



## بررسی اثر افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیوم بر خواص تریبولوژیکی PA6/NBR

مسعود سعیدی<sup>۱</sup>، نصراله بنی مصطفی عرب<sup>۱\*</sup>، محمدرضا نخعی<sup>۲</sup>، قاسم نادری<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

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

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱ بهمن ۱۴۰۳

پذیرش: ۶ اسفند ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

تریبولوژی

ترموپلاستیک الاستومر

پلی‌آمید ۶

نیتریل بوتادین رابر

کاربید سیلیسیوم

### چکیده

کامپوزیت‌های پایه پلیمری به ویژه کامپوزیت‌های با پایه پلی‌آمید امروزه از اهمیت زیادی در کاربردهای مهندسی برخوردار هستند. یکی از مباحث مهم در عمر مفید و کارایی این پلیمرها مقاومت در برابر فرسایش و به طور کلی خواص تریبولوژیکی آنها است. این مقاله به بررسی اثر نانو ذرات کاربید سیلیسیوم بر خواص تریبولوژیکی PA6/NBR پرداخته است. بدین منظور ترکیب‌های مختلف با مقادیر متفاوت NBR و SiC ساخته شد. درصد وزنی NBR از ۱۰ تا ۵۰ و درصد وزنی SiC از ۱ تا ۵ درصد انتخاب شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمون‌های فرسایش، ضریب اصطکاک و سختی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش در درصد NBR، نرخ سایش را تا ۷۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیوم تاثیر مثبتی بر خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت مورد مطالعه داشت به طوری که برای نمونه‌های با مقدار ثابت ۳۰ درصد NBR، تغییر درصد وزنی SiC از صفر تا ۵ درصد، باعث افزایش سختی تا ۱۱٪، کاهش نرخ فرسایش تا ۳۰٪ و کاهش ضریب اصطکاک تا ۲۸٪ گردید.

## Investigating the effect of adding silicon carbide nanoparticles on tribological properties of PA6/NBR

Masoud Saeidi<sup>1</sup>, Nasrollah Bani Mostafa Arab<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Nakhaei<sup>2</sup>, Ghasem Naderi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Mechanical Engineering group, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

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

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 20 January 2025

Accepted: 24 February 2025

#### Keywords:

Tribology

Thermoplastic Elastomer

Polyamide 6

Nitrile Butadiene Rubber

Silicon Carbide

### Abstract

Nowadays polymer-based composites, especially polyamide-based composites, have found great importance in engineering applications. One of the important issues in the useful life and efficiency of these polymers is their resistance to erosion and their tribological properties in general. This article investigates the effect of silicon carbide nanoparticles on the tribological properties of PA6/NBR. For this purpose, different compositions with different amounts of NBR and SiC were made. The weight percentage of NBR was chosen from 10 to 50 and that of SiC was selected from 1% to 5%. The manufactured samples were subjected to erosion, friction coefficient, and hardness tests. The results showed that increase in the percentage of NBR increased the wear rate by 77%. Also, the addition of silicon carbide nanoparticles had a positive effect on the tribological properties of the studied nanocomposite, such that for samples with a constant value of 30% for NBR, changing the weight percentage of SiC from 0% to 5% causes a hardness increase of up to 11%, erosion rate decrease of up to 30% and friction coefficient decreases of up to 28%.

### Please cite this article using:

Saeidi M, Bani Mostafa Arab N, Nakhaei MR, Naderi Gh. Investigating the effect of adding silicon carbide nanoparticles on tribological properties of PA6/NBR. 2025 Mar 21;12(1):29-39. doi: 10.22034/ijme.2025.500809.2043 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

مواد پلیمری به دلیل چگالی کم و فرآوری مقرون به صرفه، جایگزین مواد فلزی و سرامیکی در بخش‌های مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، زیست‌پزشکی، بسته‌بندی میکروالکترونیک و پوشش‌ها شده‌اند. پلیمرها به شکل خالص یا با افزودنی‌هایی که در طول فرآوری اضافه می‌شوند به منظور افزایش خواص فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و تریبولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در نتیجه مواد را برای کاربردهای خاص مناسب می‌گردانند [۱]. پیشرفت در زمینه علم مواد بخاطر نیاز به توسعه‌ی مواد جدید برای کاربردهای مختلف دنیای مدرن منجر به نوآوری‌های قابل توجهی به ویژه در زمینه‌ی ترموپلاستیک الاستومرها<sup>۱</sup> (TPES) شده است [۲]. این مواد به دلیل اختلاطی از خاصیت ارتجاعی لاستیک مانند و قابلیت فرآوری ترموپلاستیک مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۳]. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های TPES خواص مکانیکی منحصر به فرد آن‌ها است [۴]. TPES مانند الاستومرهای معمولی وقتی در معرض کشش قرار می‌گیرند، به دلیل وجود بخش‌های لاستیکی در ساختار خود، پس از تحمل تنش به شکل اولیه خود برمی‌گردند [۵]. قطعات سخت در ساختار TPES آن‌ها را قادر می‌سازد تا ساختار خود را تحت بارهای کاری مختلف حفظ کنند [۶]. علاوه بر این، TPES دارای مقاومت ضربه‌ای عالی و قادر به جذب و اتلاف انرژی هستند، که آن‌ها را برای کاربردهایی که به دوام و چقرمگی نیاز دارند، ایده‌آل می‌سازد [۷]. مقاومت در برابر سایش و پاره‌گی نیز چرخه عمر آن‌ها را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش هزینه‌های کلی و در نتیجه نیاز کمتر به تعویض قطعات می‌شود [۸]. یکی از ترکیباتی که در زمینه TPES بیشتر مورد تحقیق قرار گرفته است، مخلوط نیتریل بوتادین رابر<sup>۲</sup> (NBR) با پلی آمیدها مانند پلی آمید<sup>۳</sup> (PA6) یا پلی آمید<sup>۶</sup> است [۹]. این مخلوط‌ها از مقاومت شیمیایی NBR و پایداری حرارتی پلی آمیدها بهره می‌برند [۱۰]. NBR مقاومت مطلوبی در برابر روغن‌ها، سوخت‌ها و سایر مواد شیمیایی دارد، در حالی که دارای ویژگی‌های لاستیکی ذاتی مانند انعطاف‌پذیری است [۱۱]. از سوی دیگر، PA6 یک پلیمر مهندسی با استحکام، چقرمگی و پایداری حرارتی مطلوب است. همچنین PA6 مقاومت در برابر فرسایش خوبی از خود نشان می‌دهد و گزینه‌ی مناسبی برای تولید قطعاتی است که تحت بارهای مکانیکی پیوسته قرار می‌گیرند [۱۲].

در زمینه تریبولوژی، پلیمرها به دلیل خاصیت ارتجاعی زنجیره‌های پلیمری، مقاومت در برابر فرسایش و ضریب اصطکاک پایین آن‌ها به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. پلیمرهایی مانند پلی آمیدها، پلی تترا فلئورواتیلن، پلی استال‌ها، پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق العاده بالا، پلی اتر اترکتون، پلی یورتان‌ها، رزین‌های فنولیک و اپوکسی برای کاربردهای مهندسی که فرسایش در آنها یک مسئله حیاتی است، مناسب هستند [۱۴]. به عنوان مثال، پلی آمید<sup>۴</sup> (PA) یک پلیمر مهندسی است که به دلیل استحکام مکانیکی عالی و مقاومت در برابر فرسایش به طور گسترده در کاربردهایی مانند یاتاقان‌ها، چرخ دنده‌ها، پوشش کابل، شیلنگ‌ها، الیاف و تقویت تسمه نقاله در مقایسه با سایر پلیمرها استفاده می‌شود. با این حال، حساسیت آن به جذب رطوبت و چقرمگی نسبتاً کم، دامنه کاربردهای پلی آمید را محدود می‌کند [۱۵].

با توجه به جذب آب توسط پلیمرهای خاص، یاماموتو و تاکاشیما [۱۶] توضیح داده‌اند که مولکول‌های آب به راحتی در حجم آزاد فاز آمورف پلیمر منتشر می‌شوند. این فرآیند منجر به پلاستیک شدن، تورم و نرم شدن می‌شود و در نتیجه سختی و استحکام پلیمر کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انتشار آب، نیروهای جاذبه بین زنجیره‌های پلیمری را کاهش می‌دهد، حذف مواد در حین لغزش را تسهیل می‌کند و در نتیجه سرعت فرسایش را افزایش می‌دهد. برای بهبود حساسیت به آب پلی آمید<sup>۶</sup> (PA6) می‌توان به آن لاستیک آبگریز اضافه کرد.

در حال حاضر، انواع مختلفی از نانوذرات یا نانوپرکننده‌ها در ماتریس پلیمری تقویت می‌شوند تا عملکرد تریبولوژیکی خود را افزایش دهند. نانوذرات معدنی و سخت اغلب بدین دلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند که عملکرد قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال می‌توان به زیرکونیا، کاربید سیلیسیوم، دی اکسید تیتانیوم و اکسید مس [۱۷]، دی سولفید مولیبدن [۱۸]، گرافن [۱۹]، گرافیت [۲۰] و پلی تترا فلئورواتیلن [۲۱] اشاره کرد. اهمیت این نانوذرات در قابلیت آنها برای افزایش مدول الاستیک و مقاومت در برابر فرسایش پلیمرهای پایه است [۲۲، ۲۳].

<sup>1</sup> Thermoplastic Elastomers

<sup>2</sup> Nitrile Butadiene Rubber

<sup>3</sup> Polyamid6

<sup>4</sup> Polyamide

نانوذرات کاربید سیلیسیوم (SiC) دارای سختی، هدایت حرارتی و پایداری شیمیایی قابل توجهی هستند [۲۴]. گزارش شده است که افزودن nSiC به ماتریس پلی یورتان هم استحکام مکانیکی و هم پایداری حرارتی را افزایش می‌دهد [۲۵]. افزودن SiC به TPE مانند لاستیک طبیعی گرمانرم می‌تواند منجر به بهبود خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌ها شود [۲۶]. با این وجود، به دست آوردن ترکیبی از PA6 و NBR با خواص خوب نیاز به طراحی فرمولاسیون و روش فراوری دارد که منجر به تشکیل مورفولوژی‌هایی شود که در آن مواد می‌توانند به خوبی برهم کنش داشته باشند [۲۷].

با توجه به موارد ذکر شده، در این مقاله برخی از جنبه‌های با اهمیت تریبولوژی نانو کامپوزیت پلیمری PA6/NBR/SiC مورد مطالعه قرار گرفته و به ویژه بصورت تجربی به تاثیر نانوکاربید سیلیسیوم بر نرخ فرسایش و ضریب اصطکاک به عنوان دو عامل مهم بر رفتار تریبولوژیکی پرداخته شده است.

## ۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

PA6 با چگالی  $1.14 \text{ g/cm}^3$ ، نرخ جریان حجمی مذاب  $1 \text{ cm}^3/10\text{min}$  (5 Kg & 275°C) و نقطه ذوب  $220^\circ\text{C}$  از شرکت EPSAN ترکیه، همچنین NBR با ۳۴ درصد وزنی اکریلونیتریل، چگالی  $0.98 \text{ g/cm}^3$  و ویسکوزیته مونی  $^2$  (ML (1+4), 100 °C) از شرکت KUMHO کره و نانو ذرات مکعبی SiC با چگالی  $3.216 \text{ g/cm}^3$  و میانگین اندازه ذرات ۴۵-۶۵ نانومتر از ایالات متحده آمریکا خریداری شد. خواص مواد مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ مشخصات مواد مورد استفاده

| ماده | کمیت                | واحد                       | مقدار |
|------|---------------------|----------------------------|-------|
| PA6  | چگالی               | $\text{g/cm}^3$            | ۱.۱۴  |
|      | نقطه ذوب            | $^\circ\text{C}$           | ۲۲۲   |
|      | نرخ جریان حجمی مذاب | $\text{cm}^3/10\text{min}$ | ۱۶۰   |
| NBR  | چگالی               | $\text{g/cm}^3$            | ۰.۹۸  |
|      | درصد اکریلونیتریل   | %                          | ۳۴    |
|      | ویسکوزیته مونی      | ML(1+4)125°C (M)           | ۴۱    |
| nSiC | چگالی               | $\text{g/cm}^3$            | ۳.۱۲۶ |
|      | میانگین اندازه ذرات | nm                         | ۴۵-۶۵ |
|      | مورفولوژی           | -                          | مکعبی |

### ۲-۲- آماده سازی نمونه

به دلیل آب‌دوستی<sup>۳</sup> PA6 و SiC، قبل از اختلاط، مواد در آون در دمای  $80^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. اختلاط مواد با سرعت روتور ۸۰ دور در دقیقه با استفاده از میکسر داخلی (W50 Brabender) آلمانی که دمای آن قبل از اختلاط روی  $220^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد تنظیم شده بود انجام شد. با توجه به ترکیبات از پیش تعیین شده، مقادیر داده شده از PA6، NBR، و SiC برای هر نمونه وزن شد. NBR به قطعات کوچک بریده شد، سپس PA6 با SiC داخل نایلون پلاستیکی مخلوط شد تا توسط نانوذرات آغشته شود. پس از ریختن PA6 آغشته به NBR در محفظه اختلاط، گشتاور آن افزایش یافت. پس از رسیدن به یک گشتاور ثابت و ۱ دقیقه انتظار، PA6 کاملاً ذوب شد. سپس NBR در محفظه اختلاط ریخته شد و پس از آن مجدداً گشتاور افزایش و دوباره کاهش یافت و ثابت ماند. پس از مخلوط کردن با گشتاور ثابت به مدت ۱ دقیقه، نمونه از محفظه خارج شد.

<sup>1</sup> Melt Volume Flow Rate

<sup>2</sup> Mooney Viscosity

<sup>3</sup> Hydrophilic

برای انجام آزمایش‌های تریبولوژیکی، نمونه‌ها با استفاده از پرس داغ (بوچر<sup>۱</sup>، سوئیس) بلافاصله پس از اختلاط برای جلوگیری از جذب رطوبت در قالبی که به این منظور ساخته شده بود در دمای ۲۴۰ درجه سانتیگراد پرس شدند. برای جلوگیری از ایجاد حفره، ابتدا مواد داخل قالب به مدت ۴ دقیقه پیش‌گرم شده و سپس به مدت ۳ دقیقه با فشار ۱۵۰ تن پرس شدند. پس از انجام پرس داغ، قالب بلافاصله در پرس سرد تحت فشار ۳۵ بار به مدت ۳ دقیقه قرار داده شد تا از اعوجاج هندسی جلوگیری شود.

## ۲-۳- تجهیزات

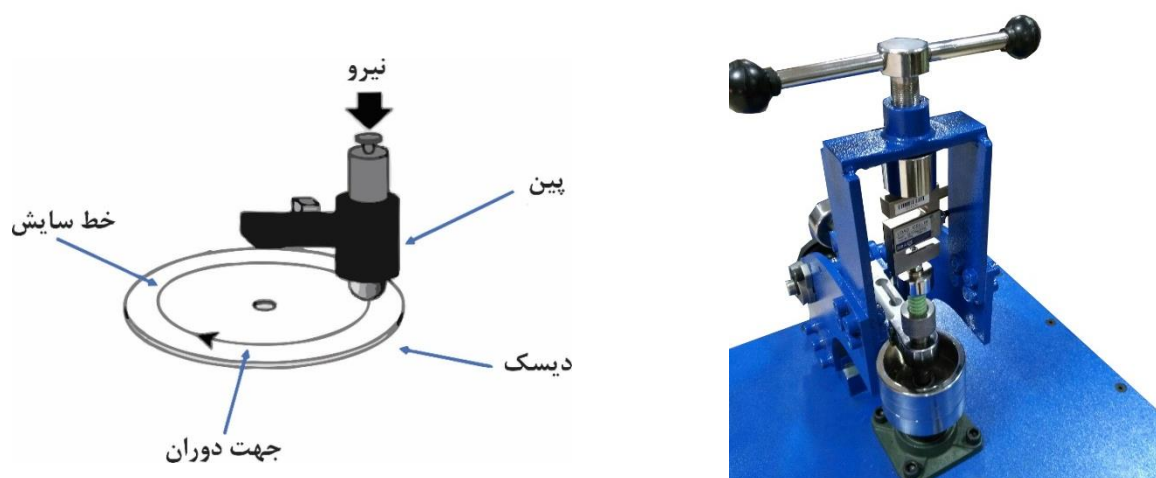
### ۲-۳-۱- آزمون فرسایش

آزمون فرسایش به روش پین روی دیسک با دستگاه شرکت تجهیز صنعت نصر، طبق استاندارد ASTM D65 انجام شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌ها با استون تمیز شده و خشک شدند. سپس داخل روتور ثابت شده و در دمای محیط با سرعت ۱۶۱ دور بر دقیقه تحت نیروی اعمالی ۳۰ نیوتن و میزان مسافت ۵۰۰ متر در معرض پین ساینده از جنس آلومینا قرار گرفتند. قطر نمونه ۳۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۵ میلی‌متر بود. وزن هر نمونه قبل و بعد از انجام آزمون با ترازوی با دقت ۰.۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد تا میزان ماده‌ی فرسایش یافته مشخص شود. سپس با استفاده از رابطه ۱ نرخ فرسایش محاسبه شد [۲۸].

$$Kw = \frac{\Delta m}{\rho Ld} \text{ cm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad (1)$$

که  $\Delta m$ (g) جرم فرسایش یافته از نمونه برحسب گرم،  $\rho$ (g/cm<sup>3</sup>) چگالی نمونه،  $L$ (N) نیروی اعمالی و  $d$ (m) مسافت طی شده پین بر روی دیسک می‌باشد.

عکس دستگاه و شکل شماتیک آزمون در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱ دستگاه و شکل شماتیک دستگاه فرسایش پین روی دیسک

### ۲-۳-۲- آزمون ضریب اصطکاک

نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها نیز طبق استاندارد ASTM D1894 توسط دستگاه فرسایش پین روی دیسک و حین انجام آزمون ترسیم شد.

### ۲-۳-۳- آزمون سختی

آزمون سختی Shore D با دستگاه سختی‌سنج Zwick آلمان طبق استاندارد ASTM D2240 بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. وسیله سختی‌سنج در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

<sup>۱</sup> BUCHER



شکل ۲ دستگاه سختی سنج

## ۲-۴- روش آزمایش

برای بررسی تاثیر درصد لاستیک NBR بر خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت مورد مطالعه، ابتدا ترموپلاستیک الاستومر PA6/NBR بدون افزودن نانو ذرات SiC ساخته شد. درصد لاستیک با توجه به پژوهش‌های انجام شده‌ی قبلی بین ۱۰ تا ۵۰ درصد انتخاب شد [۲۹-۳۲]. برای بررسی تاثیر نانو ذره بر خواص تریبولوژیکی با توجه به پژوهش‌هایی که با مواد TPE دیگر و SiC انجام شده بود، ترکیباتی با درصدهای وزنی ۱ تا ۵ درصد SiC ساخته شد [۳۳-۳۵]. به این ترتیب چهارده نمونه به قطر ۳۵ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شد و آزمون فرسایش و ضریب اصطکاک با دوبار تکرار و آزمون سختی با سه بار تکرار انجام و مقدار میانگین برای نتایج در نظر گرفته شد.

## ۳- نتایج و بحث

بر روی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای متفاوت NBR و SiC، آزمون‌های فرسایش، ضریب اصطکاک و سختی انجام شد. به منظور اشاره راحت‌تر به نمونه‌ها با ترکیب‌های مختلف، برای هر نمونه کد خاصی در نظر گرفته شد که همراه با نتایج آزمون‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

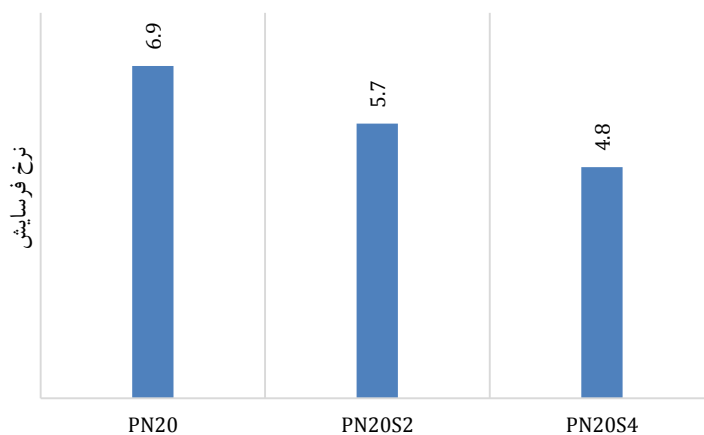
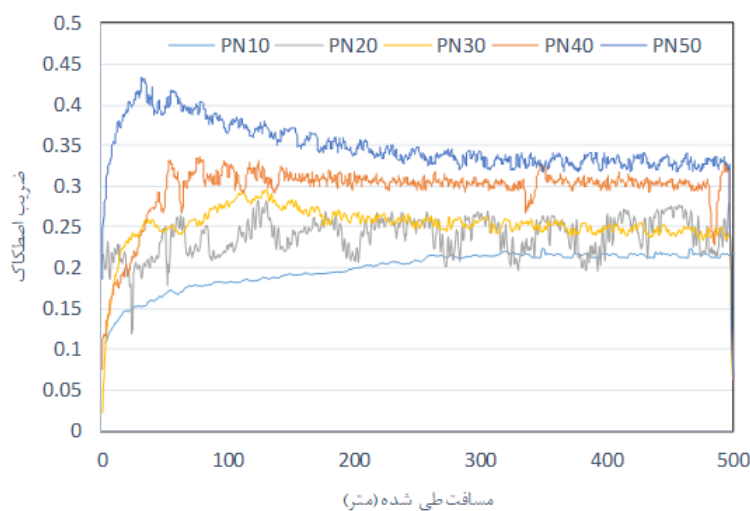
همانگونه که از نتایج جدول ۲ مشخص است، با افزایش درصد NBR در نمونه‌های ۱ تا ۵ نرخ فرسایش و ضریب اصطکاک افزایش یافته است. این تغییرات در نرخ فرسایش و ضریب اصطکاک می‌تواند به این دلیل باشد که طبق نتایج ایونس و همکارانش [۳۶]، با افزایش درصد لاستیک و در پی آن افزایش ضریب اصطکاک و کاهش سختی، الگوی فرسایش از نوع فرسایش به دلیل خستگی سطحی تغییر یافته و سطح قطعه دچار خستگی سطحی شده و ذرات راحت‌تر جدا شده‌اند.

در شکل ۳ نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه‌های یک تا پنج مشاهده می‌شود. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، هر چه میزان سختی سطح کاهش می‌یابد، نرخ فرسایش نیز افزایش می‌یابد و بین با افزایش چسبندگی و اصطکاک و در نتیجه بالا رفتن دما سطح را دچار خستگی سطحی می‌نماید. علاوه بر این از آنجا که مقاومت فرسایشی PA6 بالاتر از NBR است، طبق انتظار با کاهش درصد PA6 نرخ فرسایش افزایش یافت.

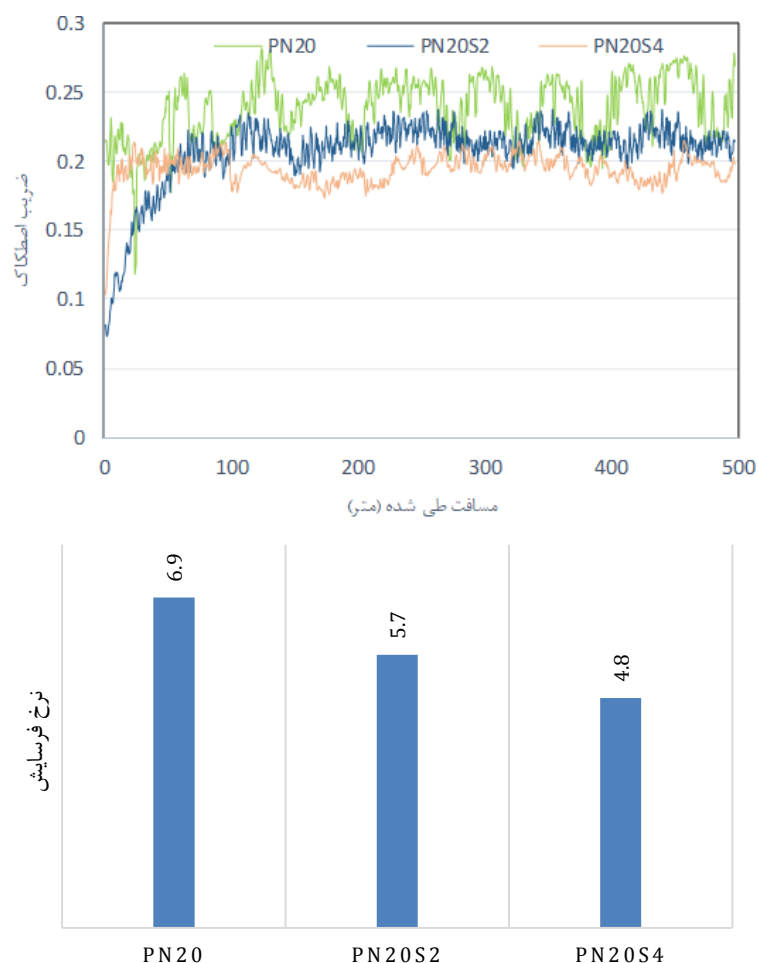
در شکل ۴ با ثابت نگهداشتن درصد NBR تاثیر افزودن نانوذرات کابید سیلیسیوم بررسی شده است.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون نرخ ویژه فرسایش، ضریب اصطکاک و سختی

| شماره آزمایش | کد نمونه | NBR<br>(درصد وزنی) | SiC<br>(درصد وزنی) | نرخ فرسایش (Kw)<br>$\times 10^{-8} \text{ (cm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}\text{)}$ | ضریب اصطکاک | سختی<br>Shore D |
|--------------|----------|--------------------|--------------------|---|-------------|-----------------|
| ۱            | PN10     | ۱۰                 | -                  | ۳/۲   | ۰/۲۱        | ۸۰              |
| ۲            | PN20     | ۲۰                 | -                  | ۶/۹   | ۰/۲۳        | ۷۳              |
| ۳            | PN30     | ۳۰                 | -                  | ۱۱  | ۰/۲۵        | ۶۹              |
| ۴            | PN40     | ۴۰                 | -                  | ۱۲/۴  | ۰/۳۰        | ۶۳              |
| ۵            | PN50     | ۵۰                 | -                  | ۱۴/۳  | ۰/۳۲        | ۵۹              |
| ۶            | PN10S3   | ۱۰                 | ۳                  | ۲/۵   | ۰/۱۵        | ۸۲              |
| ۷            | PN20S2   | ۲۰                 | ۲                  | ۵/۷   | ۰/۲۱        | ۷۵              |
| ۸            | PN20S4   | ۲۰                 | ۴                  | ۴/۸   | ۰/۱۹        | ۷۸              |
| ۹            | PN30S1   | ۳۰                 | ۱                  | ۱۰  | ۰/۲۴        | ۷۱              |
| ۱۰           | PN30S3   | ۳۰                 | ۳                  | ۹/۷   | ۰/۲۳        | ۷۱              |
| ۱۱           | PN30S5   | ۳۰                 | ۵                  | ۷/۷   | ۰/۱۸        | ۷۸              |
| ۱۲           | PN40S2   | ۴۰                 | ۲                  | ۱۱/۵  | ۰/۲۸        | ۶۵              |
| ۱۳           | PN40S4   | ۴۰                 | ۴                  | ۹/۴   | ۰/۲۵        | ۶۸              |
| ۱۴           | PN50S3   | ۵۰                 | ۳                  | ۸/۵   | ۰/۲۷        | ۶۲              |



شکل ۳ نمودار ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش نمونه‌های PN10 تا PN50 پس از طی مسافت ۵۰۰ متر توسط پین بر روی دیسک



شکل ۴ نمودار ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش نمونه‌های PN20، PN20S2 و PN20S4 پس از طی مسافت ۵۰۰ متر توسط پین بر روی دیسک

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیوم، ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش کاهش یافته‌اند. وجود نانوذرات می‌تواند باعث همگن شدن فیلم انتقال<sup>۱</sup> و چسبندگی به پین ساینده شده و این امر باعث کاهش اصطکاک پین با سطح تماس مقابل<sup>۲</sup> می‌شود [۳۷-۳۹]. مطالعات قبلی نشان داده است که افزایش مقاومت به فرسایش می‌تواند به دلیل هدایت حرارتی بالای نانو ذرات استفاده شده در نانوکامپوزیت پلیمری باشد [۴۰]. هدایت حرارتی بالای کاربید سیلیسیوم منجر به کاهش اصطکاک و دمای تریبوسیستم شده و نرخ فرسایش را کاهش می‌دهد، که نتایج حاصل از آزمون‌ها نیز این امر را تایید می‌کند [۴۱]. در شکل ۵ تصاویر نمونه‌های فرسایش یافته نشان داده شده است. همانطور که از تصاویر پیداست، با افزایش درصد NBR میزان فرسایش افزایش یافته است.

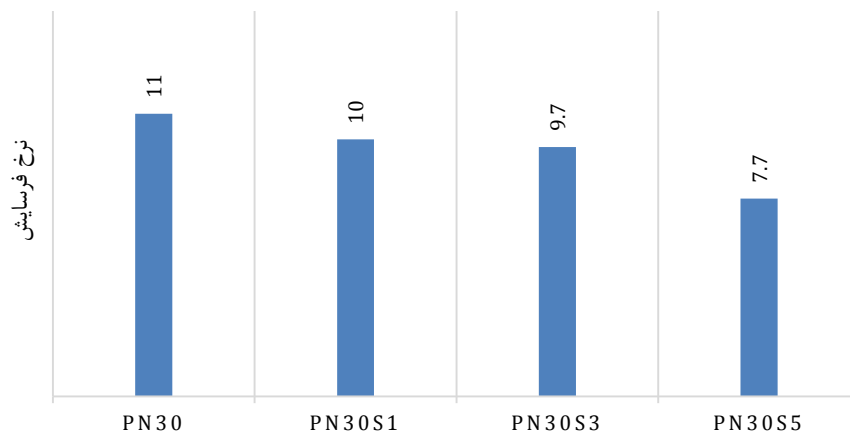
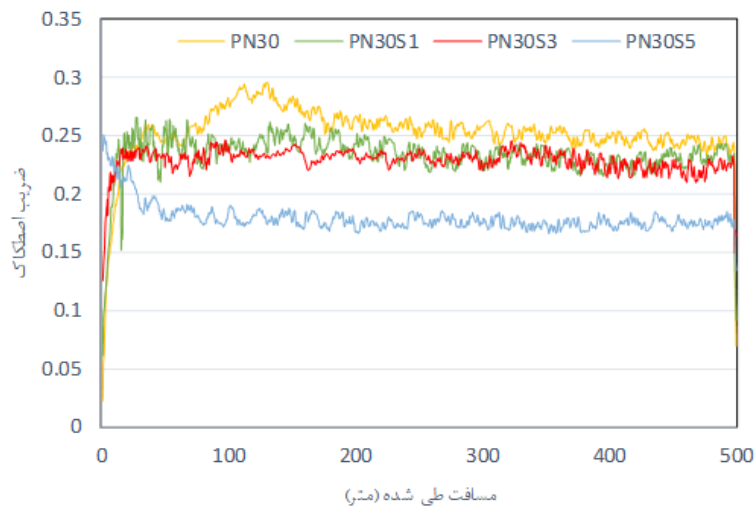
در مورد نمونه‌های دیگر نیز همین روال صادق است، به عنوان مثال همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای نمونه‌های دارای ۳۰ درصد وزنی NBR نیز با افزایش درصد نانو ذرات، ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش کاهش یافته است. در نمونه PN30 ضریب اصطکاک ۰,۲۵ و نرخ فرسایش ۱۱ بود. در نمونهی PN30S1، با افزایش ۱ درصد نانو ذره، ضریب اصطکاک ۴ درصد و نرخ فرسایش ۹ درصد کاهش یافت که این مقادیر به ازای افزودن ۳ درصد نانو ذره به ترتیب ۱۶ و ۱۴ درصد کاهش به دنبال داشته‌اند. در نمونه PN30S5 میزان این کاهش بیشتر شده به گونه‌ای که ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش از ۰,۲۵ و ۱۱ در PN30 به ۰,۱۸ و ۷,۷ کاهش یافته است.

<sup>1</sup> Transfer Film

<sup>2</sup> Counterface



شکل ۵ تصاویر نمونه‌ها بعد از آزمون فرسایش



شکل ۶ نمودار ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش نمونه‌های PN30, PN30S1, PN30S3 و PN30S5 پس از طی مسافت ۵۰۰ متر توسط پین بر روی دیسک

مقادیر بدست آمده از آزمون سختی Shore D نیز نشان از رابطه‌ی مستقیم افزایش درصد نانو ذره کاربید سیلیسیوم با سختی دارد. به عنوان مثال مقایسه بین سختی نمونه‌های PN40، PN40S2 و PN40S4 نشان می‌دهد که به دلیل سختی بسیار بالاتر nSiC نسبت به PA6 و NBR، هر چه درصد این نانو ذره بالاتر رود سختی نانو کامپوزیت هم افزایش می‌یابد که در نهایت مقاومت این نمونه را در برابر فرسایش بالا می‌برد. افزودن ۴ درصد nSiC مقدار سختی نمونه‌ی ۱۲ را نسبت به نمونه‌ی ۴، هفت درصد افزایش داده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ترموپلاستیک الاستومر PA6/NBR با درصدهای مختلف نانو ذرات SiC تقویت شد. آزمون‌های مختلف تریبولوژیکی فرسایش، ضریب اصطکاک و سختی بر روی نمونه‌ها انجام شد تا اثر نانو ذرات SiC بر این خواص مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس آزمون‌های صورت گرفته نتایج زیر بدست آمد:

- اضافه کردن نانو ذرات SiC باعث بهبود خواص تریبولوژیکی ترموپلاستیک الاستومر PA6/NBR می‌شود. به عنوان نمونه با افزودن ۵ درصد SiC به PN50 نرخ فرسایش ۳۴٪ کاهش و سختی ۱۳٪ افزایش یافت.
- افزودن نانو ذرات SiC به طور معناداری باعث افزایش سختی گردید، به عنوان نمونه سختی PN30 نسبت به PN30S5 حدود ۱۱ درصد کمتر است.
- ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش رابطه‌ی تنگاتنگی با درصد وزنی نانو ذرات SiC دارند.
- با افزایش میزان لاستیک در TPE، ضریب اصطکاک و نرخ فرسایش افزایش می‌یابند.
- افزودن NBR مکانیزم فرسایش را از فرسایش بدلیل سایش به فرسایش بدلیل خستگی سطحی تغییر می‌دهد.

#### References

- [1] Francis R, Joy N, Aparna EP, Vijayan R. Polymer grafted inorganic nanoparticles, preparation, properties, and applications: a review. *Polymer Reviews*. 2014 Apr 3;54(2):268-347. doi: 10.1080/15583724.2013.870573
- [2] Alarifi IM. A comprehensive review on advancements of elastomers for engineering applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023 Oct 1;6(4):451-64. doi: 10.1016/j.aiepr.2023.05.001
- [3] Reghunadhan A, Akhina H, Ajitha AR, Chandran N, Nair ST, Maria HJ, Thomas S. Thermoplastic elastomers (TPEs) from rubber-plastic blends. *Advances in Thermoplastic Elastomers*. 2024 Jan 1:291-314. doi: 10.1016/B978-0-323-91758-2.00008-8
- [4] Holden G. Thermoplastic elastomers. In *Applied Plastics Engineering Handbook 2024* Jan 1 (pp. 97-113). William Andrew Publishing. doi: 10.1016/B978-0-323-88667-3.00020-5
- [5] Awasthi P, S A, Banerjee SS. Thermoplastic Elastomeric Foams: Challenges, Opportunities and New Approaches. *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams (Volume 1)*. 2023:91-119. doi: 10.1021/bk-2023-1439.ch005
- [6] Steube M, Johann T, Barent RD, Mueller AH, Frey H. Rational design of tapered multiblock copolymers for thermoplastic elastomers. *Progress in Polymer Science*. 2022 Jan 1;124:101488. doi: 10.1016/j.journal of progress in polymer science.2021.101488
- [7] Jogur G, Nawaz Khan A, Das A, Mahajan P, Alagirusamy R. Impact properties of thermoplastic composites. *Textile Progress*. 2018 Jul 3;50(3):109-83. doi: 10.1080/00405167.2018.1563369
- [8] Brydson JA. Thermoplastic elastomers: properties and applications. iSmithers Rapra Publishing; 1995.
- [9] Li X, Li Y, Qian C, Wang S, Nie R. Design and preparation of sulfur vulcanized polyamide 66 cross-linked nitrile butadiene rubber networked and its application in blending with graphene oxide. *Materials Today Communications*. 2024 Jun 1;39:108704. doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.108704
- [10] Datta Sarma A, Padmanathan HR, Saha S, Shankar Banerjee S, Bhowmick AK. Design and properties of a series of high-temperature thermoplastic elastomeric blends from polyamides and functionalized rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017 Oct 15;134(39):45353. doi: 10.1002/app.45353
- [11] Whba R, Su'ait MS, Whba F, Sahinbay S, Altin S, Ahmad A. Intrinsic challenges and strategic approaches for enhancing the potential of natural rubber and its derivatives: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024 Jul 14:133796. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133796
- [12] Man Z, Wang H, He Q, Kim DE, Chang L. Friction and wear behaviour of additively manufactured continuous carbon fibre reinforced PA6 composites. *Composites Part B: Engineering*. 2021 Dec 1;226:109332. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109332
- [13] Sinha SK, Briscoe BJ. *Polymer tribology*. World Scientific; 2009. doi: 10.1142/p560 | March 2009
- [14] Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014.

- [15] Deopura BL, Alagirusamy R, Joshi M, Gupta B, editors. Polyesters and polyamides. Elsevier; 2008 Jun 17.
- [16] Yamamoto Y, Takashima T. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts. *Wear*. 2002 Oct 1;253(7-8):820-6. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00059-5
- [17] Bahadur S, Sunkara C. Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO<sub>2</sub>, ZnO, CuO and SiC. *Wear*. 2005 Apr 1;258(9):1411-21. doi: 10.1016/j.wear.2004.08.009
- [18] Ben Difallah B, Kharrat M, Dammak M, Monteil G. Improvement in the tribological performance of polycarbonate via the incorporation of molybdenum disulfide particles. *Tribology Transactions*. 2014 Sep 3;57(5):806-13. doi: 10.1080/10402004.2014.913751
- [19] Masood MT, Papadopoulou EL, Heredia-Guerrero JA, Bayer IS, Athanassiou A, Ceseracciu L. Graphene and polytetrafluoroethylene synergistically improve the tribological properties and adhesion of nylon 66 coatings. *Carbon*. 2017 Oct 1;123:26-33. doi: 10.1016/j.carbon.2017.07.026
- [20] Shalwan A, Yousif BF. Influence of date palm fibre and graphite filler on mechanical and wear characteristics of epoxy composites. *Materials & Design*. 2014 Jul 1;59:264-73. doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.066
- [21] Burris DL, Sawyer WG. Improved wear resistance in alumina-PTFE nanocomposites with irregular shaped nanoparticles. *Wear*. 2006 Apr 7;260(7-8):915-8. doi: 10.1016/j.wear.2005.06.009
- [22] Gorrasi G, Sorrentino A. Mechanical milling as a technology to produce structural and functional bio-nanocomposites. *Green Chemistry*. 2015;17(5):2610-25. doi: 10.1039/C5GC00029G
- [23] Wang QJ, Chung YW. *Encyclopedia of tribology*. Springer US; 2013.
- [24] Kamil AS, Al-Judy HJ. Effect of addition of silanized silicon carbide nanoparticles on some physical properties of heat cured acrylic denture base material. *Journal of research in medical and dental science*. 2018 Dec;6(6):86-95.
- [25] Guo Z, Kim TY, Lei K, Pereira T, Sugar JG, Hahn HT. Strengthening and thermal stabilization of polyurethane nanocomposites with silicon carbide nanoparticles by a surface-initiated-polymerization approach. *Composites Science and Technology*. 2008 Jan 1;68(1):164-70. doi: 10.1016/j.compscitech.2007.05.031
- [26] Mou'ad AT, Chen RS, Ahmad SH, Al-Tarawni MA, Saraireh SA. Hybridization of a Thermoplastic Natural Rubber Composite with Multi-Walled Carbon Nanotubes/Silicon Carbide Nanoparticles and the Effects on Morphological, Thermal, and Mechanical Properties. *Journal of polymer composite*. 2018.
- [27] Paran SM, Naderi G, Ghoreishy MH, Dubois C. Essential work of fracture and failure mechanisms in dynamically vulcanized thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR/XNBR-grafted HNTs. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018 Sep 1;200:251-62. doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.07.018
- [28] Sarath PS, Reghunath R, Thomas S, Haponiuk JT, George SC. An investigation on the tribological and mechanical properties of silicone rubber/graphite composites. *Journal of Composite Materials*. 2021 Nov;55(26):3827-38. doi: 10.1177/00219983211031634
- [29] Mahallati P, Arefazar A, Naderi G. Thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR. *International Polymer Processing*. 2010 May 1;25(2):132-8. doi: 10.3139/217.2311
- [30] Nakhaei MR, Mohammadi S, Naderi G, Ghoreishy MH. Experimental study of microstructure, thermal and mechanical properties of PA6/NBR nanocomposites reinforced with graphene nanoparticle. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019;6(3):419-26. doi: 10.22068/JSTC.2022.549961.1774 [In Persian]
- [31] Paran SM, Naderi G, Ghoreishy MH. Microstructure and mechanical properties of thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR/HNT. *Polymer Composites*. 2017 Sep;38:E451-61. doi: 10.1002/pc.23936
- [32] Paran SM, Naderi G, Ghoreishy MH, Dubois C. Essential work of fracture and failure mechanisms in dynamically vulcanized thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR/XNBR-grafted HNTs. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018 Sep 1;200:251-62. doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.07.018
- [33] Kueseng K, Jacob KI. Natural rubber nanocomposites with SiC nanoparticles and carbon nanotubes. *European Polymer Journal*. 2006 Jan 1;42(1):220-7. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.011
- [34] Rangari VK, Yousuf M, Jeelani S. Influence of SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hybrid nanoparticles on polymer tensile properties. *Journal of Composites*. 2013;2013(1):462914. doi: 10.1155/2013/462914
- [35] Naeimirad M, Zadhoush A, Neisiany RE. Fabrication and characterization of silicon carbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements. *Journal of composite materials*. 2016 Feb;50(4):435-46. doi: 10.1177/0021998315576378
- [36] Evans DC, Lancaster JK. *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 13. *Wear: Treatise on Materials Science and Technology*, Vol. 13. 2013 Oct 22;13:85. doi: 10.1007/978-3-030-95746-9\_5
- [37] Pavlidou S, Papaspyrides CD. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. *Progress in polymer science*. 2008 Dec 1;33(12):1119-98. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008

- [38] Gorrasi G, Attanasio G, Izzo L, Sorrentino A. Controlled release mechanisms of sodium benzoate from a biodegradable polymer and halloysite nanotube composite. *Polymer International*. 2017 May;66(5):690-8. doi: [10.1002/pi.5309](https://doi.org/10.1002/pi.5309)
- [39] Liparoti S, Landi G, Sorrentino A, Speranza V, Cakmak M, Neitzert HC. Flexible poly (amide-imide)-carbon black based microheater with high-temperature capability and an extremely low temperature coefficient. *Advanced Electronic Materials*. 2016 Jun;2(6):1600126. doi: [10.1002/aelm.201600126](https://doi.org/10.1002/aelm.201600126)
- [40] Ain QU, Sehgal R, Wani MF, Singh MK. An overview of polymer nanocomposites: Understanding of mechanical and tribological behavior. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Oct 1* (Vol. 1189, No. 1, p. 012010). IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/1189/1/012010](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1189/1/012010)
- [41] Hutchings I, Shipway P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-heinemann; 2017 Apr 13.