



## مطالعه تجربی اثر افزودن نانو لوله کربنی و صفحات گرافن بر استحکام ضربه کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت

حسین بشیری گودرزی<sup>1</sup>، مهدی یارمحمدتوسکی<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب، تهران

\* صندوق پستی 16846-13114، m\_yarmohammad@azad.ac.ir

### چکیده

با افزایش روز افزون کارایی مواد نانو و نانوکامپوزیت‌ها در زندگی روزمره و صنعت، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه آغاز شده است. به همین دلیل در راستای تحقیقات گذشته و تکمیل آن‌ها مواد نانولوله کربنی و نانو گرافن به طور جداگانه با درصد وزنی های 0.1، 0.3 و 0.5 در فاز زمینه کامپوزیت متشکل از رزین اپوکسی و الیاف بازالت اضافه گردید و به روش لایه‌گذاری دستی نانو کامپوزیت‌های شش لایه الیاف بازالت ساخته شد. نمونه‌های کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی برای تعیین میزان تغییرات انرژی جذب شده شکست، تحت آزمون ضربه شاریپی قرار گرفت و سطح شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون ضربه شاریپی برای مطالعه دقیق و کامل، تحت عکس برداری الکترونی قرار گرفت. افزایش میزان انرژی ضربه جذب شده در حضور مواد نانو با تمامی درصد وزنی های متفاوت نسبت به نمونه کامپوزیتی مشاهده گردید. بیشترین میزان افزایش انرژی ضربه جذب شده در نمونه‌های نانو کامپوزیت نسبت به نمونه‌های کامپوزیت، در نمونه های استفاده شده از ذرات گرافن به میزان 0.1 درصد وزنی مشاهده گردید. بیشترین میزان افزایش انرژی ضربه جذب شده در نمونه‌های کامپوزیت های نانولوله کربنی، مربوط به استفاده از 0.3 درصد وزنی از نانو لوله کربنی در فاز زمینه می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

دریافت: 97/8/29

پذیرش: 97/12/25

### کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت

نانو گرافن

نانو لوله کربنی

شارپی

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل

میدانی

## An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite

Hossein Bashiri Goodarzi, Mehdi Yarmohammad Tooski\*

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, m\_yarmohammad@azad.ac.ir

### Keywords

Nano composite  
Nano Graphene  
Carbon Nano tubes  
Charpy  
Field-emission scanning  
electron microscopy (FE-SEM)

### Abstract

As the nanoscale materials and nano-composites are increasingly used in everyday life and industrial applications, extensive research has begun into this field. For this reason, in the course of previous research, carbon nanotubes and nano-graphene materials were added separately with weight percentages of 0.1, 0.3 and 0.5 in the composite phase consisting of epoxy resin and basalt fiber, and nano-composites laminates with 6 layers of basalt fiber were made through hand layup. In order to determine the amount of energy absorbed during impact, composite and nanocomposite samples were subjected to Charpy impact test, and the specimen deformations were studied under electron microscopy. An increase in the energy absorbed by samples containing nanoscale materials with all weight percentages was observed in comparison with conventional composite specimens. The highest increase in absorbed energy in nanocomposite samples with regard to the composite specimens was observed in samples containing 0.1% graphene particles by weight. The highest increase in absorbed energy in carbon nanotubes composites was detected in samples consisting of 0.3% carbon nanotubes in the matrix.

### 1-مقدمه

شیوه‌ها برای بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌ها تقویت ماتریس می‌باشد [1]. استفاده از ذرات نانو می‌تواند سبب بهبود خواص زمینه یا ماتریس گردد. افزودن ذرات نانو در کامپوزیت‌ها سبب ایجاد سازه جدیدی بنام نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. نانوکامپوزیت‌ها همان کامپوزیت‌ها می‌باشند که یک یا چند جزء از آن، ابعاد کمتر از 100 نانومتر دارد. نانوکامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده اند. فاز اول

طی دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌ها به‌خاطر نسبت سفتی و استحکام به وزن بالا در مقایسه با مواد رایج مانند فلزها به‌طور گسترده در کاربردهای گوناگون در صنایع هوا فضا، حمل و نقل، دریایی، کالاهای ورزشی و خودرویی استفاده می‌شوند. هر چند قابلیت مقاومت به ضربه کامپوزیت‌ها ضعیف می‌باشد و به منظور تحمل عملکرد سازه در طی سرویس می‌بایستی بهبود یابد. یکی از

### Please cite this article using:

Bashiri Goodarzi, H. and Yarmohammad Tooski, M., "An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.3, pp. 411-418, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

بر رفتار کششی و ضربه شاری نانو کامپوزیت‌های پلی پروپیلن توسط شکریه و احمدی جنیدی [15] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش مطلوب خواص مکانیکی نظیر کرنش شکست، مدول یانگ و انرژی ضربه با افزودن 0.5، 1 و 2 درصد وزنی نانوگرافن حاصل می‌شود. کاظمی خسرق و همکاران [16]، اثر اصلاح سطحی نانو صفحات گرافن با درصد‌های وزنی 0، 0.3 و 0.5 درصد وزنی بر خواص ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در نمونه حاوی 0.3 درصد وزنی نانو، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده بترتیب به میزان 11 و 23 درصد در مقایسه با نمونه بدون نانوگرافن بهبود یافت و نمونه حاوی 0.5 درصد وزنی نانوگرافن در مقایسه با نمونه 0.3 درصد وزنی عملکرد مناسبی نداشت.

با افزایش روز افزون کارایی مواد نانو و نانو کامپوزیت‌ها در زندگی روزمره و صنعت، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه آغاز شده است. همچنین رزین اپوکسی به طور گسترده به عنوان چسب، پوشش و زمینه کامپوزیت پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده به‌طور ذاتی ترد هست و اشاعه آسان میکروترک در آن سبب محدود شدن کاربرد آن می‌شود. لذا با توجه به نیاز صنایع مختلف از جمله هوافضا، افزایش چقرمگی رزین بایستی مورد ملاحظه قرار گیرد. بیشتر تحقیقات انجام شده در رابطه با تاثیر نانو بر کامپوزیت پایه پلیمری با الیاف شیشه، کربن و کولار می‌باشد. به همین دلیل در راستای تحقیقات گذشته و گسترش آنها، استفاده از الیاف طبیعی مانند بازالت در کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت شده با نانو، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از نانولوله کربنی و نانوگرافن با درصد وزنی‌های 0.1، 0.3 و 0.5 جهت تقویت کامپوزیت با الیاف بازالت استفاده می‌شود. نمونه‌های نانو کامپوزیت تحت آزمون ضربه شارپی قرار گرفته و براساس انرژی جذب شده آنها مقدار استحکام ضربه محاسبه می‌شود و با استفاده از عکس برداری الکترونی FESEM سطح شکست نمونه‌ها مورد ملاحظه قرار می‌گیرد.

## 2- مواد و ساخت

نمونه‌های مختلفی از نانو کامپوزیت‌ها شامل ترکیب رزین اپوکسی و الیاف بازالت همراه با نانولوله‌های کربنی و یا نانوگرافن ساخته شده است. الیاف بازالت از محصولات شرکت بازالتکس که دارای دانسیته سطحی 300 گرم بر سانتیمتر مربع و ضخامت 0.3 میلیمتر می‌باشد. در ساخت کامپوزیت از رزین اپوکسی اپوکیت KER 828 استفاده شده که نانولوله یا نانوگرافن در آن به‌طور یکنواخت پخش می‌شود. بدین منظور ابتدا رزین اپوکسی به نسبت وزنی 100 به 15 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 0.1، 0.3 و 0.5 درصد به رزین اپوکسی اضافه شده و با استفاده از یک همزن مکانیکی دور بالا به مدت 20 دقیقه با سرعت 2000 دور بر دقیقه همزده شد تا توزیع اولیه نانولوله‌ها در زمینه اپوکسی حاصل گردد. در ادامه و به منظور شکستن آگلومرهای موجود و دستیابی به پخش مناسبی از نانولوله‌های کربنی، مخلوط مورد نظر به مدت 90 دقیقه تحت امواج آلتراسونیک با استفاده هموزنایزر پروبی با فرکانس 24 کیلوهرتز و توان 120 وات 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 هوا، مخلوط حاصل به مدت 20 دقیقه توسط پمپ خلاء هواگیری

یک ساختار بلوری است که در واقع پایه یا زمینه نانو کامپوزیت محسوب می‌شود که از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک می‌باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر است که به عنوان تقویت کننده یا مواد پرکننده در درون فاز اول ماده زمینه توزیع می‌شوند. نانو کامپوزیتها بر اساس نوع تقویت کننده به سه نوع تقویت شده با نانو ذرات، نانوالیاف و نانوصفات تقسیم بندی می‌شوند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانو کامپوزیتها معمولاً سبب ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. اجزاء نانو کامپوزیتها بر اثر برهمکنش سطحی بین ماده پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. اجزای مواد نانو کامپوزیتی می‌توانند بر اثر تعامل بین سطح ماتریس و ذرات پرکن، ترکیبی از خواص هر دو جزء را داشته باشند و بهتر عمل کنند [2]. ذرات نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن خواص مکانیکی منحصر به فرد مانند مدول الاستیک بالاتر از 1000 گیگاپاسکال و استحکام کششی بالاتر از 100 گیگاپاسکال [4,3] به عنوان تقویت کننده‌ی مناسب در تولید کامپوزیتها مطرح می‌باشند. صفحات نانو گرافن از مجموعه اتمهای کربن سازمان یافته در شبکه‌های شش ضلعی با هیبریداسیون  $sp^2$  تشکیل شده است [5]. آزمایش‌های انجام گرفته بر روی گرافن مشخص شد گرافن مدول یانگ 1 تراپاسکال را داراست. گرافن دارای ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته بالایی در راستای درون صفحه می‌باشد. این ویژگی سبب شده است گرافن به عنوان رسانای الکتریکی برای محیط‌های با حرارت بالا مناسب باشد [6,7].

اثر افزودن نانو ذرات در کامپوزیت پایه پلیمری توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. آشنا قاسمی و همکاران [8] نشان دادند برای کامپوزیت‌های تقویت شده با رزین اپوکسی و لاستیک XNBR، افزودن 0.75 درصد وزنی نانو صفحات گرافن در زمینه اپوکسی باعث افزایش 23 درصدی استحکام ضربه شده و حضور 1.5 درصد وزنی این نانو ذرات افزایش 20 درصدی مدول کششی را به دنبال دارد. استفاده از نانو ذرات اکسید تیتانیوم با درصد کم در نانو کامپوزیتها شامل ماتریسی از دو فاز پلیمری پلی پروپیلن/ پلی اتیلن، تقریباً 7 درصد استحکام ضربه نانو کامپوزیت را افزایش می‌دهد [9]. نانو کامپوزیت پلی پروپیلن/ نانوسیلیکا توسط گارسیکا و همکاران [10] مورد بررسی قرار گرفت. با افزودن نانو ذرات سیلیکا به پلی پروپیلن، افزایش 30 درصدی مدول یانگ و 68 درصدی استحکام ضربه گزارش شد. رفیعی و همکارانش [11] مدول الاستیسیته، مقاومت نهایی و چقرمگی شکست کامپوزیت با لحاظ گرافن و نانولوله‌های کربنی را بر روی رزین اپوکسی در کسر وزنی  $0.1 \pm 0.002$  بررسی کردند. نتایج نشان داد مدول الاستیسیته نانو کامپوزیت با نانوگرافن و نانولوله کربنی نسبت به کامپوزیت پلیمری بترتیب 31% و 3% افزایش یافت. همچنین مقاومت نهایی و چقرمگی شکست نانو کامپوزیت با نانوگرافن نسبت به نانولوله کربنی افزایش بیشتری دارد و بهبود خواص مکانیکی پلیمر تقویت شده با نانوگرافن از پلیمر تقویت شده با نانولوله کربنی بهتر است. با افزودن نانولوله کربنی به کامپوزیت هیبریدی [12] در آزمون ضربه شارپی مشخص شد که انرژی جذب شده تا شکست نمونه با نانو نسبت به نمونه کامپوزیت بدون نانو 21 درصد افزایش یافت. همچنین افزودن ذرات نانوسیلیکا و کربن به کامپوزیت هیبریدی پایه پلیمری نشان داد که افزودن ذرات نانو سبب بهبود استحکام ضربه می‌شود بطوریکه برای درصد وزنی 1% نانو کربن استحکام ضربه 28% افزایش یافت [13]. و اچارویچانت و همکارانش [14] با افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم با درصد‌های وزنی 1، 2 و 3 به پلی پروپیلن، افزایش مدول یانگ، استحکام کششی و استحکام ضربه پلی پروپیلن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین افزایش مدول یانگ، استحکام کششی و استحکام ضربه مربوط به نانو ذرات اکسید تیتانیوم با 1% درصد وزنی می‌باشد. اثر نانوگرافن



Fig. 3 Coded specimens

شکل 3 نمونه‌های کدگذاری شده

آزمون ضربه شاریپی با دستگاه پاندولی شکل انجام می‌شود. نمونه به صورت افقی بین دو تکیه گاه بسته می‌شود. آنگاه پاندول از ارتفاع مشخص رها می‌شود. مسیر حرکت پاندول در وسط دو تکیه‌گاه است. نمونه به گونه‌ای قرار داده شده است که پاندول دقیقاً به پشت شیار برخورد کند. مقداری از انرژی جنبشی پاندول در اثر اصابت به نمونه و شکستن آن کاسته می‌شود. به دلیل کاهش انرژی جنبشی، پاندول به ارتفاع اولیه خود بر نمی‌گردد. دستگاه با محاسبه این اختلاف ارتفاع انرژی لازم جهت شکستن قطعه کامپوزیت و به عبارتی میزان انرژی ضربه‌ای جذب شده توسط هر نمونه را محاسبه می‌نماید.

### 3- بررسی استحکام ضربه نانولوله کربنی

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش ضربه شاریپی بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف بازالت و نانولوله کربنی و نانوگرافن ارائه می‌شود. در ابتدا پاسخ نمونه‌ها با نانولوله کربنی با درصد‌های وزنی متفاوت نانو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در آزمایش شاریپی، انرژی جذب شده بر سطح مقطع نمونه به عنوان استحکام ضربه محاسبه می‌گردد [17]. استحکام ضربه کامپوزیت با نانولوله کربنی و کامپوزیت بدون نانولوله در شکل 4 نشان داده شده است. با افزودن نانولوله کربنی به فاز زمینه کامپوزیت، استحکام ضربه افزایش می‌یابد. استحکام ضربه مربوط به نمونه نانولوله کربنی با 0.3 درصد وزنی نانو نسبت به نمونه بدون نانو لوله 36.5 درصد افزایش داشته در حالی که استحکام ضربه نمونه‌ها با نانو لوله کربنی 0.1 و 0.5 درصد وزنی نانو نسبت به نمونه بدون نانو لوله پرتیب 8.8 و 18.5 درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تست ضربه شاریپی نمونه‌های نانو کامپوزیتی، مقدار درصد وزنی نانولوله کربنی در فاز زمینه نانوکامپوزیت در میزان تغییرات استحکام ضربه نمونه‌ها نقش بسزا و قابل ملاحظه‌ای دارد، که این تغییرات می‌تواند ناشی از نحوه پخش نانو لوله‌ها در فاز زمینه و همچنین ایجاد استحکام متفاوت مابین فاز زمینه و الیاف با توجه تغییر درصد وزنی مواد نانو باشد. افزودن نانو لوله کربنی تا 0.1 درصد وزنی سبب افزایش استحکام ضربه تا 8.8 درصد می‌شود. با افزودن این میزان تا 0.3 درصد وزنی، استحکام ضربه تا 36.5 درصد به دلیل هم افزایی تقویت ماتریس توسط نانو لوله با پل زنی افزایش می‌یابد. استفاده از 0.5 درصد وزنی نانو لوله کربنی به دلیل کلوخه شدن احتمالی ذرات موجب افت خواص استحکام ضربه می‌شود.

شد. چرخش مخلوط به کمک همزن مغناطیسی باعث شده تا حباب‌های هوا به سطح رسیده و خروج آنها راحت‌تر باشد. در مرحله آخر هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 به مخلوط اضافه گردید و به مدت 5 دقیقه عملیات اختلاط رزین تقویت شده و هاردنر بصورت دستی صورت پذیرفت. برای ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شده است. پس از ریختن رزین حاصل بر روی هر لایه بازالت، کامپوزیت چند لایه‌ای تحت فشار قرار گرفته و در دمای اتاق فرایند پخت صورت گرفته است. مطابق شکل 1 کامپوزیت‌ها به صورت صفحه‌های مربع شکل به ابعاد 25×25 سانتیمتر ساخته شدند. در ساخت کامپوزیت از نانولوله و نانوگرافن استفاده شد که درصد وزنی نانو 0.1، 0.3 و 0.5 درصد می‌باشد. نمونه‌ها مطابق استاندارد برش داده شده و برای آزمون ضربه شاریپی آماده شدند.



Fig. 1 Composite plate before cutting

شکل 1 صفحه کامپوزیتی قبل از برش

نمونه‌های نانو کامپوزیت مطابق استاندارد ASTM D256 به طول 64 میلی‌متر و عرض 10 میلی‌متر برش داده شد. در هر نمونه با دستگاه CNC ناچ مطابق استاندارد ایجاد گردید و تعداد پنج نمونه برای هر درصد نانو در آزمون ضربه شاریپی انتخاب گردید.

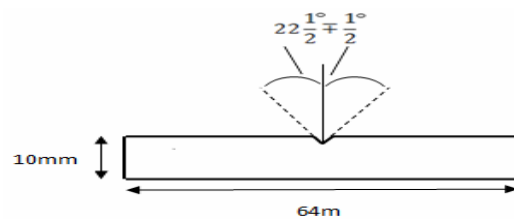


Fig. 2 Dimension of specimen according to standard

شکل 2 ابعاد نمونه مطابق استاندارد

پس از مرحله برش و جداسازی قطعات به منظور شفاف‌سازی و مشخص بودن قطعات در تمام مراحل کار، کدگذاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. شکل 3-6، نمونه‌های کدگذاری شده را نشان می‌دهد. به طور مثال در قطعه (1 0.3 C)، منظور از C نانو لوله کربنی (CNT) و منظور از 0.3، نانولوله کربنی با 0.3 درصد وزنی و منظور از 1، نمونه شماره یک می‌باشد و به همین ترتیب منظور از کدگذاری در قطعه (2 0.5 G)، نمونه شماره 2 نانوگرافن با 0.5 درصد وزنی می‌باشد.

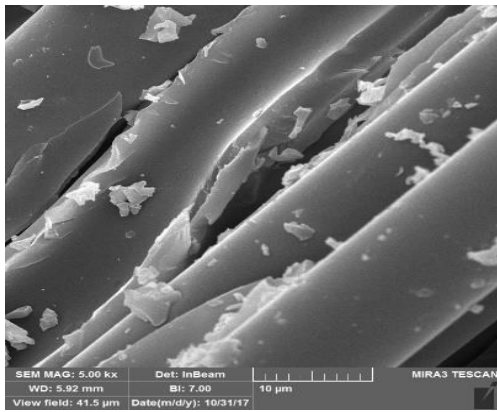


Fig. 6 Fiber surface with nanotube

شکل 6 سطح الیاف با نانو لوله

همچنین بیرون زدگی الیاف از سطح زمینه در ناحیه شکست نمونه کامپوزیت بدون نانو لوله در شکل 7 و سطح شکست نمونه نانو کامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانو لوله کربنی در شکل 8 نشان داده شده است.

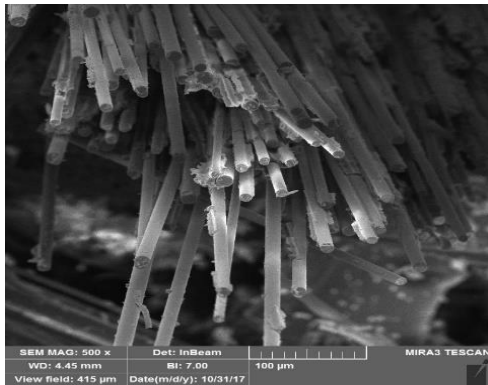


Fig. 7 Fracture surface of specimen without nanotube

شکل 7 سطح شکست نمونه بدون نانو لوله کربنی

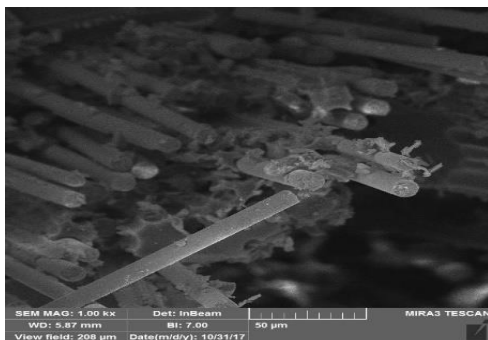


Fig. 8 Fracture surface of specimen with nanotube(0.3% wt)

شکل 8 سطح شکست نمونه با نانو لوله کربنی (0.3 درصد وزنی)

با مقایسه دو شکل 7 و 8 می توان مشاهده نمود که الیاف در نمونه کامپوزیتی به طور مجزا از سطح شکست جدا شده اما در حضور نانو لوله بیرون-زدگی الیاف از زمینه در سطح شکست به طور یکنواخت و چسبندگی می باشد که مواد زمینه در سطح شکست الیاف را احاطه کرده که علت آن تقویت چسبندگی مابین فاز زمینه و الیاف توسط نانو لوله های کربنی می باشد. یکی از دلایل افزایش این استحکام و افزایش قابل ملاحظه انرژی جذب شده شکست در

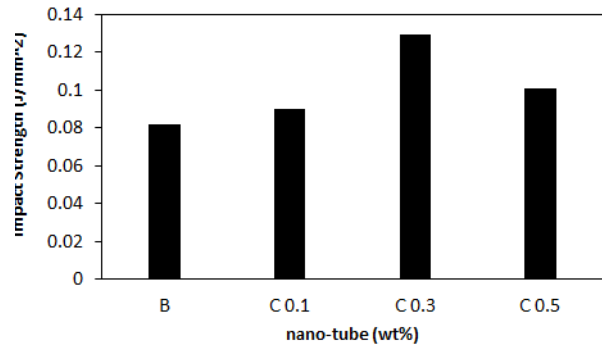


Fig. 4 Impact strength of nano-tube samples with different content and composite without nano-tube

شکل 4 استحکام ضربه نمونه های نانولوله با محتوی مختلف و کامپوزیت بدون نانولوله

3-1- بررسی میکروسکوپی سطح شکست نمونه های حاوی نانولوله کربنی  
بررسی دقیق و کامل سطح شکست نمونه های نانو کامپوزیتی به علت وجود مواد نانو و پیوندهای میکروسکوپی میان فاز زمینه و الیاف و همچنین نحوه پخش مواد نانو در فاز زمینه نیازمند مطالعه با دستگاه های میکروسکوپی الکترونی پیشرفته می باشد. بدین منظور بررسی سطح شکست نمونه ها و مکانیزم اثر گذاری نانو لوله های کربنی در فاز زمینه و نقش آنها در ایجاد و اشاعه ترک میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ FESEM مورد مطالعه قرار گرفت.

یکی از موارد مهم در ایجاد ترک اولیه و میزان انرژی جذب شده شکست، پیوند میان فاز زمینه و الیاف می باشد. بدین منظور سطح الیاف در ناحیه شکست نمونه کامپوزیت بدون نانولوله در شکل 5 و سطح شکست نمونه نانو کامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانولوله کربنی در شکل 6 نشان داده شده است. از مقایسه دو شکل 5 و 6 می توان دریافت سطح الیاف در نمونه کامپوزیتی، سطحی صاف تر است و مواد زمینه کمتری در سطح الیاف وجود دارد که این نشان دهنده پیوند و چسبندگی ضعیف تر مابین الیاف و زمینه می باشد در صورتی که برای نمونه نانو کامپوزیتی سطح الیاف آکنده از ذرات مواد زمینه می باشد.

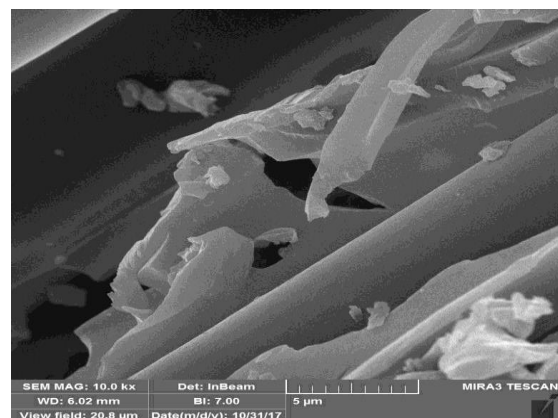


Fig. 5 Fiber surface without nanotube

شکل 5 سطح الیاف بدون نانو لوله

به راحتی در طول فصل مشترک رشد پیدا می‌کند. افزودن نانولوله‌های کربنی به میزان 0.1 درصد وزنی استحکام فصل مشترک بین زمینه و الیاف را تا حد کمی بهبود می‌بخشد، اما این درصد وزنی نانو در حدی نمی‌باشد که نانولوله کربنی به‌طور همگن و یکنواخت در تمامی زمینه پخش شود. با افزایش نانولوله کربنی به میزان 0.3 درصد وزنی و 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. این مکانیزم تحت عنوان مکانیزم پل زنی ترک اطلاق می‌شود. با افزودن 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی و مقادیر بالای نانولوله کربنی تا حدی پیوند مابین زمینه و الیاف قوی‌تر می‌شود اما به دلیل توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی منجر به پدیده کلوخه شدن و ایجاد آگلومره‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی می‌شود. مناطق کلوخه شده به عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده و منجر به کاهش انرژی مورد نیاز اشاعه ترک می‌شوند. همچنین کلوخه‌ها باعث همگرایی ترک‌ها و همچنین به عنوان مناطق اولیه ایجاد ترک عمل می‌کنند که در نتیجه باعث افت نسبی انرژی شکست کامپوزیت می‌شوند.

#### 4- بررسی استحکام ضربه نانوگرافن

در این قسمت اثر افزودن نانو گرافن بر کامپوزیت تقویت شده با بازالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تغییر درصد وزنی مواد نانو در میزان انرژی دینامیکی شکست نانو کامپوزیت‌های حاوی نانوگرافن همانند نانو کامپوزیت‌های حاوی نانولوله تغییرات قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود؛ به طوری که با افزایش مقدار درصد وزنی نانوگرافن، میزان انرژی جذب شده شکست کاهش می‌یابد. شکل 11 نمودار انرژی شکست کامپوزیت با نانوگرافن با درصد‌های وزنی متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 11 با افزودن 0.1 درصد وزنی نانوگرافن به سطح زمینه، انرژی جذب شده سطح شکست نسبت به حالت کامپوزیت بدون ذرات نانو، 50.7 درصد افزایش می‌یابد و با افزودن 0.3 درصد وزنی نانوگرافن، افزایش انرژی شکست به میزان 12.4 درصد و 0.5 درصد وزنی نانوگرافن، به میزان 38.4 درصد افزایش می‌یابد.

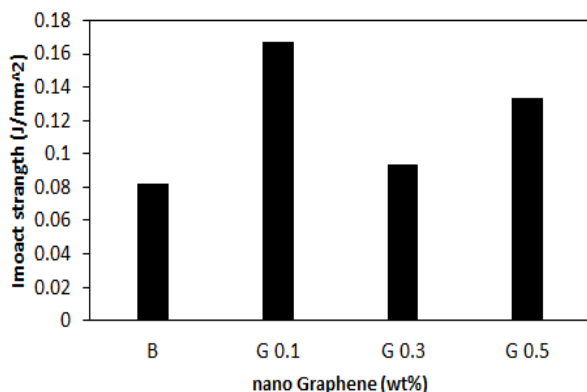


Fig. 11 Impact strength of composite with different content of nano Graphene

شکل 11 استحکام ضربه نانو کامپوزیت‌های با محتوی مختلف نانوگرافن

نانوکامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانولوله، رخ دادن مکانیزم پل‌زنی ترک توسط نانو لوله‌های کربنی می‌باشد. بیرون‌زدگی نانو لوله‌ها از سطح زمینه در شکل 9، نمایانگر وقوع این پدیده در نانوکامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود نانولوله‌ها همانند یک پل بر روی ترک قرار گرفته‌اند.

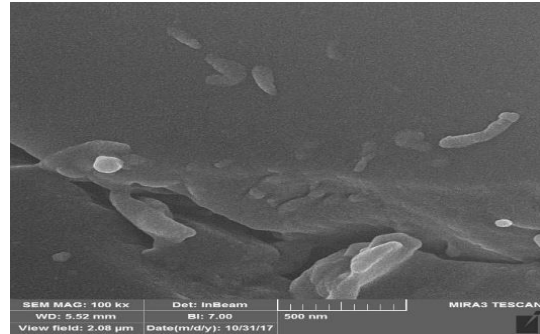


Fig. 9 Crack bridging effect of nanocomposite with 0.3% wt nanotube

شکل 9 اثر پلی زنی ترک نانو کامپوزیت با 0/3 درصد وزنی نانو

یکی از مسائلی که می‌تواند باعث کاهش میزان انرژی شکست نمونه‌های حاوی 0.5 درصد وزنی نانو لوله نسبت به 0.3 درصد وزنی نانولوله شود، پدیده کلوخه شدن نانو لوله‌های کربنی به علت افزایش نانولوله‌ها و پخش ناهمگن در فاز زمینه می‌باشد. شکل 10، سطح شکست نانو کامپوزیت حاوی 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی با بزرگنمایی 500 نانو متر را نشان می‌دهد که در آن پدیده کلوخه شدن و وجود آگلومره‌ها در زمینه که باعث به وجود آمدن مراکز تمرکز تنش و سهولت در اشاعه ترک شده قابل مشاهده است.

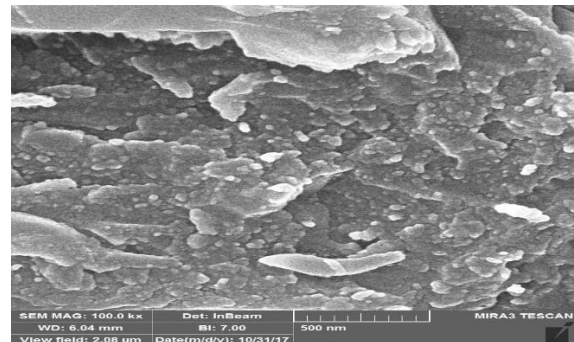


Fig. 10 Agglomeration of nano particle in sample with 0.5 % wt carbon nanotube

شکل 10 کلوخه شدن نانوذرات در نمونه نانو با 0/5 درصد وزنی نانو لوله کربنی

همانطور که در شکل‌های 4 تا 10 نشان داده شده است استحکام ضربه با افزایش مقادیر نانولوله کربنی بیشتر می‌شود و این بدان علت است که انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها به شدت تحت تاثیر نحوه پخش نانولوله‌های کربنی در زمینه یا ماتریس است. نخستین مد تخریب در کامپوزیت‌های لایه‌ای، تشکیل میکروتورک در زمینه یا ماتریس است. زمینه به عنوان ضعیف‌ترین ناحیه در کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. ترک‌های ایجاد شده، در اثر بار اعمال شده به نمونه بخاطر ضربه شاریپی در زمینه رشد کرده تا به فصل مشترک الیاف و زمینه برسند. اگر پیوند بین زمینه و الیاف به اندازه کافی مستحکم نباشد ترک

وزنی نانوغرافن سبب بیشتر نمودن چسبندگی میان فاز زمینه با الیاف شده و تا حدی لغزش سطحی نانوغرافن بر روی هم را در فاز زمینه بهبود بخشیده است [8]. بدلیل ماهیت غیر قطبی نانوغرافن، الیاف و ماتریس نتایج نشان می-دهد افزودن نانوغرافن تا 0.1 درصد تمایل به تقویت الیاف دارد، افزایش این میزان تا 0.3 نانو گرافن به بهبود و سازگاری الیاف و ماتریس تمایل دارد در صورتیکه با افزودن نانوغرافن به 0.5 درصد، نانوغرافن علاوه بر تمایل نانو گرافن به الیاف و ماتریس احتمالاً میتواند فصل مشترک الیاف و ماتریس را نیز تقویت نماید که منجر به استحکام بیشتر کامپوزیت می گردد.

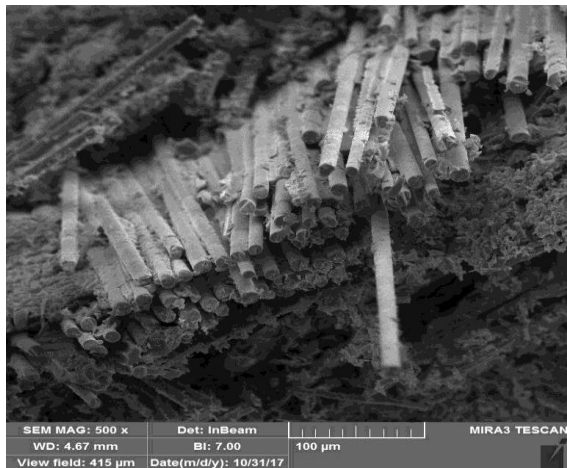


Fig. 13 Fracture surface of nanocomposite with 0.3 %wt graphene  
شکل 13 سطح شکست نانوکامپوزیت با 0.3 درصد وزنی گرافن

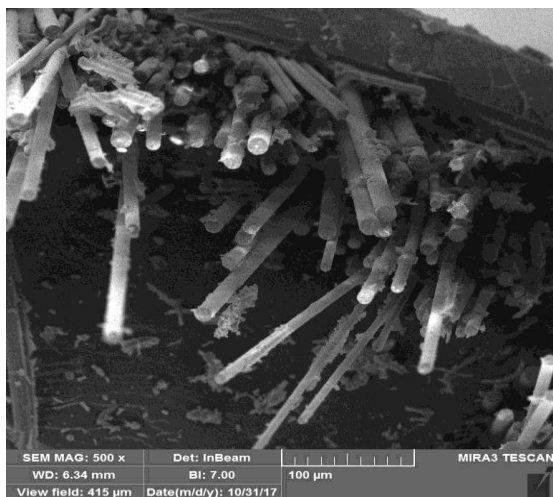


Fig. 14 Fracture surface of nanocomposite with 0.5 %wt graphene  
شکل 14 سطح شکست نانوکامپوزیت با 0.5 درصد وزنی گرافن

در جدول 1 انرژی جذب شده تا شکست نمونه‌ها برای نمونه‌های کامپوزیت بدون نانو که در جدول با B نشان داده شده است و کامپوزیت با لحاظ نانولوله کربنی و نانوغرافن آورده شده است. بیشترین انرژی جذب شده و استحکام ضربه مربوط به کامپوزیت حاوی 0.1 درصد نانوغرافن می‌باشد. در نانوکامپوزیت با 0.1 درصد نانوغرافن، انرژی جذب شده میانگین 7.23 ژول و استحکام ضربه میانگین 0.1668 ژول بر میلیمتر مربع می‌باشد. کامپوزیت با نانولوله کربنی

همان‌گونه که از شکل 11 مشاهده می‌گردد افزودن 0.1 درصد وزنی نانوغرافن بالاترین تغییر در افزایش انرژی سطحی شکست را دارا می‌باشد و با افزایش درصد وزنی انرژی دینامیکی شکست کاهش می‌یابد. درکل افزودن نانوغرافن به سطح زمینه اگر به طور مناسب پراکنده شده و بر هم کنش قوی در سطح مشترک گرافن و پلیمر وجود داشته باشد باعث افزایش انرژی سطحی شکست و بهبود خواص ضربه پذیری کامپوزیت می‌گردد. افزودن 0.1 درصد وزنی نانوغرافن به کامپوزیت سبب ایجاد سطح ویژه زیاد صفحات گرافن شده و چسبندگی بین سطح مشترک فازها افزایش می‌یابد.

یکی از دلایل کاهش میزان انرژی سطحی شکست با افزایش درصد وزنی گرافن به میزان 0.3 درصد وزنی، افزایش لغزش صفحات گرافن بر روی هم می‌باشد که با افزایش درصد وزنی نانوغرافن به میزان 0.5 درصد وزنی نسبت به 0.3 درصد وزنی نانوغرافن، انرژی جذب شده 23 درصد افزایش می‌یابد که می‌تواند به علت افزایش چگالی و کاهش لغزندگی سطحی ذرات گرافن در فاز زمینه باشد [8].

#### 1-4- بررسی میکروسکوپی سطح شکست نانو کامپوزیت های گرافن

به منظور بررسی دقیق سطح شکست نمونه‌ها و بررسی میزان و نحوه بیرون-زدگی الیاف از سطح شکست و همچنین تاثیر ذرات گرافن در پیوند میان الیاف و فاز زمینه نمونه های نانو کامپوزیت با درصد وزنی متفاوت تحت عکس برداری FESEM قرار داده، که در ادامه به مطالعه عکس های بدست آمده و بررسی و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود.

سطح شکست نانوکامپوزیت با 0.1 درصد وزنی نانوغرافن در شکل 12 نمایش داده شده است. الیاف در سطح شکست کاملاً توسط زمینه احاطه شده-اند و بیرون زدگی الیاف در سطح شکست وجود ندارد که این موضوع موید چسبندگی قوی الیاف و زمینه بواسطه وجود نانوغرافن در زمینه می‌باشد.

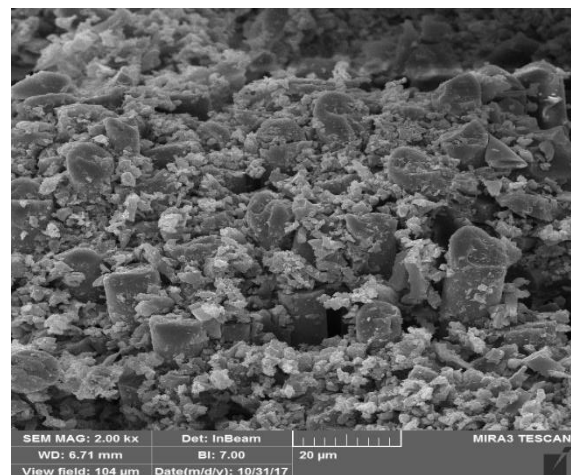


Fig. 12 Fracture surface of nanocomposite with 0.1 %wt graphene  
شکل 12 سطح شکست نانوکامپوزیت با 0.1 درصد وزنی گرافن

در شکل 13، سطح شکست نانو کامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانوغرافن و در شکل 14 سطح شکست نانو کامپوزیت با 0.5 درصد وزنی نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در شکل 13، بیرون زدگی الیاف نسبت به شکل 14 بیشتر می‌باشد که این موضوع حاکی از آن است که افزایش درصد

در کل می‌توان علت بهبود خواص ضربه‌پذیری نانو کامپوزیت‌های گرافن نسبت نانو کامپوزیت‌های نانولوله کربنی را در هم تنیدگی و چسبندگی مکانیکی به دلیل سطح چروک‌خورده گرافیت اکسید لایه لایه شده به روش گرمایی و وجود پیوند هیدروژنی بین زنجیره‌های پلیمری و گروه‌های اکسیژنی موجود روی سطح صفحات گرافن بیان نمود.

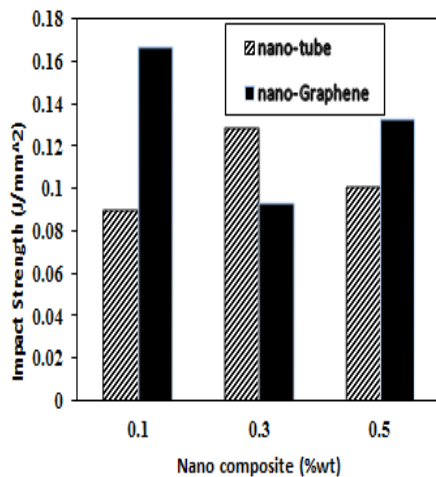


Fig. 15 Comparing the impact strength of nano tube and graphene

شکل 15 مقایسه استحکام ضربه نانو لوله و گرافن

### 5- نتیجه گیری

در این مقاله نانو کامپوزیت تقویت شده با بازالت و نانو لوله و نانو گرافن تحت ضربه شاری مورد بررسی قرار گرفت. میزان تغییر انرژی ضربه جذب شده توسط دستگاه ضربه شاری تحت تأثیر افزودن مواد نانو لوله کربنی و گرافن با درصد وزنی های 0.1، 0.3 و 0.5 به عنوان ذرات نانو بر روی کامپوزیت متشکل از رزین اپوکسی و الیاف بازالت بررسی شده است که نتایج حاصل به شرح ذیل می باشد:

شکست ایجاد شده در اثر ضربه شاری در همه نمونه های کامپوزیت و نانو کامپوزیت از نوع ترد است.

در سطح مقطع همه نمونه‌های آزمایش شده، پاره شدن الیاف همراه با خروج آنها از زمینه و جدا شدن لایه‌های کامپوزیت اتفاق افتاده است.

میزان پاره شدن الیاف همچنین خروج آنها از زمینه و جدا شدن لایه‌ها با توجه حضور مواد نانو همچنین نوع مواد نانو و میزان درصد وزنی مواد نانو استفاده شده متفاوت است.

میزان انرژی ضربه جذب شده در حضور مواد نانو با تمامی درصد وزنی های متفاوت نسبت به نمونه کامپوزیتی افزایش یافته است.

بیشترین میزان افزایش انرژی ضربه جذب شده در نمونه‌های نانو کامپوزیت تقویت شده با نانولوله و نانو گرافن برای نمونه‌های نانو کامپوزیت حاوی 0.1 درصد وزنی نانو گرافن می‌باشد.

بیشترین میزان افزایش انرژی ضربه جذب شده در نمونه‌های کامپوزیت نانو لوله کربنی، مربوط به نمونه‌های حاوی 0.3 درصد وزنی از نانو لوله کربنی می‌باشد.

دارای روند متفاوتی بوده و کمترین انرژی جذب شده و استحکام ضربه در بین نانو کامپوزیت‌ها مربوط به نانو کامپوزیت حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی می‌باشد بطوریکه برای نانو کامپوزیت حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی، انرژی جذب شده میانگین 3.8 ژول و استحکام ضربه 0.0901 ژول بر میلی‌متر می‌باشد. با افزودن نانولوله کربنی تا 0.3 درصد وزنی استحکام ضربه تا 36.5 درصد افزایش می‌یابد و استحکام ضربه برای نانو کامپوزیت با 0.3 وزنی نانولوله کربنی بیشترین مقدار می‌باشد. در این حالت هم افزایش تقویت ماتریس توسط نانو لوله با پل زنی سبب افزایش استحکام ضربه شده است.

در شکل 15 تغییرات انرژی شکست درصدهای وزنی متفاوت نمونه‌های نانو کامپوزیت گرافن و نانولوله کربنی و همچنین کامپوزیت بدون حضور مواد نانو در زمینه مقایسه گردیده است. بهبود خواص نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو گرافن بیشتر از نانولوله های کربن است. یکی از دلایل این نتایج مساحت سطح تماس بیشتر صفحات گرافن و نسبت زیاد طول به عرض صفحات گرافن در مقایسه با نانولوله های کربنی می‌باشد.

افزودن 0.1 درصد وزنی نانو گرافن به سطح زمینه نسبت به درصدهای وزنی دیگر، بالاترین استحکام ضربه را دارا می‌باشد اما با افزودن 0.1 درصد وزنی نانو لوله تغییر چندانی در استحکام ضربه مشاهده نمی‌گردد. نانو کامپوزیت با 0.3 درصد وزنی نانو لوله و 0.5 درصد وزنی نانو گرافن استحکام ضربه یکسانی دارند. نکته قابل توجه در نمودار اختلاف 23 درصدی مابین 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی و 0.5 درصد وزنی نانو گرافن می‌باشد که خود نشان دهنده این موضوع می‌باشد که پدیده کلوخه شدن در نانولوله کربنی و ایجاد تمرکز تنش در مناطق کلوخه شده تاثیر بیشتری بر روی اشاعه ترک و کاهش انرژی شکست نسبت لغزندگی سطحی مابین صفحات گرافن می‌گذارد.

جدول 1 انرژی جذب شده و استحکام ضربه نمونه‌های کامپوزیت و نانو کامپوزیت

Table 1 Absorbed energy and impact strength of composite and nanocomposite specimens

نمونه	مساحت (mm <sup>2</sup> )	انرژی ضربه (J)	نسبت انرژی به مساحت (J/mm <sup>2</sup> )
B1	43.99	3.7	0.0858
B2	43.38	3.9	0.0899
B3	42.90	3.2	0.0746
C 0.1 1	42.55	3.6	0.0846
C 0.1 2	42.41	3.9	0.0919
C 0.1 3	41.49	3.9	0.0939
C 0.3 1	45.48	6.3	0.1385
C 0.3 2	44.74	6.3	0.1408
C 0.3 3	47.44	6.5	0.1370
C 0.5 1	37.81	4.1	0.1084
C 0.5 2	37.98	3.5	0.0921
C 0.5 3	37.12	3.8	0.1024
G 0.1 1	43.40	7	0.1613
G 0.1 2	43.59	7.7	0.1766
G 0.1 3	43.04	7	0.1626
G 0.3 1	41.678	4.1	0.0983
G 0.3 2	41.82	4.1	0.098
G 0.3 3	41.13	3.5	0.0851
G 0.5 1	42.90	5.7	0.1329
G 0.5 2	43.01	5.6	0.1302
G 0.5 3	42.22	5.8	0.1374

- [13] Megahed, M., Megahed AA and Agwa, MA., "The Influence of Incorporation of Silica and Carbon Nanoparticles on the Mechanical Properties of Hybrid Glass Fiber Reinforced Epoxy," Journal of industrial of textiles, In press.
- [14] Wacharawichananat, S., Thongyai, S. and Tipsri, T., "Effect of Mixing Conditions and Particle Sizes of Titanium Dioxide on Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene/Titanium Dioxide Composites", Iranian Polymer Journal, Vol. 18, No. 8, pp. 607-616, 2009.
- [15] 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", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No 9, pp. 125-133, 2015.
- [16] 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.
- [17] Zabihi, O., Ahmadi, M., Nikafsha S. Preyeswary K.C. and Naebe, M., "A Technical Review on Epoxy-Clay Nanocomposites: Structure, Properties, and Their Applications in Fiber Reinforced Composites, Composite Part B: Engineering , V. 135, pp 1-24, 2018.
- استحکام ضربه نانولوله کربنی 0.3 درصد وزنی نسبت به 0.1 درصد وزنی افزایش یافت که این میزان با افزایش نانولوله کربنی به مقدار 0.5 درصد وزنی، 23% کاهش یافت.
- در تمامی نمونه‌های نانوکامپوزیت گرافن پیوند قوی تری میان مواد زمینه و الیاف و بیرون زدگی کمتر الیاف نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده گردید. با افزایش مقدار درصد وزنی نانوغرافن نسبت به 0.1 درصد وزنی نانوغرافن، کاهش میزان انرژی ضربه جذب شده مشاهده گردید.
- با افزایش نانوغرافن به مقدار 0.3 درصد وزنی نسبت به 0.1 درصد وزنی پدیده لغزندگی سطحی میان نانوغرافن افزایش یافته اما با افزایش مقدار نانوغرافن به میزان 0.5 درصد وزنی این پدیده به علت چین خوردگی میان صفحات گرافن کاهش می‌یابد.
- با توجه به چسبندگی بالاتر ذرات گرافن و اختلاط راحت تر آن ها در مواد زمینه و قیمت پایین تر ذرات گرافن نسبت مواد نانو لوله، استفاده از مواد نانو گرافن مقرون به صرفه تر از مواد نانو لوله کربنی می‌باشد.

## 6- مراجع

- [1] Stevanovic, M. M. and Stecenko T. B., "Mechanical Behaviour of Carbon and Glass Hybrid Fibre Reinforced Polyester Composites" Journal of Material Science, Vol. 27, pp. 941-946, 1992.
- [2] Fischer, H., "Polymer nanocomposites: From Fundamental Research to Specific Applications," Materials Science and Engineering: C, Vol. 23, pp. 763-772, 2003.
- [3] Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W. and Gibson, J. M., "Exceptionally high Young's Modulus Observed for Individual Carbon Nanotubes," Nature, Vol. 381, No. 6584, pp. 678-680, 1996.
- [4] Wong, E. W., Sheehan, P. E. and Lieber, C. M., "Nanobeam mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes," Science, Vol. 277, No. 5334, pp. 1971-1974, 1997.
- [5] Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H. B., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T. and Ruoff, R. S., "Graphene-Based Composite Materials," Nature, Vol. 442, No. 7100, pp. 282-286, 2006.
- [6] Androulidakis, C., Tsoukleri, G., Koutroumanis, N., Gkikas, G., Pappas, P., Parthenios, J., Papagelis, K. and Galiotis, C. "Experimentally Derived Axial Stress-Strain Relations for Two-Dimensional Materials such as Monolayer Graphene, Carbon" Vol. 81, No. 1, pp. 322-328, 2015.
- [7] Sadeghzadeh, S. and Liu, L., "Resistance and Rupture Analysis of Single and Few-Layer Graphene Nanosheets Impacted by Various Projectiles," Superlattices and Microstructures, Vol. 97, No. 1, pp. 617-629, 2016.
- [8] Ashenai Ghasemi, F., Saberian, M.H., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Nano-Composite based on Epoxy/ Graphene Nano-Platelets/ Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Rubber," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, in press.
- [9] Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "An Investigation of Titanium Dioxide Nanoparticles Effect on the Impact Strength, Tensile Strength and Elastic Modulus of Polypropylene/Linear Low Density Polyethylene (PP/LLDPE) Blends," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 386-390, 2017.
- [10] Garcia, M., Vilet, G.V. and Jain, S., "Polypropylene/SiO2 Nanocomposites with Improved Mechanical Properties," Journal reviews on advanced materials science. Vol. 6, No. 2, pp. 169-175, 2004.
- [11] Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H. and Koratkar, N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content," ACS NANO, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [12] Sharma S.P. and Lakkad S.C., "Impact Behavior and Fractographic Study of Carbon Nanotubes Grafted Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Multi-Scale Hybrid Composites," Composite Part A: Applied science and manufacturing, Vol. 69, pp. 124-131, 2015.