

نقش افزودنی‌های پودری بر رفتار تریبولوژیک کامپوزیت‌های پلیمری بر پایه رزین فنولیک

مهدی پاکروان^۱ و سیدرضا غفاریان^۲

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

این مقاله به بررسی نقش افزودنی‌های پودری شامل روانسازهای جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید)، پلی تترافلورو اتیلن و فیلر سرامیکی SiC بر رفتار تریبولوژیک یک پلیمر ویژه، رزین فنولیک، می‌پردازد. نمونه‌هایی از جنس کامپوزیت‌های پلیمری با استفاده از روش قالب‌گیری فشاری گرم ساخته شده و مشخصات سایشی و اصطکاکی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از یک دستگاه تریبومتر پین روی دیسک تحت شرایط لغزش خشک و دمای محیط استفاده شده و مقادیر ضریب اصطکاک و میزان سایش نمونه‌ها تعیین گردید. یک پین از جنس فولاد سخت AISI 52100 به عنوان سطح مقابل انتخاب شد. آزمایش‌های متعددی با تغییر در نوع و کسر وزنی فیلر به کار رفته در ساخت نمونه کامپوزیتی انجام گرفت. درصد‌های وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ برای روانسازهای جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید)، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در مورد پلی تترافلورو اتیلن و ۵ و ۱۰ برای فیلرهای سرامیکی SiC به کار گرفته شد. در مورد SiC تأثیر اندازه ذرات نیز مورد مطالعه قرار گرفت که بدین منظور دو نوع فیلر با اندازه‌های ۵ و ۳۸ میکرومتر انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد افزودن فیلرهای با ساختار لایه‌ای (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید) موجب کاهش میزان اصطکاک و افزایش مقدار سایش می‌گردد. در حالی که پودر پلیمری پلی تترافلورو اتیلن (PTFE) از طریق کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک هر دو ویژگی تریبولوژیک را بهبود می‌بخشد. فیلر سرامیکی سیلیکون کارباید، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. در این مورد اندازه ذرات فیلر نقش مؤثری بر رفتار سایشی دارند، به گونه‌ای که ذرات درشت‌تر ($38 \mu\text{m}$) محافظت بهتری از ماتریس پلیمری در برابر فرایند سایش به عمل آورده و میزان سایش را کاهش می‌دهند، در حالی که ذرات ریزتر ($5 \mu\text{m}$) باعث افزایش جزئی در مقدار سایش می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تریبولوژی، رزین فنولیک، گرافیت، مولیبدن دی سولفاید، پلی تترافلورو اتیلن، سیلیکون کارباید

Role of particulate fillers in the modification of the tribological behavior of polymer composites in dry sliding

M. Pakravan and R. Ghaffarian

1. Department of Chemistry, Isfahan University of Technology

Department of polymer engineering Amirkabir University of Technology

Abstract: This paper discusses the role of fillers including solid lubricants (graphite and molybdenum disulfide), polytetrafluoroethylene and silicon carbide on the tribological behavior of a specific polymer, Phenolic Resin. Polymeric composite material samples are manufactured by compression molding and are evaluated for their friction and wear properties. Using a pin-on-disc apparatus, dry sliding wear behavior under ambient conditions was studied which measured friction coefficient of samples. The counterface was made from hardened steel, AISI 52100. A number of experiments were performed using different filler types and weight percents including: graphite and molybdenum disulfide (10, 15 and 20%), polytetrafluoroethylene (5, 10, 15 and 20%) and Silicon Carbide (5 and 10%). In silicon carbide case, two different particle sizes ($5, 38 \mu\text{m}$) were tested as well. Results showed that addition of fillers with layer structure (graphite and MoS_2) decrease the friction coefficient and wear resistance but PTFE powder improves both tribological behaviors. Ceramic filler of SiC exhibited different effect. In this case particle size affects the wear property. Large particles (of about $38 \mu\text{m}$) found to protect the polymer matrix better than small particles (of about $5 \mu\text{m}$), which partially increase the wear rate.

Keywords: Tribology, Polymer, Particulate Filler, Composite, Phenolic Resin

E-mail of corresponding author (s): mpakravan@cc.iut.ac.ir

مقدمه

به دنبال توسعه فن‌آوری، صنایع مختلف در جستجوی موادی سبک‌تر، با استحکام بیشتر، با امکان تولید سریع و ایمن جهت برآورده کردن نیازهای خود در طراحی سازه‌ها و مکانیزم‌های مختلف با مزیت اقتصادی مناسب هستند. در این میان، در دنیای پیشرفته کنونی نمی‌توان از مواد پلیمری چشم‌پوشی کرد. با این وجود پلیمرهای خالص به دلیل استحکام و سفتی پایین جهت قطعات سازه‌ای مناسب نمی‌باشند. به منظور افزایش دامنه کاربرد مواد پلیمری، کامپوزیت‌های بر پایه این مواد از طریق افزودن مواد تقویت‌کننده مختلف به آنها رشد و توسعه یافته‌اند [۱]. به گونه‌ای که هم‌اکنون مواد کامپوزیتی پلیمری به دلیل مجموعه‌ای از خواص مختلف مانند: خودروان‌سازی، مقاومت در برابر خوردگی و ضربه، چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، عملکرد بدون سر و صدا به علت جذب ارتعاشات و صدا، فرایند آسان، سرعت تولید بالا و قیمت پایین، در کاربردهای گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که در بسیاری از موارد توسط فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرهای خالص به تنهایی قابل انجام نیست [۲-۴]. بهبود رفتار سایشی و اصطکاکی مواد پلیمری از طریق وارد ساختن ترکیبات مختلف به صورت ذرات پودری به ترکیب مواد پلیمری منجر به نتایج قابل توجه و امیدوارکننده‌ای شده است [۵ و ۶]، به گونه‌ای که امروزه آنها را به عنوان جایگزین بسیاری از مواد فلزی سستی در قطعات و اجزای لغزشی به کار می‌برند [۷ و ۸]. بدین منظور بسیاری از فیلرها مانند پودرهای فلزی، ترکیبات معدنی، روان‌سازهای جامد و نمک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پودرهای فلزی معمولاً برای بهبود خواص الکتریکی، حرارتی و تریبولوژیکی پلیمرها به کار می‌روند. توانایی فیلرهای معدنی نیز برای افزایش خواصی مانند سفتی، سختی، مقاومت گرمایی، انبساط حرارتی، رفتار الکتریکی، چگالی، رنگ و در بعضی موارد رفتار تریبولوژیک به اثبات رسیده است، همچنین

اکسیدهای فلزی نیز نقش ویژه‌ای در کاهش نرخ سایش پلیمرها از خود نشان داده‌اند [۹-۱۲]. طی سال‌های اخیر پژوهش‌گران مختلف، بسیاری از انواع فیلرهای معدنی را به عنوان ماده افزودنی به پلیمرها اضافه کرده و رفتار سایشی و اصطکاکی آنها را مورد مطالعه قرار داده‌اند، نتایج به دست آمده در بعضی موارد غیر معمول و متناقض بوده- است، تعدادی از ترکیبات باعث افزایش مقاومت سایشی شده در حالی که تعدادی دیگر مقدار سایش را افزایش داده‌اند. ورت و همکاران^۱ نشان دادند که CuO و PTFE باعث کاهش میزان سایش ماتریس پلی اترترکتون (PEEK) می‌شود [۹]، بهادر و همکاران^۲ نیز طی یک سری مطالعه دریافتند مقدار سایش با افزودن CuS و CuF_2 به PEEK [۱۳]، CuS به نایلون ۱۱ [۱۴] و CuO و CuS به پلی‌فنیلن سولفاید (PPS) [۱۵] کاهش می‌یابد. نتایج کارهای یو و همکاران^۳ [۱۱] در افزودن Ag_2S و NiS به PPS و بهادر و همکاران [۱۵] در افزودن CaF_2 و ZnF_2 به PPS کاملاً در تضاد با یافته‌های فوق است.

با توجه به این موارد، هم‌چنان مکانیزم واقعی فیلرها در تغییر خواص سایشی و اصطکاکی پلیمرها، درصد مناسب و بهینه افزودن فیلر برای دستیابی به بالاترین ترکیب خواص مکانیکی و تریبولوژیک و به ویژه نوع فیلر مناسب جهت دستیابی به خواص مورد نظر برای ماتریس خاص به خوبی شناخته شده نیست [۱۶ و ۱۳ و ۱۲]. بررسی نقش عملکرد فیلرهای مختلف در خواص سایشی پلیمرها از مواردی است که توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده و نظریات مختلفی در این رابطه پیشنهاد شده است. تاناکا^۴ طی یک مقاله جامع، توضیح داد که نرخ سایش PTFE در اثر افزودن فیلر، به علت جلوگیری از تخریب ساختار پیوسته PTFE کاهش پیدا می‌کند [۱۷]. تخریب

1- Voort et al

2- Bahadur et al

3- Yu et al

4- Tanaka

ماده معدنی و احیای آن به فلز مربوطه [۱۳] و انجام واکنش‌های تریبو شیمیایی بین فلز و سطح مقابل، از جمله فرضیاتی است که برای بررسی نقش فیلرها در این مورد ارائه گردیده است. در فرضیه اخیر بهادر و همکارانش، بنا بر شواهد به دست آمده از کارهای خود [۱۹ و ۱۳]، نشان دادند که واکنش شیمیایی بین فیلر و Fe (در سطح مقابل) باعث ایجاد ترکیبات بین سطحی جدیدی می‌شود که این مواد از طریق افزایش مقدار سازگاری بین فیلم انتقالی (Transfer Film) ایجاد شده بین سطحی با سطح مقابل، موجب افزایش چسبندگی آن می‌شوند. حفاظت این فیلم از سطح پلیمر در برابر ناهمواری‌های سطح مقابل به عنوان عامل افزایش مقاومت سایشی شناخته می‌شود [۱۸].

با این وجود، هم‌چنان تحقیقات در این زمینه به منظور شناخت کامل نقش فیلرها در کارایی سایشی کامپوزیت-های پلیمری و ارائه روشی جهت پیش‌بینی رفتار تریبولوژیک آنها در حال انجام است [۱۶ و ۶ و ۵]. هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر فیلرهای جامد پودری بر خواص سایشی و اصطکاکی کامپوزیت‌های بر پایه رزین فنولیک به منظور دستیابی به خواص مواد ضد اصطکاکی خود روان‌کننده (ضریب اصطکاک پائین و مقاومت سایشی بالا) جهت استفاده در کاربردهایی نظیر بوش، یاتاقان، رینگ و سایر قطعات مشابه بوده است. برتری خواص سایشی تعدادی از پلیمرها در مقایسه با سایر آنها موضوعی اثبات شده است [۳ و ۴]. در این بین عملکرد اصطکاکی و سایشی پلیمر ترموست رزین فنولیک در تماس با فولاد، بسیار عالی و قابل توجه است به گونه‌ای که از این ماده به صورت گسترده برای ساخت انواع قطعات اصطکاکی مانند لنت ترمز و صفحه کلاچ استفاده می‌شود [۲۲-۲۰]. نتایج حاصل از انجام مهندسی معکوس روی تعدادی از قطعات ضد اصطکاکی مورد استفاده در صنعت نیز نشان‌دهنده استفاده از این پایه پلیمری در ترکیب آنها بود. به همین دلیل در این پژوهش رزین فنولیک به عنوان پایه پلیمری برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی انتخاب گردید. فیلرهای

پودری به کار رفته شامل گرافیت و مولیبدن دی‌سولفاید، با توجه به ساختار لایه‌ای شناخته شده آنها، پودر پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) به عنوان پلیمری با ویژگی‌های خود روان‌کنندگی و اصطکاکی مناسب و فیلر سرامیکی سیلیکون کار باید با مشخصات سایشی خوب، با دو اندازه ذرات مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون گزارش علمی منتشرشده‌ای در زمینه استفاده از این فیلرها در مورد رزین فنولیک ارائه نگردیده است. در این راستا کامپوزیت‌های متعددی با درصدهای مختلف از فیلرهای فوق ساخته شده و نقش نوع و درصد هر یک از آنها بر رفتار تریبولوژیک نمونه‌ها مطالعه شد.

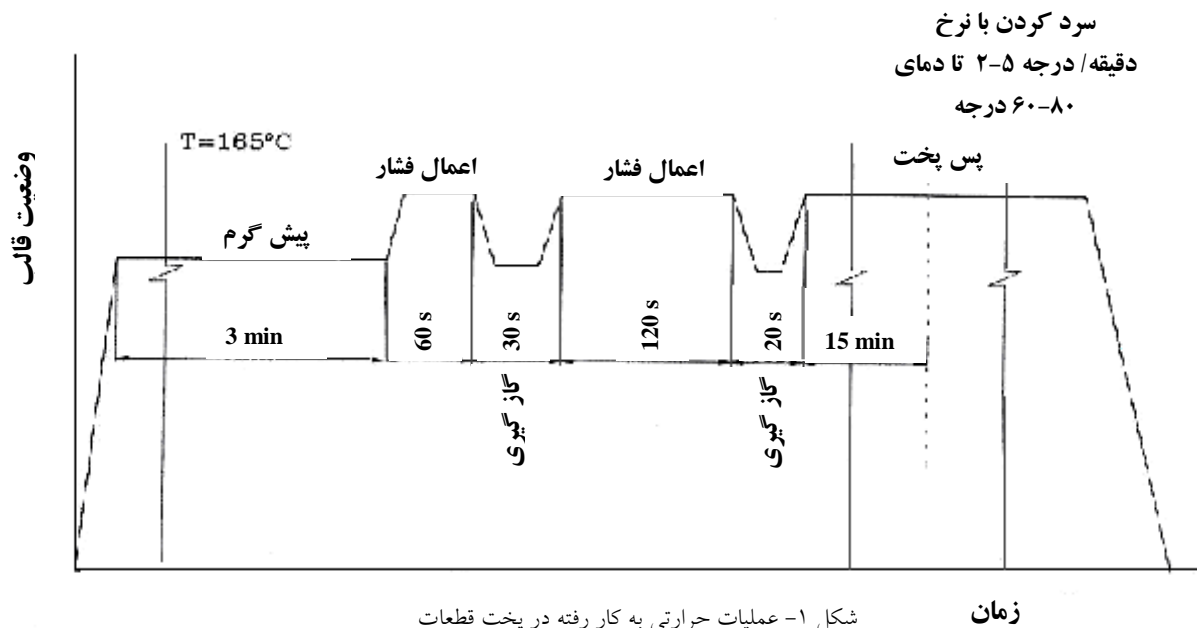
روش تحقیق

مواد اولیه

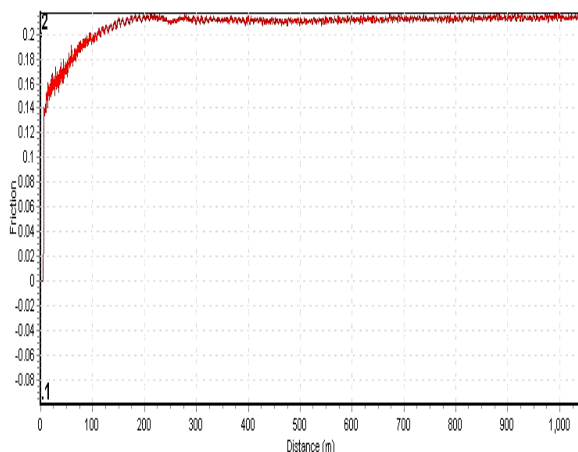
در این تحقیق از رزین فنولیک دو جزئی (نوالاک) ساخت شرکت رزیتان ایران به صورت ذرات پودری جامد با میانگین اندازه ذرات $90 \mu\text{m}$ و نقطه ذوب $110 - 100^\circ\text{C}$ به عنوان ماتریس پلیمری استفاده شد. گرافیت با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ محصول چین، مولیبدن دی‌سولفاید با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ ساخت آلمان و پودر پلی‌تترا فلورواتیلن میکرونیزه محصول شرکت Ausimont ایتالیا به عنوان روان‌سازهای جامد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین سیلیکون کارباید با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ محصول شرکت Carborundum انگلیس و با میانگین اندازه ذرات $5 \mu\text{m}$ محصول شرکت Bohler آمریکا به عنوان فیلرهای سرامیکی تهیه گردید.

ساخت نمونه‌ها

از یک همزن تیغه‌ای کوچک با دور متوسط جهت اختلاط مواد به کار رفته در هر ترکیب استفاده شد. با انجام تست DSC (کالریمتری روبشی دیفرانسیلی) و ساخت نمونه-های آزمایشی اولیه، دمای پخت 165°C و فشار 25 MPa



۹۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ (به ترتیب) انجام گرفته و سپس نمونه‌ها و بین توسط یک پارچه آغشته به استن به خوبی تمیز شدند [۲۳]. سرعت خطی حرکت بین 0.75 m/s و بار عمودی برابر 6 Kg برای همه نمونه‌ها انتخاب شد. خواص سایشی و اصطکاکی تا طول نهایی یک کیلومتر تعیین گردید. منحنی ضریب اصطکاک به صورت پیوسته توسط کرنش‌سنج و سیستم جمع‌آوری اطلاعات متصل به پین توسط نرم افزار طراحی شده به همین منظور ترسیم گردید. شکل (۲) یک نمونه از این منحنی‌ها را در مورد نمونه کامپوزیت حاوی ۲۰ درصد گرافیت نشان می‌دهد.



شکل ۲- رفتار اصطکاکی نمونه حاوی ۲۰ درصد گرافیت تحت بار 6 Kg

به عنوان شرایط فرایندی ساخت نمونه‌ها انتخاب گردید [۲۳]. با توجه به این آزمون‌ها، چرخه عملیات حرارتی به کار رفته در مورد هر نمونه، شامل مراحل پیش گرم کردن، گازگیری، پخت و زمان‌های هر مرحله، به طور ثابت در مورد تمامی نمونه‌ها اعمال شد. شکل (۱) چرخه حرارتی استفاده شده در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با استفاده از دستگاه پرس گرم 25 ton ساخت شرکت Unimolder انگلیس، نمونه‌های دیسکی شکل با قطر 100 mm و ضخامت 3 mm جهت انجام آزمون‌های سایش و اصطکاک ساخته شدند.

آزمون‌های تریبولوژیک

خواص سایشی و اصطکاکی نمونه‌های دیسکی شکل تهیه شده توسط یک دستگاه تریبومتر بین روی دیسک مطابق استاندارد ASTM G99 ساخت شرکت پرسایش ایران مشخص گردید. از یک پین با قطر 5 mm و شعاع عرقچین 4 mm و از جنس فولاد بلبرینگ AISI 52100 با سختی $65-63 \text{ HRC}$ به عنوان سطح مقابل استفاده شد. قبل از انجام آزمون، عملیات آماده‌سازی سطح نمونه‌ها جهت یکنواخت کردن آنها با استفاده از کاغذ سنباده‌های

استفاده شدند. روان‌سازهای جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید) با درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰، پلی‌تترافلورو اتیلن با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و فیلر سرامیکی SiC با دو ترکیب درصد ۵ و ۱۰ به ماتریس پلیمری افزوده شدند. هر دو ویژگی سایشی و اصطکاکی کامپوزیت‌های حاوی روان ساز جامد و مشخصات سایشی نمونه‌های کامپوزیت SiC مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

اثر روان‌سازهای جامد

شکل‌های (۳) و (۴) عملکرد تریبولوژیک نمونه‌های حاوی مولیبدن دی سولفاید را در مقایسه با رزین خالص نشان می‌دهد. افزودن MoS₂ به ترکیب رزین موجب افزایش میزان سایش و کاهش ضریب اصطکاک شده است. ساختار لایه‌ای MoS₂ موجب می‌شود در اثر حرکت پین، به راحتی ساییده شده و ذرات سایشی (wear debris) بسیار ریزی را بر روی سطح ایجاد کند. افزایش درصد MoS₂ در ترکیب کامپوزیت نیز به دلیل افزایش این ذرات، باعث افزایش بیشتر میزان سایش شده است. شکل (۴) نشان می‌دهد افزودن این ماده باعث کاهش قابل توجه در مقدار ضریب اصطکاک نمونه می‌شود. علت این کاهش، تشکیل یک فیلم انتقالی از ذرات MoS₂ بر روی سطح مقابل و در نتیجه تبدیل برهم کنش سایشی از فلز-کامپوزیت به MoS₂-کامپوزیت می‌باشد. تشکیل این فیلم انتقالی فدا شونده که از طریق ایجاد ذرات سایشی بیشتر تجدید می‌شود، به عنوان عامل اصلی کاهش نیروی اصطکاکی شناخته می‌شود [۲۶-۲۵ و ۱۲]. افزایش فیلر از ۱۵ به ۲۰ درصد مقدار اصطکاک را اندکی افزایش داده است. به نظر می‌رسد در درصدهای فیلر بالاتر، حضور بسیار زیاد ذرات سایشی، موجب تغییر در ماهیت فیلم انتقالی بین سطحی می‌شود. در این حالت به جای تشکیل یک فیلم نازک روی سطح مقابل یک لایه ضخیم از پودرفیلر بین دو سطح ایجاد می‌شود که این فیلم مقدار

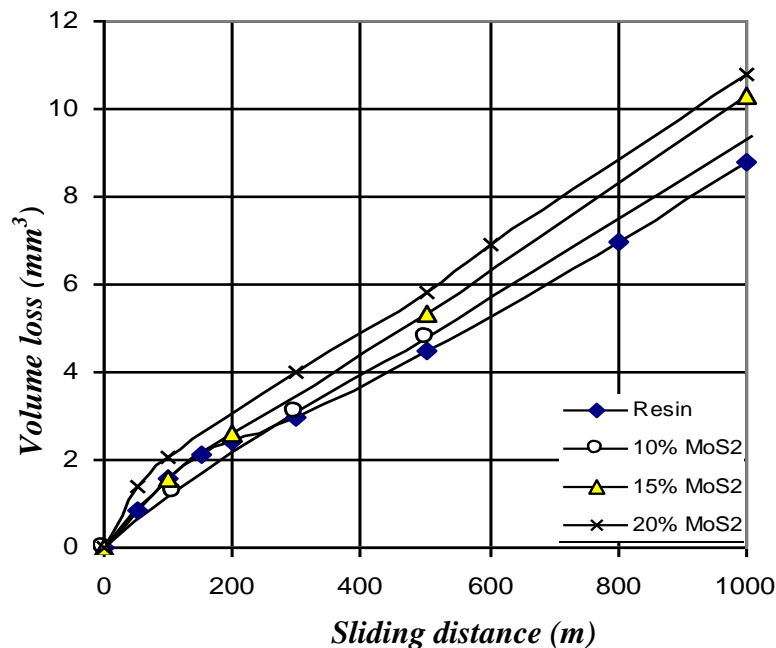
نمودارهای مزبور به منظور امکان‌پذیر شدن انجام مقایسه، پس از حذف نوسانات طبیعی موجود (از طریق در نظر گرفتن مقدار متوسط بین پیک‌ها) دوباره ترسیم شده‌اند. مقدار سایش نیز از طریق اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه در فواصل مشخص و با استفاده از یک ترازوی دقیق با دقت یک دهم میلی‌گرم تعیین گردید و سپس منحنی‌های مشخصه سایش (Wear Characteristic Curve) برای نمونه‌های مختلف رسم شد. به منظور بررسی دقیق رفتار سایشی نمونه‌ها، با توجه به اختلاف چگالی موجود بین نمونه‌های مختلف منحنی‌های مشخصه سایش بر حسب میزان کاهش حجم نمونه کامپوزیت در طول مسافت سایش رسم شد. بدین منظور مقدار چگالی همه نمونه‌ها بر اساس روش غوطه‌وری و مطابق استاندارد DIN 53479 تعیین گردید [۲۴]. نمونه کامپوزیتی در هوا و آب با استفاده از یک ترازوی چهار رقمی وزن گردیده و سپس چگالی آن با کمک فرمول شماره (۱) تعیین گردید، که در آن ρ_C چگالی نمونه، ω_w وزن نمونه در آب، ω_a وزن نمونه در هوا و ρ_w چگالی آب می‌باشد که با استفاده از پیکنومتر بدست آمد.

$$\rho_C = \frac{\omega_a}{\omega_a - \omega_w} \cdot \rho_w \quad (1)$$

پس از تعیین چگالی هر نمونه، از تقسیم مقدار کاهش وزن نمونه بر چگالی آن، میزان کاهش حجم نمونه‌های کامپوزیتی مشخص گردید.

روش‌ها

در این پژوهش تأثیر نوع و درصد فیلرهای مختلف بر رفتار تریبولوژیک کامپوزیت‌های بر پایه رزین فنولیک مطالعه شد. بدین منظور مواد در دو گروه اصلی فیلرهای پودری با ویژگی روان‌سازی جامد شامل گرافیت، مولیبدن دی سولفاید و پلی‌تترافلورو اتیلن و فیلر سرامیکی سیلیکون کار باید (در دو نوع با اندازه ذرات ۳۸ و ۵ میکرون)



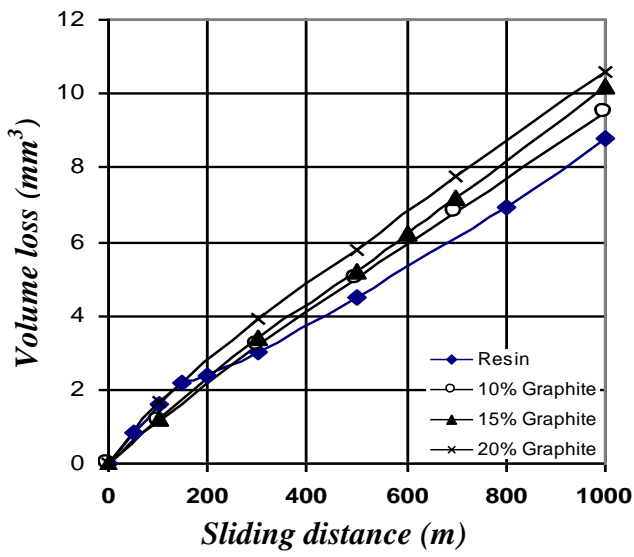
شکل ۳- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی مولیبدن دی سولفاید، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

چسبنده روی سطح مقابل است. قرار گرفتن این فیلم روی سطح پین فلزی، از تماس ناهمواری‌ها و برجستگی‌های خشن سطح فلز با نمونه کامپوزیت جلوگیری کرده و باعث افزایش مقاومت سایشی آن می‌شود [۲۸ و ۱۷]. میزان سایش تا ترکیب درصد ۲۰، روند کاهشی خود را حفظ کرده که عکس نتایج بدست آمده از دو فیلر قبلی است. در این مورد نیز رفتار اصطکاکی مشابهی با افزایش فیلر از ۱۵ به ۲۰ مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت فیلم PTFE و کندگی آن از روی سطح می‌تواند علت این مورد باشد. مقایسه کلی انجام گرفته در زمینه نحوه تأثیر نوع و درصد فیلرهای با ویژگی روان‌سازی جامد بر رفتار سایشی و اصطکاکی کامپوزیت در شکل‌های (۹) و (۱۰) آمده است. نتایج بیانگر آن است که در همه موارد، گرافیت و مولیبدن دی سولفاید، مقدار سایش را افزایش داده ولی وارد کردن PTFE به ترکیب، موجب کاهش آن نسبت به رزین خالص شده است. همچنین کارایی سایشی مولیبدن دی سولفاید نیز در مقایسه با گرافیت بیشتر است ولی عملکرد اصطکاکی گرافیت مناسب‌تر از مولیبدن دی سولفاید می‌باشد.

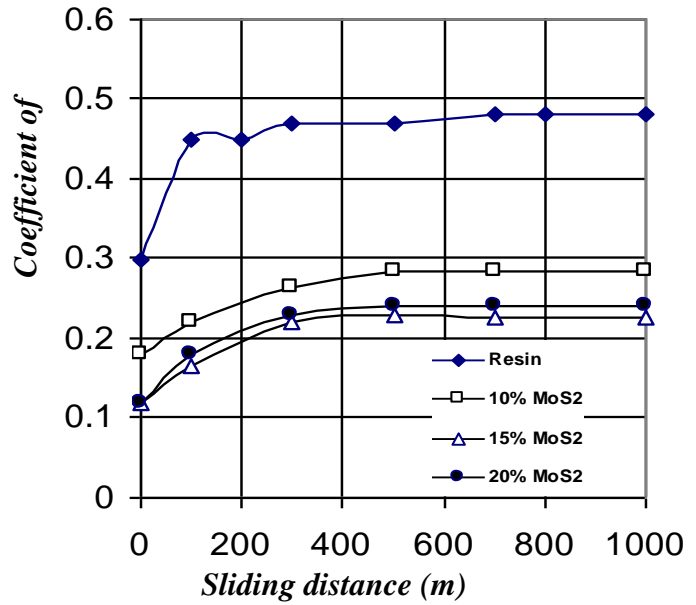
ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهد. افزایش ضخامت این فیلم باعث کاهش چسبندگی آن به سطح مقابل و افزایش امکان کنده شدن و ترک خوردن و در نتیجه لایه‌برداری آن می‌گردد که منجر به افزایش مقدار سایش می‌شود [۱۸ و ۱۶].

نحوه تأثیر فیلر گرافیت بر خواص سایشی رزین فنولیک در شکل‌های (۵) و (۶) مشخص شده است. در این مورد نیز افزودن این ماده به رزین، کاهش مقاومت سایشی و میزان اصطکاک نمونه‌ها را در پی داشته است. ساختار گرافیت تقریباً مشابه MoS_2 بوده و به همین دلیل تشابه رفتارهای ایجاد شده قابل انتظار است. مکانیزم عملکرد گرافیت نیز ناشی از همین ساختار است که با ایجاد فیلم انتقالی بین سطحی، مقدار ضریب اصطکاک ماتریس پلیمری را کاهش می‌دهد [۲۷ و ۱۸، ۱۲].

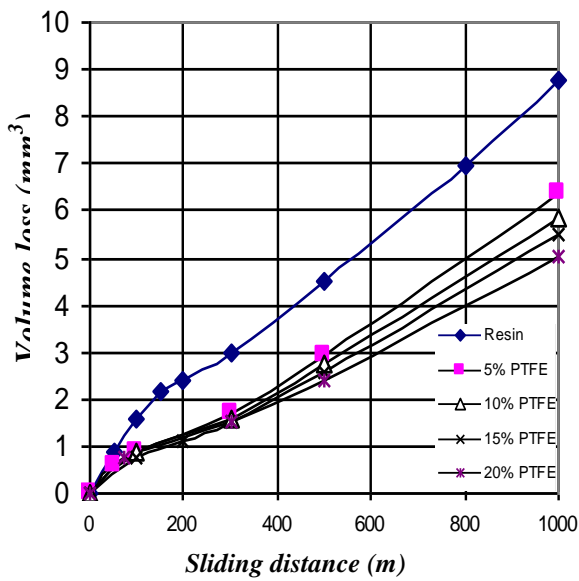
افزودن PTFE به رزین، باعث کاهش میزان سایش آن شده است (شکل ۷)، با افزایش درصد PTFE مقدار این کاهش، افزایش یافته است. در مورد PTFE نیز شواهد نشان‌دهنده تشکیل یک لایه فیلم انتقالی بسیار نازک و



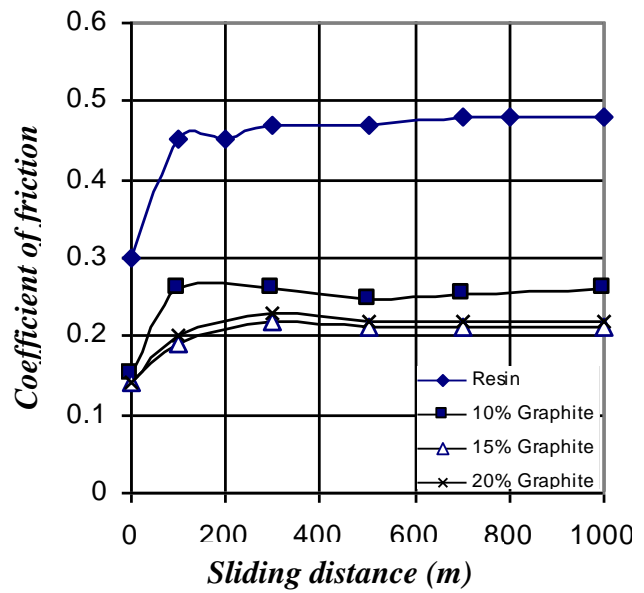
شکل ۵- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی گرافیت،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



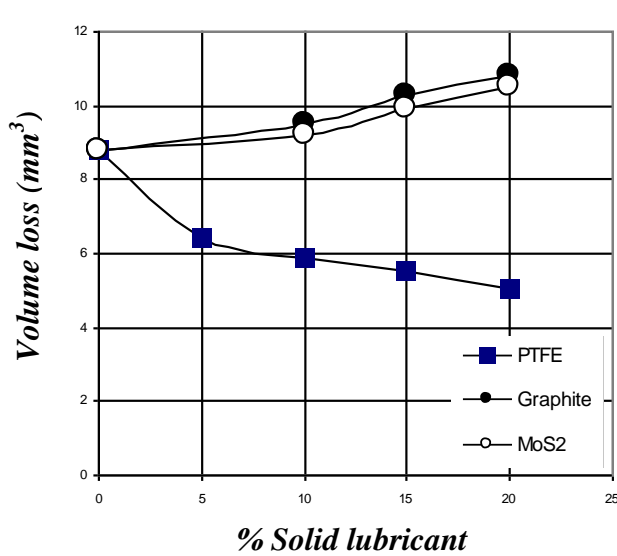
شکل ۴- رفتار اصطکاکی نمونه‌های حاوی مولیبدن دی سولفاید،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



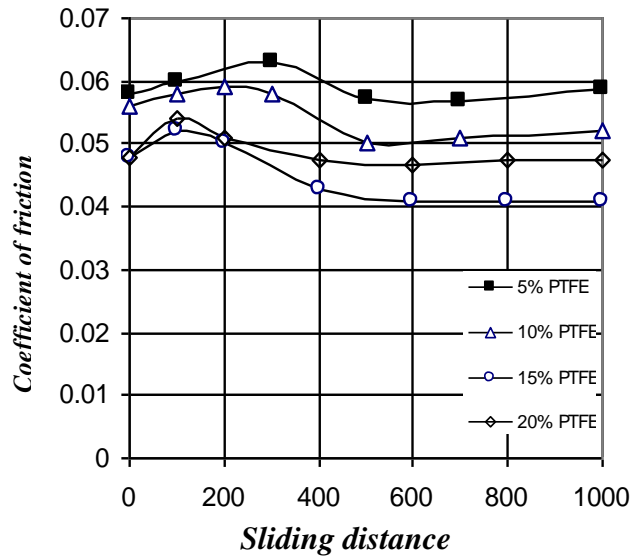
شکل ۷- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی پلی‌تترا فلورو اتیلن،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



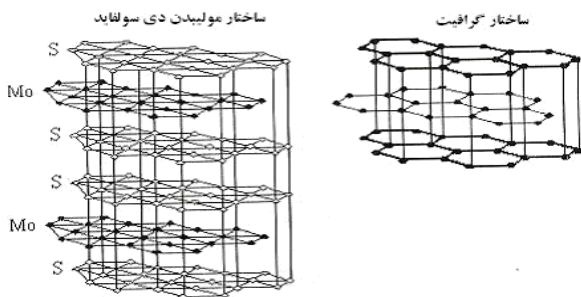
شکل ۶- رفتار اصطکاکی نمونه‌های حاوی گرافیت،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۹- تاثیر روانسازهای جامد بر رفتار سایشی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

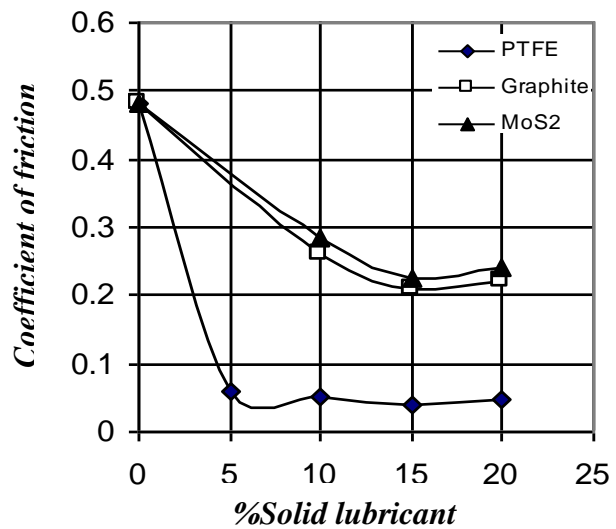


شکل ۸- رفتار اصطکاکی نمونه های حاوی پلی تترافلورو اتیلن، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۱۱- ساختار مولکولی گرافیت و مولیبدن دی سولفاید [۲۹]

تفاوت رفتار ایجاد شده بین گرافیت و مولیبدن دی سولفاید با PTFE را نیز می توان به نحوه تشکیل و ساختار متفاوت فیلم های انتقالی تشکیل شده از این مواد نسبت داد. در دو مورد اول ذرات سایشی به صورت لایه های با صفحات موازی در راستای حرکت جهت داده می شوند، مطابق شکل (۱۲)، در حالی که در مورد PTFE، جریان یافتگی سرد (cold creep) پلیمر، یک فیلم کاملاً یکنواخت، پیوسته و چسبنده را روی سطح مقابل ایجاد می کند. شکل (۱۳) مکانیزم تشکیل فیلم و نحوه تغییر فرم زنجیرهای پلیمری و آرایش یافتگی آنها به صورت نوارهای (striae) برش یافته را نشان می دهد [۳۰]. طبق این



شکل ۱۰- تاثیر روانسازهای جامد بر رفتار اصطکاکی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

علت این رفتار را می توان در ساختار متفاوت گرافیت نسبت به مولیبدن دی سولفاید دانست. شکل (۱۱) ساختار مولکولی این دو ماده را نشان می دهد. نیروهای بین لایه ای در گرافیت ضعیف تر بوده و در نتیجه در اثر تنش های وارد شده به راحتی برش خورده و سطوح آن از هم جدا می شوند. این موضوع خاصیت فداشوندگی آن را تقویت می کند و به همین علت سایش بالاتر و اصطکاک پایین تری در نمونه هایی که به آنها اضافه شده است، ایجاد می کند.

اثر فیلر سرامیکی

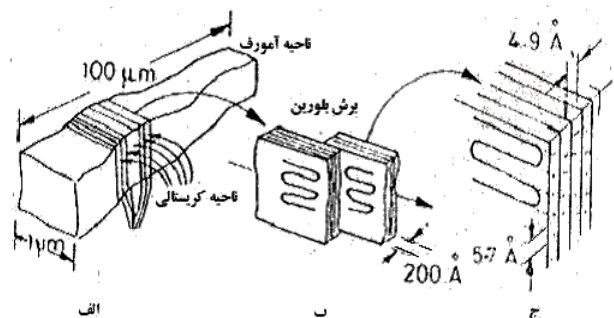
به منظور مطالعه تاثیر درصد و اندازه فیلرهای سرامیکی سخت بر رفتار سایشی پلیمرها، از ذرات سیلیکون کارباید استفاده شد. شکل‌های (۱۵ و ۱۶) مشخصات سایشی نمونه‌های حاوی SiC با اندازه ذرات ۳۸ و ۵ میکرون را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده تاثیر کاملاً متفاوت این دو نوع فیلر است. در حالی که فیلر با اندازه ذرات ۳۸ میکرون (مش ۴۰۰) باعث کاهش قابل توجه در مقدار سایش رزین شده است، ذرات ریز فیلر با اندازه ۵ میکرون (مش ۲۵۰۰)، میزان سایش را افزایش داده است. این نتایج مؤید نقش مثبت ذرات درشت فیلر در مقایسه با ذرات ریزتر می‌باشد. علت این رفتار را می‌توان به مکانیزم سایش کامپوزیت‌های رزین فنولیک نسبت داد. به طور کلی چهار نوع فرایند سایش برای مواد پلیمری گزارش شده است: الف) ایجاد ترک‌های سطحی (Surface Cracking) در مورد پلیمرهای آمورف در حالت شیشه‌ای ب) کشیدگی و آرایش‌یافتگی مجدد (Stretching and Reorientation) ساختار مولکولی پلیمرهای نیمه‌بلورین ج) ایجاد فیلم انتقالی با آرایش یافتگی زیاد از ماکرومولکول‌ها بین دو سطح و د) فیلم ضخیم از لایه پلیمری مذاب در دماهای سطحی بالا. ماتریس کامپوزیت‌های مورد مطالعه، رزین فنولیک، از پلیمرهای ترموستی است. این ماده دارای رفتاری شکننده با پایداری حرارتی بالا می‌باشد که از شبکه‌ای بودن ساختار زنجیرها و عدم تحرک آنها ناشی می‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که این مواد عمدتاً بر اثر مکانیزم‌های خستگی سطحی و ترک خوردن سطح (مکانیزم الف) دچار سایش می‌شوند، با وجودی که به لحاظ ساختاری به گروه پلیمرهای آمورف شیشه‌ای تعلق ندارد [۳۱ و ۳۲].

به دلیل لغزش و وارد آمدن نیروی عمودی بر نمونه، برش‌ها یا قطعات بلورین از ساختار جدا می‌شوند، اتصال این برش‌ها به یکدیگر، موجب تشکیل الیاف پلیمری آرایش یافته شده و اتصال الیاف مجاور هم به یکدیگر نیز ایجاد فیلم جهت یافته پلیمری را بین دو سطح موجب می‌شود. مکانیزم کلی این تغییرات روی سطح نمونه لغزش یافته در شکل (۱۴) آمده است.

تفاوت ساختاری فیلم‌های تشکیل شده نشان می‌دهد که پایداری فیلم در مورد نمونه‌های حاوی PTFE بیشتر بوده و همین موضوع تغییر در عملکرد سایشی اصطکاکی آنها را موجب شده است [۲۸، ۱۷، ۱۲]. ماهیت متفاوت این فیلم باعث بهبود مشخصات اصطکاکی رزین نیز می‌شود، شکل (۸).

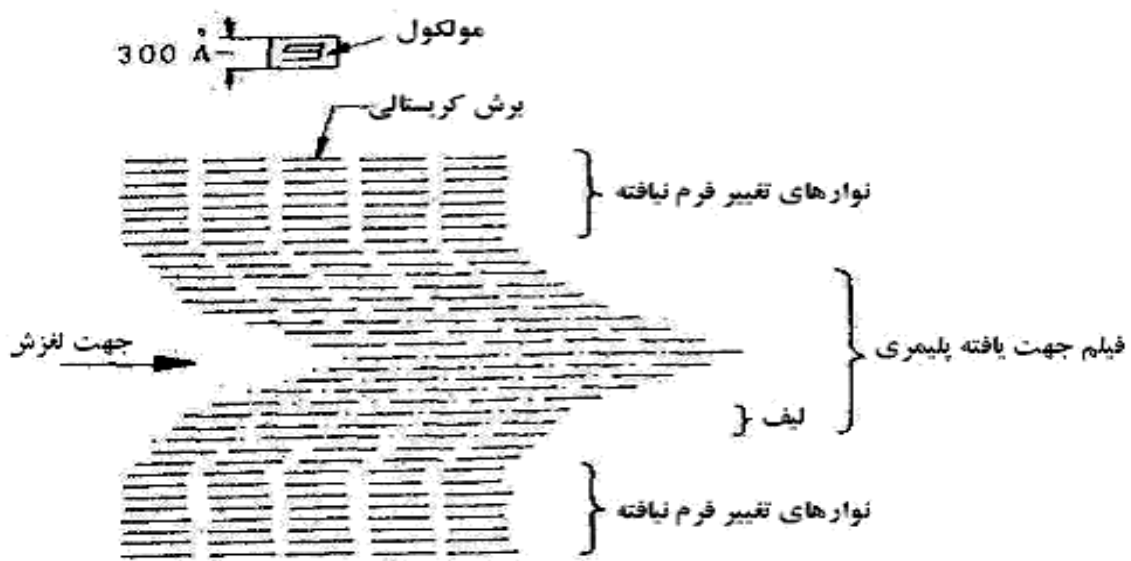


شکل ۱۲- جهت گیری ذرات گرافیت و مولیبدن دی سولفاید بین دو سطح (پس از لغزش اولیه) و ایجاد فیلم انتقالی



شکل ۱۳- ساختار پلی تترافلورو اتیلن و تغییرات آن هنگام تشکیل فیلم، الف) بلوک پلی تترافلورو اتیلن ب) برش‌های بلورین یک نوار تشکیل شده پس از لغزش ج) نحوه قرارگیری زنجیرهای پلیمری

درون برش‌ها [۳۰]



شکل ۱۴- مکانیزم تشکیل فیلم پلی تترا فلورو اتیلن بر اثر تغییر در ساختار آن [۳۰]

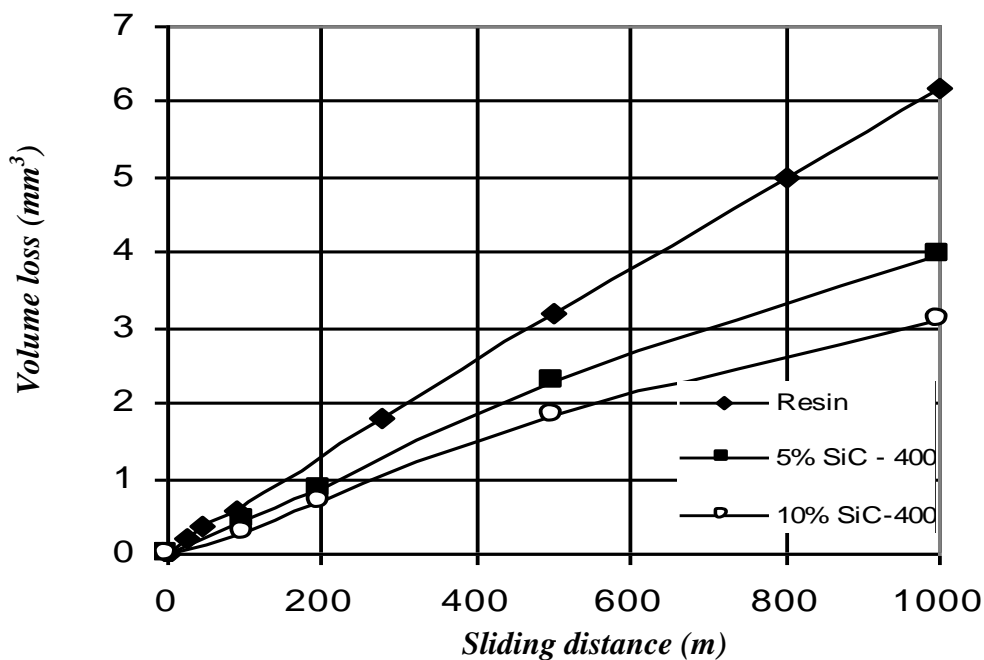
سایش نمونه‌ها مشاهده می‌شود [۳۲]، (شکل ۱۷). به نظر می‌رسد تأثیر اندازه ذرات سرامیکی به ضخامت لایه سطحی کامپوزیت که تحت تأثیر فرآیند سایش قرار گرفته و ذرات سایشی را می‌سازد بستگی دارد. ذرات بزرگتر از این ضخامت، تأثیر مثبت بر میزان سایش داشته و ذرات ریزتر باعث افزایش مقدار سایش می‌شوند.

نتیجه‌گیری

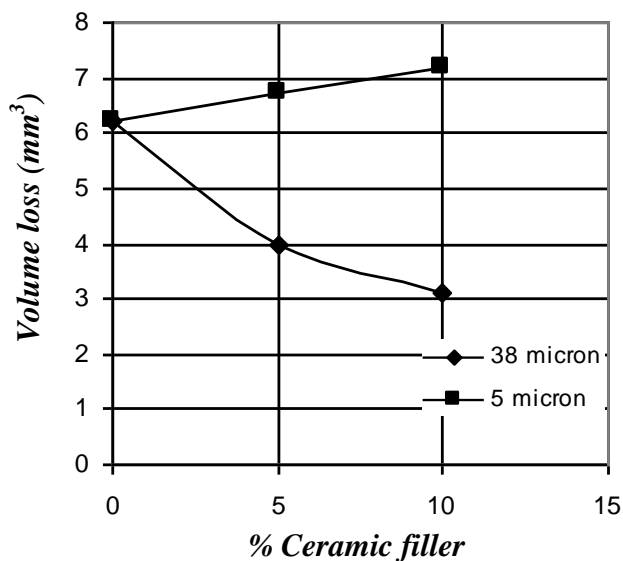
بر اساس مشاهدات تجربی به عمل آمده و مباحث فوق نتایج زیر به دست آمده است:

۱. افزودن فیلرهای مختلف باعث تغییر در رفتار سایشی و اصطکاکی پلیمرها می‌شود.
۲. گرافیت، مولیبدن دی سولفاید و پلی تترا فلورو اتیلن به عنوان روان‌ساز جامد، مقدار ضریب اصطکاک سطح کامپوزیت را از طریق ایجاد فیلم‌های انتقالی با مکانیزم‌های مختلف کاهش می‌دهند.

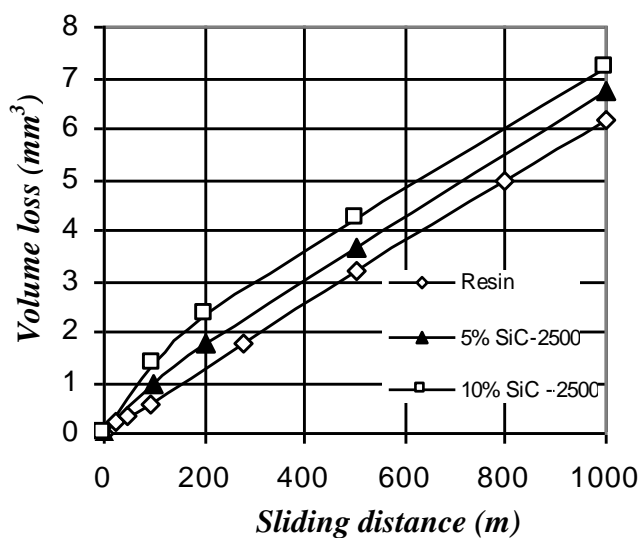
در اثر قرار گرفتن بین روی نمونه، یک میدان تنش فشاری زیر منطقه تماس ایجاد می‌شود که توسط یک میدان کششی احاطه شده است. تنش‌های کششی روی سطح بیشتر بوده و در لایه مرزی تماس ماکزیمم می‌شوند. به علت شکننده بودن ماتریس مورد استفاده و عدم توانایی تحمل تنش‌های کششی یک سری ترک از محل قرار گرفتن بین روی سطح به درون ماتریس گسترش می‌یابد. این ترک‌های عمود بر جهت لغزش پس از رشد، باعث موجی شدن سطح و در نهایت ایجاد ذرات سایش و ساییده شدن نمونه می‌شوند [۳۲]. فیلر با اندازه ذرات کوچک باعث از بین رفتن ترک‌های بزرگ در سطح کامپوزیت پلیمری می‌شود ولی شکل عمومی ترک‌های سطح تغییر نمی‌کند. این ذرات به راحتی در اثر ساییده شدن ماتریس از سطح جدا شده و در فضای بین دو سطح در تماس قرار می‌گیرند. سختی بسیار زیاد فیلرهای سرامیکی از تبدیل آنها به ذرات بسیار ریز ممانعت می‌کند. قرار گرفتن ذرات بین دو سطح باعث تغییر مکانیزم سایش به سایش خراشان سه جسمی گردیده و در نتیجه سطح کامپوزیت و مقابل هر دو دچار سایش شده و به همین علت افزایش در میزان



شکل ۱۵- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی سیلیکون کارباید با اندازه ذرات ۳۸ میکرون، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۱۷- تأثیر درصد و اندازه ذرات فیبر سیلیکون کارباید بر رفتار سایشی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg



شکل ۱۶- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی سیلیکون کارباید با اندازه ذرات ۵ میکرون، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

۲. تأثیر ذرات سرامیکی در رفتار سایشی به اندازه ذرات فیبر بستگی دارد.
 ۳. ذرات بزرگتر باعث محافظت از ماتریس در حین فرایند سایش شده و ذرات ریزتر با کنده شدن و قرار گرفتن بین دو سطح، میزان سایش را افزایش می‌دهند.

۱. پلی تترا فلورو اتیلن بر خلاف گرافیت و مولیبدن دی سولفاید مقدار سایش را نیز کاهش می‌دهد. عملکرد گرافیت در بهبود رفتار اصطکاکی و مولیبدن دی سولفاید در افزایش مقاومت سایشی مناسب‌تر است.

- مراجع
13. Bahadur S, Gong D and Anderegg J.W., *The investigation of the action of fillers by XPS studies of the transfer films of PEEK and its composites containing CuS and CuF₂*, Wear, 160, 131-8, 1993
 14. Kapoor A. and Bahadur S., *Transfer film bonding and wear studies on CuS-nylon composite sliding against steel*, Tribology International., 27, 323-9, 1994
 15. Yu L. and Bahadur S., *An investigation of the transfer film characteristics and tribological behaviors of polyphenylene sulfide composites in sliding against tool steel*. Wear, 214, 245-51, 1998
 16. Friedrich K. and et al., *Effects of various fillers on the sliding of polymer composites*, Copm. Sci. & Tech., 65, 2329-43, 2005
 17. Tanaka K., *Effect of Various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites*. In: Friedrich K, editor, *Friction and wear of polymer composites*, Elsevier, Amsterdam, 137-74, 1986
 18. Zhao Q. and Bahadur S., *The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear*, Wear, 225-229, 660-8, 1999
 19. Zhao Q. and Bahadur S., *A study of the modification of the friction and wear behavior of PPs by particulate Ag₂S and PbTe fillers*, Wear, 218 (1998), 62-72
 20. Gopal F., Dharani L.R. and Blum F.D., *Fade and wear characteristics of a glass-fiber-reinforced phenolic friction material*, Wear, 174, 119-27, 1994
 21. Pogolian A.K. and et al, *Investigation of the tribochemical and physico-chemical processes in sliding of mineral-filled formaldehyde copolymer composites against steel*, Wear, 260, 662-9, 2006
 22. Ho S.C. et al, *Effect of Phenolic content on tribological behavior of carbonized copper-phenolic based friction material*, Wear, 258, 1764-74, 2005
 23. Pakravan M., M.Sc. thesis, AmirKabir University of Technology, Tehran, 2002
 1. Ho K. and Jeng M.C., *Tribological characteristics of short glass fiber reinforced polycarbonate composites*, Wear, 206, 60-68, 1997
 2. Santner E. and Czichos H., *Tribology of polymers*, Tribol. Int., 22, 103-109, 1989
 3. Bohm H., Betz S. and A. ball, *The wear resistance of polymers*, Tribol. Int., 23, 399-406, 1990
 4. Mens J.W and Gee A.W., *Friction and wear behavior of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water*, Wear, 149, 255- 268, 1991
 5. Cho M.H., Bahadur S. and Pogolian A.K., *Friction and wear studies using Taguchi method on polyphenylene sulfide filled with a complex mixture of MoS₂, Al₂O₃ and other compounds*, Wear, 258, 1825-35, 2005
 6. Chang L. and Zhang Z., *Tribological properties of Epoxy nanocomposites*, Wear, 260, 869-78, 2006
 7. Friedrich K., Lu Z. and Hager A.M, *Recent advances in polymer composites' tribology*, Wear, 190, 139-144, 1995
 8. El-Sayed A.A. and et al., *Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications*, Wear, 184, 45-53, 1995
 9. Voort J.V. and Bahadur S., *Effect of PTFE addition on the transfer film, wear and friction of PEEK- CuO composite in: Tribology Symposium*, Ed. H. Masudi, ASME, Texas, 1995, 169
 10. Bahadur S. and Kapoor A., *The effect of ZnF₂, Zns and PbS fillers on the tribological behavior of nylon 11*, Wear, 155, 49-61, 1992
 11. Yu L., Liu W. and Xue Q., *Effect of various inorganic fillers on the friction and wear behaviors of PPS*, J. Appl. Polym. Sci., 68, 1643-50, 1998
 12. Bahadur S and Gong D, *The action of fillers in the modification of the tribological behaviour of polymers*, Wear, 158, 41-59, 1992

29. Lansdown A.R., *Molybdenum Disulphide Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1999
30. Biswas S.K. and Vijayan K., *Friction and wear of PTFE - a review*, Wear, 158, 193-211, 1992
31. Hutchings I. M., *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, Great Britain, 1992
32. J.M. Durand, *Role of reinforcing ceramic particles in the wear behavior of polymer - based model composites*, Wear, 181-183, 833-9, 1995
24. *Testing of plastics and Elastomers, Determination of Density*, DIN 53479, 1976
25. Fusaro R.L., *Self-lubricating polymer composites and polymer transfer film lubrication for space application*, Tribology International., 23, 105-22, 1990
26. Lansdown A.R., *Molybdenum Disulphide Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1999
27. Cho M.H. et al, *tribological properties of solid lubricants (Graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake materials*, Wear, 260, 855-60, 2006
28. Biswas S.K. and Vijayan K., *Friction and Wear of PTFE- a review*, Wear, 158, 193-211, 1992