

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی

بررسی تجربی خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت شده با نانوذرات

نگارنده:

صدیقه رنجکش آدرمنابادی

استادان راهنما:

دکتر محمد جعفری

دکتر سید مهدی حسینی فراش

شهریور ماه ۱۳۹۹

تقدیم اثر بہ

بہ پاس دستان زحمت کش پدرم و قلب رؤف مادرم

بہ پاس ایثار و از خود گذشتگی شان

بہ پاس مہر سرشار و لطف بی انتہای شان

بہ پاس گرمای امید بخش و جودشان در این روزگار سرد

بہ پاس قلب های بزرگ و چشمان ہمیشہ نگران شان

و بہ پاس ہر آنچہ ذات مقدس پرودگارم می داند و من از آن بی خبرم

این اثر را بہ پدر عزیزم و مادر مہربانم تقدیم می کنم.

شکر و قدردانی

سپاس خدای را که بخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کزاردن توانند. بدون شک مقام و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصد دست ناتوان، چیزی بنگاریم. بر حسب وظیفه و از باب "من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عز و جل"؛

از پدر و مادر عزیز و مهربانم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عنو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذاشته اند و در تمام عرصه های زندگی صبورانه یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛
از تمامی استید کرده کلنیک بر ویره:

از استادان گرامی و بزرگوار جناب آقایان دکتر محمد جعفری و دکتر سید مهدی حسینی فراش که زحمت راحمانی این رساله را بر عهده گرفتند؛
از خانواده ی مهربانم که تمام موفقیت های زندگی ام مرهون زحمات بی دریغ و دلسوزانه ی آن هست و با صبرشان بنده را در این مدت همراهی نمودند
کمال شکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب صدیقه رنجکش آدرمنابادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت های پایه پلیمری تقویت شده با نانوذرات تحت راهنمایی دکتر جعفری - دکتر سید مهدی حسینی فراش متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هدف از این مطالعه، افزایش خواص مکانیکی و کاهش میزان سایش مواد پلیمری با ساخت مواد کامپوزیتی و با استفاده از نانوساختارها مختلف به عنوان ماده تقویت کننده است. در این مطالعه، با افزودن نانولوله کربنی، نانورس و نانو اکسید گرافن به زمینه اپوکسی، تغییرات خصوصیات مکانیکی ماده‌ی حاصل بررسی شد. برای این منظور نمونه‌های اپوکسی خالص، اپوکسی / نانولوله کربنی (% ۱/۵ نانولوله کربنی)، اپوکسی / نانورس (% ۱/۵ نانورس)، اپوکسی / نانو اکسید گرافن (% ۱/۵ نانو اکسید گرافن)، اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس (% ۰/۷۵ نانولوله کربنی و % ۰/۷۵ نانورس)، اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن (% ۰/۷۵ نانولوله کربنی و % ۰/۷۵ نانو اکسید گرافن)، اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس / نانو اکسید گرافن (% ۰/۵ نانولوله کربنی، % ۰/۵ نانورس و % ۰/۵ نانو اکسید گرافن) مورد مطالعه قرار گرفتند. برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت نانوساختارها در زمینه اپوکسی، از همزن مکانیکی به همراه فراصوت استفاده شد. مدول یانگ، استحکام کششی نهایی، کرنش در نقطه شکست و چقرمگی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، از منحنی تنش - کرنش استخراج شد. آزمون سایش خشک نیز با استفاده از دستگاه پین روی دیسک در بارهای مختلف (۲۰ N، ۶۰ N و ۱۰۰ N) و در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تقویت رزین اپوکسی با ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی بیشترین تاثیر را بر خواص مکانیکی اپوکسی دارد. در این نمونه تنش قابل تحمل % ۱۶ و کرنش در لحظه شکست % ۲۷ نسبت به اپوکسی خالص افزایش نشان می‌دهد. همچنین، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب نانورس با نانو اکسید گرافن چقرمگی را % ۴۲ نسبت به اپوکسی خالص افزایش می‌دهد که این مقدار بیشترین افزایش نسبت به سایر نمونه‌ها است. 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 نرخ سایش در بار ۶۰ N برای نمونه حاوی % ۱/۵ نانولوله کربنی % ۸۱ و در بار ۱۰۰ N برای نمونه‌ی حاوی % ۱/۵ نانورس % ۶۰ نسبت به اپوکسی خالص کاهش از خود نشان دادند. خصوصیات مورفولوژی سطوح شکست و سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

کلمات کلیدی: بررسی تجربی، نانوکامپوزیت، اپوکسی، آزمون پین روی دیسک، آزمون تست سایش

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- S. Ranjkesh Adarmanabadi, S. M. Hosseini Farrash, M. Jafari. "Synergistic effect of nano clay, nano-graphene oxide and carbon nanotubes on the mechanical and tribological properties of crosslinked epoxy nanocomposite," (Submit).

2- S. Ranjkesh Adarmanabadi, S. M. Hosseini Farrash, M. Jafari. "Experimental study of mechanical and tribological properties of epoxy matrix reinforced with nanoclay and nano-graphene oxide," (Submit).

۳- ص. رنجکش آدرمنابادی، س. م. حسینی فراش، م. جعفری، "بررسی تجربی اثر نوع تقویت کننده نانوساختار بر خواص مکانیکی و سایشی نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی،" (در حال داوری).

۴- ص. رنجکش آدرمنابادی، س. م. حسینی فراش، م. جعفری، "مطالعه تجربی رفتار لغزش خشک فلز بر روی نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی و تعیین خواص مکانیکی آنها،" (ارسال مقاله).

فهرست مطالب

ث	فهرست جداول
ج	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: نانوکامپوزیت‌ها و پرکننده‌های نانوساختار
۱-۱-۱	مقدمه
۱-۲-۱	تاریخچه‌ی مواد کامپوزیتی
۱-۳-۱	تعریف کامپوزیت
۱-۴-۱	کامپوزیت‌ها
۱-۴-۱-۱	طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها براساس نوع زمینه
۱-۴-۱-۲	طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها براساس فاز پرکننده
۱-۵-۱	روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها
۱-۶-۱	تعریف فناوری نانو
۱-۷-۱	نانوساختار
۱-۷-۱-۱	خواص مواد نانوساختار
۱-۷-۱-۲	روش‌های تولید مواد نانوساختار
۱-۸-۱	نانوکامپوزیت‌ها
۱-۸-۱-۱	خواص نانوکامپوزیت‌ها
۱-۸-۱-۲	کاربرد نانوکامپوزیت‌ها
۱-۹-۱	روش پراکندگی پرکننده‌های نانوساختار
۱-۹-۱-۱	فراصوت

- ۱۵..... ۲-۹-۱- کلندرینگ
- ۱۶..... ۳-۹-۱- آسیای گلوله‌ای
- ۱۷..... ۴-۹-۱- همزن و اکستروژن
- ۱۸..... ۱۰-۱- کاربرد سایشی کامپوزیت‌های پایه پلیمری
- ۱۹..... ۱۱-۱- تریبولوژی
- ۲۰..... ۱۲-۱- تریبوسیستم
- ۲۱..... ۱۳-۱- سایش
- ۲۱..... ۱-۱۳-۱- انواع سایش و مکانیزم‌های آن
- ۲۵..... ۱۴-۱- اصطکاک
- ۲۶..... ۱۵-۱- آزمون سایش
- ۲۷..... ۱-۱۵-۱- انواع دستگاه‌های آزمون سایش
- ۳۲..... ۲-۱۵-۱- نحوه ارائه نتایج

فصل ۲: مروری بر تحقیقات پیشین ۳۵

- ۳۶..... ۱-۲- مقدمه
- ۳۶..... ۲-۲- بررسی مقالات منتشر شده
- ۳۷..... ۱-۲-۲- نانولوله‌های کربنی
- ۴۳..... ۲-۲-۲- نانواکسیدگرافن
- ۴۵..... ۳-۲-۲- نانورس

فصل ۳: روش انجام آزمایش‌ها ۴۷

- ۴۸..... ۱-۳- مقدمه
- ۴۸..... ۲-۳- مواد استفاده شده در ساخت نمونه‌ها
- ۴۸..... ۱-۲-۳- رزین

۴۸.....	۲-۲-۳- پرکننده‌های نانوساختار.....
۵۲.....	۳-۳- توزیع پرکننده‌های نانوساختار در رزین.....
۵۴.....	۴-۳- آزمون‌های انجام شده.....
۵۴.....	۱-۴-۳- آزمون سایش.....
۵۷.....	۲-۴-۳- آزمون کشش.....
۵۸.....	۵-۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی.....

فصل ۴: نتایج و بحث ۵۹

۶۰.....	۱-۴- مقدمه.....
۶۰.....	۲-۴- نتایج آزمون کشش نمونه‌های ساخته‌شده.....
۶۷.....	۱-۲-۴- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مقاطع شکست نمونه‌ها.....
۷۸.....	۳-۴- نتایج آزمون سایش نمونه‌های تولید شده.....
۷۹.....	۱-۳-۴- ضریب اصطکاک.....
۸۳.....	۲-۳-۴- کاهش وزن.....
۸۶.....	۳-۳-۴- نرخ سایش ویژه.....
۹۲.....	۴-۳-۴- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح سایشی.....

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۱۰۵

۱۰۶.....	۱-۵- نتیجه‌گیری.....
۱۰۷.....	۲-۵- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده.....

پیوست‌ها ۱۰۸

مراجع ۱۱۱

فهرست جداول

جدول (۱-۳) مشخصات نوع و درصد وزنی پرکننده‌های نانوساختار جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی.	۵۱
جدول (۲-۳) نامگذاری استفاده شده جهت آماده‌سازی مخلوط.	۵۱
جدول (۳-۳) شرایط آزمون در دمای محیط.	۵۶
جدول (۱-۴) خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن.	۶۲
جدول (۲-۴) کاهش وزن برحسب گرم نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن در بارهای مختلف...	۸۳
جدول (۳-۴) نرخ سایش ویژه ($\text{mm}^3/(\text{N.m})$) نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن در بارهای مختلف.	۸۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) نمایش نمونه‌های از کامپوزیت‌های پلیمری [۳]..... ۳
- شکل (۲-۱) نمایش سیستماتیک مواد کامپوزیت‌ها [۱۱]..... ۷
- شکل (۳-۱) شماتیک سنتز مواد نانوساختار به دو روش بالابه‌پایین و پایین به‌بالا [۴]..... ۱۲
- شکل (۴-۱) توزیع پرکننده‌ها نانو و میکرو در مقیاس مشابه $0/1\%$ حجمی در حجم مرجع 1mm^3 (الف) ذرات آلومینا، (ب) فیبر کربن، (ج) نانوصفحات کوچک گرافیتی، (د) نانولوله‌های کربنی [۱۶]..... ۱۴
- شکل (۵-۱) حمام آب فراصوت..... ۱۵
- شکل (۶-۱) دستگاه کلندرینگ (الف) و شماتیک عملکرد دستگاه کلندرینگ (ب) [۱۶]..... ۱۶
- شکل (۷-۱) مکانیزم آسیای گلوله‌ای [۱۶]..... ۱۷
- شکل (۸-۱) همزن برشی [۱۶]..... ۱۷
- شکل (۹-۱) نمونه‌های از پوشش‌ها و قطعات پلیمری مورد استفاده در کاربردهای سایش لغزشی [۱۱]..... ۱۸
- شکل (۱۰-۱) سطوح اجزاء در تماس و حرکت نسبی آن‌ها [۵]..... ۱۹
- شکل (۱۱-۱) تریبوسیستم متشکل از چهار عنصر اصلی: دو جسم در تماس، ماده میان سطحی و بار [۵]..... ۲۰
- شکل (۱۲-۱) نمایش شماتیک از فرآیندهای سایش منسجم و بین سطحی [۱۷]..... ۲۲
- شکل (۱۳-۱) مکانیزم‌های سایش: (الف) چسبنده، (ب) ساینده، (ج) خورنده، (د) سایش خستگی، (ه) فرسایشی، (و) سایشی، [۳]..... ۲۵
- شکل (۱۴-۱) علل اصطکاک و سایش [۳]..... ۲۶
- شکل (۱۵-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش چرخ لاستیک ماسه خشک [۱۹]..... ۲۷
- شکل (۱۶-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش پین روی درام [۱۹]..... ۲۸
- شکل (۱۷-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش خطی [۱۹]..... ۲۹
- شکل (۱۸-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش بلوک روی حلقه [۱۹]..... ۳۰
- شکل (۱۹-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش بلوک روی دیسک [۱۹]..... ۳۱
- شکل (۲۰-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک [۱۹]..... ۳۱
- شکل (۲۱-۱) الحاق دماسنج مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای نقطه اتصال [۱۹]..... ۳۳
- شکل (۱-۲) آلوتروپ‌های کربنی: (الف) گرافن، (ب) فولرن، (ج) نانولوله کربنی و (د) گرافیت [۲۱]..... ۳۷
- شکل (۲-۲) نانولوله کربنی چند جداره (الف) و نانولوله کربنی تک جداره (ب) [۲۱]..... ۳۸
- شکل (۱-۳) تصویر TEM از نانولوله‌های کربنی چند جداره..... ۴۹
- شکل (۲-۳) تصویر SEM از پودر نانوصفحات اکسید گرافن..... ۴۹

شکل (۳-۳) تصویر TEM از پودر نانوصفحات اکسید گرافن.....	۵۰
شکل (۴-۳) تصویر SEM از نانورس مونتمریلونیت.....	۵۰
شکل (۵-۳) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون حمام فراصوت.....	۵۲
شکل (۶-۳) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین بر روی همزن مغناطیسی.....	۵۲
شکل (۷-۳) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون دسیکاتور.....	۵۳
شکل (۸-۳) ماده‌سازی قالب سیلیکونی (سمت راست)، قالب سیلیکونی (سمت چپ).....	۵۳
شکل (۹-۳) قالب‌گیری نمونه‌ها.....	۵۳
شکل (۱۰-۳) قسمت‌های مختلف دستگاه آزمون سایش.....	۵۴
شکل (۱۱-۳) تصویر دستگاه اینسترون مدل ۸۸۰۲.....	۵۷
شکل (۱۲-۳) چسباندن لایه کربنی مخصوص.....	۵۸
شکل (۱۳-۳) دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثرمیدانی.....	۵۸
شکل (۱-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیتی.....	۶۰
شکل (۲-۴) مقایسه نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیتی به صورت مجزا.....	۶۲
شکل (۳-۴) مقاومت کششی نهایی نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.....	۶۳
شکل (۴-۴) کرنش شکست نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.....	۶۳
شکل (۵-۴) مدول الاستیک نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.....	۶۳
شکل (۶-۴) چقرمگی نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.....	۶۳
شکل (۷-۴) مقاومت کششی نهایی بی‌بعد شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.....	۶۶
شکل (۸-۴) کرنش شکست بی‌بعد شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.....	۶۶
شکل (۹-۴) مدول الاستیک بی‌بعد شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.....	۶۶
شکل (۱۰-۴) چقرمگی بی‌بعد شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.....	۶۶
شکل (۱۱-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی خالص.....	۶۸
شکل (۱۲-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی.....	۶۹
شکل (۱۳-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن.....	۷۱
شکل (۱۴-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانورس.....	۷۲
شکل (۱۵-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن.....	۷۴
شکل (۱۶-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس.....	۷۵
شکل (۱۷-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس.....	۷۷
شکل (۱۸-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن / نانورس.....	۷۸

شکل (۴-۱۹) ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص و نمونه‌های کامپوزیتی. ۷۹

شکل (۴-۲۰) نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص، سه کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانوساختار و ترکیب سه نوع نانوساختار. ۸۰

شکل (۴-۲۱) نمودار ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانواکسیدگرافن و اپوکسی/ نانورس/ نانواکسیدگرافن. ۸۱

شکل (۴-۲۲) نمودار ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های نانوگرافن، نانولوله کربنی و اپوکسی/ نانوگرافن/ نانولوله کربنی. ۸۱

شکل (۴-۲۳) نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های نانورس، نانولوله کربنی و ترکیب اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانورس. ۸۲

شکل (۴-۲۴) نمودار کاهش وزن اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن. ۸۳

شکل (۴-۲۵) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص، سه نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوساختار و ترکیب سه نوع نانوساختار. ۸۴

شکل (۴-۲۶) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن و اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسیدگرافن. ۸۵

شکل (۴-۲۷) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانواکسیدگرافن و اپوکسی/ نانورس/ نانواکسیدگرافن. ۸۵

شکل (۴-۲۸) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانولوله کربنی و اپوکسی/ نانورس/ نانولوله کربنی. ۸۶

شکل (۴-۲۹) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن. ۸۸

شکل (۴-۳۰) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن، نانورس و اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسیدگرافن/ نانورس. ۸۹

شکل (۴-۳۱) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن و اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسیدگرافن. ۹۰

شکل (۴-۳۲) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانورس و اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانورس. ۹۱

شکل (۴-۳۳) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانواکسیدگرافن، نانورس و اپوکسی/ نانواکسیدگرافن/ نانورس. ۹۱

شکل (۴-۳۴) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی خالص. ۹۳

شکل (۴-۳۵) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی/ نانولوله کربنی. ۹۵

شکل (۴-۳۶) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی/ نانواکسیدگرافن. ۹۶

شکل (۴-۳۷) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی/ نانورس. ۹۷

شکل (۴-۳۸) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسیدگرافن. ۹۹

- شکل (۴-۳۹) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس..... ۱۰۰
- شکل (۴-۴۰) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانورس..... ۱۰۲
- شکل (۴-۴۱) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن / نانورس..... ۱۰۳

فصل ۱: نانوکامپوزیت ها و پرکننده های نانوساختار

۱-۱- مقدمه

افزودن ذرات در مقیاس نانو در یک ماتریس پلیمری، در بسیاری از موارد باعث بهبود خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های^۱ حاصل می‌شود. با حرکت دو سطح بر روی یکدیگر سایش^۲ رخ می‌دهد؛ سایش در قطعات به علت اصطکاک^۳ بوجود می‌آید و باعث تخریب یک یا هر دو سطح در تماس و ناکارآمدی ماده می‌شود. در مواردی مانند سنباده‌زنی و پولیش‌کاری فرایند سایش جهت برداشتن کنترل شده مواد لازم است، اما سایش در بیشتر موارد باعث کاهش دقت و افزایش لقی بین قطعات متحرک، ایجاد ارتعاش، خستگی و در نهایت باعث از کار افتادن کامل دستگاه‌های بزرگ و پیچیده می‌شود. از آنجا که ماده سائیده شده دوباره قابل استفاده نیست هزینه‌های حاصل از فرایند سایش در صنعت بسیار بالاست. هرچند وجود اصطکاک در قطعاتی همچون ترمزها، کلاچ‌ها، کفشک و کاسه ترمز پدیده مطلوب و مورد نیاز است اما در بسیاری موارد جهت جلوگیری از رخ دادن سایش بایستی با روش‌های مختلف مثل روان‌کاری^۴ سطوح، اصطکاک را کم کرد. در سال‌های اخیر کربن که به‌عنوان عنصر اصلی تشکیل‌دهنده حیات در پوسته زمین به فراوانی یافت می‌شود، به‌عنوان روان‌کننده جامد در مقیاس نانو برای کاهش سایش در نظر گرفته شده‌است. نانوساختارهای کربن به دلیل استحکام مکانیکی عالی، مساحت سطح بزرگ و هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، به‌عنوان پرکننده برای تقویت زمینه‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کامپوزیت‌های که با پرکننده‌های در مقیاس نانو پر شده‌اند نسبت به کامپوزیت‌های که با ذرات در مقیاس میکرو پر شده‌اند، خصوصیات سایشی بهتری دارند؛ مقاومت در برابر اصطکاک و سایش این کامپوزیت‌ها با افزایش غلظت پرکننده افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان از پرکننده‌های چند منظوره برای تولید کامپوزیت‌های با کارایی بالا استفاده کرد که با استفاده از یک پرکننده واحد نمی‌توان به آن‌ها دست یافت [۱]. مهمترین مزیت این مواد نسبت به پرکننده‌های سنتی

¹ Composite

² Wear

³ Friction

⁴ Lubrication

بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی در غلظت‌های بسیار کم است. محدودیت اصلی که مانع استفاده از این مواد شده‌است، کمبود اطلاعات در مورد عملکرد سایشی آن‌هاست [۲]. تحقیقات در مورد خواص مکانیکی و سایش و تاثیر افزودن پرکننده‌های نانو ساختار در بهبود عملکرد سایشی ماده هنوز در مرحله نسبتاً اولیه است، از این‌رو تحقیق و بررسی دقیق‌تر در حوزه پرکننده‌های نانو ساختار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چند نمونه از کاربردهای مبتنی بر سایش پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۱) نمایش نمونه‌های از کامپوزیت‌های پلیمری [۳].

۲-۱- تاریخچه مواد کامپوزیتی

بسیاری از نیازهای صناعی مانند صنایع فضایی، راکتورسازی، الکترونیک، ساختمان‌سازی، حمل و نقل و غیره با استفاده از مواد معمولی برآورده نمی‌شود و نیاز به تغییر گسترده‌ی خواص مواد دارد، از طرف دیگر در کاربردهای مهندسی اغلب تلفیق خواص مواد، 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. در کل هدف جهانی کاهش میزان مصرف سوخت صنایع فضایی و وسایل نقلیه است، از این‌رو کاهش وزن، هزینه و زمان چرخه تولید از اهداف ضروری هستند، به همین دلایل، صنایع هوافضا و اتومبیل که در ابتدا بر پایه آلیاژهای فلزی با وزن بالا بودند، روی مواد کامپوزیتی پیشرفته متمرکز شده‌اند [۴].

چینی‌ها و مصریان از جمله تمدن‌های باستانی بودند که برای اولین بار از مخلوط کاه‌گل و شن برای افزایش استحکام گل استفاده کردند. مصریان با چسباندن لایه‌های نازک چوب و پارچه به یکدیگر با طناب، قایق‌های خود را در برابر متورم شدن در اثر نفوذ آب تقویت می‌کردند [۵].

۱-۳- تعریف کامپوزیت

تعریف کامپوزیت توسط انجمن متالوژی آمریکا: به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده مجزا که سطح مشترک مشخصی بین آن‌ها وجود داشته‌باشد، کامپوزیت گفته می‌شود [۶]. مهمترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیازها، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل کرد. به‌طور کلی مواد کامپوزیتی دارای مزایای مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن، مقاومت بالا در برابر خوردگی، خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات، خواص عایق حرارتی خوب، استحکام بالا، نسبت حجم به وزن کم، سبک بودن، هزینه کمتر و صرفه‌جویی اقتصادی هستند [۷].

۱-۴- کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها را می‌توان بر اساس نوع زمینه و پرکننده طبقه‌بندی کرد. کامپوزیت‌ها با توجه به نوع زمینه، به سه دسته‌ی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقسیم می‌شوند.

۱-۴-۱- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها براساس نوع زمینه

۱- کامپوزیت‌های پلیمری (PMC)^۱: زمینه پلیمر به‌خاطر خواص مکانیکی مناسب، قابلیت شکل‌پذیری آسان، سبکی و خواص خوب در دمای محیط، ایده‌آل محسوب می‌شود. زمینه پلیمری شامل سه دسته کلی ترموست‌ها، ترموپلاست‌ها و الاستومرها است [۴].

۲- کامپوزیت‌های فلزی (MMC)^۲: در صنایع خودروسازی از کامپوزیت‌های با بستر فلزی به‌طور گسترده استفاده می‌شود. استحکام بالا، مقاومت به شکست، سفتی و مقاومت در برابر دماهای بالا و محیط‌های خورنده، سبب برتری این کامپوزیت‌ها نسبت به انواع پلیمری می‌شود [۴].

۳- کامپوزیت‌های سرامیکی (CMC)^۳: سرامیک‌ها به داشتن پیوندهای بسیار قوی مولکولی مشهور هستند. نقطه ذوب و پایداری در دماهای بالا استحکام خوب و مقاومت در برابر خوردگی آن‌ها را به موادی مناسب برای کاربرد در دماهای بالای 1500°C تبدیل کرده است [۴].

۱-۴-۱-۱- نقش زمینه در کامپوزیت‌ها

زمینه ماده‌ای چسبنده است که به‌عنوان تکیه‌گاه و نگهدارنده فیبرها و ذرات پرکننده با محافظت از فیبرها و ذرات پرکننده در برابر عوامل محیطی تنش بین فیبرها و ذرات منفصل را منتقل می‌کند همچنین رزین بر خواصی نظیر استحکام برشی و مقاومت کششی در کامپوزیت‌ها اثرگذار است [۴].

¹ Polymer Matrix Composite

² Metal Matrix Composite

³ Ceramic Matrix Composite

۱-۴-۱-۲- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

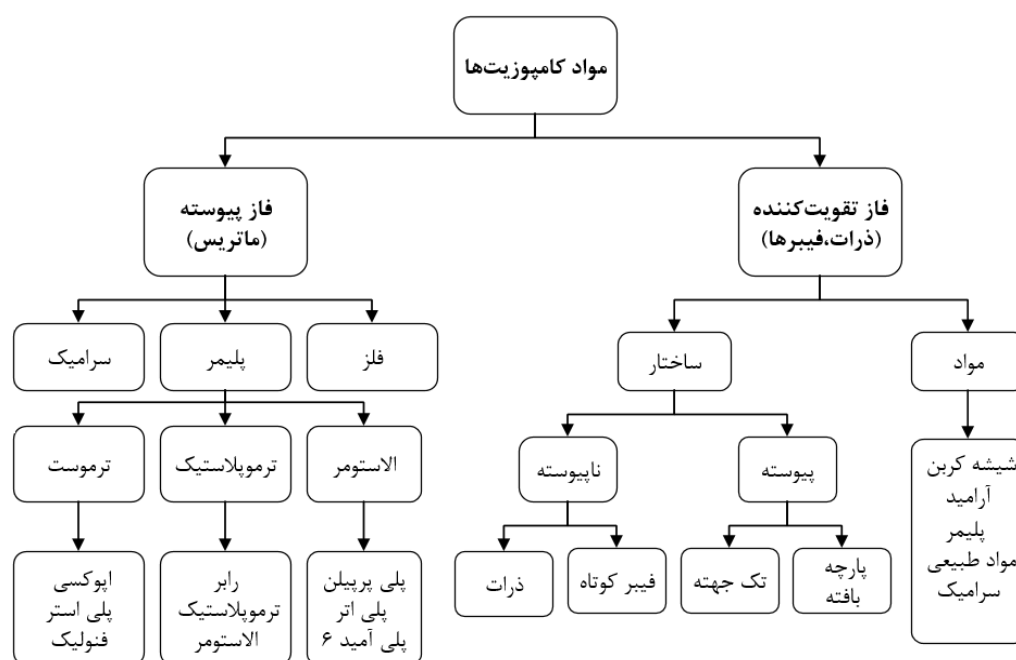
پلیمرها به دلیل خصوصیتی از قبیل خود روان کاری، اصطکاک کمتر و مقاومت به سایش بهتر در اجزای که تحت سایش قرار دارند به کار گرفته می‌شوند و کامپوزیت‌های پلیمری به عنوان جایگزین مناسب مواد فلزی، در اجزای لغزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. پلیمرها توسط گرما و تحت فشار به قطعات مفیدی مانند چرخ‌دنده‌ها، یاتاقان‌ها، بوش‌ها و غیره برای کاربردهای مهندسی تبدیل می‌شوند. پلیمرها با توجه به رفتارهای شیمیایی و تکنولوژیکی خود به دو گروه گرماسخت (ترموست) و گرمانرم (ترموپلاست) تقسیم می‌شوند. گرمانرم‌ها تحت شرایط گرمایی، نرم و تحت شرایط سرد، سخت می‌شوند. گرماسخت‌ها موادی هستند که در دمای بالا سخت می‌شوند. پلیمرهای گرماسخت نسبت به گرمانرم‌ها قوی‌تر و سفت‌تر هستند و به‌طور کلی می‌توانند در دمای بالاتر مورد استفاده قرار گیرند. گرماسخت‌ها از پایداری حرارتی و ابعادی بالا، مقاومت بالا در برابر خزش و خاصیت عایق الکتریکی و حرارتی بالایی برخوردار هستند [۹]. کامپوزیت‌های بر پایه رزین ترموست و مخصوصاً آن دسته که دارای فیبر کربن پیوسته است می‌توانند عملکرد بهتری (به عنوان مثال، نرخ سایش ویژه کمتر، استحکام بالاتر) نسبت به زمینه‌های ترموپلاستیک و تقویت‌کننده‌های فیبر کوتاه در هنگام لغزش فلزات بر روی آن‌ها در شرایط سخت ارائه‌دهند [۱۰]. با این حال، اکثر قطعات تحت اصطکاک و سایش، از سیستم‌های پلیمری تقویت‌شده ناپیوسته ساخته شده‌اند، چون اجازه می‌دهد هندسه پیچیده‌تری برای یک هدف خاص داشته باشند. شکل (۱-۲) طبقه‌بندی ماده کامپوزیت‌ها، فاز پیوسته و تقویت‌کننده را تشریح می‌کند. رفتار سایشی و اصطکاکی مواد پلیمری را می‌توان با چسبندگی پایین و استحکام بالاتر بهبود داد با استفاده از پرکننده‌های ویژه می‌توان به این هدف رسید؛ برای کاهش چسبندگی از، روان‌کننده‌های داخلی استفاده می‌شود، این روان‌کننده‌ها اجازه می‌دهند یک فیلم انتقال^۳ برای کاهش اصطکاک روی

^۱ Thermoset

^۲ Thermoplastic

^۳ Transfer film

سطح قطعه مقابل^۱ تشکیل شود. از آنجاکه اصطکاک بین دو سطح در تماس لغزشی باعث ایجاد گرما همراه با کاهش خواص مکانیکی پلیمر می‌شود، بایستی زمینه پلیمری مقاوم در برابر حرارت بالا استفاده شود. علاوه بر این، خصوصیات سایشی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری می‌تواند با استفاده از دیگر پرکننده‌های رسانای حرارتی، از جمله ذرات نانو یا نانولوله‌های کربنی تغییر یابد [۱۱].



شکل (۲-۱) نمایش سیستماتیک مواد کامپوزیت‌ها [۱۱].

۱-۴-۲-۳- مقدمه‌ای بر رزین اپوکسی و ساختار آن

رزین‌های اپوکسی^۲ در سال ۱۹۳۸ توسط یک شیمیدان سوئیسی به نام پیرکاستان^۳ 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

^۱ Counterface

^۲ Epoxy

^۳ Pierre Castan

مناسب هستند [۴]. رزین‌های اپوکسی پخت‌شده دارای خواص الکتریکی - مکانیکی مناسب، پایداری ابعادی، مقاومت شیمیایی و مقاومت گرمایی خوبی هستند [۱۲]. اگرچه اپوکسی نسبت به سایر زمینه‌های پلیمری گران‌تر است، اما محبوب‌ترین زمینه، برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. از مهمترین دلایلی که اپوکسی بیشترین استفاده در زمینه پلیمری را دارد می‌توان به استحکام بالا، نرخ جریان و ویسکوزیته پایین، نوسانات کم در طول سخت‌شدن، نرخ انقباض پایین و دسترسی به انواع مختلف اپوکسی مطابق با خصوصیات مخصوص و فراوری مورد نیاز اشاره کرد [۱۳].

۱-۴-۲-۴- مقاومت‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر حرارت

مقاوم‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر حرارت با استفاده از آلیاژسازی با پلیمرهای مقاوم گرمایی، کامپوزیت‌کردن پلیمر با استفاده از ذرات نانو، کوپلیمر^۱ شدن (عامل‌دارکردن) رزین‌های اپوکسی و استفاده از عامل پخت انجام می‌گیرد [۱۲].

۱-۴-۲-۴-۱- کامپوزیت‌کردن پلیمر با استفاده از ذرات نانو

هدف اصلی ساخت نانو کامپوزیت، رسیدن به خواص بهتر نسبت به کامپوزیت‌های معمولی است. اصلاح پلیمر با افزودنی‌های نانو بدون این که موجب تضعیف چقرمگی شود، می‌تواند سختی را بهبود دهد. همچنین این اصلاح، می‌تواند خواص نفوذپذیری را بهبود بخشد، بدون این که شفافیت را کاهش دهد یا این که مقاومت در برابر حرارت را بدون کاهش در خواص مکانیکی و رنگ افزایش دهد. از کاربردهای نانو کامپوزیت‌ها می‌توان به موشک‌های بالستیک اشاره کرد زیرا این مواد، در برابر شعله دوام قابل قبولی دارند [۱۲].

^۱ Copolymer

۱-۴-۲- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها براساس فاز پرکننده

بر اساس شکل تقویت‌کننده‌ها، کامپوزیت‌ها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

کامپوزیت‌های لایه‌ای^۱: مواد تشکیل دهنده به صورت متناوب و لایه‌ای بر روی هم قرار گرفته‌اند. این لایه‌ها از سه نوع فلزی، سرامیکی و پلیمرهای تقویت‌شده هستند و بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده قابل ساخت می‌باشند.

کامپوزیت‌های ذره‌ای^۲: از پراکنده کردن (توزیع^۳) ذرات ریز در فاز پیوسته ساخته می‌شوند.

کامپوزیت‌های لیفی: الیاف محاط‌شده در فاز پیوسته، کامپوزیت‌های لیفی را می‌سازند. از پارامترهای موثر بر تقویت‌کنندگی الیاف می‌توان طول، سطح مقطع و آرایش در فاز پیوسته را نام برد.

کامپوزیت‌های ورقه‌ای: فاز پرکننده در این کامپوزیت‌ها را، ورقه‌های مسطح تشکیل می‌دهند [۵].

۱-۴-۲-۱- اثر نانوپرکننده‌ها بر روی خصوصیات سایشی کامپوزیت‌های پلیمری

نانوکامپوزیت‌های پلیمری با استفاده از انواع پرکننده‌های نانوساختار به شرح زیر تهیه می‌شوند:

۱. کربن‌ها: فلورن، نانولوله‌های تک‌جداره^۴ و چند جداره^۵، نانوالماس‌ها^۶، نانوفیبرها^۷ و نانوباندها^۸

۲. سرامیک‌ها

¹ Layers

² Particulate

³ Distribution

⁴ Nanofillers

⁵ Single-walled nanotubes

⁶ Multi-walled nanotubes

⁷ Nanodiamond

⁸ Nanofiber

⁹ Nanoband

۳. مواد مرکب فلزی آلی^۱

۴. پلیمرها: پلیمرهای بلورین- مایع [۵].

تحقیقات زیادی ثابت کرده که با افزودن مقدار کمی از نانوپرکننده‌ها به اندازه یک دهم درصد غلظت به مقدار قابل توجهی خصوصیات مکانیکی بهبود می‌یابد [۱۴]. اگر پرکننده‌های نانوساختار در ناحیه اصطکاکی قرار بگیرند می‌توانند عملکرد روان کاری، شبیه روان کارهای جامدی مثل گرافیت داشته باشند که بر روی سطوح اصطکاکی مثل غلتک‌های کوچک عمل می‌کنند. بنابراین تغییر اصطکاک لغزشی به اصطکاک غلتکی روی محل تماس مشاهده می‌شود [۵].

۱-۵- روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها

مواد اولیه جهت ساخت کامپوزیت‌ها دارای ویژگی‌های منحصر بفردی چون استحکام، مقاومت حرارتی، سختی، سفتی، چقرمگی و غیره هستند. خواص ویژه‌ی یک ماده کامپوزیتی علاوه بر خواص ویژه‌ی مواد اولیه تابعی از نحوه طراحی، نحوه استفاده و روش تولید نیز است. از روش‌های متداول تولید مواد کامپوزیتی می‌توان به لایه‌گذاری دستی^۲، لایه‌گذاری پاششی^۳، رشته پیچی^۴، نفوذ ورقه رزین^۵، قالب‌گیری با انتقال رزین^۶، قالب‌گیری با کیسه خلاء^۷، قالب‌گیری حرارتی^۸ اشاره کرد [۴].

^۱ Organic

^۲ Hand Lay-up

^۳ Spray-up

^۴ Filament Winding

^۵ Resin Film Infusion (RFI)

^۶ Resin Transfer (RTM)

^۷ Vacuum Bag Molding

^۸ Sheet Molding Compound (SMC)

۱-۶- تعریف فناوری نانو

علم نانو مطالعه مطالبی است که برخی از خصوصیات مهم آن به یک ساختار داخلی با حداقل یک بعد کمتر از ۱۰۰ nm نسبت داده می‌شود. دانش نانو در درجه اول به سنتز، توصیف، اکتشاف و بهره برداری از مواد نانوساختار شده می‌پردازد. فناوری نانو دستکاری ماده برای استفاده در کاربردهای خاص از طریق برخی فرآیندهای شیمیایی و/یا فیزیکی برای ایجاد موادی با خواص خاص است [۴].

۱-۷- نانوساختار

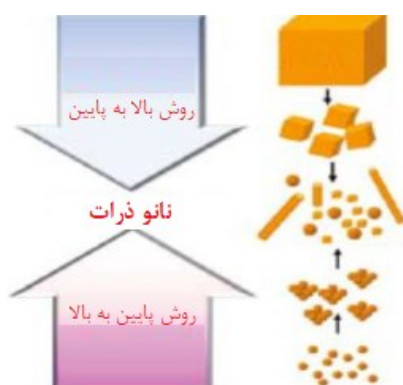
مواد نانوساختارها، موادی با ابعاد کوچک هستند که شامل واحدهای ساختمانی با اندازه زیر میکرون یا مقیاس نانو حداقل در یک جهت هستند. مواد نانوساختار را می‌توان بر اساس میزان نانومواد، ابعاد، ماده ای که ساخته شده اند و روش سنتز طبقه بندی کرد [۴].

۱-۷-۱- خواص مواد نانوساختار

به دلیل وجود دانه‌های بسیار ریز در مواد نانوکریستال و همچنین قرار گرفتن کسر بالایی از اتم‌ها در مرز دانه خواص مکانیکی، خواص الاستیک و خواص پلاستیک این مواد در مقایسه با سازه درشت‌تر دانه همین مواد متفاوت و در بیشتر موارد خواص بهتری نشان می‌دهند [۱۵].

۱-۷-۲- روش‌های تولید مواد نانوساختار

روش‌های مختلفی جهت تولید مواد نانوساختار وجود دارد، از جمله آن‌ها می‌توان به آسیاکاری مکانیکی^۱، کریستالیزاسیون^۲، جامدات آمورف^۳ و تغییر شکل پلاستیکی شدید اشاره کرد. برای رسیدن به مقیاس نانو مطابق شکل (۱-۳)، دو روش کاهش ابعاد از بالا به پایین^۴ و افزایش ابعاد از پایین به بالا^۵ وجود دارد، دیگر روش‌ها به صورت زیرمجموعه‌ای از روش‌های ذکر شده یا تلفیقی از این دو روش در نظر گرفته می‌شود. رویکرد پایین برای سنتز پرکننده‌های نانوساختار به تکنیک فاز گاز و فاز مایع تقسیم می‌شود در حالی که فرایند بالا به پایین روند جامد یا فرآیند مکانیکی است [۴].



شکل (۱-۳) شماتیک سنتز مواد نانوساختار به دو روش بالا به پایین و پایین به بالا [۴].

۱-۸- نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها از دو یا چند بخش مجزا از هم که یک یا چند جزء آن کوچک‌تر از ۱۰۰ nm است تشکیل شده‌اند. توزیع مواد تقویت‌کننده درون یک ماده زمینه بر خصوصیات نظیر استحکام و سختی

¹ Mechanical milling

² Crystallization

³ Amorphous

⁴ Top - down

⁵ Bottom - up

تاثیر می‌گذارد. ماده زمینه نیز با جدا کردن ذرات پرکننده رشد ترک را به تاخیر می‌اندازد. اجزاء نانوکامپوزیت‌ها بر اثر برهم‌کنش سطحی بین ماده‌ی زمینه و مواد پرکننده از خواص بهتری برخوردار می‌شوند [۷].

۱-۸-۱- خواص نانوکامپوزیت‌ها

پایداری حرارتی و ابعادی، انتقال حرارتی بالا، مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن، مقاومت بالا در برابر خوردگی، خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات، خواص عایق حرارتی خوب، ضد احتراق بودن، استحکام بالا، نسبت حجم به وزن کم، قابلیت بازیافت و سبک بودن از خواص این مواد می‌باشند [۷].

۱-۸-۲- کاربرد نانوکامپوزیت‌ها

از نانوکامپوزیت‌ها در ساخت صنایع خودرو، صنایع هوافضا، صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، پلاستیک‌های رسانا، روکش ضد سایش و خوردگی استفاده می‌شود [۷].

۱-۹- روش پراکندگی پرکننده‌های نانوساختار

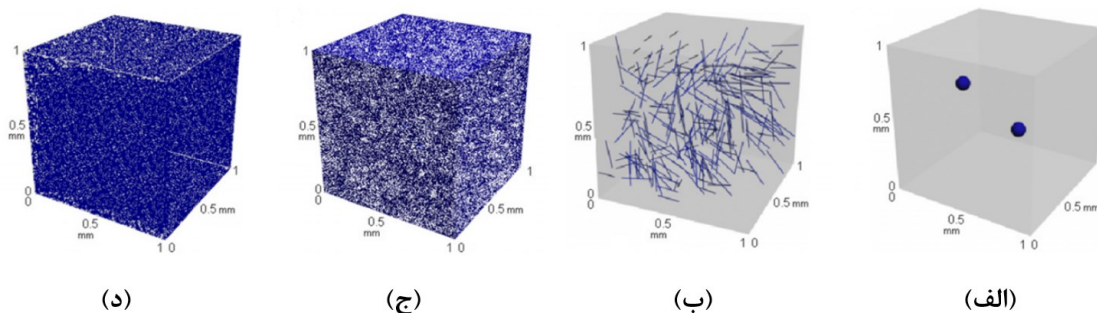
همان‌طور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده‌است اندازه پرکننده‌ها و ماهیت فیزیکی ذرات در پراکندگی آن‌ها در زمینه پلیمری نقش مهمی دارد. پراکندگی یکنواخت نانوذرات با استفاده از انواع مختلفی از روش‌های مکانیکی، از جمله فراصوت^۱، کلندرینگ^۲ (یا دستگاه سه غلتک)، آسیای گلوله‌ای^۳، همزن و

^۱ Ultrasonication

^۲ Calendering

^۳ Ball Milling

اکستروژن^۱ حاصل می‌شود. انتخاب یک روش مناسب یا ترکیبی از چندین روش و همچنین شرایط عملکرد آن‌ها باید براساس ویژگی‌های مطلوب محصولات نهایی باشد زیرا استفاده از این روش‌ها باعث آسیب مکانیکی پرکننده‌های نانوساختار و شکستگی آن‌ها به قطعات کوچکتر می‌شود [۱۶].



شکل (۱-۴) توزیع پرکننده‌ها نانو و میکرو در مقیاس مشابه ۱٪/۰ حجمی در حجم مرجع 1 mm^3 (الف) ذرات آلومینا، (ب) فیبر کربن، (ج) نانوصفحات کوچک گرافیتی، (د) نانولوله‌های کربنی [۱۶].

۱-۹-۱- فراصوت

فراصوت عمل استفاده از انرژی فراصوت^۲ برای تحریک ذرات در محلول برای اهداف مختلف است. در آزمایشگاه‌ها، معمولاً با استفاده از حمام فراصوت^۳ یا پروب/شاخک فراصوت^۴، شکل (۱-۵)، این اهداف حاصل می‌شوند. فراصوت یک روش مؤثر برای پراکندگی پرکننده‌های نانوساختار در مایعات دارای ویسکوزیته پایین، مانند آب، استون و اتانول است. برای پرکننده‌های نانوساختار پراکنده شده در

^۱ Stir and Extrusion

^۲ Ultrasound

^۳ Ultrasonic Bath

^۴ Ultrasonic Probe/ Horn

حلال‌های فرار، مانند اتانول و استون، نمونه‌ها باید سرد نگه داشته‌شوند (به‌عنوان مثال با استفاده از حمام یخ) و فراصوت باید در فواصل کوتاه انجام شود [۱۶].

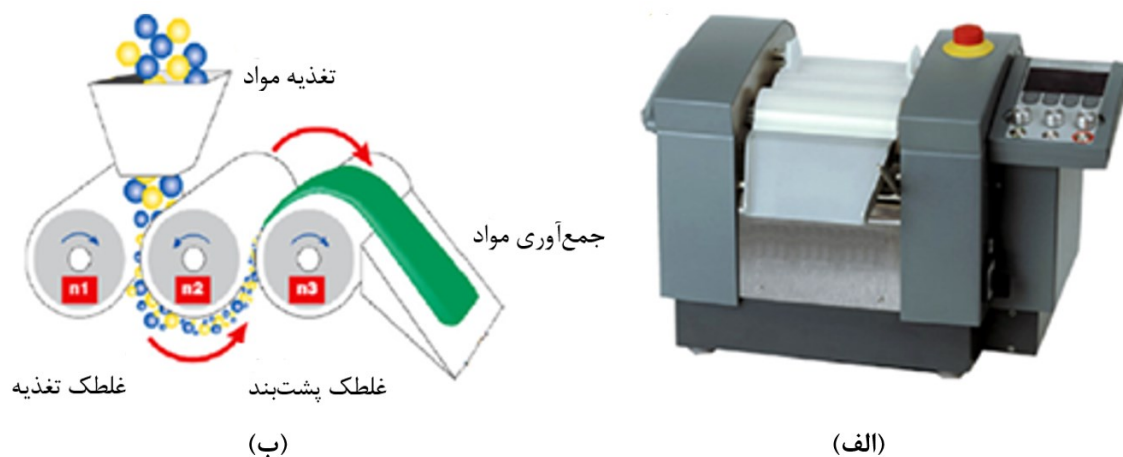


شکل (۵-۱) حمام آب فراصوت.

۱-۹-۲- کلندرینگ

کلندرینگ یا سه میل غلتک، وسیله‌ای است که از نیروی برشی ایجاد شده توسط غلتک برای مخلوط کردن، پراکندگی یا همگن‌سازی مواد چسبناک استفاده می‌کند. پیکربندی کلی دستگاه کلندرینگ شامل سه غلتک استوانه‌ای مجاور است که هر کدام با سرعت متفاوت می‌غلتند (شکل (۱-۶-الف)). غلتک‌های اول و سوم، به نام غلتک‌های تغذیه و پشت‌بند (n_1 و n_3 در شکل (۱-۶-ب))، در یک جهت می‌چرخند در حالی که غلتک مرکزی در جهت مخالف می‌چرخد. ماده‌ای که باید مخلوط شود درون قیف تغذیه می‌شود؛ هنگام پراکندگی، مواد به پایین غلتک مرکزی می‌چسبند، که آن‌را به شکاف دوم منتقل می‌کند، در این فاصله، مواد در حد مطلوب با ظرافت پراکنده می‌شوند. به محض خارج شدن، ماده‌ای که روی غلتک مرکزی باقی‌مانده است، از طریق میله دوم بین غلتک مرکزی و غلتک پشت‌بند حرکت می‌کند. سپس یک تیغه مواد پردازش شده را از غلتک پشت‌بند جدا می‌کند و آن‌را به پیش‌بند منتقل می‌کند. این چرخه چندین بار می‌تواند تکرار شود تا پراکندگی به حداکثر برسد. یکی از مزایای

منحصر به فرد این تکنیک این است که می‌توان عرض شکاف بین غلتک‌ها را به صورت مکانیکی یا هیدرولیکی تنظیم و نگهداری کرد، بنابراین به راحتی می‌توان توزیع مواد قابل کنترل و باریک، از ذرات را در مواد چسبناک به دست آورد. در بعضی از عملیات‌ها می‌توان عرض شکاف‌ها را به تدریج کاهش داد تا به سطح مطلوب پراکندگی ذرات برسیم [۱۶].



شکل (۱-۶) دستگاه کلندرینگ (الف) و شماتیک عملکرد دستگاه کلندرینگ (ب) [۱۶].

۱-۹-۳- آسیای گلوله‌ای

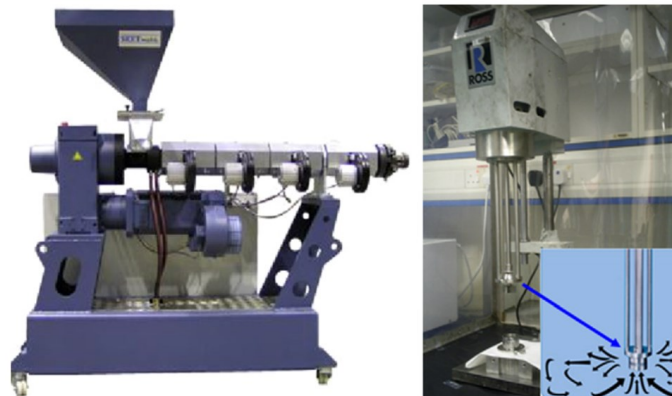
آسیای گلوله‌ای نوعی روش سنگ‌زنی است که برای خرد کردن مواد جهت استفاده در رنگ‌ها، مواد شیمیایی و سرامیک استفاده می‌شود (شکل (۱-۷)). از مواد مختلفی مثل سرامیک، سنگ‌ریزه و استیل ضد زنگ به عنوان گلوله استفاده می‌شود. آسیاهای گلوله‌ای با کیفیت بالا می‌توانند ذرات مخلوط را به اندازه 100 nm تولید کنند و سطح مواد را به شدت افزایش دهند [۱۶].



شکل (۷-۱) مکانیزم آسیای گلوله‌ای [۱۶].

۴-۹-۱- همزن و اکستروژن

همزن یک روش معمول برای پراکندگی ذرات در سیستم‌های مایع است و می‌تواند برای پراکندگی نانولوله‌های کربنی در یک زمینه پلیمری نیز مورد استفاده قرار گیرد (شکل (۸-۱)). اندازه و شکل پروانه و سرعت اختلاط، نتایج پراکندگی را کنترل می‌کند. پس از هم‌زدن شدید نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری، پراکندگی نسبتاً خوبی حاصل می‌شود. با استفاده از این روش، نانولوله‌های کربنی چند جداره راحت‌تر از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره پراکنده می‌شوند، اگرچه نانولوله‌های کربنی چند جداره تمایل به تجمع مجدد دارند. برای برخی از پلیمرهای ترموست، مانند اپوکسی، تجمع واضح دوباره نانولوله‌های کربنی پس از چند ساعت واکنش پخت مشاهده شده‌است [۱۶].



شکل (۸-۱) همزن برشی [۱۶].

۱-۱۰- کاربرد سایشی کامپوزیت‌های پایه پلیمری

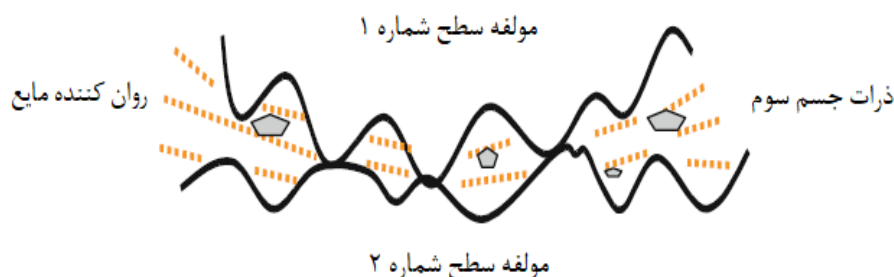
استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری برای کاربردهای سایشی بسیار گسترده است. کاربرد خاص قطعات، تعیین‌کننده نحوه طراحی دقیق مواد است. به این معنا که ضریب اصطکاک و مقاومت در برابر سایش از خواص واقعی مواد نیست بلکه از خصوصیات سیستم است و به سیستمی که قطعه در آن کار می‌کند بستگی دارد. به‌طور کلی لغزش باعث سایش می‌شود و اغلب مواد باید برای اصطکاک و سایش پایین طراحی شوند مانند موادی که در ساخت چرخ‌دنده‌ها و یا بلبرینگ‌ها استفاده می‌شود، اما گاهی اوقات ضریب اصطکاک بالا همراه با مقاومت در برابر سایش کم مورد نیاز است مانند لنت‌های خودرو یا کلاچ‌ها [۱۱]. عملکرد سایشی مواد پلیمری به عوامل مختلفی از جمله مکانیزم سایش درگیر، روش آزمون، ساینده مورد استفاده، خصوصیات حجم و سطح نمونه‌های آزمایش شده بستگی دارد [۱۷]. شکل (۱-۹) نمونه‌های از پوشش‌های پلیمری و قطعات کامپوزیتی مورد استفاده در کاربردهای سایش لغزشی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۹) نمونه‌های از پوشش‌ها و قطعات پلیمری مورد استفاده در کاربردهای سایش لغزشی [۱۱].

۱۱-۱- تریبولوژی

سوده‌شناسی یا تریبولوژی^۱، دانش بررسی برهم‌کنش سطح و حرکت است. اصطلاح تریبولوژی از واژه یونانی تریبوس^۲ گرفته شده است که به معنی سایش است. سطوح ذکر شده در اینجا اجزای متقابلی هستند که می‌توانند به‌طور طبیعی وجود داشته باشند یا ساخته شوند. نمونه‌هایی از قبیل تماس قلم و کاغذ در هنگام نوشتن، بین کفش و زمین هنگام راه رفتن، بین چرخ و شافت آن، بین دو دندانه‌ی چرخ‌دنده‌های درگیر و بسیاری از مفصل‌ها در بدن انسان در این دسته قرار می‌گیرند. سیستمی که حاوی چنین سطوحی است به‌عنوان یک سیستم تریبولوژیکی^۳ نامیده می‌شود و یک جفت سطح متقابل و همچنین واسطه‌های موجود در بین آن‌ها، غالباً سطح مشترک تریبولوژیکی^۴ نامیده می‌شود. از طرف دیگر، اگرچه زمین و خورشید در یک حرکت نسبی قرار دارند، اما از آنجا که در تماس فیزیکی با یکدیگر نیستند بنابر این یک سیستم تریبولوژیکی بشمار نمی‌آیند. شماتیکی از یک رابطه تریبولوژیکی در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است. پروفیسور چنگ، پنج عامل را برای توصیف چنین سیستمی پیشنهاد کرد: هندسه اجزاء، ماهیت زبری سطوح، شرایط عملیاتی و محیط، روان‌کاری و روان‌کننده (جامد، مایع یا گاز) و مواد [۵].



شکل (۱-۱۰) سطوح اجزاء در تماس و حرکت نسبی آن‌ها [۵].

¹ Tribology

² Tribos

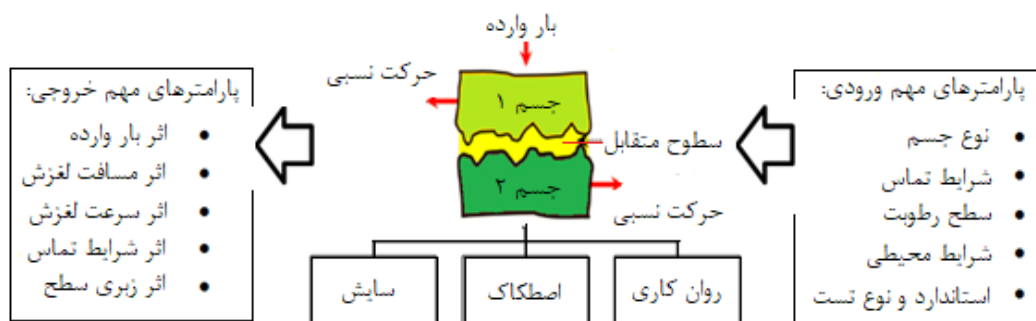
³ Tribological System

⁴ Tribological Interface

از نظر تریبولوژیکی، مهمترین مزایای نانوکامپوزیت‌های پلیمری نسبت به کامپوزیت‌های با اندازه ذرات میکرو، حذف کمتر مواد و اتصال بهتر بین نانوپرکننده و زمینه است. علاوه بر تأثیر مستقیم بر عملکرد تریبولوژیکی کامپوزیت‌ها، نانوافزودنی‌ها به‌طور غیرمستقیم با تغییر در بلورینگی، ریز ساختار، انتقال شیشه و کاهش دما و سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی زمینه پلیمری تأثیر می‌گذارند [۱۸].

۱۲-۱- تریبوسیستم

یک سیستم تریبولوژیکی، یا تریبوسیستم^۱ شامل کلیه مؤلفه‌های اساسی است که به تنش‌های تریبولوژیکی، خصوصیات آن‌ها و تغییرات تحت بارگذاری و همچنین کلیه مشخصات مکانیزم‌ها و بزرگی آن‌ها کمک می‌کند. به زبان ساده یک سیستم مهندسی است که در آن سایش رخ می‌دهد. هر تریبوسیستم ورودی‌ها و خروجی‌هایی دارد که در شکل (۱-۱۱) آمده است [۵].



شکل (۱-۱۱) تریبوسیستم متشکل از چهار عنصر اصلی: دو جسم در تماس، ماده میان سطحی و بار [۵].

^۱ Tribosystem

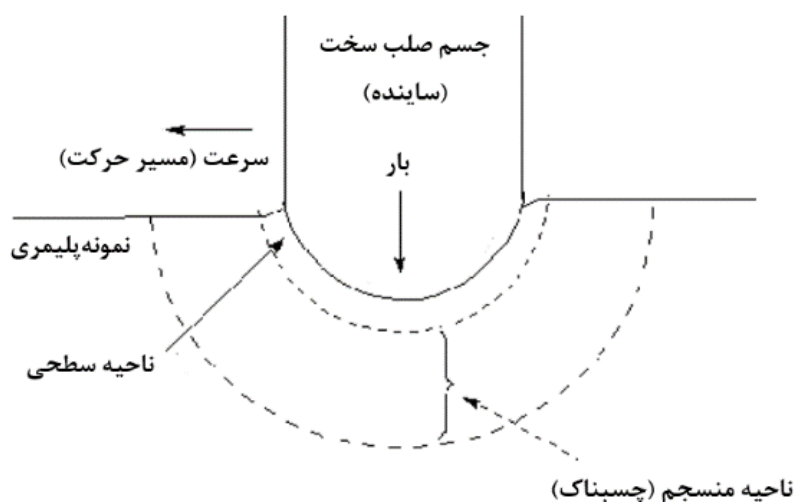
۱-۱۳- سایش

سایش در استاندارد DIN 50320 آلمان به عنوان کاهش جرم پیش‌رونده^۱ از سطح جامد در اثر فعالیت مکانیکی و حرکت نسبی در مقابل جسم جامد، مایع یا گاز تعریف شده است. سایش معمولاً آسیب ناشی از مالش اجسام به دلیل کاربردهای مکرر مکانیکی، ضربه و انواع دیگر نیروها است. بنابراین سطح انسجام مکانیکی خود را از دست می‌دهد و بقایایی تشکیل می‌شود که از ناحیه تماس خارج می‌شود [۱۸]. سایش بر خلاف ضریب الاستیسیته و سختی یک خاصیت ذاتی ماده نیست و بستگی به تریبوسیستم از جمله سرعت، زمان، دما و نیرو دارد. همچنین عواملی مانند دقت ابعادی قطعات، اندازه دانه‌ها و ساختمان کریستالی نیز می‌تواند بر رفتار سایش و میزان اصطکاک مواد اثر بگذارند. سایش همانند خزش و خستگی باعث تخریب و ناکارآمدی ماده پس از یک مدت زمانی است. اما تفاوت سایش در این است که ماده دوباره قابل استفاده نیست و از این‌رو هزینه‌های مرتبط با سایش در صنعت بالاست [۲].

۱-۱۳-۱- انواع سایش و مکانیزم‌های آن

به‌طور کلی دو مکانیزم بسیار متفاوت سایش در پلیمرها وجود دارد، سایش منسجم (دو جسمی) و بین سطحی (سه جسمی)، که به‌صورت شماتیک در شکل (۱-۱۲) نشان داده شده است [۱۷].

¹ Progressive



شکل (۱۲-۱) نمایش شماتیک از فرآیندهای سایش منسجم و بین سطحی [۱۷].

۱-۱۳-۱-۱- سایش خراشان^۱ (ساینده)

در سایش ساینده^۲، که با به وجود آمدن خراش روی سطح ایجاد می‌شود یک سطح سخت و زبر در برابر یک سطح نرم‌تر حرکت لغزشی دارد و در آن فرورفتگی و شیار ایجاد می‌نماید. این مکانیزم باعث کاهش وزن نمونه نرم می‌شود. این سایش دو نوع است:

الف) دو جسمی: دو جسم به صورت مستقیم و بدون واسطه با هم در تماس هستند.

ب) سه جسمی: هنگامی که یک ذره ساینده در فصل مشترک دو سطح در حال لغزش قرار بگیرد و از هر دو سطح ذراتی را جدا سازد سایش سه جسمی رخ می‌دهد. این سایش به عوامل مختلفی مثل سختی مواد در تماس، بار اعمال شده و مسافت لغزش و هندسه ذرات ساینده بستگی دارد [۱۸].

^۱ Scratch wear

^۲ Abrasion wear

۱-۱۳-۲- سایش چسبان^۱

سطوح قطعاتی که توسط فرآورده‌های مختلف تولید می‌شوند کاملاً صاف نبوده بنابر این درگیری قطعات با یکدیگر، در نقاط خاصی صورت می‌گیرد و تنش‌های زیادی در آن قسمت‌ها ایجاد می‌کند که موجب تغییر شکل پلاستیک و ایجاد اتصالات موضعی می‌شود. سایش چسبان موقعی رخ می‌دهد که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصال و نهایتاً انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر شود. گسیختگی اتصالات در فصل مشترک و یا در حالت حادثر در عمقی از محل اتصال به‌طور مداوم صورت می‌گیرد [۱۸].

۱-۱۳-۳- سایش ورقه‌ای^۲

تئوری لایه‌لایه شدن برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ معرفی شد در این سایش سطح ماده به‌صورت لایه‌لایه در نظر گرفته می‌شود که در فرآیند سایش به‌صورت پوسته‌پوسته جدا خواهد شد. در این نوع سایش تغییر شکل پلاستیکی برشی، جوانه‌زنی و رشد ترک در عمق کوتاهی از سطح ایجاد می‌شود که در نهایت به جدا شدن ورقه‌ای می‌انجامد. ورقه‌ای شدن به‌علت تجمع نابجایی‌ها در زیر سطح و توزیع تنش‌های فشاری در سطح رخ می‌دهد اگرچه سایش لایه‌لایه شدن بیشتر در فلزات و سرامیک‌ها مشاهده می‌شود، اما توسط بسیاری از محققان در پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری نیز گزارش شده است [۱۸].

¹ Adhesive wear

² Delamination Wear

۱-۱۳-۴- سایش نوسانی^۱

سایش نوسانی هنگامی اتفاق می‌افتد که دو سطح در حال تماس، تحت بارهای اعمالی، حرکت نوسانی با دامنه کم داشته باشند و لغزش به واسطه تنش‌های ارتعاشی یا سیکلی ایجاد گردد [۱۸].

۱-۱۳-۵- سایش تریبوشیمی^۲

سایش تریبوشیمی از شاخص‌های دو سطح در تماس با یکدیگر است که با محیط مجاور خود واکنش می‌دهد؛ محیط می‌تواند مایع یا گاز باشد. معمولاً این لایه‌ها می‌توانند اکسیدی باشند [۱۸].

۱-۱۳-۶- سایش خستگی سطحی^۳

سایش خستگی ناشی از پدیده‌های خستگی سطحی است و از تنش‌های مکرر و ناخواسته ناشی می‌شود. این سایش را می‌توان با تشکیل ترک و جدا شدن ماده از سطح به علت اعمال نیروهای متناوب تکراری شناسایی کرد. تماس چرخشی، لغزشی چرخشی و همچنین تماس ضربه‌ای متناوب می‌تواند تنش‌های سیکلی را در سطح پدید آورد [۱۸].

۱-۱۳-۷- سایش انتقال

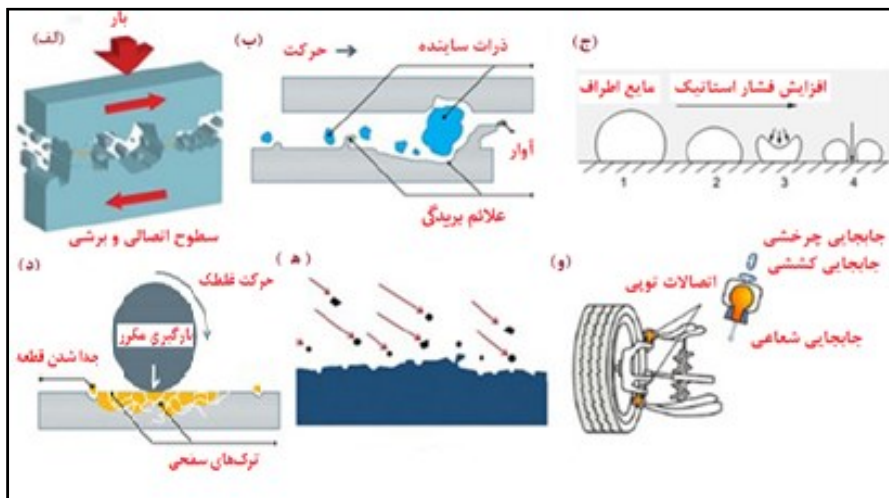
سایش انتقال متعلق به فرآیندهای سایش سطحی است و شامل تشکیل یک فیلم انتقال در تماس‌های لغزشی پلیمری - فلزی، پلیمری - سرامیکی و پلیمری - پلیمری است. فیلم انتقال از پلیمر به فلز یا سرامیک منتقل می‌شود، اما جهت انتقال در مورد تماس‌های لغزشی پلیمری - پلیمری واضح نیست.

¹ Fretting Wear

² Tribochemical Wear

³ Surface Fatigue Wear

چندین پارامتر می‌تواند در شکل‌گیری فیلم انتقال و نقش آن در فرآیندهای سایش بعدی تأثیر بگذارد: ضخامت و پایداری فیلم انتقال، نیروهای چسبندگی بین فیلم و قطعه مقابل لغزشی، واکنش شیمیایی و زبری سطح لغزنده مقابل، ساختار پلیمری (تبلور، انعطاف‌پذیری)، شرایط لغزشی (دما، بار طبیعی، جو، سرعت) و حضور پرکننده‌ها، از جمله پارامترهای تاثیرگذار هستند. شکل (۱-۱۳) انواع مکانیزم‌های سایش را نشان می‌دهد [۱۸].

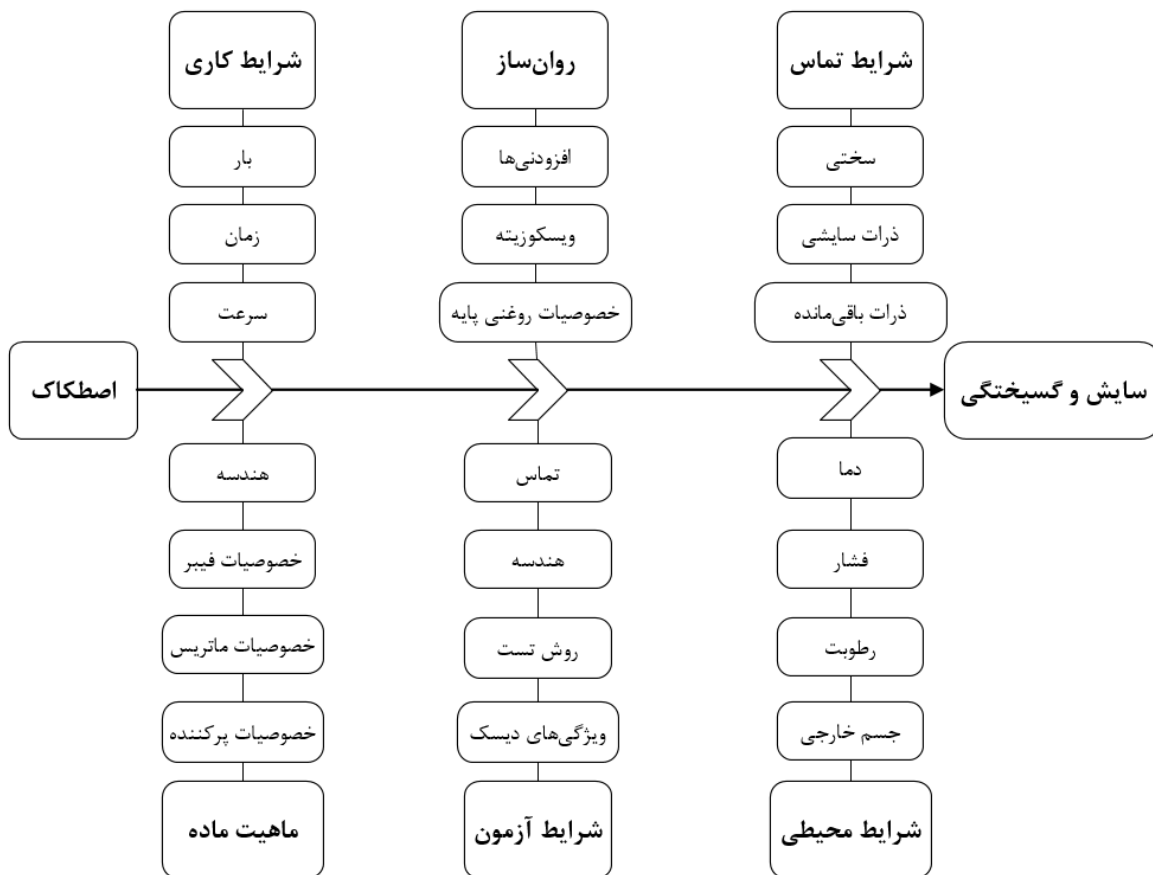


شکل (۱-۱۳) مکانیزم‌های سایش: (الف) چسبنده، (ب) ساینده، (ج) خورنده، (د) سایش خستگی، (ه) فرسایشی، (و) سایشی، [۳].

۱-۱۴- اصطکاک

اصطکاک بین دو سطحی که نسبت به یکدیگر دارای حرکت نسبی هستند به‌وجود می‌آید و باعث اتلاف انرژی، تغییرشکل دائمی و سایش دو قطعه در تماس با یکدیگر می‌شود. شرایط کاری، ماهیت مواد، روان‌کننده‌ها و شرایط محیطی برخی از موارد مهمی است که در رابطه با سایش مورد توجه قرار می‌گیرد. دلایل مختلف اصطکاک و سایش در شکل (۱-۱۴) نشان داده شده است. بسیاری از قطعات مهندسی مانند کفشک ترمز، یاتاقان، شفت و غیره به‌دلیل انواع مختلف بار در حین حرکت در معرض اصطکاک و سایش قرار می‌گیرند [۳]. خصوصیات تریبولوژیکی با استفاده از دو عامل، ضریب اصطکاک و میزان

سایش اندازه‌گیری می‌شود. اکثر کارهای تحقیقاتی، تغییرات این دو عامل را مورد توجه قرار داده‌اند. به‌طور کلی، در طول فرایند اصطکاک و سایش، گرمای اصطکاک باعث می‌شود مواد پلیمری نرم شوند، که ممکن است اصطکاک و سایش مواد را افزایش دهد. بنابراین، پایداری حرارتی بالای نانومواد برای خواص عالی تریبولوژیکی مناسب است [۳].



شکل (۱۴-۱) علل اصطکاک و سایش [۳].

۱۵-۱- آزمون سایش

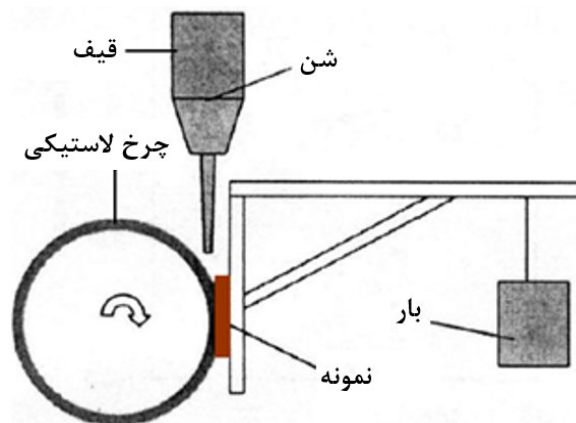
برای انجام آزمون سایش، باید با در نظر گرفتن پارامترهای واقعی از آزمون سایش متناسب استفاده شود. نمونه‌هایی از این پارامترها عبارتند از جنس قطعه ساینده، سرعت لغزش، مسافت لغزش، بارهای اعمال‌شده و شرایط محیطی.

۱-۱۵-۱- انواع دستگاه‌های آزمون سایش

انواع مختلفی از ماشین‌های آزمون سایش وجود دارد، که بر اساس عملکرد آزمون، با یکدیگر متفاوت هستند.

۱-۱۵-۱-۱- دستگاه آزمون سایش چرخ لاستیک ماسه خشک^۱

این دستگاه بر اساس استاندارد ASTM G65 ساخته شده است. شماتیک آن در شکل (۱-۱۵) نشان داده شده است. در این نوع دستگاه، چرخ لاستیکی هنگام اعمال بار در تماس با نمونه است، ذرات شن با سرعت مشخصی به منطقه ساییده شدن در طول آزمایش ریخته می‌شوند. سرعت جریان را می‌توان بر اساس قطر خروجی قیف شن تغییر داد. اگر ذرات شامل شن و ماسه باشد، آزمایش ساینده است، در صورت عدم استفاده از شن، آزمایش چسبنده است. از این آزمون برای آزمون عملکرد سایش آج لاستیک‌ها، بوش‌ها، بلبرینگ‌ها و غلتک‌ها استفاده می‌شود [۱۹].

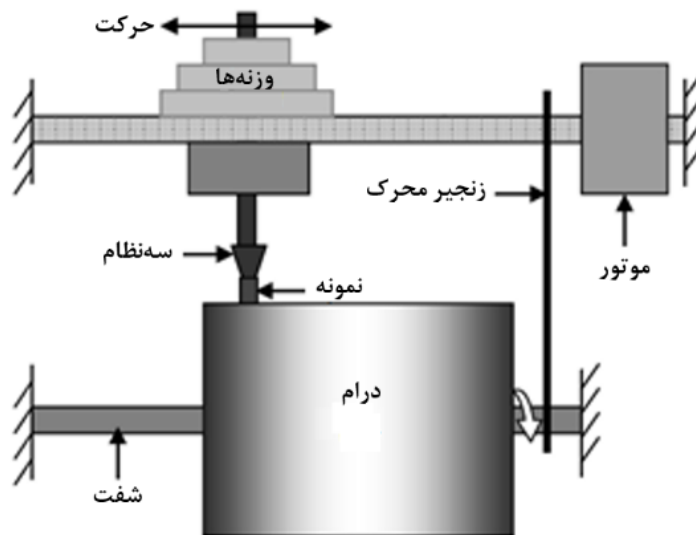


شکل (۱-۱۵) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش چرخ لاستیک ماسه خشک [۱۹].

^۱ Dry sand rubber wheel wear test rig

۱-۱۵-۲- دستگاه آزمون سایش پین روی درام^۱

این دستگاه بر اساس استاندارد ASTM A514 ساخته شده است (شکل (۱-۱۶)). در این دستگاه نمونه به صورت خطی حرکت می کند در حالی که درام با کمک زنجیر محرک با سرعت دلخواه می چرخد. سرعت نمونه و درام را می توان با استفاده از کنترلر سرعت در سیستم موتور کنترل کرد. اگر درام با کاغذ ساینده درجات مختلف پوشانده شود، آزمایش ساینده است، و اگر بدون کاغذ ساینده باشد، آزمایش چسبنده است. درام می تواند از مواد مختلف بر اساس شبیه سازی شرایط زمان واقعی باشد. کاربرد این آزمون برای آزمون قطعات لغزنده بر روی غلتک های چرخشی یا نوار نقاله است [۱۹].



شکل (۱-۱۶) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش پین روی درام [۱۹].

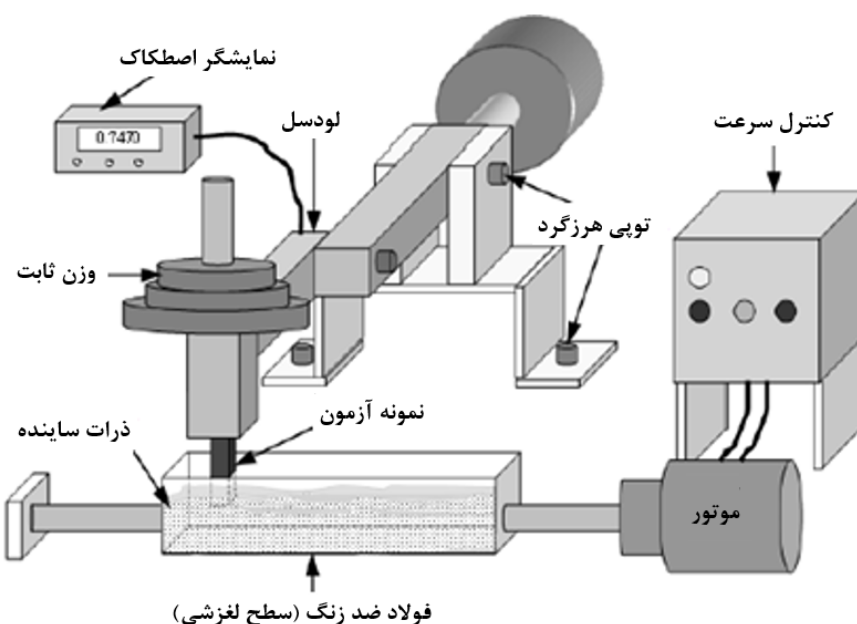
۱-۱۵-۳- دستگاه آزمون سایش خطی^۲

نمای شماتیک دستگاه تریبو خطی در شکل (۱-۱۷) نشان داده شده است. ساینده ی استیل ضدزنگ آن به کمک پیچ قدرت که مستقیماً به موتور وصل می شود به صورت خطی حرکت می کند. هنگامی که

^۱ Pin on drum wear test rig

^۲ Linear tribo machine

ظرف فولاد ضدزنگ با ذرات ساینده پر شود، آزمایش می‌تواند ساینده باشد، در غیر این صورت آزمون کاملاً چسبنده است. قطعه ساینده می‌تواند از نظر مواد مختلف، برای شرایط آزمایش مختلف باشد. برای آزمایش چسبنده، می‌توان به‌منظور شبیه‌سازی سایش در شرایط تماس مرطوب در داخل ظرف لغزشی آب ریخت. استفاده از آزمون دستگاه سایش خطی، برای آزمون شرایط پانل‌های پنجره، درها، لولا و کشوها مناسب است [۱۹].



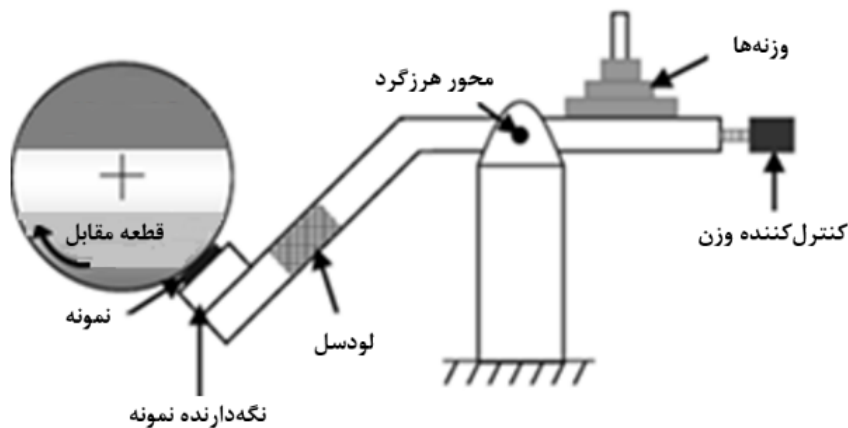
شکل (۱۷-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش خطی [۱۹].

۱-۱۵-۴- دستگاه آزمون سایش بلوک روی حلقه^۱

نمای شماتیک از یک دستگاه آزمون سایش بلوک روی حلقه در شکل (۱۸-۱) ارائه شده است. این دستگاه مطابق با استانداردهای ASTM G77 و G137-5 ساخته شده است. بسته به ماهیت آزمون، قطعه

^۱ Block on ring tribo test machine

مقابل می‌تواند انواع مختلفی از مواد باشد. این دستگاه جهت آزمون قطعات چرخشی مثل آج لاستیک، قرقره، میل بادامک و مواد یاتاقان‌ها شبیه‌سازی شده است [۱۹].

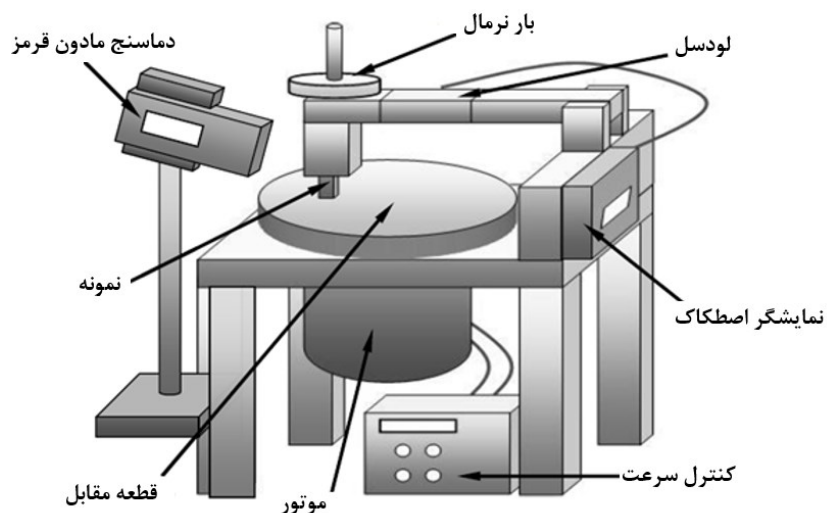


شکل (۱۸-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش بلوک روی حلقه [۱۹].

۱-۱۵-۵- دستگاه آزمون سایش بلوک روی دیسک^۱

دستگاه بلوک روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G99 طراحی شده است (شکل (۱-۱۹)). نمونه به صورت عمودی در مقابل صفحه قرار می‌گیرد. دماسنج مادون قرمز قابل حمل را می‌توان به منظور اندازه‌گیری دمای در طول آزمایش در دستگاه بلوک روی دیسک قرار داد. آزمون می‌تواند چسبنده و ساینده باشد و در معرض حالت لغزشی خشک قرار گیرد. یک واحد کنترل کننده سرعت، به موتور متصل می‌شود تا بتواند سرعت را تغییر دهد. همچنین یک نشانگر اصطکاک دیجیتال به طور مستقیم به لودسل وصل می‌شود تا در هنگام آزمایش نیروهای اصطکاک را ضبط کند [۱۹].

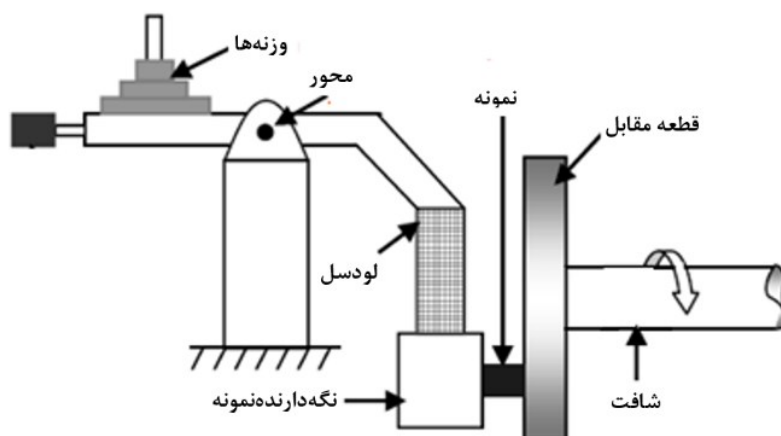
^۱ Block on disc tribo test machine



شکل (۱۹-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش بلوک روی دیسک [۱۹].

۱-۱۵-۱-۶- دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک^۱

نمای شماتیک دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک در شکل (۲۰-۱) ارائه شده است که بر اساس استاندارد ASTM G99 ساخته شده است. نمونه آزمایشی به صورت عمودی و افقی بر روی قطعه مقابل قابل تنظیم است. از این آزمون برای آزمون سایش لغزشی مواد مختلف استفاده می شود [۱۹].



شکل (۲۰-۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک [۱۹].

^۱ Pin on disc tribo test machine

۱-۱۵-۲- نحوه ارائه نتایج

در این بخش برخی از روش‌های متداول در ارائه داده‌ها برای نمایش رفتار ویژگی‌های مربوط به سایش و اصطکاک مواد که بیشتر مورد توجه محققان جهان است بیان می‌شود.

۱-۱۵-۲-۱- عملکرد سایشی

بسیاری از محققان ترجیح می‌دهند عملکرد سایش یک ماده را از نظر نرخ سایش ویژه بیان کنند. نرخ سایش ویژه را می‌توان به شرح زیر تعریف کرد [۱۹]:

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_n \cdot D} \quad (1-1)$$

W_s - نرخ سایش ویژه ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

ΔV - اختلاف حجم (mm^3)

F_n - بار وارده نرمال N

D - مسافت لغزشی

بنابراین، اگر میزان نرخ سایش ویژه خاص پایین باشد، عملکرد سایش یک ماده بهتر است [۱۹].

۱-۱۵-۲-۲- عملکرد اصطکاک

عملکرد اصطکاک یک ماده را می‌توان به‌عنوان نیروی مقاومت در برابر حرکت نسبی بین دو رابط لغزشی تعریف کرد. ضریب اصطکاک را می‌توان به‌شرح زیر بیان کرد:

$$\mu = \frac{F_r}{F_n} \quad (2-1)$$

μ : ضریب اصطکاک

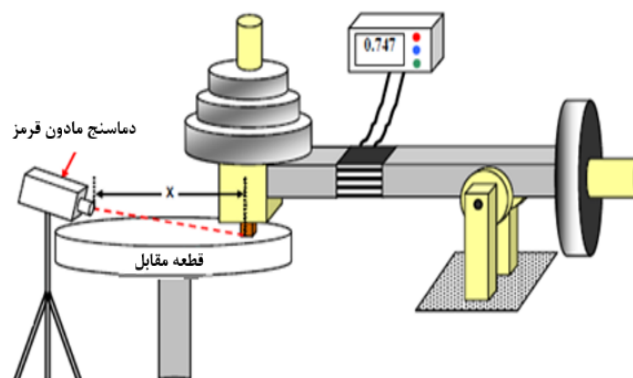
F_r : نیروی اصطکاک، N

F_n : نیروی نرمال، N

θ : زاویه فشار / زاویه زبری [۱۹].

۱-۱۵-۲-۳- عملکرد دما

هنگام انجام آزمایشات سایش‌شناسی مهم است که، ویژگی‌های دمای مواد را با یکدیگر مرتبط کنیم. دما بر فرسودگی و عملکرد اصطکاک یک ماده در طولانی مدت، تأثیر می‌گذارد. یکی از راحت‌ترین راه‌های کنترل دما استفاده از دماسنج مادون قرمز است (شکل (۱-۲۱)). هنگامی که دماسنج مادون قرمز نزدیک‌تر به نمونه آزمایش قرار گیرد، اندازه‌گیری دما دقیق‌تر خواهد بود [۱۹].



شکل (۱-۲۱) الحاق دماسنج مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای نقطه اتصال [۱۹].

۱-۱۶- نوآوری و ساختار پایان نامه

در این تحقیق خواص سایشی اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های حاصل از سه نانوساختار نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن و نانورس به کمک روش تجربی تعیین می‌شود. پس از همگن‌سازی نانوساختارها درون رزین و قالب‌گیری با استفاده از دستگاه آزمون سایش پین بر روی دیسک، آزمون انجام می‌شود. اثر افزودن نانوساختارها بر نرخ سایش رزین اپوکسی مطالعه می‌شود. طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده، اثر هم‌افزایی این نانوساختارها بر روی یکدیگر تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این اثر شامل پنج فصل است.

در فصل اول مقدمه‌ای درباره کامپوزیت‌ها و روش‌های توزیع نانوساختارها درون زمینه پلیمری جهت ساخت نانوکامپوزیت‌ها آورده شد. در ادامه به تعاریف مربوط به سایش و انواع روش‌های انجام آن پرداخته شد.

در فصل دوم، تحقیقات انجام‌شده در زمینه انجام آزمون سایش بر روی نانوکامپوزیت‌ها به‌صورت دسته‌بندی ارائه شده است.

در فصل سوم روش ساخت و تعیین خواص سایشی نانوکامپوزیت‌ها به روش تجربی آورده شده است.

فصل چهارم به بررسی و بحث در مورد نتایج به‌دست آمده پرداخته شد.

در نهایت جمع‌بندی مطالب و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده در فصل پنجم آورده شده است.

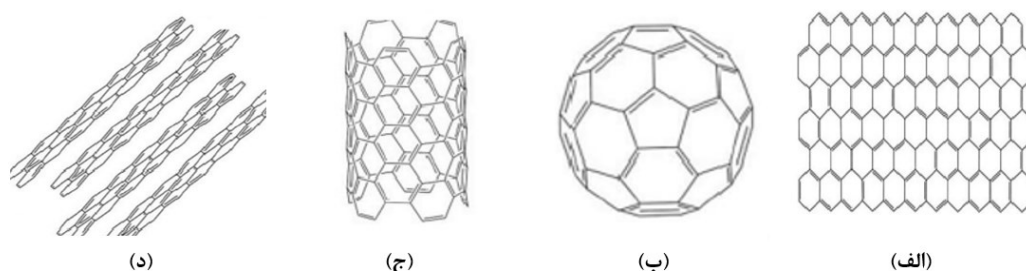
فصل ۲: مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

در این فصل، مقاله‌های مرتبط با موضوع پایان‌نامه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به گستردگی موضوع و تنوع نانوساختارهای استفاده‌شده در این پژوهش، مقالات در سه بخش و با توجه به نوع نانوساختار بررسی می‌گردند.

۲-۲- بررسی مقالات منتشر شده

هدف از بررسی و بازبینی مقالات، ارائه سابقه اطلاعات در زمینه سایش‌شناسی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، نانورس و نانواکسیدگرافن است. کربن به‌عنوان یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده حیات است که در پوسته زمین به فراوانی یافت می‌شود. در سال‌های اخیر آلوتروپ‌های کربنی در مقیاس نانو به‌عنوان روان‌کننده‌های جامد مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۲۰]. شکل (۱-۲) فولرن، نانولوله کربنی یک‌بعدی، گرافن دوبعدی و همچنین گرافیت را که از مهمترین آلوتروپ‌های کربن هستند، نشان می‌دهد [۲۱]. هر اتم کربن می‌تواند با چهار اتم کربن دیگر پیوند برقرار کرده یک شبکه‌ای سه بعدی به‌نام الماس تشکیل دهد. در صورتی که یک اتم کربن با سه اتم کربن دیگر پیوند برقرار کند به‌جای شبکه سه بعدی، ورقه‌ای دو بعدی ایجاد شود این ورقه‌ها را گرافن می‌نامند [۲۲]. گرافن عنصر ساختاری چندین آلوتروپ کربنی است؛ به‌طوری‌که از اجتماع چند ورقه گرافن، گرافیت به‌دست می‌آید. چنانچه تک لایه گرافیتی حول یک محور بچرخد و لوله شود نانولوله کربنی و در صورتی که به شکل کروی پیچانده شود فلورن حاصل می‌شود [۲۳]. نانوساختارهای کربن به‌دلیل استحکام مکانیکی عالی، مساحت سطح بزرگ و هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، به‌عنوان پرکننده برای تقویت زمینه‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان یک نانوپرکننده معمولی یک‌بعدی، نانولوله‌های کربنی می‌توانند به‌طور قابل توجهی خصوصیات حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری را بهبود بخشند.



شکل (۱-۲) آلوتروپ‌های کربنی: (الف) گرافن، (ب) فولرن، (ج) نانولوله کربنی و (د) گرافیت [۲۱].

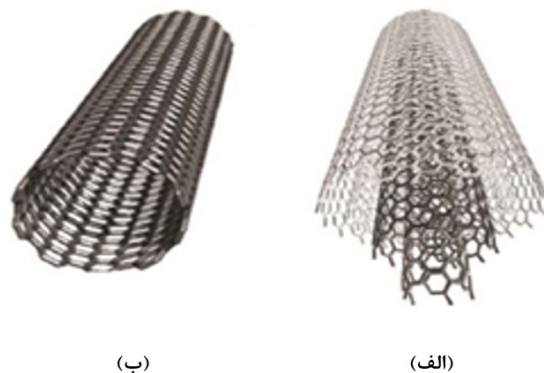
همچنین نانوپرکننده‌های دو بعدی مانند گرافن، اکسید گرافن و نانوپلاکت‌های گرافیتی عملکرد خوبی یا حتی بهتر از نانوپرکننده‌های یک‌بعدی نشان داده‌اند [۲۴].

۲-۱-۲- نانولوله‌های کربنی

پلیمرها در اجزاء در معرض سایش به‌خاطر آماده‌سازی آسان، مقاومت در برابر خوردگی خوب، اصطکاک پایین و کاهش ارتعاش استفاده می‌شوند. اما؛ توانایی انتقال بار و مقاومت دمایی پلیمرها نسبت به سرامیک‌ها و فلزات پایین‌تر است. برای بهبود این خصوصیات نانوتقویت‌کننده‌های از قبیل نانوفیبرهای کربن یا نانولوله‌ها می‌توانند به پلیمرها اضافه شوند، این نانوتقویت‌کننده‌ها خصوصیات حرارتی، الکتریکی و مکانیکی بسیار خوبی را ارائه می‌دهند. علاوه‌براین، نانولوله‌های کربنی به‌دلیل ساختار مشابه به ساختار گرافیت و فولرن، خواص خودروان‌کاری دارند، بنابراین، می‌تواند به‌عنوان مواد ضد اصطکاک و مقاوم در برابر سایش مناسب باشد [۲۵].

نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ توسط دانشمندی به‌نام سومیو ایجیما^۱ کشف و تولید شد [۲۶]. شکل (۲-۲) دو نوع نانولوله‌ی تک جداره و چند جداره را نمایش می‌دهد.

^۱ Iijima Sumio



شکل (۲-۲) نانولوله کربنی چند جداره (الف) و نانولوله کربنی تک جداره (ب) [۲۱].

تحقیقات متعددی در مورد خواص اصطکاکی کامپوزیت‌های گرمانرم و گرماسخت پر شده از نانولوله‌های کربنی، انجام شده‌است. تحقیقات نشان داده مقاومت به سایش کامپوزیت‌ها به‌طور کلی با افزودن غلظت کمی از نانولوله‌های کربنی بهبود می‌یابد. با این حال، نانولوله‌های کربنی به‌راحتی در زمینه پلیمر پراکنده نمی‌شوند و به‌ویژه در غلظت‌های زیاد ($< 5\%$)، تمایل به تشکیل توده‌های^۱ بزرگ دارند، که گاهی اوقات باعث افت خواص مکانیکی و تریبولوژیکی می‌شود [۲]. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانولوله‌های کربنی می‌توان به خواص الکترونیکی و رسانایی حرارتی بالاتر از الماس و همچنین ویژگی‌های مکانیکی، که در آن سختی، استحکام و انعطاف‌پذیری از هر ماده فعلی تجاوز می‌کند، اشاره کرد. خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی، همراه با چگالی کم آن‌ها، دامنه توسعه مواد کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله را گسترش می‌دهند [۲۷]. جداره‌های نانولوله‌های کربنی شبیه ورق‌های گرافیتی دارای پیوند کووالانسی قوی هستند. با توجه به ساختار گرافیکی آن‌ها، نانولوله‌های کربنی دارای هدایت حرارتی بالا و هدایت الکتریکی هستند که می‌تواند نیمه‌رسانا یا مانند فلز رسانا باشد. مدول یانگ نانولوله‌های کربنی می‌تواند به اندازه ۱۰۰۰ GPa باشد که تقریباً پنج برابر بیشتر از فولاد است. همچنین استحکام کششی نانولوله‌های کربن می‌تواند تا ۱۵۰ GPa یعنی حدود ۴۰ برابر بیشتر از فولاد باشد [۲۸]. جداره نانولوله‌های کربنی یک ساختار شش ضلعی است که شبیه به ساختار گرافیت یا فولرن‌ها است و در نتیجه

^۱ Agglomerate

خاصیت روان کاری دارد [۲۹]. بسته به روند ساخت نانولوله‌های کربنی، دو دسته کلی نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانولوله‌های کربنی چند جداره وجود دارند. چنانچه نانولوله کربنی فقط شامل یک لوله از گرافن باشد، نانولوله تک جداره و اگر شامل دو یا چند پوسته استوانه‌ای متمرکز از ورق‌های گرافن متحدالمرکز که به‌طور محکم در اطراف یک هسته توخالی مرکزی، با نیروهای واندروالس باشند نانولوله چند جداره نامیده می‌شود [۱۶].

کومار سینگ و همکاران [۳۰] با استفاده از دستگاه پین روی دیسک، خواص تریبولوژی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با فیبر، که با ۳٪ نانولوله چند جداره، ساخته شده بود، تحت بار، سرعت لغزشی و درمحیط‌های مختلف بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش بار و سرعت لغزشی، کاهش وزن افزایش می‌یابد. این رفتار به دلیل افزایش سریع دمای کامپوزیت با افزایش بار رخ می‌دهد آن‌ها نشان دادند مکانیزم‌های اصلی که مسئولیت سایش در بار زیاد و سرعت لغزشی را برعهده دارند مکانیزم‌های چسبندگی و سایش هستند. ساکا و همکاران [۳۱] اصطکاک و سایش کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با پرکننده‌های کربنی از جمله نانولوله‌های کربنی تحت فرایند قرار گرفته و تحت فرایند قرار نگرفته، گرافیت و مخلوطی از گرافیت و نانولوله‌های کربنی را با استفاده از روش پین روی دیسک بررسی کردند. آن‌ها دریافتند مقاومت در برابر سایش با اختلاط پرکننده‌های کربن در زمینه اپوکسی افزایش می‌یابد. و کامپوزیت‌های اپوکسی/ نانولوله‌های کربن عاملدار بهترین رفتار تریبولوژیکی را دارند. کامپو و همکاران [۲۵] 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 تقویت‌شده 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. آشوک گاندی و همکاران [۳۲] نقش نانولوله‌های کربنی در بهبود خواص

سایشی پلی پروپیلن^۱ در شرایط لغزشی خشک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانولوله کربنی باعث بهبود مقاومت به سایش پلی پروپیلن خالص می شود. همچنین افزایش درصد نانولوله های کربن مقاومت به سایش را افزایش می دهد. لی یان و همکاران [۳۳] به بررسی میزان سایش کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی همتراز شده^۲ (ACNTs) توسط یک فرآیند تخمیر بخار شیمیایی تحت شرایط آب پرداختند. کامپوزیت های ACNTs/EP دارای ویژگی های ضد سایش برجسته است، که میزان سایش را ۲۱۹ برابر نسبت به اپوکسی خالص کاهش می دهد. نتایج نشان داد که هر دو نرخ سایش ویژه و ضریب اصطکاک کامپوزیت کمتر از نمونه اپوکسی خالص بود. سولونگ و همکاران [۳۴] به مطالعه بهینه سازی پراکندگی نانولوله های چند جداره، افزایش پیوند بین فازی با زمینه پلیمری از طریق عاملدار کردن شیمیایی و همچنین اثرات گروه های عاملدار مختلف بر روی سطح نانولوله های کربنی و خواص تریبولوژی کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با غلظت های مختلف نانولوله کربنی پرداختند. آن ها پی بردند که ترکیب نانولوله های کربنی کاهش وزن زمینه ی اپوکسی را به میزان قابل توجهی در آزمون سایش خشک کاهش می دهند. علاوه بر این، مقاومت در برابر سایش، که به طور معکوس متناسب با کاهش وزن است با افزایش غلظت نانولوله های کربنی در زمینه اپوکسی افزایش می یابد. نانولوله های کربنی خواص تریبولوژیکی را افزایش می دهد که خود روان کاری نانولوله های کربنی عامل اصلی آن است. همچنین نانولوله های عامل دار در زمینه پلیمری باعث افزایش کیفیت پراکندگی، تقویت پیوند بین سطحی با زمینه پلیمری می شود و منجر به خاصیت تریبولوژیکی بهتری نسبت به کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانولوله های بدون عامل است. ژانگ و همکاران [۳۵] رفتار اصطکاکی و سایشی کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده توسط نانولوله های کربنی را مطالعه کردند. آن ها دریافتند سطح پوشیده شده از نانولوله های کربنی نقش به سزایی در قابلیت سایشی کامپوزیت ها دارد و میزان سایش را کاهش می دهد. بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت، ناشی از نانولوله های کربنی در معرض

¹ Polypropylene

² Aligned

لغزش بود که از زمینه اپوکسی محافظت می‌کند. همچنین تماس لغزشی در آزمون سایش می‌تواند نانولوله‌های کربنی را به‌طور قابل توجهی تغییر شکل دهد و باعث تکه‌تکه شدن آن‌ها شود. دونگ و همکاران [۳۶] با استفاده از یک دستگاه آزمون سایش و در شرایط تماس لغزشی خشک به بررسی اثر افزودن درصدهای مختلف نانولوله‌های چند جداره به زمینه اپوکسی پرداختند. آزمایشات نشان داد کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌های چند جداره، به‌خاطر خاصیت خود روان‌کاری نانولوله‌های کربنی اصطکاک را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت به سایش و بهبود خواص تریبولوژی اپوکسی می‌شود. برای رسیدن به این نتایج لازم است پراکندگی نانولوله‌های کربنی در اپوکسی به‌صورت یکنواخت انجام پذیرد. چن و همکاران [۲۸] اثر روش پراکندگی^۱ بر خواص تریبولوژیکی، رفتار حرارتی، خمشی و استحکام در برابر ضربه مواد مرکب اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار دادند. روش‌های پراکندگی مورد استفاده عبارت بودند از: سانتریفیوژ نامتقارن دوگانه^۲، فراصوت و مخلوط کردن دستی. آن‌ها نانولوله‌های کربنی را به سه صورت ساده، فعال‌سازی در اسید نیتریک و فعال‌سازی در اسید نیتریک به‌همراه عامل اتصال‌دهنده استفاده کردند. آن‌ها دریافتند سانتریفیوژ نامتقارن دوگانه برای افزایش پراکندگی پرکننده‌های نانوساختار موثرتر است. این روش تنش‌های برشی بالایی تولید می‌کند و باعث تخریب توده‌ها می‌شود اما به اندازه کافی برای جلوگیری از تخریب نانولوله‌های کربنی خفیف است. فراصوت نیز جهت پراکندگی پرکننده‌های نانوساختار در رزین اپوکسی موثر است. حتی می‌توان از هر دو روش فراصوت و سانتریفیوژ نامتقارن به‌صورت ترکیبی جهت پراکندگی ذرات استفاده نمود. در خصوص پرکننده‌های نانوساختار فعال‌شده در اسید نیتریک نبایستی از فراصوت استفاده شود چون باعث تخریب نانولوله‌های کربنی می‌گردد. از دیدگاه تریبولوژی به فعال‌سازی نانولوله‌های کربنی در اسید نیتریک و یا فعال‌سازی با عامل اتصال نیازی نیست، زیرا از پرکننده‌های نانوساختار فعال‌نشده نتایج خوبی را حاصل می‌شود. جان کویی و همکاران [۲۹] به بررسی اثر اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی

^۱ Dispers

^۲ Dual Asymmetric Centrifuge

چندجداره، بار اعمال شده و سرعت لغزش بر رفتار سایشی و اصطکاکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی چند جداره پرداختند. آن‌ها دریافتند که اضافه کردن نانولوله‌های چند جداره به رزین اپوکسی با کاهش ضریب اصطکاک باعث افزایش مقاومت سایشی رزین اپوکسی است. همچنین با افزایش بار اعمال شده و سرعت لغزشی، هر دو ضریب اصطکاک و نرخ سایش ویژه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. سنتوس و همکاران [۳۷] رفتار حرارتی، دینامیکی - مکانیکی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های رزین اپوکسی - اکریلات و نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل دار را مورد بررسی قرار دادند. مکانیزم سایش یافت شده برای نانوکامپوزیت‌ها عبارتند از: سایش چسبنده، خستگی و لایه لایه شدن. نتایج حاکی از افزایش سختی و توانایی بیشتر در اتلاف انرژی و همچنین تغییر در دمای انتقال شیشه برای نانوکامپوزیت‌ها است. علاوه بر این نانوپرکننده‌ها ضریب اصطکاک و میزان سایش کامپوزیت‌ها را نیز کاهش داده اما مکانیزم سایش مشاهده شده را تغییر نمی‌دهد. کاریون و همکاران [۳۸] تأثیر مایع یونی بر دمای انتقال شیشه، اصطکاک و سایش نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره‌ای را بررسی کردند. آنها دریافتند تأثیر مواد افزودنی بر خصوصیات حرارتی نانوکامپوزیت‌ها برای هر ماده متفاوت است. همچنین کاهش رفتار سایشی آن‌ها را در مقایسه با پلیمرهای خالص مشاهده کردند. کاهش سایش به پراکندگی نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری نسبت داده شده است که باعث افزایش مقاومت زمینه در برابر انتشار ترک، شکستگی و همچنین اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی توسط مایع یونی و بهبود روان کاری می‌شود. هزینه بسیار بالای تولید نانولوله‌های کربنی در مقایسه با دیگر پرکننده‌ها، مانند خاک رس، گرافیت، کربن سیاه و فیبرکربن، پتانسیل استفاده از نانولوله‌های کربنی را به عنوان یک پرکننده در نانوکامپوزیت‌ها محدود کرده است. ساخت نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از پرکننده‌های ترکیبی متشکل از نانولوله‌های کربنی و دیگر پرکننده‌های کم مصرف ممکن است یک گزینه جایگزین امیدوار کننده برای کاهش هزینه مواد نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی ارائه دهد. با این حال، پراکندگی مناسب این پرکننده‌های هیبریدی به یک زمینه پلیمری برای دستیابی به اثرات هم‌افزایی فوق یک کار چالش برانگیز است زیرا

این پرکننده‌های هیبریدی اشکال هندسی منحصر به فرد و مشخصات پراکندگی متفاوت خود را دارند [۱۶].

۲-۲-۲- نانواکسید گرافن

گرافن در سال ۲۰۰۴ توسط نوووسلوف^۱ و همکاران کشف شد [۲۱]. امروزه محققان توانسته‌اند با افزودن مقدار کمی گرافن به فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها، موادی چقرمه و سبک تولید کنند. تولید انبوه ورق‌های گرافن از اکسید گرافیت بر اساس یک روش شیمیایی ارزان‌تر از نانولوله‌های کربنی است. برخی از نتایج اخیر نشان داد که نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی مقدار کمی از ورق‌های گرافن از لحاظ افزایش انواع خواص مکانیکی، نسبت به نانولوله‌های کربنی بهتر عمل می‌کنند [۱۶].

جون شن و همکاران [۳۹] تجزیه و تحلیل حرارتی مکانیکی و عملکرد تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح شده با محتوای بسیار کم اکسید گرافن را بررسی کردند. آزمایشات اصطکاک و سایش انجام شده بر روی کامپوزیت‌های، اپوکسی/ اکسیدگرافن در برابر فولاد نشان می‌دهد که با افزودن اکسیدگرافن به زمینه اپوکسی مقاومت سایشی به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته و میزان ساییدگی، نسبت به اپوکسی خالص کاهش می‌یابد. برتری نانو ورقه‌های اکسیدگرافن مربوط به مساحت سطح ویژه زیاد، چسبیدگی خوب به اپوکسی به‌خاطر زبری و پرچین و چروک بودن سطح، هندسه مسطح دو بعدی و افزایش دمای انتقال شیشه است. جون شن و همکاران [۴۰] به تحقیق درمورد اثر ترکیبی نانولوله‌های کربنی چند جداره و پرکننده‌های نانوساختار اکسیدگرافن بر عملکرد تریبولوژیکی و تجزیه و تحلیل حرارتی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی پرداختند. آن‌ها در یک محتوای کم از ترکیب پرکننده‌های نانوساختار اکسیدگرافن و نانولوله‌های کربنی با اپوکسی دریافتند عملکرد سایشی به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با به‌کارگیری اکسیدگرافن توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی خیلی

¹ Novoselov

بهرتر شد هم‌چنین افزایش چسبندگی و اتصال اپوکسی با نانوپرکننده‌ها باعث بهبود عملکرد تریبولوژی و دمای انتقال شیشه شد. دن‌لیو و همکاران [۴۱] ویژگی‌های مقاومت تریبولوژیکی و مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با فولرن C 60 و گرافن عاملدار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تریبولوژیکی و ضد خوردگی نشان داد که ضریب اصطکاک کمتری را در مقایسه با اپوکسی خالص نشان می‌دهند. کومار و همکاران [۴۲] به بررسی خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، مدول الاستیسیته با استفاده از تست کششی، سختی و عملکرد تریبولوژیکی کامپوزیت‌های اپوکسی با پرکننده‌های جامد و مایع پرداختند. آن‌ها خواص ترکیبی کامپوزیت‌های اپوکسی با مواد پرکننده مانند گرافن، گرافیت و روان‌کننده‌های مایع به‌عنوان پوشش بر روی سطح استوانه‌ای با جنس فولاد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند کامپوزیت‌های مبتنی بر اپوکسی پر از مایع، به‌عنوان پوشش‌های تریبولوژیکی برای تحمل بار در یاتاقان‌ها، حلقه‌های پیستون موتور و غیره بسیار مناسب هستند.

کومار و همکاران [۴۳] مطالعات خود را بر روی بررسی تریبولوژیکی پوشش دوگانه با لایه‌های کامپوزیت روغن پایه، گرافن و اپوکسی روی فولاد ابزار در شرایط خشک و روان‌کاری متمرکز کردند. نتایج نشان داد که کامپوزیت اپوکسی با ۱۰٪ گرافن و ۱۰٪ روغن پایه برای شرایط تماس تریبولوژیکی، در شرایط خشک و روغن‌کاری شده برای قطعات ماشین در شرایط سخت مناسب است. چن و همکاران [۴۴] یک مخلوط هیبریدی جدید از نانولوله‌های کربنی، اکسید گرافن و دی‌سولفید مولیبدن به روش هیدروترمال^۱ تهیه کردند و به بررسی ساختار، ترکیب فاز و اثر افزایش خواص تریبولوژی آن پرداختند. نتایج نشان داد این ترکیب کمترین ضریب اصطکاک و میزان سایش را نسبت به اپوکسی خالص و سایر پوشش‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با پرکننده‌های تکی یا مخلوط‌های دوتایی دارند، که این موضوع به پراکندگی یکنواخت پرکننده‌های نانوساختار، اثر خودروان‌کاری دی‌سولفید مولیبدن و ظرفیت تحمل بار نانولوله‌های کربنی و اکسیدگرافن بر می‌گردد. ژائو و همکاران [۴۵] از پرکننده‌های نانوساختار اکسید گرافن که با مایع یونی فعال شده بود به‌جای گرافن ورقه‌ای در زمینه اپوکسی استفاده کردند. اکسید

^۱ Hydrothermal

گرافن عاملدار در مقایسه با گرافن ورقه‌ای پراکندگی قابل توجهی در زمینه اپوکسی از خود نشان داد. همچنین تقویت کامپوزیت با اکسید گرافن عاملدار خواص مکانیکی حرارتی و سختی را بهبود بخشید. آزمایشات نشان داد افزودن اکسید گرافن عاملدار اصطکاک و سایش اپوکسی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

۲-۲-۳- نانورس

نانومواد دو بعدی مانند خاک رس^۱ و گرافن طیف گسترده‌ای از مواد هستند که خواص مختلفی را پوشش می‌دهند. به‌طور معمول، تک لایه‌های این مواد چند نانومتر ضخامت دارند که دارای خواص الکترونیکی و مغناطیسی هستند. استفاده از نانومواد دو بعدی برای کنترل اصطکاک و سایش در چند سال گذشته مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۲]. در بین انواع مختلف نانوپرکننده‌ها، خاک رس مونت موریلونیت^۲ یکی از مواردی است که معمولاً در رزین‌های اپوکسی کاربرد دارد. ساخت کامپوزیت‌های پلیمر/رس، مانند سایر پرکننده‌های معدنی، به‌راحتی می‌تواند باعث تجمع خاک رس شود و باعث بدتر شدن خواص مکانیکی و مقاومت در برابر سایش شود. با این حال، گزارش شده‌است که کامپوزیت‌های پلیمر/رس، با صفحات کوچک رس ورقه ورقه شده، ضرایب بالاتری را ارائه می‌دهند [۴۶]. پراکندگی بهتر رس در زمینه اپوکسی با اصلاح سطح رس باعث کاهش اصطکاک و میزان ساییدگی خاص می‌شود [۴۷].

ویتا و همکاران [۴۸] عملکرد مواد سرامیکی که در معرض فرسایش ذرات جامد قرار داشتند، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند این مواد معمولاً از باقیمانده‌های جامد و خاکسترهای آتشفشانی بدست می‌آیند، که در آن از نانورس و رزین اپوکسی به‌عنوان چسب استفاده شده‌است. مواد با استفاده از

¹ Clay

² Montmorillonite

خروجی نازل در سه زاویه مختلف (30° ، 45° و 90°) و با سرعت 224 m/s بر روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شوند. نتایج نشان داد که تمام مواد سرامیکی حداکثر سرعت فرسایش خود را در زاویه 90° مشاهده کردند؛ در زاویه 30° فرسایش به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. علاوه بر این، سرامیک‌های متشکل از خاکسترهای آتشفشانی و شن و ماسه مخلوط با رزین اپوکسی در مقایسه با موادی که با خاک رس ترکیب شده بودند، مقاومت به فرسایش بهتری دادند. ویت تورس و همکاران [۴۹] سائیدگی در مواد سرامیکی حاصل از مواد جامد باقی مانده از معادن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها عملکرد مواد جدید سرامیکی، تحت سایش ساینده خشک، را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که سرامیک حاوی ذرات خاکستر آتشفشانی، شن و ماسه مخلوط با خاک رس، مقاومت بیشتری نسبت به موادی که با رزین اپوکسی خالص ترکیب شده‌اند دارند. خاکستر آتشفشانی مخلوط با رزین اپوکسی، بدترین عملکرد را با این شرایط آزمایش نشان داد که می‌تواند به سختی پایین و تردی بالا نسبت به سایر مواد مرتبط باشد. لینگاراجو و همکاران [۵۰] تأثیر تقویت‌کننده‌های نانوسیلیس و نانورس هالوئیت بر خواص مکانیکی پلیمر اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. بالاترین میزان سایش در کامپوزیت اپوکسی خالص و کمترین میزان سایش در کامپوزیت تقویت‌شده با نانورس مشاهده شد. مهاشا و همکاران [۵۱] به بررسی تأثیر ترکیب نانوتیتانیوم به‌تنهایی و با ترکیب نانوذرات رس بر روی رفتار مکانیکی، سختی، میرایی، شوک تحت آب و سایش لغزشی خشک کامپوزیت‌های اپوکسی بازالت پرداختند. از بررسی تجربی مشخص شد که استحکام کششی و ثبات ابعادی کامپوزیت‌های اپوکسی بازالت با افزودن پرکننده‌ها افزایش می‌یابد.

فصل ۳: روش انجام آزمایش‌ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل به تشریح کامل جزییات مواد استفاده شده، نحوه‌ی محاسبه نسبت مواد، روش پراکندگی مواد در رزین، مراحل آماده‌سازی، معرفی تجهیزات و دستگاه‌های استفاده‌شده و روش آزمون نمونه‌ها پرداخته می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری نرخ سایش ویژه کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با پرکننده‌های نانوساختار، بر اساس استاندارد ASTM-G99-04 ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۲- مواد استفاده شده در ساخت نمونه‌ها

۳-۲-۱- رزین

رزین مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی آزمون سایش، رزین اپوکسی KER 828 محصول شرکت KUMHO کره به همراه هاردنر تا ۱۰٪ است که از شرکت شیمی افسون خریداری شد. ویسکوزیته رزین، ۱۲ تا ۱۴ Pa.s و چگالی در دمای 25°C ، $1/15\text{ kg/l}$ است.

۳-۲-۲- پرکننده‌های نانوساختار

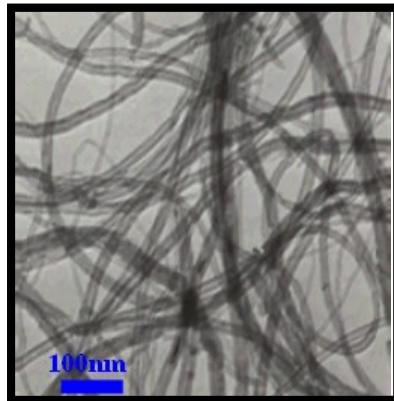
در این پژوهش سه نوع نانوساختار به‌عنوان تقویت‌کننده با مشخصات زیر از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه و استفاده شد:

۳-۲-۲-۱- نانولوله‌های چند جداره کربنی

نانولوله‌های کربنی چندجداره محصول (US-Nano) شرکت آمریکایی US Research

Nanomaterials، دارای قطر خارجی ۲۰ - ۱۰ nm و طول ۳۰ μm به رنگ سیاه با خلوص بالای ۹۵٪

تهیه شد. تصویر TEM نانولوله‌های کربنی در شکل (۱-۳) آورده شده است (پیوست الف).



شکل (۱-۳) تصویر TEM از نانولوله‌های کربنی چند جداره.

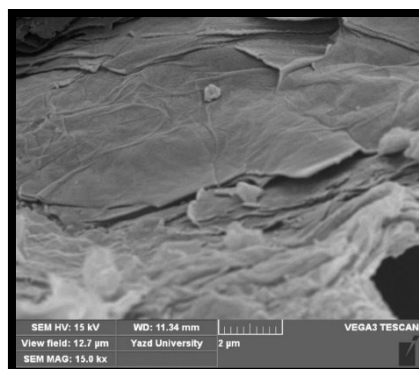
۳-۲-۲-۲- پرکننده نانوساختار اکسید گرافن

پودر نانوصفحات کوچک اکسید گرافن با ضخامت ۷ - ۳/۴ nm، درجه خلوص تقریباً ۹۹٪، با تعداد

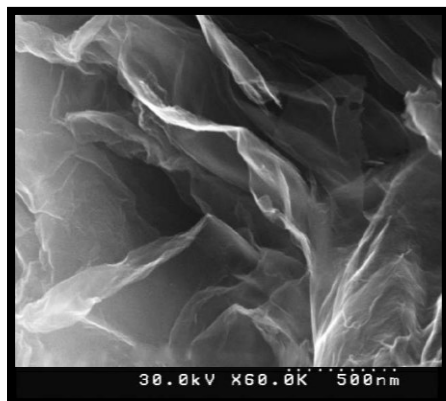
میانگین ۱۰ - ۶ لایه، مساحت سطح $300 - 100 \text{ m}^2/\text{g}$ و با اندازه جانبی ۵۰ - ۱۰ μm تهیه شد.

شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) تصاویر SEM و TEM از پودر نانوصفحات اکسید گرافن را نشان می‌دهند

(پیوست ب).



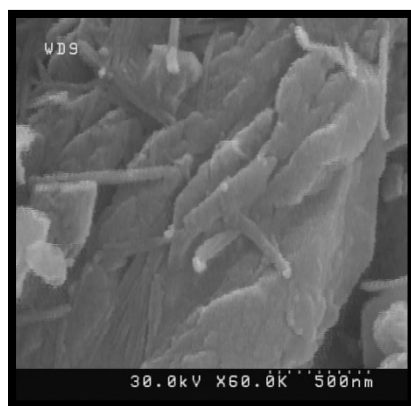
شکل (۲-۳) تصویر SEM از پودر نانوصفحات اکسید گرافن.



شکل (۳-۳) تصویر TEM از پودر نانوصفحات اکسید گرافن.

۳-۲-۲-۳- نانورس مونتمریلونیت

نانورس مونتمریلونیت محصول Sigma با اندازه ذرات ۱ - ۲ nm، چگالی $0.7 - 0.5 \text{ g/cm}^3$ ، مساحت سطح ویژه $270 - 220 \text{ m}^2/\text{g}$ از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شد. تصویر SEM نانورس مونتمریلونیت در شکل (۴-۳) آورده شده است (پیوست ج).



شکل (۴-۳) تصویر SEM از نانورس مونتمریلونیت.

هر سه نوع نانوساختار به صورت پودر خشک تهیه و مطابق درصدهای مشخص شده در جدول (۱-۳) به رزین افزوده شدند.

جدول (۱-۳) مشخصات نوع و درصد وزنی پرکننده‌های نانوساختار جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی.

نوع کامپوزیت	درصد اپوکسی	درصد نانواکسید گرافن	درصد نانولوله کربنی	درصد نانورس
اپوکسی	۱۰۰٪	---	---	---
اپوکسی / نانواکسید گرافن	۹۸/۵٪	۱/۵٪	---	---
اپوکسی / نانولوله کربنی	۹۸/۵٪	---	۱/۵٪	---
اپوکسی / نانورس	۹۸/۵٪	---	---	۱/۵٪
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانولوله کربنی	۹۸/۵٪	۰/۷۵٪	۰/۷۵٪	---
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانورس	۹۸/۵٪	۰/۷۵٪	---	۰/۷۵٪
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس	۹۸/۵٪	---	۰/۷۵٪	۰/۷۵٪
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانولوله کربنی / نانورس	۹۸/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪

نسبت اپوکسی به هاردنر توسط شرکت شیمی افسون ۱۰۰ به ۱۰ داده شده است. جدول (۲-۳) نامگذاری

استفاده شده جهت آماده‌سازی مخلوط را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۳) نامگذاری استفاده شده جهت آماده‌سازی مخلوط.	
ماده	اختصار
رزین اپوکسی	A
هاردنر	B
پرکننده	C

مجموع رزین، هاردنر و نانوساختار باید برابر با $A + B + C = 100\%$ باشد. نسبت مجموع پرکننده در

هر نمونه حاوی نانوساختار $1/5\%$ است. برای نمونه اپوکسی خالص می‌توان نوشت:

$$A + B + C = 24/54 \text{ g} + 2/46 \text{ g} + 0 = 27 \text{ g}$$

و برای نمونه‌های حاوی نانوساختار تساوی زیر برقرار است:

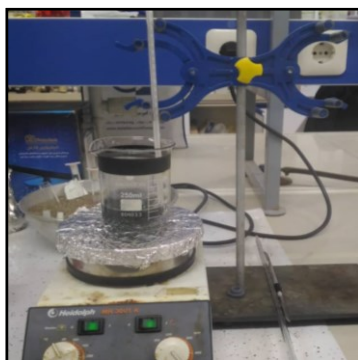
$$A + B + C = 89/546\% + 8/954\% + 1/5\% = 100\%$$

۳-۳- توزیع پرکننده‌های نانوساختار در رزین

در این مطالعه به‌منظور توزیع پرکننده‌های نانوساختار درون رزین از دستگاه حمام فراصوت و همزن مغناطیسی به‌صورت ترکیبی استفاده شده‌است. پس از محاسبه میزان درصد وزنی مورد نیاز، پرکننده‌های نانوساختار توسط ترازوی دیجیتال با دقت چهار رقم اعشار وزن کرده و به رزین، اضافه شد. سپس مطابق شکل (۳-۵) بشر به مدت ۱ h درون حمام فراصوت شرکت BANDELIN ساخت کشور آلمان، با توان W ۴۰۰ و در دمای 40°C قرار داده شد. با افزایش دمای رزین ویسکوزیته آن کاهش یافته و عمل توزیع پرکننده‌های نانوساختار به‌خوبی صورت گرفت. سپس با استفاده از همزن مغناطیسی با ۵۰۰ دور در دقیقه و در دمای 40° عمل توزیع پرکننده‌های نانوساختار به مدت ۱ h مطابق شکل (۳-۶) انجام شد. سپس دوباره برای ۱ h از حمام فراصوت استفاده شد.

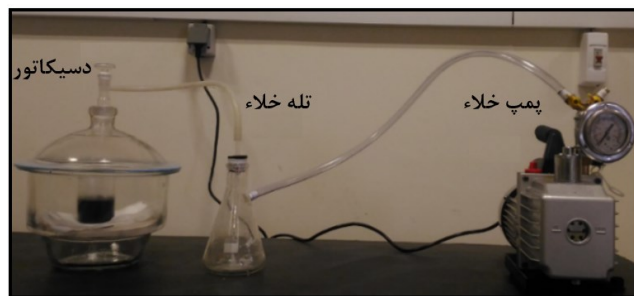


شکل (۳-۵) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون حمام فراصوت.



شکل (۳-۶) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین بر روی همزن مغناطیسی.

پس از توزیع پرکننده‌های در رزین، مطابق شکل (۷-۳) بشر را درون دسیکاتور قرار داده‌شد و با ایجاد خلاء عملیات حباب‌گیری به مدت ۳۰ min انجام شد. سپس ماده سخت‌کننده به مخلوط اضافه شد و به مدت ۲ min توسط همزن مکانیکی هم‌زده شد. عملیات حباب‌گیری دوباره برای ۵ min انجام شد.

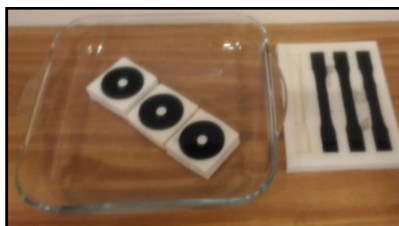


شکل (۷-۳) نحوه قرارگیری بشر حاوی پرکننده‌های نانوساختار و رزین درون دسیکاتور.

سپس مخلوط به درون قالب‌های سیلیکونی که متناسب با محدودیت‌های دستگاه آزمون سایش، از پیش طراحی و ساخته شده‌است منتقل شد (شکل (۸-۳)). نمونه‌ها به مدت ۲۴h در دمای 30°C مطابق شکل (۳-۹) سخت شدند.



شکل (۸-۳) ماده‌سازی قالب سیلیکونی (سمت راست)، قالب سیلیکونی (سمت چپ).



شکل (۹-۳) قالب‌گیری نمونه‌ها.

۳-۴- آزمونهاى انجام شده

۳-۴-۱- آزمون سایش

جهت انجام آزمون سایش از دستگاه پین بر روى ديسك ساخت شركت آريا مدرن صنعت استفاده شد. پين كه از جنس فولاد بلبرينگ (۶ Cr ۱۰۰) با سختى ۶۰ راكول با قطر ۱۰ mm و طول ۶۰ mm ساخته شد عضو سايا است. نمونه ديسكى عضو ساييده شونده و ماده مورد آزمایش است كه روى ديسك دستگاه بسته مى‌شود. پس از ساخت نمونه‌ها و تراز كردن سطح آن‌ها توسط دستگاه تراش، نمونه‌ها با استفاده از استون تمیز گردیده و وزن هر نمونه با ترازو، با دقت 0.001 g اندازه‌گیری و ثبت شد.

۳-۴-۱- معرفی قسمت‌های مختلف دستگاه:

قسمت‌های مختلف دستگاه آزمون سایش در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شكل (۳-۱۰) قسمت‌های مختلف دستگاه آزمون سایش.

۳-۴-۱-۱-۱- مشخصات سیستم مکانیکی

- نیروی عمودی توسط سروجک و تنظیم نیرو توسط نرم افزار تا حداکثر ۱۰kgf اعمال می گردد.
- محرک دیسک، سروموتور با قدرت ۴۰۰w و حداکثر سرعت ۲۵۰rpm و گیربکس با نسبت ۱/۱۲
- قابلیت جابجایی محل پین روی دیسک و قابلیت نصب پین از قطر ۱ mm تا ۱۴ mm
- قابلیت نصب انواع دیسک با قطرهای مختلف تا قطر ۲۵ cm

۳-۴-۱-۱-۲- مشخصات سیستم اندازه گیری، کنترل و نرم افزار:

- قابلیت تنظیم سرعت دیسک از طریق نرم افزار تا سرعت ۲۵۰ rpm با کنترل حلقه بسته سرعت با دقت ۰/۰۱
- قابلیت نمایش نیروی عمودی در نرم افزار که به وسیله سنسور مربوطه اندازه گیری می شود
- تبدیل تعداد دور یا زمان سایش به مسافت طی شده از طریق نرم افزار
- تنظیم سرعت خطی دیسک بر اساس قطر مسیر سایش توسط نرم افزار
- سنسور دما از نوع ۱۰۰PT برای اخذ دمای نمونه. (حروف PT در نام این سنسورها به دلیل استفاده از پلاتینیوم با نام اختصاری Pt در جدول عناصر است. عدد ۱۰۰ نشان دهنده این موضوع است که در صفر درجه سانتیگراد این سنسور ۱۰۰ اهم مقاومت دارد.)
- سنسور نیروی اصطکاک با ظرفیت ۱۰Kgf
- سنسور اندازه گیری نرخ سایش تحت فشار کم بروی سطح تنظیم می شود و با شروع سایش و عمیق شدن شیار سایش، نرخ سایش را اندازه می گیرد.

- محاسبه ضریب اصطکاک از روی نیروی عمودی و نیروی اصطکاک و ارائه نمودار مربوطه
 - نمایش لحظه‌ای داده‌ها (زمان، دور، دما و نیرو) به صورت نمودار در نرم افزار
 - ذخیره داده‌ها به صورت فایل اکسل
 - تنظیم اتمام آزمایش بر حسب تعداد دورهای دیسک در نرم افزار
 - قابلیت اجرای آزمون در شرایط نیروی عمودی ثابت و سرعت افزایشی دیسک از حداقل دور تا حداکثر آن با شیب تنظیم شده توسط نرم افزار
 - قابلیت اجرای آزمون در شرایط سرعت ثابت دیسک و نیروی عمودی افزایشی از حداقل نیرو تا حداکثر آن با شیب تنظیم شده توسط نرم افزار
- این آزمون طبق استاندارد ASTM-G99-04 انجام شد. خروجی‌های این آزمون کاهش وزن نمونه و ضریب اصطکاک بر حسب مسافت است. با استفاده از قسمت کنترل موجود بر روی نرم افزار دستگاه شرایط اولیه آزمون مطابق جدول (۳-۳) اعمال شد.

جدول (۳-۳) شرایط آزمون در دمای محیط.

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

۳-۴-۲- آزمون کشش

جهت انجام آزمون کشش از دستگاه اینسترون^۱ مدل ۸۸۰۲ استفاده شد. سرعت کشش طبق استاندارد ASTM D638، 2 mm. min^{-1} در نظر گرفته شد. در شکل (۱۱-۳) تصویر این دستگاه دیده می‌شود.



شکل (۱۱-۳) تصویر دستگاه اینسترون مدل ۸۸۰۲.

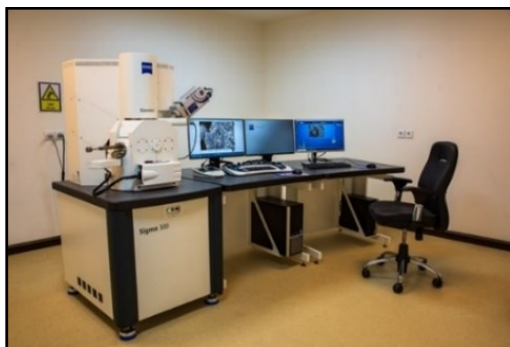
^۱ Instron 8802

۳-۵- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی

جهت تهیه تصاویر FESEM^۱ از سطوح نمونه‌ها، ابتدا فرایند آماده‌سازی سطح نمونه‌ها انجام شد برای نمونه‌های شکسته‌شده حاصل از آزمون کشش، مقطعی که دچار شکست شده را به طول تقریبی ۱ cm برش داده به‌صورتی که شامل سطح شکست نیز باشد. جهت رسانا کردن نمونه برای اینکه الکترون در حین عملیات تصویرگیری بتواند از سطح نمونه منتقل شود، یک لایه‌ی نازک از چسب کربنی مخصوص مطابق شکل (۳-۱۲) به نمونه چسبانده می‌شود. توسط دستگاه اسپاترینگ رومیزی، پوششی از جنس آلیاژ طلا - پالادیوم در شرایط خلاء روی سطح نمونه‌ها نشانده می‌شود. نمونه‌ها پس از پوشش‌دهی بر روی نمونه‌گیر دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثرمیدانی ساخت آلمان مدل Sigma 300 HV Zeiss جهت تصویر برداری قرار می‌گیرند (شکل (۳-۱۳)).



شکل (۳-۱۲) چسباندن لایه کربنی مخصوص.



شکل (۳-۱۳) دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثرمیدانی.

^۱ Field Emission Scanning Electron Microscopy

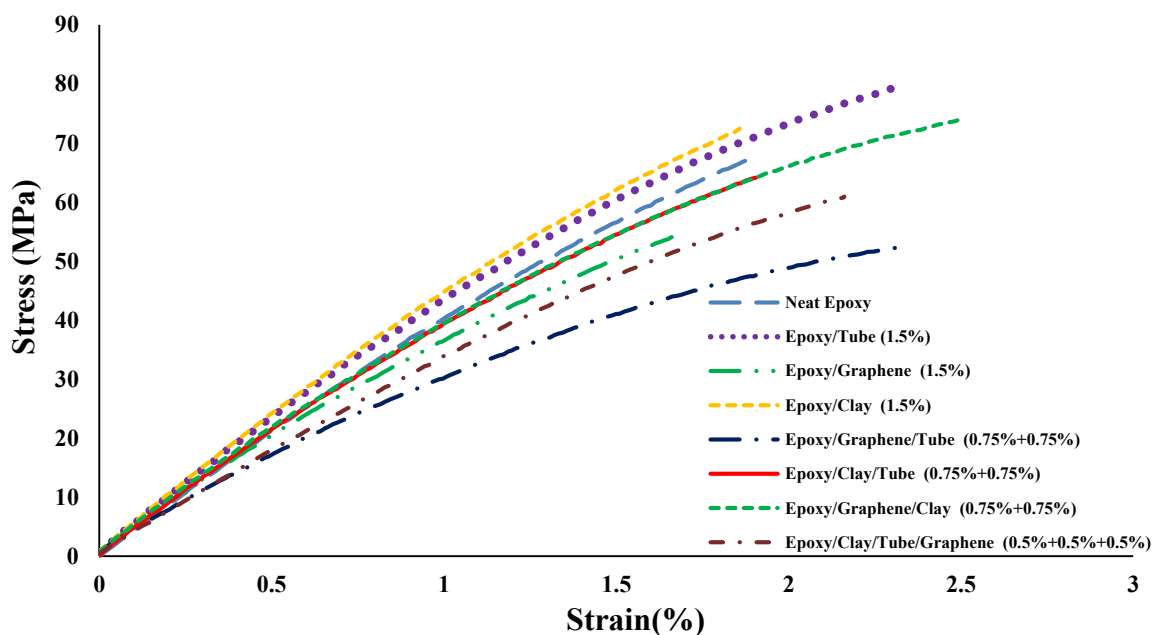
فصل ۴: نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

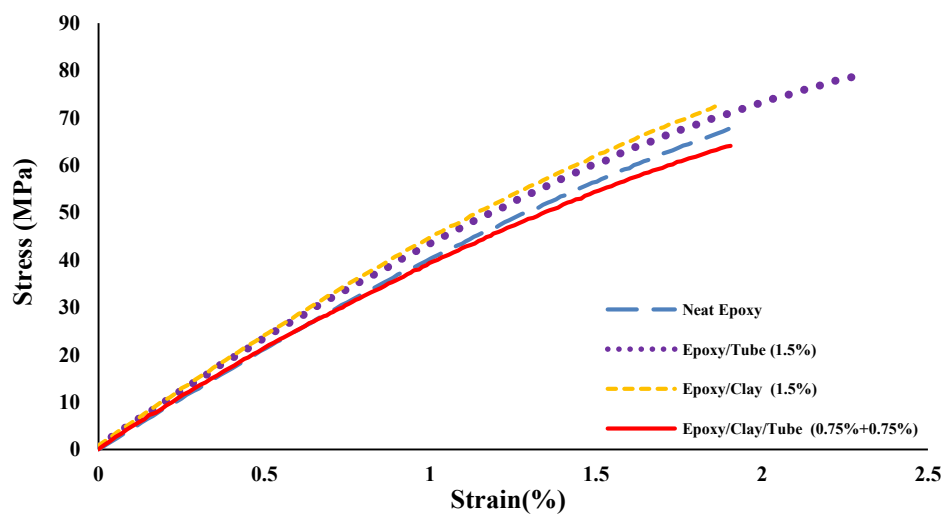
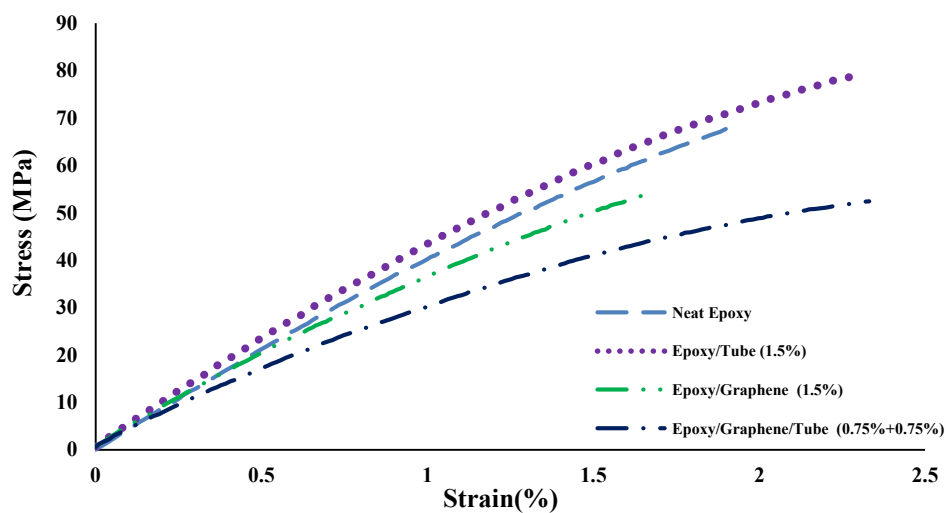
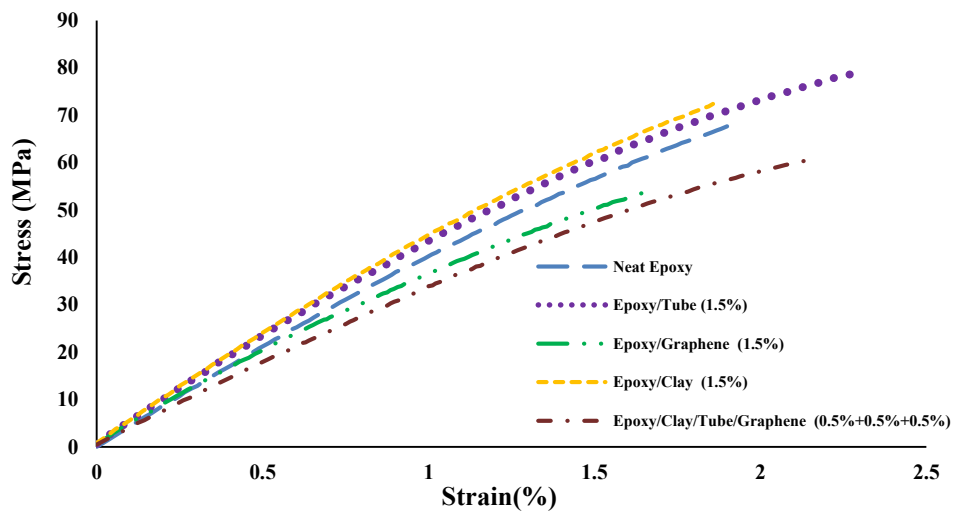
در این فصل نخست با استفاده از نتایج حاصل از آزمون کشش، اثر افزودن نانوساختارها با نوع و درصد متفاوت بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری بررسی می‌گردد؛ سپس رفتار سایشی این کامپوزیت‌ها مطالعه می‌شود.

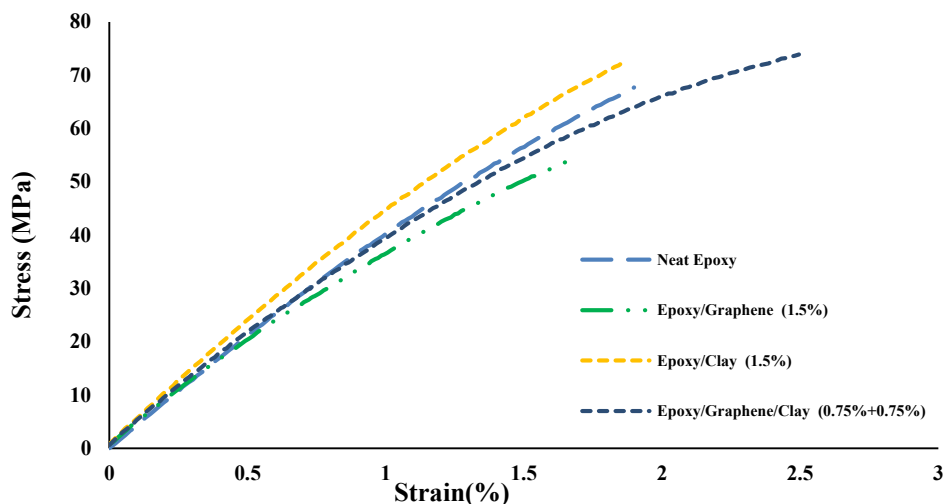
۴-۲- نتایج آزمون کشش نمونه‌های ساخته شده

با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده تعیین گردید. نمودار تنش- کرنش اپوکسی خالص، اپوکسی/ نانولوله کربنی، اپوکسی/ نانواکسید گرافن، اپوکسی/ نانورس، اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسید گرافن، اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانورس، اپوکسی/ نانواکسید گرافن/ نانورس و اپوکسی/ نانولوله کربنی/ نانواکسید گرافن/ نانورس در شکل (۴-۱) و جهت مقایسه بهتر به صورت مجزا در شکل (۴-۲) آورده شده است.



شکل (۴-۱) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیتی.





شکل (۲-۴) مقایسه نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیتی به صورت مجزا.

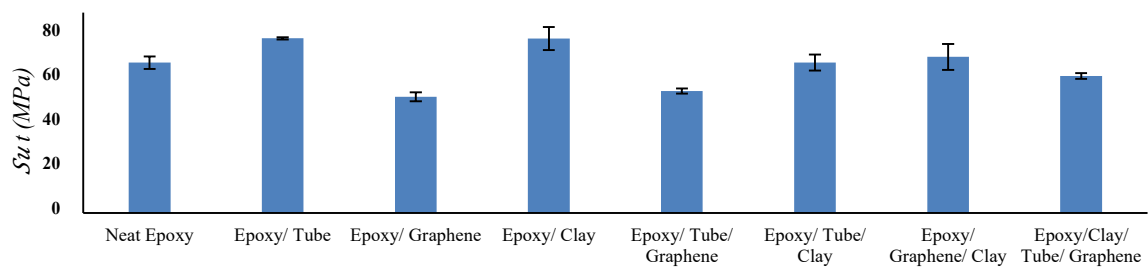
از هر ماده مورد مطالعه، تعداد ۳ نمونه استاندارد ساخته و میانگین نتایج گزارش شده‌است (پیوست د). کرنش در هنگام شکست (ϵ_b)، مقاومت کششی نهایی (S_{ut})، مدول الاستیک (E) و چقرمگی (UT) خواص مکانیکی بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه‌ها در جدول (۴-۱) آورده شده‌است.

جدول (۴-۱) خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن.

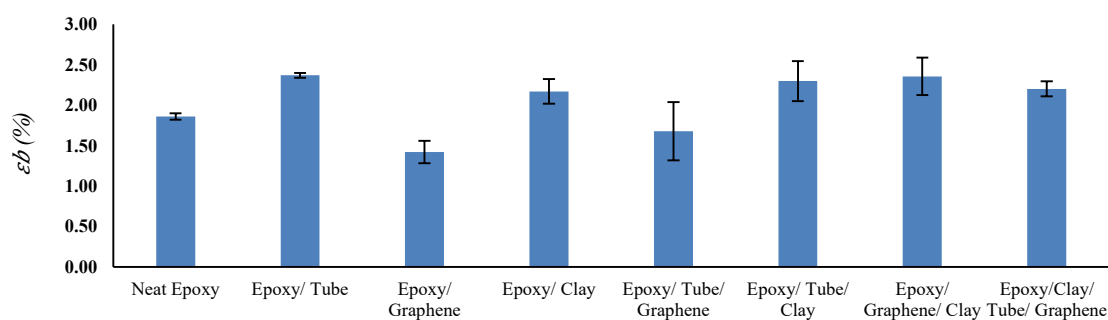
نوع کامپوزیت	$\epsilon_b(\%)$	$S_{ut}(\text{MPa})$	$E(\text{GPa})$	$UT(\text{J/m}^3)$
اپوکسی	۱/۸۶	۶۷/۵۷	۴/۱۹	۵۶/۲۴
اپوکسی / نانولوله کربنی	۲/۳۷	۷۸/۴۸	۴/۴۵	۷۷/۳
اپوکسی / نانواکسید گرافن	۱/۴۲	۵۲/۲۱	۳/۹۹	۳۸/۶۷
اپوکسی / نانورس	۲/۱۷	۷۸/۳۸	۴/۴۱	۷۸/۹۸
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن	۱/۶۸	۵۴/۸۲	۳/۳۶	۴۷/۰۶
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس	۲/۳۰	۶۷/۶۴	۳/۸۱	۶۹/۶۳
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانورس	۲/۳۶	۷۰/۱۴	۳/۷۹	۷۹/۷۲
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن / نانورس	۲/۲۰	۶۱/۶۱	۳/۳۹	۵۸/۱۵

میزان میانگین به همراه انحراف استاندارد^۱ که نحوه پراکندگی داده‌های حاصل از آزمایش را حول میانگین‌شان توصیف می‌کند در شکل‌های (۴-۳) تا (۴-۶) نشان داده شده‌است.

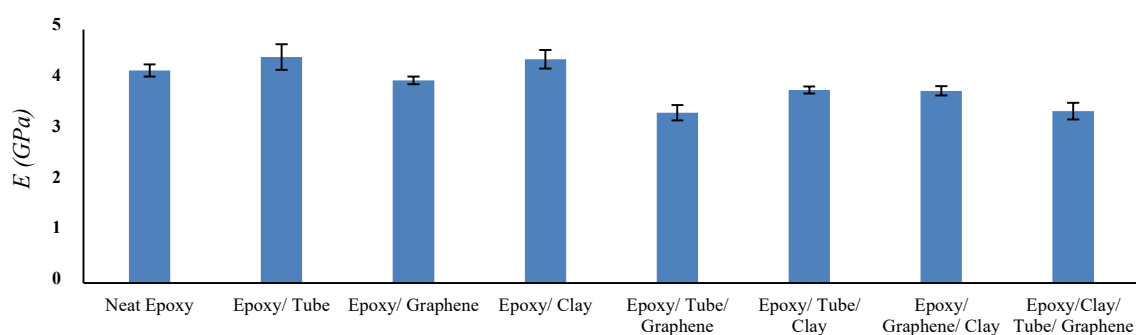
^۱ Standard deviation



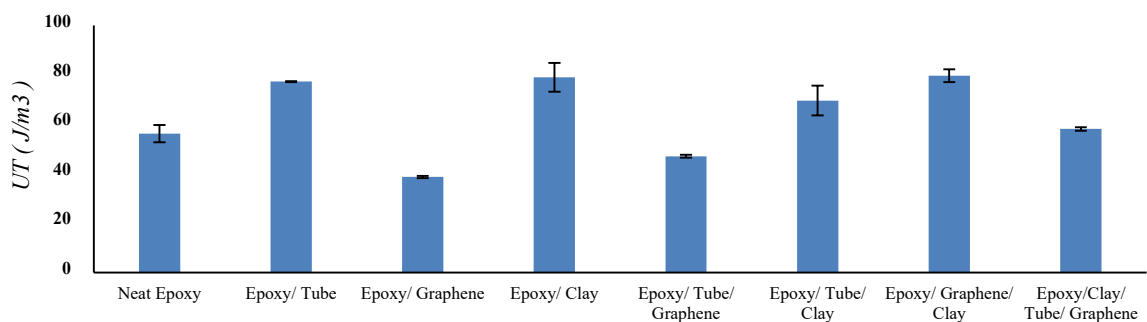
شکل (۳-۴) مقاومت کششی نهایی نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.



شکل (۴-۴) کرنش شکست نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.



شکل (۵-۴) مدول الاستیک نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.



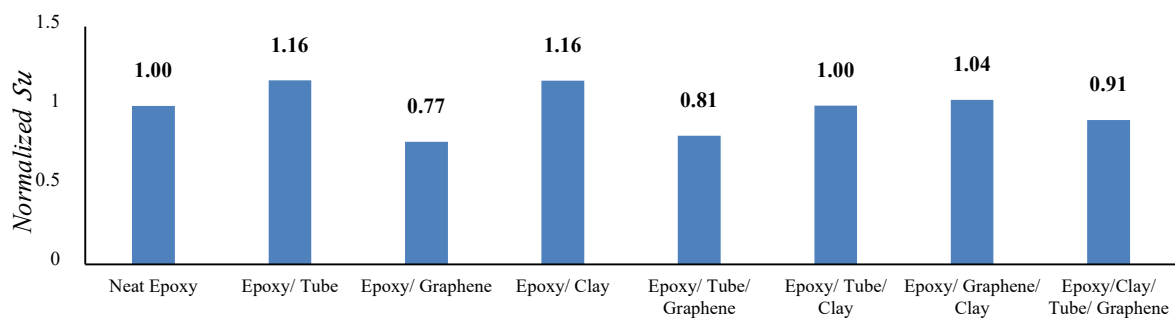
شکل (۶-۴) چقرمگی نمونه اپوکسی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی.

جهت مقایسه بهتر نتایج به دست آمده، نتایج نسبت به خواص اپوکسی خالص بی بعد شدند. نتایج بی بعد شده در شکل های (۷-۴) تا (۱۰-۴) نمایش داده شده اند.

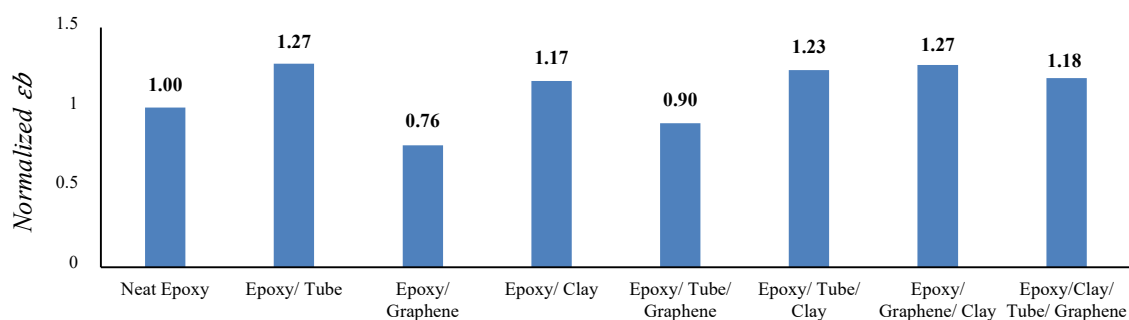
شکل (۷-۴) مقاومت کششی نهایی بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی نسبت به اپوکسی خالص را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود مقاومت کششی نمونه های کامپوزیتی اپوکسی / نانولوله کربنی با $\% ۱۶/۱$ افزایش از $۶۷/۵۷$ به $۷۸/۴۸$ و اپوکسی / نانورس با $\% ۱۶$ از $۶۷/۵۷$ به $۷۸/۳۸$ می رسد. مقاومت کششی نهایی نمونه اپوکسی / نانواکسیدگرافن با $\% ۲۳$ کاهش و پس از آن نمونه ترکیبی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن با $\% ۱۹$ کاهش نسبت به اپوکسی خالص در ضعیف ترین جایگاه بین نمونه ها قرار می گیرند. با توجه به نمودارها به نظر می رسد چسبندگی سطحی خوب بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی، انتقال تنش بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی افزایش می دهد [۴۰]. کرنش شکست بی بعد شده نمونه ها نسبت به اپوکسی خالص در شکل (۸-۴) نشان داده شده است. 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 داده اند. افزودن نانواکسیدگرافن به رزین اپوکسی، کرنش شکست اپوکسی را در حدود $\% ۲۴$ کاهش می دهد. کرنش شکست نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن نیز پس از نمونه حاوی $\% ۱/۵$ نانواکسیدگرافن با $\% ۱۰$ کاهش نسبت به اپوکسی خالص قرار می گیرد. شکل (۹-۴) مدول الاستیک بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی را نسبت به اپوکسی خالص نشان می دهد. بیشترین مدول الاستیک مربوط به نمونه های اپوکسی / نانولوله کربنی با $\% ۶/۳$ افزایش از $۴/۱۹$ GPa به $۴/۴۵$ GPa و اپوکسی / نانورس با $\% ۵/۴$ افزایش از $۴/۱۹$ به $۴/۴۱$ نسبت به اپوکسی خالص است. بهبود مدول الاستیک به پراکندگی خوب ذرات نانورس، اندازه و چسبندگی سطحی خوب بین ذرات و زمینه اپوکسی نسبت داده می شود به طوری که تحرک زنجیره های پلیمری تحت بارگذاری محدود می شود. جهت گیری لایه های سیلیکات و زنجیره های پلیمری با توجه به جهت بارگذاری نیز می تواند در اثرات تقویت کننده نقش داشته باشد [۵۲].

کمترین مدول الاستیک نیز مربوط به نمونه‌های اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن با 20% کاهش و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن / نانورس با 19% کاهش نسبت به اپوکسی خالص است. در این بین مدول الاستیک نمونه‌های نانو اکسید گرافن / نانورس 10% ، نانولوله کربنی / نانورس 9% و نانو اکسید گرافن 5% نسبت به اپوکسی خالص کاهش داشته‌اند. مطابق شکل (۴-۱۰) چقرمگی نمونه اپوکسی / نانورس / نانو اکسید گرافن نسبت به دیگر نمونه‌ها در وضعیت بهتری قرار دارد، این نمونه با 42% افزایش نسبت به نمونه اپوکسی خالص در صدر جدول قرار می‌گیرد. این افزایش نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی خوب این دو پرکننده نانو ساختار با یکدیگر است. پس از آن نمونه اپوکسی / نانورس با 40% افزایش و نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی با 37% افزایش نسبت به اپوکسی خالص قرار می‌گیرند. از طرفی نمونه‌های اپوکسی / نانو اکسید گرافن 31% و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن 16% نسبت به اپوکسی خالص در چقرمگی کاهش داشته‌اند. نتایج کلی نشان می‌دهد که دستیابی به پراکندگی یکسان در درصد بالای پرکننده‌های نانو ساختار به دلیل برهم‌کنش آن‌ها و ایجاد کلوخه‌ها، بسیار مشکل است. افزایش کلوخه‌ها با ایجاد تمرکز تنش باعث کاهش استحکام و شکست ماده می‌شود. با افزودن نانو اکسید گرافن، کشیدگی در هنگام شکست به‌وضوح کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند کامپوزیت‌های اپوکسی / نانو اکسید گرافن و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن شکننده‌تر هستند [۵۳].

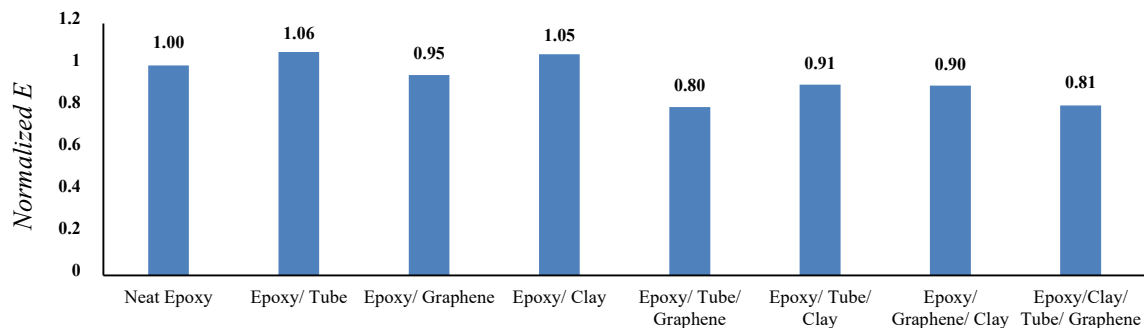
به‌همین دلیل شاهد کاهش مدول ینانگ، استحکام کششی نهایی، چقرمگی و مقاومت در برابر شکستگی هستیم. در بین نمونه‌ها، اپوکسی / نانو اکسید گرافن نسبت به دیگر نمونه‌ها کمترین خواص مکانیکی را از نظر استحکام کششی، کرنش شکست و چقرمگی از خود نشان داد.



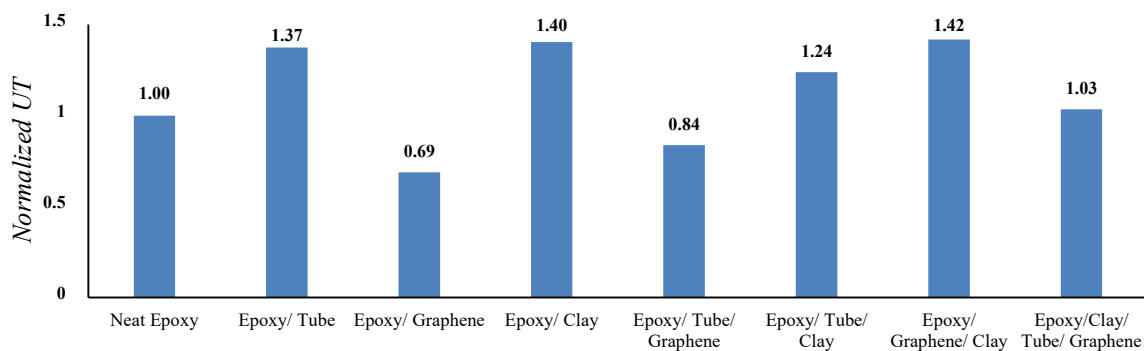
شکل (۴-۷) مقاومت کششی نهایی بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.



شکل (۴-۸) کرنش شکست بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.



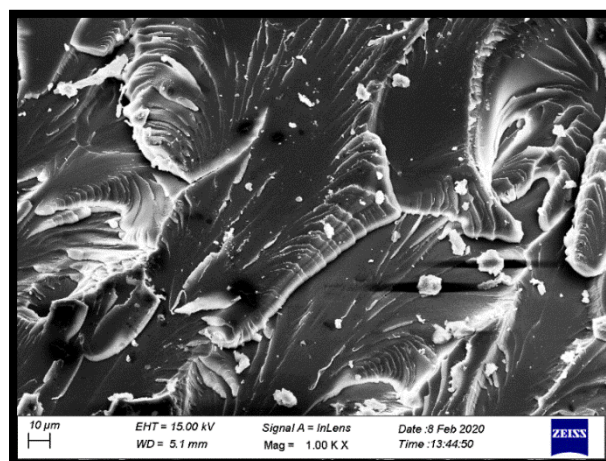
شکل (۴-۹) مدول الاستیک بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.



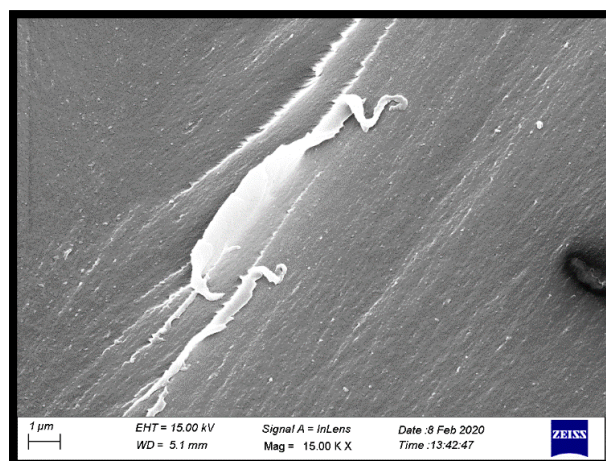
شکل (۴-۱۰) چقرمگی بی بعد شده نمونه های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص.

۴-۲-۱- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مقاطع شکست نمونه‌ها

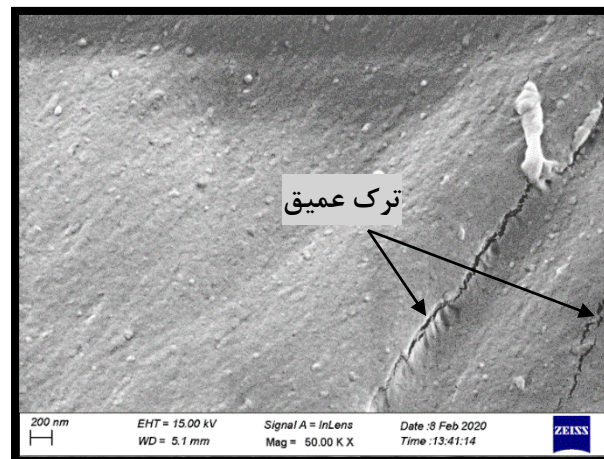
سطوح شکست نمونه‌ها برای بررسی علل و مکانیسم‌های شکست با استفاده از تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شدند. شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۸) تصاویر FESEM از مقاطع شکست اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های آن‌را، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴-۱۱-الف-ب) دیده می‌شود سطح شکست در اپوکسی خالص به صورت کاملاً روان است، حرکت روان لایه‌ها حاکی از شکست ترد نمونه است [۵۳]. در شکل (۴-۱۱-ج) شکاف‌های عمیق در سطح اپوکسی خالص دیده می‌شود.



(الف)



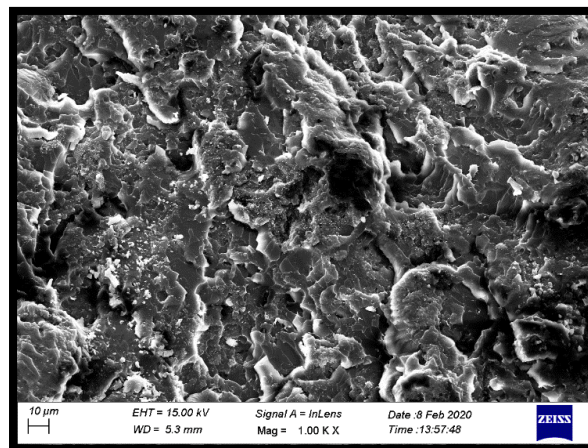
(ب)



(ج)

شکل (۴-۱۱) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی خالص.

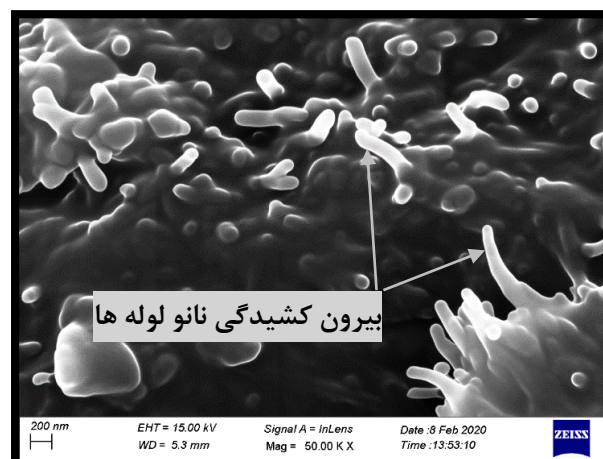
شکل (۴-۱۲) سطح مقطع شکست کامپوزیت تقویت شده با $1/5\%$ نانولوله کربنی را نمایش می‌دهد نحوه بیرون زدگی نانولوله‌های کربنی پس از بارگذاری، نشان از پیوند قوی بین اپوکسی و نانولوله کربنی است. همان‌طور که در تصاویر مشخص است توزیع نانولوله‌های کربنی درون اپوکسی تقریباً به صورت یکنواخت است. ترک‌های ریز در شکل (۴-۱۲-الف) و تغییر جهت آن‌ها به علت برخورد ترک به نانولوله‌های کربنی و تغییر جهت ترک است. در این نمونه 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. در تمام نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی مشاهده می‌شود برخی از نانولوله‌های کربنی از سطح شکستگی بیرون کشیده شده‌اند (شکل (۴-۱۲-ب - ج))، همچنین شکستگی نانولوله‌ها حاکی از مقاومت نانولوله‌های کربنی در برابر شکست است.



(الف)



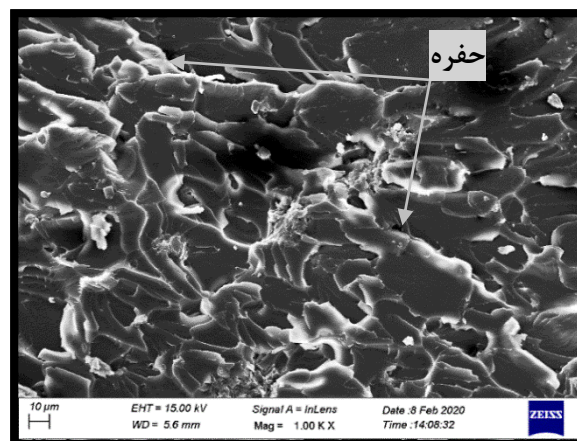
(ب)



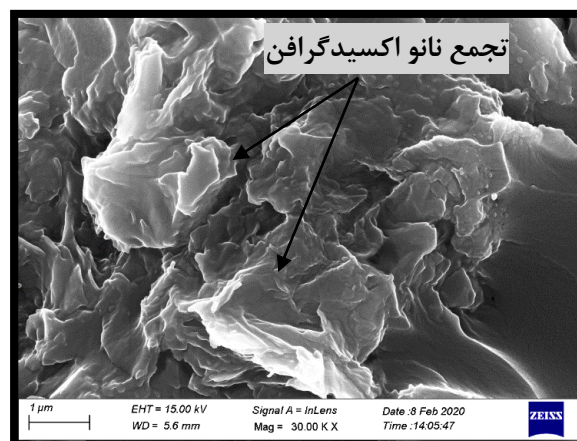
(ج)

شکل (۴-۱۲) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی.

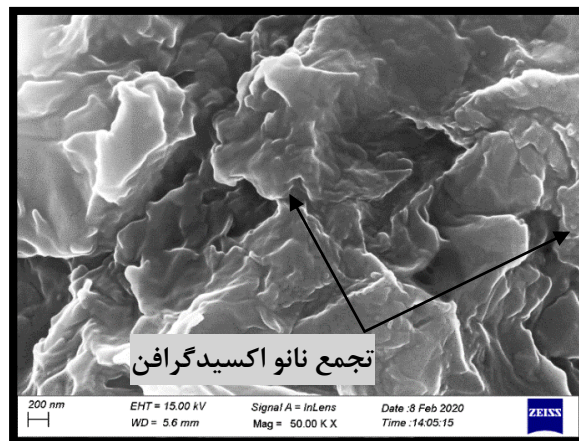
سطح مقطع شکست کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانواکسیدگرافن در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. در شکل (۴-۱۳-الف) سطح شکستگی، ابر مانند و خشن دیده می شود [۵۳]. حفره های موجود در شکل می تواند ناشی از جدایش توده نانوصفحات از سطح شکست باشد. همانطور که در تصاویر (۴-۱۳-ب-ج) نشان داده شده است، تجمع اجتناب ناپذیر نانواکسیدگرافن باعث کاهش خواص اپوکسی/نانواکسیدگرافن شده است. علاوه بر این، نانواکسیدگرافن ها تمایل به خمیدگی و قلاب زدن دارند. دلایل فوق به وخامت نسبت ابعادی موثر و سطح نانواکسیدگرافن ها کمک می کند. این تخریب منجر به چسبندگی سطحی ضعیف بین زمینه و پرکننده می شود که بهبود خصوصیات مکانیکی را محدود می کند [۵۴]. در تراکم بالای ذرات، فاصله بین ذرات کم می شود و در نتیجه با کلوخه شدن ذرات و توزیع نامناسب ذرات در کل زمینه، باعث افت مقاومت کامپوزیت، به دلیل تمرکز تنش می شود [۵۴].



(الف)



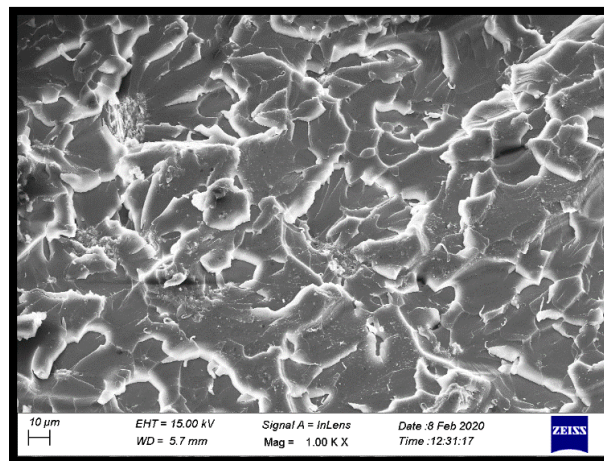
(ب)



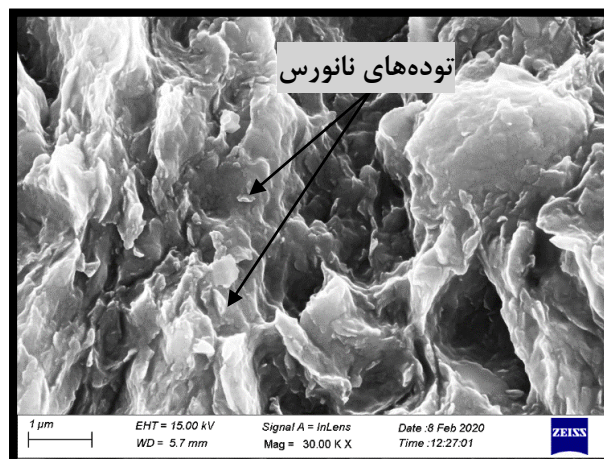
(ج)

شکل (۴-۱۳) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسید گرافن.

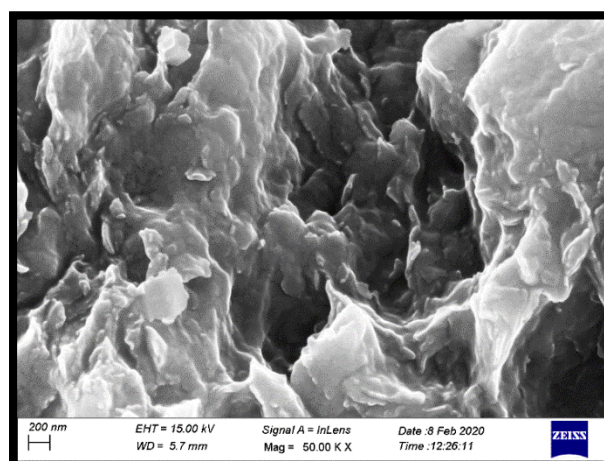
تصاویر کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانورس در شکل (۴-۱۴) آورده شده است. از آنجا که نانورس آب دوست است غالباً با اصلاح شیمیایی آن را جهت بهبود خواص پلیمرهای آب گریز آماده سازی می کنند. مکانیسم تشکیل ترک در نمونه حاوی ذرات نانورس به خاطر به هم پیوستن ذرات، با ترک تشکیل شده در نمونه اپوکسی خالص کاملاً متفاوت است (شکل (۴-۱۴-الف)) و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی اپوکسی می شود [۵۵]. اتصال خوب بین ذرات و زمینه‌ی این نمونه در برابر ایجاد شکاف و رشد ترک مقاومت می کند، بنابر این منجر به افزایش انرژی شکست و در نتیجه بهبود مقاومت در برابر شکست می شود [۵۶]. این نمونه بعد از نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی بهترین عملکرد را دارد. در شکل (۴-۱۴-ب) توده‌های نانورس قابل مشاهده است. نمونه نانورس، به دلیل اثر بهم پیوستن، افزودن نانورس می تواند مکانیسم تشکیل ترک را تغییر دهد (شکل (۴-۱۴-ج)).



(الف)



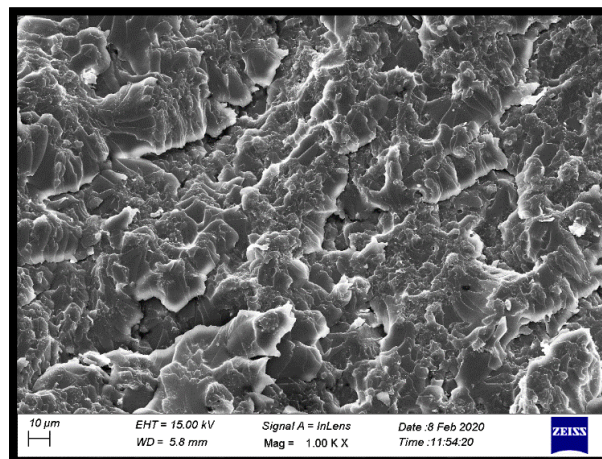
(ب)



(ج)

شکل (۴-۱۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانورس.

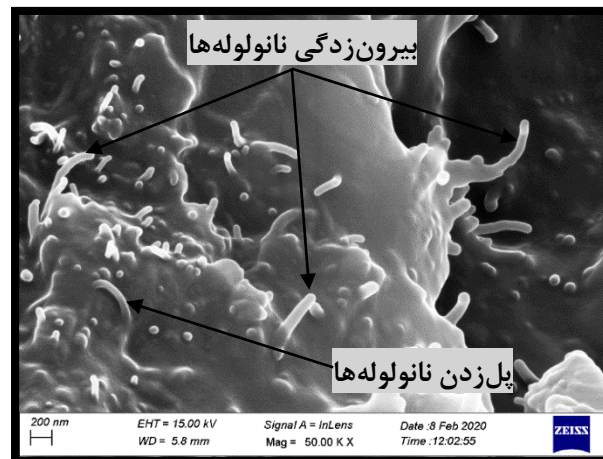
شکل (۴-۱۵) کامپوزیت حاوی ۰/۷۵٪ نانولوله کربنی و ۰/۷۵٪ نانواکسیدگرافن را به تصویر می‌کشد. سطح شکست در شکل (۴-۱۵-الف) در بزرگنمایی $10\ \mu\text{m}$ نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴-۱۵-ب) دیده می‌شود پرکننده‌های نانوساختار اکسیدگرافن و نانولوله‌های کربنی جمع شده و تشکیل توده‌های بزرگ داده‌اند. این توده‌ها باعث تمرکز تنش و ضعف در استحکام کششی کامپوزیت شده است. نتایج آزمون کشش برای کامپوزیت حاوی این دو نانوساختار حاکی از افت شدید خواص مکانیکی نسبت به اپوکسی خالص است؛ به طوری که در مقاومت کششی ۱۸٪ و چقرمگی ۱۶٪ کاهش دیده می‌شود. بیرون کشیدگی و پل زدن نانولوله‌های کربنی در شکل (۴-۱۵-ج) به وضوح قابل مشاهده است.



(الف)



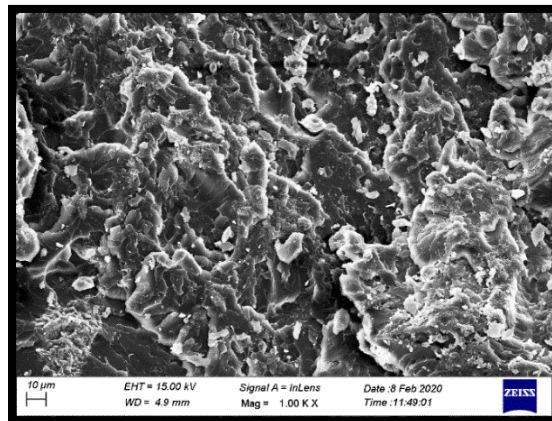
(ب)



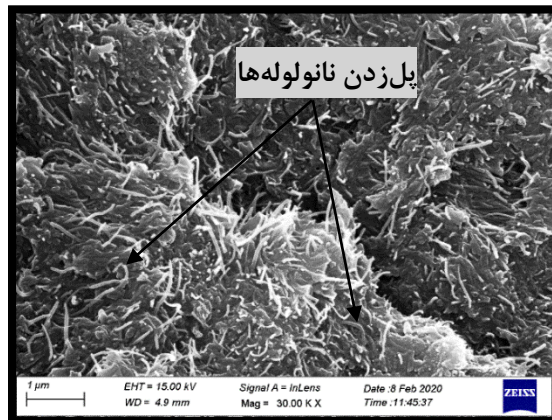
(ج)

شکل (۴-۱۵) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن.

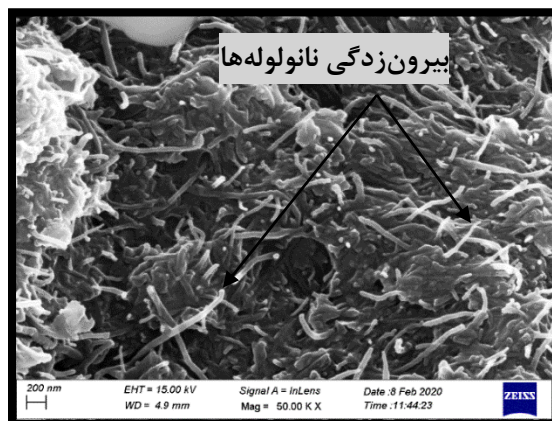
تصاویر مربوط به کامپوزیت اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس بعد از آزمون کشش در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. جهت گیری پرکننده‌های نانوساختار رس و نانولوله کربنی نقش بسیار مهمی در تنش و کرنش زمینه دارد. همان طور که در شکل (۴-۱۶-الف) واضح است نانولوله‌های کربنی بدون جمع شدن در نانورس پخش و به طور یکنواخت پراکنده شده‌اند. هر دو نوع نانوساختار با هم‌افزایی به پراکنده شدن بهتر یکدیگر کمک می‌کنند و تا حد خوبی از توده‌ای شدن جلوگیری می‌کنند. هم‌افزایی بین ذرات نانولوله کربنی و ذرات نانورس به دلیل پیوند مناسب بین این دو نانوساختار رخ می‌دهد [۵۷]. مطابق شکل (۴-۱۶-ب) ذرات در تعامل با یکدیگر بین زنجیره‌های پلیمری اپوکسی قرار گرفته و مانع حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌شوند [۵۸]. شکل (۴-۱۶-ج) کشیدگی نانولوله‌های کربنی که نمایشگر مقاومت به کشش این پرکننده‌های نانوساختار در برابر شکست است نشان می‌دهد.



(الف)



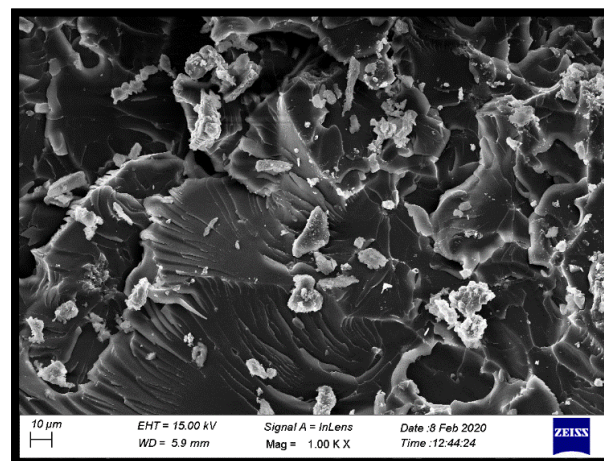
(ب)



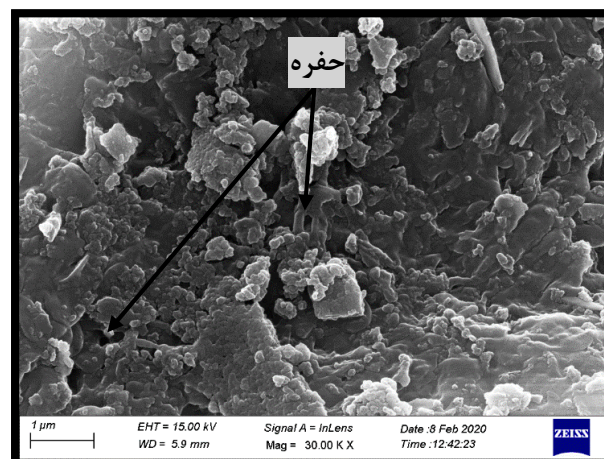
(ج)

شکل (۴-۱۶) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس.

شکل (۴-۱۷) سطح مقطع شکستگی کامپوزیت را با ۰/۷۵٪ نانواکسیدگرافن و ۰/۷۵٪ نانورس را نشان می‌دهد. افزودن نانورس به نانواکسیدگرافن باعث افزایش استحکام کامپوزیت شد (شکل (۴-۱۷-الف)). توده‌های نانورس می‌توانند باعث به هم پیوستن مکانیکی درون کامپوزیت‌ها و در نتیجه از بین بردن انتشار ترک شوند [۵۶]. حفره‌های کوچک با تعداد کمی در شکل (۴-۱۷-ب) قابل مشاهده‌است. توده‌های نانورس و نانواکسیدگرافن در شکل (۴-۱۷-ج) دیده می‌شود.



(الف)



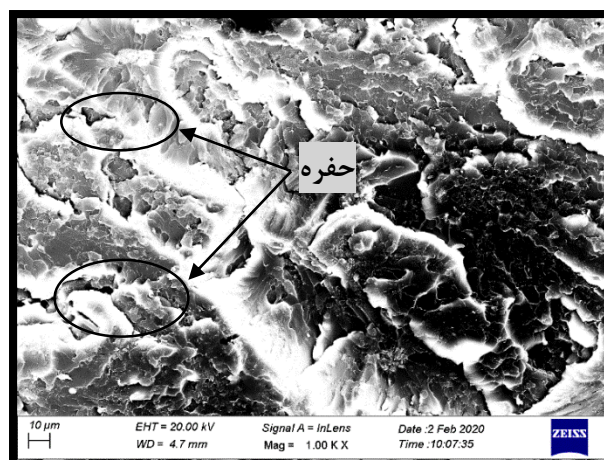
(ب)



(ج)

شکل (۱۷-۴) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس.

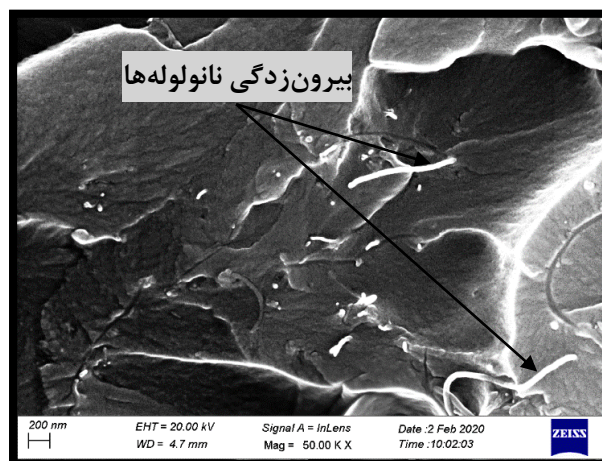
سطح مقطع شکست کامپوزیت اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن / نانورس با 0.5% از هر نوع نانوکامپوزیت در شکل (۱۸-۴) به تصویر درآمده است. حفره‌های موجود که در شکل (۱۸-۴-الف) قابل مشاهده هستند. همچنین تجمع پرکننده‌های نانوساختار در شکل (۱۸-۴-ب) دیده می‌شود نمایان‌گر توزیع غیر یکنواخت پرکننده‌های نانوساختار است که باعث تمرکز تنش است. حفره‌ها و توده‌های نانوساختارها ممکن است عامل اصلی کاهش خواص این کامپوزیت هیبریدی نسبت به نمونه‌های دیگر باشند. به طوری که چقرمگی این کامپوزیت تنها 3% و کرنش در نقطه شکست 18% بیشتر از اپوکسی خالص است بیرون‌زدگی نانولوله‌های کربنی بیانگر تحمل بار توسط این ذرات است (شکل (۱۸-۴-ج)).



(الف)



(ب)



(ج)

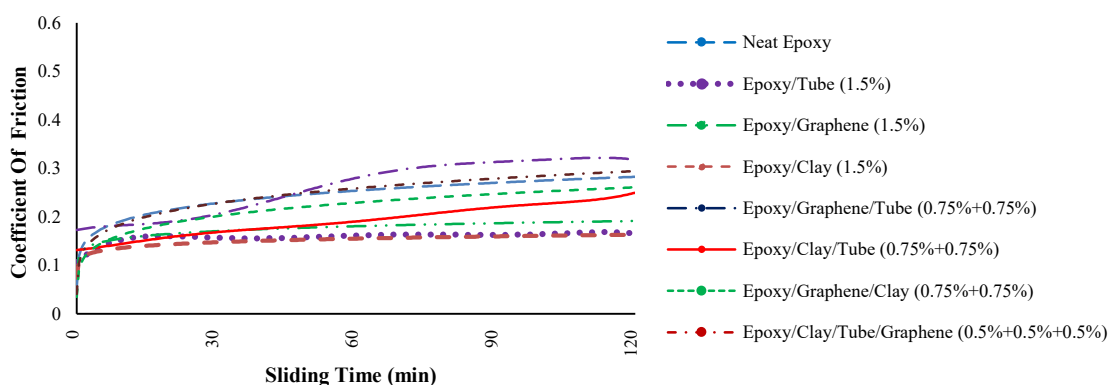
شکل (۴-۱۸) تصویر FESEM سطح مقطع شکست نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن / نانورس.

۴-۳- نتایج آزمون سایش نمونه‌های تولید شده

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از آزمون سایش بر روی نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن پرداخته می‌شود؛ و جزئیات به‌طور کامل مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج در قالب نمودارهای برای ضریب اصطکاک، کاهش وزن و نرخ سایش ویژه به‌صورت کلی و جزئی ارائه می‌گردد. عملکرد هر نمونه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد و با دیگر نمونه‌ها برای بارگذاری‌های متفاوت مقایسه می‌شود. در پایان مورفولوژی سطوح سایش که با استفاده از FESEM به‌دست آمده بررسی می‌گردد.

۴-۳-۱- ضریب اصطکاک

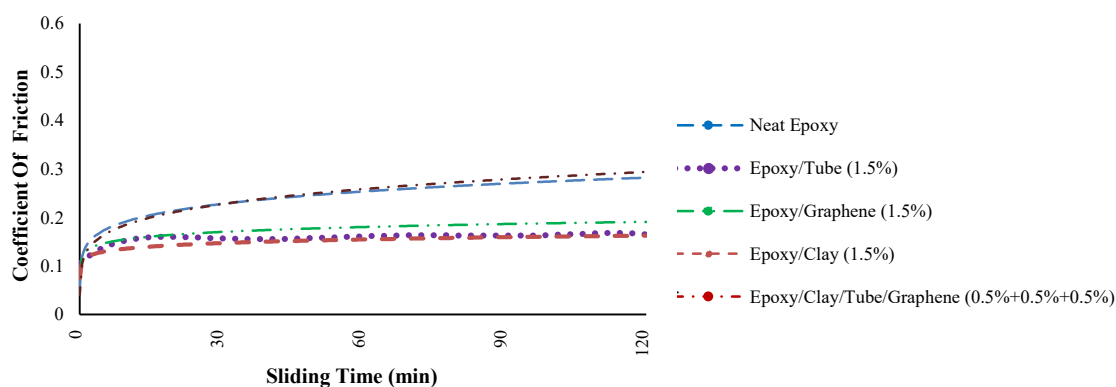
نمودارهای ضریب اصطکاک از خروجی‌های دستگاه که قابلیت محاسبه ضریب اصطکاک از روی نیروی عمودی با مقدار ثابت و نیروی اصطکاک را دارد به دست آمد. شکل (۴-۱۹) نمودارهای ضریب اصطکاک در بار ۶۰ N نمونه اپوکسی خالص و نمونه‌های کامپوزیتی آن را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه کامپوزیتی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن است و کمترین ضریب اصطکاک در نمونه کامپوزیتی با اپوکسی / نانورس دیده می‌شود.



شکل (۴-۱۹) ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص و نمونه‌های کامپوزیتی.

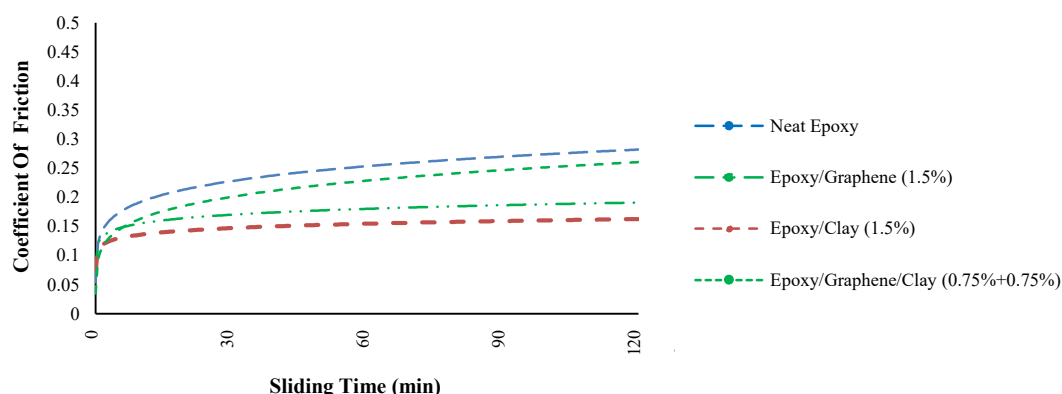
در شکل‌های (۴-۲۰) الی (۴-۲۳) به بررسی و مقایسه جزئی‌تر نمودارها می‌پردازیم: شکل (۴-۲۰) نمودار نمونه اپوکسی خالص، سه نمونه کامپوزیتی هر کدام با ۱/۵٪ از پرکننده‌های نانوساختار رس، نانو اکسید گرافن و نانولوله کربنی و نمونه کامپوزیتی ترکیب هر سه نانوساختار را نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار نمونه هیبریدی بیشترین ضریب اصطکاک و نمونه‌ی اپوکسی / نانورس کمترین میزان ضریب اصطکاک را از خود نشان می‌دهد. نمونه ترکیبی پرکننده‌های نانوساختار در ۳۰ min ابتدایی نسبت به اپوکسی خالص ضریب اصطکاک کمتری دارد اما با گذر زمان افزایش ضریب اصطکاک به‌خاطر توده‌ای شدن پرکننده‌های نانوساختار و تجمع آن‌ها در زمینه اپوکسی رخ می‌دهد. در مورد نمونه‌های

اپوکسی که با ساینده فولادی در تماس هستند، یک فیلم انتقال بر روی ساینده تشکیل می‌شود. وقتی این لایه در هر دو سطح تماس ایجاد شود، ترکیب نمونه و ساینده شبیه به هم می‌شود و سپس ضریب اصطکاک پایدار می‌شود [۳۱]. در نمودار نمونه‌ی اپوکسی/نانواکسیدگرافن پس از افزایش میزان ضریب اصطکاک از ۶۰ min به بعد تقریباً روند ثابتی دیده می‌شود این می‌تواند به‌خاطر ایجاد فیلم انتقال بین نمونه و قطعه مقابل باشد [۴۰]. در نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی تا قبل از ۳۰ min افزایش ناگهانی ضریب اصطکاک دیده می‌شود به‌طوری که در ۱۵ min تا ۲۰ min ضریب اصطکاک با نمونه کامپوزیتی نانوآکسیدگرافن برابر می‌شود اما پس از دقایقی افت محسوسی به‌خاطر ایجاد فیلم انتقال توسط نانولوله‌های کربنی در میزان ضریب اصطکاک این نمونه دیده می‌شود [۳۱].



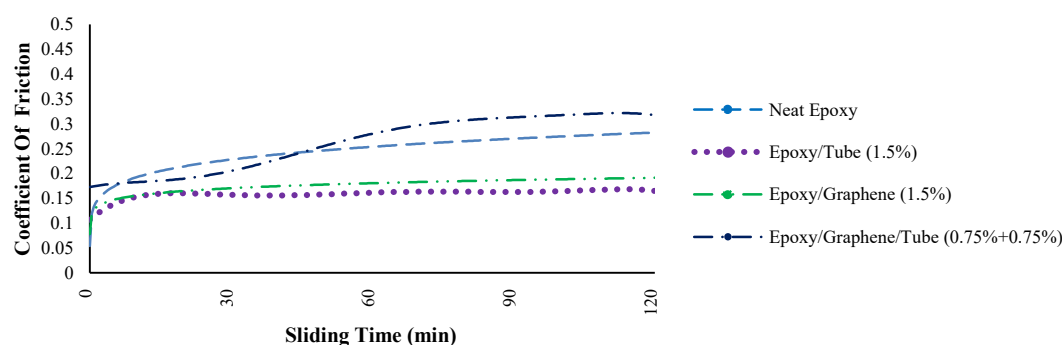
شکل (۴-۲۰) نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص، سه کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانوساختار و ترکیب سه نوع نانوساختار.

شکل (۴-۲۱) به مقایسه ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانوآکسیدگرافن و ترکیب نانورس/نانواکسیدگرافن می‌پردازد. با توجه به‌شکل مشاهده می‌شود کلیه نمونه‌های کامپوزیتی دارای ضریب اصطکاکی پایین‌تر از اپوکسی خالص هستند و نمونه کامپوزیتی حاوی نانورس کمترین میزان ضریب اصطکاک را داراست. طبق نمودار ترکیب نانوآکسیدگرافن با نانورس باعث افزایش ضریب اصطکاک این کامپوزیت شد.



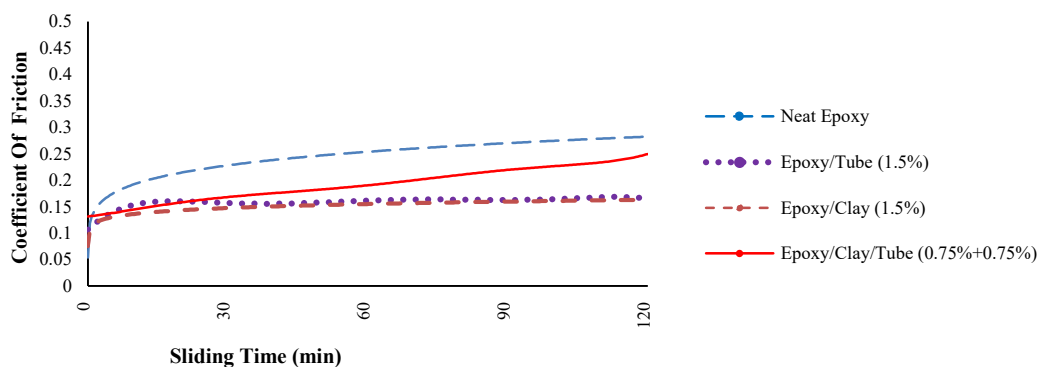
شکل (۴-۲۱) نمودار ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانواکسیدگرافن و اپوکسی / نانورس / نانواکسیدگرافن.

نمودار مقایسه بین ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های نانواکسیدگرافن، نانولوله کربنی و ترکیب این دو را می‌توان در شکل (۴-۲۲) دید. نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی ضریب اصطکاک کمتری نسبت به سه نمونه دیگر از خود نشان می‌دهد. نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن با اختلاف کمی، ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به کامپوزیت حاوی نانولوله کربنی ارائه می‌دهد. اما ترکیب نانولوله کربنی با نانواکسیدگرافن، حاوی ۰/۷۵٪ از هر کدام، کامپوزیتی با ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به اپوکسی خالص می‌سازد که باعث افت خواص سایشی آن می‌شود.



شکل (۴-۲۲) نمودار ضریب اصطکاک نمونه اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های نانوگرافن، نانولوله کربنی و اپوکسی / نانوگرافن / نانولوله کربنی.

در نهایت نمودار ضریب اصطکاک مربوط به اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های نانورس، نانولوله کربنی و ترکیب نانولوله کربنی / نانورس در شکل (۴-۲۳) ارائه شده است. اپوکسی خالص ضریب اصطکاکی بیشتری از هر سه نمونه کامپوزیت، اپوکسی / نانورس، اپوکسی / نانولوله کربنی و ترکیب این دو با ۰/۷۵٪ از هر نوع نانوساختار از خود نشان می‌دهد. نمونه اپوکسی / نانورس با کمترین ضریب اصطکاک در ردیف اول بهبود اپوکسی در برابر سایش قرار دارد. 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. اضافه کردن نانولوله کربنی به نانورس با ایجاد تمرکز توده‌هایی از 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.



شکل (۴-۲۳) نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ی اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های نانورس، نانولوله کربنی و ترکیب اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس.

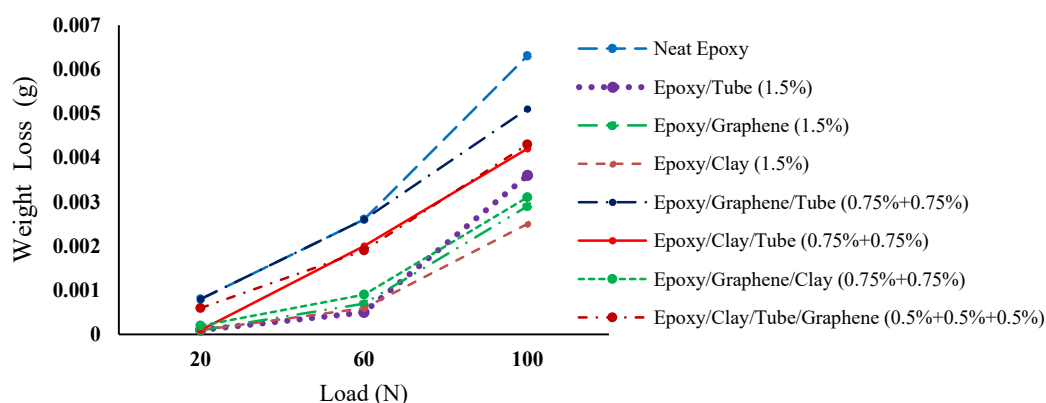
۴-۳-۲- کاهش وزن

برای محاسبه کاهش وزن نمونه‌ها، پس از هر بار آزمون سایش، بقایای سایش جداسازی و تمیزکاری با استون انجام شد، سپس وزن نمونه‌ها ثبت شد. نتایج کاهش وزن در جدول (۴-۲) نمایش داده شده است.

جدول (۴-۲) کاهش وزن برحسب گرم نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن در بارهای مختلف.

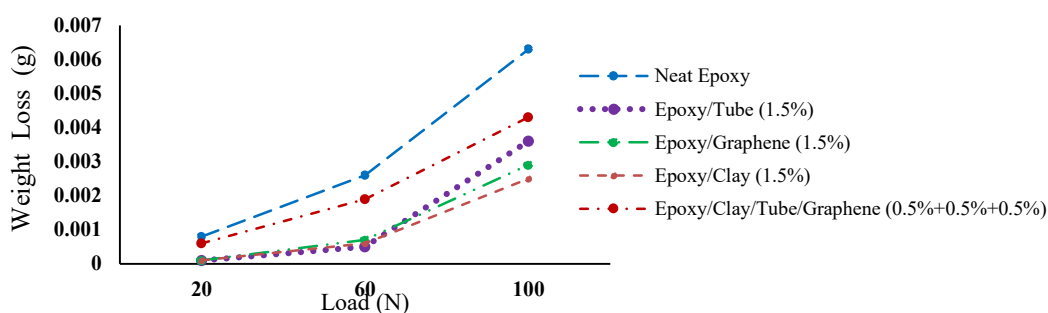
کامپوزیت	۲۰ N	۶۰ N	۱۰۰ N
اپوکسی	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۶۳
اپوکسی / نانولوله کربنی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۳۶
اپوکسی / نانواکسید گرافن	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲۹
اپوکسی / نانورس	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۲۵
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۵۱
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۴۲
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانورس	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۱
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن / نانورس	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۴۳

شکل (۴-۲) نمودار کاهش وزن کل نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. برای بررسی بهتر نمودارها به صورت جزئی‌تر در شکل‌های (۴-۲۵) تا (۴-۲۸) آورده شده است.



شکل (۴-۲) نمودار کاهش وزن اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن.

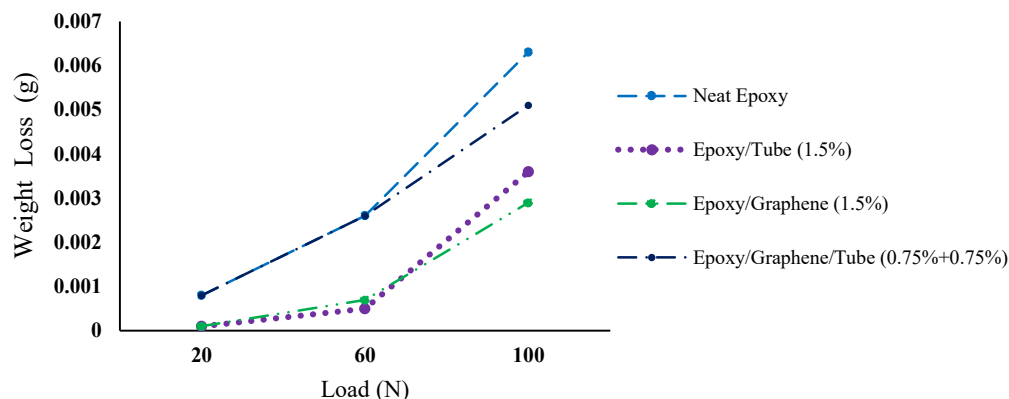
شکل (۴-۲۵) نمودارهای مربوط به کاهش وزن اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله کربنی، اپوکسی/نانواکسیدگرافن، اپوکسی/نانورس و اپوکسی/نانولوله کربنی/نانواکسیدگرافن/نانورس را نشان می‌دهد. نمودار اپوکسی خالص برای هر سه بار ۲۰ N، ۶۰ N و ۱۰۰ N بیشترین کاهش وزن را از خود نمایش می‌دهد. پس از آن نمودار کامپوزیت حاصل از ترکیب سه نانوساختار، حاکی از افزایش کاهش وزن در این نمونه است. سه کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانوساختار در بار ۲۰ N کاهش وزنی یکسان دارند. با افزایش بار به ۶۰ N نمونه حاوی نانولوله کربنی ۸۳٪، نمونه حاوی نانورس ۷۷٪ و نمونه حاوی نانواکسیدگرافن ۷۳٪ کاهش وزن کمتری نسبت به اپوکسی از خود نشان می‌دهند. در بار ۱۰۰ N این روند تغییر کرده و نمونه حاوی نانولوله کربنی با شیب بیشتری دچار کاهش وزن شده به طوری که در رده اول کاهش وزن نسبت به نمونه‌های حاوی نانواکسیدگرافن و نانورس قرار می‌گیرد.



شکل (۴-۲۵) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص، سه نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوساختار و ترکیب سه نوع نانوساختار.

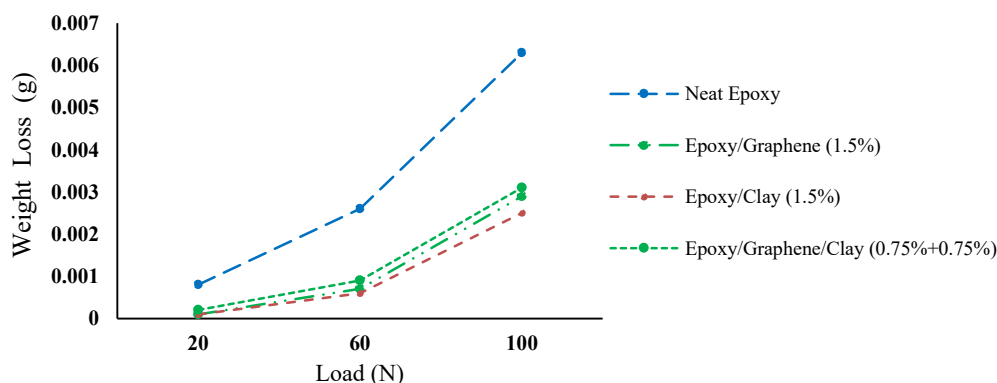
در شکل (۴-۲۶) مقایسه نمودارهای اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی و نانواکسیدگرافن آمده است. همان‌طور که در شکل مشخص است نمونه کامپوزیتی حاوی ۰/۷۵٪ نانولوله کربنی و ۰/۷۵٪ نانواکسیدگرافن در دو بار وارده ۲۰ N و ۶۰ N، کاهش وزنی برابر با اپوکسی خالص در این بارها دارد اما با افزایش بار به ۱۰۰ N کاهش وزن کمتری در این کامپوزیت در مقایسه با اپوکسی خالص از خود نشان می‌دهد. دو نمونه‌ی کامپوزیتی اپوکسی/نانواکسیدگرافن و اپوکسی/نانولوله کربنی در بار ۲۰ N یکسان عمل کرده اما در بار ۶۰ N نمونه حاوی نانواکسیدگرافن کاهش وزن

بیشتری را نسبت به نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی تجربه می‌کند این روند برای بار ۱۰۰ N تغییر کرده و اختلاف قابل توجهی در کاهش وزن نمونه حاوی نانولوله کربنی نسبت به نانو اکسید گرافن دیده می‌شود.



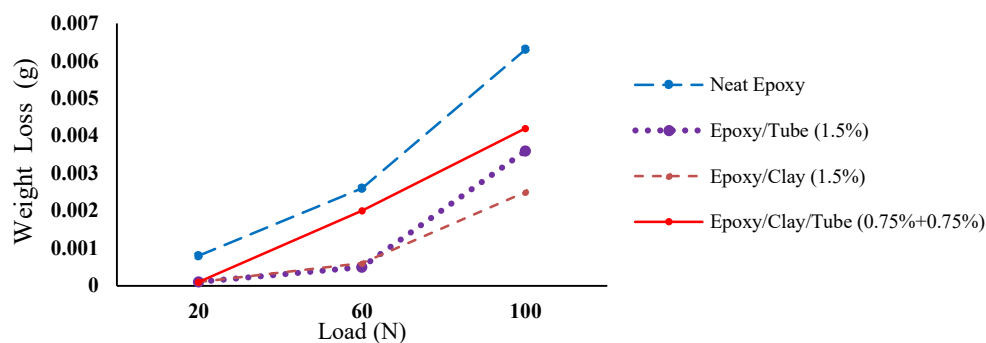
شکل (۴-۲۶) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانو اکسید گرافن و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن.

با توجه به شکل (۴-۲۷) برآورد می‌شود بیشترین کاهش وزن و از دست دادن جرم مربوط به نمونه اپوکسی خالص است بعد از آن برای کلیه بارها، بیشترین کاهش وزن را ترکیب دو جزئی نانورس و نانو اکسید گرافن با ۰/۷۵٪ برای هر نانوساختار دارد. اگرچه در بار ۲۰ N نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ نانو اکسید گرافن و ۱/۵٪ نانورس کاهش وزن یکسانی دارند اما با افزایش بار، نمونه نانو اکسید گرافن جرم بیشتری از ماده را از دست می‌دهد.



شکل (۴-۲۷) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانو اکسید گرافن و اپوکسی / نانورس / نانو اکسید گرافن.

آنچه از نمودار (۴-۲۸) برداشت می‌شود کمترین کاهش وزن در نیروی ۲۰ N برای سه کامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی، اپوکسی/نانورس و کامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی/نانورس رخ داده است. در بار ۶۰ N نمونه ترکیبی اپوکسی/نانولوله کربنی/نانورس از دو کامپوزیت دیگر در کاهش وزن پیشی گرفته و با کاهش ۰/۰۰۲ g از وزن خود نسبت به دو نمونه دیگر خواص سایشی کمتری را نشان می‌دهد هر چند نسبت به نمونه اپوکسی خالص بهتر عمل کرده‌است. این نمونه با شیب ثابت در بار ۱۰۰ N نیز کاهش وزنی در حدود ۰/۰۰۴ g از خود نشان می‌دهد. در بار ۶۰ N نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی با اختلاف بسیار کم نسبت به نمونه اپوکسی/نانورس بهتر عمل می‌کند اما با افزایش بار این نمونه با شیب بیشتری نسبت به نمونه اپوکسی/نانورس، کاهش وزن از خود نشان می‌دهد به‌طوری‌که این کاهش وزن کاملاً مشهود است.



شکل (۴-۲۸) نمودار کاهش وزن نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانورس، نانولوله کربنی و اپوکسی/نانورس/نانولوله کربنی.

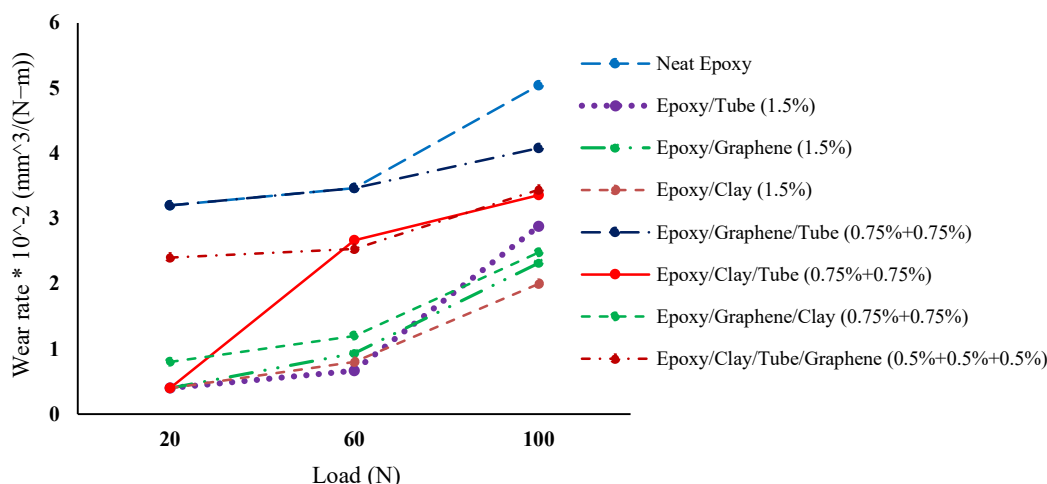
۴-۳-۳- نرخ سایش ویژه

جدول (۴-۳) نرخ سایش ویژه برای نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن را نشان می‌دهد. با مقایسه نرخ سایش ویژه نمونه‌ها مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های کامپوزیتی، کامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانولوله کربنی در بار ۶۰ N و نمونه حاوی ۱/۵٪ نانورس در بار ۱۰۰ N نسبت به نمونه‌های دیگر دارای مقاومت به سایش بیشتری هستند.

جدول (۳-۴) نرخ سایش ویژه ($\text{mm}^3/(\text{N.m})$) نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های آن در بارهای مختلف.

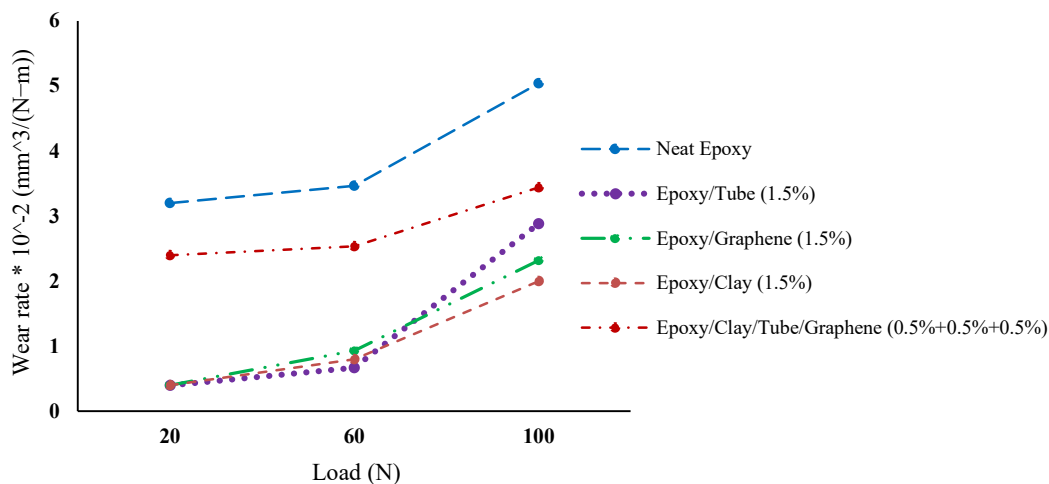
نوع ماده	۲۰ N	۶۰ N	۱۰۰ N
اپوکسی	۳/۲	۳/۴۶	۵/۰۴
اپوکسی / نانولوله کربنی	۰/۴	۰/۶	۲/۸۸
اپوکسی / نانواکسید گرافن	۰/۴	۰/۹۳	۲/۳۲
اپوکسی / نانورس	۰/۴	۰/۸	۲
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن	۳/۲	۳/۴۶	۴/۰۸
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس	۰/۴	۲/۶۶	۳/۳۶
اپوکسی / نانواکسید گرافن / نانورس	۰/۸	۱/۲	۲/۴۸
اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن / نانورس	۲/۴	۲/۵۳	۳/۴۴

در بار ۲۰ N نمونه‌های اپوکسی / نانولوله کربنی، اپوکسی / نانواکسید گرافن، اپوکسی / نانورس و نمونه ترکیبی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس با $۰/۷۵\%$ از هر نوع نانوساختار نرخ سایشی یکسانی داشته‌اند. نمودار مربوط به نرخ سایش ویژه برای نمونه اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن در شکل (۴-۲۹) به صورت کلی و در شکل‌های (۴-۳۰) الی (۴-۳۳) به صورت مقایسه جزئی تر ارائه شده است. با بررسی نمودار کل نمونه‌ها در شکل (۴-۲۹) مشاهده می‌شود کمترین نرخ سایش ویژه در بار ۲۰ N برای سه نمونه حاوی $۱/۵\%$ اپوکسی / نانولوله کربنی، اپوکسی / نانواکسید گرافن، اپوکسی / نانورس و نمونه ترکیبی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس با $۸۷/۵\%$ کاهش نرخ سایش نسبت به اپوکسی خالص است. بیشترین نرخ سایش ویژه در بار ۲۰ N مربوط به نمونه کامپوزیت ترکیبی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن با $۰/۷۵\%$ از هر نانوساختار، که برابر با نرخ سایش ویژه اپوکسی خالص است. در بار ۶۰ N نمونه حاوی $۱/۵\%$ نانولوله کربنی با کاهش ۸۱% نسبت به اپوکسی خالص کمترین نرخ سایش ویژه را دارد. دو نمونه اپوکسی خالص و نمونه کامپوزیت ترکیبی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن بیشترین نرخ سایش ویژه را از خود نشان دادند. و در نهایت در بار ۱۰۰ N کمترین نرخ سایش ویژه برای نمونه کامپوزیتی حاوی $۱/۵\%$ نانورس با ۶۰% کاهش نسبت به نمونه اپوکسی خالص و بیشترین نرخ سایش ویژه برای نمونه اپوکسی خالص مشاهده شد.



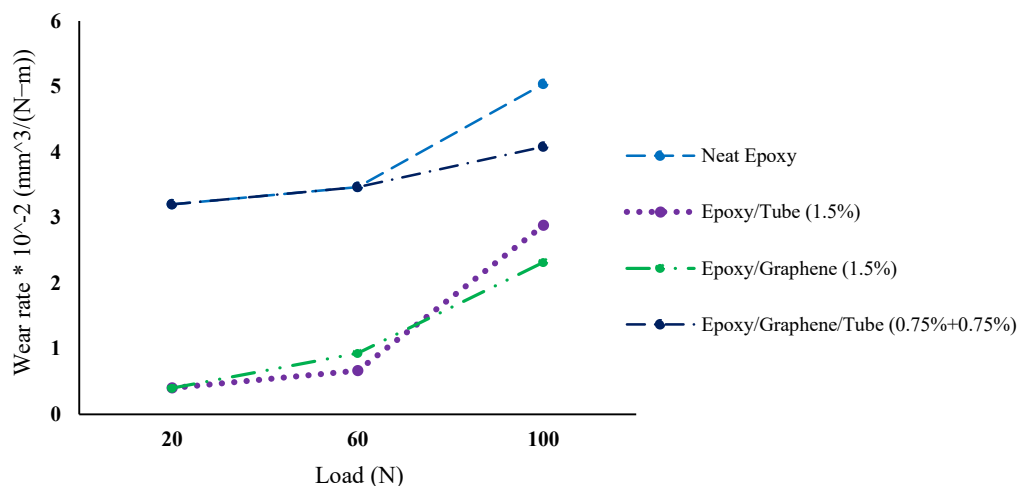
شکل (۴-۲۹) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن.

نمودار (۴-۳۰) به مقایسه نرخ سایش ویژه نمونه اپوکسی خالص با سه نمونه کامپوزیتی با ۱/۵٪ از هر نانوساختار و ترکیب این سه نانوساختار با ۰/۵٪ از هر کدام نانوساختار می‌پردازد. همان‌طور که از نمودار مشخص است بیشترین نرخ سایش ویژه در هر سه بار مربوط به نمونه اپوکسی خالص است و پس از آن نمونه ترکیبی هر سه نانوساختار بیشترین نرخ سایش ویژه را داراست. در بار ۲۰ N هر سه نمونه با ۱/۵ نانوساختار دارای نرخ سایش ویژه یکسان هستند و ۸۷/۵٪ کاهش نسبت به اپوکسی خالص در آنها دیده می‌شود. در بار ۶۰ N نمونه‌ی اپوکسی/ نانولوله کربنی با ۸۱٪ کاهش نرخ سایش ویژه نسبت به اپوکسی خالص کمترین نرخ سایش ویژه دارد. پس از آن نمونه اپوکسی/ نانورس با ۷۷٪ و نمونه اپوکسی/ نانو اکسید گرافن با ۷۳٪ کمترین نرخ سایش ویژه را دارند. با افزایش بار به ۱۰۰ N این رفتار تغییر کرده و نمونه اپوکسی/ نانورس ۶۰٪ و نمونه اپوکسی/ نانولوله کربنی ۴۳٪ کاهش نرخ سایش ویژه را نسبت به اپوکسی خالص از خود بروز می‌دهد.



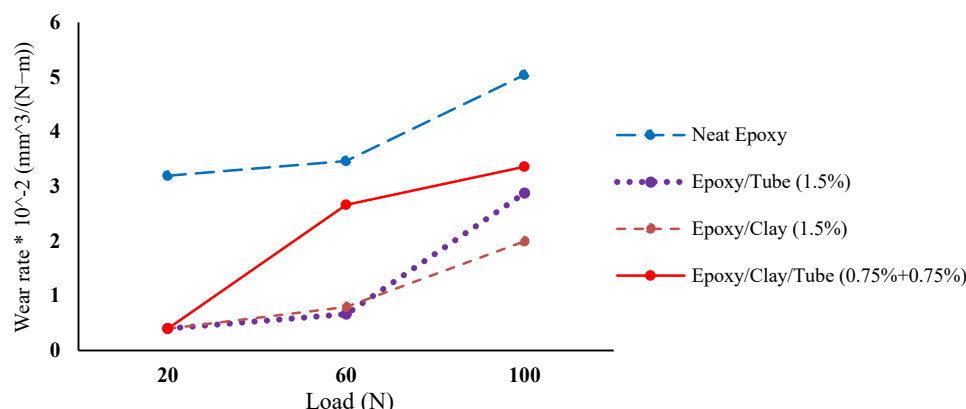
شکل (۴-۳) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن، نانورس و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن / نانورس.

با بررسی نمودار (۴-۳) مشاهده می‌شود استفاده از ترکیب نانواکسیدگرافن با نانولوله کربنی با ۰/۷۵٪ از هر کدام اثر چندانی در بهبود خواص سایشی اپوکسی ندارد و در دو بار ۲۰ N و ۶۰ N همانند اپوکسی خالص عمل کرده و تنها با افزایش بار به ۱۰۰ N نرخ سایش ویژه به میزان ۱۹٪ کاهش می‌یابد. در بار ۶۰ N، اپوکسی / نانواکسیدگرافن با ۸۱٪ کاهش و اپوکسی / نانولوله کربنی با ۷۳٪ کاهش، کمترین نرخ سایش ویژه نسبت به اپوکسی خالص را از خود نشان می‌دهند. نرخ سایش ویژه با افزایش میزان بار به ۱۰۰ N برعکس می‌شود و نانواکسیدگرافن با ۵۴٪ کاهش نرخ سایش ویژه نسبت به اپوکسی رفتار بهتری از خود در برابر نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی با ۴۳٪ کاهش نرخ سایش ویژه نسبت به اپوکسی نشان می‌دهد.



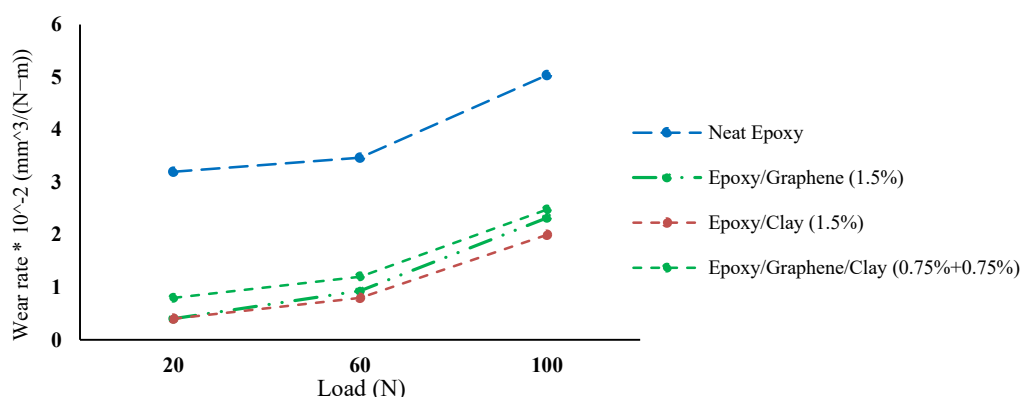
شکل (۴-۳۱) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانواکسیدگرافن و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن.

نمودار (۴-۳۲) نرخ سایش ویژه برای سه کامپوزیت با پرکننده‌های نانوساختار، نانولوله کربنی و نانورس و ترکیب این دو را نشان می‌دهد. کمترین نرخ سایش ویژه را کامپوزیت اپوکسی/ نانورس با ۶۰٪ کاهش نسبت به اپوکسی خالص در بار ۱۰۰ N و بیشترین نرخ سایش ویژه در بین این سه کامپوزیت را ترکیب این دو نانوساختار با ۷۵٪ از هر کدام نشان می‌دهد. در بار ۶۰ N نمونه اپوکسی/ نانولوله کربنی ۸۱٪ و نمونه اپوکسی/ نانورس ۷۷٪ کاهش نرخ سایش را نسبت به اپوکسی خالص، از خود نشان دادند. در مجموع هر سه نمونه کامپوزیت در هر سه بار بهتر از نمونه اپوکسی خالص عمل کرده‌اند. نمونه حاوی هر دو نانوساختار با افزایش بار از ۲۰ N به ۶۰ N شیب افزایشی بیشتری نسبت به افزایش بار ۱۰۰ N از خود نشان می‌دهند.



شکل (۳۲-۴) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی، نانورس و اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس.

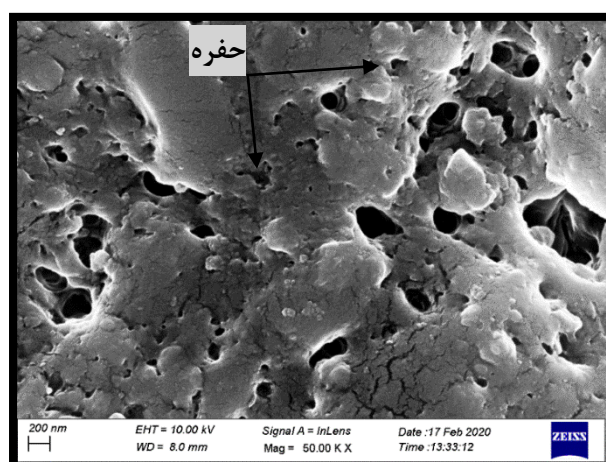
شکل (۳۳-۴) نشان می‌دهد افزودن پرکننده‌های نانوساختار اکسیدگرافن و نانورس به اپوکسی تا حد قابل قبولی نرخ سایش ویژه را کاهش می‌دهد. در بار ۲۰ N نمونه ترکیبی اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس با ۷۵٪ کاهش نرخ سایش نسبت به اپوکسی خالص در بین نمونه‌های کامپوزیتی بیشترین نرخ سایش را از خود نشان می‌دهد. در بار ۶۰ N نمونه‌های اپوکسی / نانورس، اپوکسی / نانواکسیدگرافن و اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس به ترتیب ۷۶٪، ۷۳٪ و ۶۵٪ و در بار ۱۰۰ N به ترتیب ۶۰٪، ۵۴٪ و ۵۱٪ کاهش نرخ سایش ویژه را نسبت به اپوکسی خالص از خود بروز می‌دهند. در این میان نمونه حاوی اپوکسی / نانورس کمترین و کامپوزیت اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس بیشترین نرخ سایش ویژه را از خود بروز می‌دهد.



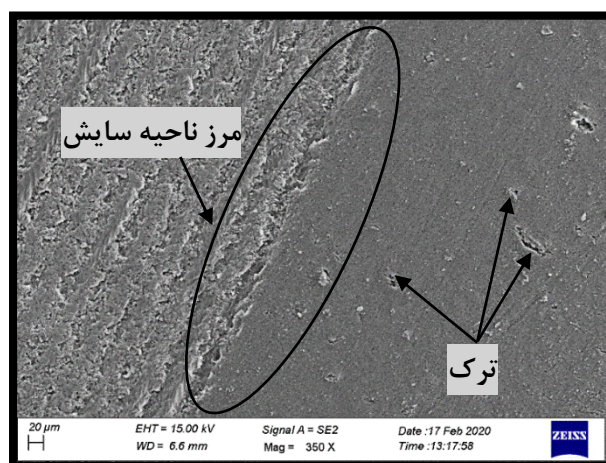
شکل (۳۳-۴) نمودار نرخ سایش ویژه نمونه‌ی اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های حاوی نانواکسیدگرافن، نانورس و اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس.

۴-۳-۴- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح سایشی

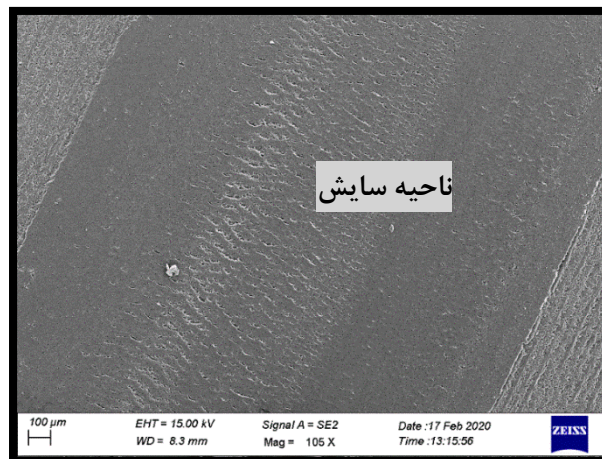
پس از آماده‌سازی سطوح سایشی تصاویر الکترونی روبشی برای هر نمونه جهت بررسی مورفولوژی سطح تهیه شد. شکل (۴-۳۴) سطح سائیده شده اپوکسی خالص، بدون تقویت‌کننده، را نمایش می‌دهد. حفره‌های ایجاد شده در اپوکسی بخاطر حبس شدن هوا داخل نمونه در شکل (۴-۳۴-الف) دیده می‌شود. ترک‌های ریزی که در شکل (۴-۳۴-ب) قابل مشاهده است بیانگر مکانیزم سایش خستگی اپوکسی خالص است [۴۴]. شیار سایشی در نمونه اپوکسی خالص نسبت به دیگر نمونه‌ها پهن‌تر و عمیق‌تر است که حاصل حذف مواد و سائیدگی بیشتر است (شکل (۴-۳۴-ج)).



(الف)



(ب)

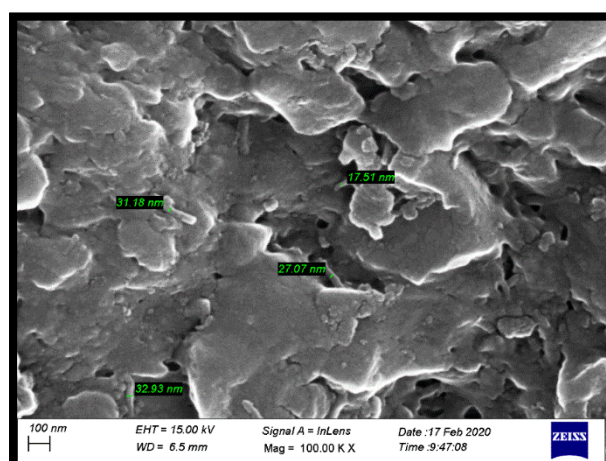


(ج)

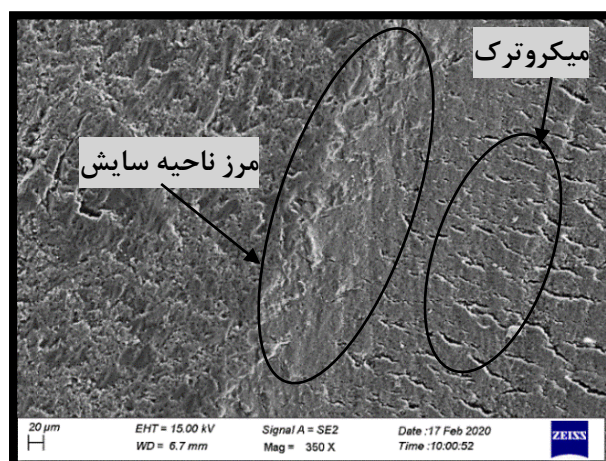
شکل (۴-۳۴) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی خالص.

ذرات باقیمانده که در طی اصطکاک و سایش تولید می‌شوند تأثیر زیادی بر خصوصیات تریبولوژیکی مواد دارند. بقایای سایش بزرگ برای خصوصیات تریبولوژیکی مضر است، زیرا می‌تواند به عنوان ذرات ساینده بر روی سطوح عمل کنند. بقایای سایش کوچک 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 می‌توانند شیارهای سطح سایشی را دفن کند و سطح آن را بسیار نرم‌تر کنند. بنابراین، کامپوزیت‌های اپوکسی دارای خواص تریبولوژیکی بسیار بهتری نسبت به اپوکسی خالص هستند [۴۴]. نمونه حاوی نانولوله کربنی در شکل (۴-۳۵) نمایش داده شده است. با افزودن نانولوله کربنی به رزین، سائیدگی سایشی بر روی سطوح تحت سایش به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و مقاومت به سایش اپوکسی به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این کاهش ممکن است بر اثر کاهش ضریب اصطکاک به‌خاطر خاصیت روان‌کنندگی نانولوله‌های کربنی در رزین اپوکسی باشد. در شکل (۴-۳۵-الف) تعدادی از نانولوله‌های کربنی که بر اثر سایش بیرون‌زده‌اند قابل مشاهده هستند. طبق تحقیقات لاو و همکاران افزودن نانولوله‌های کربنی باعث بالا رفتن سختی کامپوزیت می‌شود که به‌نوبه خود باعث افزایش خاصیت ضد سایشی کامپوزیت توسط محافظت جمعی و خصوصیات انتقال بار موثر می‌شود [۵۹]. نانولوله کربنی به دلیل نسبت ابعادی بالا چسبندگی بهتری دارند، و به‌طور قابل توجهی رفتار سایشی نمونه بهبود

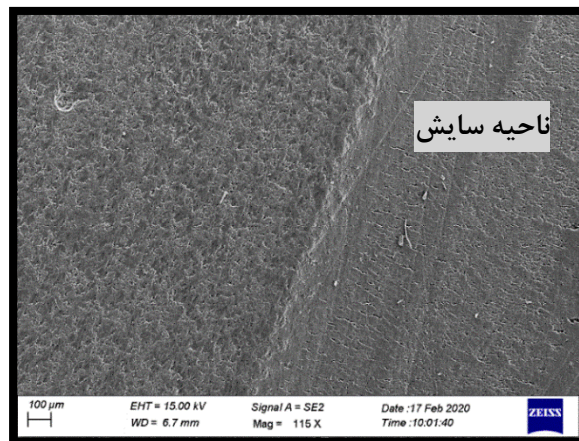
می‌بخشد [۳۱]. نمونه اپوکسی / نانولوله کربنی در مقایسه با سایر نمونه‌ها کاهش وزن، نرخ سایش ویژه و ضریب اصطکاک کمتری از خود بروز می‌دهد. ناحیه سایش در شکل (۴-۳۵-ب-ج) دیده می‌شود. در طول اصطکاک و سایش، ابتدا زمینه اپوکسی ساییده می‌شود. نانولوله‌های کربنی بار اعمال شده را حمل می‌کنند تا از سایش شدید اپوکسی جلوگیری کنند. با ادامه اصطکاک و سایش، نانولوله‌های کربنی در سطح سایشی آزاد می‌شود و بر روی سطح ساییده فیلم انتقال ایجاد می‌کنند، که از سایش مستقیم بین پلیمر و فلز جلوگیری می‌کند [۴۴]. علاوه بر این، خواص روان کاری نانولوله‌های کربنی همچنین باعث کاهش سرعت سایش و ضریب اصطکاک می‌شود [۳۶]. مکانیزم سایش در این نمونه با توجه به ترک‌های ایجاد شده در ناحیه سایش، خستگی است.



(الف)



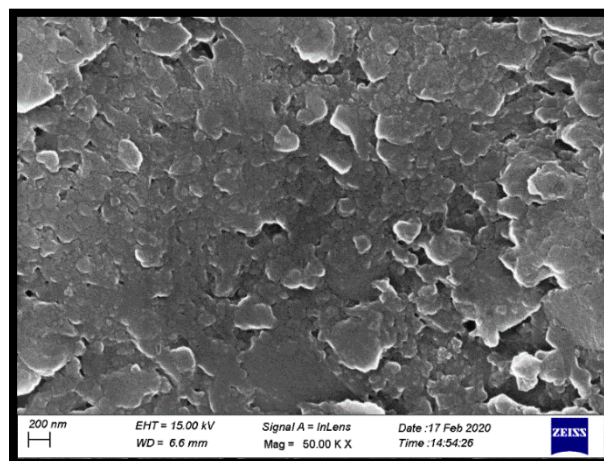
(ب)



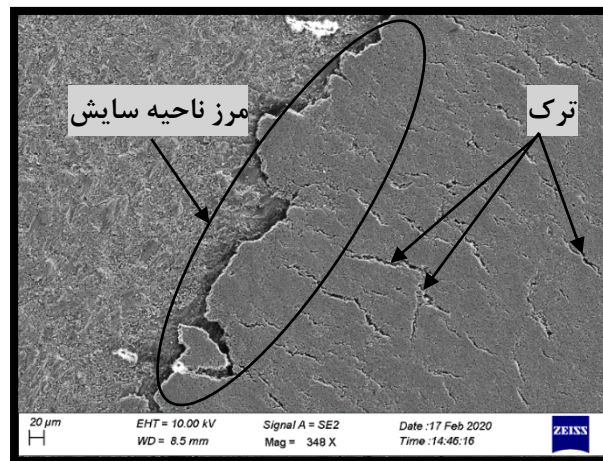
(ج)

شکل (۴-۳۵) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی.

شکل (۴-۳۶) سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن را نشان می‌دهد. شکل (۴-۳۶-الف) آوارهای کوچک به وجود آمده در طی فرایند سایش را نشان می‌دهد. آوارها و بقایای کوچک می‌توانند شیارهای ایجاد شده روی نمونه را پر کنند و باعث نرم‌تر شدن سطح مورد سایش شوند. مکانیزم سایش غالب در این نمونه با توجه به شکل (۴-۳۶-الف و ب) سایش چسب است، که منجر به لایه‌لایه شدن و ظهور ترک در سطح می‌شود [۳۱]. ناحیه سایش به‌خوبی در شکل (۴-۳۶-ج) قابل مشاهده است. نانواکسیدگرافن بر روی سطح ساینده فیلم انتقالی ایجاد می‌کنند، که از سایش مستقیم بین پلیمر و فلز جلوگیری می‌کند و به این صورت نرخ سایش را نسبت به اپوکسی خالص کاهش می‌دهد [۴۴]. نانواکسیدگرافن می‌توانند به‌طور پایدار در اپوکسی پراکنده شوند [۴۰].



(الف)



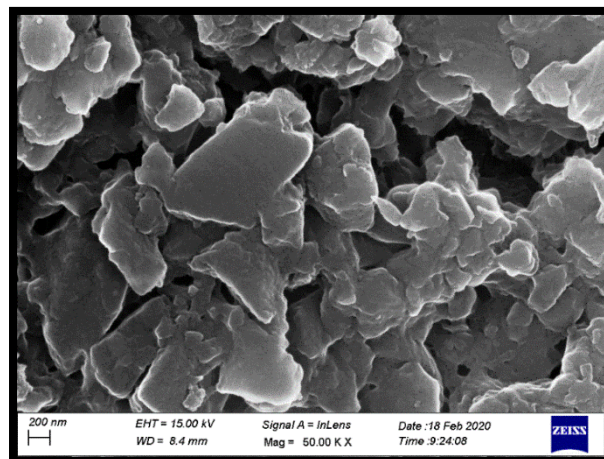
(ب)



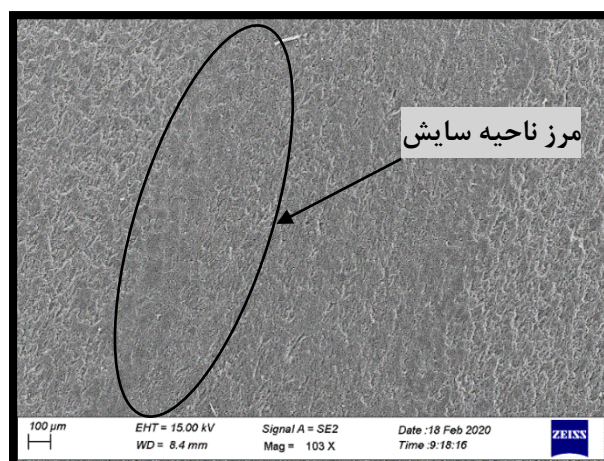
(ج)

شکل (۴-۳۶) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن.

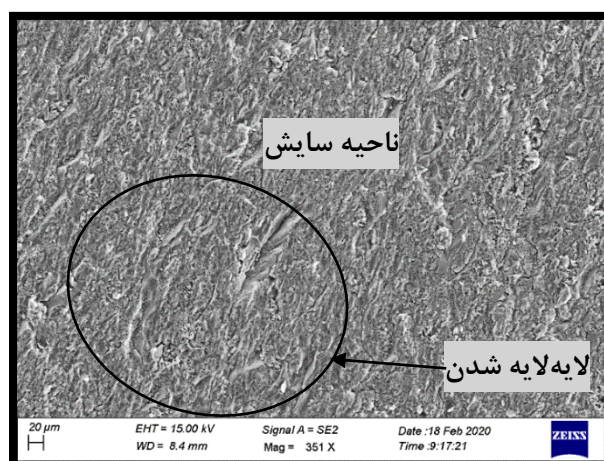
شکل (۴-۳۷) حاوی تصاویر میکروسکوپی کامپوزیت اپوکسی / نانورس حاوی $1/5\%$ نانورس است. نمای از سطح سائیده شده با بزرگنمایی 200 nm در شکل (۴-۳۷-الف) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۳۷-ب) دیده می‌شود مرز حاصل از سایش به سختی قابل تشخیص است زیرا عمق سایش در این نمونه بسیار کم است. نرخ سایش ویژه و کاهش وزن نمونه حاوی $1/5\%$ نانورس پس از نانولوله کربنی کمترین میزان سایش را دارد. مکانیسم سایش در این نمونه مطابق شکل (۴-۳۷-ج) خراش و چسب است.



(الف)



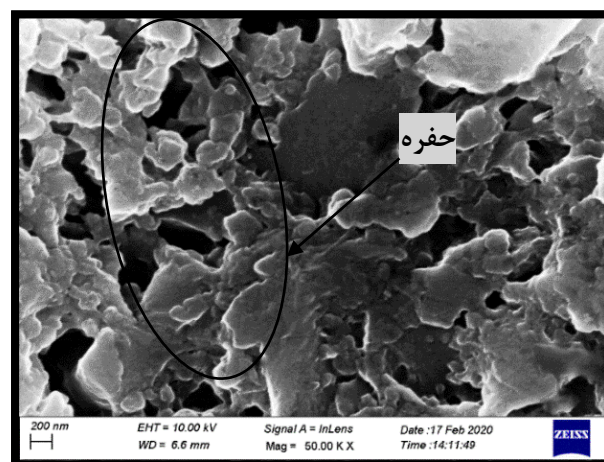
(ب)



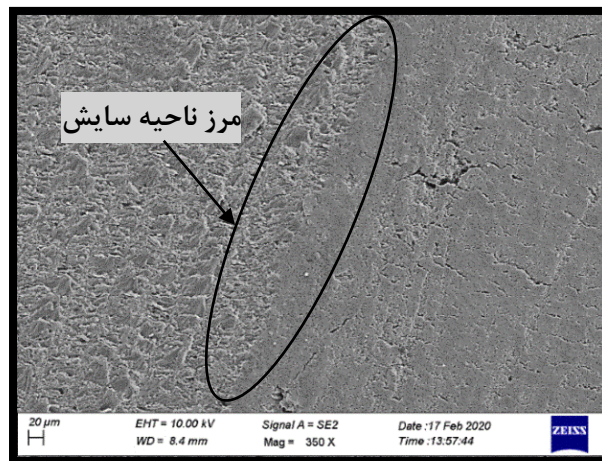
(ج)

شکل (۴-۳۷) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانورس.

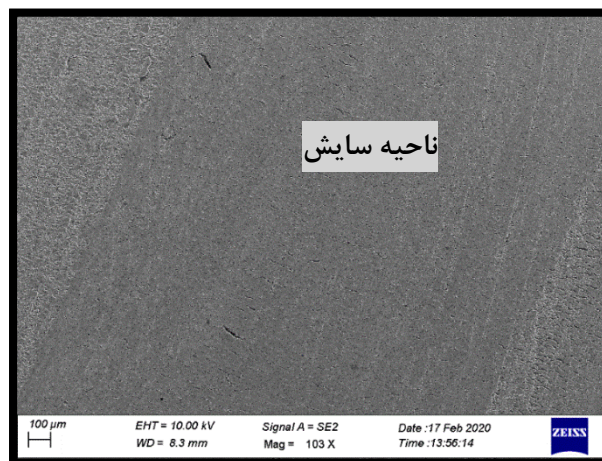
شکل (۴-۳۸) سطح سائیده شده کامپوزیت اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن با حفره‌های پوسته پوسته بیشتر و بقایای بزرگتر نشان می‌دهد. تجمع و توده‌ای شدن پرکننده‌های نانو ساختار اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی عاملی بر افزایش ضریب اصطکاک حتی بیشتر از اپوکسی خالص است که خود باعث کاهش وزن بیشتر در اثر کنده شدن ماده بر اثر سایش می‌شود. ذرات جدا شده بر اثر سایش خود عاملی بر افزایش نرخ سایش ویژه است. با توجه به شکل (۴-۳۸-الف) مشخص است سطوح سایشی ناهموار بوده و علائم لایه لایه سازی وجود دارد که نشان دهنده مکانیزم سایش چسب است این نتیجه به دلیل مقاومت در برابر سایش ضعیف اپوکسی و چسبندگی ضعیف پرکننده‌ها به زمینه اپوکسی است [۳۱]. ذرات باقیمانده خود باعث جدا شدن مواد از سطح سایش می‌شود. شکل (۴-۳۸-ب) مرز ناحیه سایشی را نشان می‌دهد. این کامپوزیت بعد از اپوکسی خالص بزرگترین شیار سایش را دارد. شیار سایش در شکل (۴-۳۸-ج) نمایش داده شده است.



(الف)



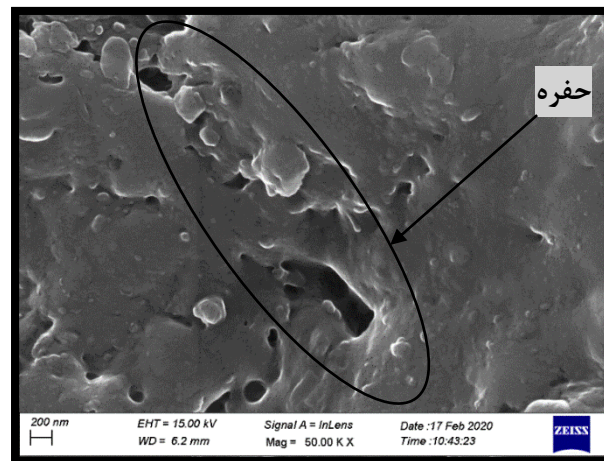
(ب)



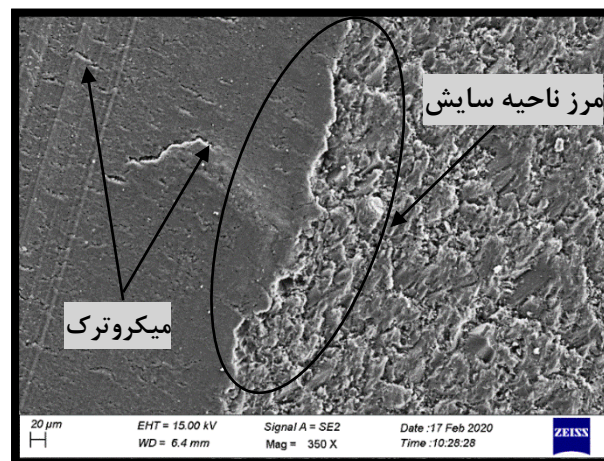
(ج)

شکل (۳۸-۴) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسید گرافن.

شکل (۳۹-۴) سطح سایشی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس را نمایش می‌دهد. این نمونه در بین نمونه‌های ترکیبی، حاوی ۰/۷۵٪ از هر کدام از پرکننده‌های نانوساختار رس و نانولوله کربنی کمترین ضریب اصطکاک را از خود نشان داده‌است. حفره‌های ایجاد شده در شکل (۳۹-۴ الف) قابل مشاهده‌است. مرز بین دو ناحیه شیار سایشی و قسمت سائیده نشده به‌خوبی در شکل (۳۹-۴ ب) مشخص است؛ میکرو ترک‌ها و حفره‌های حاصل از تماس بین ساینده و نمونه که به‌صورت پراکنده در نمونه دیده می‌شود بیانگر مکانیزم خستگی است. نمای کلی از ناحیه سایش در شکل (۳۹-۴ ج) نمایش داده شده‌است.



(الف)



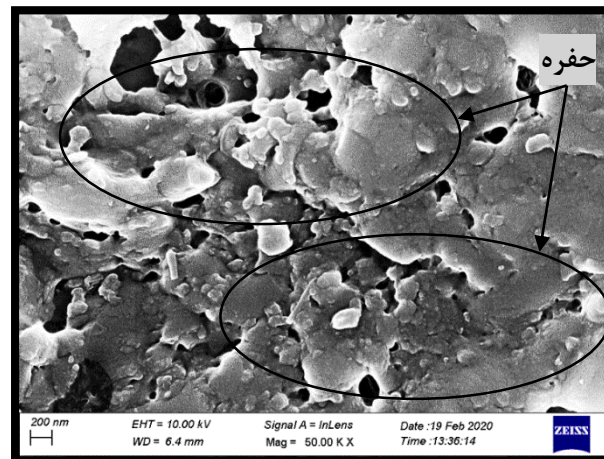
(ب)



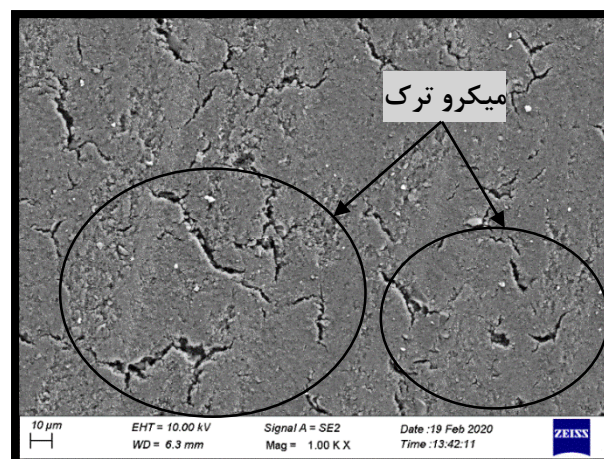
(ج)

شکل (۴-۳۹) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانورس.

تصاویر مربوط به شکل (۴-۴۰) کامپوزیت اپوکسی / نانو اکسید گرافن / نانورس را نشان می‌دهد. در شکل (۴-۴۰-الف) حفره‌ها در بزرگنمایی ۲۰۰ nm قابل مشاهده هستند. در شکل (۴-۴۰-ب-ج) وجود میکرو ترک‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم سایش خستگی است. ذرات و آوارهای جدا شده حاصل از سایش مانند جسم سوم عمل کرده و باعث سایش می‌شوند [۵۶].



(الف)



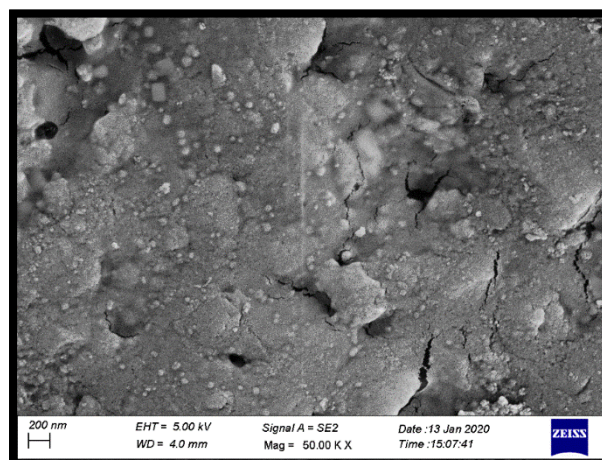
(ب)



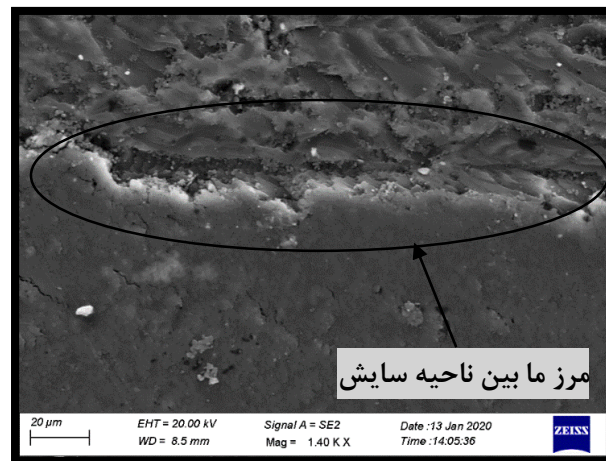
(ج)

شکل (۴-۴۰) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانواکسیدگرافن / نانورس حاوی ۰/۵٪ از سه

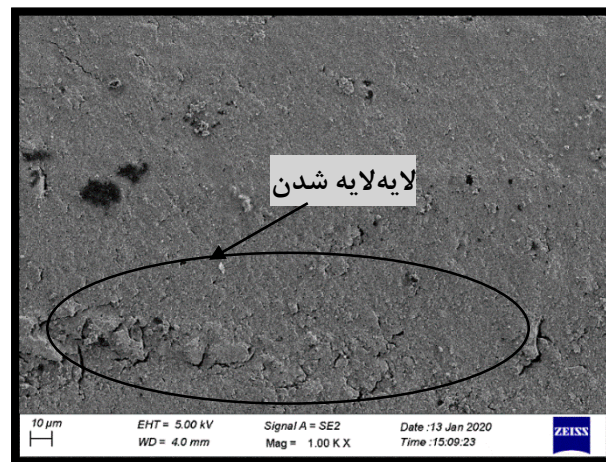
شکل (۴-۴۱) تصویر کامپوزیت اپوکسی / نانولوله کربنی / نانواکسیدگرافن / نانورس حاوی ۰/۵٪ از سه نانوساختار را نمایش می‌دهد. مطابق شکل (۴-۴۱-الف) مورفولوژی سطح علائم کندگی حاصل از جمع شدن و توده‌ای شدن پرکننده‌های نانوساختار در زمینه را نشان می‌دهد. این آسیب از جمع شدن ذرات و باقیمانده‌های مواد حاصل از سایش به وجود می‌آید. مرز بین مسیر سایش و سطح سائیده نشده به دلیل حذف رزین به مقدار زیاد قابل تشخیص است (شکل (۴-۴۱-ب)). در شکل (۴-۴۱-ج) ناحیه سایش با بزرگنمایی $10\ \mu\text{m}$ قابل مشاهده است. مکانیزم سایش در این نمونه سایش چسب است، که منجر به ظهور ترک و لایه لایه شدن می‌شود [۳۱].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴-۴۱) تصویر FESEM سطح سایش نمونه‌ی اپوکسی / نانولوله کربنی / نانو اکسید گرافن / نانورس.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهاد

۵-۱- نتیجه‌گیری

با توجه به آسیب‌های وارده بر صنایع مختلف بر اثر سایش، در این پایان‌نامه اثر پرکننده‌های نانوساختار مختلف، بر روی خواص مکانیکی و مقاومت سایشی کامپوزیت‌های پایه پلیمری بررسی شد. برای این منظور از نانوساختارهای گرافن، نانولوله کربنی و نانورس استفاده شد. نانوساختارها با استفاده از حمام فراصوت و همزن مغناطیس در زمینه اپوکسی پراکنده شدند. پس از، حباب‌زدایی، نمونه‌ها در قالب سیلیکونی و در دمای محیط به مدت ۲۴ h سخت شدند. سپس آزمون‌های کشش و سایش جهت بررسی خواص مکانیکی انجام شد. استحکام نهایی، کرنش در هنگام شکست، مدول الاستیک، چقرمگی، ضریب اصطکاک، کاهش وزن و نرخ سایش ویژه خواص مطالعه شده بودند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقویت رزین اپوکسی با ۱/۵٪ نانولوله کربنی بیشترین تاثیر را بر خواص مکانیکی اپوکسی دارد. در این نمونه مدول الاستیک ۶٪، تنش قابل تحمل ۱۶٪ و کرنش در لحظه شکست ۲۷٪ افزایش را نسبت به نمونه اپوکسی خالص داشت. کامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله کربنی و اپوکسی/نانورس بالاترین مقاومت در برابر سایش را در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خود نشان دادند. نرخ سایش در بار ۶۰ N برای نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ نانولوله کربنی ۸۱٪، برای نمونه‌ی حاوی ۱/۵٪ نانورس ۷۷٪ و در بار ۱۰۰ N برای نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ نانورس ۶۰٪ نسبت به اپوکسی خالص کاهش از خود نشان دادند. اثر خوب هم‌افزایی در دو نانوساختار نانورس و نانو اکسید گرافن با افزایش ۲۷٪ در کرنش در هنگام شکست و در چقرمگی ۴۲٪ نسبت به اپوکسی خالص دیده شد. علیرغم مقاومت در برابر سایش خوب دو نمونه اپوکسی/نانولوله کربنی و اپوکسی/نانوگرافن، نمونه هیبریدی این دو نانوساختار از ویژگی‌های سایشی پایین‌تری برخوردار است. این نتایج را می‌توان با تفاوت کیفیت چسبندگی بین پرکننده‌ها و ماتریس اپوکسی توضیح داد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم سایش غالب برای اکثر نمونه‌ها خستگی است.

۵-۲- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

برخی از توصیه‌ها برای پژوهش‌های آینده عبارتند از:

۱. استفاده از دیگر روش‌های ساخت نمونه‌های کامپوزیتی جهت توزیع پرکننده‌های نانوساختار در زمینه

۲. بررسی رفتار کامپوزیت‌ها با درصد وزنی متفاوت از نانوساختارها

۳. استفاده از الیاف و دیگر تقویت‌کننده‌ها و بررسی رفتار سایشی آن‌ها

۴. بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌ها، در شرایط روان‌کاری و تغییرات دمایی محسوس (بسیار بالا و یا

بسیار پایین)

۵. بررسی نرخ سایش ویژه با استفاده از قطعه مقابل با جنس و ماده یکسان برای هر نمونه

پیوست

پیوست الف: مشخصات نانولوله‌های چند جداره کربنی

COOH Functionalized MWCNTs (>95%, OD: 20-30 nm)

Multi Walled Carbon Nanotubes (MWNTs, MWCNTs), -COOH functionalized

Purity: > 95 wt% (carbon nanotubes) (from TGA & TEM)

> 97 wt% (carbon content)

Content of -COOH: 1.23 wt% (XPS & Titration)

Outside diameter: 20-30 nm (from HRTEM, Raman)

Inside diameter: 5-10 nm

Length: 10-30 μm (TEM)

SSA: > 110 m^2/g (BET)

Color: Black

Ash: <1.5 wt% (TGA)

Electrical conductivity: >100 S/cm

Tap density: 0.28 g/cm^3

True density: ~2.1 g/cm^3

Manufacturing method: CV



Multi Walled Carbon Nanotubes (MWNTs, MWCNTs) Application

Potential applications of carbon nanotubes are: (1) additives in polymers; (2) catalysts; (3) electron field emitters for cathode ray lighting elements; (4) flat panel display; (5) gas-discharge tubes in telecom networks; (6) electromagnetic-wave absorption and shielding; (7) energy conversion; (8) lithium-battery anodes; (9) hydrogen storage; (10) nanotube composites (by filling or coating); (11) nanoprobe for STM, AFM, and EFM tips; (12) nanolithography; (13) nanoelectrodes; (14) drug delivery; (15) sensors; (16) reinforcements in composites; (17) supercapacitor.

Some of activities of Iranian Nanomaterials Pioneers under the Academic Department - Business Sany are as follows:

Sale of Nanotechnology devices such as AFM, TEM Microscope, X-Ray Analysis, Ultrasonic, Sonicator, etc.

Synthesis of nano-structured materials

Advanced ultra-high strength concrete nanotechnology

Nano-composites

Smart nano drug delivery

پیوست ب: مشخصات پرکننده نانوساختار اکسید گرافن

Research Grade Graphene Oxide Nanoplatelets Powder

Graphene oxide is electrically insulating due to disruptive sp² bonding network but it can be converted conductive by restoring -network.

Advantages of Nano Graphene Oxide

- High aspect ratio & porosity
- Very high electro-sorption capacity
- Very thin exfoliated sheet
- Ultimately High Purity

TECHNICAL PARAMETERS

Product Name	Element Analysis				
Graphene Oxide Nano Powder	C	O	S	H	N
	72.25	26.75	0.12	0.24	-

PARAMETERS	VALUES
Thickness	3.4-7 nm
Carbon Purity	~99%
Number of Layers	Average number of layers 6-10
Surface Area (BET)	100-300 m ² /g
Bulk Density	1 g/cc
Electrical Conductivity	Insulator [Tuneable to conductor]
Lateral dimension	10-50μm

Some of activities of Iranian Nanomaterials Pioneers under the Academic Department - Business Sany are as follows:

Sale of Nanotechnology devices such as AFM, TEM Microscope, X-Ray Analysis, Ultrasonic, Sonicator, etc.

Synthesis of nano-structured materials

Advanced ultra-high strength concrete nanotechnology

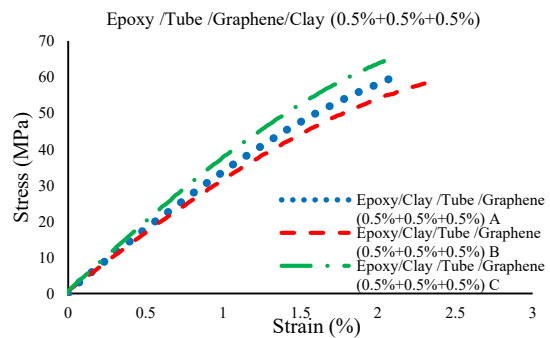
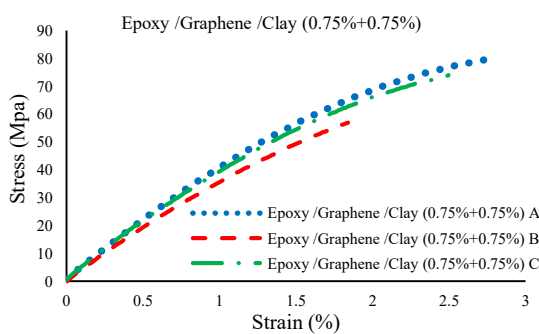
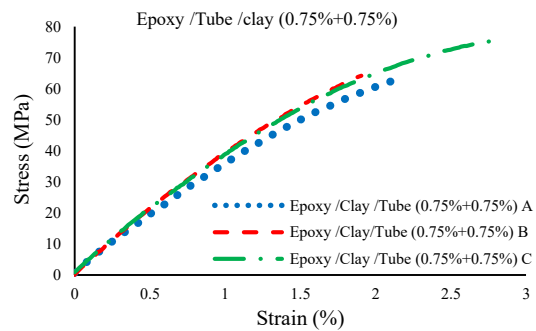
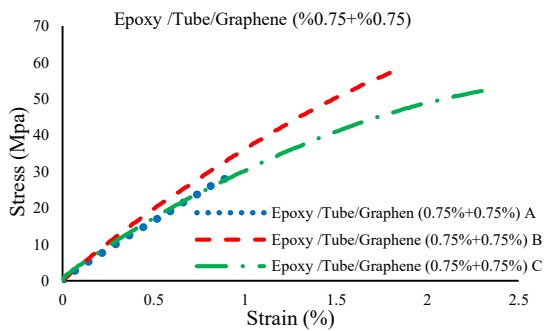
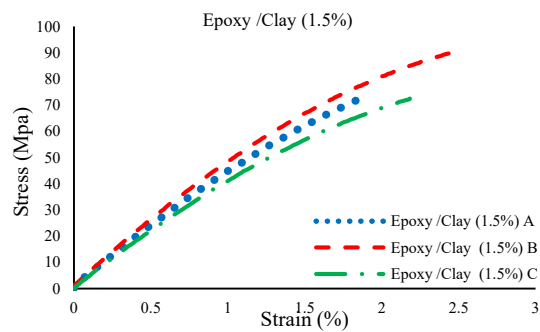
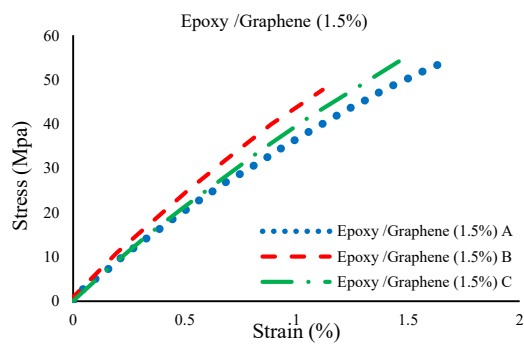
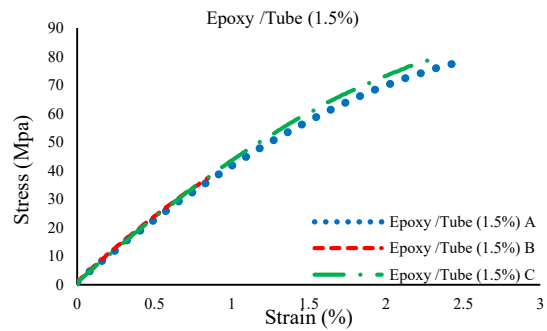
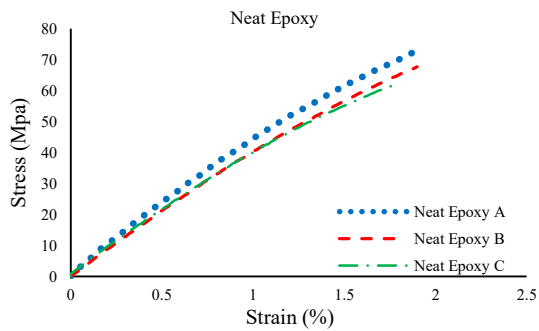
Nano-composites

Smart nano drug delivery

پیوست ج: مشخصات نانورس مونتمریلونیت

نوع کانی	مونتمریلونیت
چگالی	0.5 – 0.7 gr/cm ³
اندازه ذرات	1-2 nm
مساحت سطح ویژه	220-270 (m ² /gr)
مقدار هدایت الکتریکی	-25MV
ضریب تبادل یونی	48 (meg/ 100 gr)
فاصله خالی بین ذرات	60 A ^o
رنگ	Pale yellow
رطوبت	1 – 2 %

پیوست د: نتایج آزمون کشش برای هر سه نمونه از یک نوع کامپوزیت



مراجع

- [1] A. Ayman, Z. El-Shafei, A. AbdAllah, El-M. Aly, W. Wahid, (2012) **“Friction and wear of polymer composites filled by nano-particles: A Review,”** World Journal of Nano Science and Engineering, Vol. 02, No. 01, pp. 32–39.
- [2] A. Sorrentino, (2018) **“Tribology of self-lubricating polymer nanocomposites,”** iSelf-Lubricating Composites, Springer Berlin Heidelberg, pp. 105-131.
- [3] R. Vinayagamoorthy, (2018) **“Friction and wear characteristics of fibre-reinforced plastic composites,”** Journal of Thermoplastic Composite Materials, pp. 01–23.
- [4] S. A. Bello, J. O. Agunsoye, S. B. Hassan, M. G. Zebase Kana, I. A. Raheem, (2015) **“Tribology in industry epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties :A Review,”** Tribology in Industry, Vol. 37, No. 04, pp. 500–524.
- [5] Q. J. Wang, Y.-W. Chung, (2013) **“Encyclopedia of tribology,”**.
- [6] A. I. (2001) **“ASM Handbook,”** Composites, ASM International, Vol. 21.
- [7] W.K. Liu, E. Karpov, H. Park, (2006) **“Nano mechanics and materials: theory, multiscale methods and applications,”** John Wiley, pp.01-320.
- [8] T. Kumar, R. Ashok, N. Mohan, CR. Mahesha, (2015) **“Sliding wear characteristics of Fiber Reinforced Fillers Filled Polymer Based Composites: A Review”** International Journal of Materials Science, Vol. 10, No. 02, pp. 133-169.
- [9] B. Aldousiri, A. Shalwan, C. W. Chin, (2013) **“A review on tribological behaviour of polymeric composites and future reinforcements,”** Advances in Materials Science and Engineering, pp.01-08.
- [10] J. K. Lancaster, (1972) **“Polymer-based bearing materials the role of fillers and fibre reinforcement,”** Tribology, pp.249-255.
- [11] K. Friedrich, A. A. Almajid, L. Chang, (2012) **“Modern polymer composites for**

- friction and wear applications,”** pp.108-119.
- [12] S. Bajgholi, K. Saadati, G. Naderi, H. Bohendi, (2013) **“Heat resistant epoxy resins,”** Quarterly, Vol. 3, No. 1, pp. 04–11.
 - [13] A. Kaw, (2006) **“Mechanics of composite materials,”** Taylor& Francis, pp. 01–457.
 - [14] S. Sinha Ray, M. Okamoto, (2003) **“Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing,”** Progress in Polymer Science, Vol. 28, No. 11. pp. 1539–1641.
 - [15] N. Hosseini, F. Karimzadeh, M. H. Abbasi, M. H. Enayati, (2010) **“Tribological properties of Al6061-Al2O3 nanocomposite prepared by milling and hot pressing,”** Materials and Design, Vol. 31, No. 10, pp. 4777–4785.
 - [16] P. C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, J. K. Kim, (2010) **“Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based-A review,”** Composites Part A, Vol. 41, No. 10. pp. 1345–1367.
 - [17] G. Malucelli, F. Marino, (2012) **“Abrasion resistance of polymer nanocomposites-A Review,”** pp. 01–18.
 - [18] A. Dasari, Z. Z. Yu, Y. W. Mai, (2009) **“Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites,”** Materials Science and Engineering R: Reports., Vol. 63, No. 2. pp. 31–80.
 - [19] U. Nirmal, J. Hashim, S. Lau, U. Nirmal, J. Hashim, S. T. W. Lau, (2011) **“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 (IJMME), Vol. 63, pp. 367-373.
 - [20] W. Zhai, N. Srikanth, L. B. Kong, K. Zhou, (2017) **“Carbon nanomaterials in tribology,”** Carbon, Vol. 119, pp. 150–171.
 - [21] P. S. Karthik, A. L. Himaja, S. P. Singh, (2014) **“Carbon-allotropes: Synthesis methods, applications and future perspectives,”** Carbon, Vol. 15, No. 4. pp. 219–237.
 - [22] C. McCallion, J. Burthem, K. Rees-Unwin, A. Golovanov, A. Pluen, (2016) **“Graphene in therapeutics delivery: Problems, solutions and future**

- opportunities,”** European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, Vol. 104, pp. 235–250.
- [23] M. J. Allen, V. C. Tung, R. B. Kaner, (2010) **“Honeycomb carbon: A review of graphene,”** Chemical Reviews, Vol. 110, No. 1, pp. 132–145.
- [24] H. Zhou, H. Wang, X. Du, Y. Zhang, H. Zhou, H. Yuan, H. Y. Liu, Y. W. Mai, (2018) **“Facile fabrication of large 3D graphene filler modified epoxy composites with improved thermal conduction and tribo,”** Carbon, Elsevier Ltd, Vol. 139, pp. 1168–1177.
- [25] M. Campo, A. Jiménez-Suárez, A. Ureña, (2015) **“Effect of type, percentage and dispersion method of multi-walled carbon nanotubes on tribological properties of epoxy composites,”** Wear, Vol. 324–325, pp. 100–108.
- [26] S. Iijima, (1991) **“Helical microtubules of graphitic carbon,”** Nature, Vol. 354, No. 6348, pp. 56–58.
- [27] I. D. Rattee, F. Jones, D. Patterson, (1968) **“Advances in the science and technology of colour.,”** Composites Science, Vol. 24, NO. 122, pp. 379–389.
- [28] H. Chen, O. Jacobs, W. Wu, G. Rüdiger, B. Schädel, (2007) **“Effect of dispersion method on tribological properties of carbon nanotube reinforced epoxy resin composites,”** Polymer Testing, Vol. 26, pp. 351–360.
- [29] L. J. Cui, H. Z. Geng, L. T. Chen, W. Y. Wang, J. Gao, (2013) **“Functionalization of multi-wall carbon nanotubes to reduce the coefficient of the friction and improve the wear resistance of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites,”** Carbon, Vol. 54, pp. 277–282.
- [30] K. K. Singh, J. J. Kalita, N. Sharma, (2018) **“Investigation of friction and wear behavior of MWCNTs filled HFRP composites under different sliding parameters and different environment,”** Materials Today, Vol. 05, pp. 2847–28353.
- [31] M. M. Sakka, Z. Antar, K. Elleuch, J. F. Feller, (2017) **“Tribological response of an epoxy matrix filled with graphite and/or carbon nanotubes,”** Friction, Vol. 5, No. 2, pp. 171–182.
- [32] R. Ashok Gandhi, K. Palanikumar, B. K. Ragunath, J. P. Davim, (2013) **“Role of**

- carbon nanotubes (CNTs) in improving wear properties of polypropylene (PP) in dry sliding condition,”** *Materials and Design*, Vol. 48, pp. 52–57.
- [33] L. Yan, H. Wang, C. Wang, L. Sun, D. Liu, Y. Zhu, Yan. (2013) **“Friction and wear properties of aligned carbon nanotubes reinforced epoxy composites under water lubricated conditio,”** *Wear*, Vol. 308, No. 1-2, pp. 105–112.
- [34] A. B. Sulong, J. Park, N. Lee, J. Goak, (2006) **“Wear behavior of functionalized multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy matrix composites,”** *Composite Materials*, Vol. 40, No. 21, pp. 1947–1960.
- [35] L. C. Zhang, I. Zarudi, K. Q. Xiao, (2006) **“Novel behaviour of friction and wear of epoxy,”** *Wear*, Vol. 261, No. 7-8, pp. 806–811.
- [36] B. Dong, Z. Yang, Y. Huang, H. L. Li, (2005) **“Study on tribological properties of multi-walled carbon nanotubes/epoxy resin nanocomposites,”** *Tribology Letters*, Vol. 20, No. 3-4, pp. 251–254.
- [37] M. N. Dos Santos, C. V. Opelt, S. H. Pezzin, S. C. Amico, C. E. Da Costa, J. C. Milan, F. H. Lafratta, L. A. F. Coelho, (2013) **“Nanocomposite of photocurable epoxy-acrylate resin and carbon nanotubes: Dynamic-mechanical, thermal and tribological properties,”** *Materials Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 367–374.
- [38] F. J. Carrión, C. Espejo, J. Sanes, M. D. Bermúdez, (2010) **“Single-walled carbon nanotubes modified by ionic liquid as antiwear additives of thermoplastics,”** *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 15, pp. 2160–2167.
- [39] X. J. Shen, X. Q. Pei, S. Y. Fu, and K. Friedrich, (2013) **“Significantly modified tribological performance of epoxy nanocomposites at very low graphene oxide content,”** *Polymer*, Vol. 54, No. 3, pp. 1234–1242.
- [40] X. J. Shen, X. Q. Pei, Y. Liu, S. Y. Fu, (2014) **“Tribological performance of carbon nanotube-graphene oxide hybrid/epoxy composites,”** *Composites Part B: Engineering*, Vol. 57, pp. 120–125.
- [41] D. Liu, W. Zhao, S. Liu, Q. Cen, Q. Xue, (2016) **“Comparative tribological and corrosion resistance properties of epoxy composite coatings reinforced with functionalized fullerene C60 and graphene,”** *Surface and Coatings Technology*, Vol. 286, pp. 354–364.

- [42] V. Kumar, S. K. Sinha, A. K. Agarwal, (2017) **“Tribological studies of epoxy composites with solid and liquid fillers,”** Tribology International, Vol. 105, pp. 27–36.
- [43] V. Kumar, S. K. Sinha, A. K. Agarwal, (2018) **“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, Vol. 127, pp. 10–23.
- [44] B. Chen, X. Li, Y. Jia, L. Xu, H. Liang, X. Li, J. Yang, C. Li, F. Yan, (2018) **“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, Vol. 115, pp. 157–165.
- [45] F. Zhao, L. Zhang, G. Li, Y. Guo, H. Qi, G. Zhang, (2018) **“Significantly enhancing tribological performance of epoxy by filling with ionic liquid functionalized graphene oxide,”** Carbon, Vol. 136, pp. 309–319.
- [46] S. R. Ha, S. H. Ryu, S. J. Park, K. Y. Rhee, (2007) **“Effect of clay surface modification and concentration on the tensile performance of clay/epoxy nanocomposites,”** Materials Science and Engineering A, Vol. 448, No. 1-2, pp. 264–268.
- [47] S. R. Ha, K. Y. Rhee, (2008) **“Effect of surface-modification of clay using 3-aminopropyltriethoxysilane on the wear behavior of clay/epoxy nanocomposites,”** Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 322, No. 1-3, pp. 1–5.
- [48] J. Vite, M. Vite-Torres, M. Castillo, J. R. Laguna-Camacho, J. Soto, O. Susarrey, (2010) **“Erosive wear on ceramic materials obtained from solid residuals and volcanic ashes,”** Tribology International, Vol. 43, pp. 1943–1950.
- [49] M. Vite-Torres, J. Vite, J. R. Laguna-Camacho, M. Castillo, A. Marquina-Chávez, (2011) **“Abrasive wear on ceramic materials obtained from solid residuals coming from mines,”** Wear, Vol. 271, No. 9-10, pp. 1231–1236.
- [50] D. Lingaraju, K. Ramji, N. B. R. Mohan Rao, U. Rajya Lakshmi, (2011) **“Characterization and prediction of some engineering properties of polymer -**

- Clay/silica hybrid nanocomposites through ANN and regression models,”** Procedia Engineering, Vol. 10, pp. 9–18.
- [51] C. R. Mahesha, Shivarudraiah, N. Mohan, M. Rajesh, (2017) **“Role of nanofillers on mechanical and dry sliding wear behavior of basalt- epoxy nanocomposites,”** Materials Today: Proceedings, Vol. 4, pp. 8192–8199.
- [52] A. Yasmin, J. J. Luo, J. L. Abot, I. M. Daniel, (2006) **“Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites,”** Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 14, pp. 2415–2422.
- [53] S. I. Abdullah, M. N. M. Ansari, (2015) **“Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites,”** HBRC Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 151–156.
- [54] C. Kostagiannakopoulou, G. Maroutsos, G. Sotiriadis, A. Vavouliotis, V. Kostopoulos, (2012) **“Study on the synergistic effects of graphene/carbon nanotubes polymer nanocomposites,”** Third international conference on smart materials and nanotechnology in engineering, Vol.8409, pp. 01–09.
- [55] D. H. Kim, H. S. Kim, (2013) **“Waterproof characteristics of nanoclay/epoxy nanocomposite in adhesively bonded joints,”** Composites Part B: Engineering, Vol. 55, pp. 86–95.
- [56] M. L. Chan, K. T. Lau, T. T. Wong, M. P. Ho, D. Hui, (2011) **“Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite,”** Composites Part B: Engineering, Vol. 42, No. 6, pp. 1708–1712.
- [57] S. H. Song, (2018) **“The effect of clay multiwall carbon nanotube hybrid fillers on the Properties of Elastomer Nanocomposites,”** International Journal of Polymer Science, Vol. 2018, pp. 01–08.
- [58] S. S. Thomas, J. Abraham, S. C. George, S. S. Thomas, (2020) **“Role of CNT clay hybrid on the mechanical, electrical,”** Polymer Bulletin, Vol. 77, No. 1., pp. 01–16.
- [59] K. T. Lau, S. Q. Shi, L. M. Zhou, H. M. Cheng, (2003) **“Micro-hardness and flexural properties of randomly-oriented carbon nanotube composites,”** Journal of Composite Materials, Vol. 37, No. 4, pp. 365–376.

Abstract

The aim of this study is increase the mechanical properties and to reduce the amount of wear by making polymeric composite materials using a combination of different nanostructures as a reinforcing agent. In this study, by adding nanotubes (CNTs), nanoclay (NC) and nano-graphene oxide (NGO) to the epoxy matrix, changes in the mechanical properties of the resulting material are investigated. For this purpose, pure epoxy, CNT/epoxy (1.5 wt. % of CNTs), NC/epoxy (1.5 wt. % of NCs), NGO/epoxy (1.5 wt. % of NGOs), CNT/NC/epoxy (0.75 wt. % of CNTs and 0.75 wt. % of NCs), CNT/NGO/epoxy (0.75 wt. % of CNTs and 0.75 wt. % of NGOs), NC/NGO/epoxy (0.75 wt. % of NCs and 0.75 wt. % of NGOs) and CNT/NC/NGO/epoxy (0.5 wt. % of CNTs, 0.5 wt. % of NCs and 0.5 wt. % of NGOs) nanocomposites are studied. To achieve uniformly dispersed nanoparticles within the epoxy matrix, the mechanical stirring with ultra-sonication is utilized. Young's modulus, ultimate tensile strength, strain at break point, and fracture toughness of nanocomposite specimens are extracted from stress-strain curves. Also, dry wear test was performed using a pin on disc machine at different loads (60, 20 and 100 N) and the tribological performance of the used materials is discussed at room temperature. According to the results, adding 1.5 wt.% of CNTs into the epoxy matrix has the greatest effect on the mechanical properties of epoxy. In this case, the ultimate stress and strain at break point shows 16% and 27% increase with respect to those of epoxy sample, respectively. Also, the obtained results show that the combination of nanoclay with graphene nanoxide increases the toughness 42% compared to pure epoxy, which is the highest increase compared to other samples. Epoxy / nanotube and epoxy / nanoclay composites showed the highest abrasion resistance compared to other samples. CNT/epoxy wear rate decreases by 81% with respect to that of epoxy when load equals 60 N. further, when the load increases to 100 N, NC/epoxy wear rate decreases by 60% with respect to that of pure epoxy specimen. Surface morphology characterization is evaluated by Field emission scanning electron microscopy (FESEM).

Keywords: Experimental, Nanocomposite, Epoxy, Pin on Disk Test, Wear test.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering

Experimental study of mechanical and wear properties of nanoparticle- reinforced polymer-based composites

By:

Sedigheh Ranjkesh Adarmanabady

Supervisors:

Dr. Mohammad Jafari

Dr. Seyyed Mahdi Hosseini Farrash

September 2020