



## بررسی اثر هم‌افزایی نانو اکسیدگرافن کاهش یافته و نانولوله کربنی چندجداره بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی

محمدامین بهرامی<sup>۱\*</sup>، محمود حشمتی<sup>۲</sup>، سعید فعلی<sup>۲</sup>

۱- دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده شماره ۲، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

### کلمات کلیدی:

نانوکامپوزیت  
نانواکسیدگرافن کاهش یافته  
نانولوله کربنی چندجداره  
اثر هم‌افزایی  
خواص مکانیکی

**خلاصه:** در این تحقیق، اثر هم‌افزایی دو نانوذره اکسیدگرافن کاهش یافته و نانولوله کربنی چندجداره بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی و مطالعه شده است. در گام نخست، نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره با درصد‌های وزنی نانولوله کربنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۱ با روش مخلوط‌سازی مستقیم ساخته شده و با آزمون کشش، خواص مکانیکی بدست آمده است. نتایج برای ۰/۴ درصد باعث بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم به ترتیب ۳۵/۷، ۲۱/۷ و ۱۲/۴ درصد شده است. در گام دوم، نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله اکسیدگرافن کاهش یافته با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد ساخته شده است. نتایج برای ۰/۶ درصد، باعث بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم به ترتیب ۳۷/۶، ۱۸/۱ و ۱۳/۱۴ درصد شده است. در گام سوم، اثر درصد‌های مختلف نانواکسیدگرافن کاهش یافته بر روی خواص نانوکامپوزیت با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی چند جداره بررسی شد که افزایش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم برای نانوکامپوزیت با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی چند جداره و ۰/۴ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته (نسبت اختلاط ۱ به ۱۰) را نشان داد. براساس این نسبت اختلاط نتایج برای ۰/۰۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره و ۰/۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته باعث بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم به ترتیب ۴۲/۲، ۲۵/۸ و ۱۸/۹۷ درصد شده است. همچنین جهت مشاهده توزیع نانوذرات و نوع شکست، آنالیز سطح شکست نمونه‌ها انجام شده است.

### ۱- مقدمه

پوشش‌های قوطی فلزی، لایه‌ی اولیه‌ی پوشش خودرو، تخته‌های مدار چاپی، کپسول‌های نیمه رسانا، چسب‌ها و کامپوزیت‌های هوافضا هستند. بیشتر رزین‌های اپوکسی، گرماسخت‌های<sup>۲</sup> بی‌شکل با استحکام مکانیکی عالی و چقرمگی متوسط هستند و مقاومت شیمیایی، رطوبت و خوردگی برجسته‌ای دارند. همچنین دارای خواص گرمایی، چسبندگی و مقاومت الکتریکی خوب، عدم برون‌رفت مواد فرار و جمع‌شدگی اندک در هنگام پخت و پایداری ابعادی مناسبی هستند. ترکیبی از خواص که معمولاً در هیچ ماده‌ی پلاستیکی دیگری یافت نمی‌شود. بزرگترین استفاده از رزین‌های اپوکسی در پوشش‌های حفاظتی است. همچنین در کپسول‌های نیمه‌رسانا و کامپوزیت‌های ساختاری، ابزارسازی، کف پوش و چسب‌ها، رزین‌های اپوکسی به کار می‌روند [۲].

افزودن نانوفیلرها یک روش مناسب برای بهبود عملکرد مواد است. با این حال، در حال حاضر مطالعات بسیار کمی بر روی اثر هم‌افزایی<sup>۳</sup> نانوفیلرها

یکی از راه‌های افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بدون تغییر در وزن کامپوزیت استفاده از نانوذرات است. در این میان، نانولوله‌های کربنی و نانو ذرات گرافن علاوه بر اینکه استحکام بالایی دارند، از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار هستند. نانو لوله‌های کربنی تک‌جداره و چندجداره و نانوذرات گرافن<sup>۱</sup> به واسطه تولید انبوه در دسترس و ارزان هستند. بنابراین در مقیاس صنعتی بطور وسیع استفاده می‌شوند. پژوهش‌های زیادی در مورد اثرات افزودن این نانو مواد به رزین‌های مختلف انجام شده است [۱].

رزین‌های اپوکسی دسته‌ای از مواد پلیمری هستند که به واسطه حضور بیش از یک حلقه‌ی سه عضوی که به گروه اپوکسی، اپوکساید، اکسیران یا اتوکسیلین شناخته می‌شود، مشخص می‌گردند. اپوکسی‌ها یکی از مستعدترین طبقات پلیمرها با کاربردهای گوناگونی همچون

### 1 Graphene Nanoparticles

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m-bahrami@tvu.ac.ir

- 2 Thermoset
- 3 Synergistic

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



۹/۰ درصد نانوپلیت گرافن و ۰/۱ درصد نانولوله کربنی به دست آوردند. ویکانگ لی و همکاران [۹]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند و ۲۰ درصد افزایش استحکام کششی و ۱۴ درصد افزایش مدول یانگ را برای ۰/۲۶ درصد نانوپلیت گرافن و ۰/۲۴ درصد نانولوله کربنی به دست آوردند. لیانگ یو و همکاران [۱۰]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند و ۱۲ درصد افزایش استحکام کششی و ۱۸ درصد افزایش مدول یانگ را برای ۰/۰۸ درصد نانوپلیت گرافن و ۰/۰۲ درصد نانولوله کربنی به دست آوردند. شین یانگ و همکاران [۱۱]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند و ۱۲ درصد افزایش استحکام کششی و ۱۸ درصد افزایش مدول یانگ را برای ۰/۹ درصد نانوپلیت گرافن و ۰/۱ درصد نانولوله کربنی به دست آوردند. پونا دی و همکارانش [۱۲]، اثر هم‌افزایی اکسید گرافن کاهش‌یافته و نانولوله‌های کربنی چندجداره را بر روی لاستیک طبیعی بررسی کردند و ۸۰ درصد افزایش استحکام کششی و ۱۰۰ درصد افزایش مدول یانگ را برای ۲/۱۵ درصد وزنی اکسید گرافن و ۲/۱۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره به دست آوردند. انلیانگ وانگ و همکارانش [۱۳]، اثر هم‌افزایی اکسید گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت نوعی اپوکسی<sup>۵</sup> بررسی نمودند و ۷۳ درصد افزایش مدول یانگ و ۷۵ درصد افزایش تنش نهایی را برای ۴ درصد نانوذرات نسبت به اپوکسی خالص به دست آوردند. یی مینگ جن و همکارانش [۱۴]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی چند جداره را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند که برای ۰/۴ درصد نانوذرات با نسبت اختلاط ۹ به ۱ مدول یانگ، تنش تسلیم و تنش نهایی اپوکسی به ترتیب ۸/۸، ۵/۵ و ۱۵/۳ درصد افزایش پیدا کردند. آنکیتا بیشت و همکارانش [۱۵]، اثر هم‌افزایی گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند که برای ۰/۵ درصد نانوذرات با نسبت اختلاط ۷/۵ به ۲/۵ تنش نهایی اپوکسی ۲/۴۶ درصد افزایش پیدا کرد. یاچائو لی و همکاران [۱۶] مروری بر تحقیقات انجام‌شده بر روی بهبود خواص مکانیکی را برای نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله کربنی گزارش کرده‌اند که بهبود خواص مکانیکی برای درصدهای خاصی از ترکیب مشاهده شده است. همچنین پاچورجیو و همکاران [۱]، مروری بر تحقیقات انجام‌شده بر روی خواص مکانیکی پلیمرهای تقویت‌شده با مشتقات گرافن و همچنین اثر

در بهبود خواص مکانیکی، هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی کامپوزیت اپوکسی وجود دارد. بعضی مطالعات نشان می‌دهند که نانولوله‌های کربنی چند جداره<sup>۱</sup> می‌توانند به خوبی از طریق گرافن و مشتقات آن پراکنده شوند که خواص بهتر را نسبت به حالت تکی نشان می‌دهد [۱].

ترکیبی از نانوفیلرها نه تنها باعث افزایش استحکام کششی و مدول یانگ می‌شود، بلکه همچنین باعث افزایش سختی نانوکامپوزیت‌ها<sup>۲</sup> می‌شوند. با این حال، دستیابی به تغییرات مکانیکی قابل توجهی از گرماسخت مانند اپوکسی، نسبتاً سخت‌تر است. لیانگ و همکارانش [۳]، اثر اکسید گرافن<sup>۳</sup> را بر روی پلی‌وینیل الکل بررسی کردند و ۷۶ درصد افزایش استحکام کششی و ۶۲ درصد افزایش مدول یانگ را تنها با اضافه کردن ۰/۷ درصد وزنی اکسید گرافن به دست آوردند. بیندو شارمیلا و همکارانش [۴]، اثر اکسید گرافن کاهش‌یافته<sup>۴</sup> را بر اپوکسی بررسی کردند و ۳۲ درصد افزایش استحکام کششی، ۱۱ درصد افزایش مدول یانگ، ۱۰۳ درصد افزایش استحکام ضربه‌ای ۸۵ درصد افزایش استحکام خمشی را با اضافه کردن ۰/۲۵ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته به دست آوردند. نریمان یوسفی و همکارانش [۵]، اثر اکسید گرافن کاهش‌یافته را بر اپوکسی بررسی کردند و ۴۰۰ درصد افزایش استحکام کششی را با اضافه کردن ۱/۵ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته و ۷۰ درصد افزایش مدول یانگ را با اضافه کردن ۲ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته به دست آوردند. چنگ تانگ و همکارانش [۶]، اثر اکسید گرافن کاهش‌یافته را بر اپوکسی بررسی کردند و ۷ درصد افزایش استحکام کششی و ۶ درصد افزایش مدول یانگ را با اضافه کردن ۰/۲ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته به دست آوردند. یوانگینگ لی و همکارانش [۷]، اثر هم‌افزایی اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی چندجداره را بر روی اپوکسی بررسی کردند و ۱۲ درصد افزایش استحکام کششی را برای ۰/۲ درصد وزنی اکسید گرافن و ۰/۰۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چندجداره و ۱۱ درصد افزایش مدول یانگ را برای ۰/۲ درصد وزنی اکسید گرافن و ۰/۰۶ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چندجداره به دست آوردند. پین نینگ و همکاران [۸]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی برای درصدهای مختلف نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی بررسی نمودند و ۲۶/۴ درصد افزایش استحکام خمشی، ۲۲ درصد افزایش استحکام کششی و ۳/۲۴ درصد افزایش مدول خمشی را برای

- 1 Multi-walled Carbon Nanotubes (MWCNTs)
- 2 Nanocomposite
- 3 Graphene Oxide (GO)
- 4 Reduced Graphene Oxide (RGO)

5 Waterborne Epoxy (WEP)

دقیقه قرار داده شد تا کلوخه‌های آن از هم باز شود [۱۷]. سپس مخلوط با هاردنر براساس نسبت اختلاط ترکیب شده و توسط همزن مغناطیسی به مدت ۵ دقیقه با دور ۵۰۰ دور در دقیقه همزده شده‌است. بعد از آن، توسط پمپ خلاء حباب‌های داخل آن خارج شده و در پایان مخلوط آماده‌شده، داخل قالب ریخته شده‌است. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب جدا و به مدت یک هفته در دمای محیط نگه داشته شده‌است تا پخت آنها کامل شود. همچنین جهت مقایسه نتایج مربوط به خواص مکانیکی نمونه بدون افزودن نانومواد نیز ساخته شده‌است.

در شکل ۱ مراحل آماده سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت نشان داده شده‌است.

### ۲-۳- آزمون کشش

جهت انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های دمبلی شکل نانوکامپوزیت که براساس استاندارد ASTM-D638 ساخته شده‌اند از ماشین آزمون کشش یونیورسال سنتام ۱۵۰ استفاده شده‌است [۱۸]. سپس نمونه‌ها در دستگاه قرار داده شده و بعد از تنظیم اکستنسومتر<sup>۱</sup> و معرفی ابعاد نمونه در نرم‌افزار دستگاه، سرعت آزمون روی ۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده و تست انجام می‌شود و تا شکست نمونه ادامه دارد. در شکل ۲ نحوه انجام آزمون کشش برای نمونه اپوکسی خالص نشان داده شده‌است.

### ۲-۴- بررسی سطح شکست نمونه

به منظور بررسی سطح شکست نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونیکی SEM مدل AIS2300C تحت ولتاژ شتابی 22 kV استفاده شده که در شکل ۳- الف تصویر مربوط به آن آورده شده‌است. همچنین بر روی نمونه‌ها پوششی از طلا استفاده شده‌است تا رسانایی آن بیشتر شود. این پوشش‌دهی در محیط خلاء توسط دستگاه پوشش‌دهی طلا hoyeon انجام می‌شود و در شکل ۳- ب تصویر آن نشان داده شده‌است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون کشش

نتایج مربوط به آزمون کشش به سه بخش تقسیم شده‌است. ابتدا نتایج مربوط به نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره با اپوکسی خالص مقایسه شده‌است. سپس نتایج مربوط به نانوکامپوزیت اپوکسی/نانواکسیدگرافن کاهش‌یافته با اپوکسی و در پایان نتایج مربوط به اثر

هم‌افزایی مشتقات گرافن با نانوذرات دیگر را ارائه دادند. که بهبود خواص مکانیکی برای حالت‌های خاصی از نانوکامپوزیت حاصل شده‌است.

اثر هم‌زمان نانولوله کربنی چندجداره و نانواکسید گرافن کاهش‌یافته به عنوان پرکننده ترکیبی بر روی رزین‌های گرماسخت هنوز مشخص نیست و از آنجاییکه اثر اکسیدگرافن کاهش‌یافته نسبت به اکسیدگرافن در بهبود خواص مکانیکی بهتر است، پس انتظار می‌رود که بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اکسیدگرافن کاهش‌یافته و نانولوله کربنی چندجداره نسبت به نانوکامپوزیت اکسیدگرافن و نانولوله کربنی چندجداره بهتر باشد. هدف تحقیق حاضر، بررسی اثر اضافه‌نمودن هم‌زمان این نانو ذرات بر روی خواص مکانیکی رزین‌های گرماسخت مانند اپوکسی و تعیین نسبت اختلاط این دو نانو ذره به منظور بهبود خواص مکانیکی است. بدین منظور ابتدا نمونه‌هایی از نانوکامپوزیت‌ها با نانولوله کربنی چندجداره و نانوکامپوزیت با نانواکسید گرافن کاهش‌یافته ساخته شده و با آزمون کشش خواص مکانیکی آن استخراج شده‌است سپس برای نمونه با خواص بهتر اثر اضافه‌کردن نانو ذره دیگر بر خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آنها گزارش شده‌است.

### ۲- مطالعات آزمایشگاهی

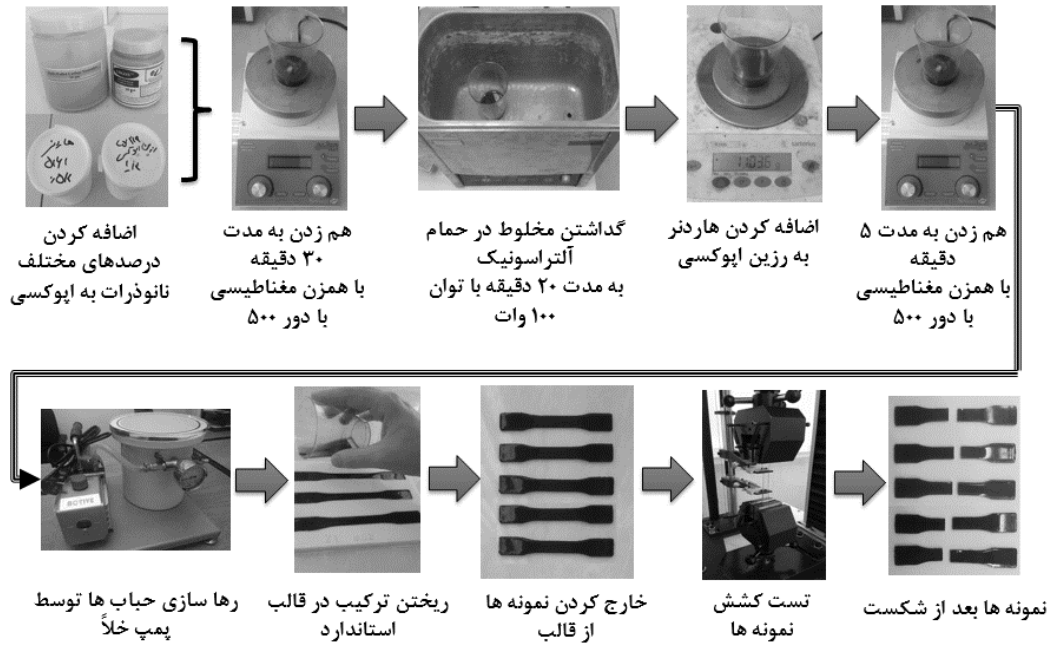
#### ۲-۱- مواد مورد استفاده

اکسید گرافن کاهش‌یافته با ابعاد بین ۱ تا ۱۰ میکرون و ضخامت ۰/۸ تا ۲ نانومتر و خلوص بیشتر از ۹۸/۸ درصد و نانولوله کربنی چندجداره با طول میانگین ۱۰ میکرون و میانگین قطر خارجی ۲۵ نانومتر و درصد خلوص بیشتر از ۹۸/۸ از شرکت یونایتد نانو تک تهیه شده‌اند. رزین اپوکسی CY219 با هاردنر HY5161 با نسبت اختلاط ۲ به ۱ ساخت شرکت هانستمن از شرکت شیمی افسون تهیه شده‌است.

#### ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت

جهت آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌ها از استاندارد ASTM D638 و روش مخلوط‌سازی مستقیم استفاده شده‌است. بدین منظور، ابتدا درصد مورد نیاز از هر کدام از نانو مواد (نانولوله کربنی چندجداره و اکسید گرافن کاهش‌یافته) به رزین اضافه شده و توسط همزن مغناطیسی در دمای محیط (حدوداً ۳۷ درجه سانتیگراد) به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۵۰۰ دور در دقیقه همزده شده‌است. زمان بیشتر هم‌زدن مخلوط تأثیری در حل‌شدن نانو مواد ندارد. در مرحله بعد، مخلوط آماده‌شده داخل حمام آلتراسونیک با توان ۱۰۰ وات به مدت ۲۰

1 Extensometer



شکل ۱. مراحل آماده سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت

Fig. 1. The steps for fabricating of nanocomposite specimens



شکل ۲. دستگاه آزمون کشش سنتام

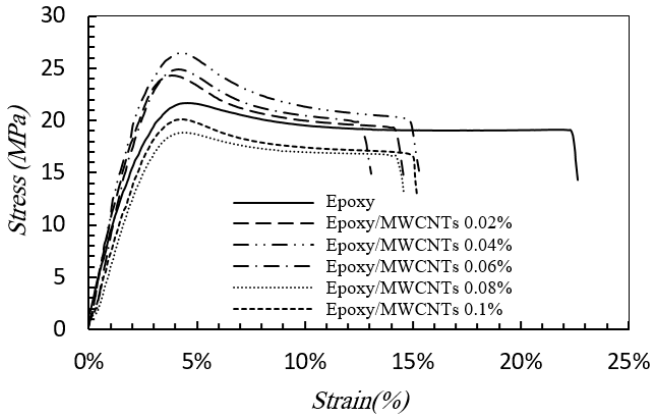
Fig. 2. The tensile test set up SANTAM

هم‌افزایی دو نانو ذره آورده شده‌است.

در شکل ۴ نتایج مربوط به تست کشش نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره برای درصد‌های ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۱ نانولوله کربنی چندجداره آورده شده‌است.

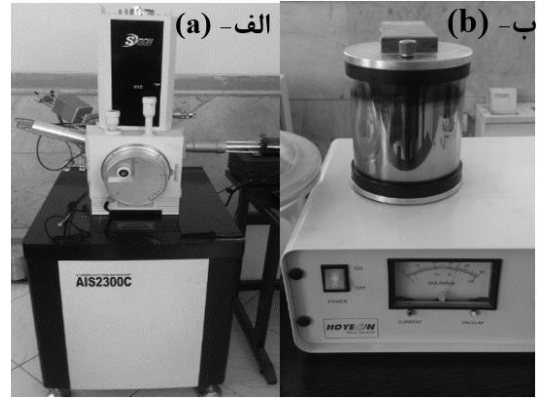
در شکل ۵ و ۶ نتایج مربوط به تست کشش نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره شامل مدول یانگ، تنش نهایی، تنش تسلیم، چقرمگی شکست و کرنش شکست برای درصد‌های ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۱ نانولوله کربنی چندجداره آورده شده‌است.

با توجه به نتایج نشان‌داده‌شده در شکل ۵، بیشترین میزان افزایش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم مربوط به نانوکامپوزیت با ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره می‌باشد و به ترتیب حدود ۳۵/۷، ۷/۲۱ و ۱۲/۴۷ درصد است. چنین رفتاری برای نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله کربنی چندجداره قبلاً گزارش شده‌است [۱۹]. همچنین مقادیر مربوط به مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم مربوط به اپوکسی CY 219 با نتایج ارائه‌شده توسط رحمت اله قجر و همکاران در دمای ۳۷ درجه تطابق دارد [۲۰]. علت افزایش مدول یانگ می‌تواند بخاطر استفاده از پرکننده نانولوله



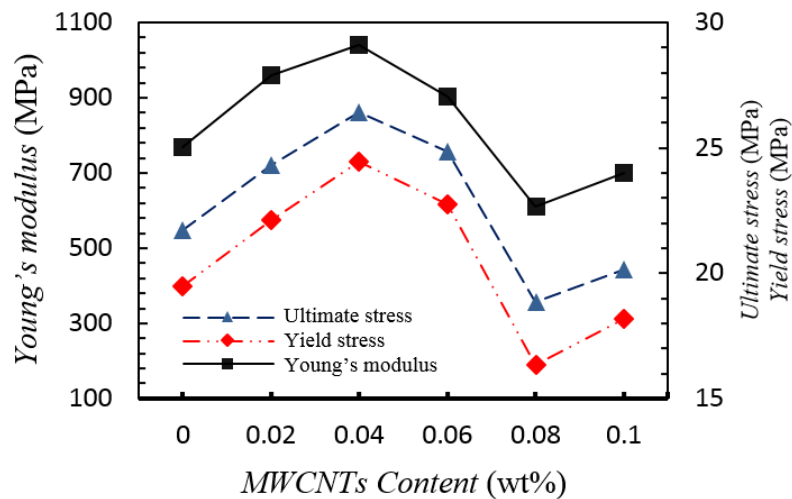
شکل ۴. نمودار تنش کرنش مربوط به نانوکامپوزیت با درصد های مختلف نانولوله کربنی چند جداره

Fig. 4. The stress-strain curve for nanocomposite specimens with different MWCNTs weight percentages



شکل ۳. (الف) دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی (SEM) (ب) دستگاه پوشش دهی طلا

Fig. 3. (a) Scanning Electronic Microscope (b) Gold coating device



شکل ۵. مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم نتایج مربوط به آزمون کشش نانوکامپوزیت با درصد های مختلف نانولوله کربنی چند جداره

Fig. 5. The Young's modulus, ultimate stress and yield stress of tensile test of nanocomposite with different MWCNTs weight percentages

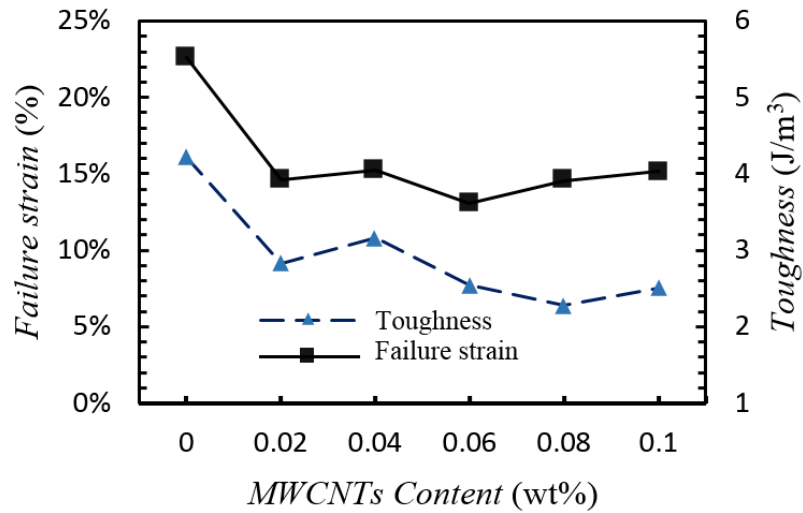
نانولوله کربنی و اپوکسی باشد. با افزایش برهم کنش بین نانولوله کربنی و اپوکسی تحرک زنجیره های اپوکسی کمتر شده، انعطاف پذیری کاهش می یابد.

در شکل ۷، نتایج مربوط به تست کشش نانوکامپوزیت اپوکسی/اکسید گرافن کاهش یافته برای برای درصد های وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ نانواکسید گرافن کاهش یافته آورده شده است.

در شکل ۸ و ۹ نیز به ترتیب نتایج مربوط به تست کشش نانوکامپوزیت

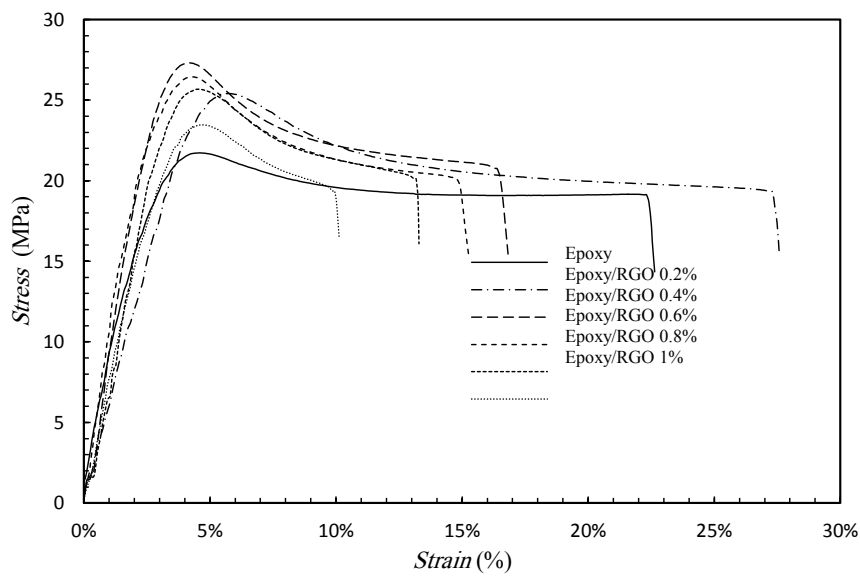
کربنی چند جداره باشد که دارای مدول یانگ بالایی هستند و علت افزایش تنش نهایی، پیوند نانولوله های کربنی با اپوکسی و جلوگیری از رشد و ایجاد ترک است. در ادامه با افزایش درصد نانولوله کربنی بر اثر تشکیل کلوخه های نانولوله کربنی در ترکیب، تمرکز تنش ایجاد شده و مقدار مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم کاهش پیدا کرده است. مطابق شکل ۶ با افزایش درصد نانولوله های کربنی میزان چقرمگی شکست و کرنش شکست کاهش پیدا کرده است که این می تواند به علت چسبندگی قوی و برهم کنش قوی بین





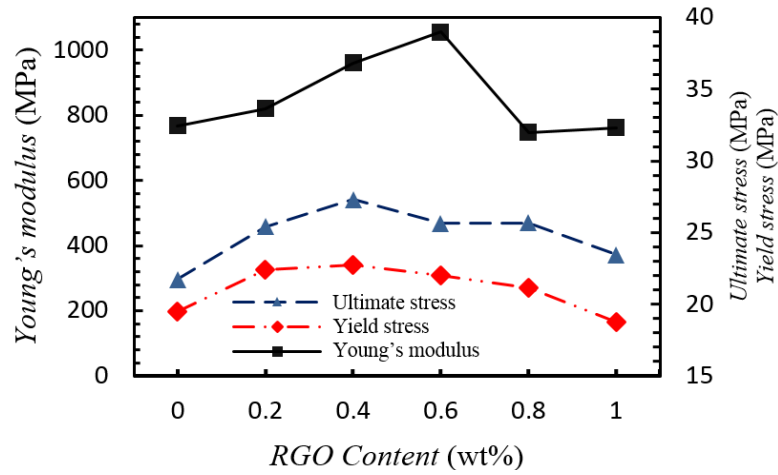
شکل ۶. چقرمگی شکست و کرنش شکست نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف نانولوله کربنی چندجداره

Fig. 6. The fracture toughness and failure strain of nanocomposite with different MWCNTs weight percentages



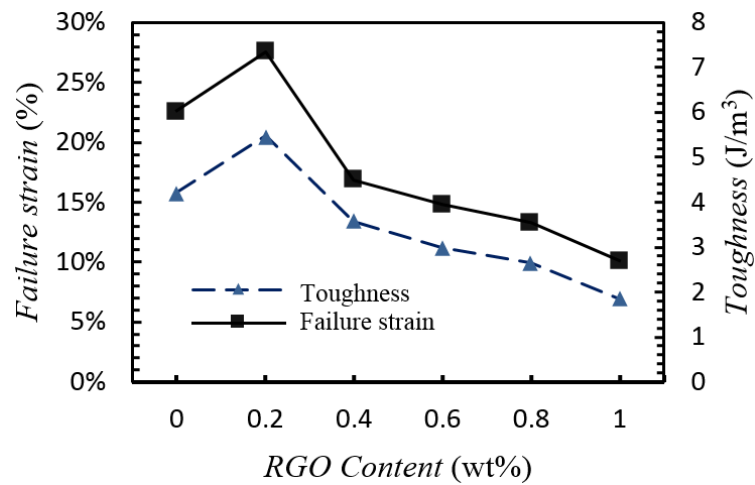
شکل ۷. نمودار تنش کرنش مربوط به نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف اکسید گرافن کاهش یافته

Fig. 7. The stress-strain curve for nanocomposite specimens with different RGO weight percentages



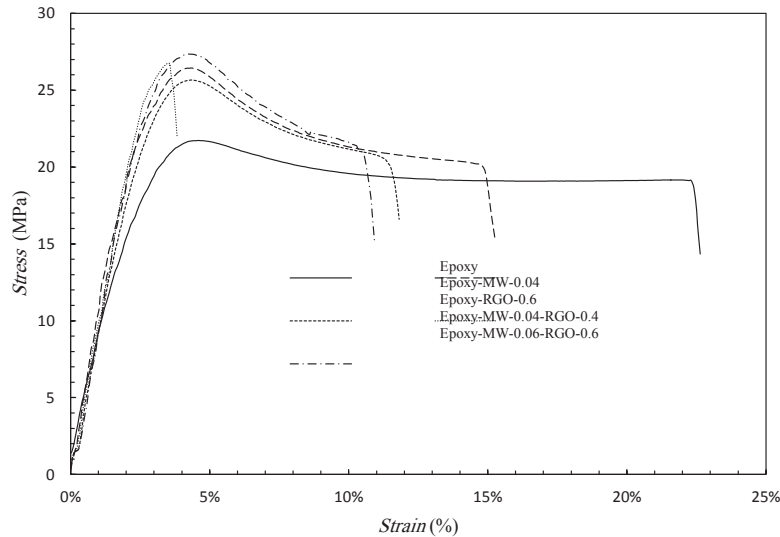
شکل ۸. مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم نتایج مربوط به آزمون کشش نانوکامپوزیت با درصد‌های مختلف اکسیدگرافن کاهش یافته

Fig. 8. Young's modulus, ultimate stress and yield stress of tensile test of nanocomposite with different RGO weight percentages



شکل ۹. چقرمگی شکست و کرنش شکست نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف اکسیدگرافن کاهش یافته

Fig. 9. The fracture toughness and failure strain of nanocomposite with different RGO weight percentages



شکل ۱۰. نمودار تنش کرنش مربوط به نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی چند جداره و نانواکسیدگرافن کاهش یافته

**Fig. 10. The stress-strain curve for nanocomposite specimens with different MWCNTs and RGO weight percentages**

نتیجه انعطاف‌پذیری نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش برای نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره/نانواکسیدگرافن کاهش یافته برای چند درصد مختلف آورده شده‌است.

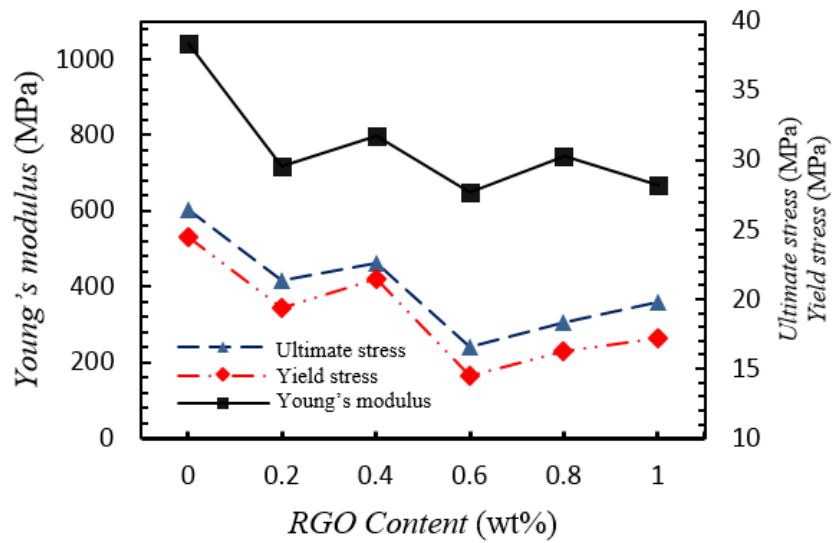
در شکل ۱۱ و ۱۲ نتایج اثر هم‌افزایی ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی با درصد‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ نانواکسیدگرافن کاهش یافته آورده شده‌است.

با توجه به شکل ۱۱ اثر افزودن نانواکسیدگرافن کاهش یافته به نانوکامپوزیت اپوکسی/۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی که بیشترین میزان مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم را داشت، باعث کاهش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم شده‌است. بهترین ترکیب اپوکسی/۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چند جداره / ۰/۴ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته است (نسبت ۱ به ۱۰)، که مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم به ترتیب ۴/۰۴، ۴/۰۲ و ۱۰/۱ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش و ۲۳/۳، ۱۴/۵ و ۱۲/۴۵ درصد نسبت به نانوکامپوزیت اپوکسی/۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره، کاهش پیدا کرده‌است. این نسبت ۱ به ۱۰ را می‌توان نسبت بهینه برای ترکیب دو نانو ذره در نظر گرفت. نوسان‌های مربوط به تغییرات خواص را می‌توان به دو عامل که در اثر ترکیب هم زمان دو نانو ذره بوجود می‌آید نسبت داد. اول اینکه افزودن نانواکسیدگرافن کاهش یافته باعث توزیع

اپوکسی/اکسیدگرافن کاهش یافته شامل مدول یانگ، تنش نهایی، تنش تسلیم، چقرمگی شکست و کرنش شکست برای درصد‌های وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ نانواکسیدگرافن کاهش یافته آورده شده‌است.

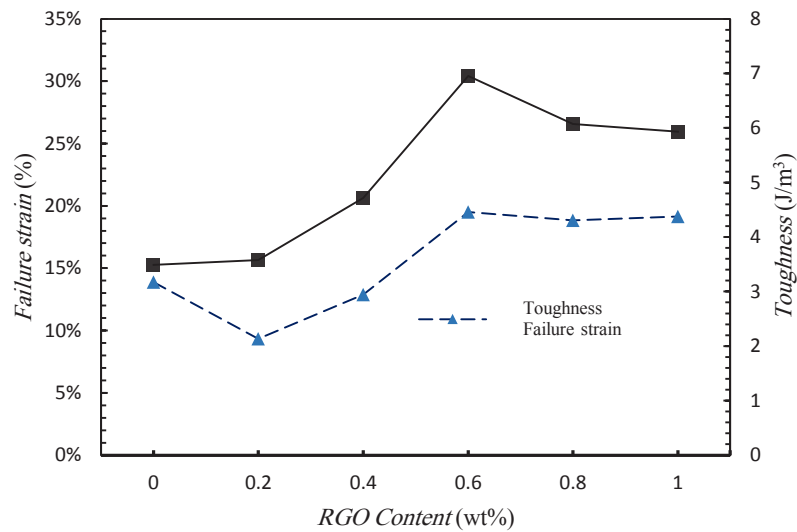
با توجه به شکل ۸ بیشترین میزان افزایش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم مربوط به نانوکامپوزیت با ۰/۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته بوده و به ترتیب حدود ۶/۳۷، ۱/۱۸ و ۱۴/۱۳ درصد می‌باشد. چنین رفتاری برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانواکسیدگرافن کاهش یافته قبلاً گزارش شده‌است [۲۱]. علت افزایش مدول یانگ بخاطر استفاده از پرکننده نانواکسیدگرافن کاهش یافته است که دارای مدول یانگ بالایی هستند و همچنین ورقه‌ای بودن این نانوذره که باعث برهم‌کنش‌های قوی مابین نانوذره و اپوکسی شده‌است. علت افزایش تنش نهایی و تنش تسلیم برهم‌کنش بین ورقه‌های نانواکسیدگرافن کاهش یافته با اپوکسی و جلوگیری از رشد و ایجاد ترک است. در ادامه با افزایش درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته بر اثر تشکیل انباشتگی ورقه‌های نانواکسیدگرافن کاهش یافته در ترکیب، تمرکز تنش ایجاد شده و مقدار مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم کاهش پیدا کرده‌است. همچنین با افزایش درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته میزان چقرمگی شکست و کرنش شکست مطابق شکل ۹ کاهش پیدا کرده‌است که این نیز می‌تواند به علت برهم‌کنش‌های قوی کووالانسی و غیر کووالانسی مابین نانوذره و اپوکسی باشد که مانع تحرک زنجیرهای پلیمری می‌شود. در





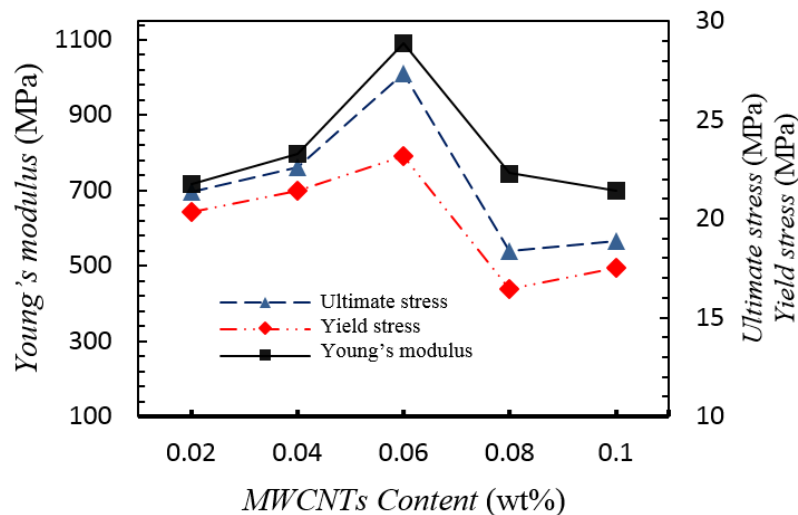
شکل ۱۱. مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم نتایج مربوط به آزمون کشش نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف اکسیدگرافن کاهش یافته و ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی

Fig. 11. Young's modulus, ultimate stress and yield stress of tensile test of nanocomposite with different RGO weight percentages and 0.04% MWCNTs.



شکل ۱۲. چقرمگی شکست و کرنش شکست نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف اکسیدگرافن کاهش یافته و ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی

Fig. 12. The fracture toughness and failure strain of nanocomposite with different RGO weight percentages and 0.04% MWCNTs.



شکل ۱۳. مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم نانوکامپوزیت اپوکسی/ نانولوله کربنی چندجداره / نانواکسیدگرافن کاهش یافته برای نسبت ۱ به ۱۰ و درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی چندجداره

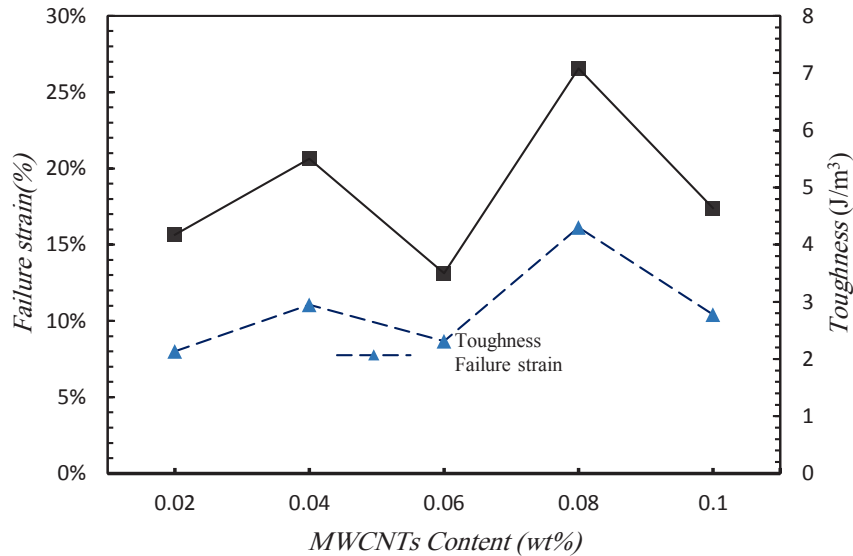
Fig. 13. Young's modulus, ultimate stress and yield stress of nanocomposite epoxy/MWCNTs/RGO with Mixing ratio 1: 10 and different MWCNTs weight percentages

با توجه به شکل ۱۳ نتایج مربوط به مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم آورده شده است که بهینه ترین ترکیب با توجه به نسبت اختلاط ۱ به ۱۰، نانوکامپوزیت اپوکسی / ۰/۰۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره / ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته است که مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم به ترتیب ۴۲/۲، ۲۵/۸۸ و ۱۸/۹۷ درصد نسبت به اپوکسی خالص و ۳/۴، ۶/۶ و ۵/۱۵ درصد نسبت به نانوکامپوزیت اپوکسی / ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته، افزایش پیدا کرده است. علت افزایش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم در این ترکیب برهم کنش قوی دو نانوذره در این نسبت اختلاط بهینه و تشکیل ساختارهای سه بعدی است که از تجمع چهره به چهره ورقه های نانواکسیدگرافن کاهش یافته جلوگیری می کند. این ساختار سه بعدی باعث ایجاد سطح تماس بیشتر بین اپوکسی و نانوذرات می شود. یکی دیگر از علل افزایش این هم افزایی این است که نانولوله های کربنی می توانند به عنوان شاخک هایی توسعه یافته برای ساختارهای سه بعدی بوجد آمده عمل کنند، که می تواند با زنجیره های پلیمری درگیر شود و در نتیجه تعامل بهتری بین دو نانوذره و اپوکسی ایجاد شود [۱۱].

علت کاهش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم برای درصدهای بالاتر از نانوذرات به علت افزایش گرانشی است که منجر به محبوس شدن حباب در داخل نانوکامپوزیت در هنگام پخت و مانع برهم کنش قوی بین

بهتر نانولوله های کربنی و در نتیجه برهم کنش بهتر نانوذرات با اپوکسی می شود. دوم اینکه نسبت بالای نانواکسیدگرافن کاهش یافته مانعی برای توزیع یکنواخت تر نانولوله کربنی است. درصد بالای نانوذرات باعث افزایش گرانشی ترکیب شده و در نهایت منجر به نقص هایی مانند حباب هوا و یا توزیع ناهمگن نانوذرات و ایجاد کلوخه در کامپوزیت می شود. همچنین مطابق شکل ۱۲ افزودن اکسیدگرافن کاهش یافته باعث افزایش چقرمگی شکست و کرنش شکست شده است. دلیل این امر این است که زمانی که برهم کنش قوی بین نانوذرات و اپوکسی اتفاق نیافتد، زنجیره های پلیمری می توانند تحرک بیشتری داشته باشند و در نتیجه انعطاف پذیری نانوکامپوزیت افزایش می یابد. همچنین بهترین وضعیت برای افزایش چقرمگی شکست و کرنش شکست برای ترکیب اپوکسی / ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چند جداره / ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته است (نسبت ۱ به ۱۵)، که به ترتیب ۶۷/۵ و ۳۸/۳۴ درصد نسبت به اپوکسی خالص و ۲/۴۰ و ۲/۹۹ درصد نسبت به نانوکامپوزیت اپوکسی / ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره، افزایش نشان می دهد.

در اشکال ۱۳ و ۱۴ نتایج اثر هم افزایی نانواکسیدگرافن کاهش یافته و نانولوله کربنی چندجداره برای نسبت ۱ به ۱۰ و درصدهای وزنی ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۱/۰ نانولوله کربنی چندجداره آورده شده است.



شکل ۱۴. چقرمگی شکست و کرنش شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره / نانو اکسید گرافن کاهش یافته برای نسبت ۱ به ۱۰ و درصد های وزنی مختلف نانولوله کربنی چندجداره

Fig. 14. The fracture toughness and failure strain of nanocomposite epoxy/MWCNTs/RGO with Mixing ratio 1: 10 and different MWCNTs weight percentages

نانوذرات می شود. بر اساس شکل ۱۴، نانوکامپوزیت اپوکسی/۰/۶ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته/۰/۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره کمترین مقدار چقرمگی شکست و کرنش شکست را دارد که این بخاطر برهم کنش قوی بین نانوذرات و پلیمرهای اپوکسی و محدود شدن تحرک زنجیره های پلیمری و کاهش انعطاف پذیری نانوکامپوزیت در این درصد است. افزایش و کاهش مقدار چقرمگی شکست و کرنش شکست برای درصدهای بیشتر نانوذرات بخاطر بالا رفتن درصد نانوذرات است که باعث افزایش گرانی و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت دو نانوذره می شود. عدم توزیع یکنواخت دو نانوذره منجر به کاهش برهم کنش های قوی بین دو نانوذره و اپوکسی می شود. این پدیده باعث می شود که پیوندهای جداگانه اپوکسی/نانولوله کربنی و اپوکسی/اکسید گرافن کاهش یافته همراه با ساختار اپوکسی/نانولوله کربنی/اکسید گرافن کاهش یافته، در نانوکامپوزیت وجود داشته باشد. با توجه به این قضیه برحسب اینکه از هر ترکیب چه مقدار در نانوکامپوزیت وجود داشته باشد، چقرمگی شکست و کرنش شکست با توجه به شکل های ۶ و ۹ رفتار خواهد کرد.

۰/۶ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته -۴ اپوکسی با ۰/۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره و ۰/۶ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته، آورده شده است.

۲-۳- بررسی سطح شکست نمونه ها

جهت بررسی سطح شکست نمونه ها برای درصدهای مختلف نانوذرات از میکروسکوپ الکترونیکی SEM استفاده شده است. شکل ۱۵ تصاویر مربوط به سطح شکست برای چهار نمونه الف-اپوکسی خالص ب-اپوکسی با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره پ-اپوکسی با ۰/۶ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته ت-اپوکسی با ۰/۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره و ۰/۶ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته، آورده شده است.

شکل ۱۵-الف سطح شکست اپوکسی خالص است که صاف است و نشان دهنده نبود نانوذرات داخل اپوکسی و ترد بودن سطح شکست است. شکل ۱۵-ب ترکیب همگن نانولوله کربنی با اپوکسی در سطح شکست را نشان می دهد و باعث تغییر مسیر شکست شده است و ترک را مجبور به انتشار در طول یک مسیر بسیار شلوغ کرده است. شکل ۱۵-پ ترکیب همگن نانو اکسید گرافن کاهش یافته با اپوکسی را نشان می دهد که در آن تغییر مسیر شکست نمود بیشتری دارد و این باعث افزایش جذب انرژی توسط

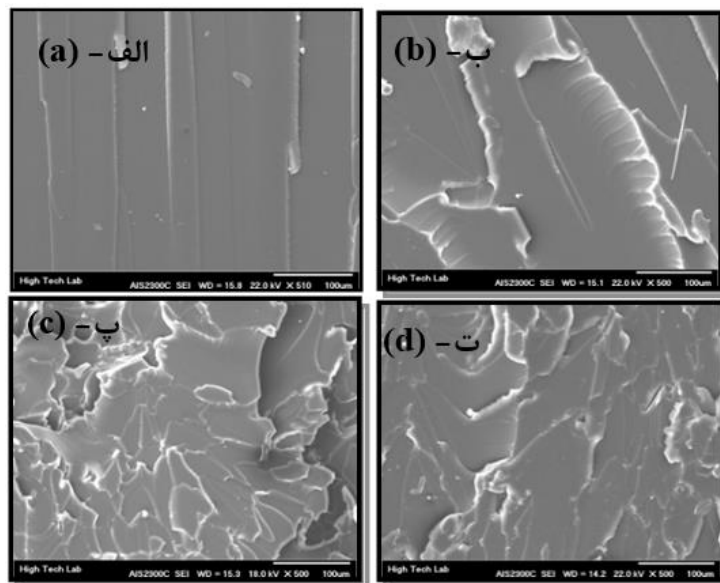
۹ رفتار خواهد کرد.

جدول ۱ برای مقایسه بین خواص مکانیکی چهار نمونه ۱- اپوکسی خالص ۲- اپوکسی با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره ۳- اپوکسی با

جدول ۱. مقایسه بین خواص مکانیکی سه نمونه نانوکامپوزیت با اپوکسی خالص

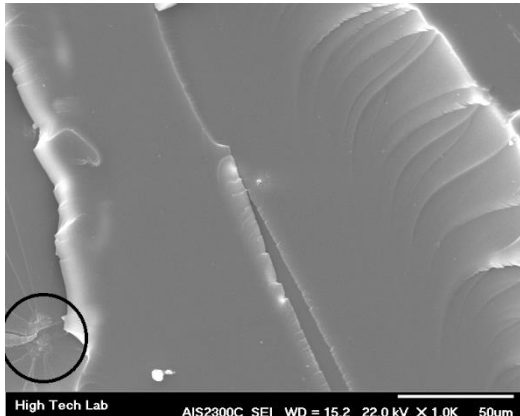
Table 1. the comparison of mechanical properties of three considered nanocomposites and neat epoxy.

خواص/ترکیب	مدول یانگ (GPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چقرمگی شکست (J/m <sup>3</sup> )	کرنش شکست (%)
اپوکسی خالص	۰/۷۷	۲۱/۷۳	۱۹/۴۵	۴/۲۲	۲۲/۶
اپوکسی با ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره	۱/۰۴ (+۳۵/۶۶ %)	۲۶/۴۳ (+۲۱/۶۸ %)	۲۴/۴۳ (+۱۲/۴۷ %)	۳/۱۷ (-۲۴/۷۸ %)	۱۵/۲۶ (-۳۲/۵۴ %)
اپوکسی با ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته	۱/۰۵ (+۳۷/۵۵ %)	۲۵/۶۵ (+۱۸/۰۷ %)	۲۲/۱ (+۱۳/۱۴ %)	۲/۹۹ (-۲۸/۹۴ %)	۱۴/۸۱ (-۳۴/۵۴ %)
اپوکسی با ۰/۰۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره و ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته	۱/۰۹ (+۴۲/۲ %)	۲۷/۳۵ (+۲۵/۸۸ %)	۲۳/۱۴ (+۱۸/۹۷ %)	۲/۳۱ (-۴۵/۲ %)	۱۰/۹۳ (-۵۱/۷۲ %)



شکل ۱۵. تصویر سطح شکست الف) اپوکسی خالص ب) اپوکسی با ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره پ) اپوکسی با ۰/۰۶ درصد نانو اکسیدگرافن کاهش یافته ت) اپوکسی با ۰/۰۶ درصد نانولوله کربنی چندجداره و ۰/۰۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته

Fig. 15. The fracture surface of (a) neat epoxy (b) epoxy/0.04 % MWCNTs (c) epoxy/0.6% RGO (d) epoxy/0.06% MWCNTs/0.6% RGO



شکل ۱۶. کلوخه تشکیل شده داخل ترکیب اپوکسی با ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی چندجداره

Fig. 16. The agglomeration of MWCNTs in the epoxy matrix (0.04 % MWCNTs)

۶ اضافه کردن نانو اکسید گرافن کاهش یافته به نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره، باعث افزایش مسیر شکست و در نتیجه جلوگیری از رشد ترک و افزایش استحکام مکانیکی نانوکامپوزیت شده است.

### منابع

- [1] D.G. Papageorgiou, I.A. Kinloch, R.J. Young, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, *Progress in Materials Science*, 90 (2017) 75-127.
- [2] C. May, *Epoxy resins: chemistry and technology*, CRC press, 1987.
- [3] J. Liang, Y. Huang, L. Zhang, Y. Wang, Y. Ma, T. Guo, Y. Chen, Molecular-level dispersion of graphene into poly (vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites, *Advanced Functional Materials*, 19(14) (2009) 2297-2302.
- [4] B.S. TK, A.B. Nair, B.T. Abraham, P.S. Beegum, E.T. Thachil, Microwave exfoliated reduced graphene oxide epoxy nanocomposites for high performance applications, *Polymer*, 55(16) (2014) 3614-3627.
- [5] N. Yousefi, X. Lin, Q. Zheng, X. Shen, J.R. Pothnis, J. Jia, E. Zussman, J.-K. Kim, Simultaneous in situ reduction, self-alignment and covalent bonding in graphene oxide/

نانوکامپوزیت شده است. همچنین ورقه های اکسید گرافن کاهش یافته باعث ایجاد اثر پل<sup>۱</sup> و جلوگیری از باز شدن شکاف های ترک شده است [۴].

شکل ۱۵-ت ترکیب همگن دو نانو ماده با اپوکسی را نشان می دهد که نشان دهنده ترکیب بهتر نانولوله کربنی در اثر اضافه کردن نانو اکسید گرافن کاهش یافته و افزایش طول مسیر شکست است.

شکل ۱۶ وجود کلوخه ها در ترکیب اپوکسی با ۰/۰۴ درصد نانولوله کربنی را نشان می دهد که باعث ایجاد تمرکز تنش، ترک و گسترش ترک در نانوکامپوزیت می شود. این پدیده در نهایت منجر به کاهش چقرمگی شکست نانوکامپوزیت شده است [۲۲].

### ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر هم افزایی همزمان دو نانوذره اکسید گرافن کاهش یافته و نانولوله کربنی چندجداره بر خواص مکانیکی اپوکسی بررسی شد. نتایج مربوط به این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. برای نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی چندجداره بیشترین میزان بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم مربوط به ۰/۰۴ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره بوده و به ترتیب حدود ۳۵/۷، ۷/۲۱ و ۱۲/۴۷ درصد است.
۲. برای نانوکامپوزیت اپوکسی/نانو اکسید گرافن کاهش یافته بیشترین میزان بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم مربوط به ۰/۰۶ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته است و به ترتیب حدود ۳۷/۶، ۱/۱۸ و ۱۴/۱۳ درصد است.
۳. افزودن ۰/۰۴ درصد وزنی نانولوله کربنی به نانوکامپوزیت اپوکسی/نانو اکسید گرافن کاهش یافته باعث کاهش مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم و افزایش چقرمگی شکست و کرنش شکست می شود.
۴. بهترین نسبت اختلاط برای ترکیب دو نانوذره و بیشترین اثر هم افزایی نسبت ۱ به ۱۰ (۱ قسمت نانولوله کربنی چندجداره به ۱۰ قسمت نانو اکسید گرافن کاهش یافته) است. همچنین بهترین نسبت اختلاط برای افزایش چقرمگی و کرنش شکست نسبت ۱ به ۱۵ است.
۵. بیشترین میزان بهبود مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم برای اثر هم افزایی مربوط به ترکیب ۰/۰۶ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره و ۶/۰ درصد نانو اکسید گرافن کاهش یافته با ۴۲/۲، ۸۸/۲۵ و ۱۸/۹۷ درصد است که بیشترین میزان افزایش بین همه حالت های مورد بررسی است.

- Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets on the Monotonic and Fatigue Properties of Uncracked and Cracked Epoxy Composites, *Polymers*, 12(9) (2020) 1895.
- [15] A. Bisht, K. Dasgupta, D. Lahiri, Evaluating the effect of addition of nanodiamond on the synergistic effect of graphene-carbon nanotube hybrid on the mechanical properties of epoxy based composites, *Polymer Testing*, 81 (2020) 106274.
- [16] Y. Li, X. Huang, L. Zeng, R. Li, H. Tian, X. Fu, Y. Wang, W.-H. Zhong, A review of the electrical and mechanical properties of carbon nanofiller-reinforced polymer composites, *Journal of Materials Science*, 54(2) (2019) 1036-1076.
- [17] M.M. Shokrieh, A. Zeinedini, S.M. Ghoreishi, Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites, *Modares Mechanical Engineering*, 15(9) (2015) 125-133. (in Persian)
- [18] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, 08.01, D638-14, 2010.
- [19] J. Ervina, M. Mariatti, S. Hamdan, Mechanical, electrical and thermal properties of multi-walled carbon nanotubes/epoxy composites: effect of post-processing techniques and filler loading, *Polymer Bulletin*, 74(7) (2017) 2513-2533.
- [20] R. Ghajar, M.M. Shokrieh, A.R. Shajari, An experimental investigation on the viscoelastic properties of CNT reinforced CY 219 epoxy resin, using DMTA and creep tests, *Materials Research Express*, 5(8) (2018) 085033.
- [21] R. Aradhana, S. Mohanty, S.K. Nayak, Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives, *Polymer*, 141 (2018) 109-123.
- [22] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings, *J. Sci. Tehnol. Compos*, 3 (2016) 187-194. (in Persian)
- epoxy composites, *Carbon*, 59 (2013) 406-417.
- [6] L.-C. Tang, Y.-J. Wan, D. Yan, Y.-B. Pei, L. Zhao, Y.-B. Li, L.-B. Wu, J.-X. Jiang, G.-Q. Lai, The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 60 (2013) 16-27.
- [7] Y. Li, R. Umer, A. Isakovic, Y.A. Samad, L. Zheng, K. Liao, Synergistic toughening of epoxy with carbon nanotubes and graphene oxide for improved long-term performance, *RSC advances*, 3(23) (2013) 8849-8856.
- [8] P.-N. Wang, T.-H. Hsieh, C.-L. Chiang, M.-Y. Shen, Synergetic effects of mechanical properties on graphene nanoplatelet and multiwalled carbon nanotube hybrids reinforced epoxy/carbon fiber composites, *Journal of Nanomaterials*, 2015 (2015).
- [9] W. Li, A. Dichiaro, J. Bai, Carbon nanotube-graphene nanoplatelet hybrids as high-performance multifunctional reinforcements in epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 74 (2013) 221-227.
- [10] L. Yue, G. Pircheraghi, S.A. Monemian, I. Manas-Zloczower, Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets-Dispersion and synergy effects, *Carbon*, 78 (2014) 268-278.
- [11] S.-Y. Yang, W.-N. Lin, Y.-L. Huang, H.-W. Tien, J.-Y. Wang, C.-C.M. Ma, S.-M. Li, Y.-S. Wang, Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Carbon*, 49(3) (2011) 793-803.
- [12] D. Ponnamma, K.K. Sadasivuni, M. Strankowski, Q. Guo, S. Thomas, Synergistic effect of multi walled carbon nanotubes and reduced graphene oxides in natural rubber for sensing application, *Soft Matter*, 9(43) (2013) 10343-10353.
- [13] E. Wang, Y. Dong, M.Z. Islam, L. Yu, F. Liu, S. Chen, X. Qi, Y. Zhu, Y. Fu, Z. Xu, Effect of graphene oxide-carbon nanotube hybrid filler on the mechanical property and thermal response speed of shape memory epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 169 (2019) 209-216.
- [14] Y.-M. Jen, J.-C. Huang, K.-Y. Zheng, Synergistic



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. A. Bahrami, M. Heshmati, S. Feli, A study on the synergistic influence of reduced graphene oxide and MWCNTs on the mechanical properties of epoxy nanocomposite, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3971-3986.*

**DOI:** [10.22060/mej.2020.18781.6888](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18781.6888)



