



بررسی رفتار لغزش خشک فلز بر نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی و نانورس

صدیقه رنجکش آدرمنابادی^۱، سید مهدی حسینی فراش^{۲*} و محمد جعفری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

ایجاد سایش در بسیاری از ماشین‌های صنعتی، باعث افزایش لقی بین قطعات متحرک، کاهش دقت، ایجاد ارتعاش، خستگی و در نهایت می‌تواند باعث از کار افتادن کامل دستگاه و تحمیل هزینه‌های بسیاری بر صنعت شود. در این مقاله رفتار لغزشی خشک فلز روی سطح نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی و خواص مکانیکی آن‌ها مطالعه شده است. اپوکسی خالص، نانولوله کربنی/ اپوکسی، نانورس/ اپوکسی و نانولوله کربنی/ نانورس/ اپوکسی نمونه‌های مورد مطالعه هستند. جهت بررسی رفتار لغزشی، نمونه‌ها به شکل دیسک و مطابق استاندارد ساخته شدند و بین فلزی ساییده مسافت هزار متر را در مسیر دایره‌ای روی سطح نمونه حرکت کرد. نیروهای محوری مختلفی بر بین فولادی اعمال گردید و ضریب اصطکاک بین فلز و نمونه‌ها و همچنین مقدار کاهش وزن نمونه‌ها پس از طی این مسافت اندازه‌گیری شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها به کمک آزمون کشش ساده تعیین گردید. نتایج حاکی از آن بود که افزودن تقویت‌کننده‌های نانوساختار در هر سه نمونه نانوکامپوزیتی باعث مقاومت بیشتر نمونه در برابر سایش در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص می‌شود. در بیشترین میزان بار محوری، ضریب اصطکاک بین فلز و اپوکسی ۰/۲۷ اندازه‌گیری شد که این مقدار پس از افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانورس به زمینه اپوکسی ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت؛ لغزش خشک؛ ضریب اصطکاک؛ کاهش وزن؛ آزمون بین روی دیسک.

Investigation of Dry Sliding Behavior of Metal on Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Nanoclay

S. Ranjkesh Adarmanabadi¹, S. M. Hosseini Farrash^{2,*}, M. Jafari³

¹ M.Sc., Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

² Asst. Prof., Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

³ Assoc. Prof., Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Abrasion in many industrial machines increases the clearance between moving parts, reduces accuracy, causes vibration, fatigue, and can ultimately cause complete machine failure and impose high costs on the industry. In this paper, the dry sliding behavior of metal on the surface of epoxy-based nanocomposites and their mechanical properties have been studied. Neat epoxy, carbon nanotube/ epoxy, nanoclay/ epoxy and carbon nanotube/ nanoclay/ epoxy are the samples. To investigate the sliding behavior, the samples were made in the form of a disc and according to the standard. The abrasive metal pin moved a distance of 1000 m in a circular path on the surface of the sample. Different axial loads were applied to the steel pin. The coefficient of friction between the metal and the samples, and the weight loss of the samples were measured. Also the mechanical properties of samples were determined by simple tensile test. The results showed that the addition of nanostructured reinforcements in all three nanocomposite samples made the sample more resistant to abrasion compared to the pure epoxy sample. At the maximum axial load, the coefficient of friction between the metal pin and the epoxy was measured to be 0.27, which indicated a reduction of 40% after adding 1.5% by weight of nanoclay to the epoxy.

Keywords: Nanocomposite; Dry Sliding; Coefficient of Friction; Weight Loss; Pin on Disk Test.

۱- مقدمه

بسیاری از قطعات مهندسی از قبیل یاتاقان‌ها، محورها، کفشک ترمزها و مواردی از این قبیل به علت بارهای اعمالی در حین حرکت در معرض اصطکاک و سایش قرار دارند؛ بنابراین شناخت رفتار سایشی این گونه از قطعات نقش بسیار مهمی در طراحی و ساخت آنها دارد [۱]. رزین‌های اپوکسی^۱ به دلیل مقاومت حرارتی و شیمیایی برتر، ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی عالی، سهولت پردازش و هزینه کم، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله هوا فضا، ساخت اتومبیل، دستگاه‌های الکتریکی و الکترونیکی و غیره پیدا کرده‌اند [۲]. برای بهبود مقاومت سایشی، افزایش خواص مکانیکی و حرارتی رزین‌های اپوکسی، از مواد پرکننده در ابعاد نانو استفاده می‌شود [۳-۶]. نانولوله‌های کربنی و نانورس‌ها از جمله پرکننده‌های مرسوم در تقویت رزین‌های پایه پلیمری هستند. نانوساختارهای کربن به دلیل استحکام مکانیکی عالی، مساحت سطح بزرگ و هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، به عنوان پرکننده برای تقویت ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷]. نانولوله‌های کربنی که توسط سومیو ایچیمادا در سال ۱۹۹۱ کشف شد، به دلیل مقاومت بالای الکتریکی و همچنین رسانایی گرمایی، به عنوان تقویت کننده برای مواد کامپوزیتی بسیاری استفاده شده است [۸]. کامپو و همکاران [۹]، رفتار سایشی کامپوزیت‌های اپوکسی با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی چند جداره در شرایط لغزشی خشک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها از پراکندگی مکانیکی نانولوله‌های کربنی با استفاده از فرایند کلندرینگ جهت ترکیب همگن و یکنواخت، برای سه درصد متفاوت نانولوله‌های کربنی استفاده کردند. در مقایسه با اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی کاهش جرم، ضریب اصطکاک و نرخ سایش ویژه کمتری از خود نشان دادند و این پارامترها با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی کاهش یافتند. کومار جوشی و همکاران [۱۰]، اثر کسر وزنی، نانولوله‌های چندجداره بر خصوصیات مکانیکی، رفتار سایشی و هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی را بررسی کردند. محققان زیادی در جستجوی

تقویت کننده جایگزین نانولوله‌های کربنی که برای محیط زیست مضر نباشد، تحقیقات خود را روی پرکننده‌های نانو رس انجام دادند. باگچی و همکاران [۱۱]، کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانو رس را با استفاده از آزمون فرسایش ذرات جامد آلومینا تحت سه زاویه و با دو سرعت مختلف مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد، نمونه‌های بدون نانو رس بیشترین مقاومت را در برابر فرسایش از خود نشان می‌دهند. در این یافته‌ها تجمع و سازگاری ضعیف نانو رس علت کاهش مقاومت به سایش کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی است. کی‌لام و همکاران [۱۲]، به بررسی عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های نانو رس/اپوکسی تا ۴ درصد وزنی از طریق آزمون میکرو سختی و آزمون سایش پرداختند. آنها دریافتند، هر دو ویژگی با افزایش محتوای نانوذرات افزایش می‌یابد. ترکیب نانو پرکننده‌ها که به آن سیستم‌های نانوذره ترکیبی یا باینری^۲ گفته می‌شود به دلیل تعامل آن‌ها با یکدیگر و با زمینه می‌تواند نتایج متنوعی را به همراه داشته باشد [۱۳]. یوکسین‌هی و همکاران [۱۴]، یک ماده ترکیبی متشکل از نانوذرات MoO₃ و نانولوله‌های کربنی چند جداره با استفاده از یک روش هیدروترمال یک مرحله‌ای، جهت تقویت کامپوزیت اپوکسی/فیبر شیشه تهیه کردند. بررسی‌ها نشان داد، مواد ترکیبی به عنوان روان کار و تقویت کننده، باعث کاهش اصطکاک و بهبود عملکرد سایشی می‌شوند. کومار و همکاران [۱۵] به تجزیه و تحلیل رفتار شیمیایی، فیزیکی، حرارتی و تریبولوژیکی زمینه اپوکسی بر اثر افزودن فولورن و نانولوله‌های کربنی چندجداره در محیط خشک پرداختند. افزایش تقویت کننده‌ها تا ۵ درصد وزنی بهبود قابل توجهی نسبت به رفتار سایشی اپوکسی خالص از خود نشان داد. نجفی و همکاران [۱۶]، تأثیر انواع فرآیندهای اختلاط نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی و چندلایه‌های الیافی فلزی را مورد بررسی قرار دادند. حسینی فراش و همکاران [۱۷ و ۱۸]، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی عامل دار را بر خواص ترمومکانیکی و دینامیکی رزین اپوکسی مطالعه کردند. موسوی و داودی [۱۹]، اثر روانکاری به کمک نانوسیال را بر زبری سطح و سایش ابزار در عملیات تراشکاری

¹ Epoxy

² Binary

که مقاومت در برابر سایش بهتر کامپوزیت هیبریدی اپوکسی بازالت/دی اکسید تیتانیوم / نانورس به دلیل اثر هم افزایی بین نانورس - دی اکسید تیتانیوم است.

از آنجاکه هزینه تهیه یا تولید نانولوله های کربنی برای به کارگیری در کاربردهای صنعتی قابل ملاحظه است، در این مطالعه قابلیت جایگزینی یک نوع نانو ذره در دسترس و ارزان قیمت مانند نانورس در ساخت نانو کامپوزیت مقاوم به سایش به جای نانولوله کربنی بررسی شده است. در این پژوهش به کمک روش تجربی خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت حاصل از افزودن نانولوله کربنی، نانوذرات رس و اثر هم افزایی نانورس و نانولوله کربنی در مقادیر پایین و در شرایط کاملاً یکسان درون رزین اپوکسی بررسی شده است. نانولوله های کربنی و نانوذرات رس با ۱/۵ درصد وزنی و نمونه ترکیبی حاوی ۰/۷۵ درصد وزنی از هر نانو ساختار به رزین اپوکسی اضافه شده است. نمونه ها در شرایط محیطی یکسان و با یک روش همگن سازی، قالب گیری و پخت شد. استانداردهای ASTM ملاک ساخت نمونه های آزمون کشش، جهت تعیین خواص مکانیکی و سایش بوده است. برای تعیین رفتار سایشی از آزمون پین روی دیسک^۱ بهره گرفته شد.

۲- ساخت نمونه ها و انجام آزمون

۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی کر ۲۸۲۸ به همراه خشک کننده تتا^۲ محصول شرکت کومهو^۳ کره با ویسکوزیته ۱۲-۱۴ Pas جهت ساخت نمونه ها استفاده شد.

در این پژوهش از دو نوع نانو ساختار به عنوان تقویت کننده استفاده شد. نانولوله های کربنی چند جداره محصول شرکت یو-اس-نانو^۴ با خلوص بالای ۹۵٪ دارای قطر خارجی ۳۰-۲۰ nm، قطر داخلی ۵-۱۰ nm، طول ۳۰-۱۰ mm به رنگ سیاه و نانورس مونتمریلونیت^۵ با اندازه ذرات ۱-۲ nm، چگالی ۲۲۰-۲۷۰ m²/gr و مساحت سطح ویژه ۰/۷-۰/۵ gr/cm³ که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شدند.

نوعی سوپر آلیاژ بررسی نمودند. منگ و همکاران [۲۰]، هیبریدهای سه بعدی متشکل از یک نانولوله کربنی چند جداره و ریز ورق های دو بعدی دی سولفید مولیبدن را بررسی کردند که در یک محیط هیدروترمال ساخته شدند. دیده شد مقاومت کششی و مقاومت در برابر شکست همزمان افزایش و ضریب اصطکاک و سرعت سایش کاهش می یابد. هایمرس و همکاران [۲۱]، به بررسی تأثیر نانورس بر خواص کششی و سایشی نانو کامپوزیت سه تایی الیاف شیشه/ اپوکسی/ نانورس پرداختند. همچنین برای درصدهای مختلف وزنی از نانورس در بارها و دوره های لغزشی مختلف تست سایش را انجام دادند. آنها دریافتند، نانو رس باعث افزایش خواص کششی و بهبود خواص ضد سایشی نانو کامپوزیت سه تایی می شود. موجا و همکاران [۲۲]، به ارزیابی اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی چند جداره در درصدهای وزنی مختلف پرداختند. آنها دریافتند مقاومت کششی و سایشی اپوکسی با افزودن نانولوله های کربنی افزایش می یابد. کایران و همکاران [۲۳]، به بررسی و بهینه سازی مقاومت در برابر سختی و مقاومت در برابر سایش کامپوزیت های اپوکسی/ شیشه/ نانو رس متمرکز شدند. مشاهده شد که کامپوزیت حاوی نانو رس زیاد، حجم فیبر کم و جهت گیری ۴۵ درجه سرعت سایش پایین را نشان می دهد، حتی اگر سختی آن کمتر از مقدار بهینه شده باشد. جین و همکاران [۲۴]، به تحقیقات تجربی برای مقایسه مقاومت در برابر سایش و میزان اصطکاک بین پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه با غلظت متفاوت نانولوله های کربنی چند جداره پرداختند. نتایج تحقیقات تجربی توجیه کرد که افزودن نانولوله های کربنی بر سایش و رفتار اصطکاک تأثیر می گذارد. شتار و همکاران [۲۵]، اثر درصدهای وزنی مختلف را روی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد، نانو رس باعث تقویت اپوکسی و کاهش نرخ سایش می شود. مهاشا و همکاران [۲۶]، تحقیقی برای ارزیابی اثر ترکیب نانو دی اکسید تیتانیوم به تنهایی و در ترکیب با نانو رس در رفتار سایشی مواد کامپوزیت پارچه بازالت - اپوکسی انجام دادند. مشخص شد

¹ Pin on disk

² Ker 828

³ TETA Hardener

⁴ Kumho

⁵ US-Nnanomaterials

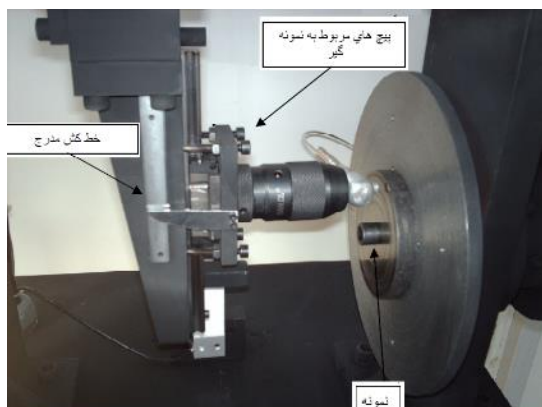
⁶ Montmorillonite Nanoclay

۲-۲- روش ساخت

در این پژوهش پس از انجام محاسبات و توزین مواد، از دستگاه حمام فراصوت بندلین^۱ ۴۰۰ W و همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ r/min به منظور توزیع پرکننده‌های نانوساختار درون رزین استفاده شده است. مخلوط رزین اپوکسی و تقویت‌کننده نانوساختار ابتدا به مدت یک ساعت درون حمام فراصوت در دمای ۴۰°C قرار گرفت. سپس مخلوط حاصل به مدت یک ساعت روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و در نهایت یک ساعت دیگر از حمام فراصوت استفاده شد. جهت انجام فرایند گاززدایی، بشر درون دسیکاتور به مدت ۳۰ min قرار داده شد تا حباب‌های موجود درون رزین تحت خلأ از آن خارج شوند. سپس ماده سخت‌کننده به مخلوط اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۲ min توسط همزن مکانیکی هم‌زده شد. عملیات حباب‌گیری دوباره به مدت ۵ min انجام شد. مخلوط پس از حباب‌گیری درون قالب‌های سیلیکونی از پیش ساخته شده منتقل و نمونه‌ها در دمای ۳۰°C به مدت ۲۴ h پخت شدند. شکل ۱ نمونه‌های پخت شده اپوکسی خالص، نانولوله کربنی / اپوکسی، نانورس / اپوکسی و نانولوله کربنی / نانورس / اپوکسی را به ترتیب از راست به چپ نمایش می‌دهد.



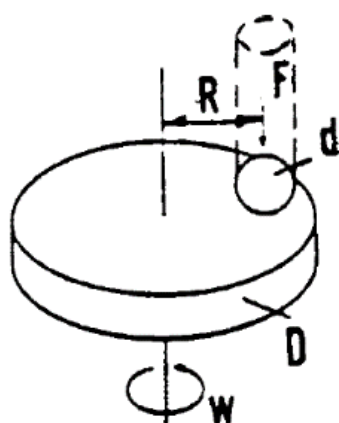
شکل ۱- نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون سایش، از راست به چپ: اپوکسی خالص، نانولوله کربنی / اپوکسی، نانورس / اپوکسی و نانولوله کربنی / نانورس / اپوکسی



شکل ۲- دستگاه آزمون پین روی دیسک آریا مدرن

۲-۳- آزمون سایش و کشش ساده

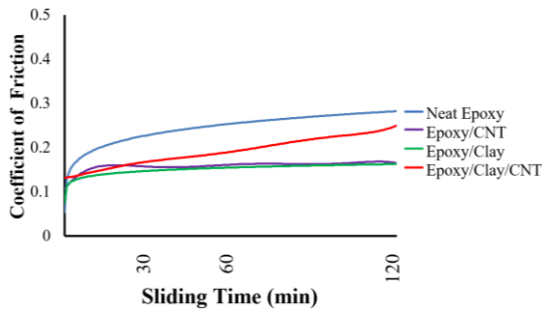
از دستگاه پین روی دیسک ساخت شرکت آریا مدرن صنعت برای انجام آزمون سایش استفاده شد (شکل ۲). پین ساییده طبق استاندارد، از جنس فولاد بلبرینگ (۶ Cr ۱۰۰) با قطر ۱۰ mm طول ۶۰ mm تهیه شد. پس از ساخت نمونه‌ها سطح آن‌ها توسط دستگاه تراش تراز گردید. نمونه‌ها قبل و پس از آزمون سایش، با استفاده از استون تمیز گردیده و وزن هر نمونه با ترازوی دقت ۰/۰۰۰۱ gr اندازه‌گیری و ثبت شد. این آزمون طبق استاندارد ASTM-G99 انجام شد. مطابق شکل ۳، نیروی عمود بر سطح، F ، قطر پین، d ، قطر دیسک (نمونه)، شعاع مسیر سایش و W سرعت چرخش دیسک است [۲۷]. آزمون در نیروهای عمودی ۲۰ N، ۶۰ N و ۱۰۰ N بدون استفاده از روانکار انجام شد. پین فولادی مسافت ۱۰۰۰ m را در شعاع ۱۰ mm از مرکز چرخش و با سرعت ۰/۱ m/s طی



شکل ۳- شماتیک سیستم آزمون پین روی دیسک [۲۷]

^۱ Bandelin (Germany)

^۲ Instron Testing Machine



شکل ۵- نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن

پرکننده‌های نانوساختار، باعث افزایش ضریب اصطکاک و در نهایت سایش بیشتر این نمونه نسبت به نمونه‌های اپوکسی/نانورس و اپوکسی/نانولوله کربنی می‌شود؛ اما همچنان ضریب اصطکاک نسبت به اپوکسی خالص تا ۱۲۰ min پایین‌تر است؛ همچنین این نمودار نشان می‌دهد که افزودن همزمان نانورس و نانولوله کربنی نمی‌تواند پس از گذشت زمان، اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش ضریب اصطکاک بین پین فلزی و نانوکامپوزیت داشته باشد. این احتمال می‌رود که وجود نانولوله‌های کربنی مانع غلغله‌های روان نانورس در فیلم واسط شوند.

۳-۱-۲- کاهش وزن

برای محاسبه کاهش وزن نمونه‌ها، قبل و بعد از آزمون سطوح نمونه‌ها با استون تمیزکاری شدند و وزن آن‌ها ثبت شد. نیروی عمودی اعمال شده برای این آزمون سه مقدار ۲۰ N، ۴۰ N و ۱۰۰ N در نظر گرفته شد.

مطابق شکل ۶ در بار ۲۰ N کاهش وزن هر سه نمونه کامپوزیتی تقریباً یکسان و به‌طور محسوسه کمتر از نمونه اپوکسی خالص است. بهبود حاصله از ایجاد فیلم انتقال روی ساینده ناشی می‌شود که باعث مقاومت در برابر سایش و کاهش میزان سایش می‌شود [۲۹]. البته مقادیر کاهش وزن در این حالت بارگذاری بسیار کم بوده و برای مشاهده بهتر مقدار کاهش وزن نمونه‌ها، آزمایش برای مقادیر بیشتری از مقدار بار عمودی تکرار شد. شکل ۷ کاهش وزن نمونه‌ها در بار ۶۰ N را نمایش می‌دهد. در بار ۶۰ N نمونه ترکیبی اپوکسی/نانولوله کربنی/نانورس از دو کامپوزیت دیگر در کاهش وزن پیشی گرفته و با کاهش ۰/۰۰۲ gr از وزن خود نسبت به دو نمونه دیگر خواص سایشی کمتری را نشان می‌دهد، هر چند



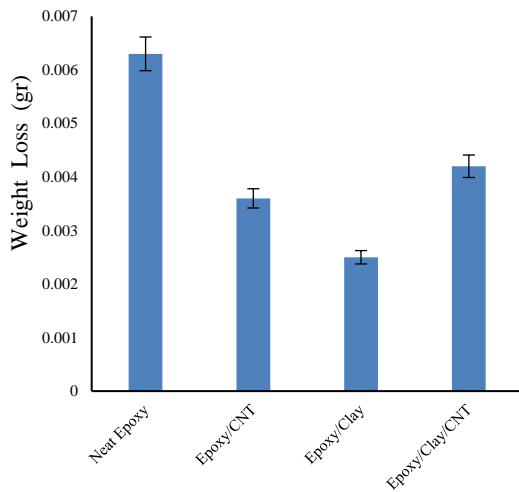
شکل ۴- نمونه آزمون سایش پس از اعمال بار

۳- نتایج

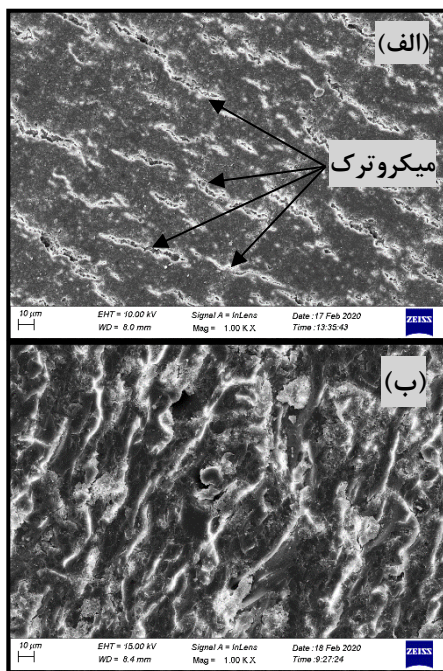
۳-۱- خواص مکانیکی حاصل از آزمون سایش

۳-۱-۱- ضریب اصطکاک

نمودار ضریب اصطکاک بین پین ساینده فولادی و نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های نانورس، نانولوله کربنی و ترکیب نانولوله کربنی/نانورس برای نیروی عمودی ۶۰ N در شکل ۵ نشان داده شده است. اپوکسی خالص ضریب اصطکاکی بیشتری از هر سه نمونه کامپوزیت از خود نشان می‌دهد. پس از گذشت دو ساعت زمان 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. نمونه اپوکسی/نانورس با کمترین ضریب اصطکاک در ردیف اول مقاومت در برابر سایش قرار دارد. بهبود مقاومت به سایش اپوکسی تقویت شده با نانورس را می‌توان به مقاومت بالا و سختی ذرات نانورس نسبت داد. در واقع این طور به نظر می‌رسد که نانورس موجود در فیلم واسط بار زیادی را تحمل می‌کند و باعث کاهش بار وارد بر اپوکسی و سایش آن می‌شود [۲۸]. کامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی در ابتدای آزمون سایش تا ۲۰ min نشان از افزایش ضریب اصطکاک حتی نسبت به کامپوزیت حاصل از ترکیب دو نانوساختار دارد، اما با گذشت زمان و ایجاد فیلم انتقال بین نمونه و ساینده، ضریب اصطکاک این کامپوزیت با اختلاف بسیار کمی از نمونه نانورس ولی بیشتر از آن ثبت شده است. این احتمال می‌رود که اضافه کردن نانولوله کربنی به نانورس با ایجاد تمرکز توده‌هایی از

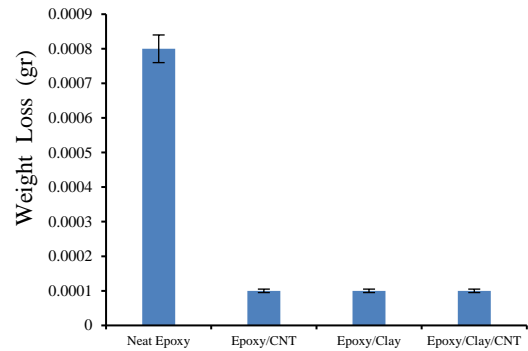


شکل ۸- نمودار میله‌ای کاهش وزن نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن در بار ۱۰۰ N

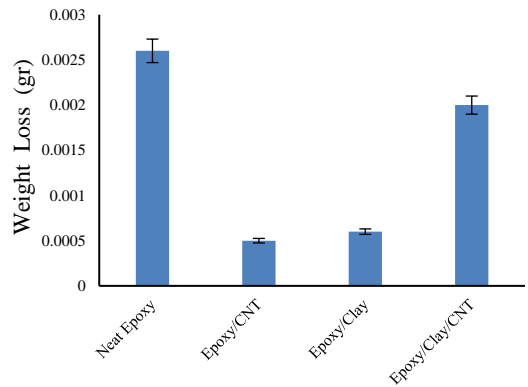


شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح سایشی، (الف) اپوکسی خالص و (ب) اپوکسی / نانورس

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تهیه شده از سطوح سایشی نمونه‌ی اپوکسی خالص و نمونه اپوکسی / نانورس را با خط مقیاس ۱۰ μm نشان می‌دهند. در شکل ۹-الف



شکل ۶- نمودار میله‌ای کاهش وزن نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن در بار ۲۰ N



شکل ۷- نمودار میله‌ای کاهش وزن نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن در بار ۶۰ N

نسبت به نمونه اپوکسی خالص بهتر عمل کرده است. در بار ۶۰ N نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی با اختلاف بسیار کم نسبت به نمونه اپوکسی / نانورس بهتر عمل می‌کند که می‌تواند به دلیل چسبندگی خوب ماتریس و نانو لوله‌های کربنی موجود در آن باشد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش بار و با گذر زمان، بر اثر افزایش دما، نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی نسبت به نمونه اپوکسی / نانورس، کاهش وزن بیشتری از خود نشان می‌دهد، به طوری که این کاهش وزن کاملاً مشهود است. کمترین کاهش وزن را کامپوزیت اپوکسی / نانورس با ۶۰٪ کاهش نسبت به اپوکسی خالص در بار ۱۰۰ N دارد. نانوذرات رس، می‌توانند به عنوان واسط بین سطوح عمل کنند و از تماس کامل تورفتگی‌ها و برآمدگی‌های سطوح جلوگیری کنند و در نتیجه باعث کاهش سایش شوند [۲۸]. شکل ۹

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

کششی نهایی مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص افزایش یافته است؛ همچنین کرنش هنگام شکست کلیه نمونه‌های کامپوزیتی، بیشتر از کرنش هنگام شکست نمونه اپوکسی خالص است (شکل ۱۱). بجز مدول الاستیک که در نمونه ترکیبی نانو ساختارها نسبت به دیگر نمونه‌ها بر اثر هم‌افزایی افت داشته است (شکل ۱۲) بطور کلی افزودن این نانو ساختارها به اپوکسی باعث بهبود خواص مکانیکی همچون چقرمگی می‌شود (شکل ۱۳).

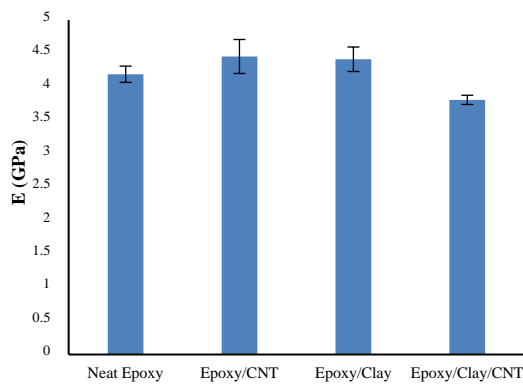
نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۱۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح حاصل از تست کشش را برای نمونه اپوکسی خالص و نمونه‌های کامپوزیتی آن نمایش می‌دهد. مقایسه تصاویر سطح شکست نمونه اپوکسی خالص (شکل ۱۴-الف) با سطح شکست

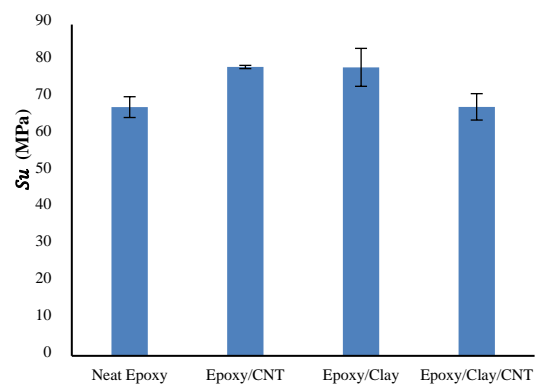
میکروتک‌های ایجاد شده بیانگر ضعیف بودن سطح نمونه اپوکسی خالص در برابر سایش است. از طرفی در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص، نمونه اپوکسی/نانورس یکپارچگی خود را حفظ کرده است و در نمونه‌ی حاوی نانو رس میکروتک‌ها دیده نمی‌شوند (شکل ۹-ب). با توجه به تصاویر میکروسکوپی مقاومت به سایش بهتر نمونه اپوکسی/نانورس قابل توجهی است.

۲-۳- خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش

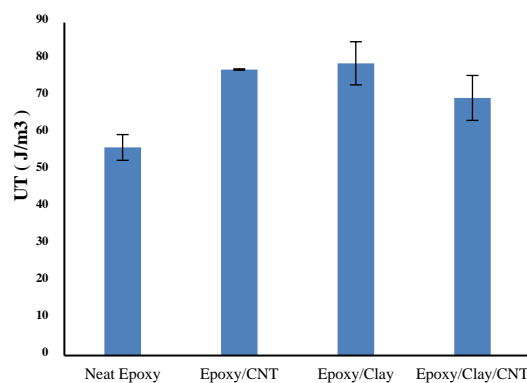
با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده تعیین شد. نمودارهای میانگین کرنش هنگام شکست (ϵ_b)، مقاومت کششی نهایی (S_{III})، مدول الاستیک (E) و چقرمگی (UT) در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مقاومت



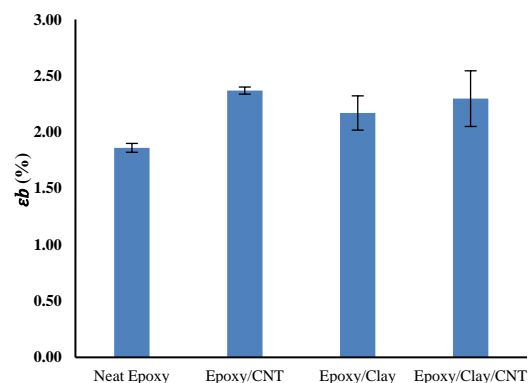
شکل ۱۲- نمودار مدول الاستیک نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیتی



شکل ۱۰- نمودار مقاومت کششی نهایی نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیتی



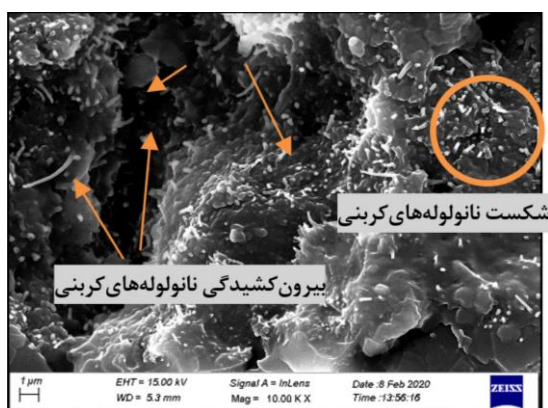
شکل ۱۳- نمودار چقرمگی نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیتی



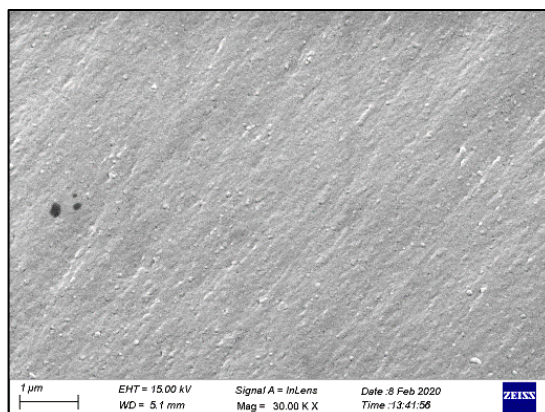
شکل ۱۱- نمودار کرنش هنگام شکست نمونه‌های اپوکسی خالص و کامپوزیتی

جدول ۱- خواص مکانیکی برای نمونه اپوکسی و کامپوزیت‌های آن

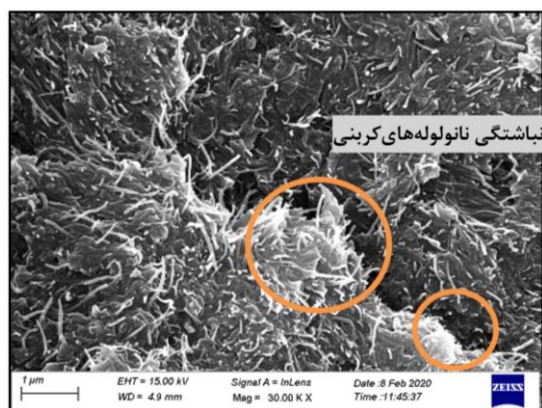
| نوع کامپوزیت | $UT (J/m^3)$ | $E (GPa)$ | $S_{ut} (MPa)$ | $\epsilon_b (%)$ |
|------------------------------|--------------|-----------|----------------|------------------|
| اپوکسی خالص | ۵۶/۲۴ | ۴/۱۹ | ۶۷/۵۷ | ۱/۸۶ |
| اپوکسی/نانولوله کربنی | ۷۷/۳ | ۴/۴۵ | ۷۸/۴۸ | ۲/۳۷ |
| اپوکسی / نانورس | ۷۸/۹۸ | ۴/۴۱ | ۷۸/۳۸ | ۲/۱۷ |
| اپوکسی/نانولوله کربنی/نانورس | ۶۹/۶۳ | ۳/۸۱ | ۶۷/۶۴ | ۲/۳۰ |



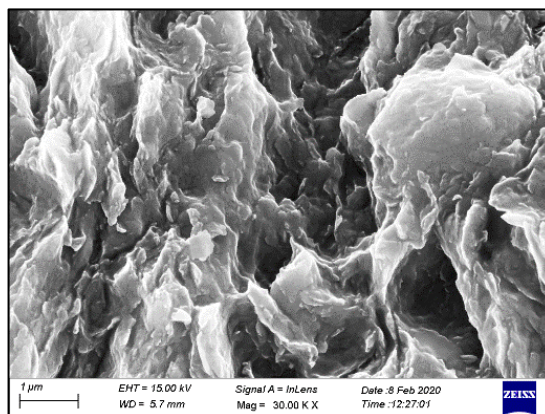
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست، (الف) اپوکسی خالص، (ب) اپوکسی/نانولوله کربنی، (ج) اپوکسی/نانورس و (د) اپوکسی/نانولوله کربنی/نانورس

نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی با مکانیزم‌هایی از قبیل بیرون کشیدگی^۱، پل زدن^۲ و شکست^۳ باعث افزایش مقاومت

نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی (شکل ۱۴-ب)، بیانگر نحوه مقاومت به شکست این نمونه‌ها است. مقایسه این دو تصویر

¹ Pull out
² Bridging
³ Rupture

۴- نتیجه گیری

در این بررسی تجربی، رفتار لغزشی ساینده فلزی در محیط خشک، روی سطح نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی و خواص مکانیکی آن‌ها مطالعه شده است. اپوکسی، اپوکسی / نانولوله کربنی، اپوکسی / نانورس و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس نمونه‌های مورد بررسی هستند. نتایج نشان داد که افزودن تقویت‌کننده‌های نانوساختار، باعث افزایش مقاومت در برابر سایش نمونه‌های حاوی نانوساختار در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص می‌شود. در بار 60N نمونه حاوی $1/5\%$ نانولوله کربنی 81% ، نمونه حاوی $1/5\%$ نانورس 77% و در بار 100N نمونه‌ی حاوی $1/5\%$ نانورس 60% نسبت به اپوکسی خالص کاهش وزن از خود نشان دادند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقویت رزین اپوکسی با $1/5\%$ نانولوله کربنی بیشترین تاثیر را بر خواص مکانیکی اپوکسی دارد. در نمونه حاوی $1/5\%$ نانولوله کربنی مدول الاستیک 6% ، تنش قابل تحمل $16/1\%$ و کرنش در لحظه شکست 27% نسبت به نمونه اپوکسی خالص افزایش داشت. نمونه اپوکسی / نانورس نیز با افزایش $5/4\%$ مدول الاستیک و 16% تنش قابل تحمل نسبت به نمونه اپوکسی خالص، پس از نمونه حاوی نانولوله کربنی خواص مکانیکی خوبی از خود نشان می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Vinayagamoorthy R (2020) Friction and wear characteristics of fibre-reinforced plastic composites. *J Thermoplast Compos Mater* 33(6): 828-850.
- [2] Liu XF, Liu BW, Luo X, Guo DM, Zhong HY, Chen L, Wang YZ (2020) A novel phosphorus-containing semi-aromatic polyester toward flame retardancy and enhanced mechanical properties of epoxy resin. *Chem Eng J* 380: 122471.
- [3] Arshid E, Amir S, Loghman A (2021) Thermal buckling analysis of FG graphene nanoplatelets reinforced porous nanocomposite MCST-based annular/circular microplates. *Aerosp Sci Technol* 111: 106561.
- [4] Arshid E, Amir S, Loghman A (2020) Bending and buckling behaviors of heterogeneous temperature-dependent micro annular/circular porous sandwich plates integrated by FGPEM nano-Composite layers. *Aerosp Sci Technol* 108: 101-109.
- [5] Arshid E, Amir S, Vossough A, Vossough H (2020) Nonlinear magneto-nonlocal vibration analysis of coupled piezoelectric micro-plates reinforced with

کامپوزیت در برابر اعمال بار می‌شوند. شکل ۱۴-ج مربوط به نمونه اپوکسی / نانورس است. در این شکل به نظر می‌رسد که نانوذرات رس توسط ماده پلیمری به خوبی احاطه شده است و چسبندگی مناسب ایجاد شده بین فاز تقویت‌کننده و ماده زمینه باعث افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیک این نمونه نسبت به اپوکسی خالص شده است. شکل ۱۴-د، نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی را درون زمینه اپوکسی حاوی نانوذرات رس نشان می‌دهد. می‌توان گفت که وجود نانورس درون ماده پلیمری، چسبندگی بین رشته‌های پلیمری را افزایش داده که این عامل باعث انباشتگی نانولوله‌های کربنی در برخی نواحی و به تبع آن کاهش برخی از خواص مکانیکی این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌های حاوی تقویت‌کننده‌های نانوساختار شده است.

مقاومت کششی نمونه کامپوزیتی اپوکسی / نانولوله کربنی نسبت به اپوکسی خالص با افزایش از $67/57\text{ MPa}$ به $78/48\text{ MPa}$ و مقاومت کششی نمونه اپوکسی / نانورس نسبت به اپوکسی خالص با افزایش از $67/57\text{ MPa}$ به $78/38\text{ MPa}$ می‌رسد. با توجه به نمودارها به نظر می‌رسد، چسبندگی سطحی خوب بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی، انتقال تنش بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی افزایش می‌دهد [۳۰]. بیشترین کرنش در نقطه شکست مربوط به نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی با $27/3\%$ افزایش نسبت به اپوکسی خالص است؛ همچنین بیشترین مدول الاستیک این نمونه با $6/3\%$ افزایش نسبت به اپوکسی خالص از $4/19\text{ GPa}$ به $4/45\text{ GPa}$ رسیده است. مقدار مدول الاستیک نمونه اپوکسی / نانورس با $5/4\%$ بهبود نسبت به اپوکسی خالص از $4/19\text{ GPa}$ به $4/41\text{ GPa}$ 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 (شکل ۱۴-ب). در اثر وجود تقویت‌کننده‌ها در ساختار اپوکسی، تحرک زنجیره‌های پلیمری تحت بارگذاری محدود می‌شود. جهت‌گیری لایه‌های سیلیکات و زنجیره‌های پلیمری با توجه به جهت بارگذاری نیز می‌تواند در اثرات تقویت‌کننده نقش داشته باشد [۳۱]. در نمونه ترکیبی تأثیر تقویت‌کننده برای بهبود خواص مکانیکی مثل چقرمگی و استحکام کششی ناچیز و برای مدول کاهشی است که ممکن است، به دلیل توده‌ای شدن ذرات تقویت‌کننده بر اثر هم‌افزایی باشد [۳۲].

- [18] Hosseini Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J (2020) Dynamic characteristics of functionalized carbon nanotube reinforced epoxy composites: An Experimental Approach. *J Solid Mech* 12(2): 358-365.
- [19] Musavi SH, Davoodi B (2017) On the effects of cryogenic cooling and lubrication with nanofluid on surface roughness and tool wear in a286 superalloys turning. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 4(7): 73-85. (In Persian)
- [20] Meng X, Wang M, Cong C, Ye H (2019) Synergistic effects of multiwalled carbon nanotube/molybdenum disulfide hybrid particles on the mechanical and wear performance of epoxy. *Polym Compos* (40): 1642-1648.
- [21] Hiremath P, Kini U A, Shettar M, Sharma S, P K J (2021) Investigation on tensile properties and analysis of wear property of glass fiber-epoxy-nanoclay ternary nanocomposite using response surface methodology. *Cogent Eng* (8): 1-15.
- [22] Mucha M, Krzyzak A, Kosicka E, Coy E, Koscinski M, Sterzynski T, Salacinski M (2020) Effect of MWCNTs on wear behavior of epoxy Resin for aircraft applications. *Materials* (13): 1-17.
- [23] Kiran ZS, Babu VS, Sekhar KS (2019) Study of the microhardness and erosive wear behavior of organo-modified nanoclay filled glass-epoxy composites and optimization. *J Mech Eng Sci* (13): 4794-4815.
- [24] Jain A, Rawat P, Singh KK, (2018) Wear and frictional behavior of three phased glass/epoxy composite laminate reinforced with MWCNTs. *Mater Today* (5): 8112-8120.
- [25] Shettar M, Kowshik CSS, Manjunath M, Hiremath P (2020) Experimental investigation on mechanical and wear properties of nanoclay-epoxy composites. *J Mater Res Technol* 9(4):9108-9116.
- [26] Mahesha CR, Shivarudraiah, Mohan N, Suprabha R (2017) Three body abrasive wear studies on Nanoclay/NanoTiO₂ filled basalt-epoxy composites. *Mater Today* (4): 3979-3986.
- [27] ASTM G99 (2010) Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. ASTM International.
- [28] Fernández-Silva SD, García-Morales M, Ruffel C, Delgado MA (2021) Influence of the nanoclay concentration and oil viscosity on the rheological and tribological properties of nanoclay-based ecolubricants. *Lubricants* 9(1): 8.
- [29] Shaabania YAA (2019) Wear and friction properties of epoxy - polyamide blend nanocomposites reinforced by MWCNTs. *Energy Procedia* (157): 1561-1567.
- [30] Shen XJ, Pei XQ, Liu Y, Fu SY (2014) Tribological performance of carbon nanotube-graphene oxide agglomerated CNTs. *Mech Adv Compos Struct* 7(1): 109-119.
- [6] Arshid E, Amir S, Vossough A, Vossough H (2020) Static and dynamic analyses of FG-GNPs reinforced porous nanocomposite annular micro-plates based on MSGT. *Int J Mech Sci* 180(1): 105656.
- [7] Zhou H, Wang H, Du X, Zhang Y, Zhou H, Yuan H, Liu HY, Mai YW (2018) Facile fabrication of large 3D graphene filler modified epoxy composites with improved thermal conduction and tribological performance. *Carbon* 139: 1168-1177.
- [8] Iijima S (1991) Helical microtubules of graphitic carbon. *nature* 354(6348): 56-58.
- [9] Campo M, Jiménez-Suárez A, Ureña A (2015) Effect of type, percentage and dispersion method of multi-walled carbon nanotubes on tribological properties of epoxy composites. *Wear* 15(324): 100-108.
- [10] Joshi SK, Kumar A, Mahtab S, Zaidi MG (2020) Modification in mechanical, tribological & electrical properties of epoxy at low weight fraction of multiwalled carbon nanotube. *Mater Today Proc* 26: 1386-1840.
- [11] Bagci M, Demirci M, Sukur EF, Kaybal HB (2020) The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites. *Wear* 15(444): 203159.
- [12] Lam CK, Lau KT (2007) Tribological behavior of nanoclay/epoxy composites. *Mater Lett* 61(18): 3863-3866.
- [13] Sen B, Fulmali AO, Prusty RK, Ray BC (2020) A study of the effect of carbon nanotube/nanoclay binary nanoparticle reinforcement on glass fibre/epoxy composites. *Mater Today Proc* 26: 2026-2031.
- [14] He Y, Wu D, Zhou M, Liu H, Zhang L, Chen Q, Yao B, Yao D, Jiang D, Liu C, Guo Z (2020) Effect of MoO₃/carbon nanotubes on friction and wear performance of glass fabric-reinforced epoxy composites under dry sliding. *Appl Surf Sci* 15(506): 144946.
- [15] Upadhyay RK, Kumar A (2018) A novel approach to minimize dry sliding friction and wear behavior of epoxy by infusing fullerene C70 and multiwalled carbon nanotubes. *Tribol Int* 120: 455-64.
- [16] Najafi M, Ansari R, Darvizeh A (2017) Experimental study of the influence of mixing method of nanoclay on mechanical properties of polymer composites and fiber metal laminates. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7(2): 63-80. (In Persian)
- [17] Hosseini Farrash SM, Rezaeepazhand J, Shariati M (2018) Experimental study on the effect of amine-functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of cnt/epoxy nanocomposites. *Mech Adv Compos Struct* 5(1): 41-48.

- [32] Sharma P, Panwar V, Kharitonov A, Pal K (2017) Effect of nanoclay on carbon black reinforced blend of amorphous–semicrystalline polymers. Polym Bull (74): 3341-3351.
- hybrid/epoxy composites. Compos Part B: Eng 57: 120-125.
- [31] Yasmin A, Luo JJ, Abot JL, Daniel IM (2006) Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites. Compos Sci Technol 66(14): 2415-2422.