) و درصد آمیختگی (D) به عنوان متغیرهای پاسخ استفاده شدند؛ بنابراین از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه هفت<sup>۵</sup> و روش

جدول ۲: پارامترهای فرآیند و سطوح مربوطه

| متغیر مستقل    | نماد | واحد  | سطح           |
|----------------|------|-------|---------------|
| توان لیزر      | P    | W     | ۷۵۰، ۸۵۰، ۹۵۰ |
| سرعت روبش      | V    | mm/s  | ۱۰، ۱۵، ۲۰    |
| نرخ تغذیه پودر | F    | g/min | ۲، ۴، ۶       |

جدول ۳: طراحی آزمایش با روش Box-Behnken و نتایج آزمایش

| کد نمونه | پارامترهای مستقل |         |          | پارامترهای پاسخ |       |      |
|----------|------------------|---------|----------|-----------------|-------|------|
|          | P(W)             | V(mm/s) | F(g/min) | W(mm)           | H(mm) | D(%) |
| ۱        | ۷۵۰              | ۱۰      | ۴        | ۰/۴۶۵           | ۰/۱۷۹ | ۳۱   |
| ۲        | ۷۵۰              | ۱۵      | ۲        | ۰/۴۲۹           | ۰/۱۵۰ | ۲۳   |
| ۳        | ۷۵۰              | ۱۵      | ۶        | ۰/۴۵۷           | ۰/۰۹  | ۳۵   |
| ۴        | ۷۵۰              | ۲۰      | ۴        | ۰/۴۵۰           | ۰/۱۰۱ | ۳۳   |
| ۵        | ۸۵۰              | ۱۰      | ۲        | ۱/۳۰۵           | ۰/۵۳۴ | ۲۰   |
| ۶        | ۸۵۰              | ۱۰      | ۶        | ۱/۲۳۲           | ۰/۴۸۸ | ۲۱   |
| ۷        | ۸۵۰              | ۱۵      | ۴        | ۱/۲۲۹           | ۰/۳۵۷ | ۳۰   |
| ۸        | ۸۵۰              | ۲۰      | ۲        | ۱/۱۶۴           | ۰/۲۷۸ | ۳۵   |
| ۹        | ۸۵۰              | ۲۰      | ۶        | ۱/۱۶۱           | ۰/۴۵۰ | ۲۱   |
| ۱۰       | ۹۵۰              | ۱۰      | ۴        | ۱/۵۳۷           | ۰/۸۲۰ | ۱۹   |
| ۱۱       | ۹۵۰              | ۱۵      | ۲        | ۱/۶۴۶           | ۰/۴۰۶ | ۳۰   |
| ۱۲       | ۹۵۰              | ۱۵      | ۶        | ۱/۵۱۴           | ۰/۶۸۷ | ۱۹   |
| ۱۳       | ۹۵۰              | ۲۰      | ۴        | ۱/۴۰۳           | ۰/۵۴۵ | ۲۲   |

### ۳. نتایج و بحث

جدول‌های ۳ تا ۶ خلاصه‌ای از نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) را برای پاسخ‌های ویژگی‌های هندسی (عرض، ارتفاع و عمق) به ترتیب ارائه می‌دهند که در آن درجه آزادی<sup>۶</sup> (DF)، مجموع مربع‌ها<sup>۷</sup> (SS) و میانگین مربع‌ها<sup>۸</sup> (MS) است. مقدار F (F value) نسبت تغییرات گروهی و تغییرات درون گروهی است و مقدار P (P value) برای تعیین اهمیت آزمون استفاده

می‌شود. مقدار P کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که عبارات مدل معنی‌دار<sup>۹</sup> هستند. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل، مدل‌های سه ویژگی هندسی یادشده بر اساس مقادیر F معنی‌دار هستند. مقدار  $R^2$  شباهت بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های پیش‌بینی‌شده را توصیف می‌کند. هر چه مقدار  $R^2$  به یک نزدیک‌تر باشد، دو مجموعه داده به هم نزدیک‌تر هستند [۲۰].

6 Degree of Freedom  
7 Sum of Squares  
8 Mean Square  
9 Significant

شرح زیر است:

$$P < P^2 < V < PF < F < PV$$

شکل ۵ نمودار آشفته‌گی متغیرهای ورودی در W را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد اثر P روی W مثبت است درحالی‌که اثر F و V روی W منفی است.

تحلیل واریانس برای ارتفاع لایه تک‌پاس در جدول ۵ نشان می‌دهد که مقدار F مدل برابر با ۹۱/۱۸ و مقدار داده‌های پرت برای مقدار F برابر با صفر است که نشان می‌دهد عبارت در مدل بسیار با پاسخ مرتبط است و مقدار P مدل برابر با ۰۰۶/۰ و مقدار داده‌های پرت برای مقدار P برابر با صفر است. بر اساس این تحلیل مدل فقط ۰۶/۰ درصد احتمال انحراف دارد که نشان می‌دهد مدل به‌خوبی برازش شده است. مقدار  $R^2$  برابر با ۱۱/۹۳ درصد است که نشان می‌دهد انطباق زیادی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده وجود دارد. مقدار  $Adj R^2$  برابر با ۱۸/۸۸ درصد است که نشان می‌دهد مدل دارای درجه بالایی از برازش با پاسخ است. مقدار  $Pred R^2$  برابر با ۴۳/۷۰ درصد است که نشان می‌دهد مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ جدید مؤثر است.  $Adeq Precision$  (نسبت سیگنال اندازه‌گیری شده به نویز) برابر با ۰۶۷/۱۳ است که بسیار بیشتر از چهار است که نشان می‌دهد دقت مدل و نرخ تشخیص آن زیاد است؛ بنابراین می‌توان معادله (۳) را معادله رگرسیون برای رابطه‌ی بین ارتفاع لایه و پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری تعریف کرد.

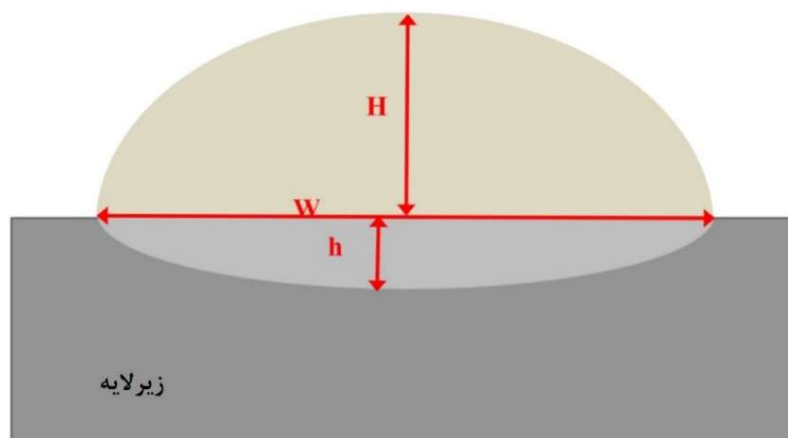
تحلیل واریانس برای عرض لایه تک‌پاس در جدول ۴ نشان می‌دهد که مقدار F مدل ۴۱/۱۷۵ و مقدار داده‌های پرت<sup>۱۰</sup> برای مقدار F برابر با صفر است که نشان می‌دهد عبارت در مدل بسیار با پاسخ مرتبط است و مقدار P مدل کمتر از ۰۰۰۱/۰ و مقدار داده‌های پرت برای مقدار P برابر با صفر است. بر اساس این تحلیل مدل فقط ۰۱/۰ درصد احتمال انحراف دارد که نشان می‌دهد مدل به‌خوبی برازش شده است.

مقدار  $R^2$  برابر با ۴۳/۹۹ درصد است که نشان می‌دهد انطباق زیادی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده وجود دارد. مقدار  $Adj R^2$  برابر با ۸۷/۹۸ درصد است که نشان می‌دهد مدل دارای درجه بالایی از برازش با پاسخ است. مقدار  $Pred R^2$  برابر با ۹۶/۲۳ درصد است که نشان می‌دهد مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ جدید مؤثر است.  $Adeq Precision$  (نسبت سیگنال اندازه‌گیری شده به نویز) برابر با ۶۰۸/۳۲ است که بسیار بیشتر از چهار است که نشان می‌دهد دقت مدل و نرخ تشخیص آن زیاد است. بنابراین می‌توان معادله (۲) را معادله رگرسیون برای رابطه‌ی بین عرض لایه و پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری تعریف کرد.

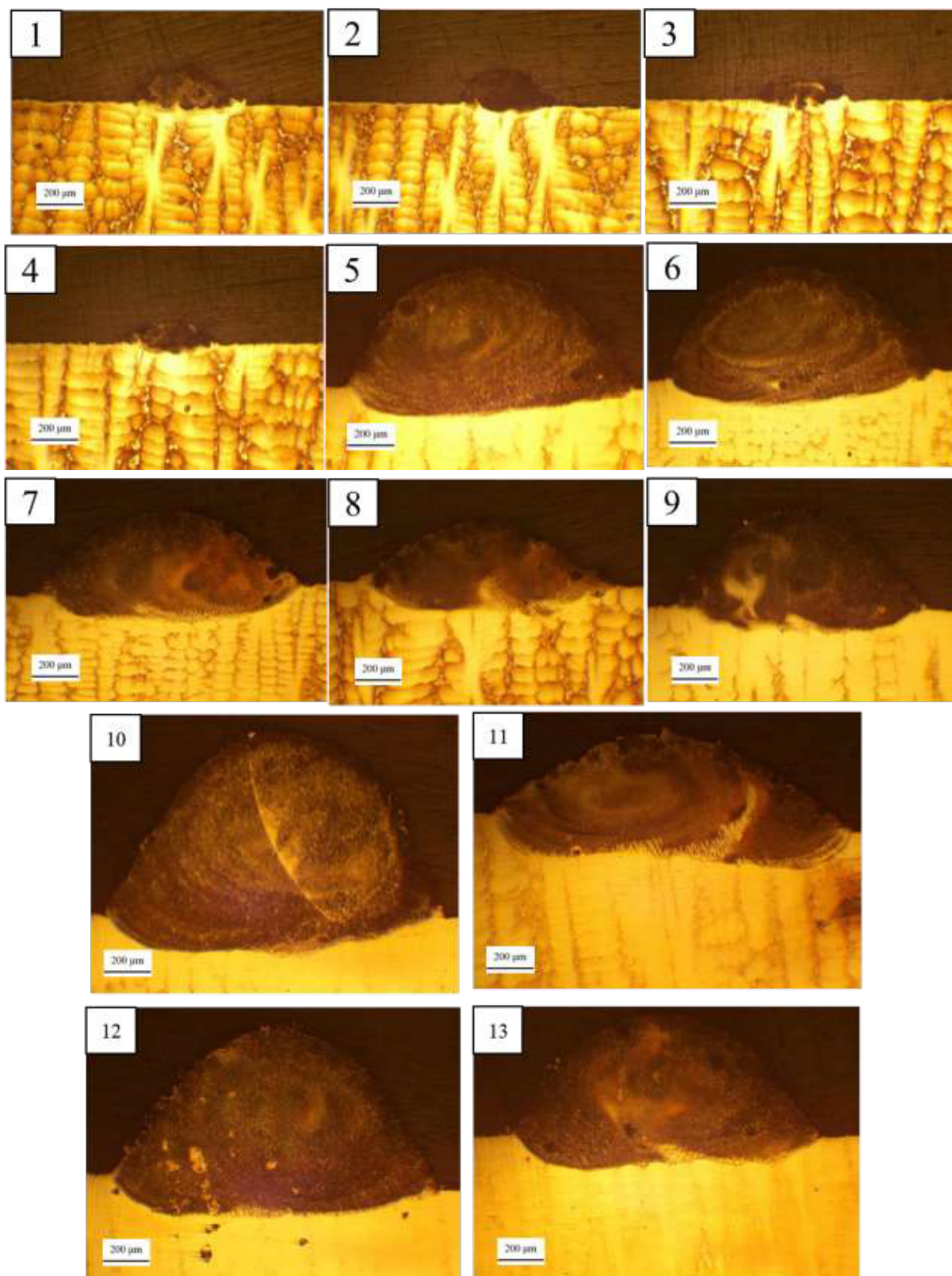
معادله رگرسیونی مربوط به عرض لایه شامل عبارت خطی P، V و F، عبارت درجه دوم  $P^2$  و عبارت PF و PV نشان می‌دهد که متغیرهای مؤثر اصلی برای متغیر پاسخ عرض لایه هستند. با توجه به مقدار P برای هر عبارت معادله ترتیب میزان تأثیر هر کدام بر متغیر پاسخ عرض لایه به

$$W = -0.2126678 + (0.046264P) + (0.041550V) + (0.15875F) - (5.95E - 005PV) - (2E - 004PF) - (2.30575E - 005P^2) \quad (2)$$

$$H = 0.26415 + (7.715E - 004P) - (0.037975V) - (0.42237F) + (4.2625E - 004PF) + (5.45E - 003VF) \quad (3)$$



شکل ۳: تصویر ویژگی‌های هندسی برای یک لایه تک‌پاس



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع لایه‌های تک‌پاس

جدول ۴: تحلیل واریانس برای عرض لایه

| Source         | SS         | DF | MS         | F Value | P value  |             |
|----------------|------------|----|------------|---------|----------|-------------|
| Model          | 2.50       | 6  | 0.42       | 175.41  | < 0.0001 | significant |
| P              | 2.31       | 1  | 2.31       | 970.99  | < 0.0001 |             |
| V              | 0.016      | 1  | 0.016      | 6.85    | 0.0398   |             |
| F              | 4.050E-003 | 1  | 4.050E-003 | 1.70    | 0.2398   |             |
| PV             | 3.540E-003 | 1  | 3.540E-003 | 1.49    | 0.2683   |             |
| PF             | 6.400E-003 | 1  | 6.400E-003 | 2.69    | 0.1521   |             |
| P <sup>2</sup> | 0.16       | 1  | 0.16       | 68.76   | 0.0002   |             |
| Residual       | 0.014      | 6  | 2.379E-003 |         |          |             |
| Cor Total      | 2.52       | 12 |            |         |          |             |

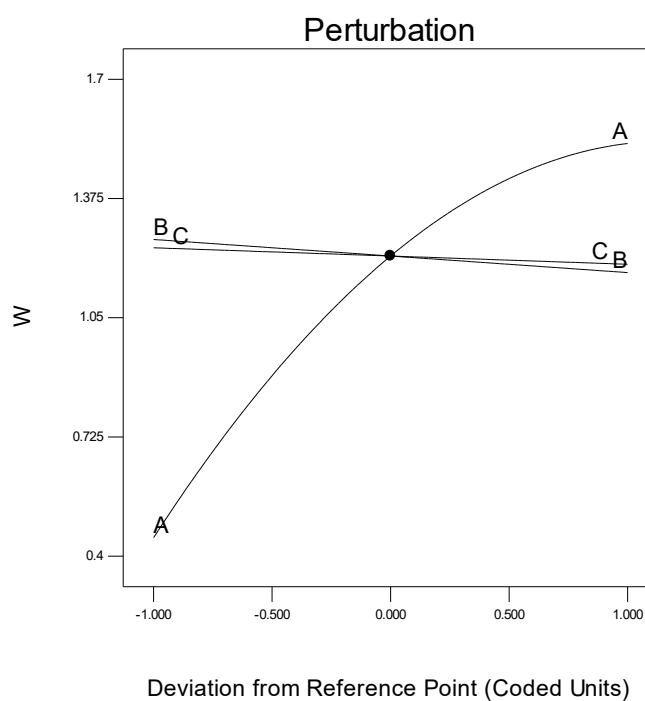
  

|           |       |                |        |
|-----------|-------|----------------|--------|
| Std. Dev. | 0.049 | R-Squared      | 0.9943 |
| Mean      | 1.08  | Adj R-Squared  | 0.9887 |
| C.V. %    | 4.53  | Pred R-Squared | 0.9623 |
| PRESS     | 0.095 | Adeq Precision | 32.608 |

Design-Expert® Software

W  
● W

Actual Factors  
A: P = 850.00  
B: V = 15.00  
C: F = 4.00



شکل ۵: نمودار آشفتگی متغیرهای ورودی در W

جدول ۵: تحلیل واریانس برای ارتفاع لایه

| Source    | SS         | DF   | MS    | F Value | P value  |             |
|-----------|------------|------|-------|---------|----------|-------------|
| Model     | 0.58       | 5    | 0.12  | 18.91   | 0.0006   | significant |
| P         | 0.47       | 1    | 0.47  | 76.82   | < 0.0001 |             |
| V         | 0.052      | 1    | 0.052 | 8.56    | 0.0221   |             |
| F         | 0.015      | 1    | 0.015 | 2.46    | 0.1606   |             |
| PF        | 0.029      | 1    | 0.029 | 4.76    | 0.0655   |             |
| VF        | 0.012      | 1    | 0.012 | 1.94    | 0.2059   |             |
| Residual  | 6.111E-003 | 7    | 0.043 |         |          |             |
| Cor Total | 12         | 0.62 |       |         |          |             |

|           |       |                |        |
|-----------|-------|----------------|--------|
| Std. Dev. | 0.078 | R-Squared      | 0.9311 |
| Mean      | 0.39  | Adj R-Squared  | 0.8818 |
| C.V. %    | 19.99 | Pred R-Squared | 0.7043 |
| PRESS     | 0.18  | Adeq Precision | 13.067 |

Design-Expert® Software

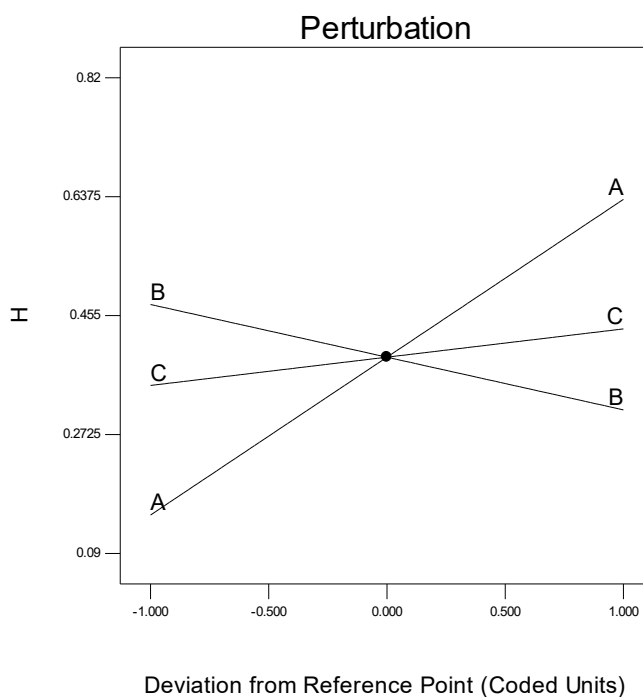
 H  
 • H

Actual Factors

A: P = 850.00

B: V = 15.00

C: F = 4.00



شکل ۶: نمودار آشفتگی متغیرهای ورودی در H

برای هر عبارت معادله ترتیب میزان تأثیر هر کدام بر متغیر پاسخ عرض لایه به شرح زیر است:

$$P < V < VF < F < PF$$

شکل ۷ نمودار آشفستگی متغیرهای ورودی در  $h$  را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد اثر  $P$  روی  $h$  مثبت است در حالی که اثر  $V$  و  $F$  روی  $h$  منفی است. عمق نفوذ لایه با افزایش نرخ تغذیه پودر کاهش می‌یابد و با افزایش لیزر افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت اسکن، انرژی لیزر بیشتری جذب زیرلایه شده و در نتیجه منجر به افزایش عمق نفوذ می‌شود. با این حال، با افزایش نرخ تغذیه پودر، انرژی لیزر بیشتری توسط ذرات پودر جذب می‌شود و در نتیجه انرژی لیزر کمتری به زیرلایه می‌رسد.

از معادلات (۱)، (۳)، (۴) می‌توان آمیختگی لایه را به دست آورد. برای محاسبه اثر برآزش معادلات (۲) تا (۵) برای داده‌های تجربی، از معادله خطای متوسط استفاده می‌شود که در آن  $\varepsilon$  میانگین خطا،  $n$  تعداد کل گروه‌های آزمایشی،  $A_i$  مقدار واقعی،  $P$  مقدار پیش‌بینی‌شده و  $i = 1, 2, 3, \dots, [8, 20]$ .

جدول‌های ۷ و ۸ اطلاعات مربوط به داده‌های تجربی، مقادیر پیش‌بینی‌شده حاصل از معادلات (۲) تا (۵) و درصد خطا برای هر یک از ۱۳ لایه تک‌پاس را نشان می‌دهد. میانگین خطا بین مقدار پیش‌بینی‌شده عرض لایه و مقدار واقعی آن برابر با ۹/۶۳۷ درصد، عمق نفوذ لایه و مقدار واقعی آن برابر با ۸/۷۳۵ درصد و درصد آمیختگی لایه و مقدار واقعی آن برابر با ۶/۶۷۲ درصد به دست آمد. برای تعیین پارامترهای بهینه فرآیند روکش‌کاری لیزری، از نرم‌افزار DESIGN EXPERT vision 7 استفاده شد. جدول ۹ مطلوب‌ترین شرایط فرآیند را نشان می‌دهد. محدوده مطلوب‌ترین پارامترهای پاسخ فرآیند عبارتند از عرض لایه از ۸/۰ تا ۴/۱ میلی‌متر، ارتفاع لایه از ۳۵/۰ تا ۶۵/۰ میلی‌متر و عمق نفوذ از ۰/۸ تا ۱۴/۰ میلی‌متر. با توجه به نتایج جدول ۷ در این مطالعه توان لیزر ۸۵۰ وات، سرعت اسکن ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر ۴ گرم در دقیقه است که به‌عنوان پارامتر بهینه فرآیند تعیین شد.

معادله رگرسیونی مربوط به ارتفاع لایه شامل عبارت خطی  $P$ ،  $V$  و  $F$  و عبارت  $PF$  و  $VF$  نشان می‌دهد که متغیرهای مؤثر اصلی برای متغیر پاسخ ارتفاع لایه هستند. با توجه به مقدار  $P$  برای هر عبارت معادله ترتیب میزان تأثیر هر کدام بر متغیر پاسخ عرض لایه به شرح زیر است:

$$P < V < PF < F < VF$$

شکل ۶ نمودار آشفستگی متغیرهای ورودی در  $H$  را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد اثر  $P$  و  $F$  روی  $H$  مثبت است در حالی که اثر  $V$  روی  $H$  منفی است. سرعت روبش کمتر منجر به ایجاد یک لایه ضخیم‌تر می‌شود. این به دلیل این واقعیت است که پودر بیشتری در واحد زمان به ناحیه مذاب تزریق می‌شود. همچنین با افزایش توان لیزر، مواد پودر کافی به حوضچه مذاب در طول فرآیند روکش‌کاری لیزری وارد نمی‌شود و در نتیجه ارتفاع روکش کم‌تر می‌شود.

تحلیل واریانس برای عمق نفوذ لایه تک‌پاس در جدول ۶ نشان می‌دهد که مقدار  $F$  مدل برابر با ۸۶/۱۳ و مقدار داده‌های پرت برای مقدار  $F$  برابر با صفر است که نشان می‌دهد عبارت در مدل بسیار با پاسخ مرتبط است و مقدار  $P$  مدل برابر با ۰۰۱۶/۰ و مقدار داده‌های پرت برای مقدار  $P$  برابر با صفر است. بر اساس این تحلیل مدل فقط ۱۶/۰ درصد احتمال انحراف دارد که نشان می‌دهد مدل به‌خوبی برازش شده است.

AdeqPrecision (نسبت سیگنال اندازه‌گیری شده به نویز) برابر با ۷۴۹/۹ است که بیشتر از چهار است که نشان می‌دهد دقت مدل و نرخ تشخیص آن مناسب است؛ بنابراین می‌توان معادله (۴) را معادله رگرسیونی برای رابطه بین ارتفاع لایه و پارامترهای فرآیند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد. مقدار  $R^2$  برابر با ۸۲/۹۰ درصد است که نشان می‌دهد انطباق زیادی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی‌شده وجود دارد. مقدار  $Adj R^2$  برابر با ۸۴/۲۷ درصد است که نشان می‌دهد مدل دارای درجه بالایی از برازش با پاسخ است. نشان می‌دهد مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ جدید مؤثر است.

معادله رگرسیونی مربوط به ارتفاع لایه شامل عبارت خطی  $P$ ،  $V$  و  $F$  و عبارت  $PF$  و  $VF$  نشان می‌دهد که متغیرهای مؤثر اصلی برای متغیر پاسخ عمق نفوذ لایه هستند. با توجه به مقدار  $P$

$$h = -0.44590 + (6.55E - 004P) + (1.5E - 003V) + (0.025F) - (1.875E - 005PF) - (7.75E - 004VF) \quad (4)$$

$$D = \frac{-0.44590 + (6.55E - 004P) + (1.5E - 003V) + (0.025F) - (1.875E - 005PF) - (7.75E - 004VF)}{-0.18175 + (14.27E - 004P) - (0.0364V) - (0.3974F) + (4.075E - 004PF) + (4.675E - 003VF)} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - P_i|}{A_i} \times 100\% \quad (6)$$

جدول ۶: تحلیل واریانس برای عمق نفوذ لایه

| Source    | SS         | DF | MS         | F Value | P value  |             |
|-----------|------------|----|------------|---------|----------|-------------|
| Model     | 0.028      | 5  | 5.588E-003 | 13.86   | 0.0016   | significant |
| P         | 0.027      | 1  | 0.027      | 66.74   | < 0.0001 |             |
| V         | 5.120E-004 | 1  | 5.120E-004 | 1.27    | 0.2970   |             |
| F         | 2.205E-004 | 1  | 2.205E-004 | 0.55    | 0.4837   |             |
| PF        | 5.625E-005 | 1  | 5.625E-005 | 0.14    | 0.7198   |             |
| VF        | 2.403E-004 | 1  | 2.403E-004 | 0.60    | 0.4654   |             |
| Residual  | 2.823E-003 | 7  | 4.032E-004 |         |          |             |
| Cor Total | 0.031      | 12 |            |         |          |             |

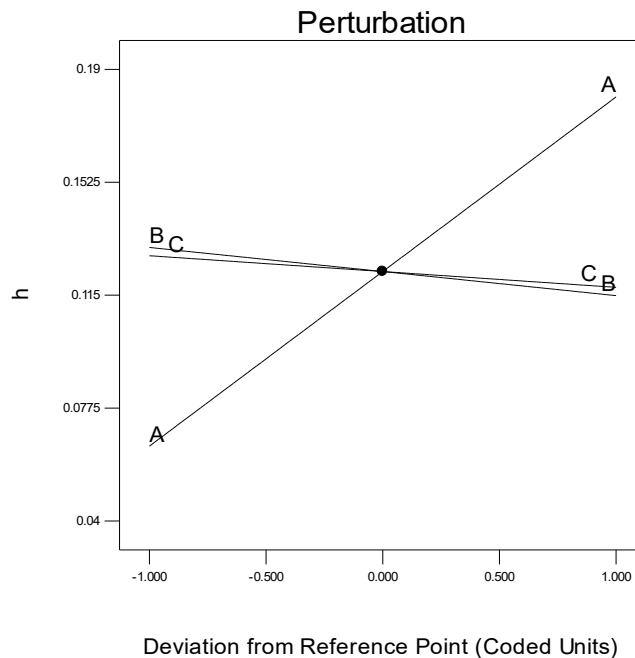
  

|           |       |                |        |
|-----------|-------|----------------|--------|
| Std. Dev. | 0.020 | R-Squared      | 0.9082 |
| Mean      | 0.12  | Adj R-Squared  | 0.8427 |
| C.V. %    | 16.35 | Pred R-Squared | 0.6369 |
| PRESS     | 0.011 | Adeq Precision | 9.749  |

Design-Expert® Software

h  
• h

Actual Factors  
A: P = 850.00  
B: V = 15.00  
C: F = 4.00



شکل ۷: نمودار آشفتگی متغیرهای ورودی در h

جدول ۷: اطلاعات مربوط به داده‌های تجربی، مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از معادلات (۲) و (۳) و درصد خطا برای عرض و ارتفاع لایه‌های تک‌پاس

| P(W) | V(mm/s) | F(g/min) | W(mm) | Eq.2  | Error(%) | H(mm)   | Eq.3  | Error(%) |
|------|---------|----------|-------|-------|----------|---------|-------|----------|
| 750  | 10      | 4        | 0.465 | 0.466 | 0.135    | 0.179   | 0.200 | 11.617   |
| 750  | 15      | 2        | 0.429 | 0.433 | 0.874    | 0.150   | 0.171 | 13.857   |
| 750  | 15      | 6        | 0.457 | 0.468 | 2.353    | 0.090   | 0.101 | 12.283   |
| 750  | 20      | 4        | 0.450 | 0.435 | 3.361    | 0.101   | 0.089 | 11.837   |
| 850  | 10      | 2        | 1.305 | 1.286 | 1.469    | 0.534   | 0.483 | 9.521    |
| 850  | 10      | 6        | 1.232 | 1.241 | 0.716    | 0.488   | 0.461 | 5.547    |
| 850  | 15      | 4        | 1.229 | 1.218 | 0.879    | 0.357   | 0.391 | 9.571    |
| 850  | 20      | 2        | 1.164 | 1.196 | 2.713    | 0.278   | 0.242 | 12.802   |
| 850  | 20      | 6        | 1.161 | 1.151 | 0.898    | 0.450   | 0.408 | 9.293    |
| 950  | 10      | 4        | 1.537 | 1.600 | 4.091    | 0.820   | 0.734 | 10.452   |
| 950  | 15      | 2        | 1.646 | 1.588 | 3.554    | 0.406   | 0.455 | 12.016   |
| 950  | 15      | 6        | 1.514 | 1.463 | 3.402    | 0.687   | 0.722 | 5.103    |
| 950  | 20      | 4        | 1.403 | 1.450 | 3.359    | 0.545   | 0.553 | 1.384    |
|      |         |          |       |       | ε=2.139  | ε=9.637 |       |          |

جدول ۹: بهینه سازی عددی پارامترهای فرآیند روکش کاری لیزری توسط 7 Design Expert vision.

| Solution Number | P      | V     | F    | W       | H        | h        | Desirability |          |
|-----------------|--------|-------|------|---------|----------|----------|--------------|----------|
| 1               | 830.27 | 16.22 | 5.77 | 1.08069 | 0.35894  | 0.103778 | 1.000        | Selected |
| 2               | 816.96 | 11.60 | 4.86 | 1.0355  | 0.356704 | 0.109671 | 1.000        |          |
| 3               | 831.54 | 10.24 | 5.56 | 1.13709 | 0.404503 | 0.121974 | 1.000        |          |
| 4               | 808.91 | 11.50 | 3.36 | 0.9834  | 0.357771 | 0.104055 | 1.000        |          |
| 5               | 837.27 | 13.73 | 2.54 | 1.16931 | 0.367255 | 0.119548 | 1.000        |          |
| 6               | 880.64 | 18.71 | 3.99 | 1.32108 | 0.404828 | 0.13473  | 1.000        |          |
| 7               | 844.57 | 14.11 | 2.46 | 1.21177 | 0.370001 | 0.12395  | 1.000        |          |
| 8               | 834.64 | 13.54 | 3.28 | 1.14792 | 0.37233  | 0.117137 | 1.000        |          |
| 9               | 837.05 | 17.40 | 5.21 | 1.1144  | 0.356311 | 0.10635  | 1.000        |          |
| 10              | 848.74 | 13.80 | 2.36 | 1.24013 | 0.383526 | 0.126772 | 1.000        |          |

## References

- 1- Zhu L, Xue P, Lan Q, Meng G, Ren Y, Yang Z, Xu P, Liu Z. "Recent research and development status of laser cladding: A review." *Optics & Laser Technology*. 2021 Jun 1;138:106915.
- 2- Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.F., "Laser cladding." CRC press. 2004.
- 3- Silvello A, Perrone A. "Laser Cladding of Metals." Cavaliere P, editor. Springer; 2021.
- ۴- شجاع رضوی، ر.، «روکش کاری لیزری»، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران ۱۳۹۵.
- 5- 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 Jul 1;50(7):985-95.
- 6- 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 Coatings Technology*. 2021 Sep 25;422:127494.
- 7- 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 Mar 1;100:265-71.
- 8- 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*. 2019 Aug 20;31(3):032016.
- 9- 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.
- 10- Cui LJ, Zhang M, Guo SR, Cao YL, Zeng WH, Li XL, Zheng B. "Multi-objective numerical simulation of geometrical characteristics of laser cladding of cobalt-based alloy based on response surface methodology." *Measurement and Control*. 2021 Sep;54(7-8):1125-35.
- 11- 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 Jul;97(5):2397-407.
- 12- 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 Jan 1;29(2):554-7.
- 13- Erfanmanesh M, Abdollah-Pour H, Mohammadian-Semnani H, Shoja-Razavi R. "An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel." *Optics & Laser Technology*. 2017 Dec 1;97:180-6.
- 14- Ansari M, Razavi RS, Barekat M. "An empirical-statistical model for co-axial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy." *Optics & Laser Technology*. 2016 Dec 1;86:136-44.

## ۴. نتیجه گیری

(۱) پودر ۲-۳۶۵ NiCoCrAlY از طریق فرآیند روکش کاری لیزری روی زیرلایه CMSX-۴ به عنوان پوشش تک لایه ایجاد شد. اثرات پارامترهای کلیدی فرآیند بر ویژگی های هندسی لایه تک پاس مورد مطالعه قرار گرفت. مدل های آماری حاصل از داده های تجربی می تواند ویژگی های هندسی لایه های تک پاس را با پارامترهای کلیدی فرآیند مانند توان لیزر، نرخ تغذیه پودر و سرعت روبش با استفاده از روش تحلیل رگرسیون پیش بینی کند.

(۲) مدل های ریاضی بر اساس داده های تجربی با استفاده از روش رگرسیون گام به گام ایجاد شد و با روش تحلیل واریانس مورد آزمون قرار گرفتند. تمام مقادیر  $R^2$  برای ویژگی های هندسی لایه های تک پاس نزدیک به ۱ هستند که نشان می دهد همه مدل ها انطباق خوبی با داده های اندازه گیری شده دارند. اعتبار مدل های ایجاد شده با مقایسه داده های اندازه گیری شده با مقادیر پیش بینی شده ویژگی های هندسی تأیید شد. نتایج نشان می دهد که حداکثر خطای این مدل ها کمتر از ۱۰ درصد است که مؤید کارایی مدل های پیشنهادی است. پارامترهای بهینه فرآیند به دست آمده از روش سطح پاسخ (RSM) عبارتند از توان لیزر ۸۵۰ وات، سرعت روبش ۱۵ میلی متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر ۴ گرم در دقیقه.

(۳) ویژگی های هندسی لایه های روکش شده توسط لیزر تحت تأثیر پارامترهای فرآیند هستند. عرض لایه با افزایش توان لیزر افزایش می یابد و با افزایش سرعت اسکن و نرخ تغذیه پودر کاهش می یابد. ضخامت لایه روکش عمدتاً به توان لیزر و نرخ تغذیه پودر بستگی دارد که تأثیر مستقیم دارد، در حالی که سرعت روبش تأثیر معکوس دارد. از تجزیه و تحلیل های آماری، عمق نفوذ لایه ارتباط بسیار قوی با توان لیزر دارد، در حالی که سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر تأثیر کمتری دارند.

- 15- Kamal S, Jayaganthan R, Prakash S. "High temperature cyclic oxidation and hot corrosion behaviours of superalloys at 900 C. Bulletin of Materials Science." 2010 Jun;33(3):299-306.
- 16- Körner C, Ramsperger M, Meid C, Bürger D, Wollgramm P, Bartsch M, Egge-ler G. "Microstructure and mechanical properties of CMSX-4 single crystals pre-pared by additive manufacturing." Metallurgical and Materials Transactions A. 2018 Sep;49(9):3781-92.
17. Mirak A.R. and Kermanpur A., "Effect of directional solidification on the mi-crostructure and mechanical properties of a 2th Generation Ni-base single crystal superalloy CMSX-4," Found. Res. J., vol. 3, no. 4, pp. 187-199, 2020.
- 18- Bezencon C, Schnell A, Kurz W. "Epitaxial deposition of MCrAlY coatings on a Ni-base superalloy by laser cladding." Scripta Materialia. 2003 Oct 1;49(7):705-9.
- 19- Padture NP, Gell M, Jordan EH. "Thermal barrier coatings for gas-turbine en-gine applications." Science. 2002 Apr 12;296(5566):280-4.
- 20- Yang S, Bai H, Li C, Shu L, Zhang X, Jia Z. "Numerical Simulation and Mul-ti-Objective Parameter Optimization of Inconel718 Coating Laser Cladding." Coatings. 2022 May 23;12(5):708.