

## بررسی تاثیر نانو لوله های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه پلیمری

چکیده: در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانولوله های کربنی بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت بررسی شد. در گام نخست و به منظور برهم کنش مطلوب تر نانولوله ها با زمینه اپوکسی، اصلاح سطحی آنها صورت گرفت. نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده در درصدهای وزنی مختلف نسبت به زمینه (۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪) انجام و در ادامه مخلوط های حاصله به عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت های تقویت شده با الیاف بازالت استفاده شد. به منظور بررسی اثر افزودن نانولوله های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت ها آزمونهای کشش و خمش سه نقطه ای روی آنها صورت پذیرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که اولاً بیشترین میزان اثربخشی نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده بر استحکام کششی و خمشی در کامپوزیت های حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شده است. ثانیاً تأثیر مثبت نانولوله های کربنی در یک مقدار مشخص بر استحکام خمشی بیشتر از تأثیر همان میزان نانولوله کربنی بر بهبود استحکام کششی بود. ثالثاً روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام کششی و خمشی نمونه ها بود، بیشترین میزان جذب انرژی در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی با بهبود ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد حاصل شد.

واژه های راهنما: نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، کامپوزیت های زمینه پلیمری.

رضا حاجی زاده اصل  
دانشجوی دکتری

مهدي يار محمد  
توسکي \*

استاديار،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران  
جنوب، تهران

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

Reza hajizadeh  
Asl  
PhD Student

Mehdi  
Yarmohammad  
Tooski \*  
Assistant Professor,  
Department of  
Mechanical  
Engineering, Islamic  
Azad University South  
Tehran branch, Tehran

## Investigation of carbon nanotubes on mechanical properties of polymer composites

**Abstract:** In the present study, the effect of adding carbon nanotubes on the tensile and flexural behavior of basalt fiber reinforced epoxy composites was investigated. In the first step, in order to better interact the nanotubes with the epoxy surface, their surface modification was performed. Surface-modified carbon nanotubes were applied at different weight percentages relative to the matrix (0.1%, 0.3%, and 0.5%) and then the resulting mixtures were used as a matrix in the fabrication of basalt fiber-reinforced composites. In order to investigate the effect of adding carbon nanotubes on the mechanical behavior of composites, three-point tensile and flexural tests were performed on them. The results show that, firstly, the highest effectiveness of surface-modified carbon nanotubes on tensile and flexural strength is obtained in composites containing 0.3% by weight. Secondly, the positive effect of carbon nanotubes in a certain amount on flexural strength is greater than the effect of the same amount on the improvement of tensile strength. Energy was obtained in a sample containing 0.3% by weight.

**Keywords:** Nanocomposites, Carbon nanotube, Polymer Composite.

## ۱- مقدمه

بالا، و خواص الکتریکی و شیمیایی مناسب مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۷]. نانو لوله های کربنی به دلیل دارا بودن سطح ویژه بسیار بالا و نسبت طول به قطر بالا تمایل زیادی به آگلومره<sup>۳</sup> شدن دارند که باعث افزایش قابلیت آنها برای بهبود خواص مکانیکی می شود [۸].

اسلامی فارسانی و همکاران نمونه های صفحات مشبک کامپوزیتی زمینه پلیمری ساخته و اثر افزودن نانولوله های کربنی چندجداره در درصد های وزنی مختلف (۰، ۱، ۲/۵ و ۴ درصد) بر رفتار ضربه سرعت بالای این کامپوزیت ها را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، ابتدا نانولوله های کربنی چندجداره با استفاده از همزن مکانیکی و امواج اولتراسونیک درون زمینه پلیمری توزیع شدند. سپس صفحات مشبک کامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله های کربنی با هندسه شش ضلعی با استفاده از روش لایه گذاری دستی ساخته شدند و آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات به وسیله پرتابه استوانه ای با دماغه مخروطی صورت پذیرفت. حضور شبکه ریب های تقویت شده با الیاف کربن موجب محدود شدن سطح شکست و افزایش انرژی جذب شده می گردند. بهترین رفتار ضربه سرعت بالا برای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی حاصل می شود. در این حالت، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله های کربنی، افزایش یافت. همچنین به ازای افزودن نانولوله های کربنی چندجداره، میزان سطح تخریب صفحات مشبک کامپوزیتی کاهش یافت.

رزین وینیل استر به علت خواص خوب مکانیکی و مقاومت شیمیایی بالا، در بسیاری از ساختارهای کامپوزیتی و صنایع مختلف استفاده می شود. یکی از مهمترین اهداف اضافه کردن تقویت کننده های نانومتری به زمینه های پلیمری افزایش مدول الاستیک و استحکام آنها می باشد. نانولوله کربنی به دلیل ساختار صلب و نسبت منظری می تواند به طور موثری در افزایش مدول الاستیک و سفتی زمینه پلیمری عمل کند. به طوری که همزمان مدول الاستیک، استحکام کششی و میزان چقرمگی نانو کامپوزیت حاصل افزایش یابد [۹]. اصلی ترین مکانیزم شکست در کامپوزیت های لایه ای، تورق و یا لایه لایه شدن است. افزودن نانولوله های کربنی منجر به افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت می شود و در نتیجه، مقاومت در برابر لایه لایه شدن کامپوزیت و شکست زمینه افزایش می یابد به همین دلیل است که پس از انجام آزمون ضربه سرعت بالا در صفحات مشبک کامپوزیتی حاوی نانولوله های کربنی میزان لایه لایه شدن در کامپوزیت کاهش یافته که در نتیجه منجر به کاهش سطح مقطع شکست می شود [۱۰].

در سال های اخیر، افزودن نانو فیبرها به عنوان تقویت کننده ثانویه در ساختار کامپوزیت های الیافی با زمینه پلیمری توسط محققان زیادی انجام شده است. این دسته از کامپوزیت ها که دارای دو نوع تقویت کننده در مقیاس های میکرونی و نانو هستند تحت عنوان کامپوزیت های چندمقیاسی<sup>۱</sup> نامیده می شوند [۱]، [۲].

در بین نانو کامپوزیت ها بیشترین توجه به نانو کامپوزیت های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانو کامپوزیت های پلیمری، خواص بی نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانو کامپوزیت های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. در مواد مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف، الیاف آرامید (کولار)، کربن و شیشه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. مواد مرکب ساخته شده با الیاف کولار هر چند با مقاومت و چقرمگی بالا یکی از بهترین سیستم های حفاظت بالستیک را نسبت به وزن ارائه می دهند، ولیکن قیمت بالای آنها استفاده آنها را محدود می کند [۳]. دلیل دوم توسعه نانو کامپوزیت های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی است. استحکام و خواص الکتریکی نانولوله های کربنی به طور قابل ملاحظه ای با نانولایه های گرافیت و دیگر مواد پرکننده تفاوت دارد. این دسته از نانو کامپوزیت ها به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند، به طور گسترده ای در صنایع خودرو، هوا و فضا و بسته بندی مواد غذایی گسترش یافته اند. از دیگر کاربردهای نانو کامپوزیت های پلیمری، پوشش های مقاوم به سایش، پوشش های مقاوم به خوردگی، پلاستیک های رسانا، حسگرها، آسترهای مقاوم در دمای بالا و غشاهای جداسازی گازها و سیالات نفتی می باشد [۴]. می توان به نوعی غشاء نانو کامپوزیتی ساخته شده از یک نوع پلیمر و نانولایه های سیلیکا اشاره کرد که توسط محققان دانشگاه کارولینای شمالی ساخته شده است [۵].

با افزودن عوامل تقویت کننده از جمله نانو ذرات آلی و غیر آلی مانند نانو لوله های کربنی تک جداره و چند جداره، فیبرهای کربنی، نانو ذرات سیلیکا، نانو ذرات اکسید مس، نانو ذرات اکسید آلومینیوم و همچنین نانو ذرات اکسید آهن، عملکرد رزین ها را بهینه سازی کرد. با تقویت رزین ها توسط نانو مواد ذکر شده، خواص مکانیکی این رزین ها مانند چقرمگی شکست، مدول کشش و مدول خمش بهبود می یابد [۶].

در میان نانو فیبرها نانو لوله های کربنی چند جداره<sup>۲</sup> به علت دارا بودن خواص منحصر بفردی هم چون نسبت استحکام به وزن

<sup>۱</sup> Multiwall carbon nanotubes<sup>۲</sup> Agglomerate<sup>۱</sup> Multiscale composites

چندجداره، استحکام خمشی کامپوزیت حاوی ۵ لایه الیاف شیشه را ۵۰ درصد افزایش می دهد که این به دلیل توزیع خوب نانولوله کربنی در زمینه اپوکسی است، این در حالی است که افزودن ۱ و ۱/۵٪ حجمی نانولوله کربنی باعث کاهش استحکام خمشی شده است. هم چنین برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن افزودن ۱ درصد حجمی نانولوله کربنی منجر به افزایش ۳۴ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شده است [۱۵].

ژانگ و همکاران 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 می شود. در این تحقیق نشان داده شده است که نانولوله کربنی منجر به بهبود انتقال تنش بین زمینه و فاز تقویت کننده الیاف می شود و در هنگام فرآیند شکست با بیرون زدگی و گسیختگی نانولوله کربنی، جوانه زنی و اشاعه ترک به تاخیر می افتد. با افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله های کربنی منجر به افزایش ۶ درصد سرعت حد بالستیک کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه می گردد و با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله های کربنی، سرعت حد بالستیک کاهش می یابد که ناشی از آگلومره شدن نانولوله های کربنی است [۱۶].

دهقان و همکاران به تحقیق درباره نانولوله کربنی چند دیواره به عنوان عامل تقویت کننده جهت بهبود رفتار کششی رزین وینیل استر پرداختند و نقش نانو لوله های کربنی بر رفتار تغییر شکل و شکست نانو کامپوزیت با استفاده از نمونه های کششی تقویت شده با ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی نانو لوله های کربنی طبق استاندارد ASTM D638 را بررسی نمودند. جهت تعیین نقش نانو لوله های کربنی بر روی مکانیزم تغییر شکل و شکست وینیل استر، سطح شکست نمونه ها را مورد ارزیابی میکروسکوپی بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می دهد که مدول یانگ، استحکام تسلیم و چقرمگی شکست وینیل استر وابسته به درصد نانولوله کربنی می باشد. بطوری که با افزودن ۱٪ وزنی نانو لوله کربنی به رزین وینیل استر، حدود ۸۲٪ کاهش استحکام کششی، ۵۳/۱۶٪ افزایش مدول یانگ و ۳۰٪ کاهش تافنس شکست ایجاد شد [۱۷]. ارزیابی میکروسکوپی بیان گر وابستگی رفتار شکست نانو کامپوزیت ساخته شده به حضور و میزان این نانو لوله ها بوده و هم چنین به رابطه ی منطقی بین خواص و آرایش سطح شکست نانو کامپوزیت اشاره دارد. ضمناً علاوه بر تشکیل حفرات و پدیده ی بهم پیوستن حفرات، مکانیزم های پل زدن، شکست، جدایش و بیرون آمدن نانو لوله ها و فیبری شدن رزین وینیل استر در سطوح شکست این نانو کامپوزیت ها به وضوح مشاهده شد [۱۷].

کیو و همکاران به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی بدون عامل و عامل دار بر خواص کششی کامپوزیت های اپوکسی الیاف شیشه پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی عامل دار موجب افزایش ۱۴ درصدی استحکام کششی و ۲۰ درصدی مدول کششی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی می شود. در حالی که افزودن نانولوله کربنی بدون عامل منجر به افزایش ۸ درصدی مدول کششی و کاهش استحکام کششی به دلیل وقوع آگلومراسیون نانولوله های کربنی شده است [۱۱].

آویلز و همکارانش به بررسی فرآیند های اکسیداسیون و سیلانیزه کردن نانو لوله های کربنی چند دیواره برای کامپوزیت های نانو لوله کربنی چند دیواره وینیل استر پرداختند. کامپوزیت های پلیمری از نانو لوله های کربنی چند دیواره ی عامل دار و رزین وینیل استر ساخته شدند و آزمون فشار روی آن ها انجام شد و به این نتیجه رسیدند که بهبود خواص مکانیکی در فشار به دلیل کاهش طول نانو لوله های کربنی بعد از اکسیداسیون آن ها و فرآیندهای ساخت کامپوزیت، محدود خواهد شد و این امر با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد بررسی قرار گرفت [۱۲].

افزودن تنها ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی آمین دار منجر به افزایش ۲۵ درصدی استحکام خمشی و ۱۱ درصدی مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه می شود و به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی کامپوزیت ۱۵ درصد و مدول خمشی کامپوزیت ۱۰ درصد افزایش می یابد. در این تحقیق مقدار مطلوب نانولوله کربنی که بیشترین افزایش را در خواص مکانیکی ایجاد می نماید مقدار ۳ درصد وزنی گزارش شده است [۱۳] انرژی جذب شده برای صفحات فاقد نانولوله های کربنی و تقویت شده با ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی به ترتیب برابر با ۷۷/۴۲ و ۸۸/۳۹ ژول گزارش گردیده است. در حقیقت به ازای افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی افزایش ۲۲ درصدی در انرژی جذب شده مشاهده می شود. خواص ضربه سرعت بالا در مواد کامپوزیتی شدیداً وابسته به چقرمگی شکست، مدول الاستیک، استحکام کششی و کرنش شکست الیاف و زمینه، به علاوه فصل مشترک بین زمینه و الیاف، هستند. افزایش میزان انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک به ازای افزودن نانولوله های کربنی، ناشی از بهبود فصل مشترک بین زمینه و الیاف است [۱۴].

دالینا و همکاران به بررسی اثر افزودن نانولوله های کربنی در درصدهای حجمی مختلف (۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۱/۵) بر خواص خمشی کامپوزیت های اپوکسی-الیاف کربن و اپوکسی-الیاف شیشه ساخته شده به روش لایه گذاری دستی<sup>۱</sup>، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی

<sup>۱</sup> Hand lay-up method

مشبک کامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی با هندسه شش ضلعی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند و آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات به وسیله پرتابه استوانه‌ای با دماغه مخروطی صورت پذیرفت. نتایج تجربی نشان داد که حضور شبکه ریب‌های تقویت‌شده با الیاف کربن موجب محدود شدن سطح شکست و افزایش انرژی جذب شده می‌گردند. بهترین رفتار ضربه سرعت بالا برای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی حاصل می‌شود. در این حالت، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش یافت [۱۹]، [۲۰].

در تحقیق دیگری به بررسی افزودن نانولوله‌های کربنی که تحت عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلانی قرار گرفته اند، بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت پرداخته و نشان داده شد 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 [۹].

بر این اساس، نانوکامپوزیت‌هایی با شش درصد وزنی مختلف از نانوفیبر ساخته شد و نمونه‌های مربوطه تحت آزمون کشش قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله کربنی در درصد‌های پایین، تأثیر مثبت بر خواص مکانیکی پلیمر وینیل استر دارد به طوری که در ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چند جداره بهترین خواص مکانیکی حاصل گردید. در این حالت چقرمگی ماده ۵۲ درصد، استحکام کششی ۲۳ درصد و مدول الاستیک ۱۴ درصد افزایش یافت. به منظور تایید نتایج آزمایشگاهی و بررسی جامع نقش نانولوله کربنی در رفتار رزین وینیل استر، به وسیله میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی عکس برداری شد و مهمترین مکانیزم‌های شکست مورد بحث و بررسی قرار گرفت. هم‌چنین جهت ارائه یک مدل تئوری مناسب برای پیش بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت، نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های تئوری موجود مقایسه گردید و یک ضریب تصحیح جدید بر اساس تئوری هرسچ و نتایج آزمایشگاهی جهت کاربردهای صنعتی آینده ارائه شد. در این پژوهش در ابتدا ۶ درصد وزنی نانو کامپوزیت حاوی نانولوله کربنی ساخته شده است. سپس آزمون کشش بر روی نانو کامپوزیت‌ها انجام گرفته است. استحکام نهایی، مدول الاستیک و چقرمگی نانو کامپوزیت‌ها محاسبه گردیده است. در ادامه تئوری‌های برای محاسبه مدول الاستیک و مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده است [۹].

استان و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهای تزریق، نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلیمری پلی‌پروپیلن/نانولوله کربنی پرداختند. آن‌ها دمای مذاب و فشار تزریق را به عنوان پارامترهای تزریق و نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله کربنی را به عنوان دو پارامتر دیگر در نظر گرفتند و تأثیر این پارامترها را بر روی خواص مکانیکی شامل مدول یانگ، استحکام نهایی، کرنش نهایی، تنش در نقطه شکست و کرنش در نقطه شکست در سه نرخ کرنش متفاوت مطابق روش تاگوجی بررسی کردند. در تحقیق آنها، درصد‌های وزنی ۱، ۳ و ۵ به عنوان درصد‌های نانولوله کربنی در نظر گرفته شد. مطابق نتایج تحقیق آنها، درصد وزنی بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام، ۵٪ بوده است درحالی‌که ۱٪ وزنی نانولوله بهینه‌ترین حالت برای رسیدن به بیشترین کرنش بوده است [۱۸].

اینام و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی دوجداره در درصد‌های وزنی خیلی کم (۰/۲۵، ۰/۰۵، ۰/۱) بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که افزودن ۰/۵۲ درصد وزنی نانولوله کربنی دوجداره اصلاح شده با عامل  $NH_2$  به کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن، موجب بهبود ۵ درصدی استحکام خمشی و ۳۵ درصدی مدول خمشی کامپوزیت می‌شود [۱۱].

توستسنون و همکارانش به ساخت نانوکامپوزیت وینیل استر/نانولوله‌های کربنی پرداخت و خواص الکتریکی کامپوزیت‌های ساخته شده را بررسی کردند [۱۷].

## ۲- نتایج و بحث

افزودن نانولوله کربنی اصلاح شده با عامل سیلانی<sup>۱</sup> 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 آن است که عملیات سطحی با استفاده از ترکیبات سیلان تأثیر بیشتری بر افزایش خواص نسبت به عملیات اکسیداسیون داشته است نمونه‌های صفحات مشبک کامپوزیتی زمینه پلیمری ساخته و اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در درصد‌های وزنی مختلف (۰، ۰/۱-۰/۲۵-۰/۴) بر رفتار ضربه سرعت بالای این کامپوزیت‌ها را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، ابتدا نانولوله‌های کربنی چندجداره با استفاده از همزن مکانیکی و امواج اولتراسونیک درون زمینه پلیمری توزیع شدند. سپس صفحات

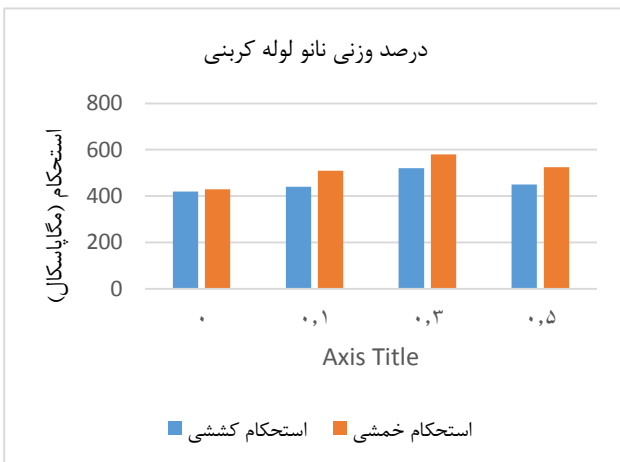
<sup>۱</sup> Silane

نام تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان قرار دادند. نتایج تحقیقات (استحکام و مدول) آزمون کشش و خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت حاوی درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی در جدول ۱ و به صورت نمودار در شکل ۱ و شکل ۲ آورده شده است [۲۳].

جدول ۱ خلاصه نتایج آزمون کشش و خمش سه نقطه ای

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

اثر افزودن نانولوله های کربنی بر تغییرات استحکام کششی و خمشی نمونه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تغییرات استحکام نمونه ها چه خمشی و چه کششی با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی در زمینه ابتدا افزایشی و سپس کاهش می باشد.



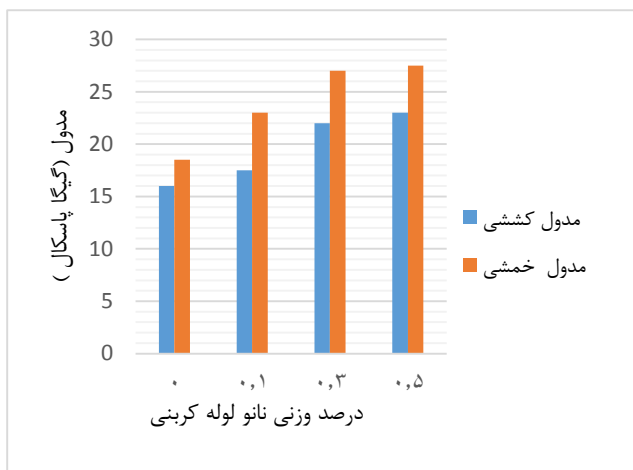
شکل ۱ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر استحکام کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی [۲۳]

بیشترین میزان استحکام مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله است، به طوری که در ارتباط با این نمونه افزایش ۱۹ و ۸۲ درصدی به ترتیب برای استحکام کششی و خمشی در مقایسه با نمونه شاهد بدون افزودن نانولوله کربنی مشاهده می شود. افزایش استحکام کامپوزیت های الیافی ناشی از افزودن نانولوله های کربنی به دلیل بهبود خواص فصل مشترکی بین زمینه و الیاف بازالت بوده که منجر به آن می شود که انتقال بار از زمینه به الیاف به خوبی صورت پذیرد که این امر منجر به افزایش استحکام کامپوزیت نهایی می شود [۲۳].

بعد از انجام آزمایش های مختلف مکانیکی از قبیل کشش، فشار، شارپی، خمش سه نقطه ای، خستگی و سختی، اثر نانو ذرات بر روی خواص مکانیکی پلیمر مورد بررسی قرار داده اند. آزمایش سختی به دلیل غیر مخرب بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته و یک مدل جدید برای مرتبط کردن تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و نیروی بارگذاری به میکروسختی ارائه شده است. تحقیقات جواد پاینده پیمان و همکاران نشان می دهد، نانو خاکرس و نانو کربنات کلسیم که به عنوان پرکننده در درصدهای کم وزنی به مواد پلیمری اضافه می شوند، خواص مکانیکی آن ها را به نحو چشم گیری افزایش می دهند [۲۱]. نتایج تحقیقات بودو و همکاران نشان داد که با رشد نانولوله های کربنی بر روی سطح الیاف شیشه، سرعت حد بالستیک کامپوزیت پلی اتیلن/الیاف شیشه به میزان ۱۱ درصد افزایش می یابد [۳].

هم چنین به منظور پیش بینی رفتار کامپوزیت ها به روش عددی، به دلیل وابستگی تسلیم مواد پلیمری به فشار هیدرواستاتیک، از معیار تسلیم دراکر-پراگر استفاده شده است. محاسبه ضرایب دراکر-پراگر نیاز به آزمایش های پیچیده مکانیکی دارد و اگر تنش تسلیم ماده بالا باشد، عملاً امکان پذیر نیست [۲۲]. به این منظور یک روش بر اساس بهینه سازی جعبه سیاه پر هزینه ارائه شده است که می تواند ضرایب دراکر-پراگر را محاسبه کند. در روش فوق با ایجاد ارتباط بین نرم افزار متلب و کد اباکوس، ضرایب دراکر-پراگر برای کامپوزیت محاسبه شده و اثرات نانو ذرات نیز بر این ضرایب به دست آمده است. هم چنین با این روش توانستند، با انجام تنها آزمایش خمش سه نقطه ای، خواص مکانیکی کامپوزیت از قبیل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم کششی، تنش تسلیم فشاری و نسبت پواسون پلاستیک را محاسبه کنند. پیش بینی حساسیت تنش تسلیم مواد پلیمری نسبت به دما و نرخ کرنش از پارامترهای مهم برای طراحی قطعات مکانیکی تحت بارگذاری ضربه ای می باشد [۱۴]. به این منظور آزمایش های مختلفی در محدوده دمایی ۲۵-۸۵ درجه سانتی گراد و در نرخ های استاتیکی، دینامیکی و ضربه ای با استفاده از دستگاه های سنتام و هاپکینسون فشاری داده اند. در ادامه ضرایب مدل ری-آیرینگ و اشتراکی که در پلیمرهای آمورف و نیمه کریستال استفاده می شود، محاسبه شده است. هم چنین یک مدل جدید به منظور پیش بینی اثر نانو ذرات بر خواص مکانیکی ترموپلاستیک ها ارائه شده است و با ترکیب این مدل با مدل های ری-آیرینگ و اشتراکی دو مدل جدید به منظور پیش بینی استحکام مواد کامپوزیتی در دما، نرخ کرنش و مقدار پرکننده ارائه شده است [۲۱].

اثر افزودن نانولوله های کربنی چندجداره در مقادیر مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری های کششی و خمشی مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور برهم کنش مطلوب تر نانولوله ها با زمینه اپوکسی، ابتدا اصلاح سطحی آن ها به وسیله عامل کوپلینگ ارگانوسیلانی به



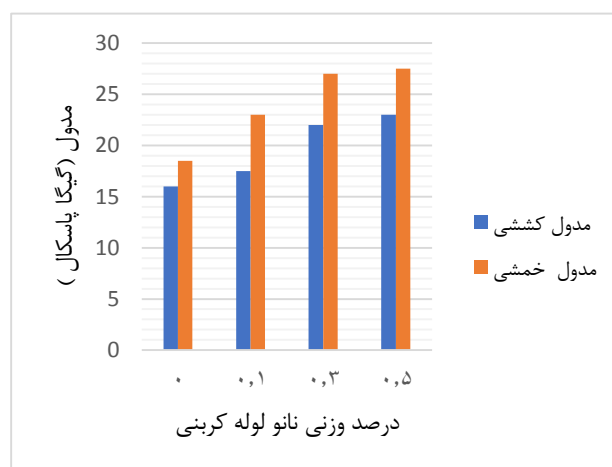
شکل ۳ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه‌های کامپوزیتی [۲۳]

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود به ازای افزودن یک درصد وزنی نانولوله کربنی مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۱۱ و ۵۱ درصد و در ازای افزودن سه درصد وزنی نانولوله کربنی به ترتیب به میزان ۳۰ و ۵۳ درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی افزایش یافته است. در مقادیر بیشتر نانولوله های کربنی (پنج درصد وزنی) مدول کششی و خمشی کامپوزیت به ترتیب به میزان ۴۰ و ۹۳ درصد افزایش یافته است که این روند نشان دهنده کاهش نرخ افزایش مدول در درصد های بالاتر نانولوله های کربنی است. حضور نانولوله های کربنی در زمینه باعث محدود شدن حرکت زنجیره های پلیمری شده که در نتیجه باعث افزایش میزان سفتی ماده می شود. هم چنین به علت مدول بسیار بالای نانولوله های کربنی در مقایسه با زمینه اپوکسی افزایش مدول (کششی و خمشی) نانوکامپوزیت حاصله مورد انتظار است [۲۳].

کاهش نرخ افزایش مدول به ازای افزودن درصد وزنی بیشتر نانولوله کربنی احتمالاً ناشی از آگلومره شدن نانولوله های کربنی درون زمینه بوده که از تاثیرگذاری آنها در بهبود سفتی ماده کاسته است [۲۴].

با افزایش درصد وزنی نانولوله ها از یک درصد به سه درصد افزایش میزان مدول کششی و خمشی به ترتیب ۲۴ و ۷۱ درصد و با افزایش درصد وزنی نانولوله ها از ۰/۳ به ۰/۵ میزان افزایش مدول کششی و خمشی هر دو تنها حدود ۳ درصد بوده است [۲]. اثر نانو لوله های کربنی بر استحکام کشش و مدول یانگ نمونه های وینیل استر تقویت شده با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله های کربنی چند دیواره در شکل ۳ ارائه شده است با افزایش درصد وزنی نانو لوله های کربنی، استحکام کششی و چقرمگی شکست کم شده و مدول یانگ افزایش می یابد. از جمله دلایلی که می توان برای کاهش استحکام و چقرمگی شکست این نانوکامپوزیت ها نام برد، توزیع نامناسب نانولوله ها و تجمع این تقویت کننده ها می باشد. از آن جا که مساحت سطح

در حقیقت حضور نانولوله های کربنی از طریق ایجاد پلی بین الیاف و زمینه باعث درهم گیر شدن و قفل شدن آنها می شود. از سوی دیگر، هنگامی که کامپوزیت تقویت شده با الیاف تحت آزمون مکانیکی قرار می گیرد بخش عمده بار اعمالی روی الیاف متمرکز شده و الیاف به عنوان جز اصلی تحمل کننده بار به شمار می رود. تقویت زمینه توسط نانولوله های کربنی اصلاح سطحی شده باعث آن می شود که تمرکز تنش روی الیاف و همچنین در فصل مشترک الیاف- زمینه کاهش یافته و تنش لازم برای پارگی الیاف و هم چنین جدایش فصل مشترک کاهش یافته و در نتیجه استحکام نمونه افزایش یابد. اما افزودن بیشتر نانولوله های کربنی (۰/۵ درصد وزنی) منجر به کاهش استحکام (کششی و خمشی) کامپوزیت در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی می شود. 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 می توان به کاهش میزان چسبندگی الیاف/زمینه به علت تشکیل یک شبکه غیر پیوسته در زمینه و همچنین تشکیل عیوب و کلوخه های نانولوله ها در درصدهای وزنی بالای نانو فیبر نسبت داد. نتیجه دیگری که با توجه به شکل ۱ مشهود است آن است که تاثیر افزودن نانولوله های کربنی در یک درصد وزنی مشخص بر استحکام خمشی نمونه بیشتر تاثیر آن بر استحکام کششی همان نمونه است. این بدان علت است که تحت آزمون خمش سه نقطه ای، نمونه بالای محور خنثی تحت فشار و زیر آن تحت کشش قرار می گیرد. در این حالت زمینه نقش موثرتری را در مقایسه با زمانی که نمونه تحت کشش تک محوری قرار می گیرد بازی می کند. بنابراین با تقویت زمینه توسط نانولوله های کربنی بهبود بیشتری در استحکام خمشی نمونه در مقایسه با استحکام کششی حاصل می شود تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۲ تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانولوله کربنی در زمینه بر مدول کششی و خمشی نمونه های کامپوزیتی [۲۳]

تزیق بر استحکام کششی و سختی، نمونه‌ها در درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی شامل ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و شرایط فرآیندی مختلف شامل فشار تزیق و دمای تزیق بر پایه‌ی طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری تزیقی، تحت آزمایش کشش و سختی قرار گرفتند. مطابق نتایج به‌دست آمده از آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موثرترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی نمونه‌ها تقریباً به میزان ۳۱٪ و با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی، سختی به میزان ۱۵٪ بهبود یافت. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که درصد وزنی نانولوله کربنی با ۶۸٪ و ۷۶٪ تاثیرگذاری به ترتیب روی داده‌های استحکام کششی و سختی، موثرتر از شرایط فرآیندی می‌باشد [۲۵].

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 بازشدن دهانه ترک در حال رشد شوند. 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 پلزی ترک اطلاق می‌شود که شماتیک آن در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۶].

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 به عنوان مناطق اولیه ایجاد ترک عمل می‌کنند که باعث افت انرژی شکست کامپوزیت می‌شوند [۲۴].

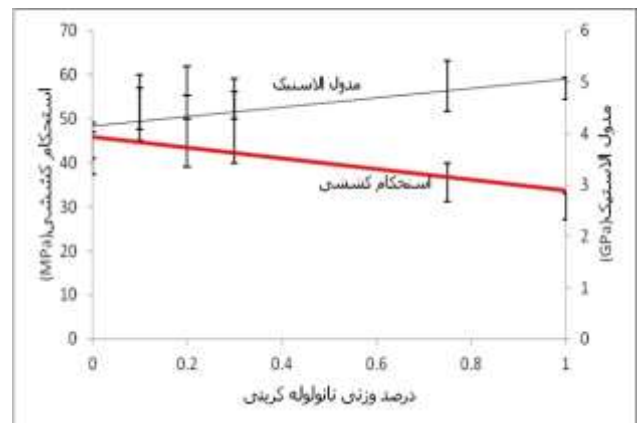
### ۳- نتیجه گیری

نتایج حاصله نشان می‌دهد که اولاً بیشترین میزان اثربخشی نانولوله‌های کربنی اصلاح سطح شده بر استحکام کششی و خمشی در کامپوزیتهای حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شده است. ثانیاً تأثیر مثبت نانولوله‌های کربنی در یک مقدار مشخص بر استحکام خمشی بیشتر از تأثیر همان میزان نانولوله کربنی بر بهبود استحکام کششی بود. ثالثاً روند تغییرات انرژی شکست با افزایش مقدار نانولوله کربنی افزوده شده مشابه استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها بود، بیشترین میزان جذب انرژی در ارتباط با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی با بهبود ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد حاصل شد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی از ۰/۲۵ درصد وزنی استحکام نهایی روند کاهشی پیدا کرده است. بر خلاف مواد معمولی نانو کامپوزیت حاوی

ویژه‌ی نانولوله‌های کربنی چندین برابر بیشتر از عوامل تقویت‌کننده‌ی دیگر می‌باشد، این امر منجر به تمایل بیشتر نانولوله‌ها در چسبیدن به یکدیگر خواهد شد. در اثر تجمع و تشکیل آگلومره، سطوح ویژه‌ی آنها کم می‌شود. از آنجا که انتقال نیرو از طریق فصل مشترک نانو لوله‌ها و رزین انجام می‌شود، با کاهش این سطوح، انتقال تنش افت پیدا کرده و منجر به کاهش استحکام کششی می‌شود. از طرفی این آگلومره‌ها به صورت مراکز تمرکز تنش در نمونه عمل کرده و منجر به کاهش چقرمگی شکست نانو کامپوزیت می‌شوند.

از آنجا که نانو لوله‌های کربنی، مدول الاستیکی برابر با ۹۱۰GPA دارند، با جای‌گیری این مواد در رزین وینیل استر، مدول الاستیک نانو کامپوزیت به شدت افزایش می‌یابد. از آنجا که تعیین مدول الاستیک در تغییر شکل‌هایی در حد الاستیک انجام می‌گیرد، لذا بحث جدایش عوامل تقویت‌کننده از رزین که خود منجر به کاهش عملکرد نانو لوله‌ها بعنوان عوامل تقویت‌کننده و همچنین کاهش استحکام و انرژی شکست می‌شود، مطرح نیست. زیرا در تغییر شکل الاستیک، تنش‌های اعمالی به نمونه در حدی نیستند که بتوانند جدایش نانو لوله‌ها از رزین وینیل استر را موجب شوند. بنابراین طبق قانون مخلوط‌ها، دلیل افزایش مدول یانگ نانو کامپوزیت را می‌توان مدول یانگ بسیار بالای نانو لوله‌های کربنی نام برد. توزیع مناسب نانولوله‌ها نیازمند نیروی برشی بسیار قوی می‌باشد که باید دقت شود به اندازه‌ی کافی و مناسب بوده تا در طول نانو لوله تخریب ایجاد نشود. در اثر استفاده از همزن آلتراسونیک و همزن برشی قوی، سطح نانولوله‌ها دچار تخریب شده و از عیوب ایجاد شده در سطح، ترک‌ها شروع و انتشار می‌یابند.



شکل ۴ اثر نانولوله‌های کربنی بر استحکام کششی و مدول یانگ نمونه‌های وینیل استر تقویت شده [۲۶]

به این منظور، پلیمر پلی‌آمید ۶ و نانولوله‌های کربنی چند دیواره در درصد‌های وزنی مختلف به روش ذوبی در دستگاه اکسترودر دو مارادونه با هم اختلاط پیدا کردند. به‌منظور بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره و شرایط فرآیندی

- [10] Aghamohammadi ,H. Eslami-Farsani, R and Tcharkhtchi, A, The effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior of basalt fibers metal laminates: An experimental study, vol. 98, p. 102538, Apr. doi: 10.1016/J.IJADHADH.2019.102538, ( 2020).
- [11] Q. Zhu. C. Zhang, J. L. Curiel-Sosa, T. Quoc Bui, and X. Xu, Finite element simulation of damage in fiber metal laminates under high velocity impact by projectiles with different shapes, *Compos. Struct.*, vol.214, pp.73–82,doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.009,(2019).
- [12] Avilés, F. Cauich-Rodríguez ,J. V, Rodríguez-González, J. A.and May-Pat ,A., Oxidation and silanization of MWCNTs for MWCNT/vinyl ester composites., *Express Polym. Lett.*, vol. 5, no. 9, ( 2011).
- [13] Zainuddin ,S. Optimization of mechanical and thermo-mechanical properties of epoxy and E-glass/epoxy composites using NH<sub>2</sub>-MWCNTs, acetone solvent and combined dispersion methods, *Compos. Struct.*, vol. 110, pp. 39–50 ,( 2014).
- [14] Ahmadi, H. G, Liaghat, and Charandabi, S. C, High velocity impact on composite sandwich panels with nano-reinforced syntactic foam core, *Thin-Walled Struct.*, vol. 148, p. 106599, (2020).
- [15] Wan Dalina, W. A. D, Mariatti ,M, Ramlee, R, Ishak ,Z. A. M, and Mohamed, A. R, Comparison on the Properties of Glass Fiber/MWCNT/Epoxy and Carbon Fiber/MWCNT/Epoxy Composites, in *Advanced Materials Research*, , vol.58, pp. 32–39, (2014).
- [16] Zhang, J, Ju, S . Jiang ,D, and Peng ,H.-X, Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes, *Compos. Part B Eng.*, vol. 54, pp. 371–376 ,( 2013).
- [17] Sharma ,A. P and S. H. Khan, Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates, *Polym. Test.*, vol. 70, pp. 320–347 ,( 2018).
- [18] Stan ,F, Sandu, L. I, and Fetecau ,C, Effect of processing parameters and strain rate on mechanical properties of carbon nanotube–filled polypropylene nanocomposites, *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 109–122, (2014).
- [19] Kim ,M.-T and Rhee ,K.-Y, Flexural behavior of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites, *Carbon Lett. (Carbon Lett.)*, vol. 12, no. 3, pp. 177–179, (2011).
- نانولوله کربنی با افزایش استحکام نهایی تردتر نشده است و کرنش آن نیز افزایش یافته است.  
مطابق نتایج به دست آمده از آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موثرترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد.
- #### ۴- مراجع
- [1] 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, *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 5, doi: 10.1177/0731684415619493, ( 2016).
- [2] 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, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 3, no. 1, pp. 11–20, (2016).
- [3] Domun ,N, Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices, *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, pp. 497–506 ,( 2019).
- [4] Alikhani ,A and Basaeri, A,The effect of pre-strain and number of SMA wires on the compression properties of glass-epoxy conical grid composites, *Compos. Struct.*, vol. 262, p. 113624, Apr., doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113624.( 2021).
- [5] Thakur, V. K and Thakur, M. K, Eco-friendly Polymer Nanocomposites : Chemistry and Applications, *Adv. Struct. Mater.*, vol. 74, (2015).
- [6] *Handbook of Composites*, (1998).
- [7] Gao, Y ,Toughening and self-healing fiber-reinforced polymer composites using carbon nanotube modified poly (ethylene-co-methacrylic acid) sandwich membrane, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 124, p. 105510, Sep., doi :10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105510. 2019)
- [8] Shokrieh, M. M. Saedi, A, and Chitsazzadeh ,M, Evaluating the effects of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of chopped strand mat *polyester composites*, *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 274–279 ,( 2014).
- [9] Setoodeh, A. Sokhandani, N, and Zebarjad, S. M, Theoretical and experimental study on the effect of multi-walled carbon nanotubes on improving the tensile properties and toughness of Vinyl ester resin, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 5, no. 4, pp. 539–550 , (2019).



- [24] Subagia ,I. D. G. A. Tijing L. D, Kim Y, Kim ,C. S, Vista , P.IV ,F, and Shon ,H. K, Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 611–617, (2014).
- [25] Esmaili, P. Azdast T. Doniavi ,A, Hasanzadeh, R, Mamaghani, S, and Eungkee Lee ,R, Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 2, no. 3, pp. 67–74, (2015).
- [26] Khajeh Arzani H. Kabiri Ataabadi ,A. R, and Chaparian, Y, Investigation of Effect of Structural Parameters on High Velocity Impact Resistance of Fiber Metal Laminates, *Modares Mech. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 1529–1538 ,( 2019).
- [20] Amjadi ,S. Emaminia ,S, Heyat Davudian S, Pourmohammad, S, Hamishehkar ,H, and Roufegarinejad, L, Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles, *Carbohydr. Polym.*, vol. 216, pp. 376–384, Jul., doi: 10.1016/J.CARBPOL.2019.03.062, (2019).
- [21] Payandehpeyman ,J. Majzoobi ,G, and Bagheri ,R, Experimental, analytical and numerical investigation of polypropylene nanocomposites microhardness, *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 3, no. 2, pp. 165–176 ,( 2016).
- [22] Li, X, Zhang. X, Guo, Y, Shim ,V. P. W, Yang J, and Chai ,G. B., Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 114, pp. 32–42, (2018).
- [23] 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, *J. Sci. Teh. Compos.*, vol. 3, pp. 187–194, (2016).