



## تأثیر نانوصفحات گرافن عامل‌دار بر خواص مکانیکی کامپوزیت وینیل استر / الیاف شیشه

مهدی عبدالهی آذغان<sup>۱</sup>، سید نوید حسینی آبنندانک<sup>۲\*</sup>، یوسف امیریان<sup>۳</sup> و علی علیزاده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی پزشکی، دانشگاه امیرکبیر، تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی دریا، دانشگاه امیرکبیر، تهران

<sup>۴</sup> استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه مالک اشتر، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

### چکیده

در این پژوهش تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن عامل‌دار بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های وینیل استر / الیاف شیشه، مورد بررسی قرار گرفت. جهت توزیع مناسب گرافن در زمینه و ایجاد پیوند مستحکم‌تر میان گرافن، وینیل استر و الیاف شیشه، سطح گرافن توسط عامل جفت‌کننده تری‌آمینوپروپیل‌تری‌متوکسی‌سیلان عامل‌دار شد. سپس کامپوزیت‌ها به روش لایه‌گذاری دستی با نانوکامپوزیت‌های حاوی درصد‌های وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ گرافن عامل‌دار ساخته شدند. مطابق نتایج، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن عامل‌دار، بهترین خواص را نشان داد. طبق نتایج آزمون خمش، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی در مقایسه با نمونه فاقد گرافن به ترتیب ۶۳ و ۲۸ درصد افزایش در استحکام و مدول خمشی از خود نشان داد. نتایج آزمون کشش به ترتیب ۲۶ و ۱۱ درصد بهبود در استحکام کششی و مدول یانگ را برای نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن عامل‌دار نسبت به کامپوزیت فاقد گرافن نشان داد. مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی، افزایش خواص مکانیکی می‌تواند مربوط به بهبود چسبندگی بین پلیمر و الیاف و مکانیزم‌های چقرمه‌سازی در نمونه‌های شامل گرافن عامل‌دار باشد.

**کلمات کلیدی:** نانوکامپوزیت؛ وینیل استر؛ گرافن؛ عامل‌دار کردن؛ رفتار مکانیکی.

## Effect of Functionalized Graphene Nanoplates on the Mechanical Properties of Vinyl Ester/ Glass Fibers Composite

M. Abdollahi Azghan<sup>1</sup>, S. N. Hosseini Abbandanak<sup>2\*</sup>, U. Amirian<sup>3</sup>, A. Alizadeh<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> PhD student, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> PhD student, Department of Biomedical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> PhD student, Department of Marine Sciences and Ship Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In this study, the effect of functionalized graphene nanoplatelets (GNPs) on the mechanical properties of vinyl ester/glass fiber composites was investigated. In order to properly distribute the graphene in the matrix and create a stronger bond between surface modified GNPs, vinyl ester and glass fibers, surface treatment of GNPs was performed using (3-aminopropyl) trimethoxysilane. The nanocomposites with different weight percentages of treated GNPs (0, 0.2, 0.4 and 0.6) were fabricated by hand lay-up method. The nanocomposite with 0.4 wt.% of modified GNPs showed the best mechanical properties. The results of bending test of 0.4 wt.% showed 63 and 28 percent increase in flexural strength and modulus, respectively compared to composite without GNPs. Also nanocomposite containing 0.4 wt.% surface modified GNPs exhibited 26% and 11% improvement in tensile strength and modulus of elasticity compared to the FMLs containing 0.0 wt.% GNPs, respectively. According to the SEM images, the increase in mechanical properties could be related to the improvement in the adhesion between glass fibers and vinyl ester resin, and also the toughening mechanism of treated GNPs.

**Keywords:** Nanocomposite; Vinyl Ester; Graphene; Functionalization; Mechanical Behavior.

## ۱- مقدمه

توسعه و تحقیق در زمینه مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی در شاخه مهندسی است که علت آن، رفتار مکانیکی مناسب آن‌ها است. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، موادی هستند که به علت خواص منحصر به فرد در حال حاضر کاربرد فراوانی در صنایع مختلف مانند، صنایع دریایی، هوافضا و مهندسی پزشکی دارند. از جمله این خواص می‌توان به استحکام و مدول ویژه بالا، مقاومت به خوردگی و خستگی بالا و ساده بودن فرآیند ساخت اشاره کرد؛ به عنوان مثال، کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی تقویت‌کننده‌های نانوغرافن به عنوان بدنه شاتل‌ها و ماهواره‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری، باعث کاهش ۷۴۹ Kg از وزن Airbus A380 شده است [۱، ۲]. در صنایع دریایی نیز این کامپوزیت‌ها به علت خواص رادارگریزی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ اما جذب رطوبت و تخریب توسط نور آفتاب در صورت استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها بدون پوشش اجتناب‌ناپذیر است [۲].

در میان رزین‌های مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، رزین وینیل استر به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و جذب آب، کاربرد فراوانی در ساخت قطعات کامپوزیتی مورد استفاده در صنایع دریایی پیدا کرده است. این رزین علی‌رغم ویژگی‌های مذکور از خواص مکانیکی مناسب و ویسکوزیته پایینی نیز برخوردار است و به این ترتیب، فرآیندپذیری خوبی برای ساخت کامپوزیت دارد [۳].

استفاده از الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده در ساخت قطعات کامپوزیتی به‌طور چشم‌گیری خواص کششی و خمشی را افزایش می‌دهد. خواص مکانیکی الیاف به علت وجود شبکه سه بعدی در همه جهت‌ها یکسان است. الیاف شیشه نوع E در شرایط رطوبت و درجه حرارت بالا نیز، از مقاومت خوبی برخوردار است. این الیاف همچنین در برابر سایش، کشش و خوردگی مقاوم است [۴].

گرافن بدون نقص با استحکام ۱۳۰ GPa، مدول یانگ ۱ TPa و رسانایی حرارتی و الکتریکی بسیار بالا به عنوان مستحکم‌ترین ماده جهان شناخته شده است. سطح ویژه گرافن برابر با ۲۶۳۰ مترمربع بر گرم است که بسیار بیشتر از سطح ویژه نانولوله کربنی بوده و از این رو برهمکنش بیشتری

با مواد اطراف خود دارد. به صورت میانگین افزودن گرافن به مقداری حدود کمتر از ۰/۲۵ درصد وزنی، سبب افزایش ۳۰ درصدی در چقرمگی کامپوزیت با زمینه اپوکسی می‌شود. البته مقدار بهبود خواص به تعداد لایه‌های گرافن، قطر صفحات، عوامل شیمیایی موجود روی سطح گرافن و نحوه پراکنده‌سازی گرافن در زمینه وابسته است [۵، ۶]. مشکل اصلی در استفاده از گرافن پراکنده کردن آن در زمینه پلیمری است، چرا که این ماده نه آب‌گریز و نه آب‌دوست است [۷].

عامل اتصال سیلانی<sup>۱</sup> توانایی ایجاد پیوند پایدار میان مواد آلی و غیرآلی را دارد. معمولاً فصل‌مشترک میان دو ماده، متفاوت از موادی تشکیل می‌شود که یکی از اجزای آن سیلیسیوم است و یا این که اجزایی با خواص مشابه سیلیسیم (مانند سیلیکات‌ها<sup>۲</sup>، آلومینات‌ها<sup>۳</sup> و بورات‌ها<sup>۴</sup>) دارد. وجود این مواد روی سطح، آن را از لحاظ شیمیایی فعال کرده و به زیرلایه این امکان را می‌دهد تا با محیط و مواد متفاوت اطراف خود ارتباط برقرار کند. اتصالات سیلانی می‌توانند سبب پراکنده‌سازی مناسب‌تر نانوذره در زمینه، اصلاح چسبندگی و برهمکنش بیشتر نانوذره با محیط اطراف، اصلاح و سرعت بخشیدن به استحاله‌های شیمیایی شوند [۸].

زهاری و همکاران [۹]، خواص مکانیکی و خاصیت جذب آب کامپوزیت زمینه پلی پروپیلن تقویت‌شده با الیاف ایچوک<sup>۵</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. الیاف ابتدا به طول ۲ میلی‌متر، خرد و سپس با استفاده از عملیات سیلان اصلاح سطحی شدند. آن‌ها مشاهده کردند که اصلاح سطحی الیاف، باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش جذب آب شد.

رفیعی و همکارانش [۱۰]، به بررسی تأثیر نانو صفحات گرافن عامل‌دار در درصد‌های گوناگون بر چقرمگی شکست و انرژی شکست پلیمر تقویت‌شده با آن پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند، با افزودن تنها ۰/۱۲۵٪ گرافن عامل‌دار چقرمگی شکست و انرژی شکست به ترتیب ۶۵٪ و ۱۱۵٪ افزایش یافتند و سرعت رشد ترک ۲۵ برابر کمتر شد.

<sup>1</sup> Silane Coupling Agent

<sup>2</sup> Silicates

<sup>3</sup> Aluminates

<sup>4</sup> Borates

<sup>5</sup> Ijuk Fiber

خوبی صورت گرفت و بهبود خواص به مقدار چشم‌گیری حاصل شد. بهترین درصد وزنی اکسیدگرافن، ۰/۳ گزارش شد که در آن به ترتیب استحکام و مدول خمشی ۶۶ و ۷۰ درصد بهبود یافتند.

حسینی و همکاران [۱۴]، تاثیر اصلاح سطحی گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی الیاف بازالت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری حاوی گرافن عامل‌دار نسبت به نمونه بدون عامل (در یک درصد وزنی یکسان)، بطور میانگین ۷۰ درصد بیشتر است. آن‌ها افزایش خواص مکانیکی را ناشی از افزایش برهمکنش بیشتر گرافن و زمینه را گزارش کردند. زمان و همکارانش [۱۵] نیز به بررسی تاثیر عامل‌دار کردن گرافن بر خواص نانوکامپوزیت تقویت شده با آن پرداختند. برای نانوکامپوزیت حاوی گرافن بدون عامل، افزایش مدول تا ۲/۵٪ وزنی از گرافن بدون عامل اتفاق افتاده و در ۴٪ وزنی کاهش یافت، در صورتی که برای نانوکامپوزیت حاوی گرافن عامل‌دار، افزایش مدول تا ۴٪ وزنی ادامه یافته و در ۵/۵٪ وزنی کاهش می‌یابد. در ۴٪ وزنی گرافن عامل‌دار، سبب ۲۱/۶٪ بهبود در مدول و گرافن معمولی سبب ۷/۴٪ بهبود در مدول شد.

با توجه به کارهای انجام شده (که به آن اشاره شد)، تاکنون تحقیقات کمی در زمینه تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های وینیل استر/ شیشه انجام شده است. در حالی که یکی از اساسی‌ترین بخش‌های مورد استفاده در صنعت کشتی‌سازی و هواپیمایی است. براین اساس، در تحقیق فعلی، خواص مکانیکی و مکانیزم‌های تأثیرگذار بر این خواص در نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری بررسی شد. نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین، بررسی تاثیر درصدهای مختلف نانوصفحات گرافن روی خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه پلی استری و همچنین بررسی مکانیزم‌های استحکام‌دهی در حضور گرافن است.

## ۲- بخش تجربی

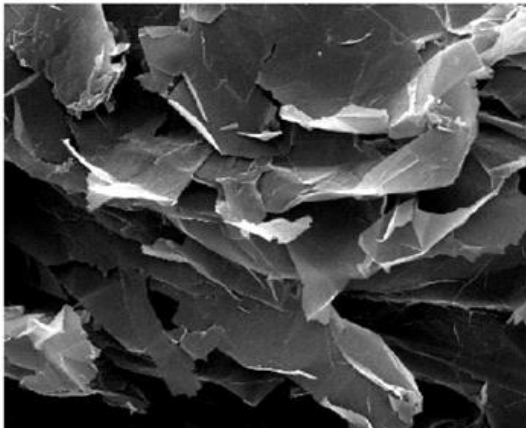
### ۲-۱- مواد

در تحقیق حاضر، به منظور ساخت کامپوزیت پلیمری از رزین وینیل استر RESITAN VE 2095 خریداری شده از شرکت شیمی افسون در ایران به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده

احمدی‌مقدم و همکارانش، به بررسی اثر افزودن گرافن روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری با زمینه از نوع اپوکسی پرداختند. در این پژوهش تأثیر عامل‌های سطحی گرافن بر بهبود خواص بررسی شد. به این منظور گرافن بدون عامل، اکسید گرافن، گرافن با عامل سطحی آمینی و همچنین گرافن با عامل سیلانی به عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفتند. به‌طور کلی عامل‌دار کردن گرافن، سبب بهبود بیشتر در خواص مکانیکی شد. در میان نانوذرات، گرافن عامل‌دار شده با عامل‌های سیلانی و آمینی بیشترین بهبود در خواص را ایجاد نمودند؛ همچنین با افزودن ۰/۵ درصد وزنی گرافن عامل‌دار مدول الاستیسته و استحکام کششی به ترتیب ۱۴ و ۳۸ درصد افزایش یافتند. علت بهبود در چقرمگی شکست، مدول الاستیسته و استحکام کششی به چسبندگی بیشتر میان گرافن عامل‌دار و زمینه و همچنین پراکندگی بهتر آن در زمینه باز می‌گردد [۱۱].

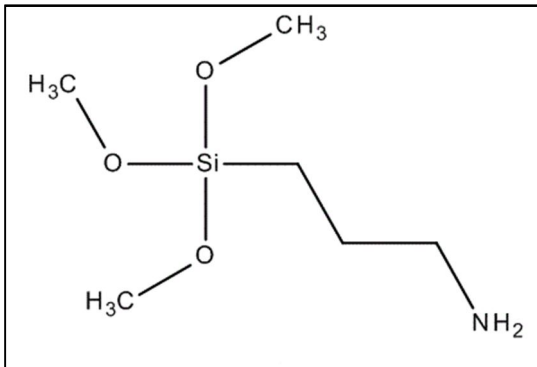
لایئو و همکارانش [۱۲]، به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های وینیل استر/ الیاف کربن تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند جداره پرداختند. مطابق با نتایج به دست آمده عامل‌دار کردن سطح نانولوله‌ها، سبب بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌ها شده که دلیل آن، برهمکنش بهتر نانولوله‌ها با رزین اپوکسی و ایجاد فصل مشترک قوی‌تر است. اصلاح سطح نانولوله‌ها با استفاده از مواد اسیدی و متعاقباً استفاده از عامل اکریلی بوده است. به‌طور کلی، نانولوله‌کربنی عامل‌دار شده با استفاده از عامل اکریلی، موجب بهبود حداکثری خواص مکانیکی و حرارتی شده است. استحکام کششی به میزان ۲۸/۹٪ و مدول خمشی نیز به میزان ۹/۹٪ افزایش یافت؛ همچنین دمای انتقال شیشه‌ای به میزان ۱۹/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و ضریب انبساط حرارتی نیز کاهش یافت.

پاتاک و همکارانش [۱۳]، خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف کربن حاوی اکسید گرافن را مورد بررسی قرار دادند. اکسید گرافن به دلیل داشتن گروه‌های عاملی روی سطحش، توزیع مناسب‌تری در زمینه و برهمکنش بیشتری با الیاف کربن ایجاد می‌کند. در این پژوهش الیاف کربن نیز دارای عامل شیمیایی روی سطح خود بودند، به همین جهت چسبندگی اکسید گرافن، هم به زمینه و هم به الیاف به



10000 X 50  $\mu$ m

شکل ۱- تصویر SEM از نانوصفحات گرافن [۸]



شکل ۲- ساختار شیمیایی عامل سیلانی تری آمینوپروپیل تری متوکسی سیلان [۱۶]

پلیمری می‌شود [۱۴]. ۱۰ mg گرافن در محلولی از ۹۵ ml اتانول و ۵ ml آب مقطر با استفاده از امواج فراصوت به مدت ۱۰ min تحت توان ۸۰ W توزیع شدند. در ادامه، عامل سیلانی با نسبت وزنی معادل گرافن درون مخلوط فوق اضافه شده و ترکیب حاصل تحت عملیات رفلکس قرار گرفت. pH ترکیب در حین فرایند با استفاده از اسید کلریدریک (HCl, ۳۷٪) در حدود ۲-۴ تنظیم شد. پس از اتمام فرایند رفلکس و به منظور جداسازی گرافن، مخلوط حاصل به مدت ۳۰ min تحت عملیات سانتریفوژ با دور ۴۰۰۰ rpm قرار گرفت. پودر حاصله سه مرتبه با اتانول و به منظور خارج ساختن عوامل کوپلینگ اضافی شستشو داده شد و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت درون آون خشک شد.

شد. رزین مورد نظر بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول A<sup>۱</sup> و اپوکسی است. در کنار رزین وینیل استر از کبالت و دی‌متیل آنیل<sup>۲</sup> به عنوان شتاب دهنده و از متیل‌اتیل کتون پرواکساید<sup>۳</sup> به عنوان سخت کننده استفاده شد. پارچه شیشه نوع E با نوع بافت حصیری از شرکت لینتکس<sup>۴</sup> چین به عنوان تقویت کننده تهیه گردید که چگالی سطحی آن، ۲۰۰ g/m<sup>2</sup> و ضخامت آن، ۰/۲ mm است. نانوصفحات گرافن از شرکت تحقیقات نانومواد یواس<sup>۵</sup> با مشخصات درصد خلوص ۹۹/۵ درصد، ۳ الی ۶ لایه و سطح ویژه ۵۰۰-۱۲۰۰ m<sup>2</sup>/g تهیه شدند. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM<sup>۶</sup>) نانوصفحات گرافن را نشان می‌دهد.

به منظور توزیع بهتر فاز نانو در زمینه اپوکسی و همچنین برهمکنش مطلوب بین آن‌ها از عامل جفت‌کننده سیلانی تحت عنوان تری آمینوپروپیل تری متوکسی سیلان<sup>۷</sup> استفاده شد که فرمول مولکولی این ترکیب به صورت C<sub>6</sub>H<sub>17</sub>NO<sub>3</sub>Si و وزن مولکولی آن، ۱۷۹/۲۹ گرم بر مول است. شکل ۲ ساختار شیمیایی عامل سیلانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب سیلانی مورد استفاده دارای گروه آمینی در انتهای خود بوده که با زمینه در حضور هاردنر آمینی قادر به برهمکنش و ایجاد اتصال عرضی است.

برای توزیع نانوذرات در زمینه وینیل استر از دستگاه همزن مکانیکی اورهد مدل SDS-11D ساخت شرکت فینتک<sup>۸</sup> کره جنوبی و سپس به منظور پخش نانوذرات در زمینه وینیل استر از دستگاه آلتراسونیک هموزنایزر ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر (فاپن<sup>۹</sup>) استفاده شد.

## ۲-۲- اصلاح سطحی نانوذرات

اصلاح سطحی گرافن باعث افزایش پراکندگی نانوصفحات گرافن و جلوگیری از کلوخ شدن در کامپوزیت‌های زمینه

<sup>1</sup> Bisphenol A  
<sup>2</sup> Dimethylanil  
<sup>3</sup> Methyl ethyl Ketone Peroxide  
<sup>4</sup> Lintex International Co  
<sup>5</sup> US Research Nanomaterial  
<sup>6</sup> Scanning Electron Microscope  
<sup>7</sup> 3-Aminopropyltrimethoxysilane  
<sup>8</sup> Fintek  
<sup>9</sup> Fapan

از دستگاه طیف‌سنج مدل جاسکو<sup>۱</sup> plus-460 در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۴۰۰۰-۴۰۰ با حساسیت  $\text{cm}^{-1}$  ۴ استفاده شد. برای مطالعه سطح شکست نمونه‌ها و همچنین پی بردن به مکانیزم‌های موجود در بهبود خواص مکانیکی، میکروسکوپ SEM مدل سایرون<sup>۲</sup> AIS-2100 بکار گرفته شد.

### ۲-۵- آزمایش مکانیکی

به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای، دستگاه کوپا<sup>۳</sup> ده تنی بکار رفت. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، طبق استاندارد ASTM D790 [۱۷]، نمونه‌ها با ابعاد  $130 \times 25 \text{ mm}^2$  و در فاصله ۱۶ میلی‌متری بین دو تکیه‌گاه تحت بارگذاری با نرخ بارگذاری  $1/5 \text{ mm/min}$  در دمای محیط قرار گرفتند. نمودار نیروی خمشی برحسب جابجایی محوری توسط دستگاه رسم شد و از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه یونیورسال هانسفیلد<sup>۴</sup> مدل H25K با ظرفیت  $2/5$  تن در دمای محیط مطابق با استاندارد ASTM D3039 [۱۸] انجام و مقادیر استحکام کششی و مدول الاستیسیته محاسبه شد. حداقل تکرار انجام آزمایش-های خمش سه نقطه‌ای و کشش برای هر گروه از نمونه‌ها ۳ بار بود که داده‌های گزارش شده میانگین آزمایش‌های انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

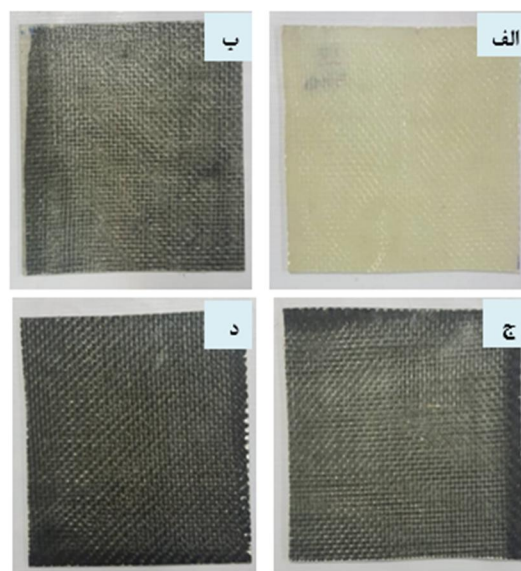
#### ۳-۱- نتیجه FTIR حاصل از مشخصه‌یابی گرافن اصلاح

##### سطحی شده

جهت افزایش چسبندگی و توزیع مناسب‌تر گرافن در زمینه کامپوزیت (رزین وینیل‌استر) از عملیات اصلاح سطحی استفاده شد. شکل ۴ نمودار FTIR گرافن را در دو حالت عامل‌دار و بدون عامل نمایش می‌دهد. پیک‌هایی که با فلش سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند، حاکی از عامل‌دار شدن سطح گرافن می‌باشند. پیک با عدد موج  $677 \text{ cm}^{-1}$ ، نشان‌دهنده پیوند گروه OH و حضور CH خارج از صفحه روی سطح گرافن است؛ همچنین پیک‌های با اعداد موج  $1024 \text{ cm}^{-1}$

#### ۲-۳- ساخت نمونه‌ها

ساخت نانوکامپوزیت زمینه وینیل‌استری حاوی تقویت‌کننده-های الیاف شیشه و گرافن به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد. برای این منظور، در ابتدا مخلوط‌هایی از رزین با درصد‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ از گرافن اصلاح شده به ترتیب به مدت ۱۵ و ۶۰ دقیقه تحت عملیات هم‌زدن مکانیکی و آلتراسونیک (با توان ۲۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز) قرار گرفتند. پس از پراکنده شدن گرافن اصلاح شده در زمینه، سه جز دیگر شامل، کبالت ۱٪، متیل اتیل کتون پروکساید ۵۰٪ و دی متیل آنیلین به ترتیب با نسبت‌های وزنی ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۰۷ درصد به مخلوط اضافه و به مدت ۵ دقیقه هم‌زده شد. در ادامه، ۶ لایه پارچه الیاف شیشه با مخلوط حاصل آغشته شد و در نهایت نانوکامپوزیت ساخته شده در دمای اتاق به مدت ۱ هفته تحت پخت قرار گرفت. شکل ۳ تصویر صفحات کامپوزیتی ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر صفحات نانوکامپوزیت ساخته شده حاوی (الف) ۰ wt.% (ب) ۰/۲ wt.% (ج) ۰/۴ wt.% و (د) ۰/۶ wt.% گرافن

#### ۲-۴- بررسی میکروسکوپی و مشخصه‌یابی نمونه‌ها

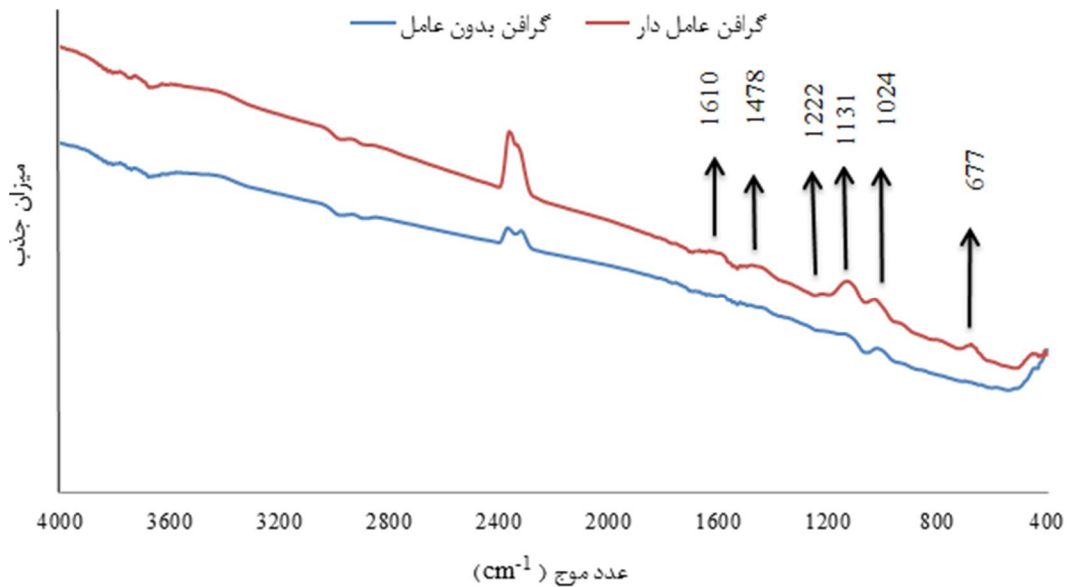
به منظور بررسی گروه‌های عاملی روی سطح گرافن و همچنین واکنش‌های احتمالی بین نانوذرات و عامل سیلانی

<sup>1</sup> Jasco

<sup>2</sup> Siron

<sup>3</sup> Koopa

<sup>4</sup> Hounsfield



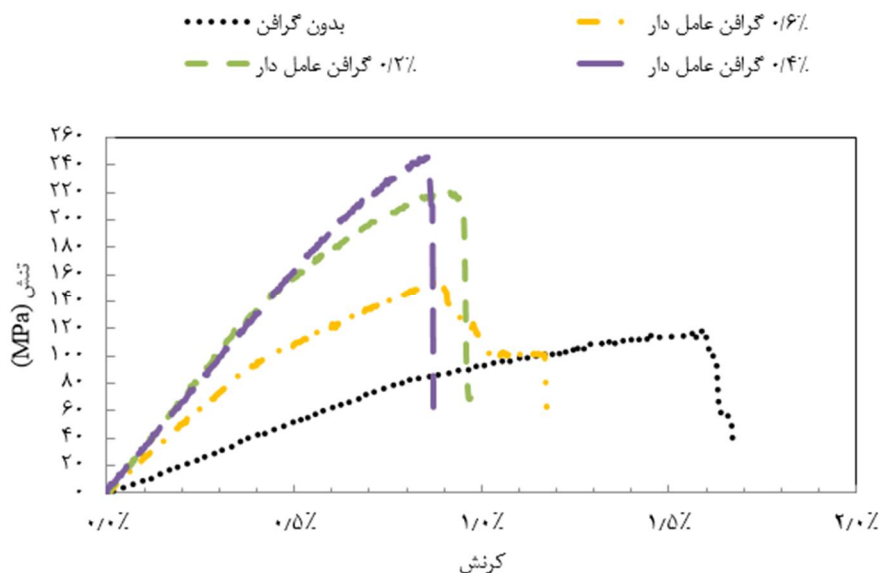
شکل ۴- نمودار FTIR گرافن عامل دار و گرافن بدون عامل

درصد وزنی گرافن اصلاح شده کاهش یافت که دلیل آن می‌تواند کلوخه شدن صفحات گرافن در زمینه باشد. با افزایش مقدار نانوذرات تا مقدار مشخصی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت به دلیل تأثیر مثبت حداکثری نانوذرات که در توضیح تصاویر میکروسکوپی ذکر می‌شود، افزایش می‌یابد و از مقدار بهینه به بعد کاهش در خواص رخ می‌دهد. از آنجایی که نانوذرات نسبت سطح به حجم بالایی دارند، از انرژی سطحی بالایی برخوردار بوده و از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار هستند. این مساله برای نانوذره‌ای مانند گرافن که ساختار لایه‌ای داشته و جز نانوذراتی است که سطح ویژه بیشتری دارد، بسیار قابل توجه است. با افزایش مقدار گرافن در زمینه، فاصله آن‌ها از یکدیگر کاهش یافته و از این رو برای کاهش آنتالپی سیستم که یک عمل خود به خودی است، نانوصفحات گرافن به یکدیگر چسبیده و تشکیل کلوخه‌های گرافن را می‌دهند که در نتیجه با کاهش مقدار سطح آزاد در سیستم انرژی سیستم کاهش یافته و سیستم به حالت تعادل نزدیک‌تر می‌گردد؛ اما این به هم چسبیدن ذرات، سبب ایجاد کلوخه‌هایی درشت می‌شود که می‌توانند همچون نقاط تمرکز تنش در زمینه یا در فصل مشترک زمینه و الیاف عمل نموده و سبب تخریب سریعتر و راحت‌تر قطعه شوند [۲۰]. برای جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات عملیات التراسونیک انجام شد، اما از آنجایی که پس از این

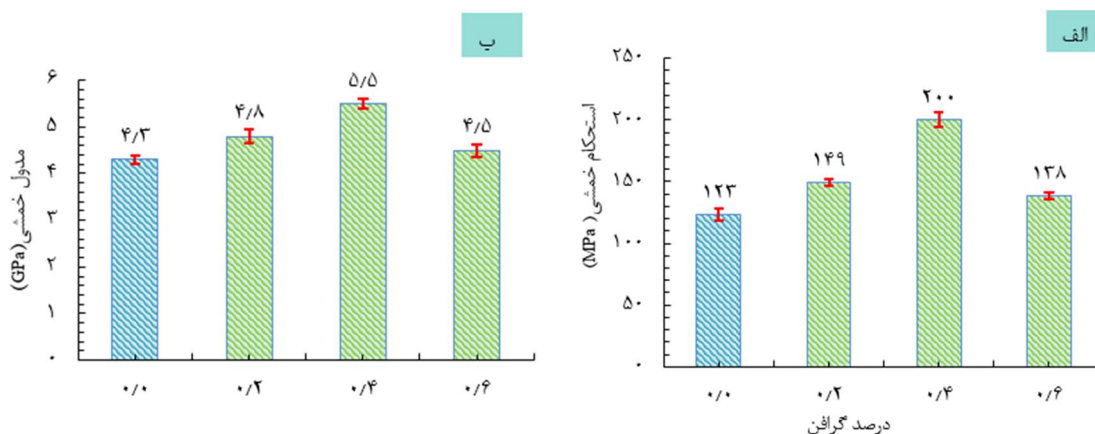
$1131 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب ارتعاشات ناشی از پیوندهای Si-O-Si و Si-O-C را نشان می‌دهند. وجود این پیک‌ها پیوند شیمیایی گرافن با عامل سیلانی و عامل‌دار شدن گرافن را اثبات می‌کنند. البته پیک  $1024 \text{ cm}^{-1}$  در نمودار مربوط به گرافن بدون عامل نیز وجود دارد که ناشی از ارتعاشات پیوند C-C است. پیک کوچک  $1222 \text{ cm}^{-1}$ ، نشان‌دهنده ارتعاشات کششی پیوند C-N است. دو پیک پهن در اعداد موج  $1478 \text{ cm}^{-1}$  و  $1610 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب حضور گروه‌های  $\text{CH}_2$  و  $\text{CH}_3$  و ارتعاشات خمشی پیوند  $\text{NH}_2$  را در صفحات گرافنی نشان می‌دهند [۱۹].

### ۳-۲- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون خمش و نمودارهای استحکام و مدول خمشی کامپوزیت وینیل استر حاوی تقویت‌کننده‌های الیاف شیشه و درصد‌های متفاوت گرافن را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۶- الف، استحکام خمشی از  $123 \text{ MPa}$  برای نمونه فاقد گرافن به‌طور پیوسته با افزایش درصد گرافن عامل‌دار زیاد شد و در  $0/4$  درصد وزنی به حدود  $200 \text{ MPa}$  رسید که برابر با  $63\%$  بهبود در استحکام خمشی است. با افزایش مقدار گرافن اصلاح شده به  $0/6$  درصد وزنی، استحکام خمشی به  $138 \text{ MPa}$  رسید که به میزان  $31\%$  نسبت به نمونه شامل  $0/4$



شکل ۵- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون خمش نمونه‌ها



شکل ۶- تأثیر گرافن بر خواص خمشی نانوکامپوزیت وینیل‌استر/ الیاف شیشه (الف) استحکام خمشی و (ب) مدول خمشی

خمشی به ۴/۵ GPa می‌رسد که به مقدار ۱۸٪ نسبت به نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده کاهش پیدا کرده است.

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح شکست نمونه‌های خمش را نشان می‌دهد. شکل ۷-الف، نمونه بدون گرافن را نشان می‌دهد که در آن سطح الیاف شیشه در این تصویر عاری از پوشش رزین وینیل‌استر است. فلش‌های نارنجی جدایش میان زمینه و الیاف را نشان می‌دهند. به‌طور کلی این تصویر نسبت به شکل ۷-ب که مربوط به نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده است، چسبندگی

عملیات و در حین پخت و ساخت نانوکامپوزیت زمان کافی برای کلوخه شدن وجود دارد، لذا به هم پیوستن صفحات گرافن جهت کاهش انرژی در این زمان برای رزین‌هایی با درصد بالای گرافن راحت‌تر اتفاق می‌افتد.

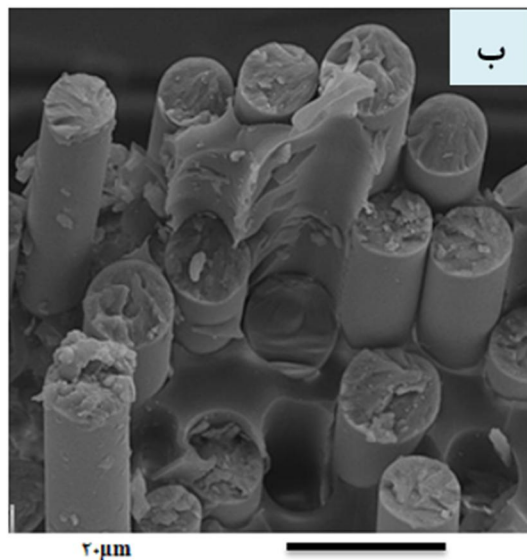
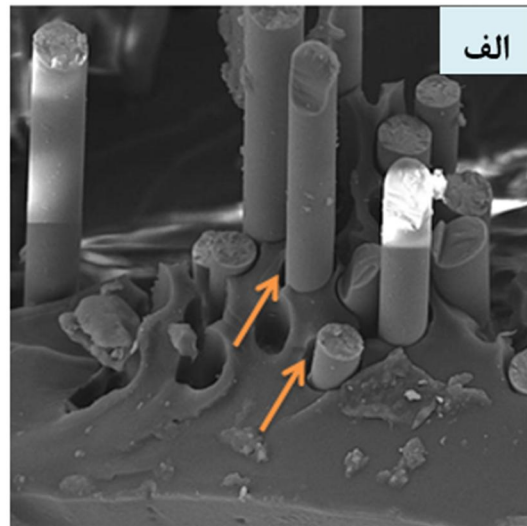
مطابق با شکل ۶-ب با بیشتر شدن درصد گرافن اصلاح شده در زمینه، مدول خمشی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول در ۰/۴ درصد وزنی از گرافن اصلاح شده حاصل می‌شود که برابر با ۵/۵ GPa است و نسبت به نمونه فاقد گرافن با مدول ۴/۳ GPa، ۲۸٪ بهبود نشان می‌دهد. با افزایش بیشتر گرافن عامل‌دار به ۰/۶ درصد وزنی، مدول



پای الیاف فاصله چندانی با آن‌ها ندارند که بیانگر چسبندگی بیشتر الیاف با زمینه است. افزودن گرافن اصلاح سطحی شده، سبب ایجاد فصل مشترک قوی‌تر میان الیاف و زمینه شده و به این صورت انتقال بار از زمینه به الیاف بهتر صورت گرفته و خواص مکانیکی به میزان قابل توجهی بهبود یافته است.

شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده را نشان می‌دهد. این شکل یکی از مکانیزم‌های چقرمه‌سازی را به تصویر می‌کشد که توسط نانوصفحات گرافن ایفا می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود، روی شکل پنج منطقه وجود دارد که نانوصفحات گرافن در آن به صورت ناهمواری‌های سطحی ظاهر شده‌اند. در امتداد تمام این نانوصفحات ترکی در یک جهت دیده می‌شود. ترک اصلی گوشه پایین سمت چپ تصویر حرکت کرده و به مناطق شامل گرافن رسیده است. از آنجایی که استحکام و مدول گرافن بسیار بالا است، لذا رزین اطراف خود را نیز تا حدی مستحکم‌تر می‌کند. این سبب سخت‌تر شدن حرکت ترک و اشاعه آن می‌شود و ترک برای اشاعه به مقدار بیشتری از نیرو نیاز دارد و نهایتاً با دور زدن منطقه تقویت شده با گرافن از آن رد می‌شود و از خود ردی به جای می‌گذارد که به صورت یک خط دیده می‌شود. این خط در واقع یک سطح پله‌ای است که ایجاد شده و برای ایجاد آن به مقدار نیروی خاصی نیاز است. در واقع به دلیل وجود نانوصفحات گرافن این سطوح جدید به وجود آمدند، لذا در غیر این صورت این سطح کاملاً صاف می‌بود؛ بنابراین استفاده از نانوصفحات گرافن به عنوان تقویت‌کننده به این صورت سبب افزایش خواص مکانیکی و نیروی مورد نیاز برای شکست نمونه می‌شود.

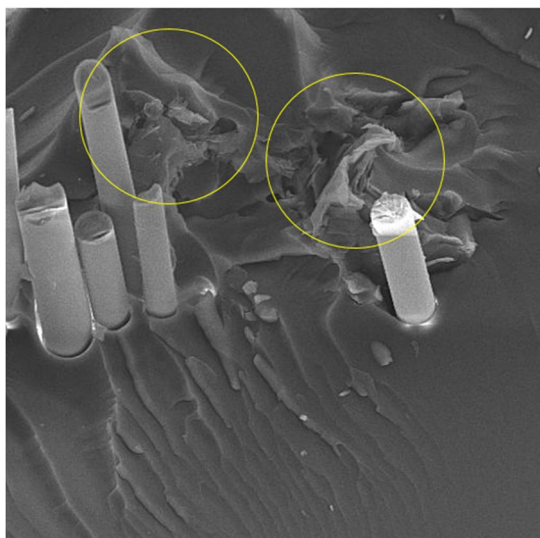
غالباً خواص در جهت خارج از صفحه مانند استحکام خمشی بیشتر توسط زمینه تعیین می‌شوند و خواص در راستای صفحه کامپوزیت را الیاف تقویت‌کننده مورد استفاده در زمینه مشخص می‌نمایند [۲۱، ۲۲]؛ بنابراین از آنجایی که افزودن گرافن اصلاح شده سبب افزایش خواص زمینه می‌شود، بهبود خواص خمشی به مقدار قابل توجهی که در این پژوهش رخ داده است، امری منطقی و قابل توجیه است. به علاوه از آنجایی که گرافن اصلاح شده چسبندگی الیاف با زمینه را بیشتر می‌کند، لذا نقش الیاف در افزایش خواص



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نانو کامپوزیت وینیل استر / الیاف شیشه / گرافن (الف) نمونه بدون گرافن و (ب) نمونه شامل ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده

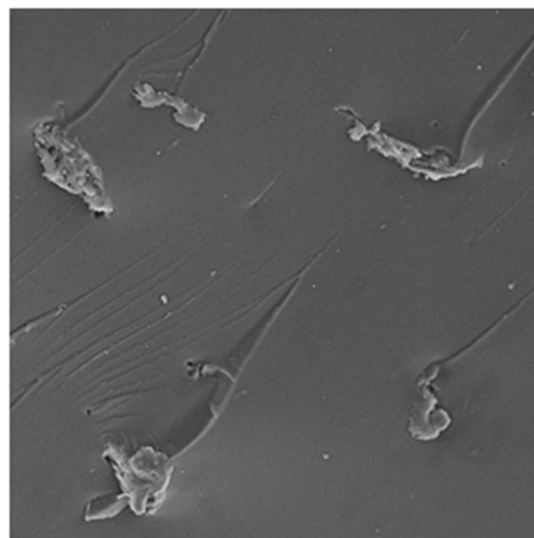
کمتری را به زمینه نشان می‌دهد. یکی دیگر از تفاوت‌های میان این دو تصویر، در اندازه الیاف خارج شده از سطح است، طول الیاف بیرون زده در شکل ۷-الف، بیشتر از شکل ۷-ب است و این نشان می‌دهد که الیاف در شکل ۷-الف راحت‌تر از زمینه خارج شده‌اند. در شکل ۷-ب مناطق زیادی از چسبندگی مناسب وجود دارد و همچنین رزین موجود در





20 μm

شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نانوکامپوزیت وینیل استر/ الیاف شیشه/ گرافن نمونه شامل ۰/۶ درصد وزنی گرافن اصلاح شده.



۵ μm

شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت وینیل استر تقویت شده با الیاف شیشه و ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده

تجمع آن‌ها به عنوان عیب شناخته شده و تمرکز تنش را به دنبال دارد که عامل اصلی کاهش خواص مکانیکی است.

### ۳-۳- نتایج آزمون کشش

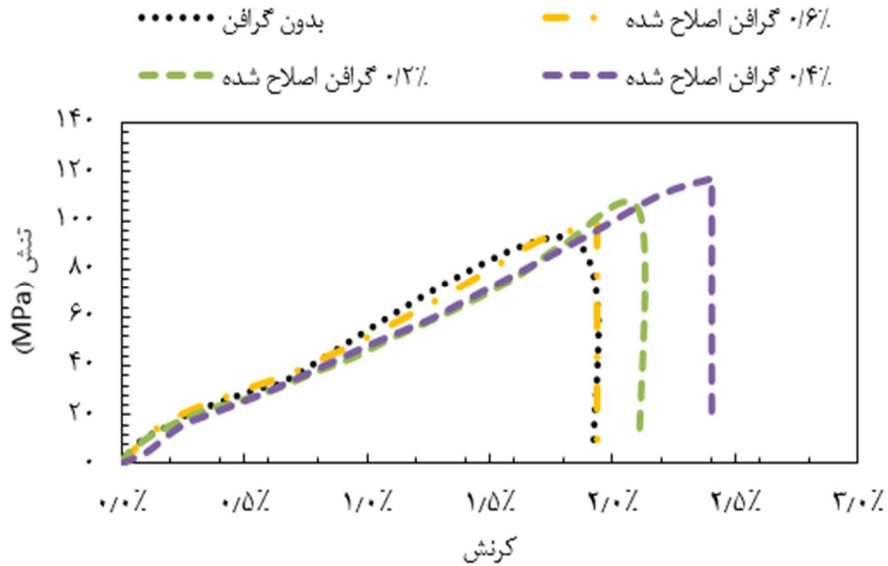
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون کشش و اثر درصدهای گوناگون گرافن بر خواص کششی کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، افزایش گرافن تا ۰/۴ درصد وزنی باعث افزایش کرنش و تنش وارده بر نمونه شده و بعد آن کاهش خواص را به دنبال دارد. بیشترین درصد کرنش (۲/۴٪) مربوط به نمونه حاوی ۰/۴٪ گرافن است که این ویژگی در شرایط یکسان برای نمونه بدون گرافن، ۱/۹٪ است؛ بنابراین افزایش گرافن تا ۰/۴٪ باعث افزایش میزان کرنش شده و سپس کاهش کرنش را به دنبال دارد.

مطابق با شکل ۱۱-الف با افزایش مقدار گرافن اصلاح شده تا ۰/۴ درصد وزنی، استحکام کششی از ۹۳ MPa برای کامپوزیت فاقد گرافن به ۱۱۷/۵ MPa برای نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده افزایش می‌یابد و پس از آن کم می‌شود که میزان ۲۶٪ بهبود در این ویژگی نسبت به کامپوزیت فاقد گرافن حاصل شده است. دلیل

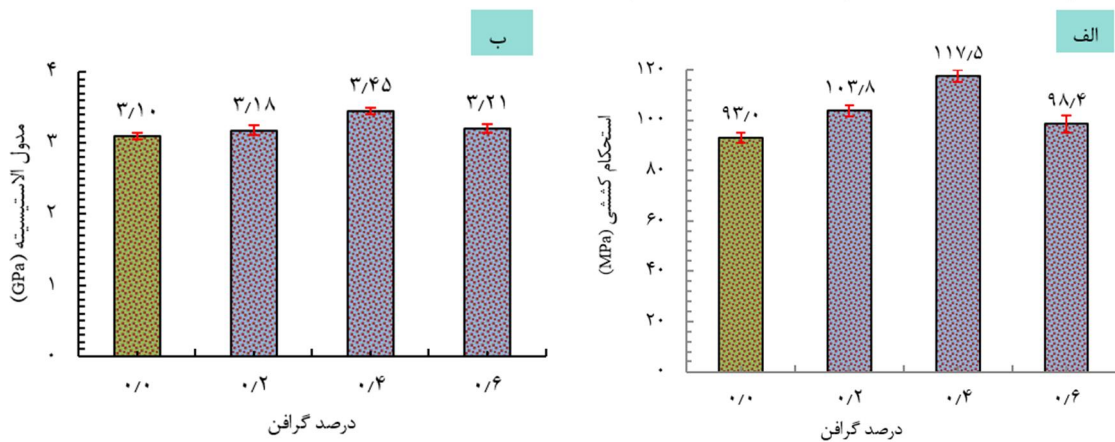
خمشی بیشتر می‌شود. در این حالت رفتار خمشی نه تنها به دلیل افزایش خواص زمینه بهبود پیدا کرده، بلکه به دلیل چسبندگی بیشتر الیاف و زمینه نیز افزایش چشم‌گیری را نشان داده است.

کوارزیمین و همکارانش [۲۳]، در یک مقاله مروری به بررسی مکانیزم‌های افزایش چقرمگی در نانوکامپوزیت‌ها پرداختند. مطابق با این تحقیق برای گرافن، انحراف ترک تنها مکانیزم موجود در افزایش چقرمگی نمی‌باشد. علی‌رغم انحراف ترک، سطح شکست نمونه‌ها دارای سطوح و رخ‌های شکست کوچکی است که به دلیل رشد و اشاعه ترک در سطوحی با ارتفاع متفاوت ایجاد می‌شوند. به‌طور کلی ترک می‌تواند منحرف شود، یا این که شاخه‌ای گردد، همچنین سبب از هم جدا شدن لایه‌های گرافن شود و یا این که از فصل مشترک میان گرافن و زمینه عبور نماید و یا قفل شود.

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح شکست نمونه خمش حاوی ۰/۶ درصد وزنی گرافن اصلاح شده را نشان می‌دهد که به صورت کلوخه درآمدند. همان‌طور که اشاره شد، انرژی سطحی و سطح ویژه بالای گرافن در درصدهای بالا تمایل آن به کلوخگی را افزایش داده و محل



شکل ۱۰- نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش نمونه‌ها



شکل ۱۱- تأثیر گرافن بر رفتار کششی کامپوزیت وینیل استر/ الیاف شیشه. (الف) استحکام کششی و (ب) مدول الاستیسیته

بسزایی دارد. مواد سفت‌تر مدول الاستیسیته بالاتری دارند. از آنجایی که در ناحیه الاستیک (پیش از تسلیم نمونه) فاصله میان اتم‌ها در اثر اعمال نیرو تغییر یافته و تغییر حجم ایجاد می‌شود، از این رو پیوند قوی‌تر اتم‌ها با یکدیگر سبب مقاومت بیشتر ماده در برابر کش آمدن یا افزایش حجم شده و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. به همین صورت ایجاد پیوندهای ضعیف نیز سبب کاهش مدول می‌شود. به عبارت دیگر، برای کامپوزیت‌های گرماسخت (ترموست) که رفتاری مشابه با سرامیک‌ها دارند، اغلب منحنی تنش کرنش بصورت خطی دیده می‌شود. در این ناحیه ماده دچار تغییر حجم

کاهش استحکام با افزایش مقدار گرافن اصلاح شده به ۰/۶ درصد وزنی، کلوخه شدن صفحات گرافن است.

شکل ۱۱-ب اثر گرافن بر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. افزودن گرافن اصلاح شده تأثیر زیادی روی افزایش مدول نداشت و تنها ۱۰/۷٪ بهبود با افزودن ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده حاصل شد که مدول از ۳/۱ GPa برای کامپوزیت فاقد گرافن به ۳/۴ GPa برای نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده رسید.

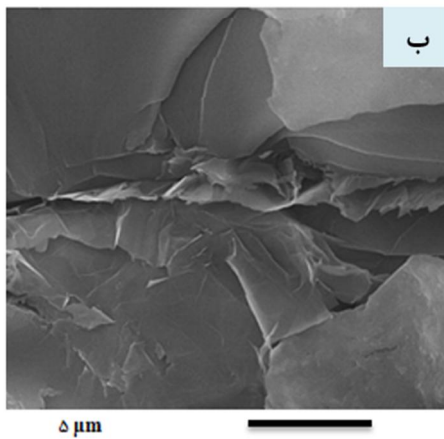
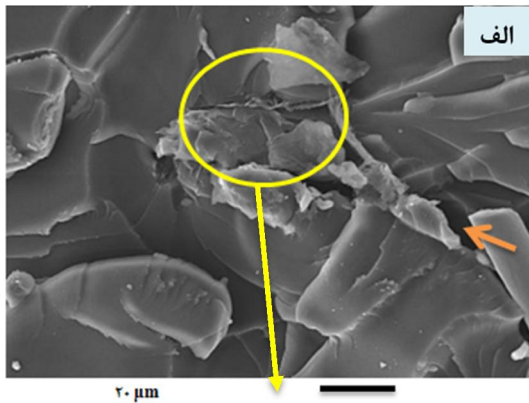
مدول یانگ خاصیتی از ماده است که به ذات ماده باز می‌گردد، لذا نوع پیوند میان اتم‌های ماده بر مقدار آن تأثیر

آمده از تحقیق بولوت، مشخص است که میزان افزایش خواص در پژوهش حاضر، بیشتر از افزایش خواص در تحقیق مذکور است؛ همچنین بیشترین بهبود خواص خمشی در تحقیق بولوت در نانوکامپوزیت حاوی ۰/۱٪ گرافن حاصل شد، اما در تحقیق حاضر، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴٪ گرافن عامل‌دار بهترین خواص خمشی را نشان داد. با توجه به این که بولوت از گرافن بدون عامل برای تقویت کامپوزیت خود استفاده کرد، می‌توان نتیجه گرفت که عامل‌دار نبودن گرافن و عدم استفاده از عملیات التراسونیک جهت افزایش پراکندگی گرافن سبب کاهش خواص مکانیکی در مقادیر بالاتر از ۰/۱٪ وزنی شده است؛ همچنین افزایش خواص خمشی به دست آمده از افزودن گرافن بدون عامل در تحقیق بولوت به میزان افزایش خواص حاصل از افزودن گرافن عامل‌دار در تحقیق حاضر نمی‌باشد؛ لذا پژوهش بولوت تأییدکننده افت شدید خواص خمشی است که با افزودن گرافن بدون عامل به میزان ۰/۴٪ وزنی در پژوهش حاضر به دست آمد.

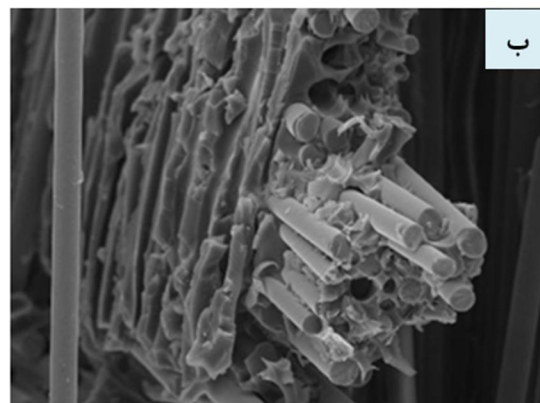
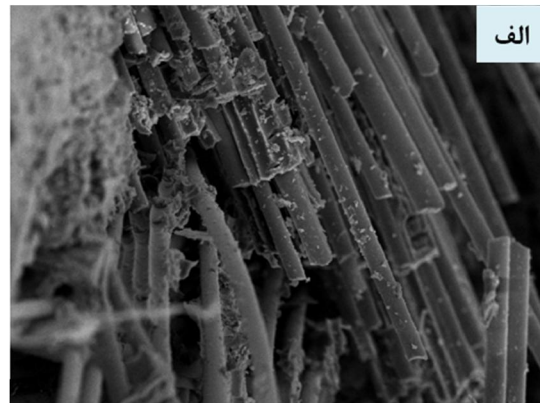
شکل ۱۲ تصاویر SEM سطح شکست نمونه فاقد گرافن و نمونه‌های حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن را نشان می‌دهد. شکل ۱۲-الف که مربوط به نمونه فاقد گرافن است، نشان‌دهنده الیاف با سطح تمیزتر و چسبندگی کمتر پلیمر به آن‌ها است. همانطور که مشاهده می‌شود، در اطراف الیاف حجم پایینی از رزین وجود داشته و فاصله میان الیاف و رزین زیاد بوده و جدایش چشم‌گیری رخ داده است. این فاصله در اطراف همه‌ی الیاف شیشه به چشم می‌خورد. ترک در مقایسه با نمونه شامل گرافن اصلاح شده (شکل ۹-ب) راحت‌تر از میان فصل‌مشترک زمینه و الیاف اشاعه یافته و بار کمتری از زمینه به الیاف به دلیل چسبندگی نامناسب میان آن‌ها منتقل شده است؛ همچنین به نظر می‌رسد که طول الیاف بیرون کشیده شده در این حالت نسبت به شکل ۹-ب بیشتر است و این نیز دلیلی بر چسبندگی نامناسب الیاف و زمینه در کامپوزیت فاقد گرافن اصلاح شده است [۲۷]. در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که چسبندگی در این شکل افزایش یافته و فاصله میان الیاف و زمینه کمتر شده است و همچنین به نظر می‌رسد که طول الیاف بیرون کشیده شده نیز کوتاه‌تر است.

می‌شود که این تغییر حجم در اثر افزایش فاصله بین اتم‌ها رخ می‌دهد. در کامپوزیت‌ها که از مواد و اتم‌های بسیاری تشکیل شده‌اند، وجود پیوند قوی میان اتم‌ها سبب مقاومت در برابر کش آمدن نمونه می‌گردد که متعاقباً افزایش سفتی یا همان مدول الاستیسیته ماده را در پی دارد. عامل‌دار کردن سبب افزایش تعداد پیوندهای قوی شده و از این رو سفتی ماده را بیشتر می‌کند. از آنجایی که مدول گرافن بدون نقص بسیار بالا و در حد ۱ TPa است، انتظار بر این است تا مدول نانوکامپوزیت حاصل نیز افزایش یابد، اما ایجاد فصل مشترک ضعیف یکی از دلایل اصلی عدم بهبود مدول است؛ لذا از علل اصلاح سطح گرافن بهبود میزان برهمکنش است. در رابطه با کاهش مدول با افزایش مقدار گرافن اصلاح شده به بیش از مقدار بهینه (۰/۴ درصد وزنی) نیز می‌توان تشکیل کلوخه‌های گرافنی که پیوند میان آن‌ها از نوع واندروالس بوده را از علل نرم‌تر شدن ماده در مکان‌های ایجاد کلوخه و کاهش مدول الاستیسیته دانست. شن و همکارانش [۲۴] نیز، علت افزایش خواص مکانیکی و مدول نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن را پراکندگی مناسب گرافن در زمینه و بالا بودن مدول و نسبت ابعادی گرافن و همچنین چسبندگی مناسب این نانوذره با زمینه و محدودتر شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری در اثر اعمال نیرو بیان نمودند. در پژوهشی دیگر، عمار و همکارانش [۲۵]، تأثیر افزودن اکسید گرافن را بر زمینه اپوکسی بررسی نمودند. از آنجایی که اکسید گرافن به واسطه داشتن گروه‌های عاملی بیشتر روی سطح، فعال‌تر است، لذا برهمکنش بهتری با زمینه داشته و پیوند محکمی میان آن و زمینه ایجاد می‌گردد. در پژوهش مذکور، دلیل افزایش مدول با افزودن اکسید گرافن، بالا بودن مدول و استحکام اکسید گرافن و ایجاد پیوند قوی میان آن با زمینه ذکر شد.

در پژوهشی، بولوت [۲۶] به بررسی تأثیر افزودن گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت پرداخته است. نتایج پژوهش نشان داد که گرافن بیشترین اثر خود را در درصد وزنی ۰/۱ نشان می‌دهد که در این درصد، استحکام کششی، مدول ینگ، استحکام خمشی، مدول خمشی و استحکام ضربه به ترتیب ۱۳/۲، ۲۱/۴، ۳۰/۲، ۶۷/۹ و ۱۷/۲ درصد نسبت به نمونه فاقد گرافن افزایش یافتند. با مقایسه نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۱۰ و نتایج به دست



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت وینیل استر تقویت شده با الیاف شیشه و ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده (الف) نحوه قفل شدن ترک و (ب) تصویر بزرگنمایی شده از ناحیه نشان داده شده با دایره زرد



شکل ۱۲- تصاویر SEM از سطح شکست کامپوزیت وینیل استر حاوی تقویت کننده های الیاف شیشه و گرافن (الف) نمونه فاقد گرافن و (ب) نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شده

کامپوزیت حاوی نانوصفحات گرافن نشان می دهد. به طور کلی تقویت زمینه توسط نانوصفحات گرافن که به طور مناسب در همه جا پراکنده شده اند، سبب ایجاد تعداد بسیاری از پدیده هایی همچون قفل شدن ترک و یا انحراف آن می شود که به طور کلی استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت را به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد [۲۰].

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر اصلاح سطحی و افزودن نانوصفحات گرافن بر رفتار خمشی و کششی کامپوزیت وینیل استر/الیاف شیشه بررسی شد. بدین منظور نانوصفحات گرافن با استفاده از عامل سیلانی تری آمینو پروپیل تری متوکسی سیلان اصلاح

شکل ۱۳ یکی از پدیده هایی را نشان می دهد که سبب افزایش چقرمگی و استحکام نانوکامپوزیت شده است. فلش زرد، جهت اشاعه ترک را مشخص می کند. واضح است که با نزدیک شدن ترک به منطقه نشان داده شده با دایره زرد، عرض آن کاهش می یابد و در مرکز دایره نوک ترک کاملاً کور می شود. در این منطقه رزین وینیل استر به خوبی با گرافن اصلاح شده، تقویت شده و مانع از عبور ترک و اشاعه آن شده است، لذا به نیرو و انرژی بیشتری برای عبور از این منطقه لازم است. شکل ۱۳-ب تصویر بزرگنمایی شده از دایره زرد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود صفحات گرافن به خوبی با زمینه برهمکنش و پیوند داده اند. تصویر مذکور نمایش خوبی از قفل شدن ترک در مقیاس میکرومتری را در

عامل‌دار بودن گرافن است که سبب ایجاد فصل مشترک قوی‌تر میان الیاف و وینیل‌استر شده است.

۶- افزایش بیش از حد بهینه گرافن اصلاح شده در کامپوزیت به دلیل وقوع پدیده کلوخه شدن سبب کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

## ۵- مراجع

- [1] Abdollahi Azghan M, Asghari F and Eslami Farsani R (2017) Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum-epoxy/basalt fibers laminate composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 4(1): 15-24
- [2] Kumar P, Irudhayam J, Naviin D. and Development (2012) a review on importance and recent applications of polymer composites in orthopaedics. *International Journal of Engineering Research and Development* 5(2): 40-43.
- [3] Abadie M, Mekhissi K and Burchill P (2002) Effects of processing conditions on the curing of a vinyl ester resin. *Appl Polym* 84(6): 1146-1154.
- [4] Van Tonder T (2014) Adhesive properties of thermoset fibre metal laminates. Thesis University of Cape Town.
- [5] Hosseini Abbandanak SN, Aghamohammadi H, Akbarzadeh E, Shabani N, Eslami-Farsani R, Kangooie M, Siadati MH (2019) Morphological /Saxs/Waxs studies on the electrochemical synthesis of graphene nanoplatelets. *Ceramics International* 45(16): 20882-20890
- [6] Hosseini Abbandanak SH, Abdollahi Azghan M, Eslami-Farsani R (2019) Investigation the interface and charpy impact behavior of fiber metal laminates containing graphene nanoplatelets and glass kevlar hybrid fibers. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 6(2):10-19
- [7] Huang, X, Qi X, Boey F. and Zhang H (2012) Graphene-based composites. *Chemical Society Reviews* 41(2): 666-686.
- [8] Arkles B (2003) Silane coupling agents: Connecting across boundaries. Morrisville: Gelest: 9-12.
- [9] Zahari W, Badri, R, Ardyananta H, Kurniawan D, Nor F (2015) Mechanical properties and water absorption behavior of Polypropylene/Ijuk fiber composite by using silane treatment. *Procedia Manuf* 2: 573-578.
- [10] Rafiee M. A, Rafiee J, Srivastava I, Wang Z, Song H, Yu Z, Koratkar N (2010) Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small* 6(2): 179-183.

سطحی شدند. سپس نانوکامپوزیت‌هایی با درصد‌های وزنی متفاوت (۰/۱۰، ۰/۲۰، ۰/۴ و ۰/۶) از گرافن اصلاح سطحی شده ساخته شد و با کامپوزیت فاقد گرافن مقایسه شدند. نتایج نهایی به شرح زیر هستند:

آنالیز FTIR حضور گروه‌های عاملی فعال روی سطح پودر گرافن و موفقیت در اصلاح شدن گرافن را نشان داد.

۱- نتایج آزمون کشش بیانگر آن است که به ترتیب

۲۶/۳ و ۱۰/۷ درصد افزایش در استحکام کششی و

مدول الاستیسیته برای نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴

درصد وزنی گرافن اصلاح شده نسبت به کامپوزیت

فاقد گرافن به‌دست آمده است.

۲- افزودن گرافن اصلاح شده به کامپوزیت وینیل‌استر/

الیاف شیشه، سبب بهبود خواص خمشی می‌شود.

نانوکامپوزیت تقویت‌شده با ۰/۴ درصد وزنی گرافن

اصلاح شده به ترتیب ۶۳ و ۲۸ درصد افزایش در

استحکام خمشی و مدول خمشی را در مقایسه با

نمونه فاقد گرافن از خود نشان داد.

۳- گرافن اصلاح سطحی شده پراکندگی و چسبندگی

مناسبی با زمینه و الیاف داشته و لذا عامل‌دار

کردن گرافن سبب افزایش کارایی آن در بهبود

خواص می‌شود.

۴- مطابق با تصاویر SEM، افزایش در خواص خمشی و

کششی ناشی از چسبندگی بهتر وینیل‌استر و

الیاف شیشه و همچنین مکانیزم‌های چقرمه‌سازی

گرافن اصلاح‌شده در زمینه است. اصلاح سطحی،

سبب برهمکنش بیشتر گرافن با زمینه و در نتیجه

باعث پدیده قفل شدن ترک توسط گرافن

می‌شود که یکی از مکانیزم‌های اصلی چقرمه‌سازی

است.

۵- مطابق تصاویر میکروسکوپی، میزان چسبندگی الیاف

به زمینه و همچنین میزان بیرون کشیده شدن

الیاف برای نمونه بهینه (حاوی ۰/۴ درصد وزنی

گرافن اصلاح شده) نسبت به نمونه فاقد گرافن

کاملاً تغییر یافته است. در این پژوهش هیچ

تغییری روی الیاف برای ساخت نمونه‌ها صورت

نگرفته، بنابراین افزایش چسبندگی و کاهش طول

الیاف بیرون کشیده شده در نمونه بهینه، ناشی از

- [20] Hosseini Abbandanak SN, Abdollahi Azghan M, Zamani A, Fallahnejad M, Eslami-Farsani R, Siadati SM (2020) Effect of graphene on the interfacial and mechanical properties of hybrid glass/kevlar fiber metal laminates. *J Ind Text*.
- [21] Davim JP, Reis P (2003) Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) using design experiments. *Compos Struct* 59(4): 481-487.
- [22] Choi N, Kinloch A, Williams J (1999) Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber/epoxy composites under Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Loading. *J Compos Mater* 33(1): 73-100.
- [23] Quaresimin M, Schulte K, Zappalorto M, Chandrasekaran S (2016) Toughening mechanisms in polymer nanocomposites: From experiments to modeling. *Compos Sci Tech* 123:187-204.
- [24] Shen M, Kuan C, Kuan H, Chen C, Wang J, Yip M, Chiang C (2013) Preparation, characterization, thermal, and flame-retardant properties of green silicon-containing epoxy/functionalized graphene nanosheets composites. *J Nanomater* 2013: 1-10
- [25] Ammar A, Al Enizi A, Al Maadeed M, Karim A (2016) Influence of graphene oxide on mechanical, morphological, barrier, and electrical properties of polymer membranes. *Arab J Chem* 9(2): 274-286.
- [26] Bulut E (2017) Mechanical characterization of basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets. *Compos Part B-Eng* (122): 71-78.
- [27] Siddiqui A, Sham M, Tang B, Munir A, Kim J (2009) Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube-epoxy nanocomposite coating. *Compos Part A-Appl S* 40(10): 1606-1614.
- [11] Ahmadi-Moghadam B, Sharafimasoooleh M and Shadlou S, Taheri F (2015) Effect of functionalization of graphene nanoplatelets on the mechanical response of graphene/epoxy composites. *Mater Design* 66: 142-149.
- [12] Liao W, Tien H, Hsiao S, Li S, Wang Y, Huang Y, Yang S, Ma CM, Wu Y (2013) Effects of multiwalled carbon nanotubes functionalization on the morphology and mechanical and thermal properties of carbon fiber/vinyl ester composites. *ACS Appl Mater Interfaces* 5(9): 3975-3982.
- [13] Pathak A, Borah M, Gupta A, Yokozeki T, Dhakate S (2016) Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Compos Sci Technol* 135: 28-38.
- [۱۴] حسینی آبنندانک سن، سیادت‌تی سم، اسلامی فارسانی ر (۱۳۹۷) اثر اصلاح سطحی گرافن بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت. *مجله علوم و تکنولوژی پلیمر* ۱۷۰-۱۵۵: ۲(۳۱).
- [15] Zaman I, Phan T, Kuan H, Meng Q, La LTB, Luong L, Youssf O, Ma J (2011) Epoxy/Graphene platelets nanocomposites with two levels of interface strength. *Polymer* 52(7): 1603-1611.
- [16] <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/3767>
- [17] ASTM D 790 (2000) Standard test methods for flexural properties of un-reinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Annual Book of ASTM Standard.
- [18] ASTM D3039 (2008) standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Annual Book of ASTM International.
- [19] Coates J (2006) Interpretation of infrared spectra a practical approach. *encyclopedia of analytical chemistry: Applications, theory and instrumentation*.