

# پوشش‌دهی نفوذی SermaLoy J به روش دوغابی بر روی آلیاژ نیکل اینکول CV۱۸ موتور جت

پرویز نور پور<sup>۱\*</sup>، جواد زبرجدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، <sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، سازمان صنایع هوایی، تهران.

\* نویسنده مسئول: parviznourpour@gmail.com

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

## چکیده

جهت کنترل رفتار اکسیداسیون و خوردگی داغ سوپر آلیاژ نیکلی اینکول CV۱۸ مورد استفاده در پره‌های موتورهای جت، فرایند پوشش‌دهی نفوذی SermaLoy J که یک نوع پوشش آلومیناییدی اصلاح شده با سیلیسیم و کروم است، به روش دوغابی به کار گرفته شد. اثر متغیرهایی شامل درصد کروم در دوغاب، ضخامت پوشش (ایجاد چندین لایه) و دمای پوشش‌دهی به وسیله نرم افزار مینی تب و تکنیک پاسخ سطح مدل‌سازی و بهینه سازی شد. آنالیز واریانس، ضریب همبستگی مناسبی را برای مدل پیشنهاد شده نشان داد ( $R^2 = ۹۶/۹$  و  $R^2 \text{ Adjusted} = ۹۳/۴$ ). خواص فیزیکی و شیمیایی پوشش SermaLoy J اصلاح شده با کروم توسط آنالیزهایی نظیر پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف سنجی پراکندگی انرژی و آنالیزهای خوردگی بررسی شد. نتایج نشان داد نفوذ عنصر کروم به همراه آلومینیوم و سیلیسیم در پوشش بر روی آلیاژ نیکل اینکول CV۱۸ باعث بهبود عملکرد پوشش می شود.

**کلیدواژه:** پوشش دوغابی، پوشش آلومیناییدی، SermaLoy J، آلیاژ نیکلی اینکول CV۱۸.

# SermaLoy J Penetration Coating Using Slurry Method on Nickel Incol 718C jet Engine

P. Nourpour<sup>\*1</sup>, J. Zabarjadi<sup>۲</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., <sup>2</sup> M.Sc., Aviation Industries Organization, Tehran.

\* **Corresponding Author:** parviznourpour@gmail.com

**Submission:** 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

## Abstract

To control the oxidation and hot corrosion behavior of nickel Incol 718C super alloy, used in jet engine blades, Sermaloy J penetration coating process, which is a type of aluminide coating modified with silicon and chromium, was applied by slurry method. The effect of variables including the percentage of chromium in the slurry, coating thickness (creation of several layers) and coating temperature were modeled and optimized by Minitab software and response surface methodology. Analysis of variance showed a good correlation coefficient for the proposed model ( $R^2 = 96.9$ ). Energy scattering and corrosion analyzes were performed the results showed that the possibility of penetration of chromium along with aluminum and silicon in the coating by slurry on nickel Incol 718C alloy improves the performance of the coating.

**Keywords:** Slurry Coating, Aluminide Coating, Sermaloy J, Nickel Inco 718C alloy.

## ۱- مقدمه

به علت دمای بالای کاری و شرایط حاد شیمیایی و مکانیکی در بخش‌های مختلف توربین‌های گازی آلیاژها و سوپرآلیاژهایی بر پایه عناصری چون نیکل، کبالت و آهن برای قسمت‌های مختلف یک توربین تولید شدند. عمده مشکلات موجود در توربین‌ها شامل بحث سایش، شوک حرارتی، اکسیداسیون، خوردگی داغ و البته در موارد بسیاری تلفیق این موارد بوده است. به دلیل وجود برخی محدودیت‌های طراحی در سوپرآلیاژها و عدم توانایی در کاهش دما (به دلیل کاهش بازده توربین)، برای مقابله با صدمات ناشی از موارد ذکر شده، استفاده از پوشش‌های محافظ و عایق بر روی مواد سازنده قطعات توربین در تماس با محیط خورنده، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱].

پوشش‌های مورد استفاده در بحث صنایع دمای بالا از جمله توربین‌های گازی عموماً شامل سه دسته پوشش‌های نفوذی، روکشی و سد حرارتی هستند. به علت مزایای پوشش‌های نفوذی بسیار مورد توجه هستند و روش‌های مختلفی جهت اعمال پوشش‌های نفوذی وجود دارد [۱] به‌طور کلی این پوشش‌های می‌توانند به دو صورت کلی تک مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای اعمال شوند. در فرایند تک مرحله‌ای، نفوذ و عملیات حرارتی روی نمونه جهت تشکیل فازهای مطلوب، به‌صورت پیوسته انجام می‌شود اما در فرایندهای چند مرحله‌ای، فرایند نفوذ و عملیات حرارتی جدا بوده و حتی فرایند نفوذ برای اعمال چند عنصر یا چند لایه نیز می‌تواند در چند مرحله انجام شود. مهم‌ترین روش‌های اعمال این پوشش‌ها عبارتند از: سمانتاسیون جعبه‌ای، رسوب شیمیایی بخار و روش دوغابی [۲].

یکی از کاربردی‌ترین روش و مهم‌ترین روش‌های اعمال پوشش‌های نفوذی، اعمال آن با استفاده از دوغاب حاوی عنصر اصلی پوشش است. در این روش یک دوغاب شامل عنصر اصلی مانند آلومینیوم و دیگر عناصر آلیاژی اصلاح کننده مانند سیلیسیم به همراه یک حلال و یک ماده هم بند تهیه شده بر سطح قطعه چربی‌زدایی و فعال شده اعمال می‌گردد. در ادامه پوسته اعمالی از دوغاب خشک شده و در کوره قرار داده می‌شود تا فرایند نفوذ در دما، زمان و اتمسفر معین انجام شود.

پیش از شروع مرحله نفوذی، یک مرحله جهت پخت ماده هم بند نیز باید در نظر گرفته شود [۳].

روش‌های متفاوتی برای اعمال پوشش‌های دوغابی وجود دارد. ساده‌ترین این روش‌ها، غوطه‌وری نمونه در دوغاب بوده که نیازمند توان بالای اپراتور است و باید با در نظر گرفتن زمان مشخص، دوغاب به‌صورت یکنواخت روی سطح نشانداده شود. روش دیگر استفاده از برس یا قلم مو بوده که با آن دوغاب روی سطح به حالت رنگ‌آمیزی اعمال می‌گردد. در روش دیگر استفاده از دستگاه‌های پاشش جهت اعمال پوسته یکنواخت از دوغاب روی سطح قطعه استفاده می‌گردد. در این روش دوغاب مورد نظر به کمک یک پیستوله و با فشار هوا بر سطح قطعه اعمال شده و قابلیت تکرار پوشش‌دهی وجود دارد. در بین روش‌های مذکور روش پاششی قابلیت بیشتری جهت اعمال پوشش یکنواخت را داراست [۲].

از مشکلات اصلی روش دوغابی نیز می‌توان به تجربی بودن آن اشاره کرد. شیوه اعمال دوغاب روی سطح قطعه به‌صورت یکنواخت و همگن بسیار اهمیت داشته و باعث یکنواخت بودن پوشش نهایی خواهد شد که در این مورد تجربه اپراتور دارای اهمیت بسزایی است [۳].

پوشش نفوذی آلومینیدی Sermaloy J دارای خواص منحصر به فرد و دارای لایه خارجی غنی از سیلیکون می‌باشد. برای پوشش دادن اجزا قسمت‌های داغ توربین‌ها در دماهای بالاتر از ۱۸۳۵ درجه فارنهایت (۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) استفاده می‌شود.

مزایای استفاده از پوشش نفوذی آلومینیدی Sermaloy J شامل موارد زیر است [۲]:

۱. مقاومت عالی در مقابل خوردگی دمای بالا و پایین می‌باشد.
۲. مقاومت عالی در مقابل اکسیداسیون دمای بالا
۳. مقاومت عالی در مقابل فرسایش
۴. انطباق‌پذیری بسیار عالی با بیشتر سوپرآلیاژهای پایه نیکل و کبالت و همچنین استیل‌های ضدزنگ غیرمغناطیسی (حاوی مقادیر بالایی از کروم و نیکل و همچنین کربن به‌عنوان پوشش است)

۵. انعطاف‌پذیری پوشش که نیاز به فرآورده‌های اضافی را حین فرآیند از بین می‌برد.

در ترکیب J Sermaloy حضور Si به جای قسمتی از Al در مواد اولیه پوشش‌دهی آلومینایزینگ منجر به تشکیل لایه آلومینایدی حاوی سیلیسیم و ترکیبات سیلیسیم‌دار معروف به پوشش آلومیناید اصلاح شده با سیلیسیم (یا به عبارتی پوش Si-Al). برای اعمال اینگونه پوشش‌ها از روش‌های سمانتاسیون پودری و دوغابی استفاده می‌شود. اما اصلاح با روش سمانتاسیون پودری به واسطه اختلاف زیاد در فشار بخار هالیدهای آلومینیم و سیلیسیم مشکل می‌باشد، بنابراین از روش دوغابی به عنوان یک فرآیند جایگزین برای روش سمانتاسیون پودری استفاده می‌شود. نقش کیفی Si در افزایش مقاومت به خوردگی داغ و حتی اکسیداسیون پوشش‌های آلومینایدی توسط چندین محقق به اثبات رسیده است. به طوری که حضور سیلیسیم بر روی پوشش تشکیل فاز بسیار خالص آلومینوم اکسید را که بسیار چسبنده است تقویت می‌کند. این ترکیب در مقابل حل شدن بانمک‌های سولفات که باعث خوردگی داغ می‌شوند مقاوم است. مقاومت اکسیداسیون دمای بالا این آلیاژ به دلیل کاهش تحرک اکسیژن در پوشش آلومینایی و همچنین اثر پایداری سیلیسیم در پوشش می‌باشد. وجود سیلیسیم در پوشش Sermaloy J همچنین از ترک خوردگی خستگی جلوگیری به عمل می‌آورد. کشش حرارتی ایجاد شده به وسیله گرم و سرد شدن‌های نابرابر سطح یا اجزا داخلی یکی از عوامل تخریب پوشش‌های آلومینایدی می‌باشد. ترک‌ها از میان این پوشش‌ها آغاز می‌شود و به فلز پایه انتشار می‌یابد. اگر ترک‌ها حین اعمال پوشش J Sermaloy ایجاد شود، در منطقه بین منطقه نفوذی و داخلی گیر می‌افتد و نمی‌تواند به سطح انتشار می‌یابد. هر یک از اجزا به صورت مستقل در این روش با این پوشش پوشانده شده و هر کدام قبل از نفوذ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این مرحله بینایی، اصلاح یا کار مجدد بر روی پوشش آلومینایدی می‌تواند بدون از دست رفتن فلز پایه انجام شود [۴].

طراحی آزمایش و مدل‌سازی با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM).

در سال‌های اخیر چندین روش سیستماتیک که قابلیت بررسی تأثیر همزمان عوامل مؤثر را نیز دارد تهیه و مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از این روش‌ها روش RSM می‌باشد. این روش از فنون ریاضی و آماری سودمند، جهت تحلیل مسائلی است که در آن‌ها یک متغیر وابسته یا پاسخ، تحت تأثیر چندین متغیر مستقل است و هدف یافتن ترکیبی از متغیرهای مستقل است که مقدار پاسخ را بهینه می‌کند و همچنین برای بررسی تأثیر همزمان این متغیرهای مستقل استفاده می‌شود [۵].

## ۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱ - مواد: پودر آلومینوم کروم با میانگین اندازه ذرات ۵ میکرومتر، پودر سیلیسیم کروم با میانگین اندازه ذرات ۳ میکرومتر و پودر کروم کروم با میانگین اندازه ذرات ۲۰ میکرومتر و با خلوص ۹۹٪ از شرکت پارسیان مرک خریداری شدند. توزیع اندازه این ذرات در شکل ۱ آورده شده است. پلی وینیل استات و هیدروکلریدریک اسید ۳۷٪ جهت چربی‌زدایی از شرکت مجللی خریداری شد. از آتمسفر آرگون ۹۹/۹٪ به هنگام پوشش‌دهی استفاده شد آب دیونیزه جهت تهیه سوسپانسیون پوشش‌ها استفاده شد.

## ۲-۲ - فرایند پوشش‌دهی: فرایند پوشش‌دهی در طی مراحل زیر اجرا گردید:

(۱) برای انجام فرایند پوشش‌دهی پره توربین دیسکی به ابعاد 5mm×20mm×30mm از جنس سوپر آلیاژ کروم اینکونل 718C بریده و مورد استفاده قرار گرفت. عناصر سازنده این آلیاژ و درصد وزنی هر کدام در جدول ۱ ارائه شده است.

(۲) تمیز نمودن / آماده‌سازی سطح آلیاژ: همانند بسیاری از فرآورده‌های پوشش‌دهی، قسمت‌هایی که قرار است پوشش داده شوند برای پوشش‌دهی بهینه باید تمیز و خشک شوند. ابتدا نمونه توسط کاغذ سمباده SiC ساب‌انیده شد. در ادامه باید فرآیند چربی‌زدایی برای حذف روغن‌ها و یا آلاینده‌های به کار گرفته شد. بدین منظور نمونه آلیاژ توسط استون شستشو داده و سپس آبکشی شد و در نهایت به مدت ۳۰ دقیقه توسط اسید کلریدریک رقیق تمیز کاری گردید.

نفوذدهی جلوگیری به عمل آید. زمان چرخه پوشش و دمای پوشش بر اساس خواص ویژه پوشش تعیین می‌شود. در این پروژه عملیات نفوذدهی با تنظیم سیکل حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴ صورت گرفت و دبی آرگون ۳ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم شد. به منظور ایجاد پوشش بر روی آلیاژ از کوره استوانه‌ای با مشخصات KSL-1700X-GS استفاده شد (شکل ۲).

مرحله آخر تمیزکاری پس از پوشش: پس از تکمیل چرخه پوشش، قسمت‌های پوشش داده شده تا دمای مناسب سرد می‌شوند و پوسته پوشش برجای مانده بر روی قسمت‌های پوشش داده شده نمونه آلیاژ برداشته می‌شوند. قسمت‌هایی از پوشش که به‌طور مناسبی بر روی سطح پوشش داده نشده است به وسیله برس یا روش استاندارد با استفاده از شستشوی تحت فشار برداشته می‌شوند. قسمت‌های داخلی توسط اسپری فشار بالای آب تمیز می‌شوند.

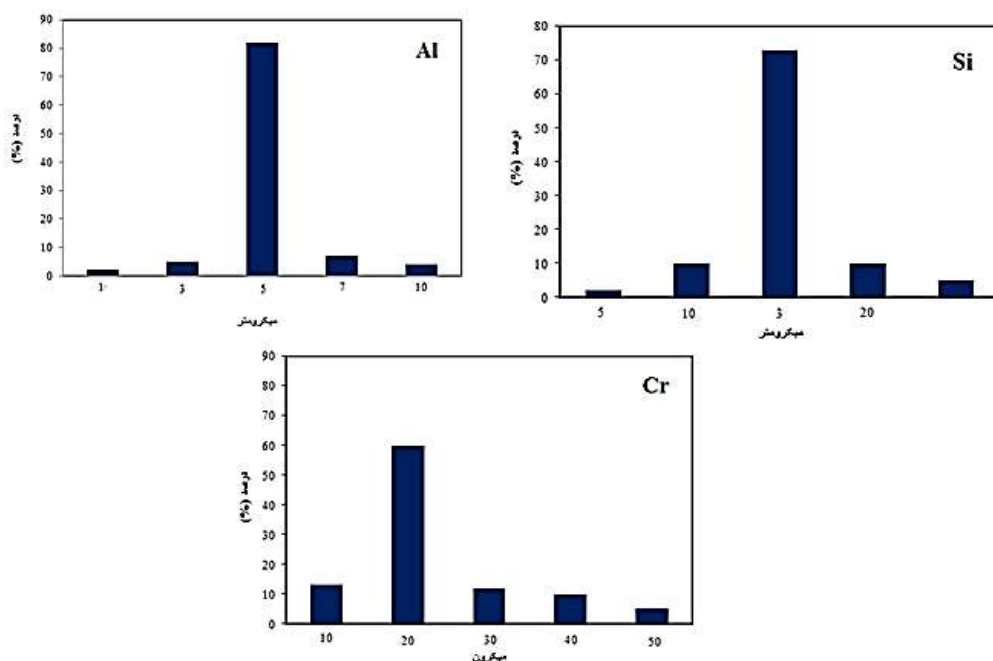
۳) مرحله سوم تهیه دوغاب می‌باشد. دوغاب Sermaloy J بدون کروم به صورت زیر تهیه شد [۶]:

۳۵٪ وزنی پودر آلومینیم، ۶٪ وزنی پودر سیلیسیم، ۴۷٪ وزنی آب و ۱۲٪ پلی‌وینیل استات (به صورت حل شده در آب)

ترکیب دوغاب Sermaloy J اصلاح شده با کروم مطابق با جدول ۲-۶ و مطابق آزمایشات طراحی شده می‌باشد. مثلاً:

۳۵٪ وزنی پودر آلومینیم، ۶٪ وزنی پودر سیلیسیم، ۴۵٪ وزنی آب، ۱۲٪ پلی‌وینیل استات (به صورت حل شده در آب) و ۲٪ کروم.

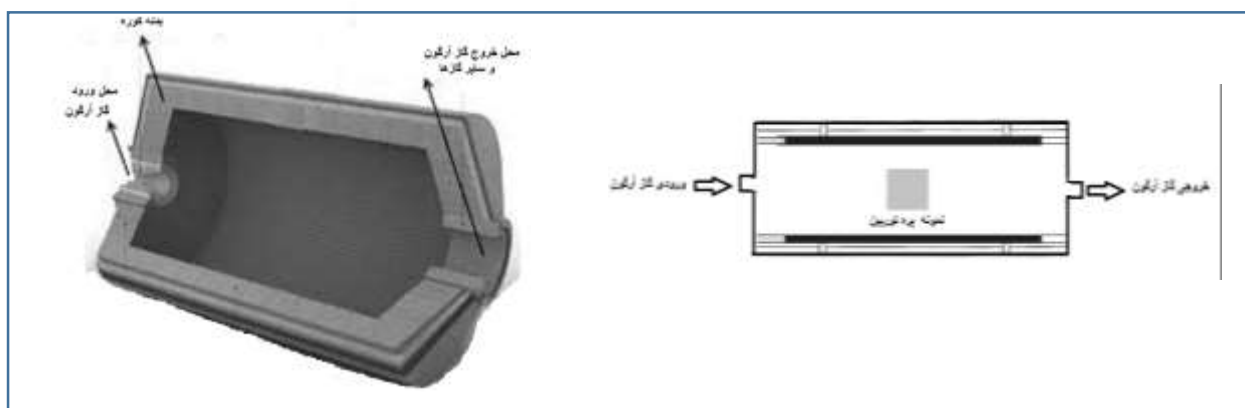
۴) اعمال دوغاب: بعد از همزدن دوغاب به وسیله همزن مغناطیسی به مدت یک ساعت و قرار دادن دوغاب در حمام التراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه، فرایند غوطه‌ور انجام شد سپس دوغاب اعمال شده بر سطح در هوای معمولی خشک گردید. ۵) ترسیب پوشش: نمونه‌ها درون کوره استوانه‌ای با اتمسفر خنثی گاز آرگون قرار داده شد تا از اکسید شدن پودرها حین فرایند



شکل ۱ - توزیع اندازه ذرات پودر آلومینوم، سیلیسیم و کروم

جدول ۱ - عناصر سازنده آلیاژ اینکول 718C

| عنصر | کروم | مولیبدن | آلومینیوم | ناوبیوم + تالیوم | کربن | تیتانیوم | منگنز | آهن  | سیلیسیم | کبالت | نیکل      |
|------|------|---------|-----------|------------------|------|----------|-------|------|---------|-------|-----------|
| درصد | ۲۱   | ۳/۳     | ۰/۸       | ۵/۵              | ۰/۰۸ | ۱/۱۵     | ۰/۳۵  | ۰/۰۵ | ۰/۳۵    | ۱/۰   | باقیمانده |



شکل ۲ - شماتیک کوره استوانه‌ای مورد استفاده جهت ایجاد پوشش

نمونه‌ها با آب مقطر داغ و خشک کردن آن‌ها، سایر آنالیزها انجام شد.

#### ۲-۴ - بهینه‌سازی فرایند پوشش‌دهی

در این تحقیق از روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) که به‌طور وسیع در روش رویه پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند پوشش‌دهی به‌روش نفوذی SermaLoy J بر روی آلیاژ نیکلی اینکول CV۱۸ به روش CCD بهره گرفته شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی فرایند پوشش‌دهی سه فاکتور اصلی شامل درصد کروم (%)، ضخامت پوشش و دمای پوشش‌دهی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس در نرم‌افزار ۱۶ Minitab اقدام به طراحی آزمایش بر اساس این سه فاکتور گردید و ۲۰ آزمایش توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد که شامل شش بار تکرار در نقطه‌ی مرکزی، ۶ نقطه محوری<sup>۳</sup> و ۸ نقطه مکعبی<sup>۴</sup> بود. در جدول ۲ لیست آزمایش‌های طراحی شده به‌وسیله روش ترکیب مرکزی برای پوشش‌دهی به‌روش نفوذی SermaLoy J بر روی آلیاژ نیکلی اینکول CV۱۸ نشان داده شده اند [۷].

#### ۲-۳ - بررسی خوردگی داغ

برای ارزیابی رفتار خوردگی داغ از یک سیستم سه الکترودی استفاده شد. برای ساخت الکترود کار؛ نمونه متصل به سیم از داخل لوله آلومینایی عبور داده شد و با ملات نسوز بتونیت سر و ته لوله آب‌بندی و سپس در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره خشک گردید. از گرافیت به‌عنوان الکترود کمکی و با توجه به ارزیابی پتانسیل فولاد زنگ نزن ۳۱۶ حین آزمون و ناچیز بودن تغییرات پتانسیل آن به‌عنوان الکترود مرجع مورد استفاده قرار گرفت. ۷۰٪ سولفات سدیم و ۳۰٪ کلرید سدیم به‌عنوان محیط نمکی آزمایش استفاده شد. پس از قرار دادن پودر نمک در محفظه، کوره روشن شد تا دما به ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد پس از گذشتن ۴۵ دقیقه و ایجاد تعادل در این دما، آزمایش‌های پلاریزاسیون با دستگاه پتانسیواستات مدل PARSTAT 2273 انجام شد. نرخ روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه و محدوده پتانسیل -۲۵۰- میلی‌ولت (نسبت به پتانسیل مدار باز) تا ۴۰۰ میلی‌ولت (نسبت به مرجع) برای رسم منحنی‌های پلاریزاسیون انتخاب شد. پس از اتمام آزمایش‌ها و شست‌وشوی

- 1 - Central Composite Design
- 2 - Central point
- 3 - Axial point
- 4 - Cube point

جدول ۲ - محدوده‌ها و سطوح مورد استفاده برای متغیرهای آزمایشی

| محدوده‌ها و سطوح |     |     |     |      | متغیرها                   |
|------------------|-----|-----|-----|------|---------------------------|
| -۱/۶۸            | -۱  | ۰   | ۱   | ۱/۶۸ |                           |
| ۳/۴              | ۴   | ۵   | ۶   | ۶/۶  | درصد کروم: x1             |
| ۴۱               | ۶۰  | ۹۰  | ۱۲۰ | ۱۳۹  | ضخامت (میکرون): x2        |
| ۸۱۸              | ۸۵۰ | ۹۰۰ | ۹۵۰ | ۹۸۲  | دما (درجه سانتی‌گراد): x3 |

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ - مدل فرایند پوشش‌دهی بر روی اینکول CV۱۸

در روش طراحی آزمایش با RSM و CCD می‌توان با استفاده از داده‌های تجربی و تئوری (جدول ۳) حاصل شده مدل‌سازی ریاضی را انجام داد در این روش معادله درجه دوم زیر ارتباط بین پاسخ و متغیرها را برقرار می‌کند [۷ و ۸].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^f b_i x_i + \sum_{i=1}^f b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{f-1} \sum_{j=i+1}^f b_{ij} x_i x_j \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله Y پاسخ یا متغیر وابسته (جریان خوردگی)،  $b_0$  مقدار ثابت،  $b_i$  ضرایب خطی،  $b_{ii}$  ضرایب درجه دوم،  $b_{ij}$  ضرایب برهم‌کنش‌ها،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل (پارامترهای موثر در جریان خوردگی) می‌باشند. فرایند پوشش‌دهی نفوذی اینکول CV۱۸ که جریان خوردگی به عنوان متغیر وابسته انتخاب شد، با معادله چند جمله‌ای درجه دوم انطباق داده شد و معادله زیر به دست آمد که مدل کلی برای فرایند پوشش‌دهی را بیان می‌کند:

رابطه (۲)

$$Y = 2.74 - 1.13 x_1 + 0.54 x_2 + 0.70 x_3 + 0.20 x_1^2 + 0.90 x_2^2 + 1.24 x_3^2 + 0.34 x_1 x_2 - 0.14 x_1 x_3 + 0.09 x_2 x_3$$

در این معادله Y جریان خوردگی به عنوان متغیر وابسته و  $x_1$ ،  $x_2$  و  $x_3$  به ترتیب درصد کروم، ضخامت پوشش و دمای پوشش‌دهی می‌باشند.

#### ۳-۲ - ارزیابی مدل

اهمیت تأثیرات خطی، مربعی و ناشی از برهم‌کنش متغیرها در مدل بدست آمده بر اساس مقادیر پارامتر آماری pvalue (سطح معنی داری) بررسی شد. مقادیر p کمتر از ۰/۰۵ برای یک عبارت نشان می‌دهد که آن عبارت بطور مؤثری پاسخ سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۸ و ۹]. با بررسی مقادیر آزمون معنی داری pvalue برای تأثیر هریک از عوامل موثر مستقل و برهم‌کنش‌ها مشاهده می‌شود که متغیرهای  $x_1$ ،  $x_2$ ،  $x_3$  و  $x_2^2$  و  $x_3^2$  تأثیر معنی دار بر روی متغیر پاسخ دارند (درصد تأثیر هر پارامتر در شکل پارتو شکل ۴ نشان داده شده است) و تأثیر عوامل موثر دیگر معنی دار نمی‌باشد. جدول (۴) نتایج آنالیز ANOVA را برای مدل نشان می‌دهد.

جدول ۳ - متغیرهای ورودی و پاسخ‌های مربوطه بر اساس طراحی CCD فرایند پوشش‌دهی نفوذی SermaLoy J بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸

| شماره آزمایش | درصد کروم: x1 | ضخامت<br>(میکرون): x2 | دما (درجه<br>سانتی‌گراد): x3 | پاسخ (جریان خوردگی) |       |
|--------------|---------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|-------|
|              |               |                       |                              | تجربی               | تئوری |
| ۱            | ۶/۶           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۱                 | ۱/۷۵  |
| ۲            | ۳/۴           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۵/۴                 | ۵/۴۷  |
| ۳            | ۵/۰           | ۱۳۹                   | ۹۰۰                          | ۶/۳                 | ۶/۳۳  |
| ۴            | ۵/۰           | ۹۰                    | ۸۱۸                          | ۵/۸                 | ۵/۳۴  |
| ۵            | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۸۲                          | ۷/۲                 | ۷/۶۷  |
| ۶            | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۸                 | ۳/۱۶  |
| ۷            | ۵/۰           | ۴۱                    | ۹۰۰                          | ۴/۹                 | ۴/۶۰  |
| ۸            | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۷                 | ۳/۱۶  |
| ۹            | ۴/۰           | ۱۲۰                   | ۸۵۰                          | ۵/۳                 | ۵/۱۴  |
| ۱۰           | ۴/۰           | ۶۰                    | ۹۵۰                          | ۶/۸                 | ۶/۲۷  |
| ۱۱           | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۵                 | ۲/۳۷  |
| ۱۲           | ۶/۰           | ۶۰                    | ۸۵۰                          | ۲/۱                 | ۲/۲۵  |
| ۱۳           | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۶                 | ۲/۳۷  |
| ۱۴           | ۴/۰           | ۶۰                    | ۸۵۰                          | ۴/۴                 | ۴/۷۸  |
| ۱۵           | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۵                 | ۲/۳۷  |
| ۱۶           | ۴/۰           | ۱۲۰                   | ۹۵۰                          | ۷/۰                 | ۷/۰۳  |
| ۱۷           | ۶/۰           | ۶۰                    | ۹۵۰                          | ۲/۹                 | ۳/۲۴  |
| ۱۸           | ۵/۰           | ۹۰                    | ۹۰۰                          | ۲/۶                 | ۲/۳۷  |
| ۱۹           | ۶/۰           | ۱۲۰                   | ۹۵۰                          | ۵/۵                 | ۵/۰۰  |
| ۲۰           | ۶/۰           | ۱۲۰                   | ۸۵۰                          | ۳/۳                 | ۳/۶۱  |

جدول ۴ - آنالیز واریانس برای ارزیابی مدل حاصل برای فرایند پوشش دهی نفوذی SermaLoy J بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸

| منبع                    | درجه آزادی | مجموع مربعات | Adjusted mean square | F     | P     |
|-------------------------|------------|--------------|----------------------|-------|-------|
| مدل                     | ۹          | ۵۷/۶         | ۶/۴                  | ۲۹/۹۳ | ۰/۰۰۰ |
| خطی                     | ۳          | ۲۷/۶         | ۹/۲                  | ۴۲/۹۴ | ۰/۰۰۰ |
| درصد کروم               | ۱          | ۱۷/۰۸        | ۱۷/۰۸                | ۷۹/۸۳ | ۰/۰۰۰ |
| ضخامت پوشش (میکرون)     | ۱          | ۳/۸۷         | ۳/۸۷                 | ۱۸/۱۱ | ۰/۰۰۲ |
| دما                     | ۱          | ۶/۶۱         | ۶/۶۱                 | ۳۰/۸۹ | ۰/۰۰۰ |
| مربعی                   | ۳          | ۲۸/۹۴        | ۹/۶۵                 | ۴۵/۱۱ | ۰/۰۰۰ |
| درصد کروم × درصد کروم   | ۱          | ۰/۵۵         | ۰/۵۵                 | ۲/۵۹  | ۰/۱۴۲ |
| ضخامت پوشش × ضخامت پوشش | ۱          | ۸/۷۱         | ۱۰/۶۶                | ۴۹/۸۵ | ۰/۰۰۰ |
| دما × دما               | ۱          | ۲۰/۱۷        | ۲۰/۱۷                | ۹۴/۳۳ | ۰/۰۰۰ |
| برهم کنش                | ۳          | ۱/۱۲         | ۰/۳۷                 | ۱/۷۵  | ۰/۲۲۶ |
| درصد کروم × ضخامت پوشش  | ۱          | ۰/۹۱         | ۰/۹۱                 | ۴/۲۶  | ۰/۰۶۹ |
| درصد کروم × دما         | ۱          | ۰/۱۵         | ۰/۱۵                 | ۰/۷۱  | ۰/۴۲۲ |
| ضخامت پوشش × دما        | ۱          | ۰/۰۶         | ۰/۰۶                 | ۰/۲۶  | ۰/۶۰۶ |
| باقیمانده‌ها            | ۹          | ۱/۹۳         | ۰/۲۱                 | -     | -     |
| عدم کفایت               | ۵          | ۱/۹۱         | ۰/۳۸                 | ۳/۸۸  | ۰/۱۵۸ |
| خطای خالص               | ۴          | ۰/۰۱۵        | ۰/۰۰۴                | -     | -     |
| کل                      | ۱۹         | ۶۱/۸۵        | -                    | -     | -     |

در این پژوهش ارزیابی مدل با استفاده از F-test بررسی شد. با توجه به نتایج تحلیل واریانس که در جدول (۴) آمده است، مقدار F محاسبه شده برای عدم کفایت مدل برابر با ۳/۸۸ است که کوچکتر از F جدول آماری  $F=۴/۷۷۲$  با سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد که دقیق بودن نتایج مدل را تایید می‌کند. معنی دار بودن مدل با استفاده از مقدار p برای عدم

کفایت مدل نیز بررسی شد. چون در سطح اطمینان ۹۵٪ مقدار p بیشتر از مقدار ۰/۰۵ می‌باشد نشان می‌دهد عدم کفایت مدل معنی دار نبوده و مدل معنی دار می‌باشد. مقدار بالای  $R^2$  (۹۶/۹) نشان‌دهنده‌ی مطابقت بالای نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج پیش‌بینی شده از طریق مدل می‌باشد.

### ۳ - ۳ - مطالعه آنالیزی ایجاد پوشش

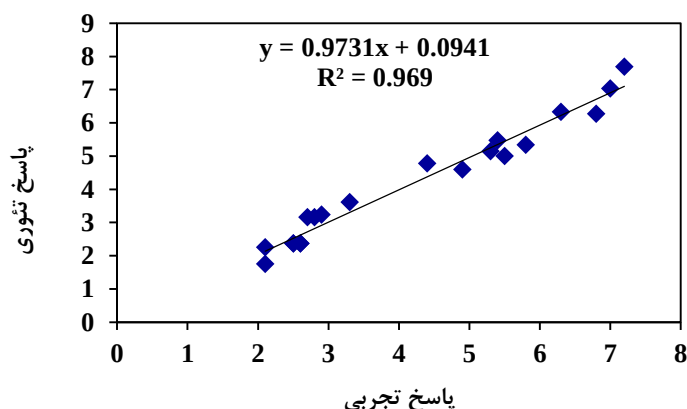
#### نفوذی SermaLoy J بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸

در ابتدا برای تایید سنتز ترکیب SermaLoy J و ایجاد پوشش بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸ از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. پراش اشعه ایکس نمونه حاوی پوشش در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق الگوی پراش اشعه ایکس فاز اصلی در این لایه سطحی  $\beta$ -NiAl با شماره کارت ۰۰-۰۴۴-۱۱۸۸ تطابق دارد در حالی که پیک‌های ضعیف  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  نیز با شماره کارت ۰۰-۰۰۳-۱۰۵۲ مشاهده می‌شود. برهم کنش نیکل با آلومینیوم و تشکیل فازهای  $\beta$ -NiAl و  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  نشان دهنده تشکیل پوشش بر سطح آلیاژ است [۱۰]. تصویر سطحی پوشش SermaLoy J اصلاح شده با سیلیم و کروم بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸ در شکل ۶ آورده شده است. ذرات درشت تر مشاهده شده مربوط به کروم و ذرات ریزتر نشان دهنده آلومینیوم و سیلیم است. این آنالیز ایجاد پوشش آلومینایدی بر سطح آلیاژ اینکول را تایید می‌کند.

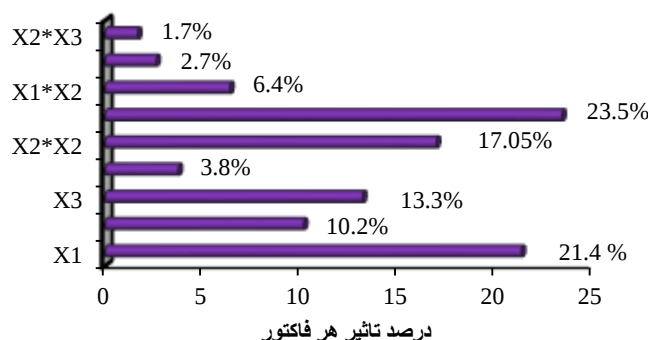
### ۴ - ۳ - خوردگی آلیاژ

در شکل ۷ نمودار پلاریزاسیون تافل آلیاژ اینکول CV۱۸ و پوشش آلومینیومنایدی اصلاح شده با کروم در دمای اتاق و در نمک مذاب سدیم سولفات ۷۰٪- سدیم کلراید ۳۰٪ در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. مقدار پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی به روش برون‌یابی تاقل و استفاده از نمودار شکل ۷ محاسبه گردید.

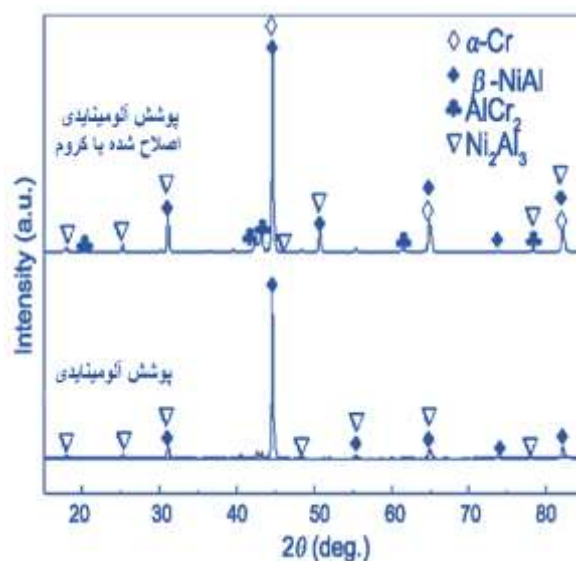
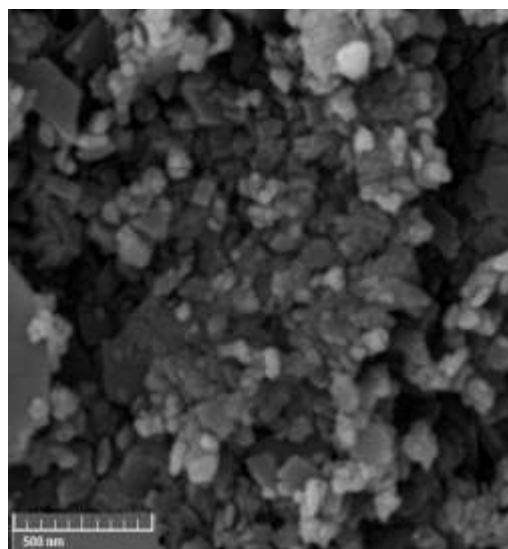
پتانسیل خوردگی نمونه بدون پوشش و پوشش دار به ترتیب ۲۲۸- و ۲۰۸ میلی ولت نسبت به الکترود مرجع محاسبه شد. مقادیر شدت جریان خوردگی نیز برای نمونه بدون پوشش ۱۹/۹ میلی آمپر و برای نمونه پوشش دار (تهیه شده در شرایط بهینه مطابق مدل‌سازی) تقریباً ۱/۹ میلی آمپر بر سانتی متر مربع برآورد شد. مشاهده می‌شود که سرعت خوردگی با اعمال پوشش به طور چشم گیر کاهش یافته است.



شکل ۳ - نمودار پاسخ تجربی در برابر پاسخ‌های پیش بینی شده توسط مدل

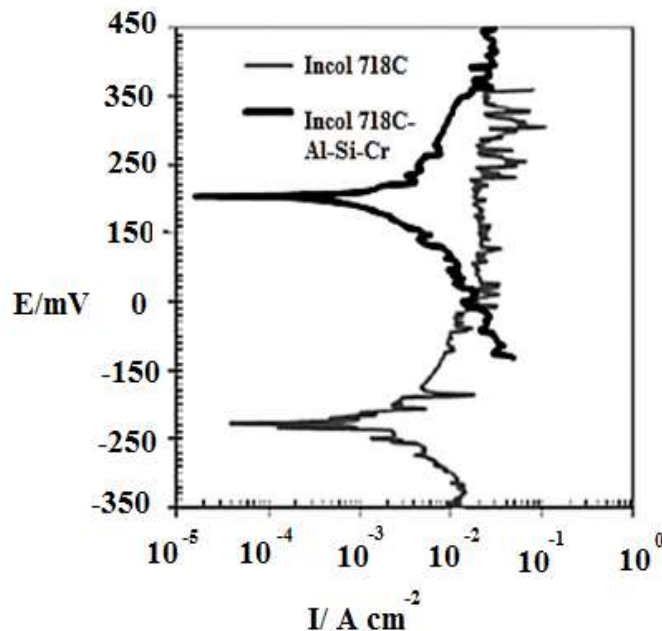


شکل ۴ - درصد تاثیر هر فاکتور در پاسخ پوشش‌دهی



شکل ۶- تصویر سطحی  
پوشش SermaLoy J اصلاح شده با  
سیلیسیم و کروم بر روی آلیاژ اینکول CV۱۸

شکل ۵- الگوی پراش اشعه ایکس پوشش SermaLoy J اصلاح  
شده با سیلیسیم و سیلیسیم- کروم.



شکل ۷- نمودار پلاریزاسیون تافل آلیاژ اینکول CV۱۸ و پوشش آلومینیومینیدی اصلاح شده با کروم در دمای اتاق و در نمک  
مذاب سدیم سولفات ۷۰٪- سدیم کلراید ۳۰٪ در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

## نتیجه‌گیری

مطابق نتایج نرم‌افزار مینی تب و تکنیک پاسخ سطح درصد کروم در دوغاب، ضخامت پوشش (ایجاد چندین لایه) و دمای پوشش‌دهی سه عامل موثر در فرایند پوشش‌دهی هستند. مقادیر بهینه برای متغیرهای انتخاب شده به صورت درصد کروم ۵/۸۵٪، ضخامت فیلم میکرون تقریباً ۷۶ میکرون و دمای اعمال پوشش برابر ۸۸۹ درجه سانتی‌گراد به دست آمد، کمترین جریان خوردگی (در واقع بهترین پوشش) پیش‌بینی شده برای فرایند پوشش‌دهی در شرایط بهینه معادل ۱/۶۸ میلی‌آمپر بر متر مربع بدست آمد. تهیه پوشش در شرایط بهینه انجام و پاسخ تجربی برابر ۱/۸ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به دست آمد که نشان‌دهنده تطابق نتایج پیش‌بینی شده و تجربی است. همچنین آنالیز واریانس، ضریب همبستگی مناسبی را برای مدل پیشنهاد شده نشان داد. ایجاد پوشش بر روی آلیاژ و خواص فیزیکی پوشش Sermaloy J اصلاح شده با کروم توسط آنالیزهایی نظیر پراش اشعه ایکس، و میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید کرد. آنالیز خوردگی نتایج نشان داد نفوذدهی عنصر کروم به همراه آلومینیوم و سیلیسیم در پوشش به روش دوغابی بر روی آلیاژ نیکل باعث بهبود عملکرد پوشش می‌شود به طوری که حضور کروم در پوشش باعث کاهش جریان خوردگی شد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد حضور کروم در دوغاب Sermaloy J باعث بهبود عملکرد آلیاژ در دماهای بالا و شرایط اکسیداسیون سخت می‌شود.

## تشکر و قدردانی

از سازمان صنایع هوایی به خاطر تامین هزینه‌های این پروژه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

## مراجع

- [1] Y. Tamarin, Protective coatings for turbine blades, 2002, ASM International.
- [2] M. Bahadri, A. Hijazi, Application of titanium-modified Sermaloy J penetrating coating on GTD-111 nickel base superalloy, Iran's second national conference on material engineering, metallurgy and mining. January 2018.
- [3] M.C. Meelu, A.T. Jones, B.G. MacMordie, Multiplex Aluminide-Silicide Coating, U. S. Patent, 1996, Pp.547-770.
- [4] M. Evans, Optimisation of manufacturing processes: a response surface approach, CRC Press; 1st edition 2016.
- [5] H. Majdi, J.A. Esfahani, Mohebbat Mohebbi, Optimization of convective drying by response surface methodology, Computers and Electronics in Agriculture, 2019, Vol. 156, No. 0, Pp. 574-584.
- [6] I. Segura-Cedillo, Fused metallic slurry coatings for improving the oxidation resistance of wrought alloys, A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy, 2011.
- [7] S. Yi, Y. Su, B. Qi, Z. Su, Y. Wan, Application of response surface methodology and central composite rotatable design in optimizing the preparation conditions of vinyltriethoxysilane modified silicalite/polydimethylsiloxane hybrid pervaporation membranes, Separation and Purification Technology, 2010, Vol. 71, No. 2, Pp. 252-262.
- [8] H.L. Liu, Y.R. Chiou, Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO<sub>2</sub> photocatalytic process coupled with response surface methodology, Chemical Engineering Journal, 2005, Vol. No. 112, No. 1-3, Pp. 173-179.
- [9] C. Hong, H. Hao, W. Haiyun, Process optimization for PHA production by activated sludge using response surface methodology, biomass and bioenergy, 2009, Vol. 33, No. 4, Pp. 721-727.
- [10] D. Wu, S. Jiang, Q. Fan, J. Gong, Ch. Sun, Hot Corrosion Behavior of a Cr-Modified Aluminide Coating on a Ni-Based Superalloy, Acta Metallurgica Sinica, (Engl. Lett.), 2014, Vol. 27, No. 4, Pp. 627-634.
- [11] K. Shirvani, The Effect of Silicon on cyclic Oxidation behavior of Aluminide coatings on Superalloy In-738LC, Journal of Materials Science Forum, 2004, Vol. 461-464, No. 0, Pp. 335-342.