



اثر اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن بر خواص ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت

الهه کاظمی خسرق¹، سید محمدحسین سیادتی²، رضا اسلامی فارسانی^{3*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 2- استادیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 3- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 * تهران، صندوق پستی 119991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 96/4/8	در این پژوهش اثر اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان بر روی رفتار ضربه سرعت بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده به میزان 0، 0.3 و 0.5 درصد وزنی برای تقویت نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت استفاده شدند و در ادامه اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت و به اثبات رسید. نتایج حاصل از آزمون ضربه سرعت بالا نشان داد که استفاده از نانوصفحات گرافن اصلاح شده با عامل سیلان تأثیر بسزایی بر عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت داشته است. در نمونه حاوی 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب‌شده به ترتیب به میزان 11 و 23 درصد در مقایسه با نمونه بدون نانوصفحات گرافن بهبود یافت، ولی در نانوکامپوزیت حاوی 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن به دلیل کلوخه شدن نانوذرات، عملکرد مکانیکی افت کرد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده این مطلب بود که افزایش انتقال بار بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری کامپوزیت ناشی از توزیع نانوصفحات گرافن تأثیر بخصوصی در بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها داشته است.
پذیرش: 96/5/23	
کلیدواژگان: اصلاح سطحی الیاف بازالت ضربه سرعت بالا نانوصفحات گرافن نانوکامپوزیت	

DOI: 10.22068/jstc.2018.29908

Effect of surface modification of graphene nanoplatelets on the high velocity impact behavior of basalt fibers reinforced polymer-based composites

Elahe Kazemi khasrag, Mohammad Hossein Siadati, Reza Eslami-Farsani*

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
 * P.O.B. 11999-43344 Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Surface modification
 Basalt fibers
 High velocity impact
 Graphene nanoplatelets
 Nanocomposite

Abstract

In this study, the effect of surface modified graphene nanoplatelets (GNPs) by silane on the high velocity impact behavior of basalt fiber epoxy nanocomposites was evaluated experimentally. The pristine and silane modified GNPs of 0, 0.3 and 0.5 weight percentages were employed for reinforcing basalt fiber- epoxy nanocomposites and the surface modification procedure of GNPs were confirmed using Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. Results from the high velocity impact tests proved that utilizing silane modified GNPs had a considerable influence on the mechanical performance of the basalt fiber reinforced polymer nanocomposites. In the 0.3 wt.% GNPs sample, the impact limit velocity and absorbed energy respectively improved by 11 and 23 %, Compared with the 0 wt.% GNPs sample, but in the 0.5 wt.% sample, agglomeration of GNPs caused reduction in the mechanical properties. Electron microscopy investigations revealed that load transfer between the polymer matrix and the reinforcing fibers was greatly affected by the addition of GNPs in enhancing the mechanical response of the nanocomposites.

1- مقدمه

است. انتخاب مواد و همچنین انتخاب روش‌ها و تکنیک‌های موجود برای ساخت، عامل اصلی تعیین‌کننده هزینه تولید، زمان مصرفی و تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید است. به طوری که در دو دهه‌ی اخیر شاهد گرایش به طراحی نوآورانه مواد و روش‌های جدید ضمن توسعه‌ی مواد و روش‌های از پیش موجود بوده‌ایم. یکی از مهم‌ترین انواع موادی که در سال‌های اخیر بیشترین سهم تحقیقات با محوریت طراحی و توسعه را به خود

در سال‌های اخیر با پیشرفت چشمگیر حوزه‌ی مهندسی ساخت، توجه بیشتر به مسائل زیست محیطی و شتاب سرسام‌آور پدیده‌ی مصرف‌گرایی در جهان، انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت محصولات بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای مهمی را در بخش‌های مختلف صنعتی به ارمغان داشته

Please cite this article using:

Kazemi khasrag, E. Siadati, M.H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced Polymer-Based Composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 109-116, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

آن‌ها گزارش نمودند که با افزودن تنها 0.1 درصد وزنی صفحات نانوغرافن، مدول ینانگ و استحکام کششی به میزان 31 و 40 درصد افزایش یافت. این در حالی است که در ارتباط با 0.1 درصد نانولوله‌های تک جداره، مدول ینانگ و استحکام کششی، به ترتیب، 3 درصد و 14 درصد افزایش یافتند. شکرپه و جنیدی [16]، اثر نانوصفحات گرافن بر رفتار کششی و ضربه چارپی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش مطلوب خواص مکانیکی نظیر کرنش شکست، مدول ینانگ و انرژی ضربه با افزودن مقادیر کم نانوصفحات گرافن حاصل می‌شود.

بالت و همکارانش [18] تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه کامپوزیت بازالت/ اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که افزودن 0.1 درصد وزنی نانو فیبر منجر به بهبود اتصال نانوصفحات گرافن با الیاف و زمینه می‌گردد و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد.

مطابق با بررسی‌های صورت پذیرفته، بیشتر تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر نانوصفحات گرافن بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری استاتیکی متمرکز شده است و توجه کمی به اثر این مواد بر رفتار دینامیکی مواد کامپوزیتی شده است. لذا رویکرد اصلی تحقیق حاضر، بررسی تجربی تأثیر نانوصفحات گرافن اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با سیلان بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا است.

2- روش آزمایش

2-1- مواد اولیه

در این تحقیق، رزین اپوکسی KER-828 همراه با هاردنر پلی‌امینی با نسبت وزنی 100 به 10 متعلق به شرکت کومو¹ کشور کره جنوبی به عنوان زمینه پلیمری برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی استفاده شد. الیاف بازالت با بافت ساتن² و دانسیته سطحی 300 گرم بر متر مربع از محصولات شرکت بازالتکس³ به عنوان الیاف تقویت‌کننده بکار گرفته شد. همچنین نانوصفحات گرافن با ضخامت 2-18 نانومتر و قطر 4-12 میکرون متعلق به شرکت یو اس نانو⁴ کشور آمریکا مورد استفاده قرار گرفتند. عامل کوپلینگ سیلانی با نام 4-آمینو پروپیل تری متوکسی سیلان، متعلق به شرکت مرک⁵ کشور آلمان برای اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن استفاده شد.

2-2- اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن

برای اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان ابتدا 2.5 گرم نانوصفحات گرافن در 100 میلی‌لیتر محلول شامل 95 درصد حجمی اتانول به کمک دستگاه اولتراسونیک به مدت 10 دقیقه توزیع شدند. در ادامه، عامل سیلان با نسبت وزنی برابر با نانوصفحات گرافن به مخلوط افزوده شد. سپس رفلکس⁶ مخلوط در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 8 ساعت صورت پذیرفت و در طی آن pH مخلوط با استفاده از اسید کلریدریک 37 درصد در محدوده 4-5 تنظیم شد. برای جداکردن نانوصفحات گرافن عملیات سانتریفیوژ به مدت 30 دقیقه با سرعت 4000 دور بر دقیقه انجام گرفت. از

اختصاص داده‌اند، مواد کامپوزیتی هستند. این مواد با هدف بهره‌مندی از قابلیت‌های چند ماده به طور یکجا در کنار هم توسعه یافته‌اند [1-4].

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از الیاف معدنی به بازار آمده است. این الیاف، الیاف بازالت است که در تجارت الیاف صنعتی بین دو دسته الیاف شیشه و الیاف کربن قرار می‌گیرد. تولید تجاری این الیاف ابتدا در روسیه و اوکراین آغاز شده است ولی در سال‌های اخیر قیمت رقابتی الیاف بازالت همراه با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مطلوب آن‌ها نظر شرکت‌های تولیدکننده الیاف و مؤسسات تحقیقاتی اروپایی را به خود جلب نموده است. از جمله برتری‌های الیاف بازالت مقاومت حرارتی بالا، اشتعال‌پذیری کم، افت کم عملکرد و استحکام در دماهای بالاتر از 900 درجه سانتی‌گراد، چسبندگی خوب به رزین‌های پلیمری و لاستیک‌ها، مقاومت سایشی و کششی، و ویژگی‌های دی‌الکتریکی بالا است [5-9].

گسترش علم نانوتکنولوژی و استفاده از آن در کامپوزیت‌های پلیمری، پیشرفت‌های نویدبخشی در راستای تولید مواد کاربردی ایجاد نموده است. اکثر تحقیقات انجام شده در نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با الیاف در راستای بهبود عملکرد مکانیکی این مواد است [10-16]. محققان زیادی تأثیر افزودن نانوذرات بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار دادند. شکرپه و همکارانش [17] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/ الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. افزودن 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. مقاومت کششی و برشی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی به ترتیب 34 و 26 درصد نسبت به کامپوزیت‌های بدون نانوفیبر افزایش یافت.

در بین تقویت‌کننده‌های نانومتری، نانوصفحات گرافن توجهات زیادی را به خود جلب نموده است. نانوصفحات گرافن به دلیل ساختار خود، در زمینه‌های زیادی ویژگی‌های بسیار منحصر به فردی را نشان می‌دهند. ثابت شده است که گرافن مستحکم‌ترین ماده‌ای شناخته شده است [11].

در ارتباط با تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تحقیقات مطلوبی صورت پذیرفته است که در اینجا بدان پرداخته می‌شود. ینانگ و همکارانش [12]، اثر افزودن نانوصفحات گرافن را بر رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های زمینه ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن مورد مطالعه قرار دادند. با توزیع 10 درصد وزنی نانوصفحات گرافن افزایش قابل ملاحظه‌ای در خواص مکانیکی حاصل شد که در طی آن انرژی ضربه به میزان 12.1 درصد افزایش یافت.

وانگ و همکارانش [13]، تأثیر نانوصفحات گرافن را بر خواص خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن 3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن، سبب افزایش 18 درصدی در استحکام خمشی و 10 درصدی در مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه می‌شود. کینگ و همکارانش [14]، اثر افزودن نانوصفحات گرافن را در درصدهای وزنی مختلف بر رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانوصفحات گرافن بررسی نمودند. نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره نشان داد که با توزیع 6 درصد وزنی نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری، مدول کششی به میزان 24 درصد در قیاس با اپوکسی خالص افزایش یافت.

رفیعی و همکارانش [15]، تأثیر صفحات نانوغرافن و نانولوله‌های کربنی تک جداره را در درصد وزنی کم بر رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با نانوصفحات گرافن و نانولوله‌های کربنی بررسی کردند.

¹ KUMHO

² Satin weave

³ Basaltex

⁴ US nano

⁵ Merck

⁶ Reflux

5-2- بررسی‌های ریز ساختاری

به منظور اثبات اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن، از دستگاه طیف سنج مادون قرمز (FT-IR) مدل جکسو plus-460 در محدوده عدد موج 400- cm^{-1} استفاده شد. برای بررسی ریزساختاری از سطوح شکست پس از آزمون ضربه سرعت بالا از میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FESEM) مدل Mira-3XMU با ولتاژ کاری 25 کیلوولت استفاده شد.

3- نتایج و بحث

1-3- نتایج FT-IR

در شکل 2 نتایج FT-IR بر روی نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده با سیلان آورده شده است. برای نانوصفحات گرافن اصلاح نشده (شکل 2- الف)، پیک‌های به وجود آمده در اعداد موج 1174.3 cm^{-1} و 2875.6 cm^{-1} به ترتیب ناشی از ایجاد پیوند بین C=O و C-H بر روی سطح نانوصفحات گرافن است. همچنین پیک ایجاد شده در 3383.4 cm^{-1} به دلیل ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل بود.

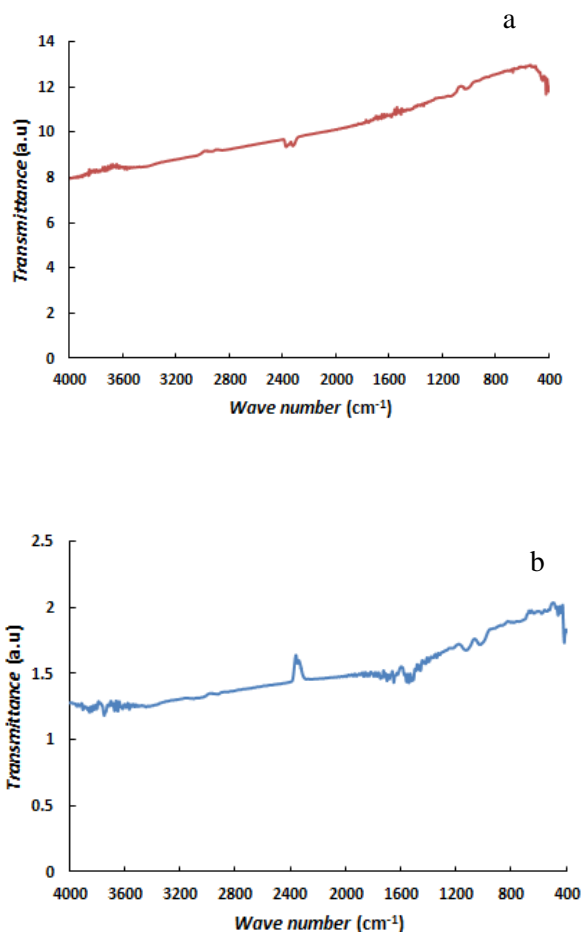


Fig. 2 Results of FT-IR spectrum of GNPs (a) pristine and (b) silane modified GNPs.

شکل 2 FT-IR بر روی نانوصفحات گرافن (الف) اصلاح نشده و (ب) اصلاح شده با سیلان.

طرفی برای حذف عامل سیلان اضافی اطراف نانوصفحات گرافن، مخلوط 3 مرتبه با اتانول مورد شستشو قرار گرفت و به مدت 24 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در داخل آن قرار داده شد.

2-3- روند ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده با سیلان (به میزان 0، 0.3 و 0.5 درصد وزنی) به زمینه پلیمری افزوده و با استفاده از همزن مکانیکی دور بالا به مدت 20 دقیقه با قدرت 2000 دور بر دقیقه اختلاط اولیه نانوصفحات گرافن با رزین اپوکسی صورت پذیرفت. سپس جهت رسیدن به توزیع مطلوب نانوصفحات گرافن، امواج التراسونیک با استفاده از دستگاه التراسونیک پروبی تحت توان 120 وات به مدت 90 دقیقه به مخلوط حاصله اعمال شد. در مرحله آخر هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 به مخلوط اضافه گردید و به مدت 5 دقیقه عملیات اختلاط رزین تقویت‌شده و هاردنر به صورت دستی صورت پذیرفت. برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت-نانوصفحات گرافن از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد که در آن 6 لایه الیاف بازالت با کسر حجمی 40 درصد استفاده شد. همچنین برای دستیابی به حداکثر استحکام، آزمون ضربه 48 ساعت بعد از جداسدن نمونه‌ها از قالب صورت پذیرفت.

2-4- آزمون ضربه سرعت بالا

آزمون ضربه سرعت بالا بر روی نمونه‌ها با ابعاد 130×130 میلی‌متر مربع با استفاده از پرتابه استوانه‌ای سر مخروطی از جنس آلومینیوم به جرم 27 گرم و قطر 21 میلی‌متر توسط دستگاه تفنگ گازی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد. سرعت برخورد گلوله به نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوصفحات گرافن برابر با 116 متر بر ثانیه بود. همچنین برای حصول اطمینان از نتایج، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد. تصویر دستگاه تفنگ گازی در شکل 1 نشان داده شده است.



Fig. 1 Image of gas gun.

شکل 1 تصویر دستگاه تفنگ گازی.

¹ Fourier transform infrared

² Field emission scanning electron microscopy

بر آن چنانچه اتصال بین الیاف و زمینه تضعیف شود، الیاف در حین اعمال نیرو می‌تواند از زمینه بیرون کشیده شوند و در نتیجه استحکام و مقاومت به شکست کامپوزیت کاهش می‌یابد [21].

اضافه نمودن نانوصفحات گرافن به زمینه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف می‌گردد که تقویت فصل مشترک و در نتیجه بهبود انتقال بار را به همراه دارد. تقویت زمینه پلیمری توسط نانوصفحات گرافن همان‌طور که قبلاً ذکر شده تمرکز تنش بر روی سطح الیاف را کاهش داده و تنش لازم برای پارگی الیاف¹ که از مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا هستند، را افزایش می‌دهد که به طبع آن خواص ضربه سرعت بالا بهبود می‌یابد [22].

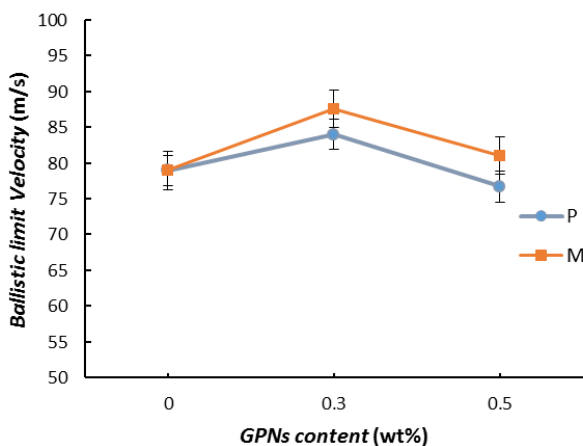


Fig. 3 effect of pristine and silane modified GNPs on the ballistic limited velocity nanocomposites.

شکل 3 تأثیر نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده با سیلان بر سرعت حد بالستیک نانوکامپوزیت.

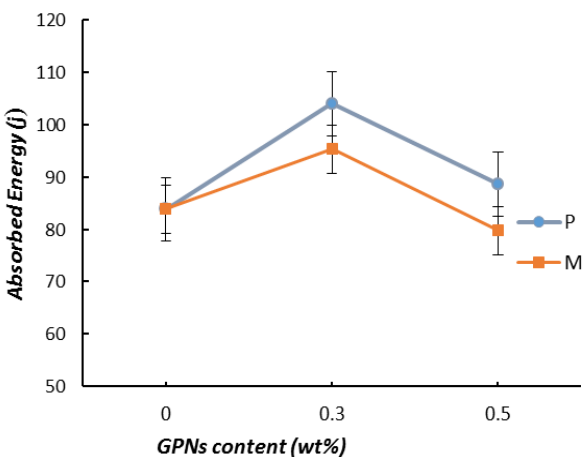


Fig. 4 Effect of pristine and silane modified GNPs with silane on energy absorbed nanocomposites.

شکل 4 تأثیر نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده با سیلان بر انرژی جذب شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی.

برای نانوصفحات گرافن اصلاح شده با سیلان (شکل 2-ب)، دو پیک جدید در عدد موج 983.7 cm^{-1} و 1025.4 cm^{-1} ایجاد شد که به ترتیب مربوط به تشکیل پیوند بین Si-O-C و Si-O-Si است. ظهور این دو پیک جدید نشان می‌دهد که بهسازی سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان با موفقیت انجام شده است [19,20].

3-2 نتایج آزمون ضربه سرعت بالا

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ضربه سرعت بالا بر روی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوصفحات گرافن در جدول 1 نمایش داده شده است. سرعت ورودی با تنظیم فشار گاز انتخاب شده و سرعت خروجی توسط اندازه‌گیری جابه‌جایی و زمان توسط دستگاه محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که حرف M، نشان دهنده نانوصفحات گرافن اصلاح شده و P، بیانگر نانوصفحات گرافن اصلاح نشده است.

جدول 1 نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ضربه سرعت بالا.

Table 1 The results of the high velocity impact test.

انرژی جذب شده (J)	حد بالستیک (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	سرعت ورودی (m/s)	درصد وزنی نانوصفحات گرافن
83.8	78.93	85	116	0
95.25	84	80	116	0.3 اصلاح نشده
103.96	87.63	76	116	0.3 اصلاح شده
79.47	76.72	87	116	0.5 اصلاح نشده
88.63	81.03	83	116	0.5 اصلاح شده
101.33	91.40	92	116	انحراف معیار

در شکل 3 تغییرات سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانوصفحات گرافن اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با سیلان نمایان است. برای نمونه‌های کامپوزیتی فاقد نانوصفحات گرافن، مقدار حد بالستیک برابر با 78.93 m/s بر ثانیه گزارش شد که با افزودن 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح نشده این مقدار به 84 m/s بر ثانیه افزایش یافت. این در حالی است که بیشترین بهبود در حد بالستیک به ازای توزیع 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح‌شده با سیلان به دست آمد که در آن سرعت حد بالستیک در مقایسه با نمونه بدون نانوذره به میزان 11 درصد بهبود یافت. از طرفی در شکل 4 تغییرات میزان انرژی جذب‌شده با توزیع نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری نشان داده شده است. برای نمونه فاقد نانوصفحات گرافن انرژی جذب‌شده برابر با 83.8 J برابر به دست آمد. با اختلاط 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح‌شده با عامل سیلان، میزان جذب انرژی ناشی از ضربه سرعت بالا به مقدار 103.96 J زول رسید که افزایش 23 درصدی در جذب انرژی را نشان می‌دهد.

در کامپوزیت‌های الیافی، چسبندگی بین سطحی زمینه و الیاف دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد زیرا هنگامی که کامپوزیت تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، انتقال تنش از طریق فصل مشترک زمینه و الیاف صورت می‌پذیرد. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باید بین زمینه و تقویت‌کننده اتصال کامل و محکم و استوار برقرار باشد تا نیرو بتواند از زمینه به الیاف منتقل شود. علاوه

¹ Fiber breakage

نانوصفحات گرافن اصلاح شده، نمایش داده است. مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست که در این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد پارگی الیاف و لایه لایه شدن نمونه کامپوزیتی است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزودن نانوصفحات گرافن مساحت تخریب در نمونه‌ها افزایش یافته است و بیشترین سطح تخریب متعلق به کامپوزیت‌های حاوی 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح شده است. به عبارتی افزایش ناحیه تخریب منجر به افزایش جذب انرژی کامپوزیت‌ها می‌گردد.

با توزیع نانوصفحات گرافن درون زمینه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت، سرعت اشاعه موج تنش در کامپوزیت و مساحت بارگذاری شده تغییر می‌نماید که در نتیجه مقدار جذب انرژی توسط آن تغییر می‌یابد. به نظر می‌آید که تخریب بیشتر در نمونه حاوی 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح سطحی شده با سیلان به دلیل افزایش سطح تحت بارگذاری قرار گرفته بوده است. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن در قیاس با 0.3 نانوصفحات گرافن، کاهش در سطح تخریب ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده از آزمون ضربه سرعت بالا نیز این موضوع را تأیید می‌نماید.



Fig. 6 Damaged area of composite with a) 0, b) 0.3 c) 0.5 wt.% silane modified GNPs.

شکل 6 ناحیه تخریب کامپوزیت با (الف) 0 درصد، (ب) حاوی 0.3 درصد و (ج) 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح شده با سیلان.

3-3- بررسی میکروسکوپ الکترونی

در شکل 7 تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی بدون نانوصفحات گرافن (شکل 7-الف) و تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوصفحات

همچنین افزایش انرژی شکست در اثر بارگذاری خمشی به علت انحراف ترک¹ در زمینه به وسیله نانوصفحات گرافن باعث بهبود جذب انرژی در کامپوزیت می‌شود که به صورت شماتیک در شکل 5 مکانیزم انحراف ترک در نتیجه افزودن نانوصفحات گرافن نمایش داده شده است. هنگامی که ترک به صفحات نانوگرافن می‌رسد، برای اشاعه ترک نیاز به تغییر مسیر رشد ترک است و از این طریق مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد. این مسئله موجب افزایش انرژی لازم برای اشاعه ترک می‌گردد که نتیجه آن افزایش جذب انرژی کامپوزیت است [23,24].

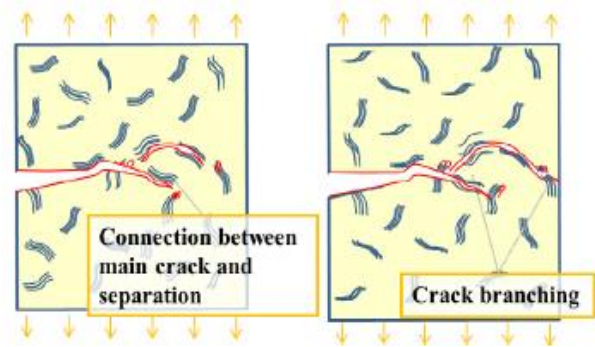


Fig. 5 A schematic of the crack deflection of GNPs [21].

شکل 5 شماتیکی از انحراف ترک به وسیله نانوصفحات گرافن [21].

از نقطه نظر اصلاح سطحی، اختلاط 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح نشده، در مقایسه با اختلاط 0.3 درصد نانوصفحات گرافن اصلاح شده با سیلان بهبود بیشتری را در رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت ایجاد کرده است. یکی از نکات قابل توجه در عملکرد صفحات نانوگرافن، نحوه توزیع و اندرکنش بین زمینه پلیمری و نانوصفحات گرافن است. با اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن چسبندگی بین زمینه و نانوصفحات گرافن با تشکیل پیوند کووالانسی بهبود می‌یابد که نتیجه این امر بهبود توزیع آن‌ها درون زمینه و بهبود بیشتر خواص مکانیکی است [25].

افزودن 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن، افت خواص ضربه سرعت بالای نمونه‌های نانوکامپوزیتی را نسبت به نمونه‌های حاوی 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن (اصلاح شده و نشده) باعث شده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از توزیع نامطلوب نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری کامپوزیت و کلوخه‌های شدن آن‌ها در درصدهای وزنی بالا باشد که منجر به کاهش انتقال بار بین زمینه و الیاف شده و محلی برای جوانه‌زنی ترک در اثر بارگذاری به شمار می‌رود [26].

ذکر این نکته لازم است که نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح شده دارای حد بالستیک و انرژی جذب شده بالاتر نسبت به نمونه‌های حاوی 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح نشده هستند. در مورد 0.5 درصد نانوصفحات گرافن اصلاح نشده کلوخه شدن شدید آن‌ها درون زمینه باعث شده است که خواص مکانیکی حتی از نمونه فاقد نانوصفحات گرافن پایین‌تر باشد که این موضوع اهمیت اصلاح سطحی را بیان می‌نماید.

در شکل 6 تصاویر ماکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی حاوی 0 درصد نانوصفحات گرافن و تقویت شده با 0.3 درصد و 0.5 درصد

¹ Crack deflection

شکل 9 تصویر FESEM از زمینه نانوکامپوزیتی حاوی 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح شده با سیلان را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است کلوخه‌هایی از نانوصفحات گرافن ناشی از توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی تشکیل شده است که این نقاط منجر به ایجاد تمرکز تنش و افت خواص مکانیکی می‌شود.

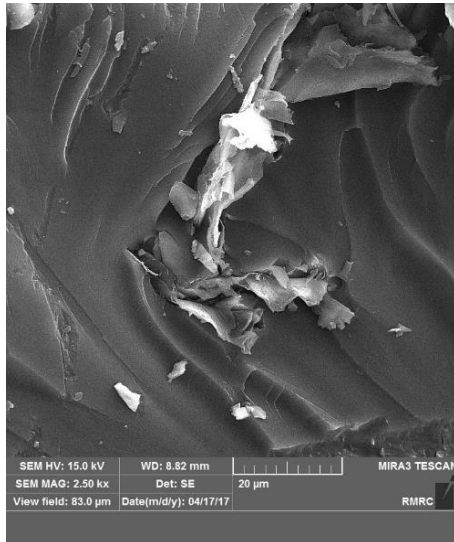


Fig. 8 The microstructure of nanocomposites with 0.3 wt% GNPs.

شکل 8 ریزساختار نانوکامپوزیتی با 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن.

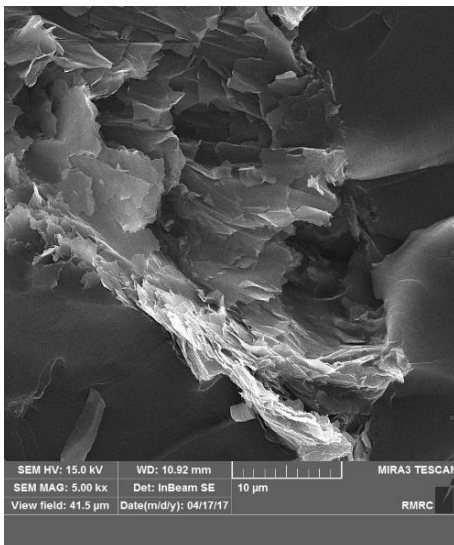


Fig. 9 Agglomeration of GNPs in the matrix with 0.5 wt% GNPs.

شکل 9 کلوخه‌ای شدن نانوصفحات گرافن درون زمینه با 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر توزیع نانوصفحات گرافن اصلاح‌نشده و اصلاح سطحی شده با سیلان در داخل زمینه پلیمری بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به طور خلاصه به شرح زیر است:

- 1- اصلاح سطحی صفحات نانوغرافن با عامل سیلان توسط طیف سنجی مادون قرمز تأیید شد.
- 2- نتایج به دست آمده از آزمون ضربه سرعت بالا مشخص نمود که اصلاح

گرافن اصلاح شده با سیلان (شکل 7-ب) آورده شده است. با مقایسه این تصاویر می‌توان استنباط نمود که چسبندگی بین الیاف بازالت و زمینه در نمونه‌های نانوکامپوزیتی مطلوب است. از طرفی همان‌طور که ملاحظه می‌گردد فاز زمینه حاوی نانوصفحات گرافن بر روی سطح الیاف تقویت‌کننده الحاق یافته است و به عبارتی دیگر سطح شکست الیاف ناهموار است. در حالی که در کامپوزیت‌هایی که نانوصفحات گرافن درون زمینه توزیع نشده‌اند، سطوح الیاف صاف و عاری از هرگونه رزین زمینه روی آن است که نشان دهنده چسبندگی ضعیف بین زمینه پلیمری و الیاف تقویت‌کننده بازالت است.

در شکل 8 تصویر میکروسکوپی از سطح شکست زمینه نانوکامپوزیتی حاوی 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح‌شده نشان داده شده است. در این رابطه ناهمواری‌هایی در سطح شکست ملاحظه می‌گردد و انحراف ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری ضربه سرعت بالا قابل مشاهده است که از دلایل اصلی افزایش جذب انرژی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی شامل نانوصفحات گرافن به شمار می‌رود.

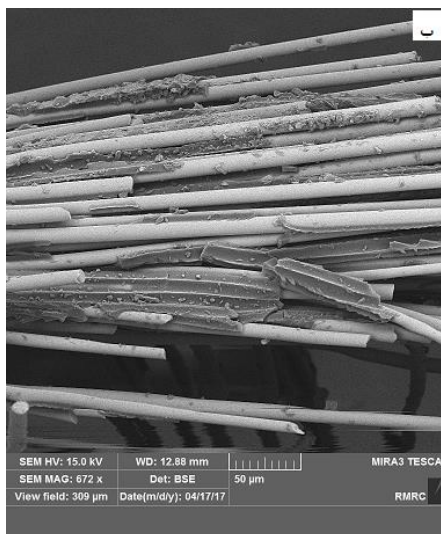
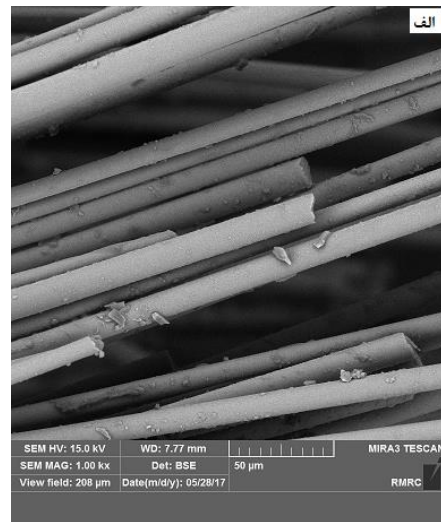


Fig. 7 The failure of composites a) 0%, b) 0.3 w% silane modified GNPs.

شکل 7 سطح شکست کامپوزیت‌های (الف) 0 درصد و (ب) 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن اصلاح شده.

[12] Yang, X. Wang, Z. Xu, M. Zhao, R. and Liu, X., " Dramatic Mechanical and Thermal Increments of Thermoplastic Composites by Multi-scale Synergetic Reinforcement: Carbon Fiber and Graphene Nanoplatelet", *Materials and Design*, Vol. 44, pp. 74-80, 2013.

[13] Wang, F. Drzal, L. T. Qin, Y. Huang, Z., "Size Effect of Graphene Nanoplatelets on the Morphology and Mechanical Behavior of Glass fiber/epoxy Composites" *Journal of Materials Science*, First Published Online, 2015, DOI: 10.1007/s10853-015-9649-x.

[14] King, J. A. Klimek, D. R. Miskioglu, I. and Odegar, G. M. "Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelet/ Epoxy Composites" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 128, pp. 4217-4223, 2013.

[15] Rafiee, M. A. Rafiee, J. Wang, Z. Song, H. Yu, Z. Z. and Koratkar, N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content" *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.

[16] Shokrieh, M. M ,and Joneidi, V. A., "Manufacturing and Experimental Characterization of Graphene/Polypropylene Nanocomposites", 2014 (in Persian).

[17] Shokrieh, M. M. Zeinedini, A. Ghoreishi, S. M., "Effects of Adding Multiwall Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Epoxy Resin and Glass/Epoxy Laminated Composites", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15(9), pp. 125-133, 2015.

[18] Bulut M., "Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 122, pp. 71-78, 2017.

[19] Ahmadi-Moghadam, B. Sharafimasooleh, M. Shadlou, S. and Taheri, F., "Effect of Functionalization of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Response of Graphene/epoxy Composites" *Materials and Design*, Vol. 66, pp. 142-149, 2015.

[20] Zhang, J. Wang, F. Dai, J. and Huang, Z., "Effect of Functionalization of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical and Thermal Properties of Silicone Rubber Composites" *Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 92-105, 2016.

[21] Shokrieh, M. M. Zeinedini, A. Ghoreishi, S. M., "On the Mixed Mode I/II Delamination R-curve of E-Glass/epoxy Laminated Composites" *Composite Structures*, Vol. 171, pp. 19-31, 2017.

[22] Qin, W. Vautard, F. Drzal, L. T. and Yu, J., "Mechanical and Electrical Properties of Carbon Fiber Composites with Incorporation of Graphene Nanoplatelets at the Fiber-matrix Interphase" *Composites Part B*, Vol. 69, pp. 335-341, 2015.

[23] Chandrasekaran, S. Sato, N. Tölle, F. Müllhaupt, R. Fiedler, B. and Schulte, K., "Fracture Toughness and Failure Mechanism of Graphene Based Epoxy Composites", *Composite Science and Technology*, Vol. 97, pp. 90-99, 2014.

[24] Quaresimin, M. Schulte, K. Zappalorto, M. Chandrasekaran, S., "Toughening Mechanisms in Polymer Nanocomposites: From Experiments to Modelling", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 123, pp. 187-204, 2016.

[25] Galpaya, D. Wang, M. Liu, M. Motta, N. Waclawik, E. and Yan, C., "Recent Advances in Fabrication and Characterization of Graphene- Polymer Nanocomposites", *Graphene*, Vol. 1, pp. 30-49, 2012.

[26] Lee, M. W. Wang, T. Y. and Tsai, J. L., "Mechanical Properties of Nanocomposites with Functionalized Graphene" *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No. 27, pp. 3779-3789, 2016.

سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان تأثیر بسزایی در بهبود خواص ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت دارد. به طوری که بیشترین بهبود در رفتار ضربه سرعت بالا به ازای اختلاط 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن با زمینه اپوکسی به دست آمد. در این مورد حد بالستیک و انرژی جذب شده به ترتیب به میزان 11 و 23 درصد در مقایسه با کامپوزیت‌های بدون نانوصفحات گرافن ارتقا یافتند.

3- کاهش خواص ضربه سرعت بالا در مقدار 0.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن در مقایسه با نانوکامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانوصفحات گرافن، ناشی از توزیع غیریکنواخت آن‌ها درون زمینه پلیمری بود که باعث می‌شود عملکرد مناسبی از خود نشان ندهند.

4- افزودن نانوصفحات گرافن داخل زمینه کامپوزیت‌های اپوکسی- بازالت منجر به افزایش مساحت تخریب در کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت بدون نانوصفحات گرافن شد، که نشانه‌ای از بهبود جذب انرژی بود.

5- مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی عمق میدانی نشان داد که قدرت چسبندگی بین زمینه و الیاف بازالت نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تحت ضربه سرعت بالا دارد.

5- مراجع

[1] Papargyris, D. A. Day, R. J. Nesbitt, A. and Bakavos, D., "Comparison of the Mechanical and Physical Properties of a Carbon Fibre Epoxy Composite Manufactured by Resin Transfer Moulding using Conventional and Microwave Heating", *Composite Science and Technology*, Vol. 68, pp. 1854-1861, 2008.

[2] Sureshkumar, M. Tamilselvam, P. Kumaravelan, R. and Dharmalingam, R., "Design, Fabrication, and Analysis of a Hybrid Fiber Composite Monoleaf Spring Using Carbon and E-Glass Fibers for Automotive Suspension Applications" *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 50, No. 1, pp. 115-122, 2014.

[3] Fiore, V. Valenza, A. and Di Bella, G., "Mechanical Behavior of Carbon/ Flax Hybrid Composites for Structural Applications" *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 17, pp. 2089-2096, 2012.

[4] Guermazi, N. Haddar, N. Elleuch, K. and Ayedi, H. F., "Investigations on the Fabrication and the Characterization of Glass/Epoxy, Carbon/Epoxy and Hybrid Composites used in the Reinforcement and the Repair of Aeronautic Structures" *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 714-724, 2014.

[5] Baets, J. Devaux, J. and Verpoest, I., "Toughening of Basalt Fiber-Reinforced Composites with a Cyclic Butylene Terephthalate Matrix by a Non-Isothermal Production Method" *Advances in Polymer Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 70-79, 2010.

[6] Fiore, V. Scalici, T. Di Bella, G. and Valenza, A., "A Review on Basalt Fibre and its Composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 10, pp. 74-94, 2015.

[7] Ivanitskii, S. G. and Gorbachev, G. F., "Continuous Basalt Fibers: Production Aspects and Simulation of Forming Processes. I. State of the Art in Continuous Basalt Fiber Technologies" *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 50, pp. 125-129, 2011.

[8] Sim, J. Park, C. Moon, D. Y., "Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, pp. 504-512, 2005.

[9] Kang, Y. Q. Cao, M. S. Yuan, J. Zhang, L. Wen, B. and Fang, X. Y., "Preparation and Microwave Absorption Properties of Basalt Fiber/Nickel Core-shell Heterostructures " *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 495, No. 1, pp. 250-259, 2010.

[10] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/ Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016 (In Persian).

[11] Wang, F. Drzal, L. T. Qin, Y. Huang, Z., "Preparation and Characterization of Functionalized Graphene Oxide/Carbon Fiber/ Epoxy Nanocomposites" *Composites Part A*, Vol. 87, pp. 10-22, 2016.

