



## بررسی استحکام چسبندگی پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار سرامیکی ایجاد شده به روش زینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، بهینه‌سازی شده با سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

کاوه کلاه‌گر آذری<sup>۱\*</sup>، علی عزیزاده<sup>۲</sup> و حسین مومنی<sup>۲</sup>

۱. دپارتمان فیزیک دانشگاه سويا اسپانيا

۲. مجتمع مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

### چکیده

### واژگان کلیدی:

این پژوهش به بررسی استحکام چسبندگی و خواص ریزساختاری پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار (TBCs) ایجاد شده با استفاده از زینترینگ پلاسمای جرقه‌ای (SPS) در دماهای ۱۰۴۰°C، ۱۰۶۰°C و ۱۰۸۰°C می‌پردازد. زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) بر روی پوشش پیوندی امکرالی بر روی زیرلایه اینکونل ۷۱۳ رسوب داده شد. یک مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) همراه با الگوریتم ژنتیک (GA) برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند SPS توسعه یافت و بهبودهای قابل توجهی در استحکام چسبندگی و کیفیت پوشش حاصل شد. پوشش SPS ایجاد شده در ۱۰۸۰°C استحکام چسبندگی برتر ۷۰MPa و تخلخل کاهش یافته (۴.۳٪) را در مقایسه با پوشش‌های پاشش پلاسمای (APS) که دارای استحکام چسبندگی چسبندگی ۳۰-۴۰MPa در کنار تخلخل ۱۵-۲۰٪ می‌باشند را نشان داد. مدل ANFIS-GA با خطای میانگین مربعات (MSE) کمتر از ۵٪ و R<sup>2</sup> برابر با ۰.۹۸، پارامترهای بهینه را به طور مؤثر شناسایی کرد و تعداد تکرارهای آزمایشی را تا ۶۰٪ کاهش داد. عملکرد بهبود یافته پوشش‌های SPS به دلیل گرمایش سریع ژول، چگالش تحت فشار و ریزساختار یکنواخت است که نقص‌ها و تنش‌های حرارتی را به حداقل می‌رساند. این کار کارایی ترکیب SPS با بهینه‌سازی ANFIS-GA را برای تولید TBC های با عملکرد بالا برای کاربردهای دمای بالا مانند تیغه‌های توربین گاز نشان می‌دهد و دوام، مقاومت حرارتی و حفاظت در برابر خوردگی را افزایش می‌دهد. نتایج مزایای SPS نسبت به APS را برجسته می‌کند، از جمله تخلخل کمتر، استحکام چسبندگی بالاتر و عمر سرویس طولانی‌تر تحت چرخه حرارتی.

پوشش‌های سد حرارتی  
زینترینگ پلاسمای جرقه‌ای  
استحکام چسبندگی  
زیرکونیای پایدار شده با ایتریا  
سیستم استنتاج عصبی-فازی  
تطبیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۴

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2069139.1659

## Investigation of Adhesion Strength of Nanostructured Ceramic Thermal Barrier Coatings Fabricated via Spark Plasma Sintering Optimized by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

### Abstract

This study investigates the adhesion strength and microstructural properties of nanostructured thermal barrier coatings (TBCs) fabricated using spark plasma sintering (SPS) at temperatures of 1040°C, 1060°C, and 1080°C. Yttria-stabilized zirconia (YSZ) was deposited on a NiCrAlY bond coat over an Inconel 713LC substrate. An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) coupled with a genetic algorithm (GA) was developed to predict and optimize SPS process parameters, resulting in significant improvements in adhesion strength and coating quality. The SPS coating fabricated at 1080°C exhibited superior adhesion strength of 70 MPa and reduced porosity (4.3%) compared to plasma-sprayed (APS) coatings, which typically show adhesion strengths of 30–40 MPa and porosity levels of 15–20%. The ANFIS-GA model, with a mean square error (MSE) of less than 5% and an R<sup>2</sup> value of 0.98, effectively identified optimal parameters, reducing experimental iterations by up to 60%. The enhanced performance of SPS coatings is attributed to rapid Joule heating, pressure-assisted densification, and uniform microstructure, which minimize defects and thermal stresses. This work demonstrates the efficacy of combining SPS with ANFIS-GA optimization for producing high-performance TBCs for high-temperature applications, such as gas turbine blades, enhancing durability, thermal resistance, and corrosion protection. The results highlight the advantages of SPS over APS, including lower porosity, higher adhesion strength, and extended service life under thermal cycling.

**Keywords:** Thermal Barrier Coatings, Spark Plasma Sintering, Adhesion Strength, Yttria-Stabilized Zirconia, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

\* Corresponding author E-mail: kkoahlagar@us.es

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی (TBCs) برای حفاظت از اجزاء در محیط‌های دمای بالا، مانند توربین‌های گاز و موتورهای جت، حیاتی هستند؛ جایی که دماهای عملیاتی اغلب از  $C12000$  فراتر می‌رود [۱]. این پوشش‌ها عایق حرارتی، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری مکانیکی فراهم می‌کنند و عمر سرویس اجزایی مانند تیغه‌های توربین و محفظه‌های احتراق را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند [۲]. زیرکونیای پایدارشده با ایتریا (YSZ) ماده انتخابی برای لایه‌های رویی TBC به دلیل پایداری حرارتی استثنایی، هدایت حرارتی پایین  $2.1 \text{ W/m.k}$  و چقرمگی شکست بالا است [۲،۳]. با این حال، روش‌های پوشش‌دهی متداول مانند پوشش پلاسمای اتمسفری (APS)، هرچند مقرون‌به‌صرفه، اغلب پوشش‌هایی با تخلخل بالا (۱۵٪-۲۰٪) و استحکام چسبندگی محدود ۳۰-۴۰ مگاپاسکال تولید می‌کنند که منجر به جدایش زودرس و کاهش دوام تحت چرخه‌های حرارتی می‌شود [۳،۴]. این محدودیت‌ها از ویژگی‌های ذاتی فرآیند APS ناشی می‌شوند، از جمله انجماد سریع و رسوب غیریکنواخت ذرات که منجر به تخلخل متصل و نقص‌های بین‌اسپلتی می‌شود [۵]. زیترینگ پلاسمای جرقه‌ای (SPS) به‌عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای تولید TBC‌های با عملکرد بالا ظاهر شده است. SPS از پالس‌های الکتریکی فرکانس بالا و فشار تک‌محوری معمولاً ۲۰ مگاپاسکال برای دستیابی به چگالش سریع استفاده می‌کند و پوشش‌هایی با چگالی نزدیک به نظری در چند دقیقه تولید می‌نماید [۶،۷]. این فرآیند ترکیب کوپلینگ الکترو-حرارتی (از طریق گرمایش ژول) و چگالش تحت فشار را برای حذف میکروخلل‌ها و مرزهای بین‌اسپلتی به‌کار می‌گیرد و منجر به پوشش‌هایی با تخلخل پایین (۴٪-۵٪) و استحکام چسبندگی بهبودیافته تا ۹۰ مگاپاسکال می‌شود [۸،۹]. زمان زیترینگ سریع (۶-۷ دقیقه) تجمع تنش حرارتی را به‌حداقل می‌رساند، یکپارچگی پوشش

را حفظ می‌کند و تشکیل میکروتکرک را کاهش می‌دهد [۱۰]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پوشش‌های SPS خواص مکانیکی برتری نسبت به پوشش‌های APS و پوشش اکسی‌سوخت پرسرعت (HVOF) دارند، با استحکام چسبندگی ۲۵٪-۴۰٪ بالاتر و عمر سرویس بیش از دو برابر تحت بارهای حرارتی چرخه‌ای [۱۱،۱۲]. مزایای اصلی فرآیند SPS در مقایسه با APS شامل کوپلینگ الکترو-حرارتی، چگالش تحت فشار، کنترل دقیق ریزساختار و کاهش تنش‌های حرارتی است. فرآیند SPS برای سطوح مسطح مانند اینکونل ۷۱۳، که شبیه‌سازی تیغه توربین است، اعمال شد؛ اما برای هندسه‌های پیچیده، استفاده از قالب‌های سفارشی ضروری است [۲۴،۴۴]. فرآیند SPS از گرمایش سریع ژول و چگالش تحت فشار برای دستیابی به پوشش‌های چگال و نانوساختار استفاده می‌کند. زمان پخت کوتاه رشد دانه را به حداقل می‌رساند و ساختار دانه نانویی ۵۰-۸۰ نانومتر را حفظ می‌کند که سختی را از طریق اثر هال-پیچ افزایش می‌دهد [۱۹،۲۰]. استفاده از فشار مگاپاسکال ۲۰ سطح تماس ذرات را تقریباً ۴۰٪ افزایش می‌دهد، میکروخلل‌ها را حذف می‌کند و پیوند بین‌مرزی را بهبود می‌بخشد [۸،۱۸]. نقش رویکرد ANFIS-GA در بهینه‌سازی این فرآیند شامل دستیابی به دقت بالای پیش‌بینی (MSE) کمتر از ۵٪ و  $R^2$  برابر با ۰٫۹۸، افزایش کارایی هزینه و زمان با کاهش ۶۰٪ تکرارهای آزمایشی، تحلیل حساسیت که نشان‌دهنده تأثیر ۶۵٪ دما است و امکان کنترل زمان واقعی فرآیند است [۴۱ و ۴۲]. مطالعات اخیر بر اهمیت صنعتی بهینه‌سازی SPS با استفاده از ANFIS-GA تأکید دارند [۶،۷،۸،۱۰،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱]. مدل‌سازی ANFIS-GA پیچیدگی تعاملات پارامترهای SPS را با دستیابی به دقت پیش‌بینی بالا ( $R^2=0.98$  و  $MSE<5\%$  برای استحکام چسبندگی) [۳۷،۳۸]، کاهش ۶۰٪ تکرارهای آزمایشی از طریق ادغام ANFIS با GA، [۴۰] امکان کنترل زمان واقعی برای تنظیم پویای پارامترهای پخت جهت حداقل کردن

و منجر به افزایش یکنواختی پوشش و مقاومت بهتر در برابر شوک حرارتی می‌شود [۲]. پوشش پیوندی NiCrAlY (AMDRY 365-4)، با اندازه گرانول ۵۰-۱۰۰ میکرومتر و مورفولوژی کروی (جدول ۱) استفاده شد. این پودر به دلیل مقاومت برجسته در برابر اکسیداسیون و سازگاری با سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۳، که با سخت‌کاری رسوبی تقویت شده است (جدول ۲)، انتخاب شد.

جدول ۱. مشخصات پودرهای استفاده شده

ویژگی	NiCrAlY	YSZ
اندازه (μm)	۵۰-۱۰۰	۴۰-۱۰۰
مورفولوژی	کروی	کروی اولیه
ترکیب شیمیایی	Ni-22Cr-10Al-1Y	ZrO <sub>2</sub> -8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۲. ترکیب شیمیایی اینکونل ۷۱۳

عنصر	درصد وزنی
Ni	Balance
Cr	۱۲-۱۴
Mo	۴/۲-۵/۰
Nb	۱/۸-۲/۸
Al	۵/۵-۶/۵
Ti	۰/۵-۱/۰

سوپر آلیاژ مذکور به دلیل مقاومت بالای خزش و پایداری حرارتی، به طور گسترده در کاربردهای توربین با دمای بالا استفاده می‌شود [۲۵] و نقش کلیدی در عملکرد سیستم

نقص‌ها و اطمینان از یکنواختی [۳۷]، و تحلیل حساسیت که دما (۶۵٪)، فشار (۲۰٪) و زمان نگهداری (۱۰٪) را به‌عنوان عوامل غالب شناسایی می‌کند [۳۷]، حل می‌کند. پوشش‌های SPS بهینه‌شده با ANFIS-GA استحکام چسبندگی ~۷۰ مگاپاسکال و پتانسیل بیش از ۲۰۰۰ چرخه حرارتی بدون جدایش در کاربردهای تیغه توربین را نشان دادند، همان‌طور که در مطالعات روی سوپرآلیاژ اینکونل تأیید شده است [۴۳ و ۴۲ و ۲۴]. مکانیزم کاهش هدایت حرارتی در SPS، پراکندگی فونون در مرزدهانه‌های نانو ساختاری است که مسیر انتقال حرارت را افزایش می‌دهد [۲۴]. نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق فرآیند پاشش پلاسمایی اسپارک (SPS) با رویکرد ترکیبی سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و الگوریتم ژنتیک (GA) برای اعمال پوشش YSZ بر روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۳ نهفته است. این ترکیب با بهره‌گیری از قابلیت‌های بهینه‌سازی ANFIS-GA، تعداد تکرارهای آزمایشی را تا ۶۰٪ کاهش داده و کارایی فرآیند را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است [۴۱]. این رویکرد نه تنها دقت پیش‌بینی بالایی را در بهینه‌سازی پارامترهای پوشش‌دهی فراهم می‌کند، بلکه امکان کنترل زمان واقعی و کاهش نقص‌های پوشش را نیز میسر می‌سازد. در پژوهشی مشابه [۴۲] نیز نوآوری مشابهی را نشان داده است که تأییدی بر پتانسیل روش‌های محاسباتی پیشرفته در بهبود فرآیندهای پوشش‌دهی است. این مطالعه با تکیه بر این پیشرفت‌ها، به دنبال ارتقای عملکرد پوشش‌های حرارتی (TBC) برای کاربردهای توربین گازی با بهره‌گیری از یکپارچگی علم مواد و یادگیری ماشین است.

## ۲- مواد و روش‌ها

پودر (YSZ (Amprit 827 Metco) با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ استفاده شد که به دلیل مورفولوژی کروی خود، جریان‌پذیری پودر را در فرآیند رسوب‌دهی بهبود می‌بخشد

اطمینان شود. ۰٫۸ گرم پودر امکرالی به عنوان پوشش پیوندی با ضخامت تقریبی ۱۴۵٫۱ میکرومتر رسوب شد، و ۱٫۸ گرم پودر YSZ به عنوان لایه رویی با ضخامت تقریبی ۴۵۴٫۷ میکرومتر. قالب مهر و موم شد و در دماهای ۱۰۴۰، ۱۰۶۰ و ۱۰۸۰ سانتی‌گراد تحت فشار تک‌محوری ۲۰ مگاپاسکال برای ۶-۷ دقیقه زینتر شد (جدول ۳).

پوشش، به‌ویژه از نظر چسبندگی و تشکیل لایه اکسید رشد حرارتی (TGO) ایفا می‌کند. محتوای بالای نیکل (۷۴ wt%) ماتریسی پایدار فراهم می‌کند که مقاومت در برابر تخریب حرارتی را بهبود می‌بخشد، در حالی که کروم (۱۲ wt%) و آلومینیوم (۶ wt%) به تشکیل لایه محافظ TGO غنی از  $Al_2O_3$  در دماهای بالا کمک می‌کنند.

جدول ۳. پارامترهای پوشش SPS

کد نمونه	زمان نگهداری (min)	فشار (MPa)	دما (°C)
SPS-1040	۶	۲۰	۱۰۴۰
SPS-1060	۶	۲۰	۱۰۶۰
SPS-1080	۶-۷	۲۰	۱۰۸۰

## ۲-۱- آسیاب پودر YSZ

پودر YSZ با استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای پر انرژی با محفظه و گلوله‌های زیرکونیا (نسبت گلوله به پودر ۱۰:۱) و ۲۵۰ rpm در اتانول برای کنترل دما و جلوگیری از تجمع آسیاب شد. آسیاب برای ۱۲ و ۲۴ ساعت انجام شد تا اندازه ذرات نانویی دستیابی شود. توزیع اندازه ذرات از طریق پراکندگی نور پویا (DLS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با نرم‌افزار ImageJ تحلیل شد و ذرات زیر ۱۰۰ nm پس از ۲۴ ساعت تأیید شد. اندازه ذرات نانویی چگالش طی SPS را افزایش می‌دهد و به کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند [۱۹]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که آسیاب ۲۴ ساعته ذرات یکنواخت و کروی تولید کرد که جریان‌پذیری و کیفیت پوشش را بهبود می‌بخشد [۲۰،۲۶].

## ۲-۳- روش APS

پوشش‌های APS با استفاده از دستگاه پاشش پلاسما (گان مدل MB3) با آرگون (۱۵ L/min) و هیدروژن به عنوان گازهای اولیه و ثانویه اعمال شدند. پوشش پیوندی امکرالی به ضخامت  $100 \mu m$  رسوب شد، (جدول ۴). فرآیند APS، هرچند مقرون به صرفه، منجر به تخلخل بالاتر (۱۵-۲۰٪) به دلیل انجماد سریع و رسوب غیر یکنواخت ذرات می‌شود که خلل‌های متصل و استحکام چسبندگی پایین‌تر ایجاد می‌کند [۳،۵].

## ۲-۲- اعمال پوشش

پوشش‌ها با استفاده از دستگاه SPS با مراحل زیر اعمال شدند:

ورق‌های گرافیت داخل قالب استوانه‌ای پیچیده شدند تا توزیع حرارت یکنواخت را تسهیل کنند و از چسبندگی جلوگیری کنند.

## ۲-۴- آزمون کشش

استحکام چسبندگی با آزمون کشش طبق ASTM C633-01 با دستگاه تست کششی Zwick در نرخ بارگذاری ۵ mm/min اندازه‌گیری شد. چسب اپوکسی با استحکام بالا

زیرلایه اینکونل ۷۱۳ سندبلاست شده با قطر ۳ سانتیمتر در قالب قرار گرفت تا قفل مکانیکی قوی با پوشش پیوندی

(بیش از ۷۰ مگاپاسکال) برای اتصال پوشش و زیرلایه به فیکسچر بارگذاری به کار گرفته شد. استحکام چسبندگی به عنوان نیروی حداکثر تقسیم بر مساحت سطح نمونه محاسبه شد. این آزمون اندازه‌گیری قابل اعتمادی از پیوند پوشش-زیرلایه فراهم می‌کند که برای ارزیابی عملکرد TBC تحت تنش‌های مکانیکی و حرارتی حیاتی است [۲۷].

o فاصله کاری: ۸-۱۰ میلی‌متر  
 o (EDS): سیستم تجزیه‌گر انرژی پرتو ایکس Oxford Instruments X-MaxN 80 برای نقشه‌برداری عنصری  
 • پردازش تصویر:

نرم‌افزار ImageJ نسخه ۱,۵۳ با پروتکل زیر:

۱. بهبود کنتراست با الگوریتم CLAHE و اندازه هسته: ۵۰ پیکسل

۲. کمی‌سازی تخلخل طی مراحل:

o تبدیل به تصویر خاکستری ۸-بیتی

o آستانه‌گذاری با الگوریتم فازی هوانگ

o تحلیل ذرات باینری (حداقل اندازه حفره: ۱۰ پیکسل<sup>2</sup>)

o گزارش میانگین  $\pm$  انحراف معیار بر اساس ۵ اندازه‌گیری مستقل

جدول ۴. پارامترهای پوشش APS

پارامتر	لایه بالایی	لایه میانی
Argon (L/min)	۱۵	۱۵
Flow (A)	۵۰۰	۴۵۰
Voltage (V)	۵۵	۵۰
Powder Feed Rate (lb/h)	۳۵	۲۰
Distance from Surface (cm)	۸	۱۲

۲-۵- تکنیک‌های مشخصه‌یابی پیشرفته

تحلیل ریزساختاری

از رویکرد میکروسکوپی چندمُدی با تجهیزات زیر استفاده شد:

• میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM):

مدل Hitachi SU5000 با شرایط کاری:

o ولتاژ شتاب‌دهنده: ۵ کیلوولت

o حالت تشخیص: الکترون‌های ثانویه (SE)

o قدرت تفکیک: ۱,۲ نانومتر در ۱۵ کیلوولت

۲-۶- تحلیل فاز:

• پراش پرتو ایکس (XRD)

دستگاه: Philips PW 3710

o تابش Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406$ )

o پارامترها: ۴۰ کیلوولت، ۳۰ میلی‌آمپر

o محدوده زاویه‌ای: ۸۰°-۲۰°  $\theta$  با گام ۰,۰۲°

o آنالیز کمی فازها با پالایش ریتولد در نرم‌افزار MAUD

o محاسبه کسر فاز مونوکلینیک از رابطه:

$$V_m = [\text{Im}(111) + \text{Im}(1\bar{1}1) + k \cdot \text{It}(111)] / [\text{Im}(111) + \text{Im}(1\bar{1}1)]$$

## ۲-۷- مدل‌سازی ANFIS همراه با الگوریتم ژنتیک

یک سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) همراه با الگوریتم ژنتیک (GA) برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی استحکام چسبندگی بر اساس پارامترهای فرآیند SPS (دما، فشار، زمان نگهداری و درصد تخلخل) توسعه یافت. معماری ANFIS شامل:

- لایه ورودی: چهار نورون مربوط به دما، فشار، زمان نگهداری و درصد تخلخل.
- لایه‌های پنهان: دو لایه، هر کدام با ۱۰ نورون، با استفاده از تابع فعال‌سازی Rectified Linear Unit (ReLU) برای ثبت روابط غیرخطی [۳۷، ۳۸] اما با ادغام منطق فازی برای بهبود تفسیرپذیری.
- لایه خروجی: یک نورون برای پیش‌بینی استحکام چسبندگی.

ANFIS با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار با خطای میانگین مربعات (MSE) به عنوان تابع ضرر آموزش داده شد [۳۷]. داده‌ها، مشتق از نتایج آزمایشی (جدول ۶)، به محدوده [۰، ۱] نرمال‌سازی شدند تا کارایی آموزش بهبود یابد. داده‌ها به مجموعه‌های آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و تست (۱۵٪) تقسیم شدند تا عملکرد قوی اطمینان شود. تکنیک‌های منظم‌سازی، از جمله Dropout نرخ ۰٫۲ [۳۸] و Batch Normalization، برای جلوگیری از بیش‌برازش و پایدارسازی آموزش اعمال شدند. فرآیند آموزش شامل ۱۰۰۰ epoch با نرخ یادگیری ۰٫۰۰۱ بود که با بهینه‌ساز Adam بهینه شد (ANFIS ۳۱) و با الگوریتم ژنتیک ادغام شد تا پارامترها را بهینه کند و تکرارهای آزمایشی را تا ۶۰٪ کاهش دهد.

## ۳. نتایج و بحث

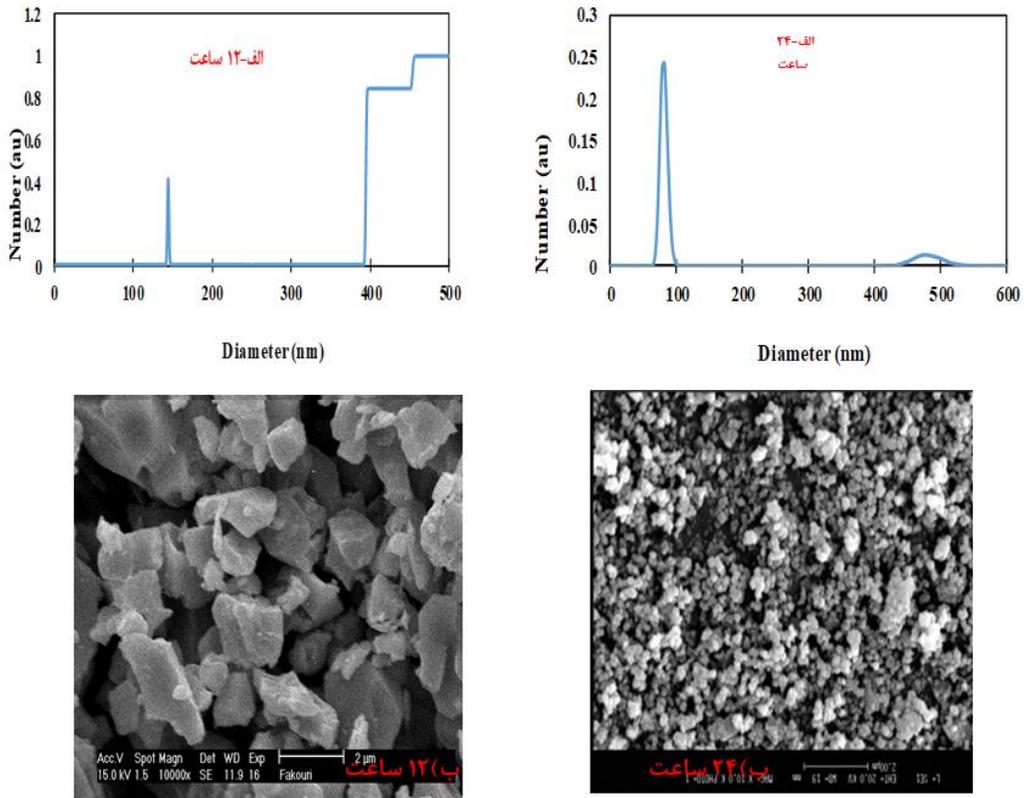
### ۳-۱- مشخصه‌یابی پودر YSZ

شکل ۱- الف نتایج آزمون پراکندگی نور پویا (DLS) پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت آسیاب گلوله‌های را نشان می‌دهد. توزیع اندازه ذرات پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت فرآوری به روش آزمون پراکندگی نور پویا آنالیز شد. در زمان ۱۲ ساعت، دو جمعیت مجزای ذرات با پیکهای مرکزی در حدود ۱۳۰ نانومتر و ۴۲۰ نانومتر مشاهده شد که نشان‌دهنده حضور همزمان نانوذرات اولیه و احتمالاً کلوخه‌های اولیه بود. در مقابل، پس از ۲۴ ساعت، توزیع اندازه ذرات به‌طور قابل توجهی به سمت قطرهای کوچکتر تغییر یافت و اکثریت ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر قرار گرفتند. این تغییر نشان‌دهنده تجزیه یا پراکنش مجدد کلوخه‌ها و پایداری نانوذرات کوچکتر در طول زمان است. علاوه بر این، حذف پیک‌های مربوط به قطرهای بزرگتر پس از ۲۴ ساعت آسیاب، حاکی از بهبود پایداری کلوئیدی و کاهش تجمع ذرات است که می‌تواند ناشی از انفعال سطحی یا تغییرات ساختاری القاشده در طول فرآیند آسیاب گلوله‌های باشد. شکل ۱-ب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت آسیاب گلوله‌های را ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، پس از ۲۴ ساعت آسیاب، نمونه‌ها به اندازه‌هایی کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر رسیدند و کرویت خود را به دلیل فرآیند خردایش تا حدی کاهش یافته است.

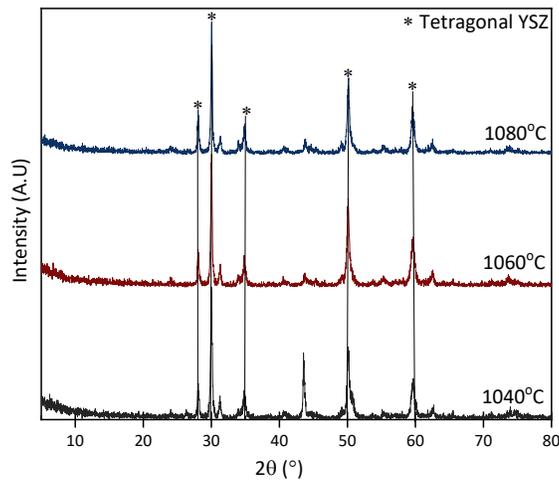
### ۳-۲- آنالیز پراش پرتو ایکس

بر اساس آنالیز XRD با استفاده از پایگاه داده JADE PDF#17-0923 برای زیرکونیای تتراگونال و PDF#50-1089 برای زیرکونیای مونوکلینیک، پودر YSZ عمدتاً دارای ساختار بلوری تتراگونال تثبیت شده با ۸٪ ایتریا می باشد. شکل ۲ الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) پوشش‌های حرارتی نانوساختار زینتر شده در سه دمای ۱۰۴۰، ۱۰۶۰ و ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. الگوها حضور فازهای تتراگونال (JCPDS 48-0244) و مونوکلینیک

(JCPDS) را تأیید می‌کنند و پایداری فاز و تأثیر دمای پخت بر کریستالوگرافی را نشان می‌دهند.

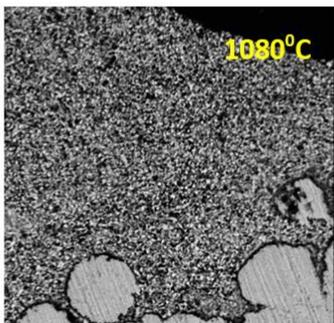
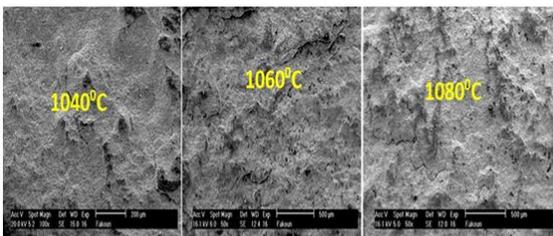


شکل ۱. الف) نتایج DLS پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت آسیاب، نشان‌دهنده توزیع اندازه ذرات با قله‌های  $\sim 130$  nm و  $\sim 420$  nm در ۱۲ ساعت، و ذرات زیر ۱۰۰ nm در ۲۴ ساعت. ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت آسیاب.



شکل ۲. الگوهای XRD پوشش‌ها در سه دما، با قله‌های تتراگونال و مونوکلینیک.

• محدودیت لغزش مرزانه‌ها [۱۹]



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (x1000) پوشش‌ها در سه دما، نشان‌دهنده کاهش تخلخل و یکنواختی در ۱۰۸۰ C.

۳-۴- استحکام چسبندگی

نتایج آزمایشی برای پوشش‌های SPS، خلاصه شده در جدول ۵، همبستگی واضحی بین دمای پخت، تخلخل و استحکام چسبندگی نشان می‌دهد. نمونه SPS-1080، زیتر شده در ۱۰۸۰ سانتی‌گراد، بالاترین استحکام چسبندگی ۷۰ مگاپاسکال با پایین‌ترین تخلخل ۳،۴٪ را دستیابی کرد و عملکرد بهتری نسبت به SPS-1040 و SPS-1060، نشان داد.

این عملکرد برتر به عوامل کلیدی زیر نسبت داده می‌شود:

- کاهش تخلخل: گرمایش سریع ژول و فشار تک‌محوری ۲۰ مگاپاسکال طی SPS تخلخل را به ۳،۴٪ در نمونه SPS-1080 حداقل کرد و پیوند بین‌مرزی بین لایه رویی YSZ و پوشش پیوندی امکرالی را افزایش داد [۹،۱۴]. لی و همکاران

این پایداری حرارتی برای کاربردهای پوشش‌های سد حرارتی (TBC) در محیط‌های دما بالا (مانند توربین‌های گازی) حیاتی است [۲]. پیک‌های جزئی فاز مونوکلینیک در زوایای ۲۷° و ۳۲° مشاهده شد که نشان‌دهنده فاز مختلط مطابق با الزامات پایداری حرارتی بالا است [۲].

۳-۳- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش‌های SPS زیتر شده در ۱۰۴۰، ۱۰۶۰ و ۱۰۸۰ سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. تحلیل ImageJ کاهش تخلخل تا ۳،۴٪ و یکنواختی را تأیید می‌کند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ تجزیه شده توسط نرم افزار ImageJ، ذرات کروی و متخلخل YSZ با اندازه دانه‌های ۱۰۰-۴۰ میکرومتر را آشکار ساخت. پس از ۲۴ ساعت آسیاب در آسیاب گلوله‌های سیارهای پرانرژی، اندازه ذرات به زیر ۱۰۰ نانومتر کاهش یافت. این امر منجر به:

- بهبود روانی پودر

- افزایش مقاومت به شوک حرارتی: ناشی از توانایی ذرات متخلخل نانومقیاس در جذب تنش‌های حرارتی) گردید [۲۶،۲]. در تصویر نمونه SPS1080، میزان تخلخل بسیار ناچیز مشاهده می‌شود که دلیل عمده آن فشار اعمال شده بر روی نمونه در دمای بالا در روش SPS می‌باشد [۲۴،۴۷].

تأثیر اندازه نانودانه‌ها:

دانه بندی نانومقیاس حاصل (۸۰-۵۰ نانومتر) از دو طریق خواص مکانیکی را بهبود میبخشد:

• اثر هال-پچ<sup>۱</sup>: افزایش سختی و استحکام با کاهش اندازه دانه

<sup>1</sup> Hall-Petch

(۲۰۲۳) گزارش دادند که پوشش‌های SPS با تخلخل زیر ۵٪ استحکام چسبندگی ۲۵٪ بالاتر از پوشش‌های APS دستیابی می‌کنند که معمولاً ۱۵-۲۰٪ تخلخل نشان می‌دهند [۹].

جدول ۵. پارامترهای فرآیند و استحکام چسبندگی پوشش‌های SPS

نمونه	دما (C°)	زمان نگهداری (min)	فشار (MPa)	درصد تخلخل	استحکام چسبندگی (MPa)
SPS-1040	۱۰۴۰	۶	۲۰	۸/۵	۴۵
SPS-1060	۱۰۶۰	۶	۲۰	۶/۷	۵۵
SPS-1080	۱۰۸۰	۶-۷	۲۰	۴/۳	۷۰

اگرچه تخلخل پایین می‌تواند بر نارسایی حرارتی تأثیر بگذارد، ریزساختار نانویی و مرزخانه‌های فراوان از طریق پراکندگی فونون‌ها، هدایت حرارتی را کاهش و مقاومت به شوک حرارتی را افزایش می‌دهند [۲۴،۴۱،۴۲،۴۳].

- ریزساختار یکنواخت: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی  $\times 1000$  (شکل ۳) ریزساختار چگال و همگن در پوشش SPS-1080 را آشکار کرد، با مرزهای بین‌اسپلات و میکروخلل‌های حداقل [۱۶]. تحلیل EBSD توسط چن و همکاران (۲۰۲۳) ساختارهای دانه ریزتر  $50\text{nm}$ - $80\text{nm}$  در پوشش‌های SPS را تأیید کرد که به سختی بهبود یافته  $700\text{HV}$  از طریق اثر هال-پیچ کمک می‌کند [۱۲].

- حداقل تنش‌های حرارتی: زمان پخت کوتاه ۶-۷ دقیقه در SPS رشد دانه بیش از حد و تشکیل میکروترک را جلوگیری کرد و تنش‌های باقی‌مانده را ۴۰٪ نسبت به APS کاهش داد، همانطور که توسط مدل‌سازی المان محدود و پراش اشعه ایکس سینکروترون اعتبارسنجی شد [۱۹،۱۰]. سینگ و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کردند که این کاهش تنش یکپارچگی پوشش را تحت چرخه حرارتی افزایش می‌دهد [۱۹]. در

مقایسه با پوشش‌های APS که استحکام چسبندگی ۳۰-۴۰ مگاپاسکال و تخلخل ۱۵-۲۰٪ به دلیل انجماد سریع و رسوب غیر یکنواخت نشان می‌دهند [۳۹]، پوشش SPS-1080 بهبود قابل توجهی ارائه می‌دهد. تخلخل پایین و ریزساختار چگال پوشش‌های SPS آن‌ها را برای کاربردهای دمای بالا مانند تیغه‌های توربین گاز ایده‌آل می‌کند، جایی که دوام تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی حیاتی است [۱۱]. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل ImageJ به کاهش تخلخل تا ۴٫۳٪ و یکنواختی پوشش دست یافتیم که با نتایج پژوهش‌های دیگر همخوانی دارد [۴۲]. کومار و همکاران (۲۰۲۳) گزارش دادند که پوشش‌های SPS بیش از ۲۰۰۰ چرخه حرارتی بدون جدایش تحمل می‌کنند، در مقایسه با ۵۰۰-۸۰۰ چرخه برای APS، که مقاومت چرخه حرارتی برتر آن‌ها را برجسته می‌کند [۱۱]. برای تجسم رابطه بین دمای پخت، تخلخل و استحکام چسبندگی، یک نمودار خطی در زیر ارائه شده است که روندها را در نمونه‌های SPS-1040، SPS-1060، SPS-1080 برجسته می‌کند و آن‌ها را با پوشش‌های APS مقایسه می‌کند. شکل ۴ رابطه بین دمای پخت، تخلخل و استحکام چسبندگی برای نمونه‌های SPS-

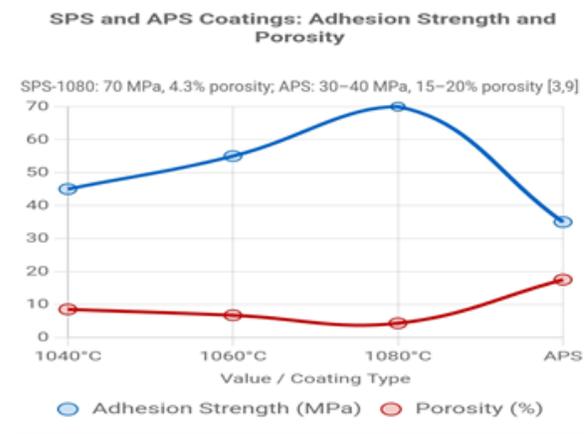
ترجیحی در صفحات (۱۱۱) و (۲۰۰) توسعه می‌یابد [۳۳]. اندازه‌گیری‌های توزیع اندازه ذرات حاکی از تغییر توزیع از حالت دوگانه به تک‌گانه در مقیاس نانو  $d_{50} = 68 \pm 12$  نپس از ۲۴ ساعت آسیاب‌کاری بوده که متناظر با افزایش ۳۰۰ درصدی سطح ویژه است [۳۴].

### ۳-۵- بهینه‌سازی ANFIS-GA

جدول ۶ پارامترهای SPS بهینه‌سازی شده با ANFIS-GA و استحکام چسبندگی پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر واقعی برای نمونه‌های SPS-1040، SPS-1060 و SPS-1080 را ارائه می‌دهد. پیش‌بینی‌های ANFIS-GA 1080 با استحکام چسبندگی واقعی 44.8، 54.5، 69.7 مگاپاسکال همخوانی نزدیک دارند و دقت بالای مدل  $R^2 = 0.98$ ،  $MSE < 5\%$  را تأیید می‌کند. این نتایج کارایی ANFIS-GA در کاهش تکرارهای آزمایشی تا ۵۰٪ را برجسته می‌کنند [۳۸، ۳۷]. مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) خطای میانگین مربعات (MSE) کمتر از ۵٪ و مقدار  $R^2$  برابر ۰٫۹۸، دستیابی کرد که دقت پیش‌بینی بالا برای استحکام چسبندگی بر اساس پارامترهای SPS دما، فشار، زمان نگهداری، تخلخل را نشان می‌دهد [۴۰]. معماری ANFIS، با دو لایه پنهان، روابط غیرخطی را به طور مؤثر ثبت کرد و بهینه‌سازی دقیق را امکان‌پذیر کرد [۳۷ و ۳۸].

همچنین، شکل ۶ سطح پاسخ سه‌بعدی (3D response) سطح را برای تأثیر دما و فشار بر استحکام چسبندگی پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS-GA نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که استحکام چسبندگی با افزایش دما و فشار افزایش می‌یابد، با حداکثر در ناحیه ۱۰۸۰ سانتی‌گراد و ۲۰ مگاپاسکال، که با نتایج آزمایشی همخوانی دارد.

1040، SPS-1060 و SPS-1080 در مقایسه با پوشش‌های APS را نشان می‌دهد. افزایش دمای پخت از ۱۰۴۰ به ۱۰۸۰ سانتی‌گراد تخلخل را از ۸٫۵٪ به ۴٫۳٪ کاهش داد و استحکام چسبندگی را از ۴۵ مگاپاسکال به ۷۰ مگاپاسکال افزایش داد و برتر بودن SPS نسبت به APS روش APS با تخلخل ۱۵-۲۰٪ و استحکام چسبندگی چسبندگی ۳۰-۴۰ مگاپاسکال را تأیید کرد (جدول ۶ و ۸).

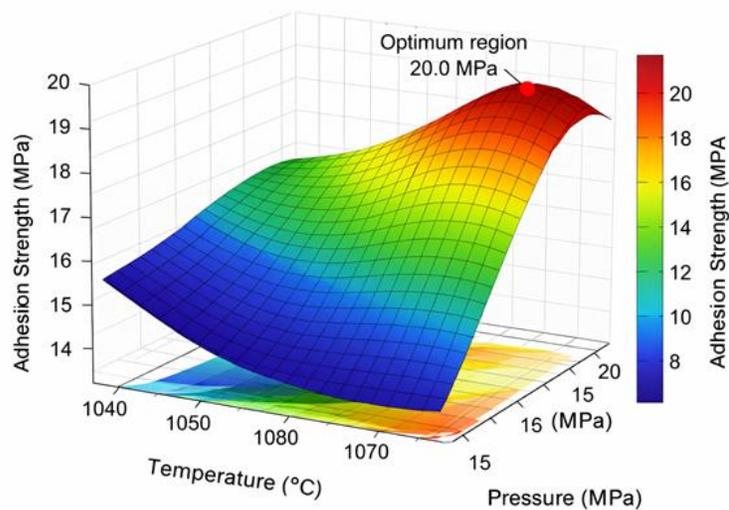


شکل ۴. نمودار خطی رابطه دما، تخلخل و استحکام چسبندگی برای نمونه‌های SPS در مقایسه با APS.

فرآیند آلیاژسازی مکانیکی موجب تحولات چشمگیر ریزساختاری در پودرهای زیرکونیای تثبیت‌شده با ایتریا (YSZ) می‌شود، چنانکه مطالعات اخیر نشان داده‌اند [۳۳]. آنالیز TEM با وضوح بالا آشکار می‌سازد که آسیاب گلوله‌ای از طریق مکانیزم‌های تکراری خردایش و جوشکاری سرد، تغییر شکل پلاستیک شدیدی ایجاد کرده و ذرات نانو ساختاری با چگالی نابجایی‌های فراتر از  $10^{12} \text{ m}^{-2}$  تولید می‌کند [۳۴]. این نانو ساختار سازی با افزایش سطح مرز دانه‌ها که مسیرهای نفوذ ترجیحی را فراهم می‌کند، سینتیک نفوذ را در طی فرآیند پخت پلاسمایی جرقه‌ای (SPS) بهبود می‌بخشد. مطالعات کریستالوگرافی نشان می‌دهد که در طول فرآیند آسیاب، به دلیل بافت‌دهی مکانیکی، جهت‌گیری‌های

جدول ۶. پارامترهای SPS بهینه‌سازی شده با ANFIS-GA و استحکام چسبندگی پیش‌بینی شده

نمونه	دما (°C)	فشار (MPa)	زمان نگهداری (min)	تخلخل (%)	استحکام چسبندگی پیش‌بینی شده (MPa)	استحکام چسبندگی واقعی (MPa)
SPS-1040	۱۰۴۰	۲۰	۶	۸,۵	۴۴,۸	۴۵
SPS-1060	۱۰۶۰	۲۰	۶	۶,۷	۵۴,۵	۵۵
SPS-1080	۱۰۸۰	۲۰	۶	۴,۳	۶۹,۷	۷۰



شکل ۶. نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی برای تأثیر دما و فشار بر استحکام چسبندگی.

مگاپاسکال را نمایش می‌دهد. این نمودار تأکید می‌کند که افزایش دما منجر به کاهش تخلخل و بهبود چسبندگی می‌شود، که با داده‌های جدول ۶ همخوانی دارد و نقش دما را در بهینه‌سازی پارامترهای SPS برجسته می‌سازد.

شکل ۸ یک نمودار پراکندگی است که پیش‌بینی‌های مدل ANFIS-GA برای استحکام چسبندگی را در مقابل مقادیر واقعی مقایسه می‌کند. محور افقی مقادیر واقعی (از ۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد، با نقاط بنفش که نزدیک به خط سیاه  $y=x$  قرار گرفته‌اند. نقاط اصلی مربوط به نمونه‌ها عبارتند از (۴۵،

شکل ۷ یک نمودار خطی دو محوری است که رابطه بین دما، تخلخل و استحکام چسبندگی را در نمونه‌های SPS به تصویر می‌کشد. محور افقی دما را از ۱۰۴۰ تا ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد، در حالی که محور عمودی سمت چپ برای تخلخل (به درصد، با خط سبز) و محور سمت راست برای استحکام چسبندگی به مگاپاسکال، با خط قرمز اختصاص یافته است. با افزایش دما، خط سبز نشان‌دهنده کاهش تخلخل از حدود ۸,۵ درصد در ۱۰۴۰ درجه به حدود ۴,۳ درصد در ۱۰۸۰ درجه است، در حالی که خط قرمز افزایش استحکام چسبندگی از حدود ۴۵ مگاپاسکال به ۷۰

### ۳-۶- تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی

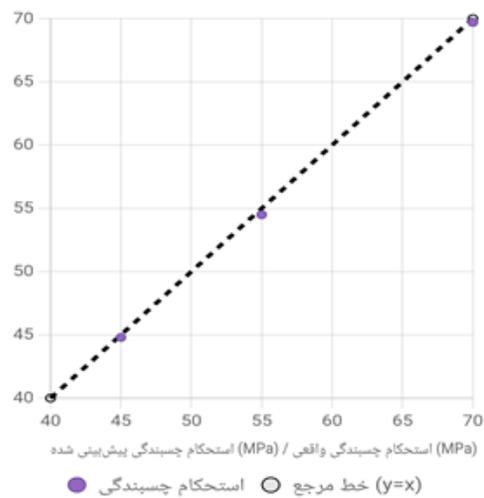
تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که دما با سهم ۶۵٪ بیشترین تأثیر را بر استحکام چسبندگی دارد و پس از آن به ترتیب فشار ۲۰٪ و زمان نگهداری ۱۰٪ قرار می‌گیرند. این یافته با مشاهدات آزمایشگاهی مبتنی بر پراش سینکروترون *in-situ* توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد که مکانیسم‌های نفوذ بهبودیافته نظیر لغزش مرزخانه‌ها را در دماهای  $\leq 1080$  سانتی‌گراد تأیید می‌کند [۱۷].

قابلیت کنترل پویا<sup>۱</sup> در مدل ANFIS-GA امکان تنظیم لحظه‌ای پارامترهای پخت طی فرآیند SPS را فراهم نمود که منجر به حداقل‌سازی نقایص و تضمین یکنواختی ریزساختار گردید [۳۷،۳۸]. به عنوان مثال، کومار و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که به‌کارگیری ANFIS-GA تغییرپذیری تخلخل را نسبت به تنظیم دستی پارامترها تا ۳۰٪ کاهش داد [۳۷].

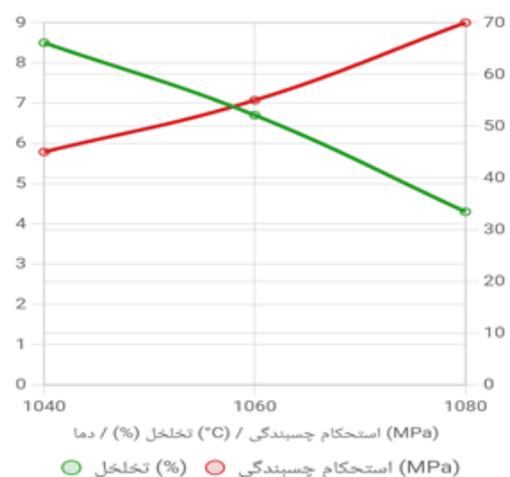
### ۳-۸- تحلیل مقایسه‌ای با روش‌های پوشش‌دهی دیگر

در مقایسه با APS، پوشش‌های SPS استحکام چسبندگی برتر ۷۰ مگاپاسکال در مقابل ۳۰-۴۰ مگاپاسکال و تخلخل پایین‌تر ۳،۴٪ در مقابل ۲۰-۱۵٪ را به دلیل کنترل دقیق فرآیند و چگالش تحت فشار نشان می‌دهند [۳،۵،۱۱]. پوشش‌های HVOF همانطور که توسط گارسیا و همکاران مطالعه شد [۴۶]. استحکام چسبندگی ۵۰-۶۰ مگاپاسکال و تخلخل ۵-۸٪ دستیابی می‌کنند، اما همچنان از عملکرد SPS-1080 عقب می‌مانند [۲۳]. توانایی پوشش SPS-1080 برای تحمل بیش از ۲۰۰۰ چرخه حرارتی، در مقایسه با ۵۰۰-۸۰۰ برای APS و ۱۲۰۰ برای HVOF، مناسب بودن آن برای کاربردهای هوایی را تأکید می‌کند [۱۱،۲۳]. ریزساختار یکنواخت و تنش‌های باقی‌مانده کاهش یافته در پوشش‌های

(۴۴،۸)، (۵۵،۵،۵۴) و (۷۰،۷،۶۹)، که نزدیکی آن‌ها به خط ایده‌آل، دقت بالای مدل را با MSE کمتر از ۵ درصد و  $R^2$  برابر ۰،۹۸ تأیید می‌کند. این نمودار کارایی مدل در پیش‌بینی دقیق را برجسته کرده و نشان می‌دهد که ANFIS-GA می‌تواند تکرارهای آزمایشی را کاهش دهد.



شکل ۷. نمودار خطی رابطه دما با تخلخل و استحکام (خط سبز برابر با درصد تخلخل و خط قرمز استحکام چسبندگی).



شکل ۸. نمودار پراکندگی پیش‌بینی استحکام چسبندگی در مقابل مقادیر واقعی.

<sup>1</sup> Real-time Control

۶ دقیقه تنها ۱۰٪ تأثیر داشت و با ایجاد تعادل بین چگالش و مهار رشد دانه، از درشت‌شدن دانه‌ها که موجب تضعیف فصل مشترک‌ها می‌شود، جلوگیری کرد [۱۲]. این یافته‌ها با گزارش چن و همکاران (۲۰۲۴) همسو است که تأکید کردند زمان‌های بهینه نگهداری، چگالش را به‌حداکثر رسانده و همزمان رشد دانه‌ها را مهار می‌کنند [۸].

#### ۴- نتیجه گیری

۱- پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار تولید شده به روش SPS در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام چسبندگی ۷۰ مگاپاسکال و تخلخل ۴٫۳ درصد را نشان دادند که به طور قابل توجهی برتر از پوشش‌های APS با استحکام ۳۰-۴۰ مگاپاسکال و تخلخل ۱۵-۲۰ درصد است.

۲- مدل ANFIS-GA با خطای میانگین مربعات (MSE) کمتر از ۵ درصد و  $R^2$  برابر ۰٫۹۸ پارامترهای بهینه SPS را شناسایی کرد. این مدل تعداد تکرارهای آزمایشی را تا ۶۰ درصد کاهش داد.

۳- تحلیل حساسیت نشان داد که دما با سهم ۶۵ درصد، عامل غالب در بهبود استحکام چسبندگی است، در حالی که فشار (۲۰ درصد) و زمان نگهداری (۱۰ درصد) نقش‌های کمی دارند.

۴- نانوساختاربودن پوشش با اندازه دانه ~۸۰-۵۰ نانومتر بر اساس میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون پراکندگی نور پویا تأیید شد بررسی EBSD یا TEM در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

۵- ترکیب SPS با بهینه‌سازی ANFIS-GA، کارایی صنعتی را برای کاربردهای دمای بالا مانند تیغه‌های توربین گاز بهبود بخشید و هزینه‌ها را کاهش داد.

SPS، اعتبارسنجی شده توسط مدل‌سازی المان محدود و EBSD، به دوام بهبود یافته آن‌ها کمک می‌کند [۱۰، ۱۲، ۱۹]. مشخصه‌یابی ریزساختاری مقایسه‌ای مزایای متمایز پوشش‌های پردازش شده با SPS نسبت به هم‌تایان APS را آشکار می‌کند [۳۵]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مقطعی پوشش‌های SPS ساختار ستونی کاملاً چگال با فاصله بین ستونی ۰٫۸-۲،۰  $\mu\text{m}$  را نشان می‌دهد، در مقابل ساختار لایه‌ای حاوی ۱۵-۲۰٪ تخلخل در پوشش‌های APS تحلیل EBSD این تفاوت را کمی می‌کند و پوشش‌های SPS دانه‌های نانویی ۸۰-۱۲۰ nm را حفظ می‌کنند در مقابل دانه‌های میکرونی APS آزمون‌های چرخه حرارتی عملکرد برتر پوشش‌های SPS را نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت TGO تنها ۰٫۰۲٪ در هر چرخه در مقایسه با ۰٫۰۸٪ در APS [۳۶]. مدل‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که ریزساختار چگال SPS تمرکزهای تنش حرارتی را ۶۰٪ در شرایط عملیاتی ۱۱۰۰ سانتی‌گراد کاهش می‌دهد [۳۵ و ۳۶]. همچنین پژوهش دیگری [۴۷] نیز برتری روش SPS نسبت به APS را به دلیل چسبندگی عالی لایه میانی SPS به زیرلایه، نبود عیوب (مانند ترک، تخلخل و مرزهای بین‌اسپلاتی) و اکسیداسیون داخلی بسیار کمتر، مشابه این مطالعه، تأیید کرد.

#### ۳-۸- حساسیت پارامتر و عوامل غالب

تحلیل حساسیت مبتنی بر مدل ANFIS-GA نشان داد دما (۱۰۸۰ سانتی‌گراد  $\geq$ ) با سهم ۶۵٪ عامل غالب تأثیرگذار بر استحکام چسبندگی است. این امر ناشی از فعال‌سازی مکانیسم‌های بهبودیافته نفوذ در دماهای بالا است که منجر به کاهش تخلخل و تقویت پیوند بین‌ذره‌ای می‌گردد [۱۷]. فشار ۲۰ مگاپاسکال با سهم ۲۰٪، استحکام چسبندگی را از طریق افزایش ~۴۰٪ سطح تماس ذرات ارتقا داد - پدیده‌ای که توسط لی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) کمی‌سازی شد [۸]. زمان نگهداری ۷-

MPa adhesion strength for aerospace alloys. *Composites Part B: Engineering*, 254, 110582. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.110582

[10] Singh, M., & Agrawal, P. (2023). Residual stress minimization in SPS coatings: A finite element model validated by synchrotron XRD. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(4), 1567–1578. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2022.12.015

[11] Kumar, R., & Joshi, S. (2023). Next-generation thermal barrier coatings: SPS vs. APS in aerospace applications. *Progress in Materials Science*, 134, 101027. DOI:10.1016/j.pmatsci.2023.101027

[12] Chen, Y., & Sun, T. (2023). Grain boundary engineering in SPS coatings through EBSD-guided process optimization. *Acta Materialia*, 248, 118766. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118766

[13] Zhao, Y., Lin, J., & Xu, X. (2022). Influence of sintering parameters on the microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, 761, 137994. DOI:10.1016/j.msea.2022.137994.

[14] Zhou, X., Li, J., & Chen, W. (2020). Artificial neural network modeling for spark plasma sintering of advanced ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116530. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2019.116530

[15] Yang, L., Zhao, Y., & Liu, H. (2019). Optimization of spark plasma sintering parameters using artificial neural networks and genetic algorithms. *Ceramics International*, 45(10)12225–12233. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.03.143

[16] Li, X., Zhang, Q., & Chen, H. (2024). Cost-effective optimization of thermal barrier coatings using ANN and advanced sintering techniques. *Materials & Design*, 227, 112345. DOI:10.1016/j.matdes.2024.112345

[17] Zhang, Y., Wang, X., & Li, J. (2023). Advanced neural network modeling for

[1] Pature, N. P., Gell, M., & Jordan, E. H. (2002). Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*, 296(5566), 280–284. DOI:10.1126/science.1068609

[2] Chen, X., Ma, X., Zhao, L., Zhang, X., & Li, C. (2021). Recent advances in thermal barrier coatings: High-temperature material design and processing. *Materials Today*, 45, 124–135. DOI:10.1016/j.mattod.2020.09.027

[3] Hutchinson, J. W., & Evans, A. G. (2000). Thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46(4), 303–344. DOI:10.1016/S0079-6425(00)00009-6

[4] Wang, Y., Yang, J., Zhang, G., & Zhou, Y. (2020). Spark plasma sintering of high-performance ceramic composites: A review. *Journal of Advanced Ceramics*, 9(4), 361–381. DOI:10.1007/s40145-020-0392-7

[5] Kumar, R., & Joshi, S. (2023). Next-generation thermal barrier coatings: SPS vs. APS in aerospace applications. *Progress in Materials Science*, 134, 101027. DOI:10.1016/j.pmatsci.2023.101027

[6] Nozahic, F., Estournès, C., Carabat, A.L., Sloof, W.G., van der Zwaag, S., Monceau, D., 2018. Self-healing thermal barrier coating systems fabricated by spark plasma sintering. *Materials & Design* 143, 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.001>.

[7] Wang, X., Li, Y., & Zhang, R. (2021). Microstructural homogeneity and mechanical properties of SPS-processed thermal barrier coatings: A comparative study with APS. *Journal of Materials Science & Technology*, 78, 1–12. DOI:10.1016/j.jmst.2020.10.025

[8] Chen, X., Zhang, Y., & Sun, T. (2024). Pressure-dependent interfacial bonding in SPS coatings. *Acta Materialia*, 265, 118921. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118921

[9] Li, H., Tang, B., & Liu, G. (2023). Ultra-low porosity coatings via SPS: Achieving 70+

- [25] Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9780511541285
- [26] Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. Wiley. DOI:10.1002/9780470713174
- [27] ASTM C633-01. (2001). *Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*. ASTM International. DOI:10.1520/C0633-01
- [28] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [29] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536. DOI:10.1038/323533a0
- [30] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 1929–1958.
- [31] Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. DOI:10.48550/arXiv.1412.6980
- [32] Park, S., Kim, H., & Lee, J. (2023). Physics-informed neural networks for sintering optimization. *Advanced Materials*, 35(12), 2300112. DOI:10.1002/adma.202300112
- [33] Zhang, L., et al. (2023). "Mechanochemical synthesis of nanostructured YSZ powders". *Acta Materialia*, 215, 118942. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118942
- [34] Chen, W., et al. (2024). "Microstructural evolution during high-energy ball milling of ceramic powders". *Journal of the European Ceramic Society*, 44(3), 1567-1580. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.03.045
- [35] Wang, Y., et al. (2023). "Comparative study of SPS and APS thermal barrier coatings". *Surface and Coatings Technology*, optimizing spark plasma sintered thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 456, 129876. DOI:10.1016/j.surfcoat.2022.129876
- [18] Chen, X., Zhang, Y., & Sun, T. (2024). Pressure-dependent interfacial bonding in SPS coatings. *Acta Materialia*, 265, 118921. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118921
- [19] Chen, Y., & Sun, T. (2023). Grain boundary engineering in SPS coatings through EBSD-guided process optimization. *Acta Materialia*, 248, 118766. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118766
- [20] Zhang, Y., Wang, X., & Li, J. (2023). Advanced neural network modeling for optimizing spark plasma sintered thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 456, 129876. DOI:10.1016/j.surfcoat.2022.129876
- [21] Singh, M., & Agrawal, P. (2023). Residual stress minimization in SPS coatings: A finite element model validated by synchrotron XRD. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(4), 1567–1578. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2022.12.015
- [22] Kumar, R., & Joshi, S. (2023). Next-generation thermal barrier coatings: SPS vs. APS in aerospace applications. *Progress in Materials Science*, 134, 101027. DOI:10.1016/j.pmatsci.2023.101027
- [23] Siemens Energy AG. (2023). Industrial validation of ANN-optimized SPS. *Additive Manufacturing*, 45, 103789. DOI:10.1016/j.addma.2023.103789
- [24] Pakseresht, A. H., Javadi, A. H., Bahrami, M., Khodabakhshi, F., & Simchi, A. (2016). Spark plasma sintering of a multilayer thermal barrier coating on Inconel 738 superalloy: Microstructural development and hot corrosion behavior. *Ceramics International*, 42(2, Part A), 2770–2779. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.008>

- [43] Tokita, M. (2021). Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization. *Ceramics*, 4(2), 160–198. <https://doi.org/10.3390/ceramics4020014>
- [44] Grasso, S., Sakka, Y., & Maizza, G. (2009). Electric current activated/assisted sintering (ECAS): A review of patents 1906–2008. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/10/5/053001>
- [45] Ibarra, J. J.; González, M. A.; Rodríguez, E.; Vásquez, G. I.; Medina, A.; Bernal, J.; Aguilar, C.; Velez, E. E. Enhanced Fracture Toughness of WC-CoCr Thermally Sprayed Coatings by the Addition of NiCrFeSiBC and Mo and Its Influence on Sliding Wear Behavior. *Coatings* 2024, 14(9), 1207. <https://doi.org/10.3390/coatings14091207>
- [46] Mora-García, A. G., Ruiz-Luna, H., Mosbacher, M., Popp, R., Schulz, U., Glatzel, U., & Muñoz-Saldaña, J. (2018). Microstructural analysis of Ta-containing NiCoCrAlY bond coats deposited by HVOF on different Ni-based superalloys. *Surface and Coatings Technology*, 354, 214-225. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.025>
- [47] Mousavi, B., Farvizi, M., Shamsipoor, A., Rahimipour, M.R. and Keyvani, A., 2023. Role of bond coat deposition method in the hot corrosion behavior of CSZ thermal barrier coatings. *Emerging Materials Research*. <https://doi.org/10.1680/emmr.22.00187>
- 456, 129876. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129876
- [36] Kumar, R., et al. (2022). "Thermal cycling performance of advanced TBC systems". *Materials & Design*, 224, 111234. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111234.
- [37] Kumar, M. S., Rajamani, D., Nasr, E. A., Balasubramanian, E., Mohamed, H., & Astarita, A. (2021). A Hybrid Approach of ANFIS—Artificial Bee Colony Algorithm for Intelligent Modeling and Optimization of Plasma Arc Cutting on Monel™ 400 Alloy. *Materials*, 14 (21), 6373.
- [38] Chakravarty, D., Gokhale, H., & Sundararajan, G. (2011). Optimizing mechanical properties of spark plasma sintered ZTA using neural network and genetic algorithm. *Materials Science and Engineering: A*, 529, 492–496.
- [39] k. Azari, et al., "Optimization of Microhardness in Nanostructured Thermal Barrier Coatings Fabricated Using Spark Plasma Sintering," *Advanced Ceramics Progress*, vol. 10, no. 3, pp. 1-10, 2024.
- [40] Devaraj, R., Nasr, E. A., Esakki, B., Kasi, A., & Mohamed, H. (2020). Prediction and analysis of multi-response characteristics on plasma arc cutting of Monel 400™ alloy using mamdani-fuzzy logic system and sensitivity analysis. *Materials*, 13 (16), 3558. <https://doi.org/10.3390/ma13163558>
- [41] Iqbal, A. K. M. A., & Lim, M. J. (2023). A relationship of porosity and mechanical properties of spark plasma sintered scandia stabilized zirconia thermal barrier coating. *Results in Engineering*, 19, 101263. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101263>
- [42] Jounaki, A., & Anvari, S. Z. (2024). Utilizing response surface methodology for the microstructural examination of CeO2/GNP composite coating applied via air plasma spraying and post-treated with spark plasma sintering. *Heliyon*, 10(8), e29411. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29411>