

رفتار کامپوزیت‌های چندمقیاسی اپوکسی-الیاف کربن حاوی نانوصفحات گرافن تحت بارگذاری عرضی

زهرآ قهرمانی

سید محمدحسین سیادت

علیرضا شهربابی فراهانی

حامد خسروی*

چکیده

مواد کامپوزیتی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند استحکام ویژه و سفتی ویژه بالا کاربردهای زیادی در صنایع خودروسازی، هوافضا، حمل و نقل و همچنین دیگر صنایع دارند. در تحقیق حاضر، به بررسی اثر افزودن نانوغرافن در مقادیر مختلف (صفر، ۰/۱، ۰/۰۳/۲، ۰/۰۴ و ۰/۵ درصد وزنی نسبت به زمینه) بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی الیاف کربن تحت بارگذاری عرضی پرداخته شده است. برای پخش نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری از دو روش هم‌زدن با سرعت بالا و اعمال امواج اولتراسونیک استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد و در ادامه آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین میزان بهبود در رفتار خمشی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن حاصل شد که در این حالت استحکام خمشی، مدول خمشی، انرژی جذب شده به ترتیب به میزان ۳۹، ۱۳۵ و ۴۷ درصد نسبت به کامپوزیت‌های فاقد نانوغرافن، افزایش یافت. همچنین مطالعات میکروسکوپ الکترونی نشان داد که افزودن نانوصفحات گرافن تأثیر بسزایی در بهبود فصل مشترک بین الیاف کربن و زمینه اپوکسی داشته است.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت زمینه پلیمری، الیاف کربن، نانوصفحات گرافن، خواص خمشی، بررسی ریزساختاری.

On the behavior of multiscale carbon fiber-epoxy composites containing graphene nanoplatelets under transverse loading

Z. Ghahremani

S. M. H. Siadati

A. Shahrabi-Farahani

H. Khosravi

Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan

Abstract

Composite materials due to their unique properties such as high specific strength and stiffness have gained many applications in automotive, aerospace, transportation and other industries. In this study, the effects of adding graphene nanoplatelets (GNPs) in various weight percentages (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 with respect to matrix) on the flexural behavior of carbon-fiber reinforced epoxy composites were assessed. For dispersion of GNPs into the polymer matrix, high speed mechanical stirrer and ultrasonic waves were used. Hand lay-up method was used for fabricating the composites, and three-point bend test for assessing their flexural behavior. Results demonstrated that the maximum improvement in flexural properties was obtained with the optimal amount of 0.4 wt.% of GNPs. The percent enhancements in flexural strength, flexural modulus, and energy absorption were 39, 135, and 47, respectively. Also, electron microscopy studies revealed that the addition of GNPs had a great influence in improving the interfacial characteristics between the matrix and the carbon fibers.

Keywords: Polymer nanocomposites, Carbon fibers, Graphene nanoplatelets, Flexural properties, Microscopic studies.

۱- مقدمه

پرمصرف‌ترین زمینه برای مواد کامپوزیتی، انواع زمینه‌های پلیمری می‌باشد. در ارتباط با پلیمرها، به علت وزن مخصوص کم و استحکام پایین، استفاده از مواد تقویت‌کننده با استحکام و مدول بالا سبب افزایش شدید استحکام ویژه و سفتی ویژه آن‌ها شده که اهدا ف اصلی مواد کامپوزیتی است [۱-۶].

الیاف کربن از دسته الیاف پیشرفته می‌باشد که به علت خصوصیات و مشخصه‌های منحصر به فردش در صنایع مختلف و البته در قسمت‌های حساس و پراهمیت کاربرد دارد. چگالی پایین، خواص مکانیکی بالا

خصوصاً سفتی بالا، مقاومت در برابر اصطکاک و دمای بالا، دوام و عمر طولانی در برابر مواد شیمیایی و نفوذ ناپذیری در برابر اشعه ایکس از بارزترین خصوصیات الیاف کربن به شمار می‌روند. به همین دلیل الیاف کربن در تکنولوژی نوین پیشتاز می‌باشد [۷ و ۸].

در دهه‌ی آخر قرن بیستم زمینه جدیدی تحت عنوان نانوکامپوزیت‌ها وارد عرصه علم و فناوری کامپوزیت‌ها شد. نانوکامپوزیت ماده مرکبی است که حداقل یکی از فازهای تشکیل‌دهنده آن دارای ابعاد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hkhosravi@eng.usb.ac.ir

نانو باشد [۹-۱۱]. یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌های نانومتری مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌ها، نانوصفحات گرافن^۱ است. گرافنی کنانوماده جدید و بعدی متشکل از اتم‌های کربن خالص است که آن را دگر شکل یا آلوتروپ دو بعدی کربن می‌دانند. این ترکیب دارای خواص الکترونیکی، نوری، حرارتی و مکانیکی فوق‌العاده‌ای است. در گرافن اتم‌های کربن تنها با سه اتم پیوند شده‌اند، ولی توانایی اتصال به چهار اتم کربن نیز در آن‌ها وجود دارد. این توانایی به همراه استحکام کششی بالا و نسبت سطح به حجم بالا، نانوغرافن را به یک ماده عالی برای ساخت کامپوزیت‌ها تبدیل کرده است [۱۲-۱۵].

شکریه و همکارانش [۱۶]، به بررسی اثر افزودن نانوذرات گرافن بر رفتار خمشی کامپوزیت اپوکسی/نانوغرافن پرداختند. بیشترین میزان بهبود در خواص به ازای افزودن ۰/۲۵ درصد وزن نانوغرافن حاصل شده که در طی آن استحکام خمشی به میزان ۱۲ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافت. اما افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوغرافن منجر به کاهش استحکام خمشی کامپوزیت شد.

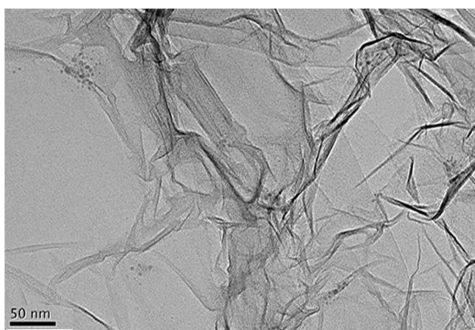
نورالدین و همکارانش [۱۷] نشان دادند که به ازای افزودن ۰/۲ درصد وزنی نانوغرافن به زمینه اپوکسی، استحکام خمشی به میزان ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق به بررسی افزودن همزمان نانوذرات رس و نانوغرافن نیز پرداخته شد که بیشترین افزایش در استحکام خمشی کامپوزیت زمینه اپوکسی را به ازای افزودن ۳ درصد وزنی نانورس و ۰/۱ درصد وزنی نانوغرافن گزارش نمودند. در این وضعیت استحکام خمشی کامپوزیت به میزان ۳۲ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافت. کامار و همکارانش [۱۸] خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه/نانوغرافن را تحت بارگذاری خمشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن تحقیق حاکی از آن بود که بیشترین میزان بهبود در خواص خمشی به ازای افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانوغرافن حاصل می‌شود. فان و همکارانش [۱۹] تأثیر نانوغرافن بر رفتار کششی کامپوزیت الیاف کیتوسان^۲/اپوکسی را به‌طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که به ازای افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانوغرافن مدول کششی کامپوزیت به میزان ۲۰۰ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانوغرافن افزایش یافت. ولی با افزودن مقادیر بیشتر نانوغرافن مدول کششی کامپوزیت تنزل پیدا نمود که ناشی از توزیع ناهمگن این نانوذرات درون زمینه پلیمری بود. شنو همکارانش [۲۰] نشان دادند که به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوغرافن بیشترین بهبود در استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/نانوغرافن حاصل می‌شود.

طبق بررسی‌های صورت گرفته، و با وجود تنوع گسترده مواد ترکیبی، تحقیقات کمی در ارتباط با تأثیر نانوصفحات گرافن بر خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف منتشر شده است. لذا رویکرد اصلی در این پژوهش بررسی اثر افزودن نانوصفحات گرافن در درصد‌های وزنی مختلف نسبت به زمینه بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری عرضی است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی با نام تجاری ۸۲۸-KER همراه با سخت کننده پلی آمینی به عنوان زمینه پلیمری نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. پارچه الیاف کربن نوع E با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر مترمربع به عنوان تقویت‌کننده الیافی کامپوزیت استفاده شد. نانوصفحات گرافن با خلوص بیش از ۹۵٪، ضخامت ۱۸-۲ نانومتر و قطر ۱۲-۴ میکرومتر (از محصولات شرکت یواس نانومتریال امریکا) به عنوان تقویت‌کننده نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانوصفحات گرافن نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانوصفحات گرافن

۲-۲- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانوذرات گرافن

برای توزیع نانوصفحات گرافن درون زمینه اپوکسی، ذرات نانوغرافن در درصد‌های وزنی مختلف به رزین اضافه شدند و اختلاط نانوذرات درون زمینه با استفاده از همزن مکانیکی دور بالا (شرکت فاین تک کره) تحت سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه صورت پذیرفت. در ادامه به منظور دستیابی به پخش مناسب نانوذرات به درون زمینه، امواج مافوق صوت با استفاده از دستگاه التراسونیک پروبی (توان ۱۲۰ وات) به مخلوط حاصله اعمال شد. سپس برای ازبین رفتن حباب‌های ایجادشده، مخلوط حاصله در محیط خلا قرار گرفت [۲۱-۲۳]. در مرحله آخر سخت کننده پلی‌آمین به رزین (با نسبت وزنی ۱ به ۱۰) حاوی ذرات نانوغرافن اضافه شد و مخلوط به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همزده شد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد که در طی آن از ۴ لایه پارچه الیاف کربن با نسبت حجمی الیاف به زمینه ۵۰ درصد استفاده شد. پس از اتمام فرآیند ساخت، پخت نمونه‌ها در دمای محیط صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که به منظور مقایسه نتایج به دست آمده و بررسی اثر نانوصفحات گرافن، نمونه‌های فاقد نانوغرافن نیز ساخته شدند.

۲-۳- آزمون خمشی سه نقطه‌ای

آزمون خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از دستگاه آزمون ساخت شرکت کوپا مطابق با استاندارد ASTM-D790 صورت پذیرفت [۲۴]. نمونه‌ها در ابعاد ۱۲۵×۲۰ میلی‌متر مربع روی فیکسچر دستگاه قرار داده شدند. پس از آن بار خمشی با سرعت مشخص (محاسبه شده با توجه به استاندارد) بر روی نمونه‌ها اعمال شد

^۱ Graphene nanoplatelets

^۲ Chitosan

جدول ۱- نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای

درصد وزنی نانوگرافن	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	جذب انرژی (N.mm)
صفر	۴۸۰	۳۰/۲۴	۷۱۷
۰/۱	۵۲۶	۳۹/۴۲	۷۵۲
۰/۲	۵۴۰	۴۶/۹۸	۸۱۹
۰/۳	۵۷۱	۵۱/۸۴	۸۶۱
۰/۴	۶۶۶	۷۱/۲۸	۱۰۵۷
۰/۵	۵۶۸	۶۳/۱۸	۸۴۹

اثراافزودن نانو صفحات گرافن بر تغییرات استحکام خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن در شکل ۴ نمایش داده شده است. روند تغییرات بدین صورت است که با افزودن نانوگرافن در ابتدا استحکام خمشی افزایش و سپس کاهش یافت. به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوگرافن استحکام خمشی کامپوزیت تنها ۳ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانوگرافن افزایش یافته و این در حالی است که افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن منجر به افزایش ۳۹ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شده است. افزودن مقادیر بالاتر (۰/۵ درصد وزنی) نانوگرافن منجر به کاهش استحکام خمشی کامپوزیت نسبت به نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن شده است.

افزایش استحکام خمشی کامپوزیت در نتیجه افزودن نانوذرات گرافن احتمالاً ناشی از دو عامل بوده است. بهبود خواص فصل مشترک زمینه-الیاف و همچنین نقش تقویت کنندگی نانوگرافن در زمینه که در نتیجه باعث می شود انتقال بار به خوبی از زمینه به تقویت کننده الیافی صورت پذیرد که این امر منجر به بهبود استحکام خمشی کامپوزیت می شود [۲۵]. فصل مشترک در مواد کامپوزیتی از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا که انتقال بار از زمینه به الیاف تقویت کننده از طریق فصل مشترک الیاف و زمینه صورت می پذیرد. بنابراین عملکرد مواد کامپوزیتی در بارگذاری های مختلف تحت تأثیر فصل مشترک قرار دارد. اگر فصل مشترک بین زمینه و الیاف ضعیف باشد یا زمینه و الیاف چسبندگی مناسبی نداشته باشند، منجر می شود که انتقال بار به خوبی صورت نپذیرد و خواص مکانیکی کامپوزیت کاهش یابد [۲۶]. از طرفی هنگامی که زمینه نانو کامپوزیتی در کامپوزیت مورد استفاده قرار می گیرد، لغزش اصطکاکی بین زمینه و الیاف محدود شده و این بدان معناست که انتقال بار از زمینه به الیاف به خوبی صورت می پذیرد و خواص مکانیکی کامپوزیت افزایش می یابد [۲۷]. در مواد کامپوزیتی الیافی، الیاف به عنوان جزء اصلی تحمل کننده بار تلقی می شود و بخش عمده بار بر روی الیاف متمرکز می شود. تقویت زمینه پلیمری توسط نانوگرافن منجر به کاهش تمرکز تنش بر روی سطح الیاف و همچنین فصل مشترک بین زمینه و تقویت کننده الیافی شده که در ادامه منجر به افزایش تنش مورد نیاز برای پارگی الیاف و جدایش فصل مشترک بین زمینه و الیاف شده و به تبع آن استحکام نمونه کامپوزیتی افزایش می یابد [۱۶]. افزودن مقادیر بالاتر (۰/۵ درصد وزنی) نانوگرافن منجر به افت استحکام خمشی کامپوزیت نسبت به نمونه های کامپوزیتی حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن شده که دلیل این امر می تواند ناشی از توزیع نامطلوب نانوگرافن درون زمینه اپوکسی و آگلومره شدن

که در شکل ۲ نمایش از نحوه انجام آزمون نشان داده شده است. به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده هر آزمون حداقل سه مرتبه برای همه نمونه ها تکرار شد.



شکل ۲- نمونه کامپوزیتی تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای

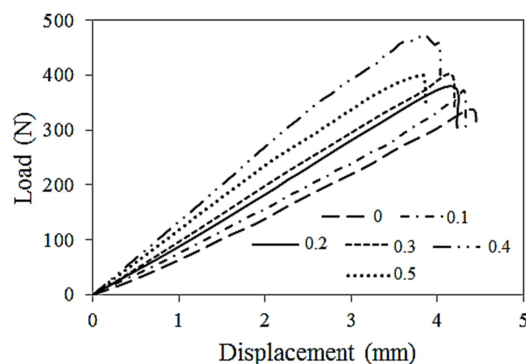
۲-۴- بررسی میکروسکوپی

برای بررسی سطح شکست نمونه های کامپوزیتی پس از آزمون خمش، میکروسکوپ الکترونی میدانی مدل پی S-4160 تحت ولتاژ شتابی ۲۵ kV استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

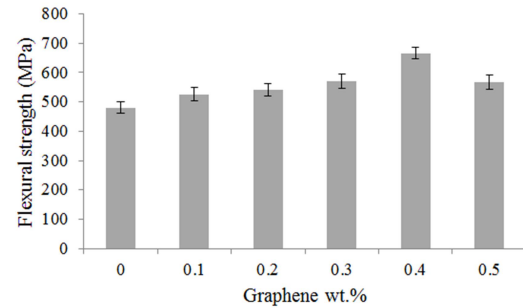
۳-۱- بررسی رفتار خمشی

منحنی های تنش-کرنش حاصل از آزمون خمش بر روی نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با درصد های وزنی مختلف نانوگرافن در شکل ۳ نمایش داده شده است. در ادامه به منظور تحلیل بهتر نتایج و بررسی اثر بخشی نانو صفحات گرافن، مقادیر استحکام کششی، مدول کششی و انرژی شکست از منحنی های حاصله استخراج شد که در جدول ۱ خلاصه نتایج به دست آمده نشان داده شده است.



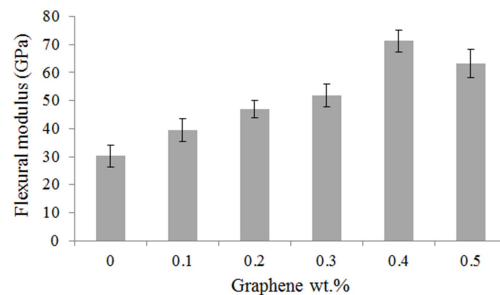
شکل ۳- منحنی های نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمون خمش بر حسب درصد های وزنی مختلف نانوگرافن

آن‌ها در درصدها یوزنی بالا باشد که منجر به کاهش چسبندگی بین زمینه والیاف شده و محلی برای جوانه‌زنی ترک به شمار می‌رود [۱۷].



شکل ۴- اثر درصد وزنی نانوغرافن بر استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

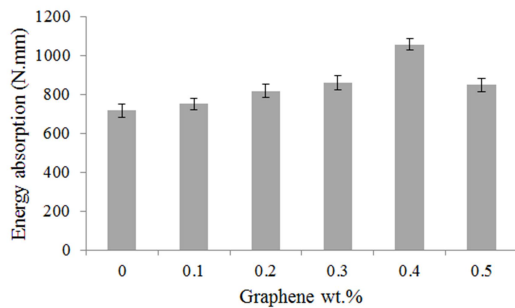
اثر افزودن نانوغرافن بر مدول خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است. به ازای افزودن نانوغرافن، مدول خمشی کامپوزیت به طور پیوسته ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته به طوری که به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن مدول خمشی به میزان ۱۳۵ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانوغرافن، افزایش یافته است. افزایش مدول خمشی در اثر افزودن نانوغرافن، به دلیل توزیع نانوغرافن درون زمینه اپوکسی است. توزیع مناسب نانوغرافن درون زمینه اپوکسی منجر به افزایش چسبندگی بین سطحی نانوغرافن و زمینه اپوکسی می‌شود که موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری شده که نتیجه این امر افزایش مدول خمشی کامپوزیت است. همچنین به دلیل سفتی بالاتر و صفحات گرافن در مقایسه با اپوکسی افزایش مدول خمشی قابل انتظار است [۲۸]. نکته قابل توجه این است که مدول خمشی کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوغرافن ۱۱ درصد کمتر از کامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن است که علت این امر احتمالاً مربوط به اندرکنش ضعیف بین زمینه و نانوغرافن در مقادیر بالای نانوغرافن است.



شکل ۵- اثر درصد وزنی نانوغرافن بر مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

در شکل ۶ میزان انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن بر حسب مقادیر مختلف نانوغرافن نشان داده شده است. میزان انرژی شکست نمونه‌ها از سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی نشان داده شده در شکل ۲ محاسبه شد. بیشترین میزان افزایش مربوط به کامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن است. در کامپوزیت فاقد نانوغرافن میزان

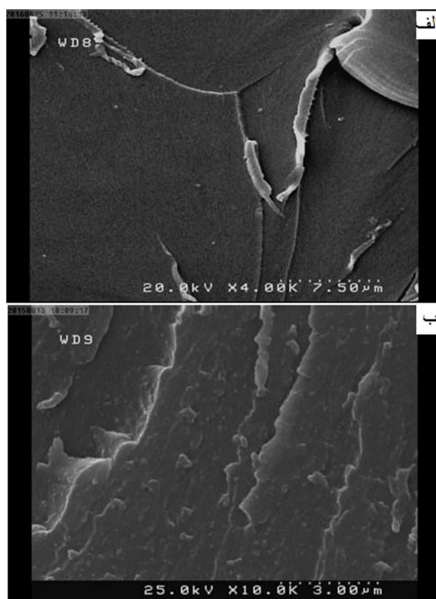
انرژی شکست ۷۱۷ نیوتن میلی‌متر است و در حالیکه با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن به عدد ۱۰۵۷ نیوتن میلی‌متر افزایش یافته است. افزایش انرژی شکست در اثر بارگذاری خمشی به علت انحراف ترک در زمینه به وسیله نانوذرات گرافن باعث بهبود جذب انرژی در کامپوزیت می‌شود، زیرا هنگامی که ترک به نانوذرات می‌رسد، برای اشاعه ترک نیاز به تغییر مسیر شدت ترک است [۲۹ و ۳۰]. افت جذب انرژی در کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوغرافن در مقایسه با کامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوغرافن احتمالاً مربوط به تشکیل آگلومره‌های نانوغرافن در درصدهای وزنی بالاست. آگلومره شدن نانوغرافن می‌تواند به عنوان نقاط تمرکز تنش برای جوانه‌زنی ریز ترک عمل نماید که نتیجه آن افت جذب انرژی کامپوزیت است.



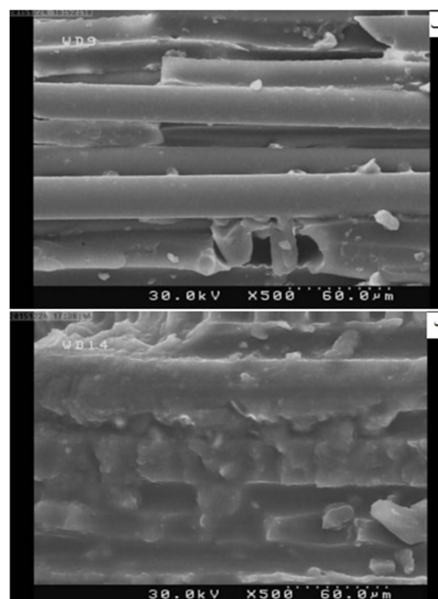
شکل ۶- اثر درصد وزنی نانوغرافن بر انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

۲-۳- بررسی سطوح شکست

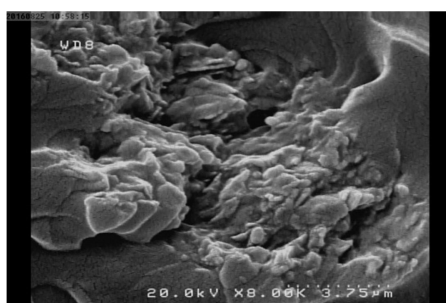
سطح شکست مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی فاقد نانوغرافن و نمونه تقویت‌شده با نانوغرافن در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای نمونه بدون نانوغرافن (شکل ۷-الف) سطح شکست الیاف صاف و هموار است که موید چسبندگی ضعیف بین زمینه و الیاف است. اما در ارتباط با نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانوغرافن (شکل ۷-ب) پس از شکست کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی سطح شکست الیاف ناهموار است و مقداری از فاز زمینه به سطح الیاف چسبیده است که نشان‌دهنده فصل مشترک مناسب بین زمینه و الیاف است. به طور کلی با بررسی تصاویر میکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های کامپوزیتی بدون نانوغرافن، جدایش فصل مشترک زمینه و الیاف مکانیزم اصلی شکست می‌باشد و در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانوغرافن مکانیزم اصلی، شکست ترک خوردن زمینه است [۳۱].



شکل ۸- سطح شکست زمینه کامپوزیت (الف) فاقد نانوگرافن و (ب) تقویت شده با ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (الف) کامپوزیت فاقد نانوگرافن و (ب) حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن



شکل ۹- آگلومره شدن نانوگرافن را در زمینه کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تأثیرافزودن نانوگرافن در درصدهای وزنی مختلف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد نسبت به زمینه) بررفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن تحت بارگذاری خمشی موردبررسی قرارگرفت که نتایج نهایی به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- آزمون خمش نشان دادکه افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن مقدار بهینه است. در این حالت استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست به ترتیب به میزان ۳۹، ۱۳۵ و ۴۷ درصد نسبت به نمونه فاقد نانوگرافن افزایش یافتند.

۲- به ازای افزودن مقادیر بالاتر نانوگرافن (۰/۵ درصد وزنی) خواص خمشی کامپوزیت افت پیدا نمود.

۳- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادکه یکی از عوامل اصلی بهبودخواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن درافزودن نانوگرافن ناشی ازبهبود فصل مشترک بین الیاف تقویت کننده و زمینه بوده است.

شکل ۸ سطح شکست زمینه اپوکسی و نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۴ درصدوزنی نانوگرافن را نشان می‌دهد. درارتباط بانمونه فاقد نانوگرافن (شکل ۸-الف) سطح شکست صاف بوده که نشان‌دهنده شکست تردمی‌باشد. این در حالی است که سطحشکست زمینه نانوکامپوزیتی (شکل ۸-ب) به صورت لایه لایه وناهموار است و انحراف مسیرترک به خوبی قابل مشاهده است. انحراف ترک درنتیجه حضورنانو ذرات گرافن منجربه افزایش فاکتورشدید تنش و یا به عبارتی منجربه افزایش چقرمگی شکست می‌شود. به همین دلیل نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد نانوگرافن هستند.

شکل ۹ آگلومره شدن نانوگرافن را در زمینه کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن را نشان می‌دهد که عامل اصلی در افت خواص خمشی این نمونه در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن است.

Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 70, pp. 82-92, 2015.

- [19] Fan H., Wang L., Zhao K., Li N., Shi Z., Ge Z., and Jin Z., Fabrication, Mechanical Properties, and Biocompatibility of Graphene-Reinforced Chitosan Composites", *Biomacromolecules*, Vol. 11, pp. 2345-2351, 2010.
- [20] Shen X.J., Liu Y., Xiao H. M., Feng Q. P., Yu Z. Z., and Fu S. Y., The Reinforcing Effect of Graphene Nanosheets on the Cryogenic Mechanical Properties of Epoxy Resins, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, pp. 1581-1587, 2012.
- [21] Khosravi H., and Eslami-Farsani R., On the flexural properties of multiscale nanosilica/E-glass/epoxy anisogrid-stiffened composite panels, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol. 7(1), pp. 99-108, 2017.
- [22] Abdi A., Eslami-Farsani R., and Khosravi H., Evaluating the Mechanical Behavior of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Surface-modified CaCO_3 Nanoparticles, *Fibers and Polymers*, Vol. 19(3), pp. 635-640, 2018.
- [23] Khosravi H., and Eslami-Farsani, R., An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3(1), pp. 11-20, 2016.
- [24] ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.
- [25] Mariche R., Sanchez M., Suarez A.J., Prolongo S.G., and Urena A., Electrically Conductive Functionalized-GNP/Epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material, *Composites Part B*, Vol. 98, pp. 49-55, 2016.
- [26] Avila A. F., Peixoto L. G. Z., Silva Neto A., De avila J., and Carvalho M. G.R., Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano- Modified by Graphene, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 269-275, 2012.
- [27] Khosravi H., Eslami-Farsani, R., Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na^+ -Montmorillonite Nanoclay, *Polymer Testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [28] Chouhan D. K., Rath S. K., Kumar A., Alegaonkar P. S., Kumar S., Hari Krishnan G., and Patro T. U., "Structure-Reinforcement Correlation and Chain Dynamics in Graphene Oxide and Laponite- Filled Epoxy Nanocomposites", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, pp. 7458-7472, 2015.
- [29] Wang F., Drzal L. T., Qin Y., and Huang Z., Enhancement of Fracture Toughness, Mechanical and Thermal Properties of Rubber/Epoxy Composites by Incorporation of Graphene Nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, pp. 10-22, 2016.
- [30] Qin Q., and Ye J., Toughening mechanism in composite materials, Elsevier, 2015.
- [31] Khosravi H., Eslami-Farsani R., On the Mechanical Characterizations of Unidirectional Basalt Fiber/ Epoxy Laminated Composites with 3-glycidoxy propyltrimethoxysilane Functionalized Multi-Walled Carbon Nano tubes-Enhanced Matrix, *Journal of Reinforced Plastics and composites*, Vol. 35, No. 5, pp. 421-434, 2016.

۴-درمجموع نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانوغرافن به زمینه کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن تاثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری خمشی دارد.

۵- مراجع

- [۱] مجتبی صدیقی، سازه‌های مرکب (مکانیک مواد و طراحی)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم، تابستان ۱۳۸۹.
- [2] Mallick P.K., Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design, Taylor & Francis, 2007
- [3] Taljera R., and Singh C. V., Damage and Failure of Composite Materials Cambridge university press, 2012.
- [4] Koide R. M., Zeska G. V., and Lauresen M. A., An ant colony algorithm applied to lay-up optimization of laminated composite plates, *Latin American Journal of solids and Structures*, Vol. 10, pp. 491-504, 2013.
- [5] Hyer M. W., Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, WCB/McGraw-Hill, New York, 1998
- [6] Kumar K. P., and Sekaran A. S. J., Some natural fibers used in polymer composites and their extraction processes: a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, PP. 1879-1892, 2014.
- [7] Wang P., Yang J., Liu W., Tang X. Z., Zhao K., Lu X., and Xu S., Tunable crack propagation behavior in carbon fiber reinforced plastic laminates with polydopamine and graphene oxide treated fibers, *Materials and Design*, Vol. 113, pp. 68-75, 2017.
- [8] Zhu H., Li X., Dong Z., Ma G., Han F, Cong Y., Yuan G., Cui Z., and Westwood A., Effect of carbon fiber crystallite size on the formation of hafnium carbide coating and the mechanism of the reaction of hafnium with carbon fibers, *Carbon*, Vol. 115, pp. 640-648, 2017.
- [9] Paul D. R., and Robeson L. M., Polymer nanotechnology: Nanocomposites, *Polymer*, Vol. 49, pp. 3187-3204, 2008.
- [10] Kumar S. M. S., Raju N. M. S., Sympathy. S., and Jayakumar L. S., Effects of Nan materials on Polymer Composites: an expatriate view, *Review Advanced Materials Science*, Vol. 38, pp. 40-54, 2014.
- [11] Hussain F., and Hojjati M, Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview, *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, pp. 1511-1574, 2006.
- [12] Hu K., Kulkarni D. D., Choi L., and Tsukruk V. V., Grapheme-polymer nano composites for structural and functional applications, *Progress in Polymer Science*, Vol. 39, pp. 1934-1972, 2014.
- [13] Mittal G., Dhand V., Rhee K. Y., Park S. J., and Lee W. R., " A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 21, pp. 11-25, 2015.
- [14] Bafana A. P., Yan X., Patel M., Guo Z., Wei S., Wujcik E. K., Polypropylene nanocomposites reinforced with low weight percent graphene nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 109, pp. 101-107, 2017.
- [15] Cui Y., Kundalwal S. I., Kumar S., Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites", *Carbon*, Vol. 98, pp. 313-333, 2016.
- [16] Shokrieh M. M., Esmkhani M., and Haghighatkah A. R., Mechanical Properties of Graphene/Epoxy Nanocomposites under Static and Flexural Fatigue Loadings, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 1, pp. 1-7, 2014.
- [17] Nudism., Guitar., Narthex A. D., Hour M., and Jeelani S., Synergistic Effect of Grapheme Nan platelets and Nan clay on Epoxy Polymer Nan composites, *Advanced Materials Research*, Vol. 1119, pp. 155-159, 2015.
- [18] Kamar N. T., Hossain M. M., Khomenko A., Haq M., Drzal L. T., and Loos A., "Interlaminar Reinforcement of Glass Fiber/Epoxy Composites with Graphene Nanoplatelets,