



## تحلیل آماری و بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی نانو کامپوزیت آلومینیوم سیلیکون کاربید با استفاده از روش سطح پاسخ

محمد شریفی‌زاده<sup>۱</sup>، نصراله بنی مصطفی عرب<sup>۲\*</sup>، امیر رفاهی اسکویی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: n.arab@sru.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ آذر ۱۴۰۲  
پذیرش: ۱۲ بهمن ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

ساخت افزایشی  
نانوکامپوزیت  
روش سطح پاسخ  
بهینه‌سازی

در سال‌های اخیر ساخت افزایشی اهمیت چشمگیری در زمینه تولید بدست آورده است. بیشتر تکنولوژی‌های ساخت افزایشی فلزات، شامل فرآیندهای ذوب و انجماد هستند که سبب ایجاد چالش‌های متالورژیکی می‌شوند. ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی یک روش ساخت افزایشی حالت جامد جدید می‌باشد که با چالش‌های متالورژیکی رایج در روش‌های ذوبی معمول مواجه نیست. از این فرآیند می‌توان برای ساخت نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم سیلیکون کاربید که در صنایع مختلف از جمله نظامی، هوافضا، خودروسازی و ... کاربردهای فراوانی دارند استفاده نمود. هدف اصلی این تحقیق، تحلیل تجربی اثر متغیرهای سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها در فرآیند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی بر ریزسختی و میزان سایش نانوکامپوزیت آلومینیوم سیلیکون کاربید تولید شده با این روش می‌باشد. بدین منظور، از روش سطح پاسخ و نرم افزار مینی‌تب برای طراحی آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل آماری و نیز بهینه‌سازی متغیرها استفاده شد. تنظیمات بهینه‌سازی چند منظوره با هدف افزایش ریزسختی و کاهش میزان سایش انتخاب شدند. ترکیب مقادیر بهینه متغیرها جهت دستیابی به اهداف بهینه‌سازی تعیین و نتایج بدست آمده صحت سنجی شد. نتیجه بهینه‌سازی با مطلوبیت ۰/۸۷ در سرعت چرخش ابزار ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس یک حاصل شد. پاسخ‌های بهینه پیش‌بینی شده ۱۰۴ و یکرز برای ریزسختی و ۰/۱۳ گرم برای سایش در مقایسه با نتایج تجربی از در صد خطای کمی برخوردار بودند.

## Statistical analysis and optimization of friction stir additive manufacturing process variables for aluminum silicon carbide nanocomposite using the response surface method

Mohammad Sharifizadeh<sup>1</sup>, Nasrollah Bani Mostafa Arab<sup>2\*</sup>, Amir Refahi Oskouei<sup>3</sup>

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: n.arab@sru.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 21 December 2023

Accepted: 1 February 2024

#### Keywords:

Additive Manufacturing  
Nanocomposite  
Response Surface Method  
Optimization

### Abstract

In recent years, additive manufacturing has gained significant importance in the field of production. Most of the additive manufacturing technologies for metals involve melting and solidification processes, leading to metallurgical challenges. The friction stir additive manufacturing process is a novel solid-state method that does not face the common metallurgical challenges associated with the traditional melting methods. This process can be used for the production of aluminum-silicon carbide nanocomposites that find many applications in industries such as military, aerospace, automotive, etc. The primary objective of this research is to experimentally analyze the effect of tool rotational speed, tool traverse speed, and number of passes in friction stir additive manufacturing on the microhardness and wear amount of aluminum-silicon carbide nanocomposite manufactured by this method. To this end, the response surface method and Minitab software were used for experimental design, statistical analysis, and optimization of the parameters. Multi-objective optimization settings were selected to increase microhardness and reduce wear. The combinations of optimal values of the parameters were determined to achieve the optimization goals, and the results were validated. The optimization result with 0.87 desirability is obtained with a tool rotational speed of 1000 rpm, a tool traverse speed of 50 mm/min, and one pass. The predicted optimal responses of 104 Vickers for microhardness and 0.013 gr for wear had a small percentage of error compared to the experimental results.

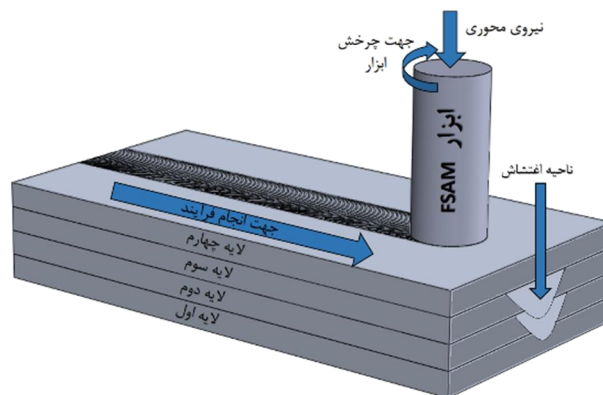
### Please cite this article using:

Sharifizadeh M, Bani Mostafa Arab N, Refahi Oskouei A. Statistical analysis and optimization of friction stir additive manufacturing process variables for aluminum silicon carbide nanocomposite using the response surface method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 January 21;10(11):24-38. doi: 10.22034/IJME.2024.431334.1888 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ویژگی‌هایی همچون چگالی کم، استحکام ویژه بالا و مقاومت در برابر خوردگی، در کاربردهای سازه‌ای در صنایع هوافضا، نظامی و حمل و نقل به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، ضعف در مقاومت سایشی کاربردهای آن‌ها را محدود کرده‌است. به عنوان یک جایگزین مطلوب، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی<sup>۱</sup> (AMCs) با تقویت‌کننده‌های ناپیوسته مانند آلومینا و سیلیکون کاربید<sup>۲</sup> (SiC)، نه تنها استحکام مکانیکی بالاتری دارند بلکه خواص تریبولوژیکی بهتری ارائه می‌دهند و از نظر کاربردی، جایگزینی مؤثر برای آلیاژهای آلومینیوم معمولی محسوب می‌شوند [۱-۴]. آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم، به دلیل داشتن استحکام و مقاومت بالا در برابر خوردگی، یکی از آلیاژهای پایه پرکاربرد برای AMCs در میان آلیاژهای مختلف آلومینیوم است [۵]. SiC به دلیل خواص عالی مانند رسانایی حرارتی بالا، سختی و استحکام مکانیکی، بیشترین تحقیقات را میان تقویت‌کننده‌های سرامیکی به خود اختصاص داده است [۶]. نانو کامپوزیت‌های آلومینیوم سیلیکون کاربید (Al-SiC) کاربردهای گوناگونی نظیر پره‌های خروجی توربین گاز دارند [۷]. روش‌های متعددی در ساخت افزایشی<sup>۳</sup> (AM) استفاده می‌شود و علیرغم اینکه این موضوع در خط مقدم نوآوری و تحقیقات قرار دارد، با چالش‌های اساسی مواجه است [۸]. ساخت افزایشی فلزات<sup>۴</sup> (MAM) در حال توسعه می‌باشد و عمدتاً برای طیف محدودی از فلزات به کار می‌رود [۹، ۱۰]. در حالیکه با MAM ساخت اشکال پیچیده امکان‌پذیر است، ارزیابی عملکرد ساختاری قطعات تولید شده، نشان می‌دهد که ویژگی‌های مکانیکی اجزای ساخته شده از مواد پایه ضعیف‌تر است و عیوب مختلفی از جمله تخلخل، ریز ساختار ناهمگن، از دست دادن عناصر آلیاژی و ترک رایج می‌باشد [۱۱-۱۳]. برای غلبه بر مسائل ساختاری در تکنیک‌های MAM رایج، لازم است که فرآیندهای حالت جامد مبتنی بر اصطکاک با این روش‌ها تلفیق شود. تکنیک ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۵</sup> (FSAM) از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۶</sup> (FSW) سرچشمه گرفته است. مشابه FSW، فرآیند FSAM باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید در مجاورت ابزار می‌شود که منجر به تبلور مجدد دینامیکی می‌شود و در نتیجه، یک ریز ساختار دانه ریز با خواص بهینه ایجاد می‌شود [۱۴]. در شکل ۱ شماتیکی از فرآیند FSAM مشاهده می‌گردد.



شکل ۱ شماتیک فرآیند FSAM

در سال‌های اخیر تحقیقاتی بسیاری پیرامون روش FSAM انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. پالانیول و همکاران [۱۵] از فرآیند FSAM برای ساخت آلیاژ منیزیم WE43 با خواص مکانیکی برتر از جمله استحکام و شکل‌پذیری بالا استفاده کردند. این مطالعه همچنین ارتباط بین خواص مکانیکی و مشاهدات ریز ساختاری را بررسی کرد. ژانگ و همکاران [۱۶] فرآیند FSAM را با استفاده از روش‌های انتقال منبع حرارت و مونت کارلو شبیه‌سازی کردند و صحت داده‌های خروجی شبیه‌سازی را از طریق نتایج آزمایشگاهی تایید کردند. هی و همکاران [۱۷] از FSAM برای ایجاد ساختار آلیاژ آلومینیوم چند لایه 7N01-T4

<sup>1</sup> Aluminum Matrix Composites

<sup>2</sup> Silicon Carbide SiC

<sup>3</sup> Additive Manufacturing

<sup>4</sup> Metal-Based Additive Manufacturing

<sup>5</sup> Friction Stir Additive Manufacturing

<sup>6</sup> Friction Stir Welding

استفاده نموده و همچنین به بررسی تکامل ریز ساختاری و تأثیر آن بر ریز سختی و خواص کششی پرداختند. لی و همکاران [۱۸] ساخت یک آلیاژ آلومینیوم چند لایه Al-Zn-Mg-Cu توسط FSAM را در زیر آب بررسی کردند. ساختار حاصل برای تجزیه و تحلیل ریز ساختار و خواص مکانیکی آن مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج، کاهش قابل توجهی در سختی از لایه بالا به پایین را نشان داد. اردلان‌نیا و همکاران [۱۹] از FSAM چند پاسی برای ساخت کامپوزیت های دو لایه Al-Zn-Cu/Al-Zn استفاده کردند و ریز ساختار و خواص مکانیکی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. جیانگ و همکاران [۲۰] تکامل ریز ساختار و توزیع سختی را در آلیاژ Al-Li ۲۰۶۰ با متغیرهای متفاوت در FSAM، برای پاس‌های منفرد و همپوشان تحلیل کردند.

روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> (RSM) یک مجموعه از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که از توابع چندجمله‌ای خطی یا درجه دوم برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های تجربی استفاده می‌کند. هدف اصلی این روش، شناسایی شرایط بهینه جهت به حداکثر رساندن متغیرهای خروجی است. مزیت قابل توجه RSM این است که، با به حداقل رساندن تعداد کلی آزمایش‌های مورد نیاز، امکان بررسی دقیق تعاملات متقابل بین متغیرها در یک سیستم را فراهم می‌آورد [۲۱]. این روش به تحلیل دقیق و بهینه‌سازی فرآیندها کمک می‌کند و این امر به ویژه در مطالعات تولید نانو کامپوزیت، که پارامترهای ورودی مواد یا روش‌های مختلف می‌توانند تأثیرگذاری متفاوتی در نتایج نهایی داشته باشند، به محققان این امکان را می‌دهد تا با بهینه‌سازی و کاهش تعداد آزمایش‌ها، به سرعت و با دقت به نتایج مطلوب خود برسند [۲۲-۲۴].

این تحقیق به بررسی ساخت نانو کامپوزیت Al-SiC با استفاده از روش FSAM پرداخته است. علاوه بر این، به بررسی آماری تأثیر متغیرهای فرآیند بر خواص مکانیکی، ارائه مدل ریاضی و بهینه‌سازی متغیرها پرداخته است. در حال حاضر، هیچ بررسی تجربی مربوط به تولید نانو کامپوزیت Al6061-SiC از طریق استفاده از تکنیک FSAM و همزمان بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر میزان سختی و سایش وجود ندارد. از RSM به منظور طراحی آزمایش، بررسی آماری و ارائه مدل ریاضی استفاده گردید. متغیرهای ورودی FSAM شامل سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها در نظر گرفته شد و دو پاسخ مقدار ریز سختی و میزان سایش اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بهینه‌سازی چند هدفه به منظور دستیابی به حداکثر سختی و حداقل سایش انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و ساخت افزایشی نانو کامپوزیت

در مطالعه حاضر از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به عنوان ماتریس پایه و نانوذرات SiC به عنوان ذرات تقویت‌کننده برای تولید نانو کامپوزیت استفاده شده است. ابعاد نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر در ۳ میلی‌متر بود و در جداول ۱ و ۲ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ ۶۰۶۱ ارائه شده است. نانو ذرات SiC مورد استفاده دارای مورفولوژی مکعبی با ابعاد ۴۵ تا ۶۵ نانومتر بود.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

عنصر تشکیل دهنده	Cr	Mg	Zn	Ti	Mn	Fe	Cu	Si	A
درصد وزنی	0.118	1.03	0.119	0.027	0.07	0.466	0.233	0.592	97.33

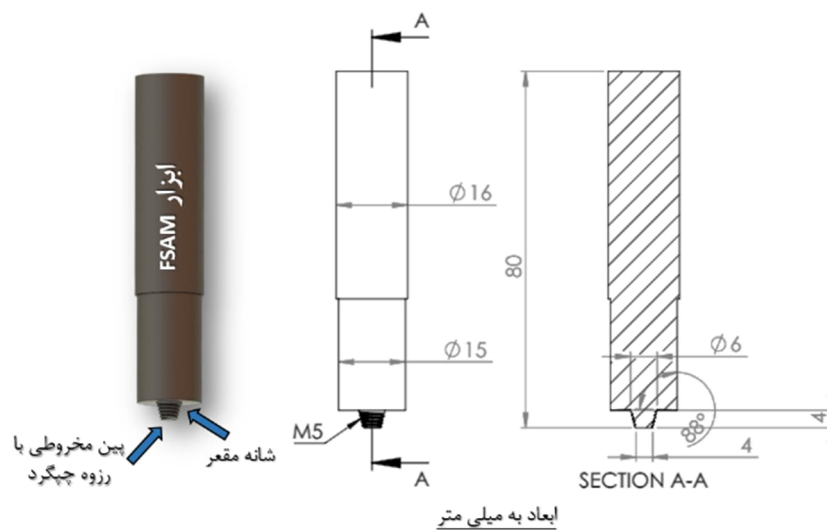
جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

سختی ویکرز	درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی (MPa)
103	8	291

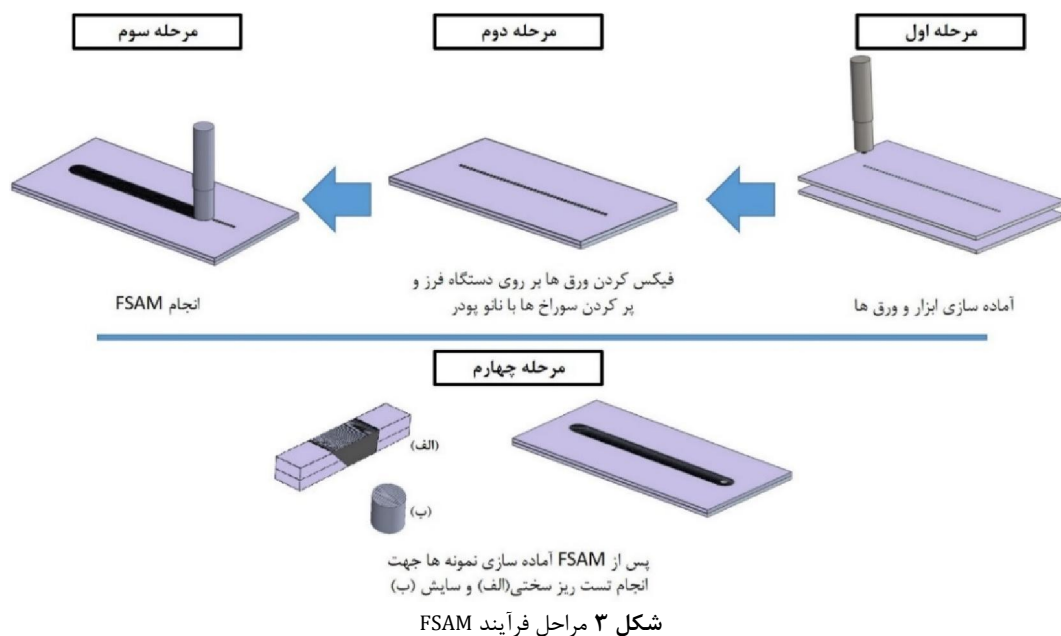
طراحی ابزار در FSW و زیر مجموعه‌هایش از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، فرآیند FSAM با یک ابزار از جنس فولاد H13 عملیات حرارتی شده، با یک شانه مقعر و یک پین مخروطی رزوه‌دار انجام شد. شکل هندسی ابزار و ابعاد آن با توجه به

<sup>1</sup> Response Surface Methodology

مقالات علمی پیشین تعیین گردید. متداول‌ترین طراحی شانه ابزار، شانه مقعر است که اتصالاتی با کیفیت تولید می‌کند [۲۵] و در مقایسه با پین استوانه‌ای، پین مخروطی جریان عمودی بهتری را برای جوش‌های حالت پوششی<sup>۱</sup> FSW فراهم می‌کند [۲۶] و نتایج یک کار تحقیقاتی دیگر در رابطه با مقایسه چند مدل پین نشان داد که پین مخروطی رزوه‌دار از عملکرد مناسبی برای جوش‌های حالت پوششی FSW برخوردار است [۲۷]. ابعاد هندسی با توجه ضخامت ورق‌ها و مقالات پیشین تعیین گردید [۲۸-۳۰]. قطر شانه ابزار ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع پین ۴ میلی‌متر بود که از ضخامت ورق بالایی بیشتر است. قطر بزرگ پین ۶ میلی‌متر و قطر کوچک آن ۴ میلی‌متر است. زاویه کجی ابزار برابر با ۲ درجه در نظر گرفته شد. تصویر سه‌بعدی ابزار مورد استفاده و ابعاد آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. در این پروژه تعداد لایه‌ها برابر ۲ در نظر گرفته شد و برای دستیابی به نسبت حجمی ۵ درصد برای ذرات تقویت‌کننده‌ی کامپوزیت، سوراخ‌هایی متوالی در امتداد محور طولی مرکزی ورق‌های لایه بالایی با استفاده از دستگاه فرز ایجاد شد. قطر هر سوراخ ۲ میلی‌متر و فاصله بین آن‌ها ۵/۳ میلی‌متر بود. پس از تثبیت ورق‌ها بر روی دستگاه فرز، سوراخ‌ها با نانوذرات SiC پر شدند. سپس فرآیند FSAM با توجه به متغیرهای ارائه شده در جدول طراحی RSM (جدول ۴) انجام شد. در شکل ۳، شماتیکی از مراحل فرآیند به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲ مدل سه بعدی ابزار FSAM و ابعاد آن  
ابعاد به میلی‌متر



شکل ۳ مراحل فرآیند FSAM

<sup>۱</sup> Lap Weld

## ۲-۲- طراحی آزمایش

برای بررسی اثر متغیرهای فرآیند و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها، نیاز به طراحی آزمایش و بررسی آماری نتایج بدست آمده می‌باشد. پژوهش حاضر با استفاده از روش RSM و با استفاده از نرم افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> نسخه ۲۱ اجرا شد. طراحی باکس-بنکن<sup>۲</sup> (BBD) از بین طرح‌های مختلف RSM انتخاب شد و سه نقطه مرکزی در نظر گرفته شد. روش طراحی باکس-بنکن یک روش طراحی آزمایش‌های آماری می‌باشد که به منظور بهینه‌سازی فرآیندها و متغیرهای مختلف در مطالعات علمی و صنعتی استفاده می‌شود. در این روش، متغیرهای مستقل با سه سطح (-۱، ۰، +۱) تعریف می‌شوند، و طراحی آزمایش به گونه‌ای اجرا می‌شود که تأثیر هر متغیر بر سطح پاسخ را با دقت بالا بررسی کند. با استفاده از طراحی باکس-بنکن، تعداد آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و همچنین اطلاعات کافی برای تحلیل و تفسیر تأثیر متغیرها فراهم می‌شود. آنالیز واریانس برای ارزیابی تأثیر متغیرها بر سطح پاسخ به کار می‌رود. در اینجا، سه سطح مختلف متغیرها با استفاده از طراحی باکس-بنکن با یکدیگر مقایسه شده و نتایج آنالیز واریانس برای بررسی این تفاوت‌ها به کار می‌روند. این روش امکان تعیین تأثیر هر متغیر به صورت مستقل و تعاملات بین متغیرها را فراهم می‌کند، که اطلاعات ارزشمندی برای بهینه‌سازی فرآیندها و افزایش کارایی فراهم می‌کند. سه متغیر، سه سطح و دو پاسخ در نظر گرفته شد. متغیرهای ورودی بررسی شده شامل سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها بود و کاهش وزن ناشی از سایش و ریز سختی به عنوان متغیرهای پاسخ محاسبه شد. دامنه متغیرهای مورد نظر بر اساس تحقیقات قبلی و آزمایش‌های اولیه تعیین شد [۳۱، ۳۲].

جدول ۳ محدوده متغیرهای ورودی و سطوح مربوط به آن‌ها

سطوح			متغیرهای فرآیند
1	0	-1	
1200	1000	800	سرعت چرخشی ابزار (rpm)
70	50	30	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)

جدول ۴ ماتریس طراحی آزمایش باکس-بنکن و مقادیر مشاهده شده از پاسخ‌ها

متغیر ورودی ۱	متغیر ورودی ۲	متغیر ورودی ۳	متغیر پاسخ ۱	متغیر پاسخ ۲	شماره آزمایش
سرعت چرخشی ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)	تعداد پاس	مقدار ریزسختی (VHN)	کاهش وزن ناشی از سایش (gr)	
1000	70	1	105.72	0.0237	1
1200	30	2	91.73	0.0361	2
1200	70	2	95.25	0.0358	3
800	30	2	96.96	0.0356	4
1000	50	2	98.30	0.0276	5
1200	50	3	97.19	0.0416	6
800	50	3	100.61	0.0313	7
1000	50	2	98.92	0.0226	8
1000	70	3	97.13	0.0294	9
800	70	2	100.93	0.0403	10
1200	50	1	101.42	0.0168	11
800	50	1	108.70	0.0228	12
1000	30	1	98.62	0.0127	13
1000	30	3	97.37	0.0322	14
1000	50	2	98.43	0.0248	15

1 Minitab

2 Box-Behnken

متغیرها و سطوح مربوط به آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است، و در جدول ۴ مقادیر ورودی متغیرها و پاسخ را برای هر آزمایش نشان می‌دهد. تکنیک آماری مورد استفاده در این مطالعه، آنالیز واریانس و رگرسیون برای بررسی تاثیر متغیرها استفاده شد و معادلات ریاضی برای هر متغیر پاسخ با استفاده از یک معادله چند جمله‌ای درجه دو برای مطابقت با داده‌های تجربی استخراج شد.

### ۲-۳- آزمایش‌های مشخصه یابی

جهت بررسی خواص مکانیکی پس از پایان FSAM، آزمون‌های ریز سختی ویکرز و سایش پین بر روی دیسک روی نمونه‌ها انجام شد. ریز سختی ویکرز از طریق دستگاه بوهرلر میکرومت<sup>۱</sup> بر اساس استاندارد ASTM-E384 با بار ۲۰۰ گرم و زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه انجام شد. سختی چهار نقطه، در ناحیه اغتشاش فرآیند FSAM برای هر نمونه محاسبه شد و میانگین آن در جدول ۴ ارائه شده است. تست سایش پین بر روی دیسک توسط دستگاه تست سایش پویش صنعت انجام شد. پین‌هایی با قطر ۵ میلی‌متر مطابق شکل ۳ برای تست سایش آماده شدند. جنس دیسک ساینده از فولاد گرمکار EN31 با درجه سختی ۵۴ راکول بود. آزمایش در دمای اتاق تحت شرایط لغزش خشک انجام شد. سرعت لغزش ۳/۷۷ متر بر ثانیه تعیین شد و مسافت طی شده برای هر نمونه ۳۰۰۰ متر بود. تفاوت وزن در ابتدا و انتهای آزمون در جدول ۴ ثبت شده است.

پس از بررسی‌های آماری و انجام بهینه‌سازی چند هدفه برای تعیین مقدار متغیرها به منظور به دستیابی به حداکثر سختی و حداقل سایش به ساخت قطعه با متغیرهای بهینه پرداخته شد. پس از بررسی صحت نتایج بدست آمده به بررسی ریز ساختار پرداخته شد و به همین منظور از فلز پایه و کامپوزیت بهینه نمونه تهیه شد. پس از آن، نمونه‌ها با سنباده‌های شماره ۸۰۰ تا ۵۰۰۰ صیقل داده شدند و پس از پولیش نهایی توسط نم‌پولیش و خمیرالماسه، با محلول کلر<sup>۲</sup> اصلاح شده (۱۰ میلی لیتر اسید هیدروفلوئوریک، ۱۵ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک و ۵۰ میلی لیتر آب) اچ شدند.

### ۳- نتایج و بحث

این بخش به تجزیه و تحلیل آماری، فرمول‌بندی پاسخ بر اساس متغیرهای ورودی و تأثیر متغیرهای ورودی بر پاسخ‌ها می‌پردازد. پاسخ‌های خروجی شامل ریزسختی و کاهش وزن ناشی از سایش برای همه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. متغیرهای ورودی و پاسخ‌های خروجی مرتبط با هر آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است.

#### ۳-۱- آنالیز واریانس و تأثیر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ ریزسختی

در جدول ۵، نتایج آزمون آنالیز واریانس مربوط به پاسخ ریز سختی برای مدل اولیه و مدل اصلاح شده آورده شده است. آنالیز واریانس به عنوان یک روش تجزیه و تحلیل داده مورد استفاده قرار گرفته است که جهت ارزیابی اهمیت عوامل مدل (شامل اثرات خطی، درجه دوم و تعاملی متغیرهای ورودی) در ارزیابی مقدار ریز سختی و مقدار سایش نانو کامپوزیت‌های تولید شده، از مقادیر P (مقدار احتمال) و F (آزمون فیشر) استفاده می‌کند. در صورتی که مقدار F بزرگتر باشد، نشانگر این است که عبارت‌ها در مدل تأثیر و اهمیت بیشتری دارند و مقادیر P که کمتر از ۰/۰۵ هستند، به عنوان معیاری برای در نظر گرفتن اهمیت‌دار بودن آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش مدل درجه دوم کامل و مدل اصلاح شده (درجه دوم کاهش یافته) ارائه شده است. در مدل درجه دوم کامل تمامی عوامل وارد آنالیز واریانس می‌شود ولی در مدل اصلاح شده با استفاده از نتایج بدست آمده از مدل درجه دوم کامل و حذف اثر عواملی با ضریب P بزرگتر از ۰/۰۵، آنالیز واریانس مجدد انجام می‌شود. مقادیر P و F مدل اصلاح شده در جدول ۵ آورده شده است و کلیه محاسبات و تحلیل‌های بعدی بر اساس مدل اصلاح شده ارائه شده است. مقادیر ضریب تعیین<sup>۳</sup> و ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۴</sup> مدل اصلاح شده، به ترتیب برابر مقدار ۹۹/۵۳ درصد و ۹۹/۰۶ می‌باشد که نشان می‌دهد، روابط به‌دست آمده دارای یک تطابق قابل توجه با نقاط آزمایش می‌باشند و مدل از کفایت خوبی برخوردار است. در مدل اصلاح شده عوامل توان دوم سرعت چرخشی ابزار و حاصلضرب سرعت چرخشی ابزار در سرعت پیشروی ابزار با توجه به مقدار P (بزرگتر از ۰/۰۵) بدست آمده از مدل درجه دوم کامل از تحلیل رگرسیون مدل اصلاح شده، حذف شدند و بقیه عوامل بر میزان ریز سختی تأثیرگذار می‌باشند. مدل رگرسیون مقدار ریز سختی به صورت تابعی از عوامل دارای اهمیت، در رابطه ۱ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Buehler Micromet

<sup>2</sup> Keller

<sup>3</sup> R<sup>2</sup>

<sup>4</sup> Adjusted R<sup>2</sup>

جدول ۵ آنالیز واریانس مدل درجه‌ی دوم کامل و مدل اصلاح شده برای پاسخ ریزسختی

مدل اصلاح شده		مدل درجه دوم کامل				درجه آزادی	عامل
مقدار P اصلاح شده	مقدار F اصلاح شده	مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات		
0.000	211.96	0.000	123.94	25.7233	231.510	9	مدل
0.000	310.90	0.000	233.68	48.4992	145.498	3	اثرات خطی
0.000	374.21	0.000	281.26	58.3740	58.374	1	سرعت چرخشی ابزار (A)
0.000	165.01	0.000	124.02	25.7403	25.740	1	سرعت پیشروی ابزار (B)
0.000	393.50	0.000	295.76	61.3832	61.383	1	تعداد پاس (C)
0.000	220.41	0.000	110.45	22.9227	68.768	3	اثرات درجه دو
-----	-----	0.900	0.02	0.0036	0.004	1	A <sup>2</sup>
0.000	125.83	0.000	94.21	19.5535	19.554	1	B <sup>2</sup>
0.000	285.65	0.000	213.13	44.2348	44.235	1	C <sup>2</sup>
0.000	55.11	0.002	27.70	5.7481	17.244	3	اثرات تعاملی
-----	-----	0.642	0.24	0.0506	0.051	1	AB
0.002	23.88	0.008	17.95	3.7249	3.725	1	AC
0.000	86.34	0.000	64.90	13.4689	13.469	1	BC
				0.2075	1.038	5	خطا
0.420	1.64	0.293	2.57	0.2746	0.824	3	عدم تناسب
				0.1069	0.214	2	خطای خالص
					232.548	14	مجموع

رابطه رگرسیون برای پاسخ ریزسختی بر حسب مقادیر واقعی متغیرهای ورودی برای مدل اصلاح شده:

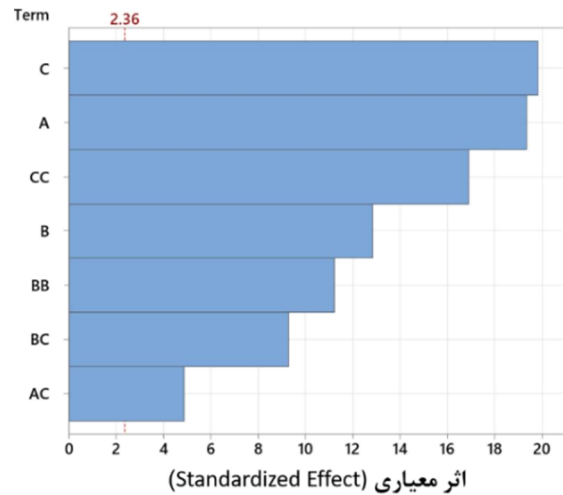
$$\text{Microhardness} = 113.05 - 0.02316A + 0.8479B - 16.86C - 0.005747B^2 + 3.464C^2 + 0.004825AC - 0.09175BC \quad (1)$$

در شکل ۴ نمودار پارتو<sup>۱</sup> که در آن میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر ریز سختی، به ترتیب میزان تأثیر از زیاد به کم نشان داده شده است، مشاهده می‌گردد.

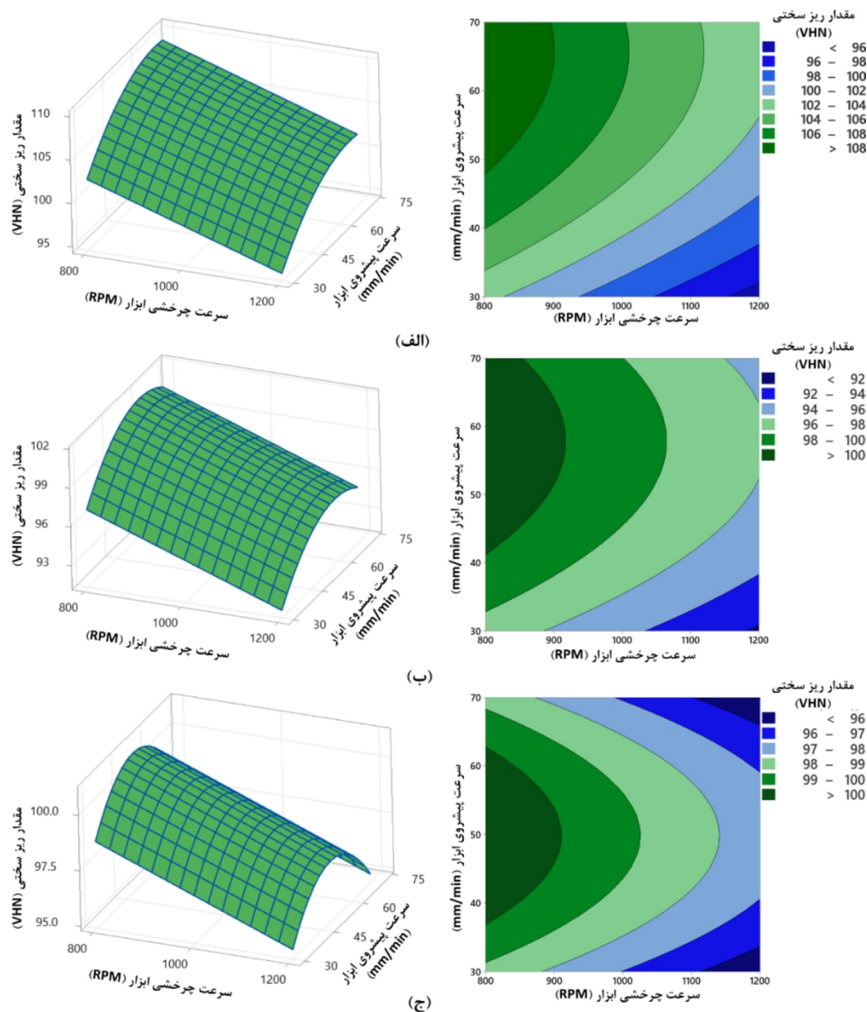
شکل ۵ نمودارهای دو بعدی و سه بعدی تأثیر اثرات تعاملی متغیرهای ورودی بر پاسخ ریز سختی نمایش داده شده است و محدوده متغیرهای بهینه در شکل‌ها مشخص است. قبل از بررسی نمودارها لازم است چند نکته در ادامه ذکر شود. در تولید نانو کامپوزیت آلومینیوم زمانیکه فلز پایه از گروه‌هایی که قابلیت عملیات حرارتی ندارند باشد، معمولاً با انجام FSW و سایر زیر مجموعه‌هایش از جمله FSAM، با افزودن نانو پودر خواص مکانیکی بهبود پیدا می‌کند [۳۳، ۳۴]. اما زمانیکه تولید نانو کامپوزیت با آلومینیومی که روی آن عملیات حرارتی صورت گرفته باشد، مسأله متفاوت است و علاوه بر مسأله بهبود خواص با بهبود ریز ساختار (ریزدانه شدن) و اثر افزودن نانو پودر، به مسأله میزان رسوبات باقیمانده از ناشی عملیات حرارتی بر روی فلز پایه نیز بایستی توجه نمود. این رسوبات برای آلیاژ ۶۰۶۱، زمانیکه دما به بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد شروع به انحلال می‌کند و انحلال رسوبات باقی‌مانده از عملیات حرارتی می‌تواند تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی مواد داشته باشد [۳۵]. با استفاده از دماسنج نوع K که بر روی سطح لایه‌ی بالایی در نزدیکی محل عبور ابزار متصل شده بود، دمای ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید و به تبع آن قطعاً در ناحیه اغتشاش دمای بالاتری

<sup>1</sup> Pareto

رخ می دهد و پتانسیل انحلال رسوبات و کاهش خواص مکانیکی فلز پایه وجود دارد. هرچه دما و مدت زمان در معرض حرارت بالا بودن نمونه بیشتر باشد، افت بیشتر خواص مکانیکی انتظار می رود. با توجه به مطالب بیان شده می توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب نیازمند ایجاد تعادل و ترکیب مناسبی از سه مکانیزم تقویت اشاره شده، می باشد. در نتیجه انتخاب متغیرهای مؤثر در طول تولید نانو کامپوزیت FSAM، به ویژه هنگامی که فلز پایه عملیات حرارتی شده باشد، بسیار مهم است.



شکل ۴ نمودار پارتو برای پاسخ ریزسختی



شکل ۵ نمودار دوبعدی و سه بعدی اثرات تعاملی متغیرهای ورودی برای حالت الف) تک پاس، ب) دو پاس و ج) سه پاس بر روی پاسخ ریزسختی



نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش سرعت چرخشی ابزار مقدار ریز سختی رو به کاهش است و در نتیجه برای دستیابی به حداکثر مقدار ریز سختی، محدوده ایده‌آل سرعت چرخشی ابزار در محدوده‌ی ابتدایی آن می‌باشد. با افزایش سرعت پیشروی ابزار ابتدا با افزایش مقدار ریز سختی مواجه هستیم و سپس دوباره کاهش می‌یابد. در نتیجه محدوده ایده‌آل برای سرعت پیشروی ابزار در محدوده میانی می‌باشد و با افزایش تعداد پاس به طور کلی مقدار ریز سختی کاهش یافته است. نتایج بررسی‌ها با پژوهش‌های پیشین همراستا می‌باشد [۲۲، ۳۶، ۳۷].

### ۳-۲- آنالیز واریانس و تأثیر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ میزان سایش

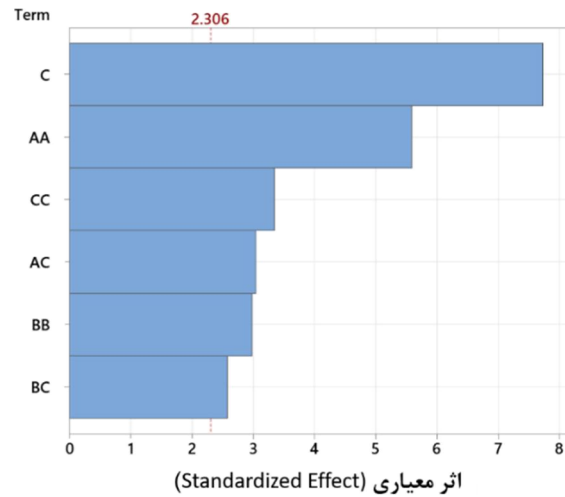
در جدول ۶، نتایج آزمون آنالیز واریانس مربوط به پاسخ میزان سایش برای مدل درجه دوم کامل و مدل اصلاح شده آورده شده است. ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده مدل اصلاح شده، به ترتیب برابر مقدار ۹۴/۱۸ درصد و ۸۹/۸۱ می‌باشد که نشان می‌دهد که روابط به‌دست آمده دارای یک تطابق مناسبی با نقاط آزمایش می‌باشند. در مدل اصلاح شده تأثیر سرعت چرخشی و پیشروی ابزار و همچنین حاصلضرب این دو عامل از آنالیز حذف شده‌اند و الباقی عوامل موجود در جدول ۶ بر میزان سایش تأثیرگذار هستند. از تحلیل رگرسیون برای تعیین فرمول آماری حاصل از آنالیز نتایج برای پیش‌بینی میزان سایش که در فرمول ۲ مشاهده می‌گردد، استفاده شد. در شکل ۶ میزان تأثیر عوامل ورودی دارای اهمیت به ترتیب میزان تأثیر بر پاسخ میزان سایش، نشان داده شده است.

جدول ۶ آنالیز واریانس مدل درجه‌ی دوم کامل و مدل اصلاح شده برای پاسخ میزان سایش

عامل	درجه آزادی	مدل درجه دوم کامل		مدل اصلاح شده	
		مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	9	0.000953	0.000106	16.97	0.003
اثرات خطی	3	0.000448	0.000149	23.93	0.002
سرعت چرخشی ابزار (A)	1	0.000000	0.000000	0.00	0.968
سرعت پیشروی ابزار (B)	1	0.000020	0.000020	3.18	0.135
تعداد پاس (C)	1	0.000428	0.000428	68.60	0.000
اثرات درجه دو	3	0.000385	0.000128	20.56	0.003
A <sup>2</sup>	1	0.000224	0.000224	35.91	0.002
B <sup>2</sup>	1	0.000064	0.000064	10.26	0.024
C <sup>2</sup>	1	0.000080	0.000080	12.87	0.016
اثرات تعاملی	3	0.000120	0.000040	6.43	0.036
AB	1	0.000006	0.000006	1.00	0.363
AC	1	0.000066	0.000066	10.65	0.022
BC	1	0.000048	0.000048	7.64	0.040
خطا	5	0.000031	0.000006		
عدم تناسب	3	0.000019	0.000006	0.99	0.539
خطای خالص	2	0.000013	0.000006		
مجموع	14	0.000984			

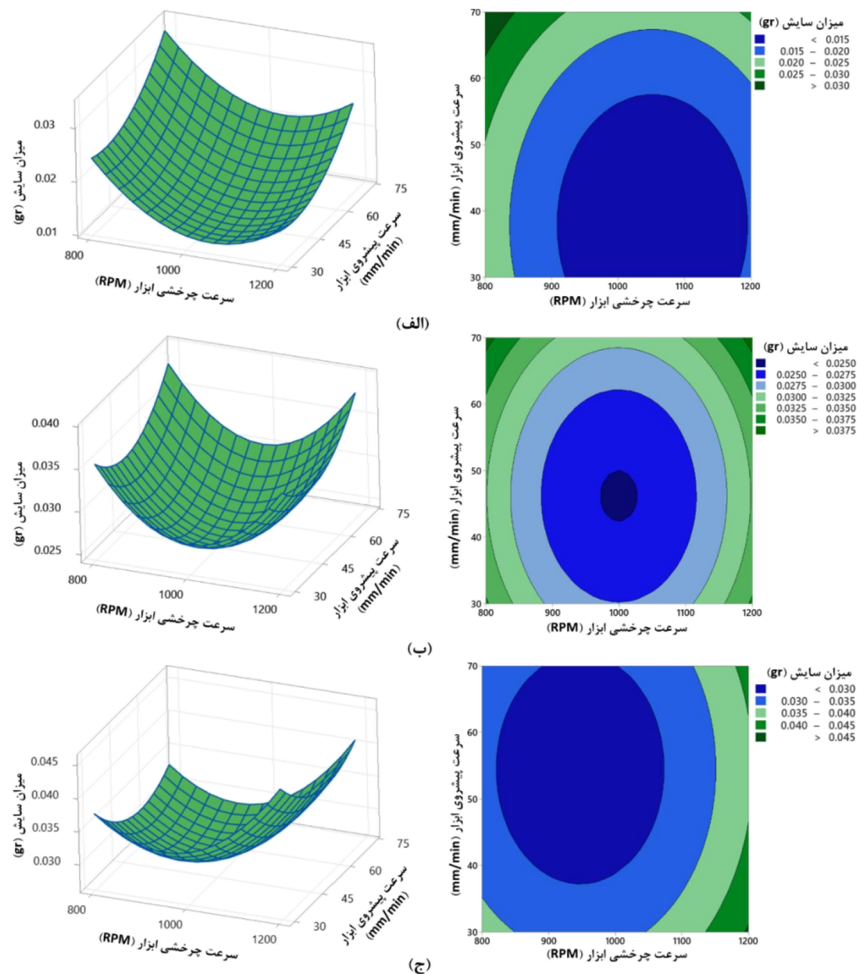
رابطه رگرسیون برای پاسخ میزان سایش بر حسب مقادیر واقعی متغیرهای ورودی برای مدل اصلاح شده:

$$Wear Loss = 0.2318 + 0.01421C + 0.000000A^2 + 0.000010B^2 - 0.00466C^2 + 0.000020AC - 0.000172BC \quad (۲)$$



شکل ۶ نمودار پارتو برای پاسخ میزان سایش

در شکل ۷ نمودارهای دو بعدی و سه بعدی و سه بعدی تأثیر اثرات تعاملی متغیرهای ورودی بر پاسخ میزان سایش نمایش داده شده است. نمودارها نشان می‌دهد، با افزایش سرعت چرخشی ابزار ابتدا میزان سایش رو به کاهش است و سپس با افزایش بیشتر دوباره میزان سایش افزایش می‌یابد. در نتیجه برای دستیابی به حداقل میزان سایش، محدوده ایده آل سرعت چرخشی ابزار در محدوده میانی می‌باشد. با توجه به نمودارها در شکل ۷ محدوده ایده آل سرعت پیشروی ابزار نیز در محدوده میانی می‌باشد و با افزایش تعداد پاس به طور کلی میزان سایش افزایش داشته است. نتایج بررسی‌ها با پژوهش‌های پیشین در تطابق می‌باشد [۳۷-۳۹].



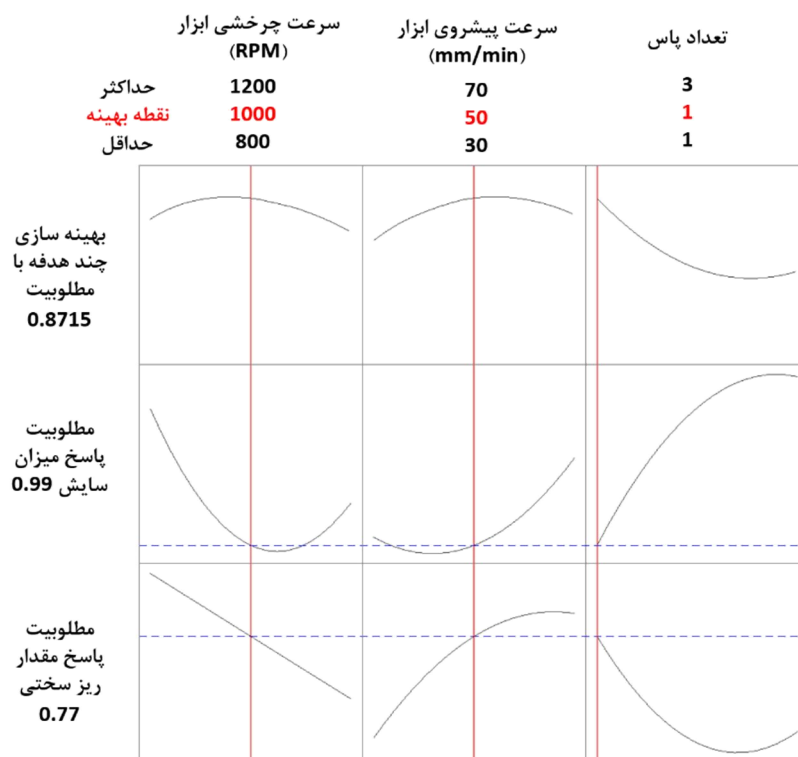
شکل ۷ نمودار دو بعدی و سه بعدی اثرات تعاملی متغیرهای ورودی برای حالت الف) تک پاس، ب) دو پاس و ج) سه پاس بر روی پاسخ میزان سایش

## ۳-۳- بهینه‌سازی و تأیید تجربی

به منظور بهینه‌سازی و یافتن بهترین مقادیر متغیرها، از روش RSM استفاده گردید و دو هدف حداکثر بودن مقدار ریز سختی و حداقل بودن میزان سایش در نظر گرفته شد. در تنظیمات بهینه‌سازی، محدوده متغیرها هم مانند مرحله طراحی آزمایش (جدول ۳) در نظر گرفته شد. در جدول ۷ مقادیر متغیرهای نقطه بهینه‌ی پیش بینی شده با مطلوبیت ۰/۸۷ مشاهده می‌گردد. شکل ۸ نمودارهای بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقادیر بهینه متغیرهای ورودی به همراه پاسخ‌های پیش‌بینی شده

میزان مطلوبیت	سرعت چرخشی ابزار (RPM)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)	تعداد پاس	مقدار ریزسختی پیش‌بینی شده (VHN)	مقدار سایش پیش‌بینی شده (gr)
0.871463	1000	50	1	104.764	0.013025



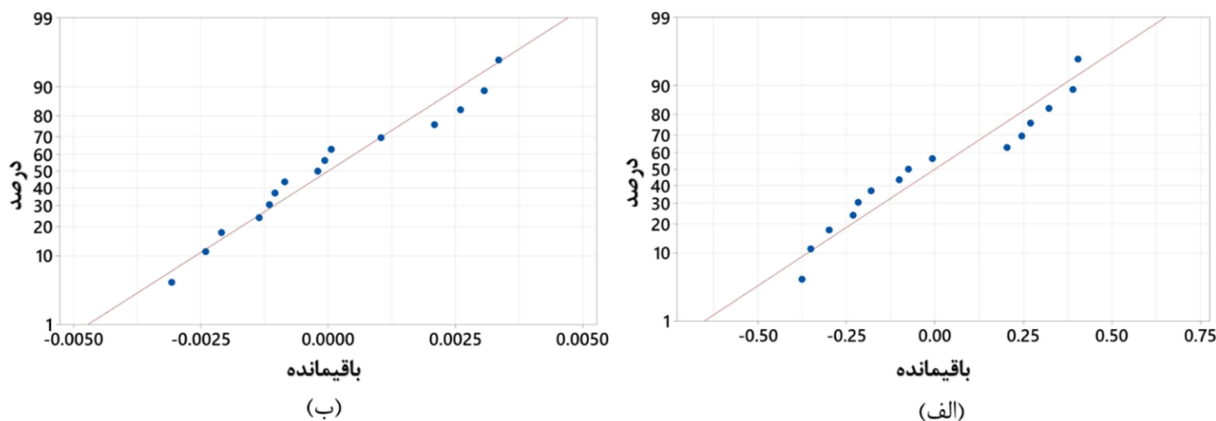
شکل ۸ نمودارهای بهینه‌سازی پاسخ‌ها

تأیید در روش علمی ضروری است، زیرا به ایجاد اعتبار و تعمیم‌پذیری یافته‌ها کمک می‌کند. معمولاً ابتدا بهینه‌سازی انجام می‌شود و سپس برای تأیید داده‌های آماری به دست آمده، یک آزمون تجربی با استفاده از مقادیر بهینه متغیر انجام می‌شود و نتایج بدست آمده با نتایج پیش‌بینی شده حاصل از داده‌های آماری مقایسه می‌شوند. مقادیر آزمایشی واقعی، مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از فرمول تجربی و درصد خطا در جدول ۸ ارائه شده است. علاوه بر نتایج ارائه شده در جدول ۸، نمودار احتمال نرمال<sup>۱</sup> باقیمانده‌ها (اختلاف بین پاسخ اندازه‌گیری شده در آزمون تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون)، به عنوان یک ابزار گرافیکی ارزشمند برای اعتبار سنجی و ارزیابی دقت مدل ارائه شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۹ نمودار احتمال نرمال برای پاسخ‌های ریزسختی و میزان سایش را نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها حول یک خط راست توزیع شده‌اند و اعتبار نتایج را تأیید می‌کنند. نتایج حاصل از جدول ۸ و شکل ۹ به طور متقابل یکدیگر را تأیید می‌کنند.

<sup>۱</sup> Normal Probability Plot

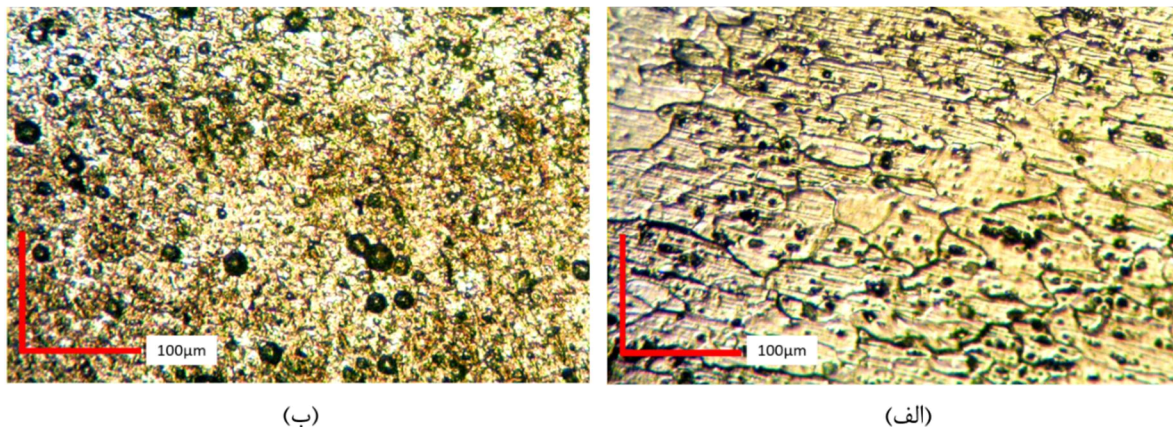
جدول ۸ مقایسه نتایج بدست آمده از فرمول تجربی و ساخت نمونه با مقادیر بهینه

پاسخ	مقدار پیش بینی شده از طریق فرمول تجربی	مقدار واقعی بدست آمده از طریق ساخت نمونه بهینه	درصد خطا
مقدار سختی (VHN)	104.76	103.15	1.53
مقدار سایش (gr)	0.0130	0.0149	14



شکل ۹ نمودار احتمال نرمال مقدار الف) ریزسختی و ب) سایش

ریز ساختار نمونه بهینه و فلز پایه با تهیه نمونه‌های مقطعی با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر متالوگرافی فلز پایه و منطقه اغتشاش نمونه بهینه در شکل ۱۰ ارائه شده است. تصاویر ارائه شده به وضوح نشان می‌دهند که نانوذرات به طور بهینه در منطقه اغتشاش توزیع شده‌اند. همچنین در مقایسه با فلز پایه، به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد در طول فرآیند FSAM، ساختار دانه ریزتری در منطقه اغتشاش مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰ تصاویر متالوگرافی الف) فلز پایه و ب) نانو کامپوزیت بهینه

#### ۴- نتیجه گیری

با روش FSAM به تولید موفق نانو کامپوزیت AL6061-SiC پرداخته شد. هدف اصلی این تحقیق بررسی آماری تأثیر متغیرهای ورودی FSAM بر ریز سختی و میزان سایش و همچنین ایجاد یک رابطه ریاضی جهت پیش بینی آن‌ها توسط روش RSM بود. هدف ثانویه تعیین متغیرهای بهینه برای حداکثر شدن ریز سختی و به حداقل رساندن مقدار سایش بود. نتایج به شرح زیر است:

- در نتایج آنالیز واریانس پاسخ ریزسختی و میزان سایش به ترتیب به ضریب تعیین ۹۹/۵۳ و ۹۴/۱۸ و همچنین ضریب تعیین تعدیل یافته ۹۹/۰۶ و ۸۹/۸۱ دست یافته شد که نشان دهنده‌ی کفایت و تطابق مناسب مدل‌های بدست آمده با نقاط آزمایش می‌باشد.
- در آنالیزهای انجام شده میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر پاسخ‌ها بررسی شد و تعداد پاس بیشترین اثر را بر پاسخ‌ها داشت.
- در تست‌های انجام شده، بالاترین میزان ریز سختی (۱۰۸.۷ ویکرز) برای حالت سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس ۱ و کمترین میزان سایش (۰/۱۲۷ گرم) برای حالت سرعت چرخشی ابزار ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس یک بدست آمد.
- در بهینه‌سازی چند هدفه، برای به دست آوردن حداکثر مقدار سختی و حداقل مقدار سایش، سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها به ترتیب ۱۰۰۰ دور در دقیقه، ۵۰ میلی‌متر در دقیقه و ۱ پاس بدست آمد و میزان مطلوبیت بهینه سازی برابر ۰/۸۷ بود.
- در نقطه بهینه مقادیر پیش بینی شده به دست آمده توسط فرمول‌های ارائه شده، برای مقدار ریزسختی و میزان سایش به ترتیب برابر با ۱۰۴ ویکرز و ۰/۱۳ گرم بود، که با مقادیر بدست آمده از تست‌های واقعی مطابقت بالایی داشت.
- اجرای FSAM با متغیرهای بهینه به دست آمده، منجر به تشکیل دانه‌بندی ریز در منطقه همزن و توزیع مطلوب نانوذرات شد.

## References

- [1] Mishra AK, Srivastava RK. Wear behaviour of Al-6061/SiC metal matrix composites. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2017 Apr;98:97-103. doi: 10.1007/s40032-016-0284-3
- [2] Givi M, Ghasemi AH, Abbasi M. The effect of friction stir vibration processing on microstructure and mechanical properties of Al5052/SiC surface nano composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Apr 21;6(1):1-1. [In Persian]
- [3] Singh T, Tiwari SK, Shukla DK. Production of AA6061-T6/Al2O3 reinforced nanocomposite using friction stir welding. *Engineering Research Express*. 2019 Dec 13;1(2):025052. doi: 10.1088/2631-8695/ab5e27
- [4] Rao RN, Das S. Effect of applied pressure on the tribological behaviour of SiCp reinforced AA2024 alloy. *Tribology international*. 2011 Apr 1;44(4):454-62. doi: 10.1016/j.triboint.2010.11.018
- [5] Davis JR. Aluminum and aluminum alloys. ASM international; 1993.
- [6] Yoo SC, Kang B, Van Trinh P, Phuong DD, Hong SH. Enhanced mechanical and wear properties of Al6061 alloy nanocomposite reinforced by CNT-template-grown core-shell CNT/SiC nanotubes. *Scientific Reports*. 2020 Jul 30;10(1):12896. doi: 10.1038/s41598-020-69341-z
- [7] Premnath A. Optimization of the process parameters on the mechanical and wear properties of Al-SiC nanocomposites fabricated by friction stir processing using desirability approach. *Silicon*. 2020 Mar;12(3):665-75. doi: 10.1007/s12633-019-00178-6
- [8] Srivastava M, Rathee S, Maheshwari S, Noor Siddiquee A, Kundra TK. A review on recent progress in solid state friction-based metal additive manufacturing: friction stir additive techniques. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2019 Sep 3;44(5):345-77. doi: 10.1080/10408436.2018.1490250
- [9] Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*. 2014 Jun;23:1917-28. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z
- [10] Ahn DG. Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2016 Oct;3:381-95. doi: 10.1007/s40684-016-0048-9
- [11] Carlton HD, Haboub A, Gallegos GF, Parkinson DY, MacDowell AA. Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Jan 10;651:406-14. doi: 10.1016/j.msea.2015.10.073
- [12] Shi Y, Gong S, Xu H, Yang G, Qiao J, Wang Z, Zhang J, Qi B. Electron beam metal additive manufacturing: Defects formation and in-process control. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Sep 8;101:386-431. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.06.013
- [13] DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, Beese AM, Wilson-Heid AD, De A, Zhang W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018 Mar 1;92:112-224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.00
- [14] Akinlabi ET, Mahamood RM. Solid-state welding: friction and friction stir welding processes. New York, NY, USA: Springer International Publishing; 2020 Jan 6. doi: 10.1007/978-3-030-37015-2



- [15] Palanivel S, Nelaturu P, Glass B, Mishra RS. Friction stirs additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. *Materials & Design* (1980-2015). 2015 Jan 1;65:934-52. doi: [10.1016/j.matdes.2014.09.082](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.082)
- [16] Zhang Z, Tan ZJ, Li JY, Zu YF, Sha JJ. Integrated modeling of process–microstructure–property relations in friction stir additive manufacturing. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2020 Jan;33:75-87. doi: [10.1007/s40195-019-00945-9](https://doi.org/10.1007/s40195-019-00945-9)
- [17] He C, Li Y, Zhang Z, Wei J, Zhao X. Investigation on microstructural evolution and property variation along building direction in friction stir additive manufactured Al–Zn–Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Mar 10;777:139035. doi: [10.1016/j.msea.2020.139035](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139035)
- [18] Li Y, He C, Wei J, Zhang Z, Qin G, Zhao X. Correlation of local microstructures and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloy build fabricated via underwater friction stir additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Feb 23;805:140590. doi: [10.1016/j.msea.2020.140590](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140590)
- [19] Ardalanniya A, Nourouzi S, Jamshidi Aval H. Effects of multipass additive friction stir processing on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Cu/Al-Zn laminated composites. *JOM*. 2021 Oct;73(10):2844-58. doi: [10.1007/s11837-021-04760-5](https://doi.org/10.1007/s11837-021-04760-5)
- [20] Jiang T, Jiao T, Dai G, Shen Z, Guo Y, Sun Z, Li W. Microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy via friction stir additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 Feb 15;935:168019. doi: [10.1016/j.jallcom.2022.168019](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168019)
- [21] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John Wiley & sons; 2017.
- [22] Molla Ramezani N, Davoodi B, Farahani M, Khanli AH. Surface integrity of metal matrix nanocomposite produced by friction stir processing (FSP). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019 Nov;41:1-1. doi: [10.1007/s40430-019-2014-2](https://doi.org/10.1007/s40430-019-2014-2)
- [23] Patil NA, Pedapati SR, Mamat OB, Hidayat Syah Lubis AM. Optimization of friction stir process parameters for enhancement in surface properties of Al 7075-SiC/Gr hybrid surface composites. *Coatings*. 2019 Dec 6;9(12):830. doi: [10.3390/coatings9120830](https://doi.org/10.3390/coatings9120830)
- [24] Zamani SM, Behdinin K, Razfar MR, Fatmehsari DH, Mohandesi JA. Studying the effects of process parameters on the mechanical properties in friction stir welding of Al-SiC composite sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 Apr;113:3629-41. doi: [10.1007/s00170-021-06852-7](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06852-7)
- [25] Hasan MM, Ishak M, Rejab MR. Influence of machine variables and tool profile on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA6061 friction stir welds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 Jun;90:2605-15. doi: [10.1007/s00170-016-9583-3](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9583-3)
- [26] Buffa G, Campanile G, Fratini L, Prisco A. Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2009 Aug 30;519(1-2):19-26. doi: [10.1016/j.msea.2009.04.046](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.046)
- [27] Babu S, Ram GJ, Venkitakrishnan PV, Reddy GM, Rao KP. Microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum alloy AA2014. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012 May 1;28(5):414-26. doi: [10.1016/S1005-0302\(12\)60077-2](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60077-2)
- [28] Hoyos E, Serna MC. Basic tool design guidelines for friction stir welding of aluminum alloys. *Metals*. 2021 Dec 16;11(12):2042. doi: [10.3390/met11122042](https://doi.org/10.3390/met11122042)
- [29] Sun Z, Wu CS. Influence of tool thread pitch on material flow and thermal process in friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020 Jan 1;275:116281. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2019.116281](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116281)
- [30] Rai R, De A, Bhadeshia HK, DebRoy T. Friction stir welding tools. *Science and Technology of welding and joining*. 2011 May 1;16(4):325-42. doi: [10.1179/1362171811Y.0000000023](https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023)
- [31] Aruri D, Adepu K, Adepu K, Bazavada K. Wear and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy surface hybrid composites [(SiC+ Gr) and (SiC+ Al2O3)] fabricated by friction stir processing. *Journal of materials research and technology*. 2013 Oct 1;2(4):362-9. doi: [10.1016/j.jmrt.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.10.004)
- [32] Singh R, Kumar S, Singh PK. Effect of welding speed and tool pin geometry on impact strength in friction stir welding of aluminium 6101 T6 Alloy. In *MATEC Web of Conferences 2016* (Vol. 57, p. 03005). EDP Sciences. doi: [10.1051/mateconf/20165703005](https://doi.org/10.1051/mateconf/20165703005)
- [33] Kurt A, Uygur I, Cete E. Surface modification of aluminium by friction stir processing. *Journal of materials processing technology*. 2011 Mar 1;211(3):313-7. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2010.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.020)
- [34] Rathee S, Maheshwari S, Siddiquee AN, Srivastava M. Investigating the effects of SiC particle sizes on microstructural and mechanical properties of AA5059/SiC surface composites during multi-pass FSP. *Silicon*. 2019 Apr 15;11(2):797-805. doi: [10.1007/s12633-018-9958-1](https://doi.org/10.1007/s12633-018-9958-1)
- [35] Abioye TE, Zuhailawati H, Anasyida AS, Yahaya SA, Dhindaw BK. Investigation of the microstructure, mechanical and wear properties of AA6061-T6 friction stir weldments with different particulate

- reinforcements addition. Journal of materials research and technology. 2019 Sep 1;8(5):3917-28. doi: [10.1016/j.jmrt.2019.06.055](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.055)
- [36] Mehri A, Abdollah-zadeh A, Habibi N, Hajian M, Wang JT. The effects of rotational speed on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded 7075-T6 thin sheet. Journal of Materials Engineering and Performance. 2020 Apr;29:2316-23. doi: [10.1007/s11665-020-04733-w](https://doi.org/10.1007/s11665-020-04733-w)
- [37] Patil NA, Pedapati SR, Mamat OB, Hidayat Syah Lubis AM. Optimization of friction stir process parameters for enhancement in surface properties of Al 7075-SiC/Gr hybrid surface composites. Coatings. 2019 Dec 6;9(12):830. doi: [10.3390/coatings9120830](https://doi.org/10.3390/coatings9120830)
- [38] Patil NA, Pedapati SR, Mamat O, Lubis AM. Morphological characterization, statistical modeling and wear behavior of AA7075-Titanium Carbide-Graphite surface composites via Friction stir processing. Journal of Materials Research and Technology. 2021 Mar 1;11:2160-80. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.02.054](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.054)
- [39] Aghamohammadi H, Jamshidi R, Heidarpour A, Mazaheri Y, Nemati M. Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2018 Nov 22;5(3):12-21. [In Persian]