



بررسی تجربی اثر نوع تقویت کننده نانوساختار بر خواص مکانیکی و سایشی نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی

صدیقه رنجکش آدرمنابادی، سید مهدی حسینی فراش*، محمد جعفری

آزمایشگاه مکانیک مواد مرکب، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

کلمات کلیدی:

تقویت کننده نانوساختار
نانوکامپوزیت
اپوکسی
خواص مکانیکی
رفتار سایشی

خلاصه: در این مقاله اثر استفاده از سه نوع مختلف تقویت کننده‌های نانوساختار، بر خواص مکانیکی و سایشی نانوکامپوزیت‌ها مطالعه شده است. نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن و نانورس با درصد‌های وزنی برابر و با روش‌های یکسان در شرایط محیطی مشابه به رزین اپوکسی افزوده شد. جهت پراکندگی یکنواخت نانوساختارها در زمینه اپوکسی، از همزن مکانیکی به همراه فراصوت استفاده گردید. پس از انجام فرآیند گاززدایی، نمونه‌های آزمون کشش و سایش مطابق استانداردهای مربوطه ساخته شدند. از هر جنس نانوکامپوزیت، سه نمونه تهیه و تحت آزمون قرار گرفت. مدول یانگ، استحکام کششی نهایی، کرنش در نقطه شکست و چقرمگی نمونه‌ها، از منحنی تنش-کرنش و با استفاده از آزمون کشش استخراج شد. آزمون سایش خشک در بارهای ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ نیوتن با استفاده از یک دستگاه پین روی دیسک در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که در نمونه‌ی حاوی نانولوله کربنی، بیشترین تنش قابل تحمل ۱۶٪ و کرنش در لحظه شکست ۲۷٪ نسبت به اپوکسی خالص افزایش دارد. همچنین کامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله کربنی و اپوکسی/نانورس بالاترین مقاومت در برابر سایش را در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خود نشان دادند، به طوری که در نمونه‌ی حاوی نانورس، ۶۰ درصد کاهش در مقدار نرخ سایش نسبت به نمونه اپوکسی خالص، مشاهده شد.

۱- مقدمه

این رزین‌ها در شرایط پخت محیطی و گرمایی، از آنها در صنایع گوناگونی همچون صنایع هواپیمایی، هوافضا، ساختمان، خودرو، صنایع الکتریکی-الکترونیکی، کشتیرانی و ساختارهای کامپوزیتی مانند اعضای مصنوعی و غیره استفاده می‌شود [۱ و ۲]. تحقیقات زیادی ثابت کرده که با افزودن مقدار کمی از نانوپرکننده‌ها، به مقدار قابل توجهی خصوصیات مکانیکی رزین بهبود می‌یابد [۳]. سایش در قطعات به علت اصطکاک بوجود می‌آید و باعث تخریب یک یا هر دو سطح در تماس و ناکارآمدی ماده می‌شود. سایش در بیشتر موارد باعث کاهش دقت و افزایش لقی بین قطعات متحرک، ایجاد ارتعاش، خستگی و در نهایت باعث از کارافتادن کامل دستگاه‌های بزرگ و پیچیده می‌شود. از آنجاییکه ماده سائیده شده دوباره قابل استفاده نیست هزینه‌های حاصل از فرایند سایش در صنعت بسیار بالاست. جهت جلوگیری از رخ دادن سایش بایستی با روش‌های مختلف مثل روان کاری سطوح، اصطکاک را کم کرد. پلیمرها بخصوص اپوکسی در اجزاء در معرض سایش به خاطر آماده‌سازی آسان، مقاومت در برابر خوردگی خوب، اصطکاک پایین و کاهش ارتعاش استفاده می‌شوند. با کشف نانولوله‌های کربنی در سال

بسیاری از نیازهای صنعتی مانند صنایع فضایی، راکتورسازی، الکترونیکی، ساختمان‌سازی، حمل و نقل و غیره نمی‌توانند با استفاده از مواد معمولی برآورده شود و نیاز به تغییر گسترده‌ی خواص دارد. از طرف دیگر در کاربردهای مهندسی اغلب تلفیق خواص، مورد نیاز است. در این صنایع به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشند، مقاومت سایشی و مقاومت به ضربه‌ی خوبی داشته باشند [۱]. رزین‌های اپوکسی^۱ در سال ۱۹۳۸ توسط یک شیمی‌دان سوئیسی به نام پیرکاستان^۲ کشف شدند. واکنش این رزین‌ها با عوامل پخت مختلف منجر به ایجاد پلاستیک‌های گرماسخت یا شبکه‌ای می‌شود که دارای خواصی همچون استحکام مکانیکی، چقرمگی، پایداری شیمیایی عالی، خواص چسبندگی و الکتریکی مناسب هستند. رزین‌های اپوکسی پخت شده دارای خواص الکتریکی-مکانیکی مناسب، پایداری ابعادی، مقاومت شیمیایی و مقاومت گرمایی خوبی هستند. با توجه به تنوع

1 Epoxy

2 Pierre Castan

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farrash@shahroodut.ac.ir



۱۹۹۱ توسط ایجیما [۴] تحقیقات گسترده‌ای در زمینه به‌کارگیری این مواد جهت بهبود خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت‌ها انجام شده‌است. حسینی فراش و همکاران [۵] در تحقیقی اثر نانو لوله‌های کربنی عامل‌دار آمین بر روی خواص ترمومکانیکی نانو کامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه‌کردن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی عامل‌دار آمین به رزین اپوکسی بیشترین تأثیر را در مدول یانگ و ضریب انبساط حرارتی نانو کامپوزیت‌ها دارد. صابرمش و همکاران [۶] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت‌کننده به ماده زمینه کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی را بر بار بحرانی کماتش ورق‌های کامپوزیتی تحت بار گذاری فشاری و به روش تجربی مطالعه کردند. کومار سینگ و همکاران [۷] خواص سایشی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با الیاف، حاوی ۳٪ نانولوله‌چندجداره، تحت بار و سرعت لغزشی را در محیط‌های مختلف بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش بار و سرعت لغزشی، کاهش وزن افزایش می‌یابد. ساکا و همکاران [۸] اصطکاک و سایش کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با پرکننده‌های کربنی از جمله نانولوله‌های کربنی، گرافیت و مخلوطی از گرافیت و نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت در برابر سایش با اختلاط پرکننده‌های کربن در زمینه اپوکسی افزایش می‌یابد. همچنین کامپوزیت‌های اپوکسی/ نانولوله‌های کربن عامل‌دار بهترین رفتار سایشی را دارند. کومار و همکاران [۹] مطالعات خود را بر روی سایش پوشش دوگانه با لایه‌های کامپوزیت روغن پایه، گرافن و اپوکسی روی فولاد ابزار در شرایط خشک و روان کاری متمرکز کردند. مهاشا و همکاران [۱۰] به بررسی تأثیر ترکیب نانوتیتانیوم به تنهایی و با ترکیب نانوذرات رس، بر روی رفتار مکانیکی و سایشی لغزش خشک کامپوزیت‌های اپوکسی بازالت پرداختند. آنها دریافتند که مقاومت کششی و پایداری ابعادی کامپوزیت اپوکسی/ بازالت با افزایش پرکننده‌ها افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران [۱۱] از پرکننده‌های نانو ساختار اکسید گرافن با مایع یونی فعال شده به‌جای گرافن ورقه‌ای در زمینه اپوکسی استفاده کردند. اکسید گرافن عامل‌دار در مقایسه با گرافن ورقه‌ای پراکندگی قابل توجهی در زمینه اپوکسی از خود نشان داد. همچنین افزودن اکسید گرافن عامل‌دار، اصطکاک و سایش اپوکسی را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. میسرا و همکاران [۱۲] اثر افزودن نانو گرافن با چهار درصد وزنی (۳٪، ۲٪، ۱٪، ۰٪) را بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت اپوکسی الیاف شیشه بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که بالاترین افزایش خواص مکانیکی با افزودن دو درصد وزنی نانو گرافن بدست می‌آید. اومش و همکاران [۱۳] تأثیر افزودن نانوگرافن بر

رفتار مکانیکی میکرو کامپوزیت‌های ترکیبی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند افزودن نانو گرافن به میکرو کامپوزیت‌ها مقاومت کششی و به دنبال آن شکل‌پذیری را کمی کاهش می‌دهد. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ نشان می‌دهد تجمع میکروپرکننده‌ها، میکرو حفره‌ها و شکستگی غیر خطی از جمله دلایل شکست بوده‌اند. ایرز و همکاران [۱۴] به مطالعه در خصوص کامپوزیت‌های بازیافتی بر پایه لاستیک با استفاده از روش‌های ساخت کم هزینه پرداختند. آنها مخلوط ذرات ریز لاستیک‌های بازیافتی و اپوکسی جامد را با نانو پلاکتهای گرافن، ذرات سلیس و آلومینا در سه درصد وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ تقویت کردند. تست مقاومت در برابر سایش با استفاده از آزمون خراش ماکرو بر روی نمونه‌ها انجام شد. موهان و همکاران [۱۵] خصوصیات تریبولژیکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با فیبر تهیه‌شده از الیاف گیاه موز و ذرات نانو رس را بررسی کردند. آنها با بررسی تصاویر میکروسکوپی دریافتند کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات نانو رس قادر به ایجاد لایه انتقال بین نمونه تحت سایش و ساییده هستند که باعث بهبود خصوصیات سایشی کامپوزیت می‌شود. مانیکندان و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی ویژگی‌های سایشی و سختی اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چندجداره و اکسید آلومینیوم با سه درصد وزنی (۲، ۱/۵ و ۱) پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره و اکسید آلومینیوم ویژگی‌های سایشی بهتری دارند.

در این پژوهش اثر افزودن سه نوع نانو ساختار مختلف درون رزین اپوکسی بر خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت حاصل به کمک روش تجربی بررسی شده‌است. این موضوع در تحقیقات مطالعه‌شده، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. نانولوله‌های کربنی، نانوصفحات اکسید گرافن و نانوذرات رس در درصدهای وزنی برابر به رزین اپوکسی اضافه شده‌است. شرایط محیطی، روش همگن سازی نانو ساختارها درون ماده زمینه، روش قالبگیری و پخت برای ساخت هر سه نوع نانو کامپوزیت یکسان بوده‌است. نمونه‌های آزمون کشش و سایش بر اساس استانداردهای انجمن آزمون و مواد آمریکا^۲ ساخته شد. جهت تعیین خواص مکانیکی از آزمون کشش ساده و برای تعیین رفتار سایشی از آزمون پین بر روی دیسک^۳ بهره گرفته شد.

1 ^۱ Scanning electron microscope (SEM)

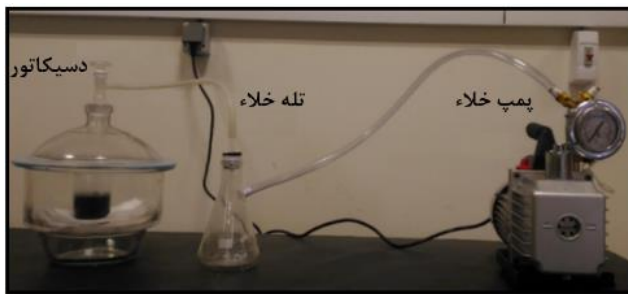
2 ^۲ American society for testing and materials (ASTM)

3 Pin on disk



شکل ۱. بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون حمام فراصوت (راست) و همزن مغناطیسی (چپ)

Fig. 1. Beaker containing nanostructured fillers and resin in an ultrasonic bath (right) and a magnetic stirrer (left)



شکل ۲. بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون دسیکاتور

Fig. 2. Beaker containing nanostructured fillers and resin inside the desiccator

دستگاه حمام فراصوت بندلین^۶ ۴۰۰ وات و همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه مطابق شکل ۱ استفاده شده‌است. مخلوط رزین اپوکسی و تقویت کننده نانوساختار ابتدا به مدت یک ساعت درون حمام فراصوت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. با افزایش دمای رزین، ویسکوزیته آن کاهش یافته و توزیع پرکننده‌های نانوساختار درون رزین به خوبی صورت می‌گیرد. مخلوط حاصل به مدت یک ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و در نهایت یک ساعت دیگر از حمام فراصوت استفاده شد.

جهت انجام فرایند گاززدایی، مطابق شکل ۲ بشر درون دسیکاتور به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد تا حباب‌های موجود درون رزین تحت خلأ از آن خارج شوند. سپس ماده سخت کننده به مخلوط اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت

6 Bandelin (Germany)

۲- ساخت نمونه‌ها و انجام آزمون

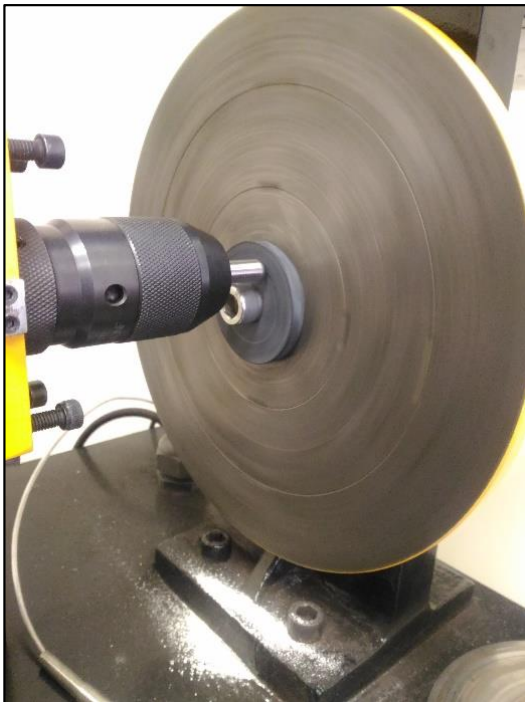
۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی کر ۸۲۸^۱ محصول شرکت کومهو^۲ کره به همراه خشک کننده تتا^۳ با ویسکوزیته ۱۴-۱۲ پاسکال ثانیه جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. در این پژوهش سه نوع نانوساختار به عنوان تقویت کننده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه و استفاده شد. نانولوله‌های کربنی چندجداره محصول شرکت یو-اس-نانو^۴، دارای قطر خارجی ۲۰-۳۰ نانومتر، قطر داخلی ۱۰-۵ نانومتر و طول ۳۰-۱۰ میکرومتر به رنگ سیاه با خلوص بالای ۹۵٪ تهیه شد. پودر نانوصفحات کوچک اکسید گرافن با ضخامت ۷-۳/۴ نانومتر، درجه خلوص تقریباً ۹۹٪، با تعداد میانگین ۱۰-۶ لایه، مساحت سطح ۱۰۰-۳۰۰ مترمربع بر گرم و با اندازه جانبی ۵۰-۱۰ میکرومتر خریداری گردید. همچنین نانورس مونتمریلونیت^۵ با اندازه ذرات ۱-۲ نانومتر، چگالی ۰/۷-۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب، و مساحت سطح ویژه ۲۲۰-۲۷۰ مترمربع بر گرم از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شد.

۲-۲ روش ساخت

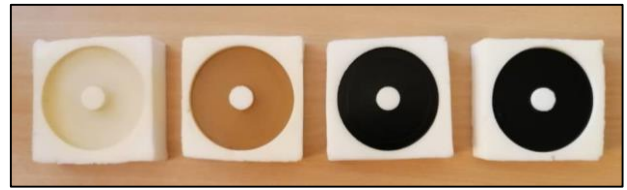
در این مطالعه به منظور توزیع پرکننده‌های نانوساختار درون رزین از

- 1 Ker 828
- 2 Kumho
- 3 TETA hardener
- 4 US-nanometerials
- 5 Montmorillonite nanoclay



شکل ۴. انجام آزمون سایش

Fig. 4. Wear test performing



شکل ۳. قالب‌گیری نمونه‌ها

Fig. 3. Molding of specimens

جدول ۱. ورودی‌های آزمون در دمای محیط

Table 1. Test inputs at ambient temperature

پارامتر آزمون	مقدار تنظیم شده
نیروی عمودی	۲۰ N، ۶۰ N و ۱۰۰ N
مسافت لغزشی	۱۰۰۰ m
شعاع مسیر سایش	۱۰ mm
سرعت لغزش	۰/۱ m/s
روان کار	استفاده نشد

می‌دهد. پس از ساخت نمونه‌ها و تراز کردن سطح آن‌ها توسط دستگاه تراش، نمونه‌ها تحت سایش قرار گرفتند. قبل و پس از آزمون، نمونه‌ها با استفاده از استون تمیز گردیده و وزن هر نمونه با ترازوی دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. این آزمون طبق استاندارد مربوطه [۱۷] انجام شد. ورودی‌های آزمون مطابق جدول ۱ است. خروجی‌های این آزمون ضریب اصطکاک بر حسب مسافت، کاهش وزن نمونه و نرخ سایش ویژه است.

۳- نتایج

۳-۱- خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش

با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده تعیین شد. نمودار تنش-کرنش اپوکسی خالص، اپوکسی/نانولوله کربنی، اپوکسی/نانوآکسیدگرافن و اپوکسی/نانورس در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل از هر جنس ماده، یک نمودار به عنوان نماینده آورده شده است. پس از رسم نمودار تنش-کرنش برای هر نمونه مقدارهای کرنش در هنگام شکست (ϵ_p)، مقاومت کششی نهایی (S_{UH})، مدول الاستیک (E) و چقرمگی (UT) استخراج شد. نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه‌ها در

۲ دقیقه توسط همزن مکانیکی هم‌زده شد. عملیات حباب‌گیری دوباره به مدت ۵ دقیقه انجام شد.

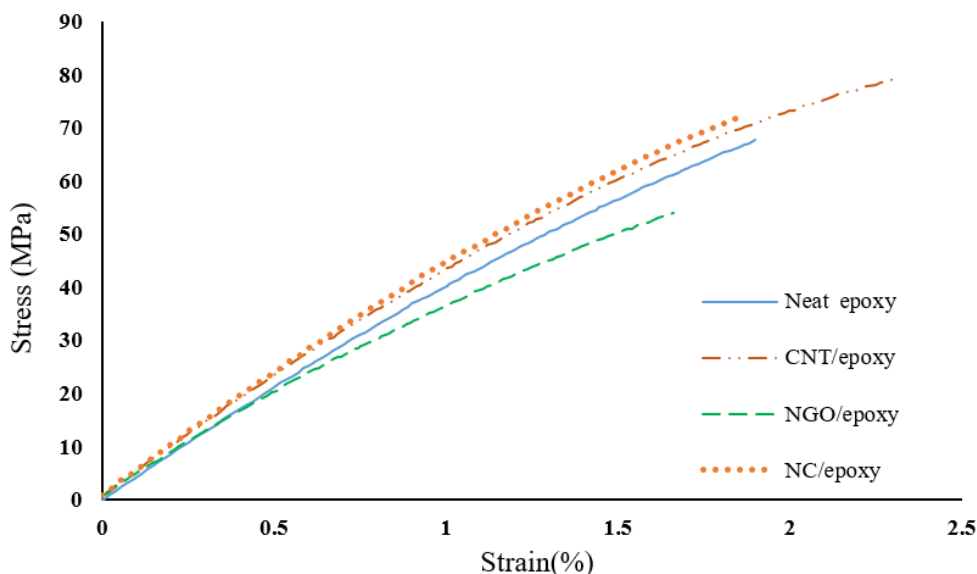
مطابق شکل ۳ مخلوط به درون قالب‌های سیلیکونی از پیش ساخته‌شده منتقل و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند.

۳-۲- آزمون کشش ساده و سایش

آزمون کشش به کمک دستگاه آزمون کشش اینسترون^۱ مدل ۸۸۰۲ انجام شد. لازم به ذکر است تعداد سه نمونه از هر جنس ماده تحت آزمون کشش قرار گرفته و میانگین نتایج به همراه مقدار انحراف از استاندارد تعیین شده است.

جهت انجام آزمون سایش از دستگاه پین بر روی دیسک ساخت شرکت آریا مدرن صنعت استفاده شد. پین که همان عضو ساینده است، از جنس فولاد بلبرینگ با قطر ۱۰ میلی‌متر طول ۶۰ میلی‌متر ساخته شد. شکل ۴ نمونه دیسکی شکل بسته‌شده به دستگاه در معرض سایش توسط پین را نشان

1 Instron testing machine



شکل ۵. نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 5. Stress-strain diagrams of neat epoxy and nanocomposite specimens

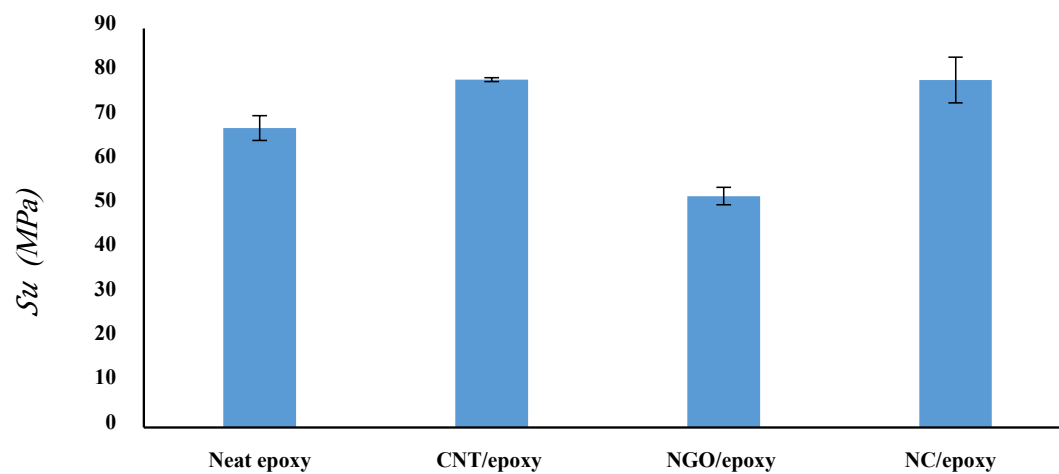
جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Table 2. Mechanical properties of neat epoxy and nanocomposite specimens

ϵ_b (%)	S_{ut} (MPa)	E (GPa)	UT (J/m ³)	نوع کامپوزیت
۱/۸۶	۶۷/۵۷	۴/۱۹	۵۶/۲۴	اپوکسی
۲/۳۷	۷۸/۴۸	۴/۴۵	۷۷/۳	اپوکسی / نانولوله کربنی
۱/۴۲	۵۲/۲۱	۳/۹۹	۳۸/۶۷	اپوکسی / نانواکسید گرافن
۲/۱۷	۷۸/۳۸	۴/۴۱	۷۸/۹۸	اپوکسی / نانورس

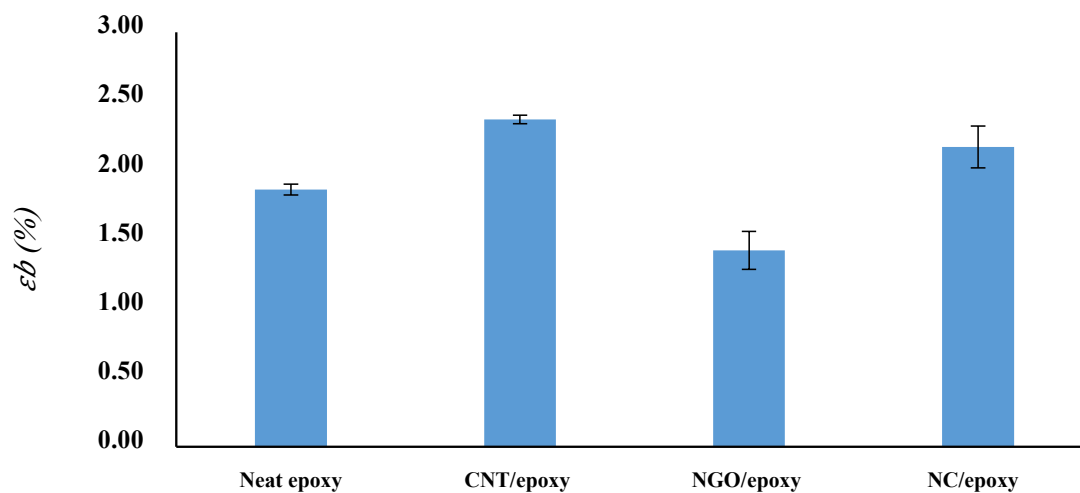
اپوکسی افزایش می‌دهد [۱۸]. نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی با ۲۷/۳٪ افزایش و پس از آن نمونه اپوکسی/نانواکسیدگرافن/نانورس با ۲۶/۶٪ افزایش بیشترین کرنش در نقطه شکست را نسبت به اپوکسی خالص از خود نشان داده‌اند. بیشترین مدول الاستیک مربوط به نمونه‌های اپوکسی/نانولوله کربنی است که با ۶/۳٪ افزایش نسبت به اپوکسی خالص از ۴/۱۹ GPa به ۴/۴۵ GPa رسیده است. همچنین مقدار مدول الاستیک نمونه اپوکسی/نانورس نیز با ۵/۴٪ بهبود نسبت به اپوکسی خالص از ۴/۱۹ GPa به ۴/۴۱ GPa افزایش داشته است. افزایش مدول الاستیک را می‌توان به پراکندگی خوب نانوساختارها درون رزین و چسبندگی سطحی خوب بین ذرات و زمینه اپوکسی نسبت داد. در اثر وجود تقویت‌کننده‌ها در

جدول ۲ آورده شده است. میزان میانگین به همراه انحراف استاندارد در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است. با افزایش مقدار تنش تا حدود ۲۰ مگاپاسکال، نمودارها رفتار خطی داشته و از این بازه‌ی نمودارها جهت تعیین مدول یانگ استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی/نانولوله کربنی با ۱۶/۱٪ افزایش از ۶۷/۵۷ MPa به ۷۸/۴۸ MPa و اپوکسی/نانورس با ۱۶٪ افزایش از ۶۷/۵۷ MPa به ۷۸/۳۸ MPa می‌رسد. با توجه به نمودارها به نظر می‌رسد چسبندگی سطحی خوب بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی، انتقال تنش بین نانولوله کربنی و زمینه



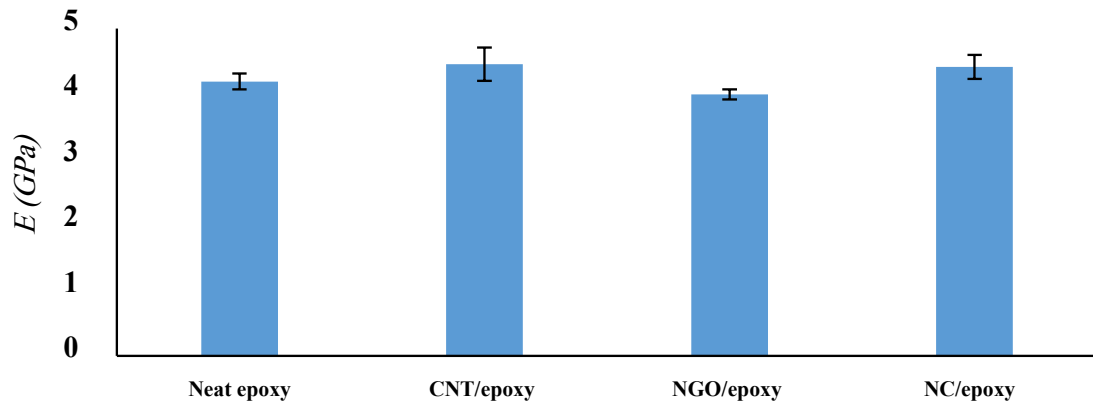
شکل ۶. مقاومت کششی نهایی نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 6. Ultimate tensile strength of neat epoxy and nanocomposite specimens



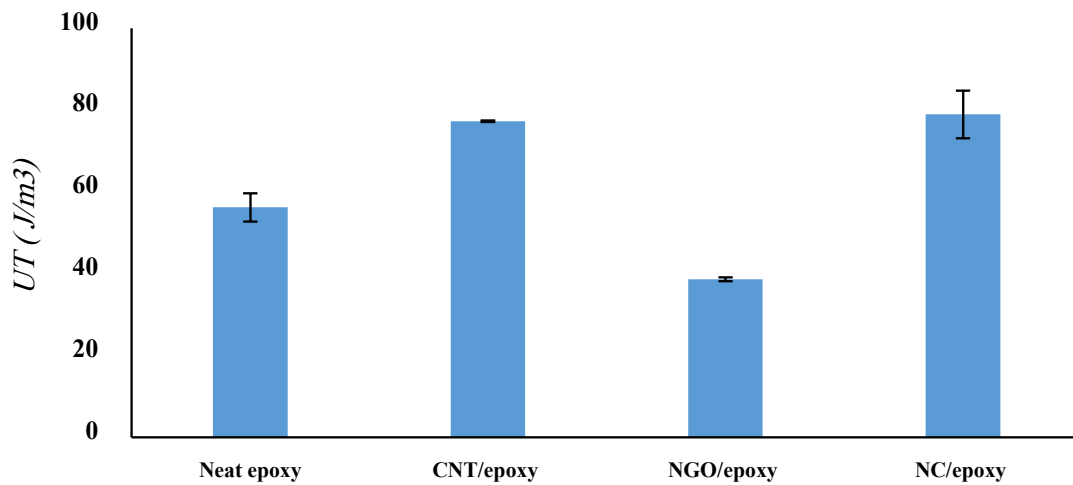
شکل ۷. کرنش شکست نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 7. Fracture strain of neat epoxy and nanocomposite specimens



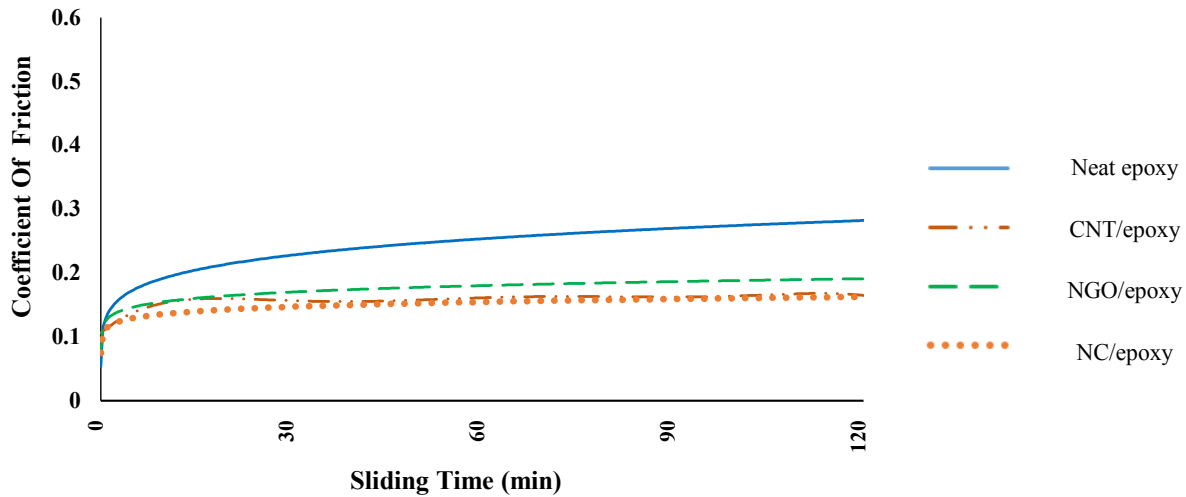
شکل ۸. مدول الاستیک نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 8. Elastic modulus of neat epoxy and nanocomposite specimens



شکل ۹. چقرمگی نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 9. Toughness of neat epoxy and nanocomposite specimens



شکل ۱۰. نمودارهای ضریب اصطکاک نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 10. Friction coefficient diagrams of neat epoxy and nanocomposite specimens

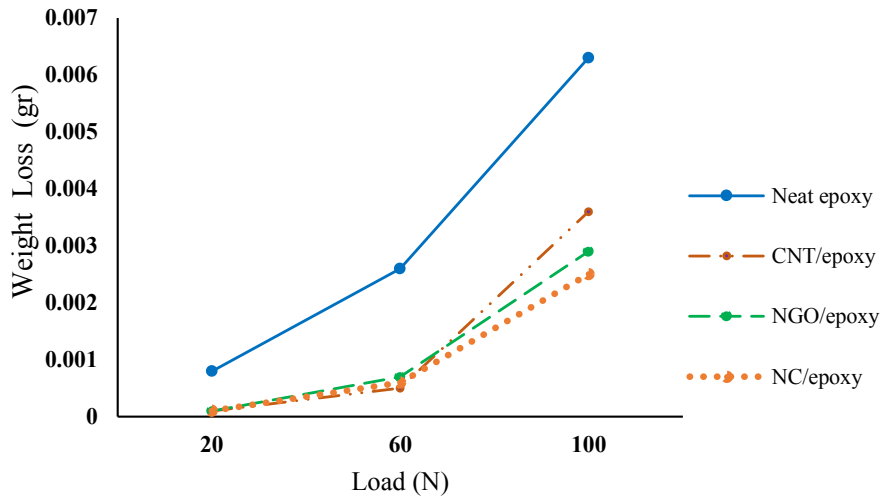
۳-۳- کاهش وزن

برای محاسبه کاهش وزن نمونه‌ها، پس از هر بار آزمون سایش، یعنی طی مسافت هزار متر، بقایای سایش جداسازی و تمیزکاری با استون انجام شد، سپس وزن نمونه‌ها ثبت شد. نیروی عمودی سه مقدار ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ نیوتن در نظر گرفته شد. نتایج کاهش وزن در جدول ۳ نمایش داده شده است. شکل ۱۱ نمودار کاهش وزن کل نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. نمودار اپوکسی خالص برای هر سه بار بیشترین کاهش وزن را از خود نمایش می‌دهد. هر سه نمونه‌ی نانوکامپوزیتی در بار ۲۰ N کاهش وزنی یکسان دارند. در این مقدار بارگذاری، کاهش وزن نمونه‌های حاوی تقویت کننده‌های نانوساختار ۸ برابر کمتر از نمونه اپوکسی خالص است. با افزایش بار به ۶۰ N نمونه حاوی نانولوله کربنی ۸۳٪، نمونه حاوی نانورس ۷۷٪ و نمونه حاوی نانو اکسید گرافن ۷۳٪ کاهش وزن کمتری نسبت به اپوکسی از خود نشان می‌دهند. در این مقدار بار هم تفاوت محسوسی بین کاهش وزن نمونه‌های حاوی نانوساختار در مقایسه با یکدیگر مشاهده نمی‌شود. با توجه به اینکه دقت اندازه‌گیری وزن در حد ده هزارم گرم است، تفاوت‌های ناچیز می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری باشد. در بار ۱۰۰ N کمترین کاهش وزن نمونه، مربوط به نمونه‌ی اپوکسی/نانورس است به طوری که کاهش وزن این نمونه در حدود ۶۰ درصد کمتر از کاهش وزن نمونه اپوکسی است. با توجه به نتایج قسمت قبل، این نمونه دارای کمترین ضریب اصطکاک با پین ساینده است و همین عامل باعث می‌شود تا کاهش وزن این نمونه در مقایسه با سایر

ساختار اپوکسی، تحرک زنجیره‌های پلیمری تحت بارگذاری محدود می‌شود. جهت‌گیری لایه‌های سیلیکات و زنجیره‌های پلیمری با توجه به جهت بارگذاری نیز می‌تواند در اثرات تقویت کننده نقش داشته باشد [۱۹]. کاهش شکل‌پذیری و مقاومت کششی کامپوزیت حاوی نانوگرافن بر اثر تجمع میکروپرکننده‌ها، میکرو حفره‌ها در مطالعات اومش نیز دیده شده است [۱۳].

۳-۲- ضریب اصطکاک

شکل ۱۰ نمودار ضریب اصطکاک بین پین ساینده فولادی و نمونه‌ها را در نیروی عمودی ۶۰ N نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه اپوکسی خالص و کمترین ضریب اصطکاک در نمونه اپوکسی/نانورس دیده می‌شود. پس از زمان دوساعت لغزش، مقدار ضریب اصطکاک برای نمونه اپوکسی مقدار ۰/۲۷ است که این مقدار با حدود ۴۰ درصد کاهش، مقدار ۰/۱۶ را برای نمونه اپوکسی/نانورس دارد. افزودن نانو اکسید گرافن و نانولوله کربنی نیز به طور محسوسی باعث کاهش ضریب اصطکاک شده‌اند. می‌توان گفت وجود نانوذرات در ساختار اپوکسی مانند نوعی روان کننده عمل کرده و کاهش ضریب اصطکاک را باعث شده است. مقاومت بالا و سختی ذرات نانو رس را می‌توان عامل اصلی بهبود مقاومت به سایش بر اثر افزودن نانو رس به اپوکسی دانست نانو رس‌ها با تحمل بار در فیلم واسطه، بار وارد بر اپوکسی را کاهش می‌دهند و در نتیجه نمونه حاوی نانو رس کمترین میزان سایش را از خود نشان می‌دهند [۲۰].



شکل ۱۱. نمودارهای کاهش وزن نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی

Fig. 11. Weight loss diagrams of neat epoxy and nanocomposite specimens

جدول ۴. نرخ سایش ویژه نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی در بار ۱۰۰ N

Table 4. Specific wear rate of neat epoxy and nanocomposite specimens under 100 N loading

نوع ماده	نرخ سایش ویژه ($\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m}) \times 10^{-2}$)
اپوکسی	۵/۰۴
اپوکسی/نانولوله کربنی	۲/۸۸
اپوکسی/نانواکسیدگرافن	۲/۳۲
اپوکسی/نانورس	۲

جدول ۳. کاهش وزن بر حسب گرم برای نمونه‌های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیتی در بارهای عمودی مختلف

Table 3. Weight loss (gr) of neat epoxy and nanocomposite specimens at different vertical loads

کامپوزیت	۱۰۰ N	۶۰ N	۲۰ N
اپوکسی	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۸
اپوکسی/نانولوله کربنی	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱
اپوکسی/نانواکسیدگرافن	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۱
اپوکسی/نانورس	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۱

نسبت به نمونه‌های دیگر دارای مقاومت به سایش بیشتری می‌باشد و کمترین عدد نرخ سایش مربوط به این نمونه است. اثر بهبود خواص سایشی کامپوزیت با افزودن نانورس در دیگر تحقیقات نیز دیده شده است [۱۵، ۱۰]. در طول فرایند سایش ممکن است تعدادی از نانولوله‌های کربنی با از بین رفتن و جابجایی اپوکسی آزاد شوند و به صورت عضو واسط بر روی سطح مانع از تماس مستقیم ماده زمینه با فولاد ساینده شود. از آنجا که نانولوله‌های کربنی خاصیت روان کاری دارند با تشکیل فیلم انتقال و کم شدن ضریب اصطکاک، نرخ سایش نیز کاهش می‌یابد [۲۲، ۸]. همچنین افزودن نانولوله کربنی باعث افزایش خاصیت سایش کامپوزیت‌ها توسط محافظت جمعی و خصوصیات انتقال بار موثر می‌شود [۲۳].

نمونه‌ها کمتر باشد.

۳-۴- نرخ سایش ویژه

نرخ سایش ویژه به صورت تغییر حجم نمونه‌ی تحت سایش به ازای نیروی واحد و طی مسافت واحد تعریف می‌شود [۲۱]. جدول ۴ نرخ سایش ویژه برای نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آنرا نشان می‌دهد. با مقایسه نرخ سایش ویژه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که بیشترین نرخ سایش ویژه مربوط به نمونه اپوکسی خالص است. نرخ سایش ویژه برای نمونه‌های اپوکسی/نانولوله کربنی و نمونه‌ی اپوکسی/نانواکسیدگرافن حدود ۵۰ درصد کاهش نسبت به نمونه اپوکسی دارند. در بین نمونه‌های نانوکامپوزیتی، نمونه حاوی ۱/۵ نانورس

مقاومت نانولوله‌های کربنی در برابر اعمال بار کششی است.

۳-۶- بررسی شکل ظاهری شیار حاصل از سایش

در شکل ۱۳ تصاویر شیار حاصل از سایش برای نمونه اپوکسی خالص و اپوکسی/نانو رس در بار 60 N آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳-الف) مشخص است شیار حاصل از سایش نمونه اپوکسی خالص، عریض‌تر، و عمق آن نسبت به نمونه حاوی نانو رس بیشتر می‌باشد که حاصل حذف مواد و سائیدگی بیشتر است. ذرات باقیمانده که در طی اصطکاک و سایش تولید می‌شوند تأثیر زیادی بر خصوصیات سایشی مواد دارند. بقایای بزرگ سایش می‌تواند به عنوان ذرات ساینده بر روی سطوح عمل کنند. بقایای ریز سایش ممکن است تحت تنش‌های مکرر، باعث انتقال فیلم به سطح مقابل شود و اصطکاک و سایش را کاهش دهد. علاوه بر این، بقایای کوچک سایش می‌تواند شیارهای سطح سایشی را دفن کند و سطح آن را بسیار نرم‌تر کند. بنابراین، کامپوزیت‌های اپوکسی دارای سایش کمتری نسبت به اپوکسی خالص هستند [۲۴]. شکل (۱۳-ب) مرز حاصل از سایش نمونه حاوی نانورس که به سختی قابل تشخیص است نشان می‌دهد، عمق سایش در این نمونه بسیار کم است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر افزودن سه نوع مختلف و متداول‌تر از تقویت‌کننده‌های نانو ساختار درون رزین اپوکسی بر خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت بررسی شد. نمونه‌های اپوکسی، اپوکسی/نانولوله کربنی، اپوکسی/نانواکسیدگرافن و اپوکسی/نانورس در شرایط مشابه ساخته و مورد آزمون قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقویت رزین اپوکسی با $1/5\%$ نانولوله کربنی بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی اپوکسی دارد. در این نمونه مدول الاستیک 6% تنش قابل تحمل 16% و کرنش در لحظه شکست 27% افزایش را نسبت به نمونه اپوکسی خالص داشت. همچنین نمونه‌ی اپوکسی/نانورس نیز با اختلاف اندکی نسبت به نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی، خواص مکانیکی خوبی از خود نشان می‌دهد. نرسیدن به خواص مطلوب برای نمونه‌ی اپوکسی/نانواکسیدگرافن را می‌توان به مشکل بودن توزیع مناسب صفحات اکسید گرافن درون ماده با روش‌های معمول مرتبط دانست. در مبحث سایش مشاهده شد که افزودن هر سه نوع تقویت‌کننده‌ی نانو ساختار باعث افزایش مقاومت نمونه در برابر سایش می‌شود. نمونه‌ی اپوکسی/نانورس با دارا بودن کمترین نرخ سایش ویژه، در حدود 60% درصد مقاومت بهتری را در برابر سایش نسبت به نمونه‌ی اپوکسی

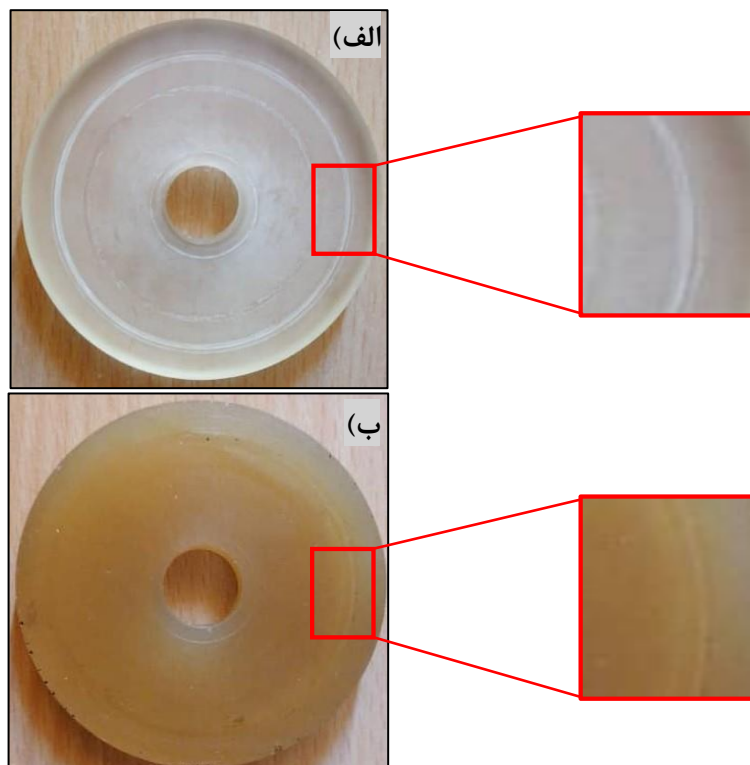


شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه اپوکسی/نانو لوله کربنی در بزرگنمایی (الف) $10\ \mu\text{m}$ (ب) $1\ \mu\text{m}$ میکرومتر

Fig. 12. SEM images of fracture surfaces of CNT/epoxy specimen at different magnifications a) $10\ \mu\text{m}$ b) $1\ \mu\text{m}$

۳-۵- بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطوح

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه‌ی حاوی نانولوله کربنی، پس از آماده‌سازی سطح، جهت بررسی تهیه شد. شکل ۱۲ سطح مقطع شکست کامپوزیت تقویت‌شده با $1/5\%$ نانولوله کربنی را در دو بزرگنمایی مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۲-الف) دیده می‌شود نانولوله‌های کربنی درون اپوکسی به خوبی توزیع شده‌اند. نقاط سفید رنگ درون ماده زمینه بیانگر وجود نانولوله‌های کربنی در این نواحی است. همچنین برای جلوگیری از گسترش ترک در اثر کشش، نانولوله‌های کربنی وارد عمل شده و با کش آمدن و خم شدن منجر به افزایش مقاومت به شکست می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود بیرون کشیدگی و شکست برخی از نانولوله‌های کربنی حاکی از



شکل ۱۳. تصاویر شبیاز سایشی نمونه‌های الف) اپوکسی خالص ب) اپوکسی/نانورس

Fig. 13. Wear track images of specimens a) Neat epoxy b) NC/epoxy

nanocomposites: A review from preparation to processing, Progress in Polymer Science (Oxford), 28(11) (2003) 1539–1641.

- [4] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, 354(6348) (1991) 56-8.
- [5] S. M. Hosseini Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand, Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of CNT/Epoxy nanocomposites, Mechanics of Advanced Composite Structures, 5(1) (2018) 41-48.
- [6] H. R. Sabermanesh, M. Ghannad, S. M. Hosseini Farrash, Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2020). (in Persian)
- [7] K. Singh, J. Kalita, N. Sharma, Investigation of friction and wear behavior of mwcnts filled hfrp composites under

خالص نشان می‌دهد. از محدودیت‌های تولید و ساخت نمونه‌ها به صورت انبوه و در حجم صنعتی می‌توان به قیمت بالای نانولوله‌های کربنی، دشوار شدن هم‌راستاسازی نانولوله‌های کربنی، دشواری در توزیع و اختلاط نانو ساختارها با بالارفتن حجم رزین اشاره کرد. با توجه به هزینه کمتر، در دسترس بودن و توزیع راحت‌تر نانو رس درون ماده زمینه، استفاده از این نانو ساختار می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [1] S. A. Bello, J. O. Agunsoye, S. B. Hassan, M. G. Zebase Kana, I. A. Raheem, Tribology in industry epoxy resin based composites, Mechanical and Tribological Properties: A Review, 37(4) (2015).
- [2] S. Bajgholi, K. Saadati, G. Naderi, H. Bohendi, Heat resistant epoxy resins, Quarterly, 3(1) (2013) 4–11.
- [3] S. Sinha Ray, M. Okamoto, Polymer/layered silicate

- of cryogenic treated epoxy reinforced with hybrid nano composite, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 15 (2020) 905-912.
- [17] ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [18] X. J. Shen, X. Q. Pei, Y. Liu, S. Y. Fu, Tribological performance of carbon nanotube-graphene oxide hybrid/epoxy composites, Composites Part B: Engineering, 57 (2014) 120–125.
- [19] A. Yasmin, J. J. Luo, J. L. Abot, I. M. Daniel, Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites, Composites Science and Technology, 66(14) (2006) 2415–2422.
- [20] M. Shettar, C. S. Suhas Kowshik, M. Manjunath, P. Hiremath, Experimental investigation on mechanical and wear properties of nanoclay–epoxy composites, 9 (2020) 9108–9116.
- [21] U. Nirmal, J. Hashim, S. Lau, U. Nirmal, J. Hashim, S. T. W. Lau, Testing methods in tribology of polymeric composites effect of kenaf particulate fillers in polymeric composite for tribological applications, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 6(3) (2011) 367-73.
- [22] B. Dong, Z. Yang, Y. Huang, H.L. Li, Study on tribological properties of multi-walled carbon nanotubes/epoxy resin nanocomposites, Tribology Letters, 20 (2005) 251-254.
- [23] R. Ashok Gandhi, K. Palanikumar, B.K. Ragnath, J. Paulo Davim, Role of carbon nanotubes (CNTs) in improving wear properties of polypropylene (PP) in dry sliding condition, Materials and Design, 48 (2013) 52-57.
- [24] B. Chen, X. Li, Y. Jia, L. Xu, H. Liang, X. Li, J. Yang, C. Li, F. Yan, Fabrication of ternary hybrid of carbon nanotubes/graphene oxide/MoS₂ and its enhancement on the tribological properties of epoxy composite coatings, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 115 (2018) 157–165.
- different sliding parameters and different environment, Materials Today: Proceedings, 5(14) (2018) 28347-53
- [8] M. M. Sakka, Z. Antar, K. Elleuch, J. F. Feller, Tribological response of an epoxy matrix filled with graphite and/or carbon nanotubes, Friction, 5(2) (2017) 171–182.
- [9] V. Kumar, S. K. Sinha, A. K. Agarwal, Tribological studies of dual-coating (intermediate hard with top epoxy-graphene-base oil composite layers) on tool steel in dry and lubricated conditions, Tribology International, 127 (2018) 10–23.
- [10] C. R. Mahesha, Shivarudraiah, N. Mohan, M. Rajesh, Role of nanofillers on mechanical and dry sliding wear behavior of basalt- epoxy nanocomposites, Materials Today: Proceedings, 4(8) (2017) 8192-9.
- [11] F. Zhao, L. Zhang, G. Li, Y. Guo, H. Qi, G. Zhang, Significantly enhancing tribological performance of epoxy by filling with ionic liquid functionalized graphene oxid, Carbon, 136 (2018) 309-19.
- [12] B.P. Mishra, D. Mishra, P. Panda, A. Maharana, An experimental investigation of the effects of reinforcement of graphene fillers on mechanical properties of bi-directional glass/epoxy composite, Materials Today, 33 (2020) 5429-544.
- [13] G. Umesh, N. Krishna Prasad, B. Rudresh, M. Devegowda, Influence of nano graphene on mechanical behavior of PA66/PA6 blend based hybrid nano composites: Effect of micro fillers, Materials Today, 20 (2020) 228-235.
- [14] A. Irez, E. Bayraktar, Design of Epoxy Modified Recycled Rubber-Based Composites: Effects of Different Contents of Nano-Silica, Alumina and Graphene Nanoplatelets Modification on the Toughening Behavior, Research Article GU J Sci, 33 (2020) 188-199.
- [15] T. Mohan, K. Kanny, Tribological properties of nanoclay infused banana fiber (NC-BF) reinforced epoxy composites, Journal of Tribology, 141 (2019) 01-38.
- [16] N. Manikandan, C. Sabarinathan, N. Zeelanbasha, V.P. Suresh Kumar, Wear and hardness investigation

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ranjkesh Adarmanabadi, S. M. Hosseini Farrash, M. Jafari, An experimental investigation of the effect of the type of nanostructured reinforcements on the mechanical and tribological properties of epoxy based nanocomposites, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 4009-4022.

DOI: [10.22060/mej.2021.19191.6973](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19191.6973)



