



بررسی تجربی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های کششی و خمشی

حامد خسروی^{۱،۲}، رضا اسلامی فارسانی^{۳*}، حسین ابراهیم نژاد خالجیری^۴

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- مربی، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۳- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۴- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۹۱، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۲/۲۷

پذیرش: ۹۵/۱/۲۳

چکیده

در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد. در گام نخست و به منظور برهم‌کنش مطلوب‌تر نانولوله‌ها با زمینه اپوکسی، اصلاح سطحی آن‌ها به وسیله عامل تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان صورت گرفت که در ادامه ایجاد گروه‌های عاملی روی سطح نانولوله‌های کربنی به وسیله آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) تایید شد. نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده در درصد‌های وزنی مختلف نسبت به زمینه (۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد) و از طریق روش‌های هم‌زدن مکانیکی و آلتراسونیک در زمینه پخش شدند و در ادامه مخلوط‌های حاصله به‌عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها آزمون‌های کشش و خمش سه‌نقطه‌ای روی آن‌ها صورت پذیرفت. همچنین برای بررسی مکانیزم شکست کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین میزان بهبود در خواص استحکام کششی، استحکام خمشی و همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی بود و از طرفی مدول کششی و خمشی نمونه‌ها با افزودن نانولوله‌ها روند افزایشی از خود نشان دادند. بررسی‌های میکروسکوپی مویید این واقعیت بودند که افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در زمینه باعث بهبود خواص فصل مشترکی بین الیاف بازالت و زمینه نانوکامپوزیتی شده است.

کلیدواژگان:

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری
الیاف بازالت
نانولوله‌های کربنی چندجداره
اصلاح سطحی
آزمون‌های کشش و خمش

An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings

Hamed Khosravi^{1,2}, Reza Eslami-Farsani^{1*}, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri¹

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

2- Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Polymer matrix composites
Basalt fibers
Multi-walled carbon nanotubes
Surface modification
Tensile and flexural tests

Abstract

This work details an experimental investigation on understanding the effects of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the tensile and flexural properties of basalt fiber (BF)/epoxy laminated composites. As a first step, the surface of MWCNTs was modified with a silane coupling agent namely 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane (3-GPTS). Fourier transform infrared (FT-IR) data confirmed the reaction mechanism between the silane compound and MWCNTs. 3-GPTS/MWCNTs with various loadings (0, 0.1, 0.3 and 0.5 wt.%) were added to the epoxy resin via mechanical and ultra-sonication routes. The resultant mixtures were then utilized to fabricate MWCNT/woven BF/epoxy nanocomposites using hand-layup technique. Mechanical properties of the composites were investigated under tensile and flexural loadings. Also, a field-emission scanning electron microscope (FESEM) was used to study the distribution level of MWCNTs in the matrix as well as the fracture surfaces of the specimens. The results revealed that at filler loading 0.3 wt.% of 3-GPTS/MWCNTs, maximum improvements in tensile and flexural strengths and energy absorption of the BF/epoxy composites were obtained. Besides, the flexural and tensile moduli were enhanced continually by increasing the MWCNTs content. The microscopic investigations verified this subject that the addition of the 3-GPTS/MWCNTs to the matrix of BF/epoxy composite improves the BF-matrix interface yielding enhanced mechanical properties.

Please cite this article using:

Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

امروزه مواد کامپوزیتی در بسیاری از صنایع مانند صنایع هوا و فضا، اتومبیل‌سازی و دریایی به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن و همچنین سفتی به وزن بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱]. در این میان، یکی از بزرگترین و پرکاربردترین نوع کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری هستند که دارای مزایای همچون استحکام و سفتی ویژه، تولید آسان قطعات پیچیده، مقاومت در برابر عوامل خوردگی و قیمت مناسب هستند [۲]. از جمله پرکاربردترین زمینه‌های مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، رزین‌های گرماسخت هستند. در این میان، رزین اپوکسی به علت دارا بودن خواص مکانیکی عالی، چسبندگی مناسب، مقاومت مناسب در برابر عوامل شیمیایی به صورت گسترده در ساخت کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳، ۴].

انواع رایج تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در رزین‌های اپوکسی شامل الیاف شیشه، کولار و کربن هستند. الیاف شیشه دارای مزایای همچون قیمت پایین، استحکام مناسب و چسبندگی خوب با زمینه است. الیاف کربن و کولار به دلیل داشتن خواص استحکامی بالا در صنایع خاص مانند هوافضا و صنایع نظامی کاربرد وسیعی دارند که در مقایسه با الیاف شیشه دارای قیمت بالاتری هستند [۵، ۲]. امروزه علاوه بر قیمت و خواص استحکامی مناسب، سازگاری با محیط زیست عاملی به شمار می‌رود که باعث شده است تا محققان از الیاف طبیعی به عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری استفاده کنند [۶].

در میان الیاف طبیعی، الیاف بازالت به دلیل داشتن خواص استحکام خوب، چسبندگی مناسب بین رزین و الیاف، خواص عایق صوتی، محدوده دمای کاری بالا، قیمت کمتر نسبت به الیاف کربن و کولار و همچنین استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع مختلف به عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری است. بازالت یک ماده طبیعی است که در سنگ ولکانیک^۱ یافت می‌شود. فرآیند تولید الیاف بازالت بسیار شبیه الیاف شیشه است اما در مقایسه با الیاف شیشه هزینه تولید کمتری دارد [۵].

در سالیان اخیر، افزودن نانوفیلرها به عنوان جز تقویت‌کننده ثانویه در ساختار کامپوزیت‌های الیافی با زمینه پلیمری توسط محققان زیادی انجام شده است. این دسته از کامپوزیت‌ها که دارای دو نوع تقویت‌کننده در مقیاس‌های میکرونی و نانو هستند تحت عنوان کامپوزیت‌های چندمقیاسی^۲ نامیده می‌شوند [۸، ۷]. در میان نانوفیلرها، نانولوله‌های کربنی چندجداره^۳ به علت دارا بودن خواص منحصر به فردی همچون نسبت استحکام به وزن خیلی بالا و خواص الکتریکی و شیمیایی بسیار مناسب مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. نانولوله‌های کربنی به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا و نسبت طول به قطر بالا تمایل زیادی به آگلومره شدن^۴ دارند که باعث کاهش قابلیت آن‌ها برای بهبود خواص مکانیکی می‌شود. روش‌های مختلفی برای توزیع نانولوله کربنی وجود دارند که مهم‌ترین آن‌ها شامل اختلاط با سرعت بالا^۵ و استفاده از امواج اولتراسونیک^۶ است [۹].

کیو و همکاران [۱۰]، به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی بدون عامل و عامل‌دار بر خواص کششی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی عامل‌دار موجب افزایش

۱۴ درصدی استحکام کششی و ۲۰ درصدی مدول کششی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی می‌شود. این در حالی است که افزودن نانولوله کربنی بدون عامل منجر به افزایش ۸ درصدی مدول کششی و کاهش استحکام کششی به دلیل وقوع آگلومراسیون نانولوله‌های کربنی شده است.

نتایج تحقیق زین‌الدین و همکاران [۱۱]، نشان داد که افزودن تنها ۰/۳ وزنی نانولوله کربنی آمین‌دار منجر به افزایش ۲۵ درصدی استحکام خمشی و ۱۱ درصدی مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه می‌شود و به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی کامپوزیت ۱۵ درصد و مدول خمشی کامپوزیت ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در این تحقیق مقدار مطلوب نانولوله کربنی که بیشترین افزایش را در خواص مکانیکی ایجاد می‌نماید مقدار ۰/۳ درصد وزنی گزارش شده است.

دالینا و همکاران [۱۲]، به بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی در درصد‌های حجمی مختلف (۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) بر خواص خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن و اپوکسی-الیاف شیشه ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی^۷، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی چندجداره، استحکام خمشی کامپوزیت حاوی ۵ لایه الیاف شیشه را ۵۰ درصد افزایش می‌دهد که این به دلیل توزیع خوب نانولوله کربنی در زمینه اپوکسی است، این در حالیست که افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی باعث کاهش استحکام خمشی شده است. همچنین برای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن افزودن ۱ درصد حجمی نانولوله کربنی منجر به افزایش ۳۴ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شده است.

ژانگ و همکاران [۱۳]، به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی بر خواص کششی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی منجر به افزایش استحکام کششی کامپوزیت می‌شود. در این تحقیق نشان داده شده است که نانولوله کربنی منجر به بهبود انتقال تنش بین زمینه و فاز تقویت‌کننده الیافی می‌شود و در هنگام فرآیند شکست با بیرون‌زدگی و گسیختگی نانولوله کربنی، جوانه‌زنی و اشاعه ترک به تأخیر می‌افتد.

اینام و همکاران [۱۴]، به بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی دوجداره در درصد‌های وزنی خیلی کم (۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۱ درصد) بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی دوجداره اصلاح‌شده با عامل NH_2 به کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن، موجب بهبود ۵ درصدی استحکام خمشی و ۳۵ درصدی مدول خمشی کامپوزیت می‌شود.

کیم و همکارش [۱۵]، نشان دادند افزودن نانولوله کربنی اصلاح شده با عامل سیلانی منجر به بهبود استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت به میزان ۳۴ درصد و مدول خمشی به میزان ۵۴٪ نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی می‌شود. افزودن نانولوله کربنی که تحت عملیات اکسیداسیون قرار گرفته است، استحکام خمشی را به میزان ۲۵ درصد و مدول خمشی را به میزان ۴۱ درصد افزایش می‌دهد. در حقیقت نتیجه این تحقیق موبد آن است که عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلان تأثیر بیشتری بر افزایش خواص نسبت به عملیات اکسیداسیون داشته است. کیم و همکاران [۱۶]، در تحقیق دیگری به بررسی افزودن نانولوله‌های کربنی که تحت عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلانی^۸ قرار گرفته‌اند بر خواص

7. Hand lay-up method
8. Silane

1. Volcanic
2. Multiscale composites
3. Multiwall carbon nanotubes
4. Agglomerate
5. high speed shear mixing
6. Ultrasonic waves

جدول ۲ مشخصه‌های نانولوله‌های کربنی

| مقدار COOH (wt%) | مساحت سطحی ویژه (m ² /g) | طول (μm) | قطر خارجی (nm) | قطر داخلی (nm) | مقدار خلوص |
|------------------|-------------------------------------|----------|----------------|----------------|------------|
| ۲ | ۲۳۳ | ۱۰-۳۰ | ۱۰-۲۰ | ۵-۱۰ | >۹۵% |

به منظور ایجاد سازگاری و برهم کنش بهتر نانولوله‌های کربنی با زمینه اپوکسی از عامل کوپلینگ ارگانوسیلانی تری-گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (3-GTMS) محصول شرکت مرک آلمان استفاده شد.

۲-۲- اصلاح سطحی نانولوله‌های کربنی

ابتدا ۰/۵ گرم نانولوله کربنی دارای گروه‌های عاملی کربوکسیل (COOH) در ۱۰۰ mL محلول شامل ۵ mL آب مقطر در اتانول به کمک دستگاه آلتراسونیک پروبی تحت توان ۸۰ W و به مدت ۱۰ min توزیع شدند. در ادامه عامل کوپلینگ 3-GPTS با نسبت وزنی برابر با نانولوله‌های کربنی به داخل مخلوط قبلی اضافه و مخلوط جدید به مدت ۱۲h در دمای ۷۰°C تحت عملیات رفلکس قرار گرفت. در حین این عملیات سرعت چرخش محلول به کمک همزن مغناطیسی ۱۰۰ rpm و میزان pH محلول از طریق افزودن اسید کلریدریک (HCl:37%) حدود ۴/۵ تنظیم شد. پس از اتمام این مرحله، مخلوط حاصل به منظور جداسازی نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده تحت عملیات سانتریفوژ (با دور ۴۰۰۰ rpm) قرار گرفت [۸]. محصول حاصله به منظور جدا کردن ترکیبات سیلانی واکنش نداده با نانولوله‌ها دو مرتبه توسط اتانول شستشو داده شد و در ادامه به مدت ۲۴h در داخل آون خشک شد. در ادامه نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده با عبارت 3-GPTS/MWCNTs نشان داده خواهند شد.

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیتی چندمقیاسی اپوکسی- بازالت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی در گام نخست باید مخلوط اپوکسی- نانولوله کربنی آماده شود. بدین منظور روند اشاره شده در ذیل به کار گرفته شد. در ابتدا رزین اپوکسی به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ به وسیله استون رقیق شد تا از طریق کاهش ویسکوزیته رزین بستر مناسبی برای توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه ایجاد شود. سپس نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده به نسبت‌های وزنی مختلف ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ درصد به رزین اپوکسی اضافه شده و با استفاده از یک همزن مکانیکی دور بالا (مدل SD11-D محصول شرکت فاین تک کره جنوبی) به مدت ۲۰ min با سرعت ۲۰۰۰ rpm همزده شد تا توزیع اولیه نانولوله‌ها در زمینه اپوکسی حاصل شود. در ادامه و به منظور شکستن آگلومره‌های موجود و دست‌یابی به پخش مناسبی از نانولوله‌های کربنی، مخلوط مورد نظر به مدت ۹۰ min تحت امواج آلتراسونیک با استفاده همونابزر پروبی (محصول شرکت فاین ایران) با فرکانس ۲۴ KHz و توان ۱۲۰ W قرار گرفت. در حین عملیات آلتراسونیک و به منظور جلوگیری از ایجاد گرمای اضافی، مخلوط مورد نظر در حمام آب و یخ قرار گرفت. در مرحله آخر به منظور حذف حباب‌های هوای گیرافتاده، مخلوط حاصل به مدت ۲۰ min توسط پمپ خلاء هواگیری شد. چرخش مخلوط در حین به کمک همزن مغناطیسی باعث شده تا حباب‌های هوا به سطح رسیده و خروج آن‌ها راحت‌تر باشد. محصول به دست آمده به عنوان ماده اولیه مورد نیاز برای

خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف بازالت پرداختند و نشان دادند افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده منجر به افزایش ۱۰ درصدی مدول خمشی و ۱۴ درصدی استحکام خمشی می‌شود که این به دلیل توزیع خوب نانولوله‌های کربنی اصلاح شده و همچنین ایجاد پیوند مطلوب بین نانولوله‌ها و زمینه اپوکسی است.

رویکرد اصلی در تحقیق حاضر بررسی تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح سطحی شده با ترکیب سیلانی بر خواص مکانیکی (کششی و خمشی) کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت و در ادامه به دست آوردن بیشترین میزان تاثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و همچنین تعیین مکانیزم اثربخشی این نانولوله‌ها در کامپوزیت‌های الیافی است.

۲- بخش تجربی

۱-۲- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی ML-506 (رزین بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول F^۱) به همراه هاردنر پلی‌آمین^۲ HA-11 (محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر) به عنوان ماده زمینه مورد استفاده قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی از پارچه الیاف بازالت با بافت متعلق به شرکت بازالتکس^۳ به عنوان تقویت کننده الیافی استفاده شد که در جدول ۱ برخی از مشخصات آن آورده شده است. نانولوله‌های کربنی حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل (COOH) متعلق به شرکت چیپ تیوب^۴ کشور آمریکا به عنوان تقویت کننده فاز نانو استفاده شد که روش تولید آن‌ها رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار بوده است. در شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانولوله‌های کربنی و در جدول ۲ برخی از مشخصه‌های اصلی آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱ برخی از مشخصات فنی الیاف بازالت

| نام الیاف | نوع آهار ^۵ | ضخامت (mm) | دانسیتته سطحی (g/m ²) | نوع بافت |
|--------------|-----------------------|------------|-----------------------------------|----------|
| ۷۱۰۱/۳۵/۱۵۰۰ | سیلان | ۰/۳ | ۳۰۰ | ساتن |



شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌های کربنی چندجداره مورد استفاده در تحقیق حاضر

1. Epoxy bisphenol A
2. Polyamine hardener
3. basaltex
4. Cheaptube
5. Sizing

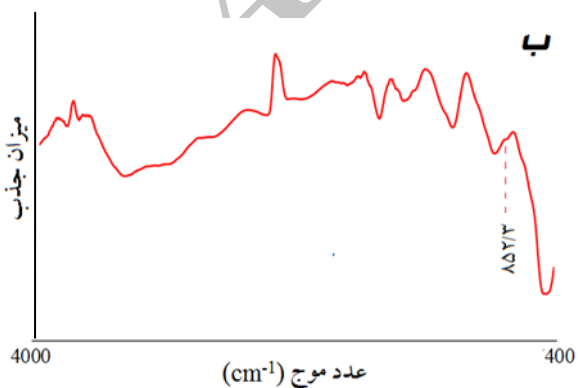
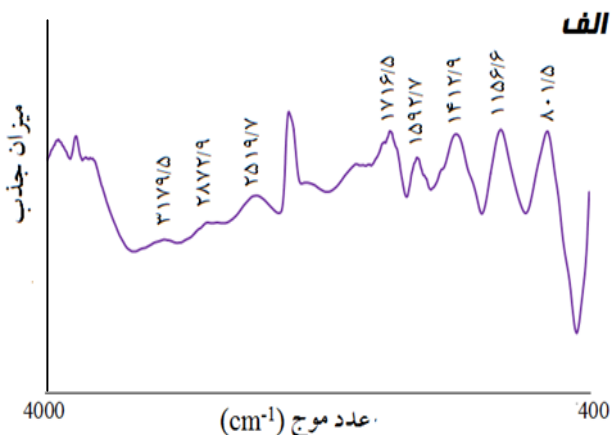
۲-۵- مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی واکنش‌های احتمالی بین نانولوله‌های کربنی و عامل سیلانی از دستگاه طیف‌سنج FT-IR مدل جسکو 460-plus در محدوده اعداد موج cm^{-1} $4000-400$ و با حساسیت cm^{-1} 4 استفاده شد. همچنین برای مطالعه سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمون و تشخیص مکانیزم‌های شکست در نمونه‌ها، از میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی^۲ (FESEM) مدل هیتاچی، S-4160 تحت ولتاژ شتابی 25 kV استفاده شد.

۲-۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج طیف‌سنجی FT-IR

نتایج طیف‌سنجی FT-IR مربوط به نانولوله‌های کربنی حاوی گروه‌های کربوکسیلی (COOH-MWCNTs) و همچنین نانولوله‌های اصلاح سطحی شده (3-GPTS/MWCNTs) در شکل ۴ آورده شده است. پیک‌های جذبی مشاهده‌شده در اعداد موج $1156/6$ و $1716/5$ cm^{-1} به ترتیب نشان‌دهنده ارتعاش‌های کششی گروه‌های C=O و C-O کربوکسیل می‌باشند [۱۹] که موبد حضور گروه‌های COOH بر روی نانولوله‌های اولیه است (شکل ۴الف). وجود پیک‌هایی در اعداد موج $3179/5$ و $2877/9$ cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (OH) بر روی سطح نانولوله‌های کربنی است [۲۰].

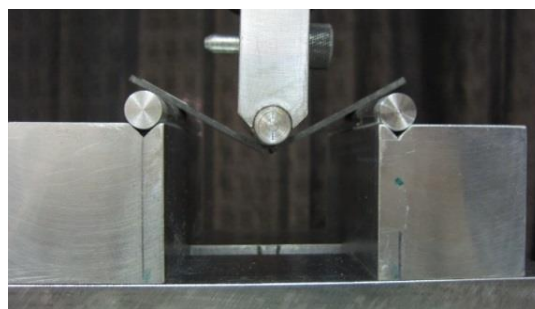


شکل ۴ طیف FT-IR مربوط به نمونه‌های پودری الف) COOH-MWCNTs و ب) 3-GPTS/MWCNTs

ساخت کامپوزیت‌های الیافی به روش لایه‌گذاری دستی مورد استفاده قرار گرفت. در ساخت نمونه‌ها ۶ لایه الیاف بازالت با نسبت حجمی رزین به الیاف (۵۲ به ۴۸ درصد) به کار گرفته شد. همچنین جهت مقایسه نتایج، نمونه‌های کامپوزیتی بدون افزودن نانولوله‌های کربنی نیز ساخته شد. به منظور پخت نهایی و دستیابی به حداکثر میزان استحکام در نمونه‌ها، انجام آزمون‌های مکانیکی پس از گذشت ۷ روز از مرحله ساخت صورت گرفت.

۲-۴- آزمون‌های مکانیکی

برای بررسی رفتار خمشی و کششی نمونه‌ها از دستگاه هانسفیلد^۱ H25KS و همچنین استانداردهای ASTM D790 (برای رفتار خمشی) و ASTM D3039 (برای رفتار کششی) استفاده شد [۱۸، ۱۷]. در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه‌ها با ابعاد $125 \times 20 \text{ mm}^2$ طوری روی فیکسچرها (مطابق شکل ۲) قرار داده شدند که حدود ۲۰ درصد طول آن‌ها به منظور جلوگیری از سر خوردنشان در حین آزمون بیرون از تکیه‌گاه‌ها باشد. سپس تمامی نمونه‌ها از قسمت میانی تحت بارگذاری با نرخ کرنش $4/3 \text{ mm/min}$ قرار گرفتند. در حین بارگذاری، نیروی خمشی بر حسب جابجایی محوری در قالب نمودار توسط دستگاه رسم شده و از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. در آزمون کشش، نمونه‌ها براساس استاندارد با ابعاد $250 \times 20 \text{ mm}^2$ بریده و در ادامه سمباده‌زنی شدند. به منظور تقویت محل تماس نمونه‌ها با فک دستگاه و جلوگیری از سر خوردنشان از تب‌های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه با ابعاد $20 \times 50 \text{ mm}^2$ در دو طرف نمونه‌ها استفاده شد (شکل ۳). نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی با نرخ 5 mm/min قرار گرفتند و در ادامه نمودارهای تنش-کرنش ترسیم شده توسط دستگاه برای تحلیل خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمون‌های کشش و خمش هر کدام سه مرتبه برای هر نمونه انجام پذیرفت.



شکل ۲ نمونه کامپوزیتی در حین آزمون خمش سه‌نقطه‌ای



شکل ۳ نمونه‌های آزمون کشش با تب کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه در دو طرف آن جهت جلوگیری از سر خوردن نمونه از دستگاه در حین آزمون

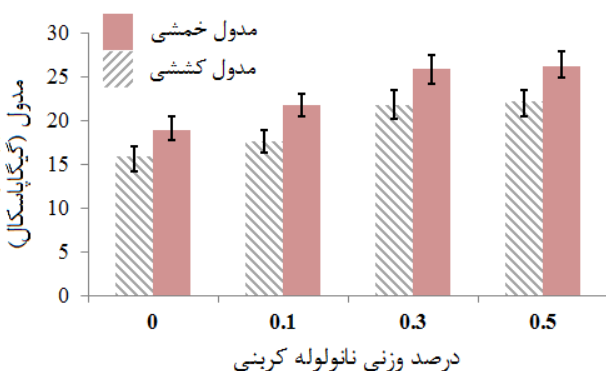
2. Field emission scanning electron microscope

1. Hounsfield

الیاف/زمینه به علت تشکیل یک شبکه غیرپیوسته در زمینه و همچنین تشکیل عیوب و کلوخه‌های نانولوله‌ها در درصدهای وزنی بالای نانوفیلر نسبت داد.



شکل ۵ تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر استحکام کششی و خمشی نمونه‌های کامپوزیتی.



شکل ۶ تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه‌های کامپوزیتی.

نتیجه دیگری که با توجه به شکل ۵ مشهود است آن است که تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی در یک درصد وزنی مشخص بر استحکام خمشی نمونه بیشتر تأثیر آن بر استحکام کششی همان نمونه است. این بدان علت است که تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه بالای محور خنثی تحت فشار و زیر آن تحت کشش قرار می‌گیرد. در این حالت زمینه نقش موثرتری را در مقایسه با زمانی که نمونه تحت کشش تک‌محوری قرار می‌گیرد بازی می‌کند. بنابراین با تقویت زمینه توسط نانولوله‌های کربنی بهبود بیشتری در استحکام خمشی نمونه در مقایسه با استحکام کششی حاصل می‌شود.

تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه‌های کامپوزیتی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۱۱ و ۱۵ درصد و در ازای افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی به ترتیب به میزان ۳۰ و ۳۵ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی افزایش یافته است. در مقادیر بیشتر نانولوله‌های کربنی (۰/۵ درصد وزنی) مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۴۰ و ۳۹ درصد افزایش یافته است که این روند مبین کاهش نرخ افزایش مدول در درصدهای بالاتر نانولوله‌های کربنی است.

ظهور پیک‌های جذبیه پهن در اعداد موج ۱۴۱۲/۹ و $801/5 \text{ cm}^{-1}$ ناشی از تغییر فرم خمشی گروه‌های OH در گروه‌های کربوکسیلی است [۲۱]. علاوه بر این، پیک‌های مشخصه در $2872/9$ و $1592/7 \text{ cm}^{-1}$ مرتبط به گروه‌های C-H و C=C است [۲۲]. در مقابل، همان‌طور که در طیف FT-IR مربوط به نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده (3-GPTS/MWCNTs) نشان داده شده است (شکل ۴ب) یک پیک اضافی که مربوط به تشکیل باند Si-O-C است در عدد موج $852/3 \text{ cm}^{-1}$ قابل مشاهده است [۲۳] که موید برهم‌کنش موفق عامل کوپلینگ سیلانی 3-GPTS روی سطح COOH-MWCNTs است.

۲-۲- نتایج آزمون‌های مکانیکی

۲-۲-۱- مدول و استحکام

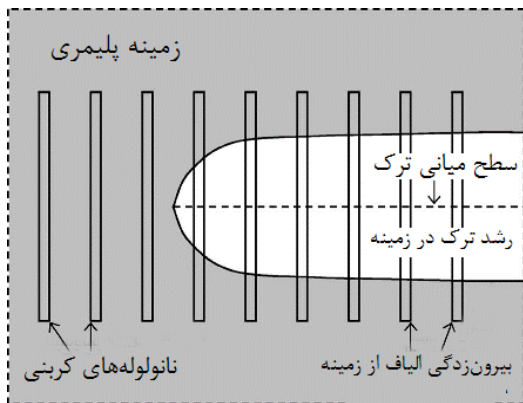
خلاصه نتایج (استحکام و مدول) آزمون کشش و خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت حاوی درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی در جدول ۳ و به صورت نمودار در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۳ خلاصه نتایج آزمون کشش و خمش سه‌نقطه‌ای

| درصد وزنی نانولوله کربنی | استحکام کششی (MPa) | مدول کششی (GPa) | استحکام خمشی (MPa) | مدول خمشی (GPa) |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| ۰ | ۴۳۰/۲۵ | ۱۵/۸۲ | ۴۴۸/۷۷ | ۱۸/۸۸ |
| ۰/۱ | ۴۶۰/۳۶ | ۱۷/۵۶ | ۵۰۲/۷۱ | ۲۱/۷۶ |
| ۰/۳ | ۵۱۵/۷۵ | ۲۱/۷۳ | ۵۸۰/۸۶ | ۲۵/۵۸ |
| ۰/۵ | ۴۶۵/۸۳ | ۲۲/۲۲ | ۵۲۵/۹۱ | ۲۶/۲۱ |

اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر تغییرات استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تغییرات استحکام نمونه‌ها چه خمشی و چه کششی با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در زمینه ابتدا افزایشی و سپس کاهش می‌باشد. بیشترین میزان استحکام مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله است، به طوری که در ارتباط با این نمونه افزایش ۱۹ و ۲۸ درصدی به ترتیب برای استحکام کششی و خمشی در مقایسه با نمونه شاهد بدون افزودن نانولوله کربنی مشاهده می‌شود. افزایش استحکام کامپوزیت‌های الیافی ناشی از افزودن نانولوله‌های کربنی به دلیل بهبود خواص فصل‌مشترکی بین زمینه و الیاف بازالت بوده که منجر به آن می‌شود که انتقال بار از زمینه به الیاف به خوبی صورت پذیرد که این امر منجر به افزایش استحکام کامپوزیت نهایی می‌شود. در حقیقت حضور نانولوله‌های کربنی از طریق ایجاد پلی بین الیاف و زمینه باعث در هم‌گیر شدن و قفل شدن آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر، هنگامی که کامپوزیت تقویت شده با الیاف تحت آزمون مکانیکی قرار می‌گیرد بخش عمده بار اعمالی روی الیاف متمرکز شده و الیاف به عنوان جز اصلی تحمل‌کننده بار به شمار می‌رود. تقویت زمینه توسط نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده باعث آن می‌شود که تمرکز تنش روی الیاف و همچنین در فصل‌مشترک الیاف-زمینه کاهش یافته و تنش لازم برای پارگی الیاف و همچنین جدایش فصل‌مشترک کاهش یافته و در نتیجه استحکام نمونه افزایش یابد [۷]. اما افزودن بیشتر نانولوله‌های کربنی (۰/۵ درصد وزنی) منجر به کاهش استحکام (کششی و خمشی) کامپوزیت در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی می‌شود. کمتر بودن میزان استحکام در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی را می‌توان به کاهش میزان چسبندگی

این مکانیزم تحت عنوان مکانیزم پل زنی ترک^۱ اطلاق می‌شود [۲۴] که شماتیک آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ شماتیکی از نحوه پل زنی ترک توسط نانولوله‌های کربنی [۲۴]

افزودن مقادیر بالای نانولوله کربنی به دلیل توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی منجر به ایجاد آگلومره‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی می‌شود. آگلومره‌ها به عنوان مناطق تمرکز تنش عمل کرده و منجر به کاهش انرژی مورد نیاز برای اشاعه ترک می‌شوند. همچنین آگلومره‌ها باعث همگرایی ترک‌ها و همچنین به عنوان مناطق اولیه ایجاد ترک عمل می‌کنند که در نتیجه باعث افت انرژی شکست کامپوزیت می‌شوند [۲۴،۵].

۳-۳- مطالعه سطوح شکست نمونه‌ها

به منظور مطالعه سطوح شکست نمونه‌ها و تشخیص مکانیزم‌های اثرگذاری نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی بازالتی تقویت شده با آن‌ها، مطالعات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ FESEM صورت گرفت که تصاویر آن در شکل‌های ۹ تا ۱۲ آورده شده است.

سطح شکست مربوط به نمونه کامپوزیتی شاهد (بدون افزودن نانولوله کربنی) که در شکل ۹ الف نشان داده شده است لیف‌های بازالت را نشان می‌دهد که دارای سطحی تمیز و هموار هستند. اما در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی (شکل ۹ ب)، الیاف بازالت پس از شکست نمونه دارای مقداری فاز زمینه چسبیده به آن است. وجود زمینه نانوکامپوزیتی (اپوکسی - نانولوله کربنی) بر روی سطوح الیاف موید چسبندگی مطلوب الیاف با زمینه در این حالت است. نتیجه‌ای که از مقایسه این دو تصویر می‌توان برداشت کرد آن است که در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی ترک خوردن زمینه^۲ و در ارتباط با نمونه شاهد جدایش فصل مشترک الیاف-زمینه^۳ مکانیزم‌های غالب برای شکست نمونه‌ها هستند [۲۵].

شکل ۱۰ سطح شکست زمینه نانوکامپوزیتی در نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد که دارای باندهای برشی زیادی است و علت آن حضور نانولوله‌های کربنی در زمینه است. در ارتباط با زمینه اپوکسی تنش برشی به آسانی از یک لایه به لایه دیگر انتقال می‌یابد و معمولاً سطح شکست صاف و ترد است. اما در ارتباط با زمینه نانوکامپوزیتی به علت مقاومت نانولوله‌های کربنی در برابر رشد ترک تفاوت محسوسی بین لایه‌ها قابل مشاهده است. برهم کنش بین ترک در حال رشد در زمینه با نانولوله‌های

حضور نانولوله‌های کربنی در زمینه باعث محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری شده که در نتیجه باعث افزایش میزان سفتی ماده می‌شود. همچنین به علت مدول بسیار بالای نانولوله‌های کربنی در مقایسه با زمینه اپوکسی افزایش مدول (کششی و خمشی) نانوکامپوزیت حاصله مورد انتظار است. کاهش نرخ افزایش مدول به ازای افزودن درصد وزنی بیشتر نانولوله کربنی احتمالاً ناشی از آگلومره شدن نانولوله‌های کربنی درون زمینه بوده که از تاثیرگذاری آن‌ها در بهبود سفتی ماده کاسته است [۵]. با افزایش درصد وزنی نانولوله‌ها از ۰/۱ به ۰/۳ افزایش میزان مدول کششی و خمشی به ترتیب ۲۴ و ۱۷ درصد و با افزایش درصد وزنی نانولوله‌ها از ۰/۳ به ۰/۵ میزان افزایش مدول کششی و خمشی هر دو تنها حدود ۳ درصد بوده است.

۳-۲- انرژی شکست

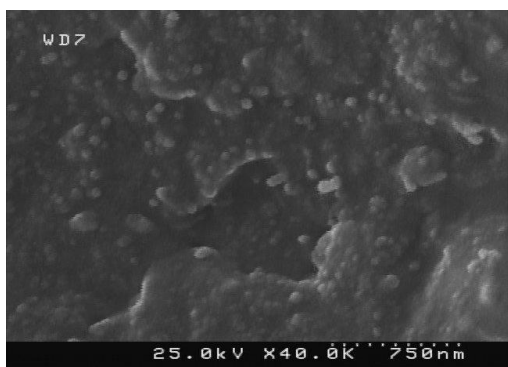
در شکل ۷ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر میزان انرژی لازم برای شکست کامپوزیت‌ها در آزمون کشش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام نمونه‌ها است. این بدان علت است که انرژی شکست نمونه‌ها به صورت مشابه با استحکام آن‌ها به شدت تحت تأثیر نحوه پخش نانولوله‌های کربنی در زمینه است. به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی، انرژی مورد نیاز برای شکست کامپوزیت به میزان ۱۷ درصد و به ازای افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی، انرژی شکست کامپوزیت به میزان ۳۵ درصد افزایش یافته است. اما به ازای افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی کاهش انرژی شکست در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله همکارانی می‌شود.



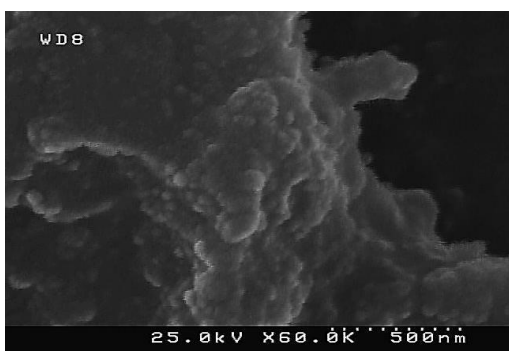
شکل ۷ رفتار جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی چندمقیاسی بر حسب مقدار نانولوله‌های کربنی افزوده شده تحت آزمون کشش

نخستین مد تخریب در کامپوزیت‌های لایه‌ای تشکیل میکروتک در زمینه است. زمینه به عنوان ضعیف‌ترین ناحیه در کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. ترک‌های ایجاد شده، در اثر بارگذاری در زمینه رشد کرده تا به فصل مشترک الیاف و زمینه برسند. اگر پیوند بین زمینه و الیاف به اندازه کافی مستحکم نباشد ترک به راحتی در طول فصل مشترک رشد می‌کند. افزودن نانولوله‌های کربنی استحکام فصل مشترک بین زمینه و الیاف را بهبود می‌دهد. پخش مطلوب نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی باعث می‌شود که آن‌ها به علت دارا بودن نسبت طول به قطر بالا به عنوان پلی مانع از باز شدن دهانه ترک در حال رشد شوند. بنابراین در این حالت انرژی بیشتری برای اشاعه ترک نیاز است که باعث می‌شود میزان جذب انرژی نمونه افزایش پیدا کند.

1. Crack bridging
2. Matrix cracking
3. Fiber-matrix debonding



شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی از سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت دارای ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی در بزرگنمایی بالا، مکانیزم پل زنی ترک



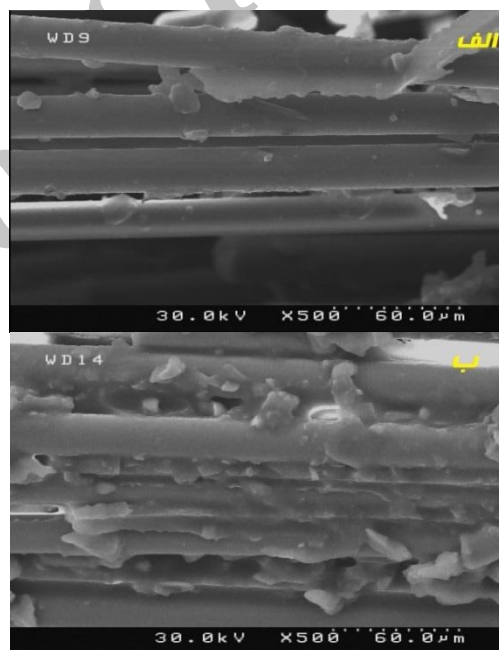
شکل ۱۲ تشکیل آگلومره‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی در زمینه نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی

۴- نتیجه‌گیری

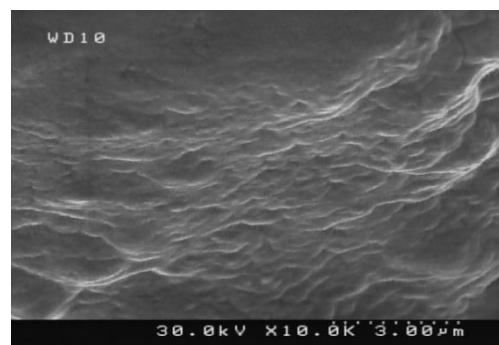
در تحقیق حاضر، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در مقادیر مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های کششی و خمشی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور برهم‌کنش مطلوب‌تر نانولوله‌ها با زمینه اپوکسی، ابتدا اصلاح سطحی آن‌ها به وسیله عامل کوپلینگ اراگنوسیلانی به نام تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان صورت گرفت. نتایج حاصله از این تحقیق را می‌توان به صورت خلاصه در موارد زیر بیان نمود:

- ۱- طیف‌سنجی FTIR موید برهم‌کنش موفق بین ترکیب سیلانی با گروه‌های عاملی کربوکسیلی موجود بر روی سطح نانولوله‌های اولیه بود.
- ۲- بیشترین میزان اثربخشی نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده بر استحکام کششی و خمشی در کامپوزیت‌های حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شد. در این مورد استحکام خمشی و استحکام کششی به ترتیب به میزان ۲۸ و ۱۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش از خود نشان داد.
- ۳- تأثیر مثبت نانولوله‌های کربنی در یک مقدار مشخص بر استحکام خمشی بیشتر از تأثیر همان میزان نانولوله کربنی بر بهبود استحکام کششی بود.
- ۴- افزایش پیوسته مدول خمشی و کششی با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی در زمینه کامپوزیت مشاهده شد.
- ۵- روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها بود، به طوری که بیشترین میزان جذب انرژی در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی با بهبود ۳۵ درصدی نسبت به نمونه شاهد حاصل شد.

کربنی پخش شده در زمینه با مکانیزم پل زنی ترک صورت می‌گیرد که به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شد. وجود نانولوله‌های بیرون زده شده از سطح زمینه یا شکسته شده موید مکانیزم پل زنی ترک توسط نانولوله‌ها است که در شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی آن نشان داده شده است. شکل ۱۲ سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی را در بزرگنمایی بالا نشان می‌دهد که موید وجود برخی آگلومره‌های نانولوله‌ها در زمینه کامپوزیت است که این مورد عامل اصلی افت برخی از خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی این درصد تقویت‌کننده فاز نانو در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی است. وجود آگلومره‌ها در زمینه باعث ایجاد نواحی تمرکز تنش شده و ایجاد ترک را تسهیل می‌بخشد. می‌توان این‌طور بیان نمود که کارایی روش به کار رفته در این تحقیق به منظور پخش نانولوله‌های کربنی در درصدهای وزنی بالا مطلوب نبوده و در این ارتباط باید روش‌های دیگری جایگزین شود. اگرچه انتظار آن است که با افزایش میزان توان و زمان عملیات آلتراسونیک به توزیع بهتری از نانولوله‌ها در زمینه دست یافت اما از طرفی شکست نانولوله‌ها در حین عملیات از بازدهی آن‌ها به شدت می‌کاهد.



شکل ۹ تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت (الف) بدون و (ب) حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی در زمینه



شکل ۱۰ سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت دارای ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی

- Nanotube-Modified Epoxy/Basalt Composites," Composites, Part B, Vol. 43, No. 5, pp. 2298-2302, 2012.
- [17] Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D 790 - 00, 2000.
- [18] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D3039/D3039M-00, 2002.
- [19] Jen, Y. M. and Huang, C. Y., "Fatigue Characterization Of Acidtreated Carbon Nanotube/Epoxy Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 47, pp. 1665-1675, 2013.
- [20] Brancato, V. Visco, A. A. and Pistone, A., "Effect Of Functional Groups On Multi-Walled Carbon Nanotubes On The Mechanical, Thermal And Electrical Performance Of Epoxy Resin Based Nanocomposites", Journal of Composite Materials, Vol. 47, pp. 3091-3103, 2013.
- [21] Tee, Y. B. Talib, R. A., and Abdan, K., "Thermally Grafting Aminosilane Onto Kenaf-Derived Cellulose And Its Influence On The Thermal Properties Of Poly (Lactic Acid) Composites", BioResources, Vol. 8, pp. 4468-4483, 2013.
- [22] Rahman, M. M. Zainuddin, S. Hosur, M. V. Malone, J. E. Salam, M. B. A. Kumar, A. and Jeelani, S., "Improvements in Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of E-Glass/Epoxy Composites Using Amino Functionalized MWCNTs," Composite Structures, Vol. 94, No. 8, pp. 2397-2406, 2012.
- [23] Brancato, V. Visco, A. M. and Pistone, A. "Effect Of Functional Groups Of Multi-Walled Carbon Nanotubes On The Mechanical, Thermal And Electrical Performance Of Epoxy Resin Based Nanocomposites", Journal of Composite Materials, Vol. 47, pp. 3091-3103, 2013..
- [24] Seshadri, M. and Saigal, S., "Crack Bridging in Polymer Nanocomposites," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No. 8, pp. 911-918, 2007.
- [25] Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. Hedayatnasab, Z. and Soleimani, N., "Influence of Thermal Conditions on the Tensile Properties of Basalt Fiber Reinforced Polypropylene-Clay Nanocomposites", Materials and Design, Vol. 53, pp. 540-549, 2014.
- ۶- مطالعات میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌ها بهبود خواص فصل‌مشرکی بین الیاف بازالت با زمینه در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی را نشان داد. جدایش فصل‌مشرک الیاف- زمینه و ترک‌خوردن زمینه به ترتیب به عنوان مکانیزم‌های غالب شکست نمونه‌های شاهد و نانوکامپوزیتی مشاهده شد.
- ۷- در مجموع، تحقیق حاضر نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده با ترکیبات ارگانوسیلان به عنوان جز تقویت‌کننده ثانویه در زمینه کامپوزیت‌های الیافی اپوکسی- بازالت نقش بسزایی را در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها ایفا می‌کند.
- ۵- مراجع
- [1] Nerilli, F. Marino, M. and Vairo, G., "A Numerical Failure Analysis of Multi-Bolted Joints in FRP Laminates Based on Basalt Fibers," Procedia Engineering, Vol. 109, pp. 492-506, 2015.
- [2] Khalili, S. M. R. Daghighi, V. and Farsani, R. E., "Mechanical Behavior of Basalt Fiber-Reinforced and Basalt Fiber Metal Laminate Composites Under Tensile and Bending Loads," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 8, pp. 647-659, 2011.
- [3] Mostafa, N. H. Ismarrubie, Z. N. Sapuan, S. M. and Sultan, M. T. H., "Effect of Fabric Biaxial Prestress on the Fatigue of Woven E-Glass/Polyester Composites," Materials and Design, Vol. 92, pp. 579-589, 2016.
- [4] Wang, X. Song, L. Pornwannchai, W. Hu, Y. and Kandola, B., "The Effect of Graphene Presence in Flame Retarded Epoxy Resin Matrix on the Mechanical and Flammability Properties of Glass Fiber-Reinforced Composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 53, pp.88-96, 2013.
- [5] Subagia, I. D. G. A. Tijjing, L. D. Kim, Y. Kim, C. S. Vista IV, F. P. and Shon, H. K., "Mechanical Performance of Multiscale Basalt Fiber-Epoxy Laminates Containing Tourmaline Micro/Nano Particles," Composites: Part B, Vol. 58, pp. 611-617, 2014.
- [6] Manikandan, V. Jappes, J. T. W. Kumar, S. M. S. and Amuthakkannan, P., "Investigation of the Effect of Surface Modifications on the Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 812-818, 2012.
- [7] 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, 2015, First online published.
- [8] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "On The Mechanical Characterizations Of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Laminated Composites With 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes-Enhanced Matrix," Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015; Online published, DOI: 10.1177/0731684415619493.
- [9] Shokrieh, M. M. Saeedi, A. and Chitsazzadeh, M., "Evaluating the Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Chopped Strand Mat/Polyester Composites," Materials & Design, Vol. 56, pp. 274-279, 2014.
- [10] Qiu, j. Zhang, C. Wang, B. and Liang, R., "Carbon Nanotube Integrated Multifunctional Multiscale Composites," Nanotechnology, Vol. 18, No. 27, pp. 1-11, 2007.
- [11] Zainuddin, S. Fahim, A. Arifin, T. Hosur, M.V. Rahman, M.M. Tyson, J.D. and Jeelani, S., "Optimization of Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of Epoxy and E-Glass/Epoxy Composites Using NH₂-MWCNTs, Acetone Solvent and Combined Dispersion Methods," Composite Structures, Vol. 110, pp. 39-50, 2014.
- [12] Wan Dalina, W.A.D. Mariatti, M. Ramlee, R. Mohd Ishak, Z. A. and Mohamed, A. R., "Comparison on the Properties of Glass Fiber/ MWCNT/ Epoxy and Carbon Fiber/ MWCNT/ Epoxy Composites," Advanced Materials Research, Vol. 858, pp. 32-39, 2014.
- [13] Zhang, J. Jua, S. Jiang, D. and Peng, H. X., "Reducing Dispersity of Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites by Introducing Multi-Walled Carbon Nanotubes," Composites, Part B, Vol. 54, pp. 371-376, 2013.
- [14] Inam, F. Wong, D. W. Y. Kuwata, M. and Peijs, T., "Multiscale Hybrid Micro-Nanocomposites Based on Carbon Nanotubes and Carbon Fibers" Journal of Nanomaterials, Vol. 2010, pp. 1-12, 2010.
- [15] Kim, M. T. and Rhee, K. Y., "Flexural Behavior of Carbon Nanotube-Modified Epoxy/Basalt Composites," Carbon Letters, Vol. 12, No. 3, pp. 177-179, 2011.
- [16] Kim, M. T. Rhee, K. Y. Park, S. J. and Hui, D., "Effects of Silane-Modified Carbon Nanotubes on Flexural and Fracture Behaviors of Carbon