علوم و مهندسی سطح، شماره ٦٦ (سال ١٤٠٤)، صفحات ٤٠-٥٣



نشریه علوم و مهندسی سطح

انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

بررسی تجربی و بهینه سازی سایش فرسایشی سطوح نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری توسط روش سطح پاسخ در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

محمدرضا شبگرد[۱]، گوهر رنجبری*[۲]، مهدی حقی[۱]

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران

واژگان کلیدی:
پلی آمید ٦
نانو کامپوزیت
سایش فرسایشی
روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت:
١٤٠٥/٠٤/٢٣
تاریخ بازنگری:
١٤٠٥/٠٦/٢٧
تاریخ پذیرش:
١٤٠٥/٠٦/٢٧

چکیده

هدف این پژوهش بررسی تجربی و عددی تاثیر درصد وزنی نانو ذرات، فشار و زاویه برخورد ذرات ساینده بر روی نرخ سایش فرسایشی لایه سطحی نانو کامپوزیت تولید شده به روش FSP با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد. از پلی آمید۶ به عنوان زمینه پلیمری و از نانورس از نوع Closit20A با درصدهای وزنی ۲، ۴ و ۶ استفاده شده است. رابطه ریاضی متغیرهای ورودی و سایش فرسایشی با استفاده از روش سطح پاسخ به دست آمده است. نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان می‌دهد در این فرایند به ترتیب زاویه برخورد ذرات ساینده، فشار، درصد وزنی نانوذرات و برهمکنش فشار و زاویه، پارامترهای تاثیرگذار در مدل ارائه شده می‌باشند. با تغییر زاویه برخورد ذرات ساینده، نرخ فرسایش به شدت تغییر می‌کند. کاهش زاویه برخورد ذرات ساینده و افزایش فشار پاشش ذرات ساینده، منجر به افزایش نرخ سایش فرسایشی می‌شود. ترکیب مقادیر بهینه متغیرها جهت دستیابی به کمترین مقدار سایش فرسایشی تعیین و نتایج بدست آمده صحت سنجی شد. نتیجه بهینه سازی با مطلوبیت ۱۰۰ درصد و در درصد وزنی ۱و فشار ۴ بار و زاویه برخورد ۹۰ درجه حاصل شد. خطای پاسخ های بهینه پیش بینی شده برای سایش فرسایشی در مقایسه با نتایج تجربی ۵ درصد می‌باشد.

DOI: https://doi.org/10.22034/issst.2026.2094460.1677

Experimental Investigation and Optimization of Erosive Wear of Polymer-Matrix Nanocomposite Surfaces Using Response Surface Methodology in Friction Stir Processing

Abstract

This study experimentally and numerically investigates the effects of nanoparticle weight fraction, pressure, and abrasive-particle impingement angle on the erosive wear rate of a surface layer of a nanocomposite fabricated using the friction stir processing (FSP) method, employing the response surface methodology (RSM). Polyamide 6 was used as the polymer matrix, and Cloisite 20A nanoclay was added at weight fractions of 2, 4, and 6%.A mathematical relationship between the input variables and erosive wear was developed using RSM. The analysis of variance (ANOVA) results showed that the abrasive-particle impingement angle, pressure, nanoparticle weight fraction, and the pressure–angle interaction were, in descending order, the most influential factors in the proposed model. The erosive wear rate changed substantially with the impingement angle. A decrease in the abrasive-particle impingement angle and an increase in blasting pressure resulted in a higher erosive wear rate.The optimal combination of variables for minimizing erosive wear was determined, and the results were validated. The optimizer achieved 100% desirability at a nanoparticle weight fraction of 1%, a pressure of 4 bar, and an impingement angle of 90°. The error between the predicted optimal erosive-wear response and the experimental result was 5%.

Keywords: Polyamide 6, Nanocomposite, Erosive wear, Response Surface Methodology.

* *Corresponding author E-mail*: ranjbari2024@iau.ac.ir

١- مقدمه

سطوح دستگاهها و قطعات مکانیکی از جمله بدنه هواپیماها که در معرض شن و گرد و غبار قرار دارند با مشکلات جدی فرسایش مواجه هستند بنابراین این امر باعث لایه لایه شدن و تاثیر نامطلوب بر بارهای آیرودینامیکی شده سرعت و مصرف بهینه سوخت را کاهش می‌دهد. روش‌های مختلف پوشش‌دهی مانند آبکاری، پاشش حرارتی، پاشش پلاسما، روش رسوب بخار و تکنیک‌های مختلف عملیات لیزری برای غلبه بر این مشکل موجود است [١].

با این وجود، این روش‌ها ممکن است به دلیل شرایط حرارتی نامطلوب منجر به تشکیل ترک و لایه لایه شدن شوند. همچنین، پراکندگی آخال‌ها و برخی از ضایعات ناخواسته در جو نامناسب تشکیل می‌شوند. با این وجود، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی که بر خواص مکانیکی تأثیر منفی گذاشته و کاربرد آن‌ها را در صنایع هوافضا محدود می‌کنند، اجتناب‌ناپذیر است [٢,٣].

برای غلبه بر کاستی‌های مذکور، از روش‌های پردازش در حالت جامد نظیر رسوب‌دهی شیمیایی و فیزیکی بخار، متالورژی پودر، فرایند اصطکاکی اغتشاشی و اتصال نفوذی استفاده می‌شود. در میان این روش‌ها فرایند اصطکاکی اغتشاشی تکنیکی قابل‌توجه به شمار می‌آید [٤,٥]. این روش، ناحیه مورد نظر را بدون تغییر در خواص ماده پایه اصلاح می‌کند. همچنین، نیازی به ماده پرکننده ندارد این امر موجب جلوگیری از ورود ناخالصی می‌شود و سازگار با محیط زیست است. با تغییر پارامترهای فرآیند، می‌توان ریزدانه شدن و رفتار فوق‌مومسانی (سوپرپلاستیسیته) را کنترل و اصلاح کرد.

علاوه بر این، بسته به نوع مواد تقویت‌کننده انتخاب‌شده، این روش خواص سطحی نظیر سختی، مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی و مقاومت به خستگی را بهبود می‌بخشد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی قادر است از طریق اصلاح ریزساختار، خواص مکانیکی را بدون لطمه زدن به ویژگی‌های ذاتی ماده پایه ارتقا دهد [٦]. در این فرایند یک ابزار چرخنده مصرف نشدنی شامل یک پین با طرحی خاص و یک شانه، وجود دارد که در روی سطح به چرخش در می‌آید. در اثر چرخش ابزار، اصطکاک زیادی مابین مواد و ابزار چرخنده ایجاد شده که منجر به گرم شدن مواد می‌شود. این گرما، دمای مواد را تا ناحیه خمیری بالا می‌برد و مواد در اثر سیالیتی که پیدا می‌کنند در هم مخلوط می‌شوند. در ادامه مواد سرد شده و اتصال مورد نظر ایجاد می‌گردد. در مورد ضربه یک ذره روی فلزات، مکانیزم‌های شخم زنی، برش، کندگی، میکرو ترک و میکرو خستگی بر سایش فرسایشی حاکم است.

روش سطح پاسخ[1] مجموعه ای از فنون آماری و ریاضی است که از توابع چندجمله ای خطی یا درجه دوم برای آنالیز تجربی و مدلسازی عددی فرایندهای مکانیکی استفاده می‌کند. هدف اصلی این روش، بهینه سازی شرایط تجربی با استفاده از شناسایی متغیرهای تاثیرگذار و به حداکثر رساندن مطلوبیت آنهاست. مزیت قابل توجه روش سطح پاسخ این است که، با به حداقل رساندن تعداد کلی آزمایشهای مورد نیاز، امکان بررسی دقیق تعاملات متقابل بین متغیرها تحلیل دقیق و بهینه سازی در یک سیستم را فراهم میآورد. این قابلیت روش سطح پاسخ در پژوهش های تولید نانوکامپوزیت، که متغیرهای ورودی متعدد در فرایند میتوانند تأثیرگذاری متفاوتی در نتایج نهایی داشته باشند، به محققان این امکان را میدهد تا با بهینه سازی و کاهش تعداد آزمایشها، در زمان و هزینه انجام آزمایش ها صرفه جویی گردد. در زمینه سایش و مدلسازی و بهینه سازی آن در فرایند اصطکاکی اغتشاشی پژوهش هایی در گذشته توسط محققین انجام شده است: بنی مصطفی عرب و همکاران [٧] به تحلیل تجربی اثر متغیرهای سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس ها در فرآیند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی بر ریزسختی و میزان سایش

[1] Response Surface Methodology

نانوکامپوزیت آلومینیوم سیلیکون کاربید تولید شده با این روش با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم افزار مینی تب پرداختند ترکیب مقادیر بهینه متغیرها جهت دستیابی به بیشترین میزان ریزسختی و کمترین میزان سایش 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. موهانراج و همکاران [۸] با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه سازی سایش در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌های سطحی (SCs) AA7075 تقویت‌شده با ذرات سرباره فولاد بر اساس پارامترهای ورودی زاویه جت، فاصله، فشار، زمان برخورد و تعداد و اندازه ذرات فرسایشی پرداخته و سطوح بهینه پارامترهای ورودی را جهت دستیابی به کمترین مقدار سایش تعیین نمودند. اجزایی مانند بال و بدنه هواپیما در شرایط سرعت بالا با مشکلات جدی فرسایش به دلیل ذرات شن و ماسه مواجه هستند. این موضوع در تحقیق کانداسامی و همکاران [۹] مورد توجه قرار گرفته و ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی سطحی (SHC) AA7075 با تقویت‌کننده‌هایی مانند اکسید آلومینیوم و کاربید سیلیکون از طریق تکنیک نوین فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پیشنهاد شده است. هدف از تحقیق ایشان ارزیابی عملکرد مقاومت به سایش بر اساس پارامترهای ورودی فاصله جت، فشار جت، زاویه جت، زمان برخورد ذرات فرسایشی و تعداد ذرات فرسایشی در نظر گرفته شده و از طریق تکنیک تاگوچی بهینه می‌شوند. نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ریزدانه‌سازی و توزیع همگن ذرات تقویت‌کننده در مقایسه با آلیاژ پایه AA7075، تخریب سطحی کمتری دارند. مطالعات اخیر روش‌های مختلفی را برای اصلاح خواص سطحی آلومینیوم با تولید کامپوزیت‌های سطحی، مانند روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی توسعه داده‌اند. در مطالعه رحیمیان و همکاران [۱۰] به توسعه یک کامپوزیت سطحی هیبریدی جدید از AA5083/(SiC-Gr) با استفاده از روش FSP پرداخته شده است. برای بهینه‌سازی فرآیند FSP، ایجاد مدل ریاضی و پیش بینی ویژگیهای خروجی از روش سطح پاسخ و طرح باکس بنکن استفاده شده است، نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد تعداد پاسها و حجم تقویت کننده پارامترهای تاثیر گذار بوده اند و پیش بینی با خطای ۱۰٪ انجام شده است.آلیاژهای منیزیم به دلیل ساختار کریستالی شش‌گوشه (HCP) دارای مقاومت سایشی و شکل‌پذیری ضعیف می باشند که کاربرد آن‌ها در مقیاس وسیع را محدود می‌سازد. بهبود کیفیت سطح، راهکاری مؤثر برای غلبه بر این محدودیت‌هاست. در پژوهش نیواس و همکاران [۱۱]، یک کامپوزیت سطحی هیبریدی جدید بر پایه آلیاژ AZ91D که با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2) و نقره (AgNPs) تقویت شده بود، با استفاده از روش FSP تولید گردیده است. به منظور دستیابی به ویژگی‌های سطحی بهبودیافته، بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از تحلیل تابع مطلوبیت روش سطح پاسخ باکس بنکن صورت گرفت. پارامترهای بهینه فرآیند عبارت بودند از: سرعت چرخش ابزار برابر با ۹۰۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ابزار برابر با ۷۰ میلی‌متر بر دقیقه، تعداد پاس برابر با ٤ و کسر وزنی ماده تقویت‌کننده برابر با ۲ درصد وزنی. تحت این شرایط، سختی کامپوزیت حدود ۲۰۰ درصد افزایش و نرخ سایش نیز حدود ٤۲ درصد کاهش پیدا کرد. ولاوان و همکاران [۱۲] در کار تحقیقی دیگری به مطالعه رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت‌های سطحی AA8011 تقویت‌شده با ۱ تا ۳ درصد وزنی نانوذرات اکسید زیرکونیوم با اندازه ٤۰ تا ٦۰ نانومترتحت فرآیند اصطکاکی–اغتشاشی پرداخته‌اند. تحلیل‌های ریزساختاری و بررسی سطوح ساییده شده تأیید کردند که استفاده از ۲ درصد وزنی نانوذرات زیرکونیوم منجر به بهترین توزیع ذرات، تشکیل لایه تریبولوژیکی پایدار و مقاومت سایشی برتر شده است. مکانیزم‌های سایش مشاهده شده در کار ایشان در شرایط مختلف شامل سایش خراشان، چسبندگی، ترک‌خوردگی زیرسطحی و پوسته‌پوسته شدن ماده بود. گلادستون و همکاران [۱۳] یک لایه سطحی نانوکامپوزیت هیبریدی بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از فرآیند اصطکاکی–اغتشاشی و با

به‌کارگیری کاربید تیتانیوم، اکسید زیرکونیوم و گرافیت در نسبت‌های وزنی مختلف، تولید کرده‌اند. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی توزیع یکنواخت مواد تقویت‌کننده، ریزدانه شدن ساختار و بهبود مقاومت به سایش را تأیید کرده است. در کار تحقیقی چادهاری و همکاران [١٤] به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند چندمرحله‌ای اصطکاکی-اغتشاشی در آلیاژ منیزیم AZ91D تقویت‌شده با نانوذرات Al_2O_3 و SiC، با استفاده از روش سطح پاسخ مبتنی بر طرح مرکب مرکزی به همراه بررسی دقیق مشخصات متالورژیکی پرداخته شده اشت. پاسخ‌های خروجی بهینه شامل استحکام کششی نهایی ٢٧٨/٥٨ مگاپاسکال، ازدیاد طول ١٧/٩٥ درصد و سختی موضعی ٥٧/٣٣ در ناحیه فرآوری‌شده بود. کومار و همکاران [١٥] با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه سازی استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول کششی و ریزسختی کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی از نوع AA7475/B4C/Al2O3 با استفاده از روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته اند. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که سرعت چرخش ابزار بیشترین تأثیر را بر خواص کششی، شکل‌پذیری و سختی کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی داشته است؛ در حالی که تغییرات نرخ پیشروی و نسبت مواد تقویت‌کننده تأثیر ناچیزی بر این خواص داشته‌اند علاوه بر این شرایط بهینه نیز برای پاسخ‌های مختلف تعیین شده است. سوگانزواران و همکاران [١٦] مقادیر بهینه پارامترهای فرسایش از قبیل زاویه جت، فاصله، فشار، زمان برخورد و تعداد مش ذرات فرسایش دهنده را برای دستیابی به کمترین نرخ فرسایش به ترتیب، ٧٥ درجه، ١٥ سانتیمتر،٤ بار، ٢ دقیقه و ٢٠٠ به دست آورده اند. پژوهش عبدالهادی و همکاران [١٧] به بررسی رفتار تریبولوژیکی آلیاژ AA6061-T6 تقویت‌شده با ذرات کاربید بورپرداخته است که به روش فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی تولید شده است. کامپوزیت‌های سطحی به منظور ارزیابی عملکرد سایشی و زبری سطح در شرایط لغزش خشک ساخته شدند. نتایج حاصل از روش سطح پاسخ حاکی از آن است که رفتار سایشی کامپوزیت‌ها به‌شدت تحت تأثیر افزودن ذرات کاربید بور قرار دارد همچنین پارامترهای بهینه برای کاهش مؤثر نرخ سایش ویژه و ضریب اصطکاک عبارت‌اند از: کسر حجمی ١٠ درصد، بار اعمال‌شده ٢٠ نیوتن و مسافت لغزش ٥٠٠ متر. زادعلی و همکاران [١٨] از یک ورق کارشده آلیاژ آلومینیوم AA 3003-H14 به همراه پودر فلزی تیتانیم برای تولید کامپوزیت سطحی تقویت شده با نانوذرات آلومینایدی درجای Al_3Ti توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد این فرایند باعث توزیع همگن ذرات تقویت کننده و تشکیل درجای نانوذرات آلومینایدی Al3Ti در فصل مشترک ذرات آلومینیوم با زمینه تیتانیم می‌شود و ریزسختی و مقاومت به سایش در نمونه کامپوزیتی بالاتر است. همانگونه که از بررسی پیشینه پژوهش برمی آید تا کنون به بررسی و بهینه سازی سایش فرسایشی پلی آمید ٦ با درصدهای مختلف نانورس در فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته نشده است لذا هدف پژوش حاضر بررسی همه جانبه سایش فرسایشی نانوکامپوزیت پلی امید ٦ – نانورس، ارایه یک رابطه عددی و بهینه سازی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر اساس متغیرهای ورودی می‌باشد.

٢- مواد و روشها

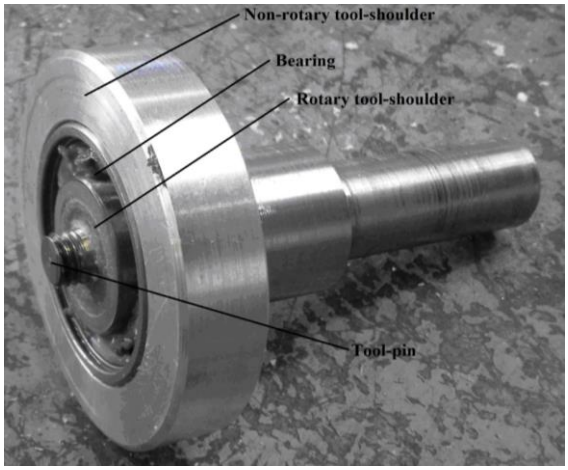
برای تولید نانوکامپوزیت پایه پلیمری با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ابتدا پیش از انجام فرآیند، شیاری با عرض ١ و عمق ٦ میلیمتر به موازات لبه کناری قطعه‌کار ایجاد گردید. سپس، پودر نانورس در داخل شیار ریخته شد و توسط تسمه نازکی با فشار دست فشرده گردید تا در حین فرآیند از حفره خارج نگردد؛ در نهایت، ابزار ساخته شده که دارای پین با رزوه ١ میلیمتر به قطر ٩ و ارتفاع ٦ میلیمتر و شانه به قطر ٣٠ میلیمتر بود، وارد قطعه‌کار شده و در امتداد شیار ایجاد شده، به منظور توزیع نانورس در زمینه پلی‌آمید٦ حرکت داده شد. ماتریس نانوکامپوزیت، از ورق‌های پلی‌آمید ٦ (TECAST) با

ضخامت ۱۰ میلیمتر میباشند. جدول ۱ مشخصات مکانیکی و فیزیکی این ورق‌ها را نشان می‌دهند.

جدول۱: مشخصات مکانیکی و فیزیکی ورق‌های پلی‌آمید ٦

ویژگی مکانیکی	مقدار
Specific Gravity	1.14 -1.15 g/c
Water Absorption at Saturation	1.2 %
Tensile Strength, Yield	64.1 - 73.1 MPa
Tensile Modulus	2.55 - 2.93 MPa
Shear Strength	44.8 -51.7 MPa
Melting Point	220 °C
Glass Teperature	60 °C

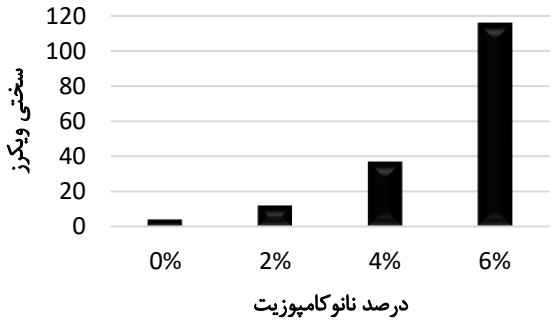
طراحی ابزار به صورتی انجام شد که سطح بالایی شیار را ببندد تا از خروج مواد پرکننده از داخل شیار جلوگیری گردد. بدین منظور، شانه ثابت با قطری بزرگتر از قطر شانه دوران‌کننده، توسط بلبرینگ به ابزار مورد نظر اضافه گردید. ابزار مورد استفاده در این تحقیق، از چهار بخش تشکیل شده است که در شکل۱ دیده می شود.- پین ابزار؛ شانه قابل دوران ابزار؛ بلبرینگ؛ شانه غیرقابل دوران ابزار. مکانیزم غیرقابل دوران مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از چرخش شانه غیرقابل دوران ابزار(رینگ سوار شده بر روی بلبرینگ)، در یک طرف شانه سطح تختی ایجاد گردید تا درهنگام کار به کمک یک تسمه راهنما این عمل انجام شود. قطر شانه قابل دوران ابزار و شانه غیرقابل دوران ابزار بترتیب ۳۰ و ۷۰ میلیمتر و قطر و طول پین ابزار به ترتیب برابر با ۹ و ٦ میلیمتر در نظر گرفته شده است. دستگاه فرز استفاده شده جهت انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مدل FP4M ساخت گروه ماشین‌سازی تبریز می‌باشد. با توجه به کمبود اطلاعات موجود در مورد بازه مناسب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، تلاش گردید تا بازه‌های مناسب پارامترهای فرآیند از طریق روش سعی و خطا بدست آید. لذا، به منظور یافتن بازه مناسب برای سرعت دورانی و سرعت پیشروی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تست-های متعددی از ترکیب سرعت‌های دورانی مابین ٦۰۰ الی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی‌های مابین ۲۰ الی ۱۲۵ میلیمتر بر دقیقه انجام گرفت. نتایج تست‌ها نشان داد که ابزار در ترکیب سرعت‌های دورانی و پیشروی پایین قادر به افزایش دمای ماتریس پلیمری در حدی که به حالت خمیری درآید، نداشته و در نتیجه، ماتریس پلی‌آمید ٦ در طول فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، رشته رشته گردیده و روند مخلوط‌سازی نانوذرات در ماتریس موفقیت آمیز نخواهد بود. از این رو، بازه مناسب برای پارامتر سرعت دورانی ابزار از ۱۲۵۰ الی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب گردید. از سوی دیگر، تولید گرما در سرعت‌های دورانی بالا، منجر به ذوب ماتریس پلی‌آمید ٦ می-گردد. به دلیل سیالیت بالای مذاب ماتریس پلی‌آمید ٦، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی خارج از کنترل گشته و روند مخلوط-سازی ذرات در ماتریس موفقیت آمیز نخواهد بود. لذا، جهت جلوگیری از تمرکز حرارت و ذوب شدن قطعه‌کار در حین فرآیند، از حداکثر سرعت‌های پیشروی ابزار در حد توان دستگاه باید استفاده گردد. از این رو، دو سرعت پیشروی ۱۲۵ و ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه انتخاب گردید. در این پژوهش برای انجام آزمایش سایش فرسایشی بر روی نمونه‌ها از ذرات سیلیس با اندازه ۱۵۰-۱۸۰ میکرومتر استفاده گردید. دستگاه میکروسختی سنج مورد استفاده در این آزمایش مدل ZHV 10 ساخت شرکت Zwick roell می‌باشد. در این دستگاه، میکروسختی سنجی توسط الماس فرورونده ویکرز (هرمی با زاویه ۱۳٦ درجه) به مدت ۱۵ ثانیه با بار ۱۰۰ گرم انجام می-گیرد. برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها بیش از سه نقطه از نمونه تعیین گردید که متوسط نتایج آنها به عنوان معیار سختی سطح در نظر گرفته شد. مقادیر میانگین میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است همانگونه که



شکل۱: نمایی از ابزار اصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.



شکل۲: مکانیزم شانه ی غیرقابل دوران در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.



شکل۳: نمودار میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت بر حسب درصد وزنی.

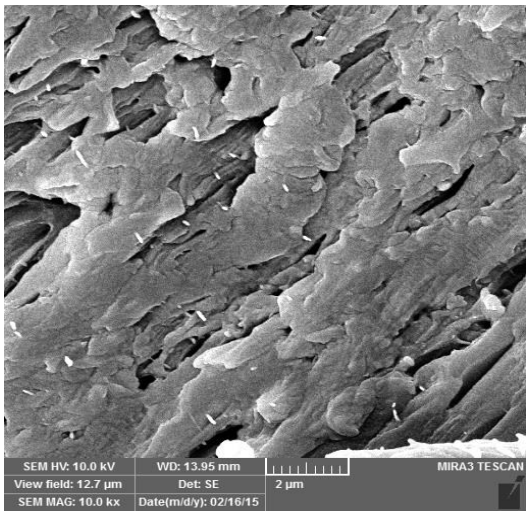
مشاهده می‌شود میکروسختی نانوکامپوزیت ٦٪ نانورس بیشترین مقدار و پلیمر پلی امید خالص، کمترین مقدار می‌باشد. جهت توزین ذرات نانورس از ترازوی دیجیتال مدل CP 224S ساخت شرکت Sartorius استفاده گردید و همچنین جهت ارزیابی نرخ سایش فرسایشی مواد سایش شونده، قبل و بعد از انجام آزمون سایش کلیه نمونه‌ها توزین گردید و با استفاده از کاهش وزن نمونه‌ها خواص سایشی آنها بررسی شد. این دستگاه دارای قدرت تفکیک ۰/۰۰۰۱ گرم بود. دستگاه SEM مورد استفاده در این پروژه با نام تجاری MIRA3 FEG-SEM می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های سایش فرسایشی از یک دستگاه سندبلاست دارای محدوده فشار کاری قابل تنظیم از صفر تا شش بار استفاده گردید. در این تحقیق ۳۲ آزمون به صورت عاملی کامل، یکبار انجام گرفته که سه فاکتور جنس قطعه‌کار تحت سایش فرسایشی، فشار پاشش ذرات ساینده و زاویه برخورد ذرات ساینده مطابق جدول ۲ متغیرهای ورودی میباشند. جدول ۳ ماتریس طراحی آزمایشات و مقادیر پاسخ ها را نشان میدهد.سطوح نمونه ها بر اساس آزمایشهای انجام یافته در پیش نمونه ها و مقدار کاهش وزن ایجاد شده در نمونه های مذکور انتخاب شد.

جدول۲: متغیرهای تنظیمی فرایند

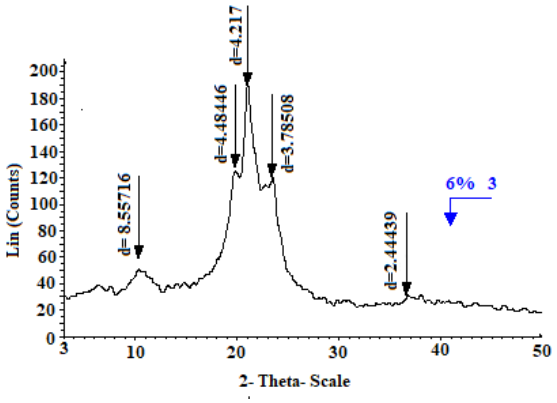
Parameter	The value of the parameters
Machine	Sandblast (AFM)
Temperature	20±3℃
Material of abrasive particle	Silicate
Abrasive particle shape	Cornered
Weight of abrasive particle	2 Kg
Nozzle diameter	4 mm
Nozzle to workpiece distance	20 ± 1mm
Spray pressure of abrasive particle	4 and 6 bar
incident angle of abrasive particles	15,30,60,90
Workpiece material	Polyamide 6 Polyamide 6/nanoclay 2% Polyamide 6/nanoclay 4% Polyamide 6/nanoclay 6%

٣- نتایج و بحث

نتایج مربوط به تصاویر میکروسکوپ الکترونی و پراش اشعه ایکس برای نمونه پلی آمید٦- نانو رس ٦٪ در شکل ٤ و ٥ اورده شده است. با افزایش مقادیر بیشتر نانو ذرات (لکه های سفید رنگ)، به دلیل وجود انرژی سطحی بالا بین نانو ذرات و کلوخه‌ای شدن ذرات، مقاومت به ضربه کاهش می یابد. شکل ٥ نشان می‌دهند که وجودکریستال‌های فاز α پلی‌آمید٦ باعث انعکاس در زوایای حدودی $2\theta=20°$ و $2\theta=24°$ درنانوکامپوزیت ٦٪ گردیده است و شدت پیک‌های فاز α در پلی‌آمید ٦ خالص بیشتر از نانوکامپوزیت می‌باشد.



شکل٤: توزیع نانو ذرات رس در زمینه پلی‌آمید٦ با ٦درصد وزنی.



شکل٥: نمودار XRD پلی آمید٦/ ٦wt٪ نانورس.

جدول٣: ماتریس طراحی آزمایشات و مقادیر پاسخ‌ها

شماره آزمایش	زاویه پاشش ذرات ساینده (Deg)	فشار پاشش ذرات ساینده (bar)	درصد نانوذرات	مقدار کاهش وزن نمونه‌ها (g)
١	١٥	٤	٠	٠/٠٤٦٥
٢	٣٠	٤	٠	٠/٠٦٧٩
٣	٦٠	٤	٠	٠/٠٣٨٣
٤	٩٠	٤	٠	٠
٥	١٥	٦	٠	٠/١١٥٤
٦	٣٠	٦	٠	٠/١٢٨٢
٧	٦٠	٦	٠	٠/٠٥٦٠
٨	٩٠	٦	٠	٠/٠٠١٣
٩	١٥	٤	٢	٠/٠٣١١
١٠	٣٠	٤	٢	٠/٠٦١٩
١١	٦٠	٤	٢	٠/٠٢٤٧
١٢	٩٠	٤	٢	٠/٠٠٠٥
١٣	١٥	٦	٢	٠/٠٧٠٣
١٤	٣٠	٦	٢	٠/٠٨٣٣
١٥	٦٠	٦	٢	٠/٠٣٥١
١٦	٩٠	٦	٢	٠/٠٠٢٥
١٧	١٥	٤	٤	٠/٠٢١٥
١٨	٣٠	٤	٤	٠/٠٤٧٢
١٩	٦٠	٤	٤	٠/٠٢٠٩
٢٠	٩٠	٤	٤	٠/٠٠١٥
٢١	١٥	٦	٤	٠/٠٦٨٨
٢٢	٣٠	٦	٤	٠/٠٦٥٣
٢٣	٦٠	٦	٤	٠/٠٣٠٨
٢٤	٩٠	٦	٤	٠/٠٠٥١
٢٥	١٥	٤	٦	٠/٠١٠٥
٢٦	٣٠	٤	٦	٠/٠٤٤٣
٢٧	٦٠	٤	٦	٠/٠١٢٥
٢٨	٩٠	٤	٦	٠/٠٠٦٩
٢٩	١٥	٦	٦	٠/٠٤٨٩
٣٠	٣٠	٦	٦	٠/٠٥٦٨
٣١	٦٠	٦	٦	٠/٠٢٨٨
٣٢	٩٠	٦	٦	٠/٠١١٢

در این بخش به تجزیه و تحلیل عددی و آماری نتایج رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی برهمکنش متغیرهای مذکور ریزسختی و کاهش وزن حاصل از سایش فرسایشی پرداخته میشود سپس تصاویر SEM نمونه ها قبل و بعد از فرسایش بررسی خواهد شد.

۳-۱- تحلیل نتایج حاصل از مدلسازی به روش RSM و تاثیر متغیرهای ورودی بر سایش فرسایشی

جدول ٤ نتایج حاصل از تحلیل واریانس را برای مدل ارایه شده نشان میدهد که به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت ارزیابی معناداری مدل و اهمیت هریک از متغیرهای ورودی و برهمکنش آنها مورد استفاده قرار میگیرد. در این جدول از مقدار F (آزمون فیشر) و P (مقدار احتمال) برای ارزیابی مقدار سایش فرسایشی نانوکامپوزیت های مورد استفاده در این پژوهش بهره گرفته شده است. در صورتیکه مقدار P مربوط به متغیری کمتر از ۰/۰۵ باشد اثر آن متغیر بر روی پارامتر پاسخ (سایش فرسایشی) معنادار است.

همچنین در صورتیکه مقدار F بزرگتر باشد نشان میدهد پارامتر ورودی مربوطه تاثیر بیشتری دارد. در این پژوهش برای ایجاد ارتباط ریاضی بین متغیر پاسخ و پارامترهای ورودی از مدل برهنکنش دو فاکتور استفاده شده است. مطابق جدول ٤ بر اساس مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ پارامترهای زاویه برخورد ذرات ساینده، درصد نانوکامپوزیت، فشار و برهمکنش زاویه و فشار به ترتیب تاثیرگذارترین فاکتورها بر روی سایش فرسایشی هستند و همانگونه که مشاهده میشود میزان تاثیرگذاری زاویه برخورد ذرات ساینده بیشتر از دو فاکتور دیگر است. مدل رگرسیون مقدار سایش فرسایشی به صورت تابعی از متغیرهای ورودی، در جدول ۵ نشان شده است.

شکل ٦ دیاگرام مدلسازی فرایند و مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی حاصل از روش سطح پاسخ را نشان میدهد. نزدیکی نقاط به خط y=x دقت پیش بینی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۷-۱۰ نمودار سه بعدی اثرات برهمکنش متغیرهای ورودی را بر سایش فرسایشی در درصدهای مختلف نانوکامپوزیت نشان میدهد. همانطور که از این شکل ها ملاحظه می‌شود میزان فرسایش شدیداً به زاویه برخورد وابسته است و با افزایش زاویه برخورد کاهش می یابد. بر اساس نظریه بیتر در سایش فرسایشی دو نوع مکانیزم ترد و نرم وجود دارد [۱۹].

$$W_D = \frac{M(V_1 sin\alpha - k)}{2\varepsilon} \quad (۱)$$

$$W_C = \frac{M}{2e}(V_1 cos\alpha - V_2 cos\alpha) \quad (۲)$$

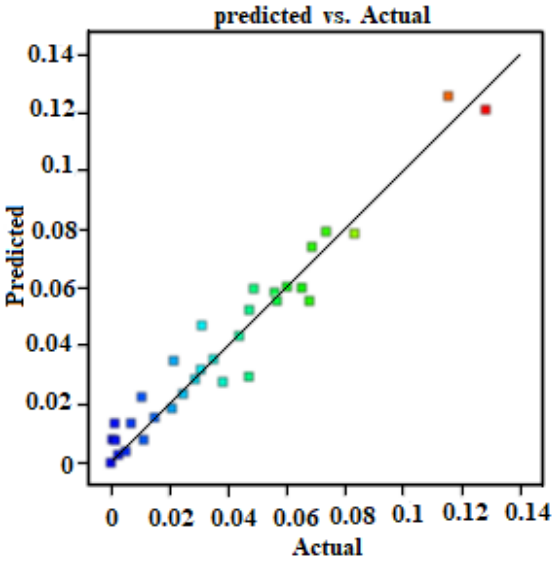
$$W = W_D + W_C \quad (۳)$$

جدول٤: نتایج تحلیل واریانس برای مدل ارایه شده

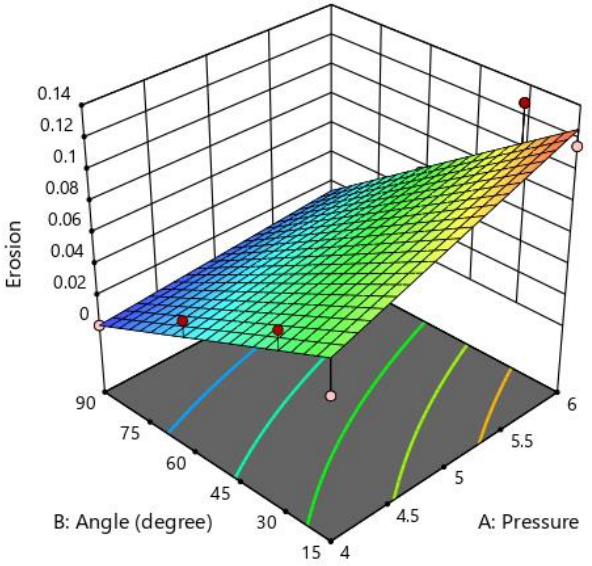
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.0288	12	0.0024	10.19	< 0.0001	significant
A-Pressure	0.0043	1	0.0043	18.33	0.0004	
B-Angle	0.0156	1	0.0156	66.36	< 0.0001	
C-nanocomposite percent	0.0039	3	0.0013	5.51	0.0068	
AB	0.0022	1	0.0022	9.18	0.0069	
AC	0.0005	3	0.0002	0.727	0.5484	
BC	0.0023	3	0.0008	3.22	0.0461	
Residual	0.0045	19	0.0002			
Cor Total	0.0332	31				

جدول۵: رابطه رگرسیون برای سایش فرسایشی بر اساس متغیرهای ورودی

شماره معادله	درصد نانو رس	رابطه ریاضی
۱	۰	Erosion = -0.046504+0.032431*pressure+0.000217* Angle-0.000285* Pressure * Angle
۲	۲	Erosion=-0.037200+0.023031* Pressure+0.000621* Angle-0.000285* Pressure * Angle
۳	۴	Erosion=-0.054601+0.023769* Pressure+0.000778* Angle-0.000285* Pressure * Angle
۴	۶	Erosion=-0.066980+0.022844* Pressure+0.001021* Angle-0.000285* Pressure * Angle

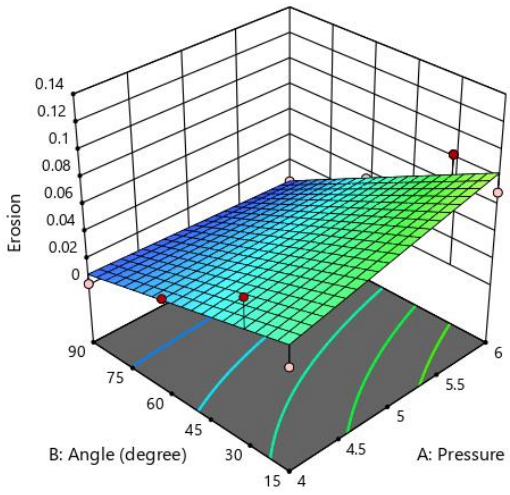


شکل٦: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی حاصل از روش RSM.

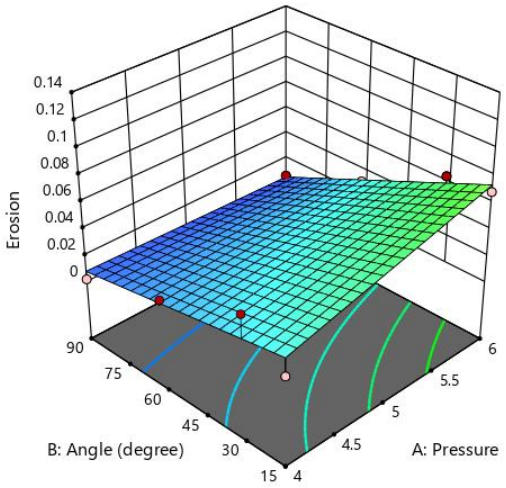


شکل۷: نمودار سه بعدی برهمکنش پارامترهای ورودی برای نمونه پلی آمید خالص.

که در آن W میزان سایش فر سایشی کل، W_D میزان فرسایش ناشی از مکانیزم ترد، W_C میزان فرسایش ناشی از مکانیزم نرم (برش)، V_1 سرعت اولیه ذره، V_2 سرعت ذره بعد از برخورد به سطح، α زاویه برخورد، K حداکثر سرعت برخورد ذره که هیچ گونه تغییر شکل پلاستیکی ایجاد نکند، M جرم ذرات ساینده، ε انرژی لازم برای حذف یک واحد از حجم ماده، e

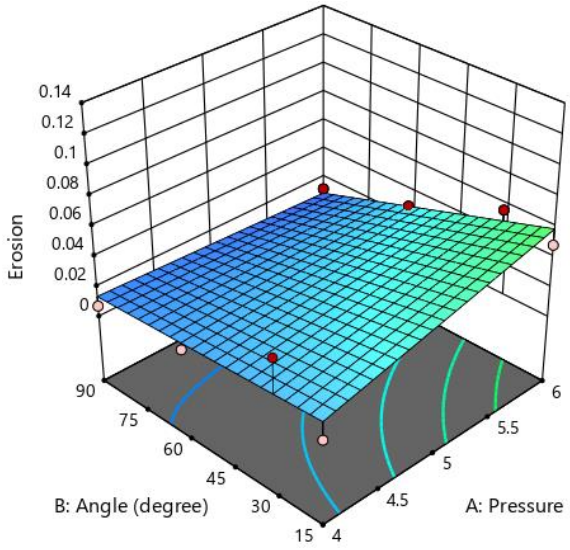


شکل۸: نمودار سه بعدی برهمکنش پارامترهای ورودی برای نمونه با ۲ درصد وزنی نانورس.



شکل۹: نمودار سه بعدی برهمکنش پارامترهای ورودی برای نمونه با ٤ درصد وزنی نانورس.

ضریب سایش فرسایشی ناشی از برش [۲۰]. مطابق روابط (۱) و (۲) ، با کاهش زاویه مقدار $\sin(\alpha)$ به سمت صفر میل می کند بنابراین مقدار فرسایش ناشی از مکانیزم ترد (W_D) کاهش یافته و مکانیزم اصلی برداشت ماده فرسایش ناشی از شخم زنی سطح و برش سطح توسط ذرات ساینده (W_C) می‌باشد.



شکل۱۰: نمودار سه بعدی برهمکنش پارامترهای ورودی برای نمونه با ٦ درصد وزنی نانورس.

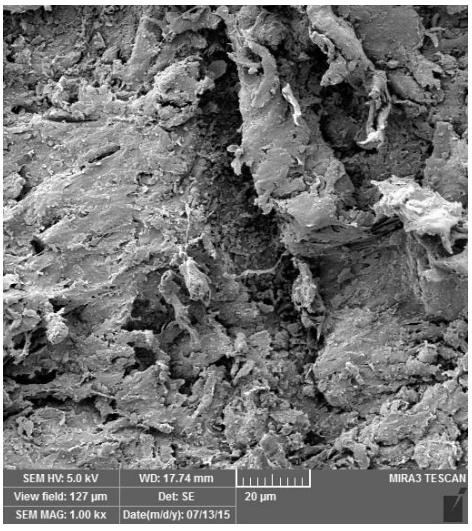
در نتیجه در زوایای برخورد کم هر چه سختی و استحکام ماده بالا باشد، در برابر برش ذرات ساینده مقاومت بیشتری داشته و میزان سایش فرسایشی آن کمتر خواهد بود. در حالی که با افزایش زاویه برخورد $\cos(\alpha)$ به سمت صفر میل می‌کند و در نتیجه مقدار فرسایش ناشی از مکانیزم ترد (W_D) افزایش یافته و مکانیزم برداشت اصلی ماده فرسایش ناشی از ایجاد میکرو ترک ها و شکست می باشد. لذا در زوایای برخورد بالا (۹۰-٦۰) هر چه ماده دارای سختی بالاتری باشد ایجاد ترک و رشد آن در اثر برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه کار راحت تر بوده و مقاومت فرسایشی ماده پایین خواهد بود.

با مقایسه شکلهای ۷-۱۰ میتوان مشاهده نمود، با افزایش درصد وزنی نانوکامپوزیت سایش فرسایشی کاهش مییابد. کامپوزیت پلی‌آمید٦ / ٦٪ نانورس به علت سختی بیشتر نسبت به بقیه کامپوزیت‌ها، در زوایای برخورد کم (۳۰-۱۵درجه) مقاومت بیشتری در مقابل برش ذرات ساینده از خود نشان می‌دهند و نرخ فرسایش کمتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد. در حالی که با افزایش زاویه برخورد از آنجایی که مکانیزم اصلی برداشت ماده از مکانیزم نرم (W_C) به مکانیزم ترد (W_D) تغییر پیدا می کند، رفته رفته مقاومت به سایش فرسایشی این کامپوزیت کمتر شده به طوری که در زاویه ۹۰ درجه کمترین مقاومت فرسایشی را نسبت به بقیه کامپوزیت‌ها از خود نشان می دهد. قطعه کارهایی که سختی کمتری دارند انعطاف پذیری بالاتری دارند و با اعمال ضربه در برابر تغییر شکل پلاستیک مقاومتی نمی‌کنند ولی در مقابل برش مقاومت کمتری دارند. در حالی که در مواد با سختی بالاتر و انعطاف پذیری کمتر هنگام اعمال ضربه میکرو ترک‌هایی به وجود آمده و از به هم پیوستن این میکرو ترک‌ها قسمت‌هایی از سطح به صورت چاله جدا می‌گردند [۲۱].

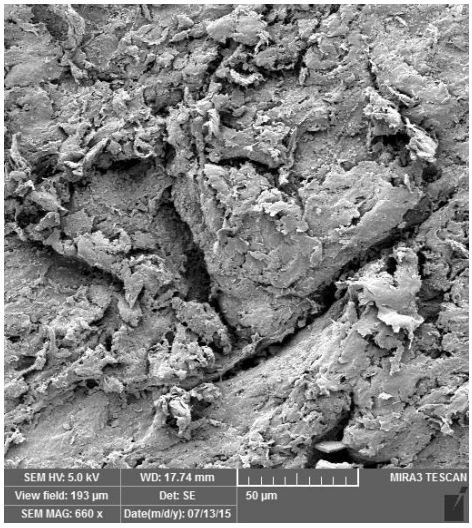
بر اساس تئوری هوچینگز سایش فرسایشی با توان دوم سرعت برخورد ذرات متناسب می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش فشار سرعت برخورد ذرات افزایش می یابد بنابراین مطابق شکل های ۷-۱۰ با افزایش سرعت ذرات ساینده نرخ فرسایش نیز افزایش پیدا می‌کند [۲۲].

یکی دیگر از قابلیت های روش متدولوژی سطح پاسخ دستیابی به پاسخ بهینه می‌باشد. با توجه به اینکه در این مقاله هدف از بهینه سازی، دستیابی به کمترین مقدار سایش فرسایشی است بنابراین ترکیب متغیرهای ورودی برای رسیدن به هدف مذکور به ترتیب ٤ bar برای فشار، ٩٠ درجه برای زاویه برخورد ذرات ساینده و ١درصد برای میزان نانورس با مطلوبیت ١٠٠٪ می‌باشد. مقدار متناظر این ترکیب ورودی برای سایش فرسایشی برابر با ٠/٠٠٠٠٥٩ می‌باشد.

شکل‌های ١١-١٤ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) را برای نمونه‌های پلی آمید ٦ با ٦% وزنی نانورس در زاویه‌های برخورد ١٥، ٣٠، ٦٠ و ٩٠ درجه بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی نشان می‌دهد. در زوایای پایین به دلیل اینکه مکانیزم برشی حاکم است شیارهایی به وجود آمده است. در زاویه برخورد ٦٠ درجه فرآیند سایش ترکیبی از برشی و شکست است بنابراین عمق شیار ایجاد شده در این زاویه عمیق تر از زوایای قبلی است؛ مطابق شکل ١٤ در زاویه برخورد ٩٠ درجه حفره‌های ایجاد شده نشان میدهد که بیشتر فرآیند سایش بصورت شکست اتفاق افتاده است.



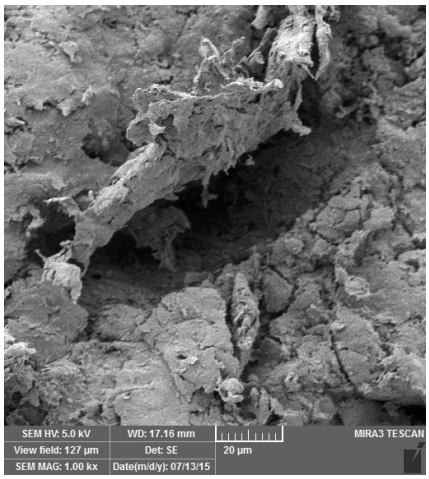
شکل١١: تصویر SEM نمونه پلی آمید/٦درصد نانورس بعد از فرآیند سایش با زاویه ١٥درجه.



شکل١٢: تصویر SEM نمونه پلی آمید/٦درصد نانورس بعد از فرآیند سایش با زاویه ٣٠ درجه.

٤- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به تولید نانو کامپوزیتهای سطحی پلی‌آمید ٦/ نانو رس پرداخته شد سپس توزیع نانو ذرات رس با استفاده از دستگاه SEM بررسی گردید. در نهایت با استفاده از روش سطح پاسخ و جدول آنالیز واریانس تاثیر متغیرهای ورودی (درصد وزنی نانو ذرات رس، زاویه برخورد و فشار پاشش ذرات ساینده)



شکل١٣: تصویر SEM نمونه پلی آمید/٦درصد نانورس بعد از فرآیند سایش با زاویه ٦٠ درجه.



شکل ١٤: تصویر SEM نمونه پلی آمید/٦درصد نانورس بعد از فرآیند سایش با زاویه ٩٠ درجه.

بر روی متغیر پاسخ (نرخ سایش فرسایشی) نانو کامپوزیت‌های تولید شده بررسی گردید. نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشد:

١. نتایج سختی سنجی ویکرز نشان میدهد افزایش درصد نانورس منجر به افزایش میکروسختی میشود به گونه ای که نانوکامپوزیت ٦٪ نانورس بیشترین مقدار سختی و پلیمر خالص پلی امید ٦، کمترین مقدار را دارا می‌باشد.

٢. افزودن نانوذرات رس علاوه بر افزایش چشمگیر سختی نمونه های کامپوزیتی، تاثیر قابل ملاحظه ای در مقاومت به سایش فرسایشی با مکانیزم برشی در نانوکامپوزیت تولید شده دارد. این امر باعث شد در زوایای پایین کمترین مقدار برداشت ماده از نمونه پلی آمید ٦ با ٦ درصد نانو رس صورت گیرد.

٣. بالابودن سایش فرسایشی در زوایای پایین نشان میدهد مکانیزم سایش فرسایشی غالب در این نمونه‌ها مکانیزم برشی است و این نانو کامپوزیت در مقابل فرسایش دارای رفتار داکتیل می‌باشد.

٤. نتایج حاصل از مدلسازی ریاضی سایش فرسایشی بر اساس متغیرهای درصد وزنی نانورس، زاویه برخورد و فشار نشان میدهد میزان سایش فرسایشی نمونه‌ها به شدت به زاویه برخورد ذرات ساینده وابسته بوده و در زوایای برخورد کم (٣٠-١٥درجه) پلیمرخالص و نانوکامپوزیت با ٢ درصد وزنی نانورس کمترین و در زوایای برخورد زیاد (نزدیک٩٠درجه) نانوکامپوزیت با ٦ درصد وزنی نانورس کمترین مقاومت فرسایشی را از خود نشان دادند.

٥. با استفاده از نتایج جدول آنالیز واریانس میتوان دریافت زاویه برخورد ذرات ساینده، درصد نانوکامپوزیت، فشار و برهمکنش زاویه و فشار به ترتیب تاثیرگذارترین فاکتورها بر روی سایش فرسایشی هستند و میزان تاثیرگذاری زاویه برخورد ذرات ساینده بیشتر از دو فاکتور دیگر است.

٦. با افزایش زاویه برخورد ذرات ساینده سایش فرسایشی کاهش می یابد.

٧. افزایش فشار پاشش ذرات ساینده همواره در تمامی نمونه‌ها موجب افزایش سایش فرسایشی قطعات می‌گردد.

٧. بر اساس نتایج حاصل از متدولوژی سطح پاسخ مقدار بهینه متغیر پاسخ سایش فرسایشی با بکارگیری زاویه برخورد ٩٠ درجه فشار ٤ بار و پلی آمید ١ درصد وزنی به دست می آید.

٨. نتایج حاصل از بهینه سازی به روش سطح پاسخ نشان میدهد با استفاده از این روش تمام بازه داده های متغیرهای ورودی مورد بررسی قرار گرفته نیاز به بررسی تمام اعداد موجود در بازه درنظرگرفته شده نمی‌باشد بنابراین در زمان و هزینه انجام ازمایش ها میتوان صرفه جویی نمود.

۵- مراجع

[1] Taylor, J. A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys. Procedia Materials Science, 1, 19-33.

[2] Sharma, D. K., Mahant, D., & Upadhyay, G. (2020). Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. Materials Today: Proceedings, 26, 506-519.

[3] Krishnamurthy, N., Murali, M. S., Venkataraman, B., & Mukunda, P. G. (2012). Characterization and solid particle erosion behavior of plasma sprayed alumina and calcia-stabilized zirconia coatings on Al-6061 substrate. Wear, 274, 15-27.

[4] Chand, S., & Chandrasekhar, P. (2020). Influence of B4C/BN on solid particle erosion of Al6061 metal matrix hybrid composites fabricated through powder metallurgy technique. Ceramics International, 46(11), 17621-17630.

[5] Hassan, A., Altaf, K., Awang, M., Pedapati, S. R., Ahmed, N., & Marode, R. V. (2024). Multi-objective optimization of friction stir additively manufactured Al-7075 multi-layered laminates. Journal of Alloys and Compounds, 993, 174659.

[6] Guo, P., Lian, Y., Zhou, M., Zhang, R., Shi, Q., & Li, Y. (2025). Impact of friction stir processing on microstructure evolution and cavitation erosion behavior of AZ91 magnesium alloy. Surfaces and Interfaces, 108074.

[۷] شریفی زاده، محمد و بنی مصطفی عرب، نصراله و رفاهی اسکویی، امیر،۱٤۰۲،تحلیل آماری و بهینه سازی متغیرهای فرآیند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی نانو کامپوزیت آلومینیوم سیلیکون کاربید با استفاده از روش سطح پاسخ.

[8] Suganeswaran, K., Nathan, S. R., Vani, R., & Mohanraj, T. (2025). Erosion parameter optimization of AA7075 surface composites with steel slag: A response surface methodology approach for aircraft fuselage applications. Surfaces and Interfaces, 72, 107117.

[9] Kandasamy, S., Rathinasamy, P., Nagarajan, N., Karumalai, D., Thangamuthu, M., & Palaniappan, M. (2022). Assessment of erosion rate on AA7075 based surface hybrid composites fabricated through friction stir processing by taguchi optimization approach. Journal of Adhesion Science and Technology, 36(6), 584-605.

[10] D Ghetiya, N., Bharti, S., Patel, K. M., Kumar, S., & Rahimian Koloor, S. S. (2023). An insight on optimization of FSP process parameters for the preparation of AA5083/(SiC-Gr) hybrid surface composites using the response surface methodology. Composites and Advanced Materials, 32, 26349833231186162.

[11] Niwas, R., & Kumar, V. (2026). Optimizing Surface Quality of TiO2/Ag Reinforced Magnesium Composites Using RSM-based Desirability–Function Analysis Fabricated by FSP Process. Journal of Materials Engineering and Performance, 1-12.

[12] Velavan, K., Gopinath, S., Gajalakshmi, K., Sathish, S., Balamurugan, T., Kaviarasu, C., & Sundaraselvan, S. (2026). Hybrid Taguchi-RSM optimization of wear response in friction stir processed AA8011/Nano-ZrO2 composites with variable reinforcement. Interactions, 247(1), 220.

[13] Suresh, M., & Mayakannan, S. (2025). Optimization of wear behavior in Ti-6Al-4V hybrid nanocomposites reinforced with TiC, ZrO2, and graphite using friction stir processing.

[14] Chaudhary, V., Verma, R., & Sharma, V. (2025). Optimization of multipass friction stir processing parameters for AZ91D nanocomposites reinforced with hybrid nanoparticles by response surface methodology. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 19(11), 7709-7730.

[15] Kumar, S., & Sinha, A. N. (2026). Influence of processing variables on fabrication of AA7475/B4C/Al2O3 hybrid surface composites via FSP. Journal of Adhesion Science and Technology, 40(3), 425-450.

[16] Suganeswaran, K., Nathan, S. R., Vani, R., & Mohanraj, T. (2025). Erosion parameter optimization of AA7075 surface composites with steel slag: A response surface methodology approach for aircraft fuselage applications. Surfaces and Interfaces, 72, 107117.

[17] Abdelhady, S. S., Nabhan, A., Zoalfakar, S. H., & Elbadawi, R. E. (2026). Modeling of wear performance and surface roughness of AA6061-T6/B4C composite under dry sliding conditions by RSM. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 240(3), 3102-3113.

[١٨] زادعلی محمد کوتیانی و همکاران، ارزیابی ریزساختاری و رفتار سایشی کامپوزیت سطحی درجای، علوم و مهندسی سطح ٣٦، (١٣٩٧).

[19] Breuer O, Sundararaj U (2004) Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites. Polymer Compos, 25(6):630–645.

[20] Bitter, J.G.A., 1964.A STUDY OF EROSION PHENOMENA.

[21] Wensink, H., and Elwenspoek, M.S., 2002. A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion.

[٢٢] رستگار زارع، محمد حسین. ١٣٨٤. فرسایش مواد و کنترل آن توسط مهندسی سطح (ترجمه). چاپ اول. انتشارات دانشگاه امام حسین (ع).