

## مطالعه رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف آسیاب شده

سعید کریمی<sup>۱</sup>، سیروس جوادپور<sup>۲\*</sup>

### چکیده

در دهه‌ی گذشته، توجه محققان به کامپوزیت‌های نانویی و میکرونی برای بهبود خواص سایشی اپوکسی متمرکز شده است. پژوهش حاضر نیز به مطالعه‌ی خواص سایشی کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف آسیاب شده‌ی میکرونی شیشه E، شیشه S و کربن با استحکام بالا پرداخته است. برای این منظور، نخست الیاف اولیه با استفاده از آسیاب ساینده به پودر تبدیل شدند و مورفولوژی آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. کامپوزیت‌های تولیدی، با مخلوط و اضافه کردن ۱wt.% پودر حاصل از آسیاب‌کاری الیاف، به یک رزین اپوکسی تجاری تبدیل شدند. جهت ارزیابی خواص سایشی کامپوزیت‌های تولیدی، از آزمون پین بر روی دیسک استفاده و میزان ضریب اصطکاک و نرخ سایش آن‌ها تعیین شد. بر اساس تصاویر SEM سطح سایش نمونه‌ها، مکانیزم حاکم بر سایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین از آزمون سختی‌سنجی برای مقایسه‌ی تغییرات سختی استفاده شد. با توجه به نتایج آزمون‌های یاد شده، از یک سو ضریب اصطکاک به گونه قابل ملاحظه از حدود ۰/۵۲۴ مربوط به نمونه‌ی خالص، به میزان ۰/۰۶۶ مربوط به کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف آسیاب شده‌ی شیشه S کاهش یافت و از سوی دیگر نیز با وجود سختی بالاتر این نمونه‌های کامپوزیتی، نرخ سایش آن‌ها مشابه با حالت خالص به دست آمد. هم‌چنین نرخ سایش کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن آسیاب شده، ۱۳ درصد کمتر از حالت تعیین شد. ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه E، به میزان جزئی کمتر از نمونه‌ی خالص به دست آمد؛ اما نرخ سایش یکسانی با آن از خود نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** الیاف کربن، الیاف شیشه، آسیاب‌کاری، کامپوزیت زمینه‌ی اپوکسی، رفتار تریبولوژیکی.

<sup>۱</sup> - فارغ التحصیل دکتری تخصصی مهندسی مواد، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

<sup>۲</sup> - استاد بخش و عضو هیئت علمی، مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

\* - نویسنده مسوول مقاله: Sirus. Javadpor@shirazu.ac.ir

## پیشگفتار

رزین‌های اپوکسی، گروهی از مواد پلیمری گرماسخت هستند که ترکیب بی‌نظیری از خواص را دارند. برتری این پلیمرها نسبت به سایر پلیمرهای گرماسخت، قابل ملاحظه است و از این روبه‌طور گسترده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای استفاده می‌شود. استحکام مکانیکی بالاتر، خواص الکتریکی و حرارتی بهتر، مقاومت به خوردگی مناسب‌تر، انقباض کمتر در حین عملیات پخت و چسبندگی بیش‌تر به انواع الیاف و تقویت‌کننده از ویژگی‌های اصلی رزین‌های اپوکسی به شمار می‌رود [۱ و ۲]. از نارسایی‌های اصلی این رزین نیز می‌توان به مقاومت نامناسب آن به سایش اشاره کرد [۳].

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص بهبود خواص سایشی انواع اپوکسی انجام شده است. این مطالعات به صورت تئوری [۴ و ۵] یا عملی انجام شده‌اند [۶]. از جمله مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به توزیع روغن‌های کپسوله شده در زمینه‌ی اپوکسی اشاره کرد. پوسته‌ی این کپسول‌های حاوی روغن، طی فرآیند سایش از بین رفته و محتویات آن‌ها، سبب کاهش ضریب اصطکاک و نرخ سایش می‌شود [۶]. بر خلاف این روش‌های دشوار و نامتعارف، توجه محققان بیش‌تر به سوی کامپوزیت‌های نانویی و میکرونی معطوف شده است. برای نمونه، مک‌کوک و همکارانش در سال ۲۰۰۶ با به کارگیری ۳/۵ درصد حجمی نانو ذرات ZnO همراه با ۱۴/۵ درصد حجمی تفلون، موفق به کاهش ضریب اصطکاک اپوکسی تا مقدار ۰/۱۱۳ شدند (حدود ۷۰۰ درصد کاهش نسبت به حالت خالص) [۷]. در همان سال، گروه دیگری از محققان، نرخ سایش یک کامپوزیت زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه E را با افزودن ۲/۵ درصد از ذرات ۱-۳۰ μm کاربید سیلیسیوم کاهش دادند؛ اما ضریب اصطکاک هیبرید یاد شده، به میزان ۷ درصد افزایش یافت [۸]. خواص سایشی یک رزین اپوکسی حاوی ۱۵ درصد حجمی از دو نوع گرافیت (با برند و ذرات میکرونی مختلف)، توسط استابیک و دیبوسکا ارزیابی شد که نتیجه‌ای جز کاهش ضریب اصطکاک تا مقدار ۰/۲۵ نداشت [۹]. در تحقیقی دیگر، با به کارگیری ۵۰ درصد حجمی از ذرات گرافیت با ابعاد کم‌تر از ۱۰ μm، ضریب اصطکاک از حدود ۰/۵۵ به

۰/۳۵ کاهش یافته است [۱۰]. زینگ و لی، ذرات سیلیسیوم کروی با دو اندازه‌ی ۱۲۰ و ۵۱۰ نانومتری را به زمینه‌ی اپوکسی افزودند و بدون اشاره به تغییر ضریب اصطکاک، کاهش قابل ملاحظه‌ی ۱۰ برابری در نرخ سایش را گزارش کردند [۱۱]. پژوهش‌هایی نیز در زمینه ساخت و تولید انواع هیبریدها انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ساخت هیبریدی متشکل از ذرات میکرونی آلومینیوم، الیاف کربن آسیاب شده و الیاف شیشه E آسیاب شده در زمینه‌ی اپوکسی اشاره کرد که هیبرید یاد شده قابلیت کاهش ضریب اصطکاک اپوکسی خالص از حدود ۰/۷ به ۰/۴ را دارد [۱۲]. تأثیر افزودن مقادیر جزئی الیاف کربن آسیاب شده (۱/۶۶-۰/۱۵ درصد حجمی) در بهبود خواص سایشی اپوکسی، توسط چند و نایک در سال ۲۰۰۸ بررسی شد [۱۳]. آن‌ها کاهش ۱۸ درصدی در نرخ سایش را تحت نیروی ۱N در مسافت ۲۵m گزارش کردند. وی در همان سال، تأثیر افزودن ۳ درصد حجمی الیاف کربن آسیاب شده را بر کاهش ضریب اصطکاک اپوکسی بررسی کرد و عدد ۰/۴ را برای بهترین شرایط تولید به روش سانتریفیوژ با دور بالا ارائه کرد [۱۴].

هدف از تحقیق حاضر، تولید کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی ۱wt.% پودر حاصل از آسیاب‌کاری الیاف کربن با استحکام بالا و الیاف شیشه E و S و بررسی خواص تریبولوژیکی آن‌ها است. این نمونه‌های کامپوزیتی، با یک روش نسبتاً ساده و مقرون به صرفه ساخته شدند. برای ارزیابی خواص سایشی آن‌ها، آزمون پین بر روی دیسک انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان الیاف آسیاب شده را به عنوان یک تقویت‌کننده‌ی میکرونی مناسب جهت بهبود خواص سایشی رزین‌های اپوکسی در نظر گرفت. از جنبه‌های محیط‌زیستی نیز استفاده از الیاف آسیاب شده نسبت به سایر تقویت‌کننده‌های نانویی و میکرونی ارجحیت دارد؛ زیرا می‌توان آن را از ضایعات پارچه‌ها و الیاف‌های کارخانه‌های نساجی الیاف بازیافت کرد.

## مواد و روش‌ها

### مواد و تجهیزات

در این تحقیق، الیاف کربن با استحکام بالا (TORAYCA T700-S)، الیاف شیشه‌ای با استحکام بالا (LBIE HS4C S-glass) و الیاف شیشه‌ای تجاری (CAMELYAF E-glass) به عنوان مواد اولیه جهت آسیاب‌کاری استفاده شدند. فاز زمینه‌ی کامپوزیت را نیز یک رزین اپوکسی تجاری از نوع پخت در دمای بالا (رزین LV 1189 و سخت کننده HA 41 تهیه شده از گروه صنعتی رزین مکرر) تشکیل داد. از تجهیزات اصلی مورد استفاده در این تحقیق، می‌توان به میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge-360)، دستگاه آزمون پین بر روی دیسک موجود در دانشگاه شیراز - (شکل ۱) و سختی‌سنج (SANTAM: Shore-D) اشاره کرد.

### آسیاب‌کاری ساینده

نخست، الیاف اولیه با استفاده از قیچی دستی به ابعاد تقریبی ۱cm بریده و برای آسیاب‌کاری ساینده (Attrition Milling) آماده شدند. یک محفظه‌ی پیرکس همراه با پره‌هایی از جنس تفلون سخت، آسیاب ساینده مورد استفاده در این تحقیق را تشکیل داد. از گلوله‌های فولادی پوشش داده شده با کروم سخت نیز به عنوان عامل ساینده در آن استفاده شد. از نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰۰ در اتانول به عنوان محیط سرد کننده و روان‌ساز استفاده شد. پره‌های تفلونی این آسیاب، با نیروی

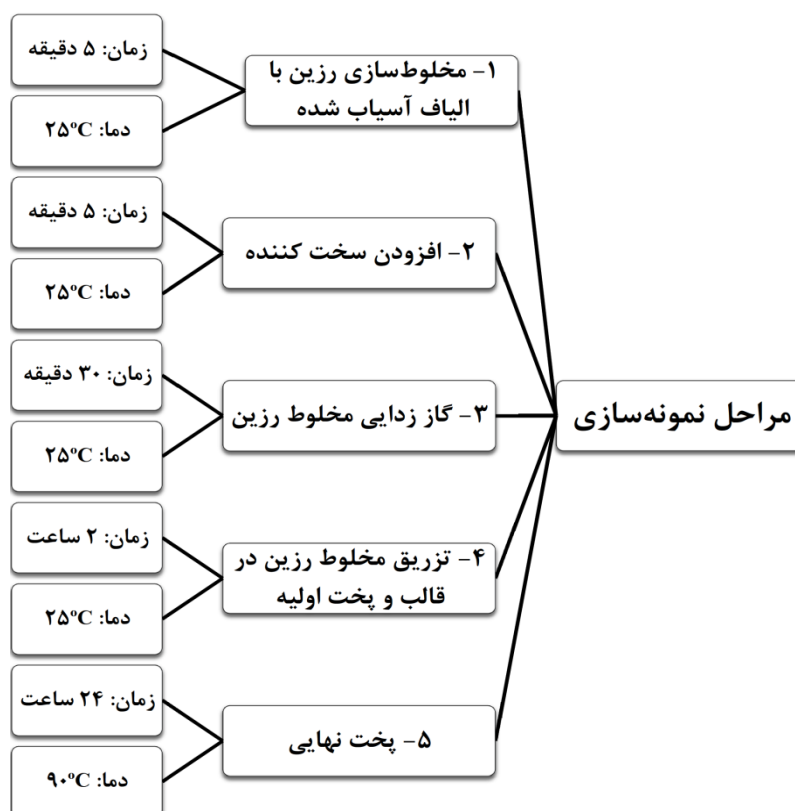
محرکه‌ی یک دریل ستونی و با سرعت چرخشی ۳۰۰RPM برای مدت زمان ۳۰ دقیقه به حرکت در آمدند که حاصل آن، یک دوغاب از الیاف آسیاب شده بود. دوغاب حاصل، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در گرم‌کن خشک شد و پس از الک کردن، پودر با ابعاد کمتر از  $300\mu\text{m}$  به عنوان الیاف آسیاب شده مورد استفاده قرار گرفت.

### ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، از نسبت وزنی رزین به سخت کننده ۸۰:۱۰۰ استفاده و برای همه‌ی نمونه‌ها، مقدار عامل تقویت کننده برابر با ۱wt.% در نظر گرفته شد. فیلوچارت مراحل نمونه‌سازی در شکل ۲ آمده است. نخست الیاف آسیاب شده به مدت ۵ دقیقه، با استفاده از هم‌زن مغناطیسی، با رزین مخلوط شد و پس از افزودن سخت کننده به آن مخلوط، هم‌زدن به مدت ۵ دقیقه دیگر نیز ادامه یافت تا یک مخلوط یکنواخت و آماده‌ی قالب‌گیری ایجاد شود. سپس مخلوط یاد شده به مدت زمان ۳۰ دقیقه در یک محفظه‌ی خلأ با میزان خلأ نسبی  $250\text{ torr}$  گاز زدایی شد. پس از تزریق مخلوط حاصل در قالب‌های شیشه‌ای با ابعاد حفره‌ی  $30 \times 30 \times 6\text{ mm}^3$ ، مرحله‌ی پخت اولیه برای مدت زمان ۲ ساعت در دمای محیط انجام شد و در پایان، فرایند پخت نهایی برای مدت زمان ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافت.



شکل ۱- دستگاه پین بر روی دیسک (Pin on Disc) مورد استفاده در آزمون سایش



شکل ۲- فیلوچارت مراحل ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

با سرعت خطی  $0.4\text{m/s}$ ، دوباره نمونه‌ها تمیز و وزن آن‌ها ثبت شد. لازم به ذکر است که این آزمون در دمای  $25 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت  $30 \pm 10$  درصد انجام شد.

ضریب اصطکاک لحظه‌ای، از خروجی‌های اصلی دستگاه آزمون سایش مورد نظر بود؛ اما پارامتر نرخ سایش با توجه به رابطه (۱) محاسبه شد [۴]:

$$W_R = \frac{\Delta m}{\rho L F} \times 10^3 \quad (1)$$

در رابطه بالا، کمیت‌های  $\Delta m$  (g)،  $W_R$  ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )،  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )،  $L$  (m) و  $F$  (N) به ترتیب عبارتند از نرخ سایش، مقدار کاهش وزن، چگالی نمونه، مسافت پیموده شده و نیروی اعمالی. برای تعیین چگالی نمونه‌ها نیز از قانون مخلوط‌ها مطابق با رابطه (۲) استفاده شد [۱۵]:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (2)$$

### آزمون سختی‌سنجی

آزمون سختی‌سنجی Shore-D بر اساس استاندارد ASTM D2240-05، در دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت  $50 \pm 5$  درصد انجام شد. هر آزمون، پنج بار تکرار و از نتایج آن میانگین‌گیری شد. دقت دستگاه برابر با یک Shore-D بود و اختلاف نتایج بیشینه و کمینه سختی هر نمونه نیز حداکثر برابر با همین مقدار به دست آمد.

### آزمون سایش

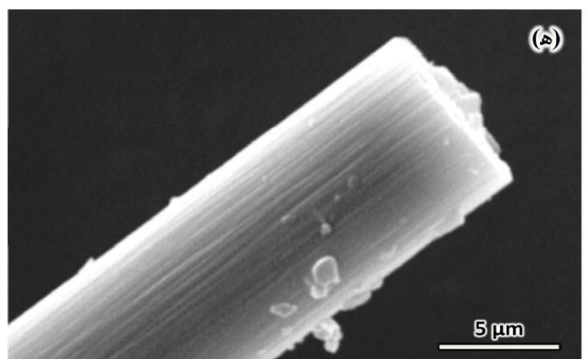
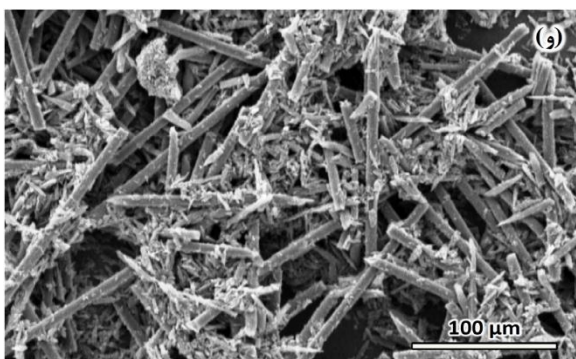
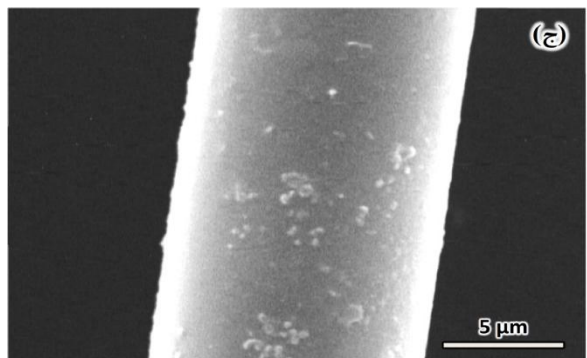
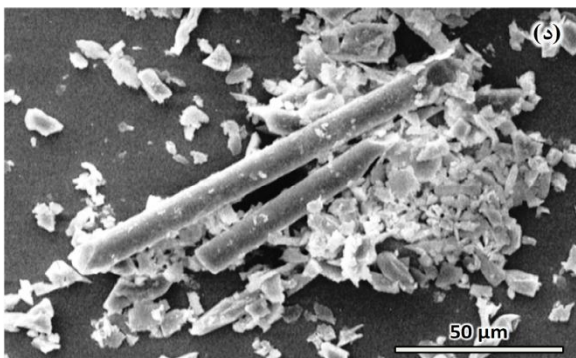
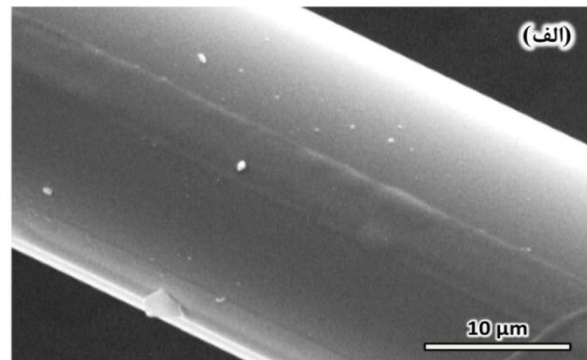
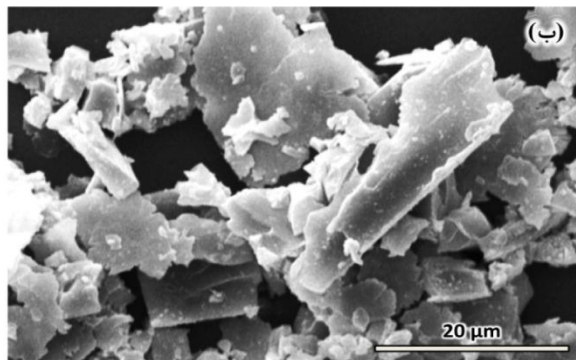
آزمون سایش با استفاده از دستگاه شکل ۱ و بر اساس استاندارد ASTM G99-04 انجام شد. برای این منظور، نخست سطح نمونه‌ها تا سنباده ۳۰۰۰ پالیش و با استون از هر گونه آلودگی پاک شد. پس از وزن کردن نمونه‌ها با ترازویی با دقت  $0.001\text{g}$ ، در دستگاه آزمون سایش تعبیه شدند. نیروی برابر با  $10\text{N}$  در نظر گرفته و توسط پین‌هایی از جنس فولاد بلبرینگ با سختی ۶۴RC، به سطح نمونه‌ها اعمال شد. پس از پیمودن مسافت  $250\text{m}$

شکل ۳، تصاویر SEM هر سه الیاف اولیه را همراه با مورفولوژی پودر حاصل از آسیاب‌کاری هر یک از آنها نشان می‌دهد. چنین به نظر می‌رسد که به غیر از الیاف کربن، آسیاب‌کاری سایر الیاف‌ها به ذراتی با نسبت ابعادی پایین منجر می‌شود. این در صورتی است که می‌توان ذرات آسیاب شده‌ی الیاف کربن را "الیاف کوتاه" در نظر گرفت. موضوع دیگر، مکانیزم حاکم بر فرآیند آسیاب‌کاری است: شکست برای الیاف کربن و سایش برای الیاف شیشه. با توجه به شکل ۳، قطر الیاف شیشه E، شیشه S و کربن به ترتیب برابر با ۲۵، ۱۱ و ۸ میکرو متر تعیین شد.

در این رابطه،  $\rho$  و  $W$  به ترتیب چگالی و درصد وزنی هر فاز است. اندیس‌های  $c$ ،  $f$  و  $m$  نیز به ترتیب بیانگر خواص مربوط به کامپوزیت، الیاف و زمینه است. جدول ۱، چگالی مواد اولیه (استخراج شده از کاتالوگ تولید کننده) و کامپوزیت‌های تولیدی (محاسبه شده با رابطه ۲) را نشان می‌دهد. در این جدول، نمونه‌های مورد نظر نیز کد گذاری شده‌اند تا از تکرار پرهیز شود.

### نتایج و بحث

#### مورفولوژی الیاف آسیاب شده



شکل ۳- تصاویر SEM گرفته شده از الیاف‌های اولیه و مورفولوژی آن‌ها پیش و پس از آسیاب‌کاری: "الف" و "ب" برای الیاف شیشه E؛ "ج" و "د" برای الیاف شیشه S؛ "ه" و "و" برای الیاف کربن

جدول ۱- چگالی مواد اولیه و نمونه‌های کامپوزیتی تولیدی

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	کد نمونه	ماده‌ی اولیه / نمونه‌ی کامپوزیتی
۱,۲۵۰۰	P	اپوکسی خالص
۲,۵۴۰۰	-	الیاف شیشه E
۲,۴۹۰۰	-	الیاف شیشه S
۱,۸۰۰۰	-	الیاف کربن
۱,۲۵۶۴	E	اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه E آسیاب شده
۱,۲۵۶۳	S	اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه S آسیاب شده
۱,۲۵۳۸	C	اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن آسیاب شده

محتمل است؛ زیرا این مکانیزم هنگامی فعال می‌شود که ماده‌ی مورد نظر ترد باشد و یا جسم خارجی ساییده وجود داشته باشد و در سطح سایش، فرورفتگی دیده شود [۱۶]. در بخش بعد، بیشتر به این موضوع پرداخته و با توجه به تصاویر SEM، مکانیزم حاکم تعیین شده است.

با توجه به این توضیحات، چنین به نظر می‌رسد که به طور کلی نمونه‌های کامپوزیتی نوع C و S به ترتیب در مرحله‌ی سوم و اول سایش خود قرار دارند. از این رو، ضریب اصطکاک نمونه‌ی C بالاتر از نمونه‌ی P است و نمونه‌ی S نیز حدود ۸۰ درصد ضریب اصطکاک کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد (شکل ۴). شایان ذکر است که به دلیل ضریب اصطکاک بسیار کمتر نمونه‌ی S و در نتیجه نیروی بسیار کمتر وارده به نیروسنج (Load Cell) دستگاه آزمون سایش، نوسان بسیار زیادی در نمودار این نمونه مشاهده می‌شود.

برای اثبات سه مرحله‌ای بودن و قرار داشتن نمونه‌ی S در اولین مرحله از سایش خود، آزمون سایش بر روی این نمونه با مسافت پیمایش ۵۰۰m و سرعت خطی ۰,۱۴m/s دوباره تکرار شد (شکل ۵). برای ساخت این نمونه، دیگر عملیات گاز زدایی مخلوط رزین و الیاف آسیاب شده انجام نشد که تأثیر آن همراه با افزایش سرعت خطی بین ساییده، نیز به خوبی در افزایش ضریب اصطکاک نسبت به حالت گاز زدایی شده مشهود است. با توجه به شکل ۵، می‌توان سه مرحله‌ی سایش یاد شده را به خوبی مشاهده کرد: مرحله‌ی اول (۰-۱۵۰m)، مرحله‌ی دوم (۱۵۰-۳۵۰m) و مرحله‌ی سوم (۳۵۰-۵۰۰m).

### خواص سایشی و سختی کامپوزیت‌های تولیدی

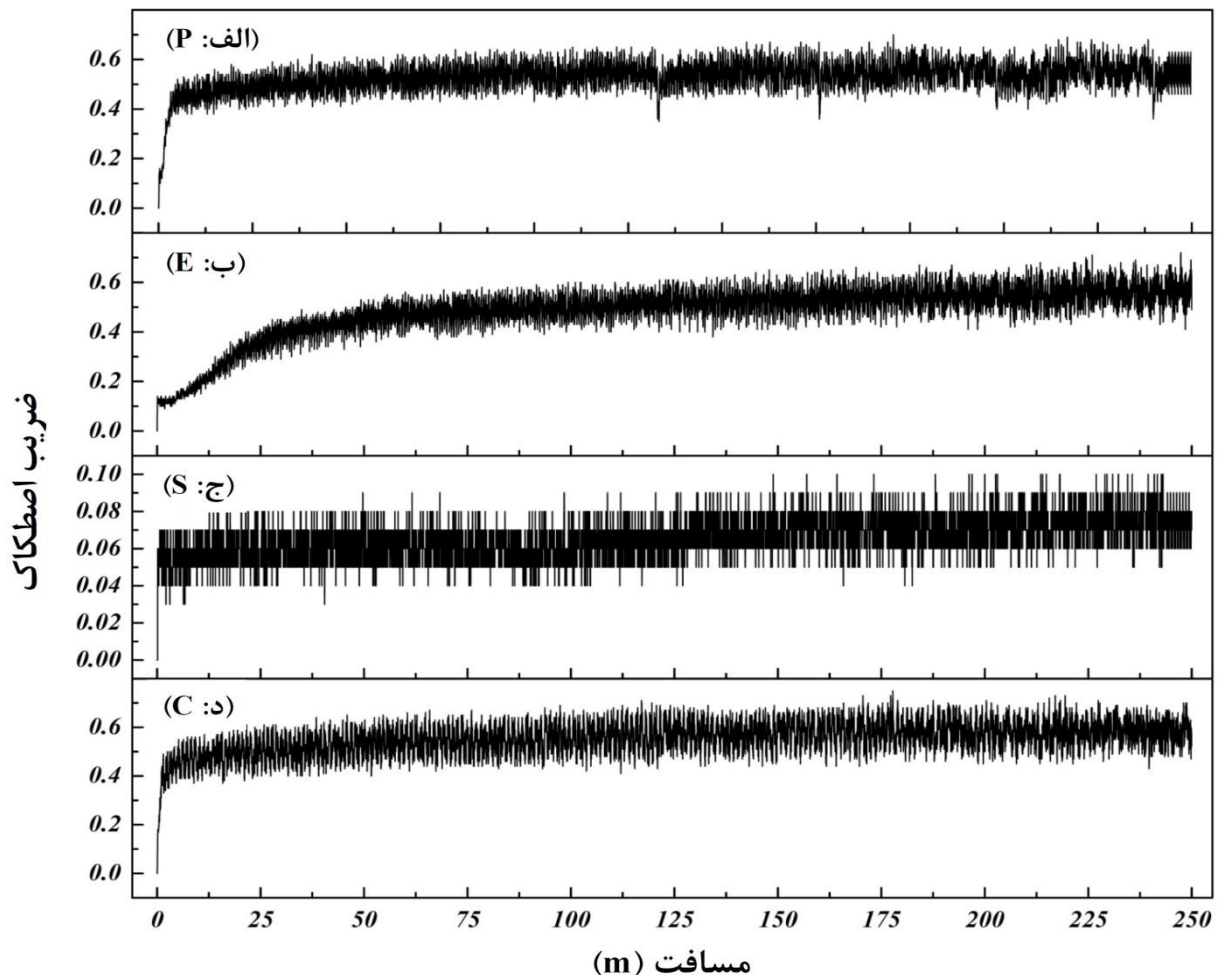
نتایج کمی آزمون سایش در شکل‌های ۴ تا ۶ آمده است. شکل ۴ تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها را بر حسب مسافت پیموده شده در آزمون سایش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، اگرچه مقدار ضریب اصطکاک نمونه‌های P، E و C تقریباً یکسان است؛ اما شیوه‌ی تغییرات نمونه‌ی E، متفاوت از دو نمونه‌ی دیگر است. در نمونه‌ی یاد شده، نخست ضریب اصطکاک در حدود ۰,۱ است؛ اما پس از پیمودن مسافت ۱,۰m، یک حالت انتقال رخ می‌دهد و عملاً مکانیزم سایش تغییر می‌کند و مقدار ضریب اصطکاک به میزان نمونه‌های P و C نزدیک می‌شود. از این رو می‌توان سه مرحله را برای سایش این نمونه‌ی کامپوزیتی در نظر گرفت. مرحله‌ی اول (۰-۱۰m): اتصال ذرات آسیاب شده‌ی الیاف شیشه E به میزانی است که می‌تواند مسافت اولیه‌ی سایش را تحمل کند و بسیار محتمل است که مکانیزم حاکم در این مرحله، از نوع چسبان (Adhesion) باشد. مرحله‌ی دوم (۱۰-۲۵m): یک مرحله‌ی انتقالی است که در آن جدا شدن فصل مشترک میان ذرات خرد شده‌ی الیاف شیشه E آغاز می‌شود و ذرات کنده شده، به عنوان ذرات خارجی ساییده عمل می‌کنند و مکانیزم حاکم به سمت خراشان (Abrasion) پیش می‌رود. مرحله‌ی سوم (۲۵-۲۵۰m): مکانیزم حاکم از نوع خراشان و به طور خاص به صورت براده‌برداری (Micro-cutting) پیش‌بینی می‌شود؛ زیرا ذرات ساییده‌ی با سختی نسبی بسیار بالا در سیستم حضور دارند [۱۶]. از سوی دیگر، فعال شدن مکانیزم خستگی سطحی از نوع دندان‌های (Indentation) نیز

کاهش قطر الیاف (D) بر افزایش انعطاف‌پذیری آن (f) را نشان می‌دهد [۱۷]. با توجه به این رابطه و به دلیل قطر کم‌تر الیاف کربن نسبت به سایر نمونه‌ها (شکل ۳-ج)، نوع آسیاب شده آن نیز انعطاف‌پذیری (f) بالاتری را از خود نشان می‌دهد و از این رو در اثر فرو رفتن سوزن دستگاه سختی‌سنج، راحت‌تر می‌تواند در فاز زمینه خم شود.

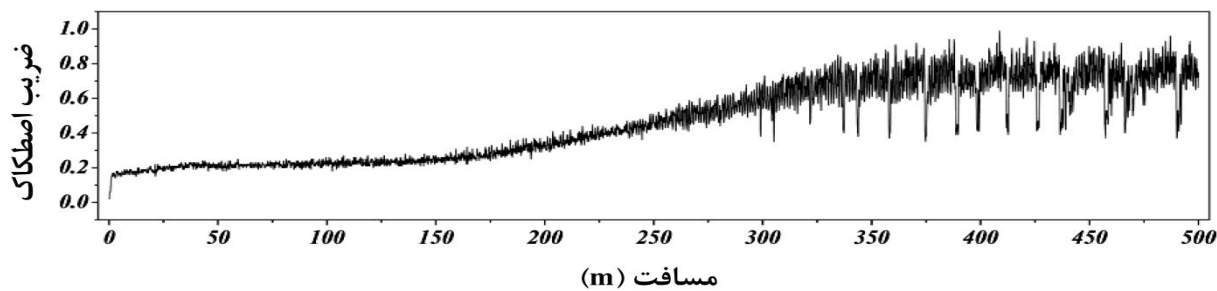
$$f \approx \frac{20}{E_f D^4} \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $E_f$  (GPa) و  $D$  ( $\mu\text{m}$ ) به ترتیب عبارتند از مدول یانگ و قطر الیاف. نتیجه‌ی مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری الیاف‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز در جدول ۲ آمده است.

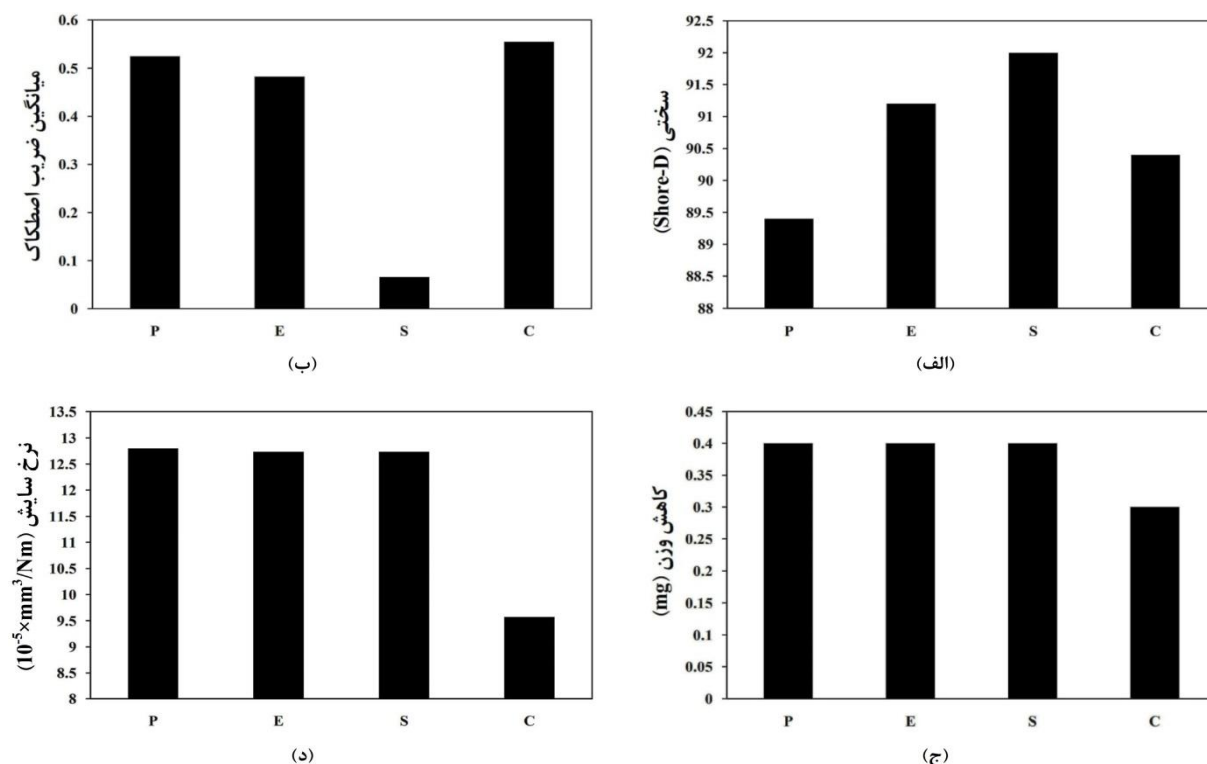
با وجود سختی بالاتر نمونه‌ی S (شکل ۶-الف) و میانگین ضریب اصطکاک بسیار پایین آن (شکل ۶-ب)؛ میزان کاهش وزن (شکل ۶-ج) و در نتیجه مقدار نرخ سایش این نمونه (شکل ۶-د)، مشابه با نمونه‌های P و E است. کمترین میزان کاهش وزن و نرخ سایش، مربوط به نمونه‌ی C است که نسبت به سایر نمونه‌ها، بیش از ۱۳ درصد بهبود یافته است. سختی این نمونه، بیشتر از نمونه‌ی P و کمتر از نمونه‌های E و S است؛ زیرا الیاف کربن، ماده‌ای اورتوتروپیک (Orthotropic) است و مدول یانگ عرضی و استحکام عرضی آن، نه تنها کم‌تر از استحکام طولی آن است، بلکه از الیاف‌های شیشه نیز کم‌تر است. علاوه بر آن، رابطه (۳) تأثیر شدید و توانی



شکل ۴- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب فاصله به ترتیب برای نمونه‌های الف: P، ب: E، ج: S و د: C



شکل ۵- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب فاصله برای نمونه‌ی S در مسافت پیمایش ۵۰۰m و سرعت خطی ۰٫۱۴m/s



شکل ۶- نتایج آزمون سختی‌سنجی و سایش

جدول ۲- استحکام، مدول یانگ و انعطاف‌پذیری الیاف شیشه E، شیشه S و کربن

الیاف کربن	الیاف شیشه S	الیاف شیشه E	کمیت
۲۹۸۹٫۳	۱۶۹۳٫۲	۴۸۰٫۳	استحکام کششی طولی* (MPa)
۱۸۹٫۵	۱۶۹۳٫۲	۴۸۰٫۳	استحکام کششی عرضی (MPa)
۲۳۰	۸۵	۷۰٫۵	مدول یانگ طولی (GPa)
۲۲	۸۵	۷۰٫۵	مدول یانگ عرضی (GPa)
۲۱٫۲۲	۱۶٫۰۸	۰٫۷۲	قابلیت انعطاف‌پذیری ( $10^6 \times 1/GPa \cdot \mu m^4$ )

\* استحکام کششی طولی الیاف‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 3822-04 اندازه‌گیری

شده است؛ اما سایر داده‌ها از منبع [۱۷] استخراج شده است.



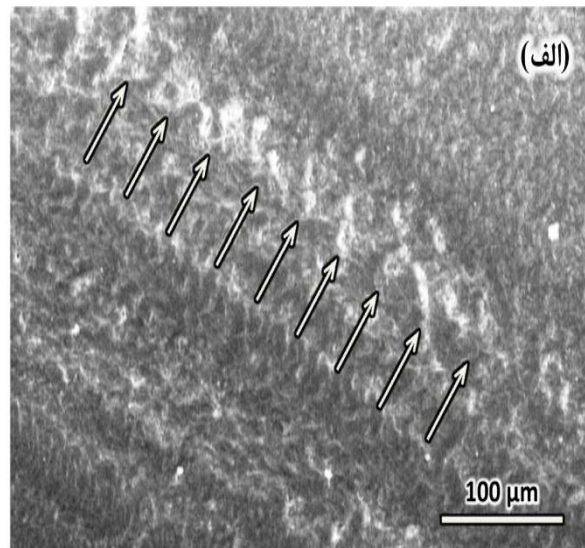
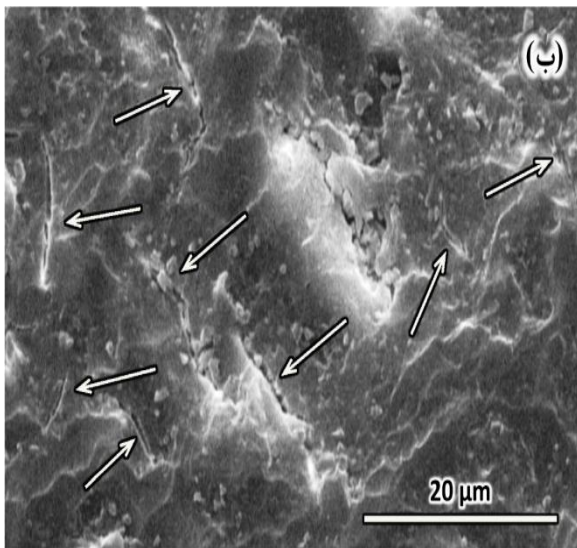
### بررسی میکروسکوپی سطوح سایش

شکل‌های ۷ تا ۹، تصاویر SEM سطح نمونه‌ها را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهند. همان گونه که انتظار می‌رود، مکانیزم سایش اپوکسی خالص از نوع چسبان است [۱۸ و ۱۹] و شکل ۷- الف نیز آن را تأیید می‌کند. در این تصویر، فلش‌ها حاکی از تشکیل شبکه‌ای از ترک‌های عرضی است که با بزرگنمایی بیشتر، در شکل ۷- ب نشان داده شده است. این ترک‌ها از ویژگی‌های مکانیزم خستگی سطحی مواد ترد و همچنین اپوکسی به شمار می‌رود [۲۰ و ۲۱].

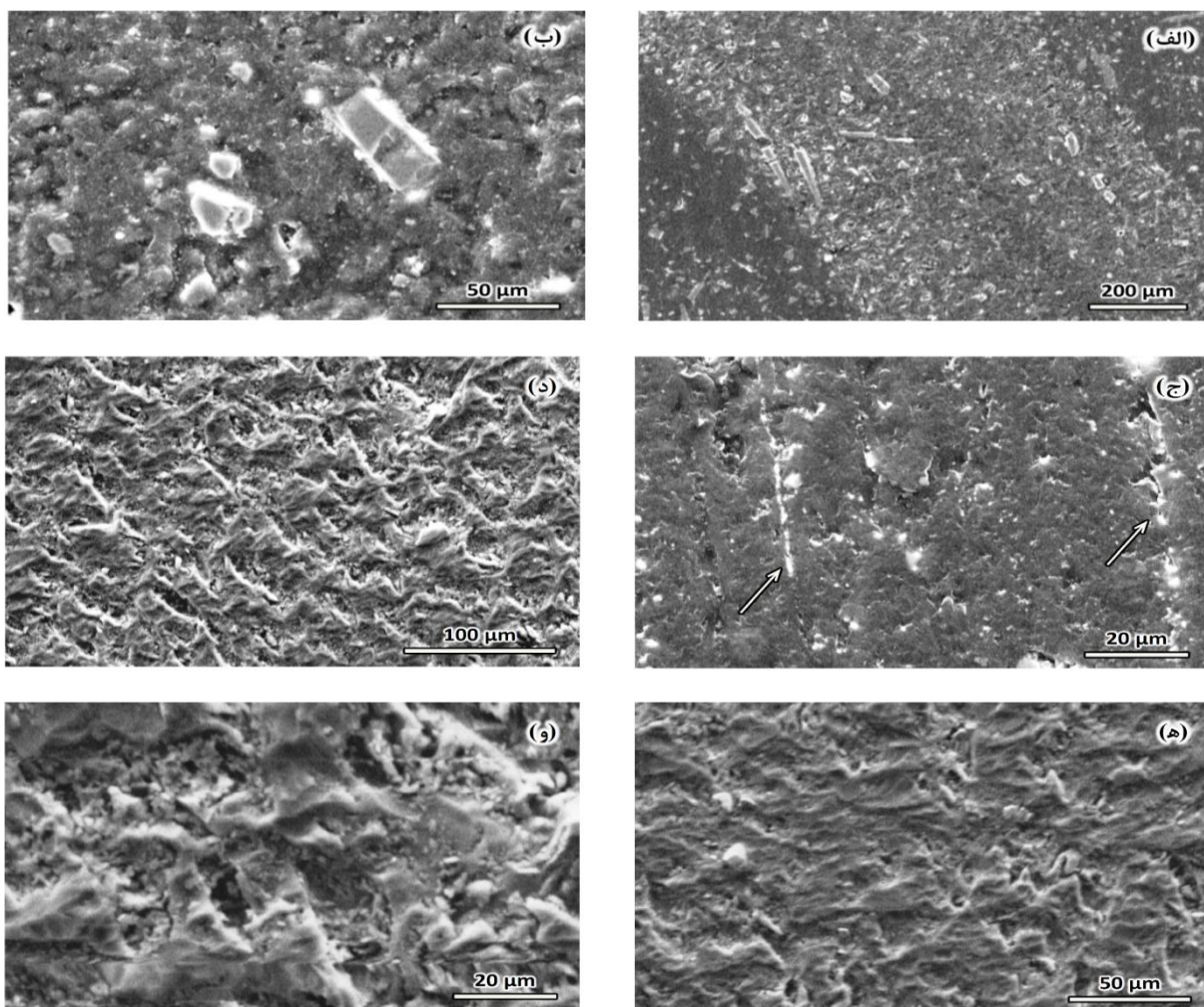
شکل ۸- الف بستر سایشی نمونه‌ی E را نشان می‌دهد که توزیع الیاف و زبری سطح به خوبی در آن نمایان است. شکل ۸- ب در بزرگنمایی بیشتر، الیاف آسیاب شده که همچنان در بستر سایش باقی مانده است را همراه با یک حفره‌ی ناشی از کنده شده ذرات الیاف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸- ج، مکانیزم سایش ترکیبی از نوع چسبان (به دلیل مالیده شدن و ایجاد سطوح سایش صاف) و خراشان (فلش‌ها و حفره‌ها را ببینید) است؛ اما به هر حال مکانیزم خراشان، مکانیزم

غالب به نظر می‌رسد. شکل‌های ۸- د تا و نیز مربوط به نمونه‌ی S است که گواهی بر غالب بودن مکانیزم سایش از نوع چسبان است و وجود آن را به ترتیب در سه بزرگنمایی کم، متوسط و زیاد اثبات می‌کند.

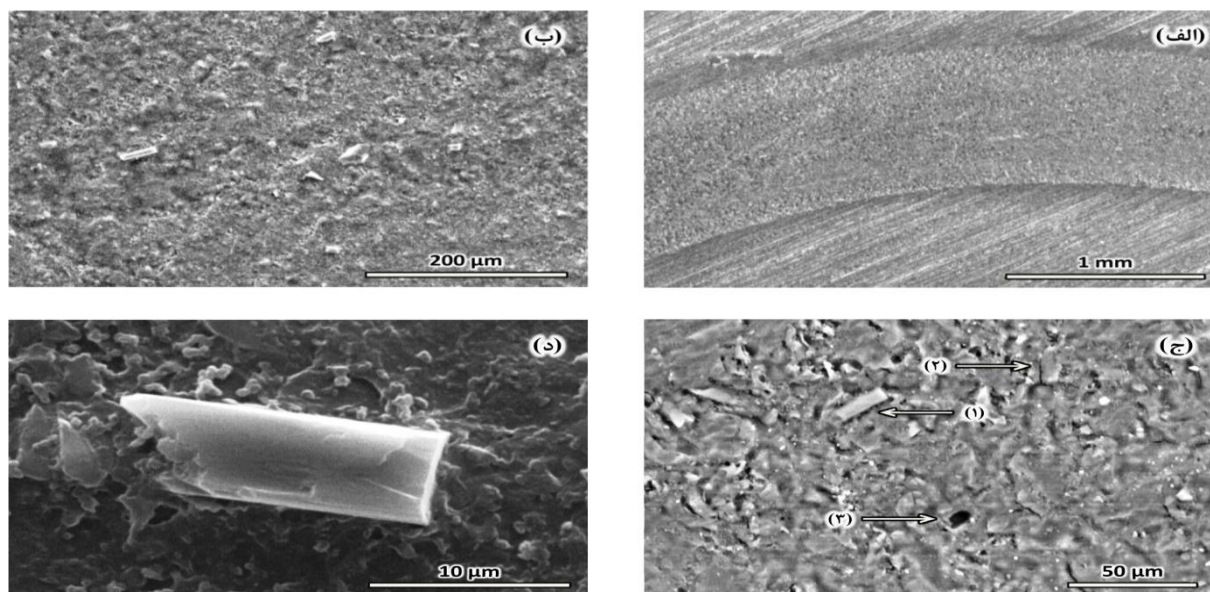
زبری یکنواخت و حاشیه‌های صاف پیرامون بستر سایش نمونه‌ی C (شکل ۹- الف)، مکانیزم سایش خراشان از نوع براده‌برداری را محتمل می‌سازد [۱۶]. این زبری یکنواخت، در بزرگنمایی بالاتر و در شکل ۹- ب نیز واضح‌تر نشان داده شده است. در این شکل، حضور ذرات الیاف به خوبی مشهود است. هنگام در تماس قرار گرفتن این ذرات با پین دستگاه آزمون سایش، به دلیل عدم اتصال مستحکم میان ذرات الیاف کربن آسیاب شده و زمینه‌ی اپوکسی، ترک در فصل مشترک این دو فاز ایجاد (فلش‌های ۱ و ۲ در شکل ۹- ج) و پس از مدتی نیز سرانجام ذرات تقویت کننده از محل خود جدا می‌شوند و یک حفره بر جای می‌گذارند (فلش ۳ در شکل ۹- ج). این ذرات به دلیل استحکام بالای خود، می‌توانند از یک سمت در سطح زمینه‌ی اپوکسی فرو روند و براده‌برداری کنند که شکل ۹- د به خوبی این مکانیزم را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ی P



شکل ۸- تصاویر SEM از سطوح سایش نمونه‌های E (الف، ب، ج) و S (د، ه و و)



شکل ۹- تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ی C

سایر نمونه‌ها دارد. با وجود سختی بالاتر نمونه‌ی S، میزان نرخ سایش آن، مشابه با نمونه‌های P و E است. کمترین میزان نرخ سایش، مربوط به نمونه‌ی C است که نسبت به سایر نمونه‌ها، بیش از ۱۳ درصد کاهش یافته است. سختی این نمونه، بیشتر از نمونه‌ی P و کمتر از نمونه‌های E و S است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از آقای دکتر سید مجتبی زبرجد و آقای دکتر رحیم اقرء به ترتیب استاد بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز و استادیار پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران و همچنین آقای مهندس داریوش آذری مدیر عامل محترم کارخانه‌ی توان محور آذین صنعت کمال تشکر را بابت همکاری صمیمانه و بی‌دریغ ایشان دارند.

### References:

- 1- ASM Handbook: Composites, p. 161-162, ASM International, 2001.
- 2- W. Jiang, F. L. Jin and S. J. Park, "Thermo-Mechanical Behaviors of Epoxy Resins Reinforced with Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  Particles", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 18, pp. 594-496, 2012.
- 3- G. Akovali, Handbook of Composite Fabrication, p. 26-27, iSmithers Rapra Publishing, Ankara, 2001.
- 4- C. Lhymn and Y. Lhymn, "Friction and Wear of Rubber/Epoxy Composites", Journal of Materials Science, Vol. 24, pp. 1252-1256, 1989.
- 5- A. Haghghat Mesbahi, D. Semnani and S. N. Khorasani, "Performance Prediction of a Specific Wear Rate in Epoxy Nanocomposites With Various Composition Content of Polytetrafluoroethylen (PTFE), Graphite, Short Carbon Fibers (CF) and Nano-TiO<sub>2</sub> Using

### نتیجه‌گیری

این پژوهش، به امکان‌سنجی بهبود خواص سایشی یک رزین اپوکسی تجاری پرداخت. برای این منظور، از الیاف آسیاب شده به عنوان تقویت کننده استفاده شد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آسیاب شده، بر خلاف مورفولوژی پودر الیاف شیشه E و S؛ تنها ذرات الیاف کربن آسیاب شده را می‌توان به عنوان ویسکر در نظر گرفت. با توجه به نتایج آزمون سایش، می‌توان بر اساس مسافت پیموده شده، سه مرحله را برای سایش نمونه‌های کامپوزیتی در نظر گرفت. مکانیزم حاکم در مرحله‌ی اول، از نوع چسبان است. مرحله‌ی دوم، یک مرحله‌ی انتقالی است. در مرحله‌ی سوم، مکانیزم حاکم از نوع خراشان و به طور خاص به صورت براده‌برداری است. نمونه‌های کامپوزیتی نوع C و S به ترتیب در مرحله‌ی سوم و اول سایش خود قرار دارند؛ اما نمونه‌ی E، هر سه مرحله را طی می‌کند. مکانیزم‌های غالب بر سایش نمونه‌های P، E، S و C به ترتیب عبارتند از چسبان و خستگی سطحی، خراشان، چسبان و براده‌برداری. ضریب اصطکاک نمونه‌ی C بالاتر از نمونه‌ی P است و نمونه‌ی S نیز حدود ۸۰۰ درصد، ضریب اصطکاک کمتری نسبت به Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)", Composites: Part B, Vol. 43, pp. 549-558, 2012.

- 6- Q. B. Guo, K. T. Lau, B. F. Zheng, M. Z. Rong and M. Q. Zhang, "Imparting Ultra-Low Friction and Wear Rate to Epoxy by the Incorporation of Microencapsulated Lubricant", Macromolecular Materials and Engineering, Vol. 294, pp. 20-24, 2009.
- 7- N. L. McCook, B. Boesl, D. L. Burris and W. G. Sawyer, "Epoxy, ZnO, and PTFE Nanocomposite: Friction and Wear Optimization", Tribology Letters, Vol. 22, pp. 253-257, 2006.
- 8- B. Sureshaa, G. Chandramohan, P. R. S. Rao, P. Sampathkumaran, S. Seetharamu and V. Venkateswarlu, "Friction and Slide Wear Characteristics of Glass-Epoxy and Glass-Epoxy Filled with SiCp Composites", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 13, pp. 535-541, 2006.

- 9- J. Stabik and A. Dybowska, "Electrical and Tribological Properties of Gradient Epoxy-Graphite Composites", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol, 27, pp. 39-42, 2008.
- 10- G. Pan, Q. Guo, J. Ding, W. Zhang and X. Wang, "Tribological Behaviors of Graphite/Epoxy Two-Phase Composite Coatings", *Tribology International*, Vol. 143, pp. 1318-1325, 2010.
- 11- X.S. Xing and R. K. Y. Li, "Wear Behavior of Epoxy Matrix Composites Filled with Uniform Sized Sub-Micron Spherical Silica Particles", *Wear*, Vol. 256, pp. 21-26, 2004.
- 12- P. V. Vasconcelos, F. J. Lino, A. M. Baptista and R. J. L. Neto, "Tribological Behaviour of Epoxy Based Composites for Rapid Tooling", *Wear*, Vol. 260, pp. 30-39, 2006.
- 13- N. Chand and A. M. Naik, "Development and High Stress Abrasive Wear Behavior of Milled Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Gradient Composites", *Polymer Composites*, Vol. 29, pp. 736-744, 2008.
- 14- N. Chand and M. K. Sharma, "Development and Sliding Wear Behaviour of Milled Carbon Fibre Reinforced Epoxy Gradient Composites", *Wear*, Vol. 264, pp. 69-74, 2008.
- 15- A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2ed, p.207, Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- 16- *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*, p. 320-628, ASM International, 2004.
- 17- K. K. Chawla, *Fibrous materials*, p. 25-204, Cambridge University Press, London, 1998.
- 18- B. Dong, Z. Yang, Y. Huang and H. L. Li, "Study on Tribological Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Nanocomposites", *Tribology Letters*, Vol. 20, pp. 251-254, 2005.
- 19- M. N. D. Santos, C. V. Opelt, S. H. Pezzin, S. C. Amico, C. E. D. Costa, J. C. Milan, F. H. Lafratta and L. A. F. Coelho, "Nanocomposite of Photocurable Epoxy-acrylate Resin and Carbon Nanotubes: Dynamic-mechanical, Thermal and Tribological Properties", *Materials Research*, Vol. 16, pp. 367-374, 2013.
- 20- O. Jacobs, W. Xu, B. Schadel and W. Wu, "Wear Behaviour of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites", *Tribology Letters* Vol. 23, pp. 65-75, 2006.
- 21- M. C. Romanes, N. A. D. Souza, D. Coutinho, K. J. Balkus and T. W. Scharf, "Surface and Subsurface Characterization of Epoxy-Mesoporous Silica Composites to Clarify Tribological Properties", *Wear*, Vol. 265, pp. 88-96, 2007.