

Experimental Study on Erosion Properties of Polymeric Based Polyamide/Nano Clay Composites

Mehdi Haghi¹, Mohammadreza Shabgard¹, Gohar Ranjbari^{2*} 

¹ Department of Manufacturing Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: November 23, 2025

Revised: January 13, 2026

Accepted: January 24, 2026

ePublished: February 14, 2026

ABSTRACT

The high strength, Young modulus, wear resistance of particle-reinforced polymer-based composites as compared to pure polymers cause increasing application of this material group in aerospace and transportation industry. In many situations, the part life depends on the surface properties such as wear resistance and surface quality. Friction stir process (FSP) is a process that can reinforce the surface layer of polymers without affecting the bulk of it. This process can distribute the filler uniformly in a specific layer thickness of matrix. In this study, the effects of nanoparticle content (wt%), pressure and incident angle of particles on erosion rate of nano-composite layer, which is formed by friction stir process, were experimentally investigated. The Material used for the matrix of nano-composite was polyamide 6 (PA6). The nanoclay (cloisite 20A), at three content level of 2, 4, and 6wt%, was selected as reinforcing particles to increase the strength and wear resistance of fabricated nano-composite layer. The results of experiments indicated that at the low incident angles (15~30°) the maximum erosions resistance occurs in polyamide6/clay (6wt%) while at high incident angles (60~90°) polyamide 6/clay (2wt%) represented highest level of erosion resistance. In all of the samples, the erosion rate increased as the spraying pressure of nanoparticles elevated.

Keywords: polyamide 6, nano clay, nano-composite, erosion

How to cite this article

Haghi M, Shabgard M, Ranjbari G, Experimental Study on Erosion Properties of Polymeric Based Polyamide/Nano clay Composites. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(03):193-203.

*Corresponding author's email: ranjbari2024@iau.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: [0000-0001-8038-5243](https://orcid.org/0000-0001-8038-5243)



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۷۹۰۹-۲۴۷۷؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۲۰۳-۱۹۳: ۲۶(۰۳): ۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.4831/mme.2026.117765.82891

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



بررسی تجربی خواص سایش فرسایشی نانو کامپوزیت پایه پلیمری پلی آمید ۶ / نانو رس

مهدی حق^۱، محمدرضا شبگرد^۱، گوهر رنجبری^{۲*} 

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

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

چکیده

کامپوزیت های زمینه پلیمری تقویت شده با ذرات صلب توسط فرایند اصطکاک اغتشاشی در مقایسه با پلیمرهای تقویت نشده، دارای استحکام، مدول یانگ و مقاومت به سایش بالاتری میباشند که این باعث افزایش روزافزون کاربرد آنها در صنایع هوافضا و حمل و نقل گردیده است. در این پژوهش تاثیر درصد وزنی نانو ذرات، فشار و زاویه برخورد ذرات ساینده بر روی نرخ سایش فرسایشی لایه سطحی نانوکامپوزیتی تولید شده توسط فرایند اصطکاک اغتشاشی، به صورت تجربی بررسی شده است. پلی آمید ۶ به عنوان زمینه پلیمری و نانو خاک رس از نوع Closit20A با درصدهای وزنی ۲، ۴ و ۶ به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شده است. برای انجام آزمایش سایش فرسایشی از یک دستگاه پاشش ذرات ساینده استفاده گردیده است. نتایج نشان می دهد با تغییر زاویه برخورد ذرات ساینده، نرخ فرسایش به شدت تغییر می کند. در زوایای پایین (۳۰-۱۵ درجه)، نانوکامپوزیت ۶ درصد نانورس، بیشترین مقاومت فرسایشی را از خود نشان داد در حالی که در زوایای برخورد بالا (۹۰-۶۰ درجه)، نانوکامپوزیت ۲ درصد نانورس، مقاومت فرسایشی بهتری از خود نشان داد. با افزایش فشار پاشش ذرات ساینده، مشاهده گردید که در تمامی آزمایش ها نرخ سایش فرسایشی افزایش می یابد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

کلیدواژه ها: پلی آمید ۶- نانو خاک رس- نانو کامپوزیت- سایش فرسایشی

نحوه ارجاع به این مقاله

حق مهدی، شبگرد محمدرضا، رنجبری گوهر، بررسی تجربی خواص سایش فرسایشی نانو کامپوزیت پایه پلیمری پلی آمید ۶ / نانو رس، مهندسی مکانیک مدرس. ۲۰۳-۱۹۳: ۲۶(۰۳): ۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: ranjbari2024@iau.ac.ir

*شناسه ا رکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0001-8038-5243



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

در حوزه نانو تکنولوژی، نانو کامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. این مواد از دو یا چند جزء مجزا (مثل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها) تشکیل شده‌اند که یک یا چند جزء آن‌ها ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارد. در بین نانو کامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری معطوف است به طوری که سهم عمده‌ی بازار را در اختیار دارند. در سال‌های اخیر، نانوذرات به دلیل توانایی‌شان در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده، به‌طور فزاینده‌ای در جامعه کامپوزیت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱، ۲]. اندازه نانومتری این ذرات که منجر به نسبت سطح به وزن بالا تا بیش از ۱۰۰۰ متر مربع بر گرم و خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی فوق العاده‌ای شده است، آن‌ها را تقویت کننده‌های نانویی منحصر به فردی برای کامپوزیت‌ها تبدیل کرده است. نانوذراتی که به طور معمول در نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از: نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT)، نانولوله‌های کربنی تک دیواره (CNT)، نانوالیاف کربنی، مونتموریلونیت، نانوخاک‌رس‌ها، SiO_2 ، TiO_2 ، Al_2O_3 و نانوسیلیکا [۳]. در قطعات مهندسی، بار مکانیکی توسط کل قطعه تحمل می‌شود و سطح قطعه وظیفه محافظت از آن را در برابر پدیده‌های سطحی همچون اصطکاک، سایش و خوردگی بر عهده دارد. تخریب سطح قطعات در اکثر پدیده‌های مهندسی امری رایج است. این پدیده‌ها از سطح یا نواحی بسیار نزدیک به سطح آغاز شده و سبب تخریب تجهیزات مهندسی می‌شوند. یکی از مهمترین پدیده‌های استهلاک سطوح، سایش است. طبق آمار، خسارت ناشی از سایش ابزار و قطعات مهندسی در کشورهای پیشرفته انگلستان، آلمان و آمریکا به ترتیب ۱٪، ۲/۵٪ و ۱/۵۴٪ درصد تولید ناخالص ملی است که با توجه به حجم تولید در آن کشورها می‌توان به اهمیت فرایند سایش پی برد [۴، ۵]. این نوع سایش در اثر برخورد ذراتی سخت با سطح جامد حاصل می‌شود که در آن ذرات یا توسط جریانی از گاز حمل می‌شوند و یا درون مایعی روان وجود دارند که برخی اوقات، این نوع از سایش را فرسایش نیز می‌نامند و اغلب جهت ایجاد تمایز با آسیب‌هایی که در اثر ضربه مایع پرفشار و یا قطرات مایع به وجود می‌آید، آن را فرسایش ذرات جامد یا فرسایش در اثر برخورد جامد تعریف می‌کنند و اگر ذرات سخت توسط یک مایع حمل شوند سایش حاصله را فرسایش دوغابی می‌نامند [۶]. به طور کلی می‌توان گفت که مکانیزم‌های سایش فرسایشی در طول فرایند ثابت نیستند و پارامترهای سرعت، اندازه ذرات ساینده، شکل و زاویه مختلف برخورد ذرات ساینده نوع مکانیزم را تعیین می‌کنند. بیشتر و همکاران [۷] به بررسی پارامترهای موثر در فرسایش مواد توسط ذرات جامد پرداختند. آن‌ها مواد را به ۲ گروه ترد و شکل‌پذیر تقسیم نمودند و برای هر کدام از مواد ترد و شکل‌پذیر روابطی را

به دست آوردند که قادر بود میزان فرسایش به وجود آمده در سطوح را براساس زاویه برخورد، سرعت ذرات و جنس ذرات ساینده و قطعه‌کار پیش‌بینی نماید. جیمز لی و همکاران [۸] نانوالیاف کربن (NCF) و الیاف کربن (CF) را با پلیمر اپوکسی به روش فیلتراسیون آماده کردند. در این تحقیق مقاومت به فرسایش در اثر برخورد ذرات ساینده به نانو کامپوزیت Epoxy/NCF بسیار بهتر از کامپوزیت معمولی Epoxy/CF بود. سورشا و اسماعیل [۹] به مطالعه رفتار فرسایشی نانو کامپوزیت پلی آمید ۶۶ و پلی پروپیلن تقویت شده با خاک رس پرداختند آن‌ها نشان دادند که این نانو کامپوزیت در مقابل فرسایش دارای رفتار داکتیل بوده و بیشترین نرخ سایش آن تحت زاویه ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد. در حالی که بیشترین نرخ فرسایش نانو کامپوزیت‌های بدون ذرات خاک رس در زاویه ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد. همچنین آن‌ها نشان دادند که اندازه نانو ذرات خاک رس به بهبود فرسایش نانو کامپوزیت‌ها کمک می‌کند. مصلاهی پور و همکاران [۱۰] خواص سایشی کامپوزیت هیبریدی $\text{Al}/(\text{SiC}+\text{BNh})$ حاصل از فرایند اصطکاک اغتشاشی را بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که مقاومت سایشی کامپوزیت هیبرید تولید شده به دلیل حذف تخلخل و ایجاد دانه بندی ریز پس از فرایند FSP نسبت به کامپوزیت های تک ذره‌ای بالاتر است. نتایج تحقیقات مظاهری و همکاران [۱۱] نشان می‌دهد مقاومت سایشی نانوکامپوزیت $\text{AZ31}/\text{ZrO}_2$ در فرایند اصطکاک اغتشاشی ۱ و ۴ پاسه تحت تاثیر نانوذرات ZrO_2 و افزایش تعداد پاس‌ها می‌باشد. نرخ سایش نانوکامپوزیت تحت ۴ پاس فرایند اصطکاک اغتشاشی تقریباً نصف قطعه کار قبل از فرایند است. مظاهری و همکاران [۱۲] در کار دیگری برای تولید نانوکامپوزیت سطحی، نانوذرات SiO_2 را توسط فرایند اصطکاک اغتشاشی به آلیاژ آلومینیم Al6061 اضافه کرده و به این نتیجه رسیدند که مقاومت سایشی بعد از سه پاس فرایند، با و بدون ذرات SiO_2 به دلیل سختی بالا، ریزدانه‌گی قابل قبول و پراکندگی یکنواخت ذرات SiO_2 افزایش می‌یابد. میرصالحی و همکاران [۱۳] نانوکامپوزیت $\text{AA7075}/\text{ZrO}_2$ را به طور موفقیت آمیزی توسط روش اصطکاکی اغتشاشی تولید کرده و تاثیر سرعت چرخشی و تعداد پاس را بر روی رفتار مکانیکی و تریبولوژی سطح بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که کاهش شدید نرخ سایش تا ۶۲٪ به علت حضور نانوذرات سخت سرامیک، اثر تحمل بار این نانوذرات، کاهش سطح تماس پین و ماتریس با نانوذرات و کاهش شدید اندازه دانه حاصل شده است. بهینه سازی تولید AA7075 SHCs در فرایند اصطکاک اغتشاشی به روش تاگوچی توسط کانداسامی و همکاران [۱۴] انجام شد. آزمایش‌های سایش فرسایش مبتنی بر آرایه متعامد تاگوچی L_{27} برای نمونه کامپوزیت سخت S4 انجام شد. مطابق پژوهش ایشان، زاویه جت، سهم غالب ۶۸/۹٪ را در نرخ فرسایش دارد و پس از آن تعداد مش ذرات فرسایش (۱۶/۵٪)، زمان برخورد (۷/۵٪) و فشار جت

ماده تقویت کننده در این کار تحقیقی مورد استفاده قرار گرفت. مراحل تهیه نمونه‌ها توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بصورت زیر بوده است:

- پیش از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، شیارهای عرض ۱ و عمق ۶ میلیمتر به موازات لبه کناری قطعه کار 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 فرآیند اصطکاکی اغتشاشی وارد قطعه کار شده و در امتداد شیار ایجاد شده، به منظور توزیع نانورس در زمینه پلی‌آمید حرکت داده شد.
- برای انجام آزمایش‌های مربوط به فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و تولید نانوکامپوزیت سطحی پلی-آمید/نانورس از یک ماشین فرز انیورسال ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با مدل FP4M استفاده شد.

۲-۲ تجهیزات آزمایش

در این مطالعه، با توجه به کارهای انجام شده قبل، از ابزار با پین استوانه‌ای استفاده گردید. جهت ایجاد توزیع همگن در نانوکامپوزیت تولیدی، پین استوانه ابزار با گام ۱ میلیمتر رزوه زده شد. ابزار ساخته شده دارای پین به قطر ۹ میلیمتر، ارتفاع ۶ میلیمتر و شانه به قطر ۳۰ میلیمتر می‌باشد. با توجه به لزوم بسته بودن سطح بالایی شیار ماتریس جهت جلوگیری از خروج مواد پرکننده، روش‌های پیشنهاد شده در کارهای قبلی، منجر به نتایج مطلوب نشد بنابراین از ابزاری با طراحی جدید استفاده گردید. قطر شانه قابل دوران و غیرقابل دوران این ابزار به ترتیب ۳۰ و ۷۰ میلیمتر و قطر و طول پین آن به ترتیب ۶ و ۹ میلیمتر در نظر گرفته شد. سرعت دورانی ابزار از ۱۲۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب گردید. جهت جلوگیری از تمرکز حرارت و ذوب شدن قطعه کار در حین فرایند از دو سرعت پیشروی ۱۲۵ و ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه استفاده گردید. شکل ۱ مکانیزم شانه‌ی غیر قابل دوران ابزار را در فرایند اصطکاکی اغتشاشی نشان می‌دهد.



شکل ۱ مکانیزم شانه‌ی غیر قابل دوران در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

Fig.1 Non rotary tool shoulder of friction stir process

(۵/۹٪) با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) به دست آمده‌اند. یک لایه سطحی نانوکامپوزیت هیبریدی بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V (TiC)، اکسید زیرکونیوم (ZrO₂) و گرافیت (Gr) با نسبت‌های وزنی مختلف توسط مایاکانان و همکاران [۱۵] ساخته شد. فرآیند با شیب ابزار ۳ درجه، سرعت دورانی ۷۵۰ RPM و سرعت پیشروی ۲۰ mm/min انجام شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد با ثابت نگه داشتن گرافیت، میزان سایش به شدت تحت تأثیر نسبت TiC:ZrO₂ قرار می‌گیرد. آلیاژ FSP شده معمولی، میزان سایش ۹/۶۸۸ mm³ را نشان داد، در حالی که ترکیب بهینه (۲۰٪ TiC-60٪ Gr) به ۲/۹۵۲۶ mm³ رسید که ۴۹/۶ درصد کاهش را نشان می‌دهد. ذرات فرسایشی اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) در یک بررسی جامع توسط رانتا کومار و همکاران [۱۶] بر روی AA7075 کامپوزیت سطحی برای ارزیابی سایش فرسایشی ناشی از برخورد ذرات جامد استفاده شدند. نمونه‌های AA7075-T6 با سرعت فرسایش ۱۰۰ m/s و دبی ۳/۳ گرم بر دقیقه مورد مطالعه قرار گرفتند، ذرات ساینده با زاویه تماس ۹۰ درجه، میکروتِرک‌ها را ایجاد کردند. بر اساس الگوریتم GOVI پارامترهای بهینه فرآیند برای به حداقل رساندن نرخ فرسایش با ویژگی‌های سطحی بهتر، چرخش ابزار -۷۷۰ RPM و سرعت پیشروی ابزار -۴۵ mm/min است. موهانراج و همکاران [۱۷] جهت بهبود خواص فرسایشی، کامپوزیت‌های سطحی AA7075 (SCs) تقویت شده با ذرات سرباره فولاد با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساختند تا رفتار فوق را بهبود بخشند. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ مبتنی بر پارامترهای ورودی زاویه جت، فاصله، فشار، زمان برخورد و تعداد مش ذرات فرسایشی ترکیب بهینه‌ای برای دستیابی به حداقل فرسایش با حفظ یکپارچگی سازه به دست آوردند.

با استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت که یکی از روش‌های مهم در بهبود مقاومت سایشی پلیمرها، ایجاد لایه نانو کامپوزیتی به روش اصطکاکی اغتشاشی است. با مراجعه به مراجع می‌توان دریافت که در زمینه رفتار سایش فرسایشی لایه نانو کامپوزیتی تولید شده به روش FSP با در نظر گرفتن تأثیر همزمان متغیرهای درصد وزنی نانو ذرات رس، زاویه برخورد و فشار پاشش ذرات ساینده پژوهشی صورت نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه تجربی بررسی تأثیر متغیرهای ورودی مذکور بر روی رفتار فرسایشی نانوکامپوزیت‌های پلی‌آمید/نانورس تولید شده به روش FSP می‌باشد.

۲- مواد و تجهیزات

۲-۱ آماده سازی نمونه‌ها

ماتریس نانوکامپوزیت، از ورق‌های پلی‌آمید ۶ با ضخامت ۱۰ میلیمتر و نام تجاری TECAST از شرکت Ensinger کشور آلمان تامین شده است. ذرات نانورس از شرکت نوترینو کشور ایران بعنوان

جدول ۱ متغیرهای تنظیمی فرایند

Table 1 Experimental condition and process variables

Parameter	The value of the parameters
Machine	Sandblast (AFM)
Temperature	20±3°C
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%

لازم به ذکر است، ذرات نانورس در تصاویر SEM بصورت ذرات سفید رنگ قابل رویت می‌باشند. با افزایش درصد نانوذرات، فاصله بین آن‌ها کمتر شده و خواص مکانیکی کامپوزیت را تا حدی بهبود می‌بخشد. ولی با افزودن مقادیر بیشتر نانو ذرات، به دلیل وجود انرژی سطحی بالا بین نانو ذرات، ذرات کلوخه‌ای می‌شوند. کلوخه‌ای شدن ذرات باعث حساسیت به ضربه در پلیمر شده و باعث افت خواص مکانیکی کامپوزیت از جمله کاهش مقاومت به ضربه می‌شود[۱۸].

۲-۳ بررسی توزیع نانورس در ماتریس پلی آمید ۶ با استفاده از الگوهای

XRD

در این تحقیق از دستگاه دیفراکتومتر اشعه ایکس مدل D5000 (Step size=0.02°, 2θ=3°-50°, Step time= 0.3 s) ساخت شرکت زیمنس آلمان برای دستیابی به الگوی انکسار اشعه ایکس نمونه های نانوکامپوزیتی استفاده شده است. نتایج آزمون XRD مربوط به پلی آمید خالص، ذرات نانو رس و نانوکامپوزیت‌های پلی آمید/نانورس در شکل های ۳ تا ۷ آورده شده است. مطابق شکل ۳ در دیاگرام پیک مشخصه نانورس که تقریباً در ۳/۸ درجه می‌باشد، با استفاده از قانون براگ فاصله صفحات تقریباً ۲۴/۲ آنگستروم محاسبه شده است. در شکل ۵ در نمودار XRD نانوکامپوزیت پلی آمید ۶ با ۲٪ نانورس، پیک مشخصه نانوذرات رس (زاویه ۳/۸) قابل تشخیص نیست، یعنی صفحات رس موجود در ساختار نانوکامپوزیت با فواصل بیش از حالت اولیه نانورس یعنی بیش از ۲۴.۲ Å از هم فاصله گرفته‌اند و در پلی آمید زمینه پخش گردیده‌اند. پیکی که در حدود زاویه ۲۲ درجه مشاهده می‌شود مربوط به تبلور پلی آمید می‌باشد. در شکل ۳، پیک در زاویه 2θ=3.8° برای نانو خاک رس خالص مشاهده می‌شود که در الگوی پراش پرتوی ایکس نانوکامپوزیت‌های ۲٪، ۴٪ و ۶٪ دیده نمی‌شود (شکل‌های ۵ الی ۷). این امر نشان می‌دهد که نانو خاک رس به شکلی مناسب در ماتریس پلی آمید ۶ در نانوکامپوزیت پراکنده شده است[۱۹].

برای انجام آزمایش سایش فرسایشی بر روی نمونه‌ها از ذرات سیلیس با اندازه ۱۵۰-۱۸۰ میکرومتر استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها از دستگاه سختی سنج مدل ZHV 10 با الماس فرورونده ویکرز (هرمی با زاویه ۱۳۶°) استفاده شد و بیش از سه نقطه از نمونه تعیین گردید که متوسط نتایج آن‌ها به عنوان معیار سختی سطح در نظر گرفته شد. جهت توزین ذرات نانورس از ترازوی دیجیتال مدل CP 224S ساخت شرکت Sartorius استفاده گردید و برای 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.

دستگاه SEM مورد استفاده در این کار تحقیقی با نام تجاری MIRA3 FEG-SEM ساخت شرکت Tescan کشور چک می‌باشد. این دستگاه دارای فیلمان انتشار میدانی (Field Emission) بوده و در دو حالت خلا بالا، مناسب برای نمونه‌های رسانا و خلا پایین، مناسب برای نمونه‌های نارسانا کار می‌کند. وضوح این دستگاه تا یک نانو متر بوده و قدرت بزرگنمایی آن تا یک میلیون برابر با اعمال ولتاژ ۳۰ کیلوولت می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های سایش فرسایشی از یک دستگاه سندپلاست دارای محدوده فشار کاری قابل تنظیم از صفر تا شش بار استفاده گردید.

۲-۳ طراحی آزمایش‌ها

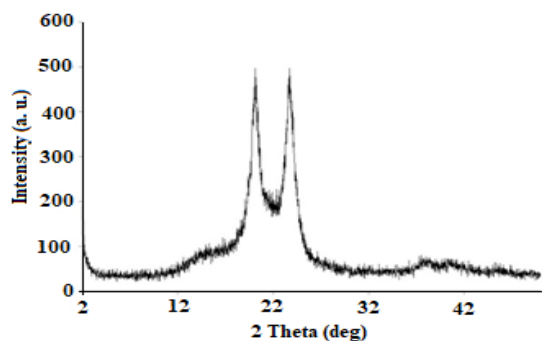
در بررسی رفتار سایش فرسایشی، پارامترهای مختلفی موثر هستند و میزان سایش مواد، تابعی از شرایط سایش می‌باشد که عبارتند از سرعت، زاویه برخورد، جنس و اندازه ذرات ساینده و همچنین پارامترهای متالورژیکی ماده تحت سایش همچون ساختار میکروسکوپی، الیاف و ذرات استفاده شده، فازها و دانه‌بندی و نیز سایر پارامترها مانند قطر داخلی نازل و فاصله آن از سطح ماده تحت سایش و سایر عوامل. با در نظر گرفتن این مطلب، در این مطالعه به هنگام انجام آزمایش‌های تجربی، عوامل موثر بر روی سایش فرسایشی به عنوان پارامترهای ورودی در چندین سطح مختلف انتخاب شده است. که این پارامترهای تنظیمی به همراه سطوح تغییرات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش در مجموع ۳۲ آزمون بصورت فول فاکتوریل انجام شده است که جنس قطعه کار تحت سایش فرسایشی، فشار پاشش ذرات ساینده و زاویه برخورد ذرات ساینده به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده‌اند.

۳- بحث و بررسی

۱-۳ بررسی تصاویر SEM نمونه های تولید شده توسط فرآیند

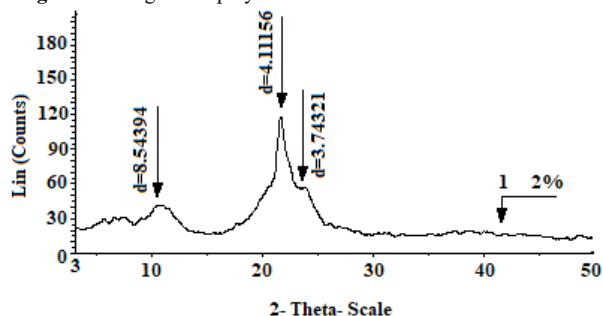
اصطکاکی اغتشاشی

برای مشاهده نحوه پراکندگی نانو ذرات رس در زمینه پلی آمید ۶، تصاویر SEM از نمونه‌ها تهیه شد. شکل ۲ تصاویر SEM برای نانو کامپوزیت پلی آمید ۶/ نانو خاک رس با ۶٪ وزنی را نشان می‌دهد.



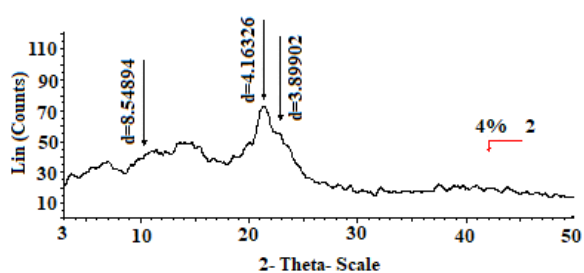
شکل ۴ نمودار پراش پرتو ایکس پلی آمید ۶ خالص

Fig.4 XRD diagram of polyamide 6



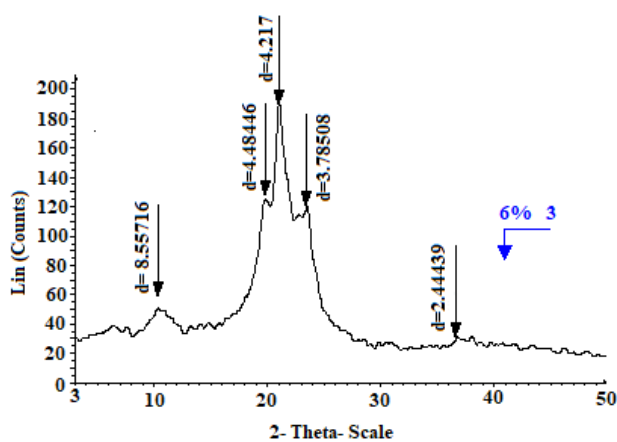
شکل ۵ نمودار پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت پلی آمید۶ / ۲wt% نانو خاک رس

Fig.5 XRD diagram of polyamide6/clay (2wt%)



شکل ۶ نمودار پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت پلی آمید۶ / ۴wt% نانو خاک رس

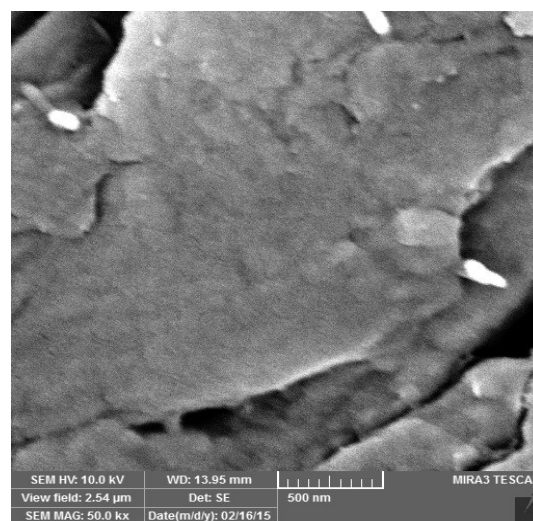
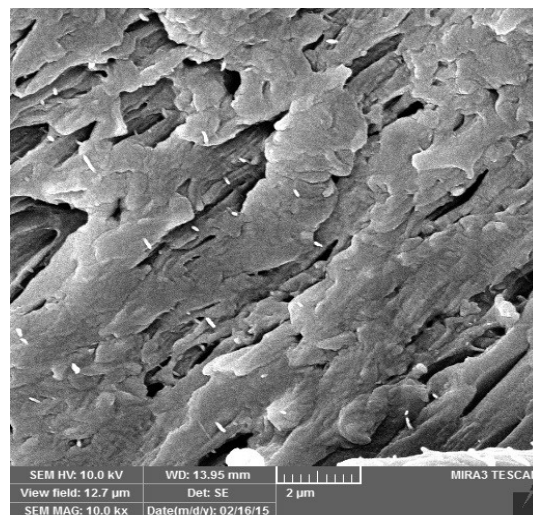
Fig.6 XRD diagram of polyamide6/clay (4wt%)



شکل ۷ نمودار پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت پلی آمید۶ / ۶wt% نانو خاک رس

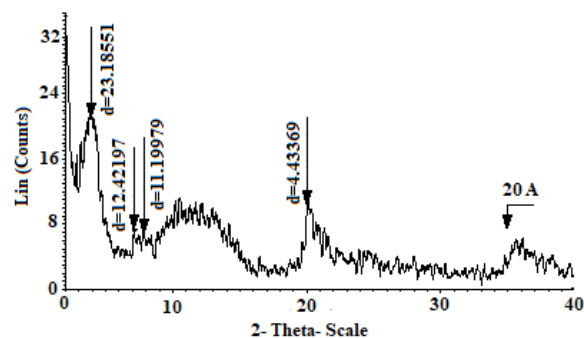
Fig.7 XRD diagram of polyamide6/clay (6wt%)

دوره ۲۶، شماره ۳، اسفند ۱۴۰۴



شکل ۲ نمونه ۶% وزنی نانورس مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰ و ۱۰۰۰برابر

Fig.2 SEM image of polyamide6/clay (6wt%) with 500 and 1000x magnification



شکل ۳ نمودار پراش پرتو ایکس نانورس Closite20

Fig.3 XRD diagram of nano clay Closite20

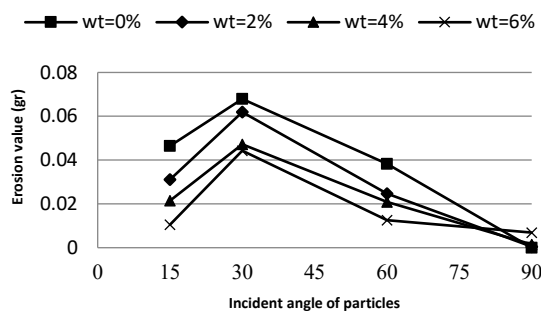
فرسایش شدیداً به زاویه برخورد وابسته است. طبق تئوری بیتردو نوع مکانیزم ترد و نرم برای برداشت ماده در سایش فرسایشی معرفی شده است [۲۰].

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

$$W_C = \frac{M}{2e} (V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \alpha) \quad (3)$$

$$W = W_D + W_C \quad (4)$$

که در آن w میزان سایش فرسایشی 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 ضریب سایش فرسایشی ناشی از برش [۲۱].



شکل ۹ مقایسه مقدار سایش نمونه‌ها در فشار ۴ بار

Fig.9 Comparison of erosion rate in pressure of 4 bar

طبق رابطه (۴) میزان سایش فرسایشی حاصل جمع مکانیزم برداشت ترد (W_D) و مکانیزم برداشت نرم (W_C) می باشد. همانطور که در روابط (۲) و (۳) قابل مشاهده است، در زوایای برخورد کم چون 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) می باشد. 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 رفته رفته $\cos(\alpha)$ به سمت صفر میل کرده و در نتیجه مقدار فرسایش ناشی از مکانیزم ترد (W_D) افزایش یافته و مکانیزم برداشت اصلی ماده فرسایش ناشی از ایجاد میکرو ترک‌ها و شکست می باشد. لذا در زوایای برخورد بالا (۶۰-۹۰) 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.

شکل‌های ۳-۷ نشان می‌دهند که وجود کریستالهای فاز α پلی آمید ۶ باعث انعکاس در زوایای حدودی $2\theta = 20^\circ$ و $2\theta = 24^\circ$ می‌شود. می‌توان علت کاهش شدت پیک‌های فاز α را شکسته شدن فاز α به کریستالهای با اندازه کوچکتر در اثر بیشتر شدن اغتشاش دانست. کاهش اندازه کریستال‌های فاز α باعث افت شدت پیک الگوی XRD می‌گردد. از سوی دیگر نانورس به عنوان هسته‌های جوانه زنی نامتجانس کریستال‌های فاز α محسوب می‌شود. با افزایش اغتشاش توزیع نانورس در ماتریس همگن‌تر شده و از این رو کریستال‌های فاز α ریزتر خواهد شد به طوری که جوانه زنی و رشد کریستالهای فاز α به ترتیب افزایش و کاهش یافته و در نتیجه شدت پیک‌های فاز α کاهش می‌یابد.

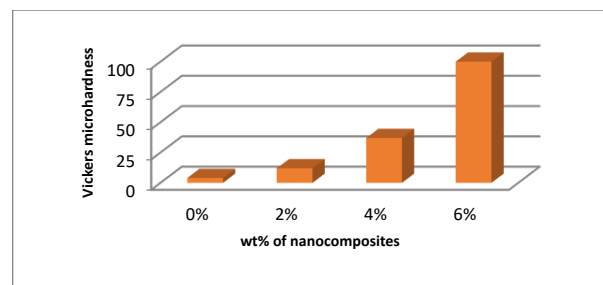
۳-۳ تاثیر درصد وزنی نانورس بر روی سختی نانو کامپوزیت‌ها

فرایند اندازه گیری میکرو سختی سطحی کامپوزیت‌های تولیدی با استفاده از الماس فرورونده ویکرز با بار ۱۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه صورت گرفت. مقدار میکروسختی نمونه‌ها با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید:

$$VMH = 0.0018544 \times M/d^2 \quad (1)$$

که در آن، M نشان دهنده بار بر حسب گرم و d میانگین دو قطر اثر فرورفتگی بر حسب میلیمتر می‌باشند.

برای افزایش دقت نتایج بدست آمده، تست‌های میکروسختی سنجی در سه نقطه انجام گرفته و میانگین نتایج حاصل از سه تست به عنوان میکروسختی نانوکامپوزیت مزبور در نظر گرفته شد. مقادیر میانگین میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



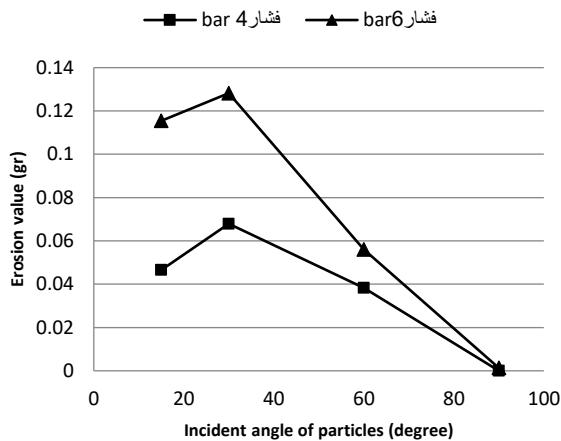
شکل ۸ مقدار میکروسختی نمونه‌ها بر حسب ویکرز

Fig.8 Vickers microhardness of samples

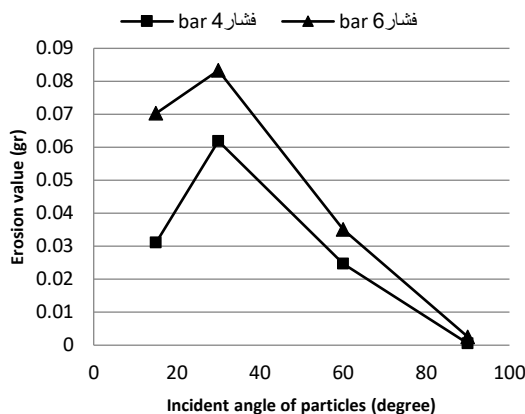
مطابق شکل ۸ مقدار میکروسختی پلیمر خالص، کمترین مقدار و نانوکامپوزیت ۶٪ نانورس بیشترین مقدار در میان نانوکامپوزیت‌های تولیدی می‌باشد.

۴-۳ تاثیر زاویه برخورد و درصد وزنی نانو ذرات بر نرخ فرسایش

شکل ۹ تغییرات نرخ سایش فرسایشی را در زاویه برخورد ذرات ساینده برای کامپوزیت ۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪ وزنی نانورس در فشار ۴ بار نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان



شکل ۱۰ تاثیر فشار بر روی نرخ فرسایش پلی آمید خالص
Fig.10 The influence of pressure on the erosion rate of polyamide



شکل ۱۱ تاثیر فشار بر روی نرخ فرسایش نانو کامپوزیت ۲٪ وزنی نانورس
Fig.11 The influence of pressure on the erosion rate of polyamide6/clay (2wt%)

بیشترین نرخ فرسایش ثابت باقی می ماند. زیرا فشار پاشش ذرات ساییده با سرعت برخورد ذرات متناسب می باشد و به هنگام افزایش فشار پاشش ذرات ساییده، انرژی سینتیکی ذرات افزایش پیدا کرده و باعث افزایش نرخ فرسایش می شود. مطابق با تئوری هوچینگز (رابطه ۵) سایش فرسایشی با توان دوم سرعت برخورد ذرات متناسب می باشد. به همین دلیل با افزایش سرعت ذرات ساییده نرخ فرسایش نیز افزایش پیدا می کند [۱۷]. با افزایش فشار پاشش ذرات ساییده، سرعت حرکت ذرات افزایش یافته و طبق رابطه ۵، میزان سایش فرسایشی (E) با سرعت ذرات رابطه مستقیم دارد.

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (5)$$

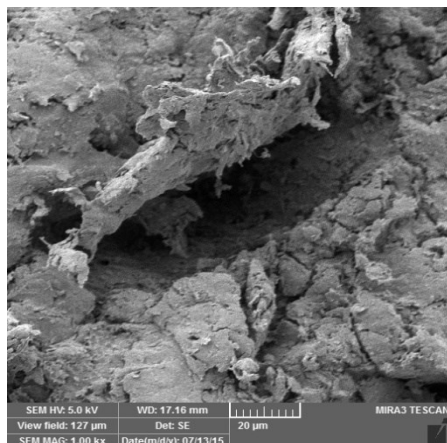
در این رابطه، E نرخ فرسایش، ρ چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب) ماده، U سرعت برخورد ذرات ساییده (متر بر ثانیه) و H سختی ماده می باشد [۲۴].

با توجه به توضیحات بالا همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، همه نمونه های تحت آزمایش سایش فرسایشی در این پژوهش دارای رفتار داکتیل هستند، چون بیشترین نرخ سایش فرسایشی در زاویه ۳۰ درجه اتفاق افتاده است. علت این امر را می توان اینگونه بیان کرد که، مکانیزم غالب سایش فرسایشی در مواد نرم و داکتیل، مکانیزم برشی می باشد و مکانیزم برشی در زوایای برخورد کم اتفاق می افتد در نتیجه اگر نمونه ها انعطاف پذیری (سختی و استحکام) بیش از این داشتند، بیشترین نرخ سایش در زوایای پایین تر از ۳۰ درجه و اگر نمونه ها انعطاف پذیری کمتر از این داشتند، بیشترین نرخ سایش در زوایای بالاتر از ۳۰ درجه رخ می داد [۲۲].

کامپوزیت پلی آمید ۶ / ۶٪ نانورس به علت سختی بیشتر نسبت به بقیه کامپوزیت ها، در زوایای برخورد کم (۳۰-۱۵ درجه) مقاومت بیشتری در مقابل برش ذرات ساییده از خود نشان می دهد و نرخ فرسایش کمتری نسبت به بقیه نمونه ها 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 کامپوزیت ها از خود نشان می دهد. بعلاوه، حداکثر نرخ فرسایش در نمونه ها در زاویه ۳۰ درجه رخ داده است. از آنجایی که پلیمر خالص سختی کمتری نسبت به نانوکامپوزیت ها دارد، در زوایای برخورد کم (۳۰-۱۵) میزان مقاومت به سایش کمتری از خود نشان می دهد و در نتیجه نرخ فرسایش بیشتری دارد در حالی که در زوایای برخورد بالا (۹۰-۶۰) به علت انعطاف پذیری بیشتر و تردی کمتر، مقاومت فرسایشی بیشتری را از خود نشان می دهد. علت اینکه مواد نرم در زوایای برخورد کم و مواد سخت در زوایای برخورد زیاد مقاومت فرسایشی کمتری از خود نشان می دهند را می توان اینگونه نیز توجیه نمود که نمونه های دارای سختی کمتر انعطاف پذیری بیشتری داشته و به هنگام اعمال ضربه در مقابل تغییر شکل پلاستیک مقاومت نمی کنند ولی با توجه به نرمی بالا در مقابل برش مقاومت کمتری دارند. در حالی که در مواد سخت تر به دلیل عدم انعطاف پذیری و نداشتن تغییر شکل پلاستیک، هنگام اعمال ضربات دارای انرژی جنبشی بالا، میکرو ترک هایی به وجود آمده و با به هم پیوستن این میکرو ترک ها قسمت هایی از سطح به صورت چاله جدا می گردند [۲۳].

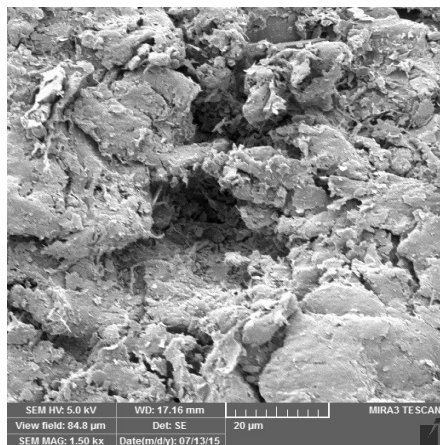
۳-۵ تاثیر فشار پاشش ذرات ساییده بر نرخ فرسایش

شکل های ۱۰ و ۱۱ تاثیر فشار پاشش بر روی نرخ سایش در زوایای مختلف را نشان می دهد. همانطور که شکل های مذکور نشان می دهند در تمامی زوایای برخورد با افزایش فشار، میزان سایش فرسایشی افزایش می یابد ولی شکل نمودار و زاویه مربوط به



شکل ۱۴ تصویر SEM نمونه با ۶ درصد وزنی نانورس بعد از فرآیند سایش در زاویه ۹۰°

Fig.14 SEM image of polyamide6/clay (6wt%) after process, incident angle=90°



شکل ۱۵ تصویر SEM نمونه با ۶ درصد وزنی نانورس بعد از فرآیند سایش در زاویه برخورد ۹۰°

Fig.14 SEM image of polyamide6/clay (6wt%) after process, incident angle=60°

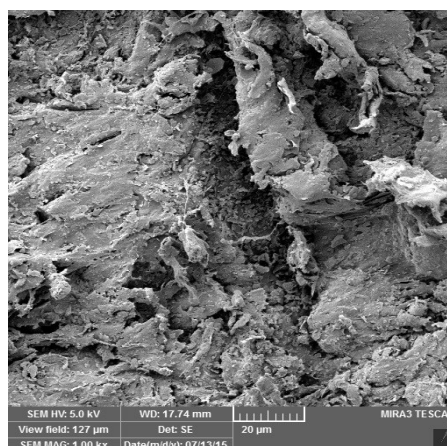
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر درصد وزنی نانو ذرات رس، زاویه برخورد و فشار پاشش ذرات ساینده بر روی نرخ سایش فرسایشی نانو کامپوزیتهای سطحی پلی آمید ۶ / نانو ذرات رس تولید شده توسط فرایند اصطکاک اغتشاشی پرداخته شده و نتایج زیر بدست آمده است:

- در بررسی نتایج XRD از نانوکامپوزیت، پلی آمید ۶ / نانورس، پیک مشخصه ی نانوذرات رس در زاویه ۳/۸° می باشد که نشان می دهد فرآیند اصطکاک اغتشاشی فاصله صفحات رس را نسبت به حالت اولیه اش افزایش داده است.
- افزودن نانوذرات رس بطور محسوسی سبب افزایش سختی نمونه های کامپوزیتی می گردد. این سختی تاثیر قابل ملاحظه ای در مقاومت به سایش فرسایشی با مکانیزم برشی در نانوکامپوزیت تولید شده دارد. با تاکید بر این نکته در زاویه برخورد ۳۰° ذرات ساینده که

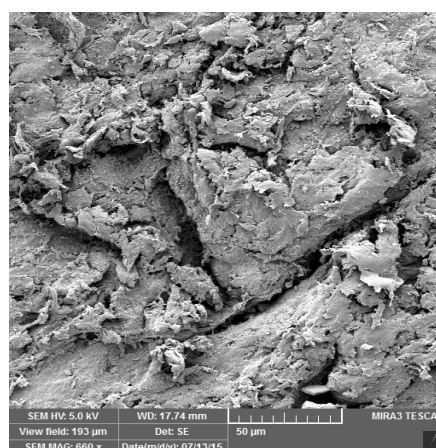
۳-۶ بررسی تصاویر SEM نمونه های بعد از فرآیند سایش

شکل های ۱۲ تا ۱۵ تصاویر SEM نمونه های با ۶ درصد وزنی نانورس بعد از فرآیند سایش به ترتیب در زاویه های برخورد ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه را نشان می دهد. همان گونه که در تصاویر مشخص است در زاویه های برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه، شیارهای ایجاد شده نشان دهنده این مطلب است که بیشتر فرآیند سایش بصورت مکانیزم برشی اتفاق افتاده است؛ در زاویه برخورد ۶۰ درجه عمق شیار ایجاد شده نسبت به زوایای برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه بصورت محسوس افزایش یافته است که نشان دهنده این واقعیت است که در زاویه برخورد ۶۰ درجه فرآیند سایش هم بصورت برشی و هم شکست است؛ در زاویه برخورد ۹۰ درجه حفره های ایجاد شده نشان می دهند که بیشتر فرآیند سایش بصورت شکست اتفاق افتاده است.



شکل ۱۲ تصویر SEM نمونه با ۶ درصد وزنی نانورس بعد از فرآیند با زاویه برخورد ۱۵°

Fig.12 SEM image of polyamide6/clay (6wt%) after process, incident angle=15°



شکل ۱۳ تصویر SEM نمونه با ۶ درصد وزنی نانورس بعد از فرآیند با زاویه برخورد ۳۰°

Fig.13 SEM image of polyamide6/clay (6wt%) after process, incident angle=30°

[6] M. H. Pol, G. H. Liaght, F. Hajiarazi, "Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012 (in Persian)

[7]. Bitter, J.G.A., 1964. A study of Erosion Phenomena.

[8]. S. Heo, H. Jang, S. Mallesh, D. Hong, B. Kwak, J. Lee, & Nam, Y. Wing-Shaped Leading-Edge Stealth Composites Using an Over-Expanded Honeycomb Core and a Periodic Pattern Etched on Ni-Coated Glass Fabric for Lightning Strike Protection. 2024

[9]. Suresha B and Mphammad Ismail. *Journal of Manufacturing Engineering*, June, 2014, Vol.9, Issue mechanical and erosive wear behaviour of clet filled polyamide66/polypropylene nanocomposites.

[10] M. Mosallae, S. A. Daneshgar, Improvement of wearing property of Al/ (SiC+BNh) surface hybrid composite fabricated by friction stir processing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 381-389, 2017 (in Persian)

[11] Y. Mazaheri, M.M. Jalilvand, A. Heidarpour, & A. R. Jahani. Tribological behavior of AZ31/ZrO₂ surface nanocomposites developed by friction stir processing. *Tribology International*, 143, 2020. doi: [10.1016/j.triboint.2019.106062](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106062)

[12] Y. Mazaheri, A. Heidarpour, M. M. Jalilvand, & M. Roknian. Effect of friction stir processing on the microhardness, wear and corrosion behavior of Al6061 and Al6061/SiO₂ nanocomposites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(8), 4826-4837. 2019 doi: [10.1007/s11665-019-04260-3](https://doi.org/10.1007/s11665-019-04260-3)

[13] A. Jamali, & S. E. Mirsalehi. Production of AA7075/ZrO₂ nanocomposite using friction stir processing: metallurgical structure, mechanical properties and wear behavior. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 55-69, 2022. doi: [10.1016/j.cirpj.2021.12.008](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.12.008)

[14] S. Kandasamy, P. Rathinasamy, N. Nagarajan, D. Karumalai, M. Thangamuthu, & M. Palaniappan. 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), 2022. doi: [10.1080/01694243.2021.1929018](https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1929018)

[15] M. Suresh, & S. Mayakannan, S. Optimization of wear behavior in Ti-6Al-4V hybrid nanocomposites

بالاترین میزان سایش در همه نانو کامپوزیت‌ها می‌باشد، کمترین میزان برداشت ماده از نمونه نانو کامپوزیتی با ۶ درصد نانورس اتفاق می‌افتد.

- بیشترین سایش فرسایشی نمونه‌ها در زاویه ۳۰° اتفاق می‌افتد، که نشان می‌دهد این نانو کامپوزیت در مقابل فرسایش دارای رفتار داکتیل بوده و مکانیزم سایش فرسایشی غالب در نمونه‌ها مکانیزم برشی است.
- میزان سایش فرسایشی نمونه‌ها به زاویه برخورد ذرات ساییده وابسته بوده و در زوایای برخورد کم (۳۰° - ۱۵°) پلیمرخالص و نانو کامپوزیت با ۲ درصد وزنی نانورس کمترین و در زوایای برخورد زیاد (۹۰°) نانو کامپوزیت با ۶ درصد وزنی نانورس کمترین مقاومت فرسایشی را از خود نشان دادند.
- افزایش فشار پاشش ذرات ساییده همواره در تمامی نمونه‌ها موجب افزایش سایش فرسایشی قطعات می‌گردد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافع برای اظهار وجود ندارد.
منابع

[1]. M. Omid, "Experimental study of mechanical properties and shrinkage behavior of PP/CaCo₃/Clay nanocomposites. ", department of mechanical engineering, Tabriz university, Tabriz, Iran. 1392. (In Persian)

[2] M. Habibneghad korayem, "Nanomaterials (Definitions, Properties, Production Methods and Applications) ", Farandish publication, 1386(In Persian)

[3]. A. Einstein, "Investigation on theory of Brownian motion. " New York. PP.249-260, 1956.

[4] H. Orang, "Effect of adding calcium carbonate nanoparticles (with different weight percentages) on the mechanical properties of polypropylene/calcium carbonate nanocomposites", department of mechanical engineering, Tabriz university, Tabriz, Iran. 1388. (In Persian).

[5]. T. A. Osswald, L.S. Turng, P. J. Gramann, " Injection Molding Handbook", Hanser Publication. P. 346-347, 2002.

- [20] M.Y.A Fuad., H. Hanim, R. Zarina., Z. A. Mohd Ishak, and A. Hassan. "Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites – effects of processing techniques and maleated polypropylene compatibiliser." *Express Polymer Letters*. 10:611-620. 2010, [DOI: 10.3144/expresspolymlett.2010.76](https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2010.76)
- [21]. I. Kemal, A. Whittle, R. Burford., T. Vodenitcharova, and M. Hoffman, "Toughening of unmodified polyvinylchloride through the addition of nanoparticulate calcium carbonate. *Polymer*." 50:4066-4079,2009.[doi:10.1016/j.polymer.2009.06.028](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.06.028)
- [22]. D.R Paul, L.M Robeson, "Polymer nanotechnology: " nanocomposites. *Polymer*, [doi:10.1016/j. polymer. 04.017, 2008](https://doi.org/10.1016/j.polymer.04.017, 2008).
- [23] H. Wensink., and M.S Elwenspoek. "A closer look at the ductile- brittle transition in solid particle erosion".2002.[doi:10.1016/S00431648\(02\)00223-5](https://doi.org/10.1016/S00431648(02)00223-5)
- [24] M. H. Rastegar Zare, "Erosion of Materials and Its Control by Surface Engineering " (Translation), First Edition. Imam Hossein University Press. 2005(In Persian)

- reinforced with TiC, ZrO₂, and graphite using friction stirprocessing.2025 [doi:10.17515/resm2025-679me0213rs](https://doi.org/10.17515/resm2025-679me0213rs)
- [16] A. Khan, P. S. R. Kumar, V. Vignesh & P.M. Mashinini. Investigation of Surface Erosion Characteristics of AA7075–Nano-hybrid Surface Composite using COVI Gene Algorithm. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 11(1), 30.2025 [doi:10.1007/s40735-025-00954-5](https://doi.org/10.1007/s40735-025-00954-5)
- [17] K. Suganeswaran, S. R. Nathan, R. Vani & T. Mohanraj. Erosion Parameter Optimization of AA7075 Surface Composites with Steel Slag: A Response Surface Methodology Approach for Aircraft Fuselage Applications. *Surfaces and Interfaces*, 107117.2025 [doi:10.1016/j.surfin.2025.107117](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107117)
- [18] Kerner EH, "The elastic and thermoelastic properties of composite Media. " *Proc Phys Sco B*;69:808-13, 1956
- [19] A. Ciullo, Peter, "Industrial minerals and their uses: a handbook and formulary", Noyes Publication. P. 113-121. 1996.