

## Synthesis and Mechanical Properties Investigation of Nano TiO<sub>2</sub>/Glass/Epoxy Hybrid Nanocomposite

Hamid Reza Salehi\* and Manouchehr Salehi

Department of Mechanic Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 159163-4311,  
Tehran, Iran

Received: 18 November 2014, accepted: 14 June 2015

### ABSTRACT

Mechanical properties of epoxy and glass/epoxy filled with 0.25, 0.5 and 1 vol% of TiO<sub>2</sub> nanoparticles have been studied using tensile and three-point bending tests. For the TiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites, the results showed that the strength and stiffness were improved, though the strain at ultimate strength point and breaking strain decreased. Moreover, the hybrid nanocomposites composed of 4 layers of woven E-glass fabric and TiO<sub>2</sub>/epoxy matrix were fabricated and cut on-axis and 45° off-axis by water jet. The results of tensile and three-point bending tests indicated a remarkable improvement in the strength and stiffness that could not be related to the mechanical improvement of the matrix. The samples containing 1 vol% nano TiO<sub>2</sub> were improved relative to samples without the nanoparticles. The tensile strength of the on-axis and off-axis samples containing 1 vol% TiO<sub>2</sub> increased by about 25.9% and 17.9%, in the order given, compared to that of the glass/epoxy specimens. In three-point bending test, the strength of the on-axis and off-axis specimens was improved 26% and 23.2%, respectively. In addition, the tensile stiffness of the on-axis and off-axis samples containing 1 vol% TiO<sub>2</sub> increased, respectively, by about 14.4% and 17.5% compared to that of the glass/epoxy specimens. Also for the same on-axis and off-axis samples the three-point bending stiffness increased about 19.8% and 14.6%, respectively. The whole investigation on the microstructure of the hybrid nanocomposites illustrated that stronger interfaces between the fiber and TiO<sub>2</sub>/epoxy matrix were formed and improvement was noticed on mechanical properties of ternary composite compared to those of the fiber/epoxy composites. The analysis of damage zones of hybrid nanocomposites showed that the surface area of the damaged zone declined considerably due to the brittle behavior of TiO<sub>2</sub>-filled specimens but the area below the stress-strain curve, showing energy absorption during the test, increased.

#### Keywords:

hybrid nanocomposite,  
nanopolymer,  
glass/epoxy composite,  
fiber and matrix interface

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [h.r.salehi@gmail.com](mailto:h.r.salehi@gmail.com)

## ساخت و بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه-اپوکسی تقویت شده با نانوذرات تیتانیم اکسید

حمیدرضا صالحی\*، منوچهر صالحی

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۵۹۱۶۳-۴۳۱۱

دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۲۴

### چکیده

در این پژوهش، خواص مکانیکی نمونه‌های اپوکسی و کامپوزیت شیشه-اپوکسی حاوی درصد‌های مختلف نانوذرات تیتانیم اکسید با آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای، بررسی دقیق شده است. نتایج آزمون‌های کشش، برای نمونه‌های اپوکسی حاوی نانوذرات نشان داد، با اضافه شدن نانوذرات به زمینه، استحکام و مدول یانگ به مقدار محدود افزایش یافته، اما کرنش در نقطه استحکام نهایی و کرنش شکست نمونه‌ها، کاهش یافته است. همچنین، نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی شامل چهارلایه پارچه شیشه E-glass و زمینه اپوکسی حاوی نانوذرات، در دو جهت اصلی و  $45^\circ$  در حالت کشش و خمش بررسی شدند. نتایج آزمون‌ها حاکی از بهبود زیاد خواص مکانیکی شامل استحکام و مدول یانگ در حالت خمشی و کششی است. خواص نمونه دارای ۱٪ نانوذرات نیز بهتر از سایر نمونه‌ها بوده و استحکام کششی آن ۲۵/۹٪ برای نمونه راستای اصلی و ۱۷/۹٪ برای نمونه  $45^\circ$ ، افزایش یافته است. مدول یانگ در حالت کششی نمونه دارای ۱٪ حجمی نانوذرات نیز افزایش ۱۴/۴٪ را برای نمونه در راستای اصلی و ۱۷/۵٪ را برای نمونه در  $45^\circ$  نشان می‌دهد. این افزایش فقط به دلیل بهبود محدود خواص مکانیکی زمینه کامپوزیت نیست. بررسی دقیق ریزساختار نانوکامپوزیت‌های هیبریدی نشان می‌دهد، با افزودن نانوذرات، چسبندگی بین الیاف و ماتریس و سطح تماس الیاف و زمینه، به طور چشمگیر بهبود یافته است. همچنین، بررسی ناحیه شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی نشان‌دهنده کاهش مساحت ناحیه تخریب با افزودن نانوذرات به زمینه بوده و رفتار تمام نمونه‌های شامل نانوذرات، شکننده‌تر از نمونه‌های بدون نانوذرات است. در حالی که مقایسه مدول چقرمگی (مساحت زیر نمودار تنش-کرنش) حاکی از افزایش جذب انرژی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی است.

### واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت هیبریدی،  
نانوپلیمر،  
کامپوزیت شیشه-اپوکسی،  
فصل مشترک الیاف،  
زمینه

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
[h.r.salehi@gmail.com](mailto:h.r.salehi@gmail.com)

## مقدمه

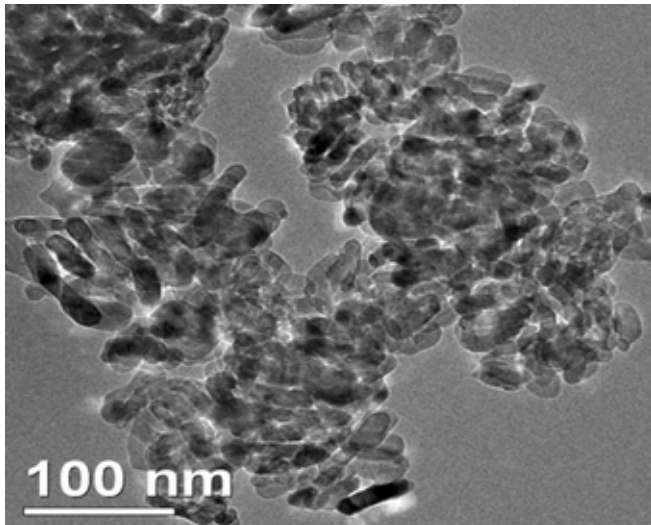
نانوکامپوزیت‌های پلیمری با خواص ویژه مکانیکی، شیمیایی، سایشی و دینامیکی، به طور گسترده در کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند. این نانوکامپوزیت‌ها، اغلب خواص برتری نسبت به نمونه‌های پلیمری بدون افزودنی‌های نانو دارند. به سبب این مزیت‌ها، ساخت و بررسی خواص انواع متفاوت نانوکامپوزیت‌ها با زمینه‌های مختلف و افزودنی‌های متنوع، طی دو دهه اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده است. از مهم‌ترین پلیمرهای استفاده شده در کاربردهای مهندسی، رزین اپوکسی بوده که بدون هیچ نوع افزودنی نیز خواص مطلوبی را در بسیاری از کاربردها ایجاد کرده است. اما، با توجه به اینکه زمینه کامپوزیت باید بارهای مکانیکی و دینامیکی زیادی را تحمل کند، تقویت آن با افزودنی‌های مناسب، ضروری به نظر می‌رسد [۱]. از افزودنی‌های اثرگذار بر خواص مختلف زمینه پلیمری، ذرات هستند. مطالعات نشان داده‌اند، ذرات می‌توانند آثار مؤثری بر استحکام و مدول زمینه ایجاد کنند. اما، اگر به طور مناسب انتخاب نشوند، باعث کاهش مقاومت زمینه در برابر ضربه شده و نمونه‌های نانوکامپوزیتی رفتار شکننده نشان می‌دهند [۲، ۱]. از این رو، ترکیب تقویت‌کننده‌های ذره‌ای و الیافی، می‌تواند باعث رفع این معضلات و تولید نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با خواص بسیار مناسب شوند. پژوهش‌های بسیاری در زمینه استفاده از نانوذرات در زمینه پلیمری انجام شده است. پژوهش‌های گذشته نشان داد، افزودن ۳-۱٪ وزنی نانوذرات خاک‌رس به زمینه اپوکسی، باعث افزایش مدول یانگ و دمای انتقال شیشه‌ای زمینه می‌شود [۳]. همچنین، افزودن نانوذرات اکسید گرافن، باعث بهبود دمای تجزیه گرمایی، دمای انتقال شیشه‌ای و استحکام اپوکسی می‌شود [۴].

پژوهش دیگری نشان می‌دهد، افزودن ۳٪ وزنی نانوذرات سیلیکا، باعث کاهش استحکام و افزایش مدول یانگ پلیمر شده است [۵]. احمدی و همکاران [۶] نشان دادند، افزودن ۳٪ وزنی نانوذرات خاک‌رس، افزون بر بهبود خواص استحکامی، باعث بهبود چقرمگی شکست در زمینه پلی‌استر شده است. بررسی خواص نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه-اپوکسی و نانوذرات خاک‌رس نشان داد، افزودن نانوذرات، باعث بهبود خواص مکانیکی و گرمایی نمونه کامپوزیت شیشه-اپوکسی شده است. این موضوع اثر برهم‌کنش مثبت نانوذرات خاک‌رس و زمینه اپوکسی را نشان می‌دهد [۷].

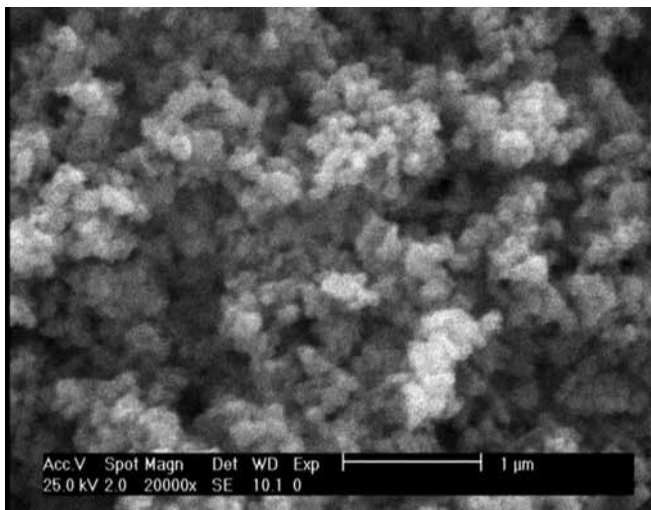
در مطالعه دیگری، خواص مکانیکی و خستگی کامپوزیت شیشه-اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی آن که حاوی ذرات سیلیکای تقویت شده‌اند، بررسی شده است. نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات سیلیکا، باعث بهبود ۵-۴ برابر مقاومت در برابر خستگی و نیز بهبود

محدود خواص مکانیکی شده است [۸].

Zulfi و همکاران [۹] خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه-اپوکسی تقویت شده را با نانوذرات کلسیم کربنات بررسی کردند. نتایج آزمون‌های ضربه و خمش نشان داد، مدول یانگ و دمای تخریب گرمایی ماده نانوکامپوزیتی، افزایش بسیاری را نسبت به نمونه اولیه نشان می‌دهد بررسی خواص نانوکامپوزیتی هیبریدی شیشه-اپوکسی ترکیب شده با نانولوله‌های کربنی، نشان‌دهنده افزایش استحکام و مدول یانگ در حالت کششی و خمشی است. افزودن این نانوذرات باعث افزایش کرنش شکست نمونه می‌شود که در کاربردهایی که به تغییر شکل زیاد تا زمان واماندگی سازه نیاز باشد، مفید هستند [۱۰]. منصوریان و همکاران [۱۱، ۱۲] پایداری گرمایی و استحکام چسبندگی برشی چسب‌های اپوکسی را بررسی کردند. آنها اثر نانوسیلیکا، نانوالومینا و نانولوله‌های کربنی را بر استحکام چسبندگی برشی و پایداری گرمایی اپوکسی بررسی کردند. نتایج آزمون‌های به‌دست آمده نشان‌دهنده بهبود شایان توجه خواص استحکام چسبندگی برشی و بهبود نسبی خواص گرمایی نمونه‌هاست. همان‌طور که از بررسی پژوهش‌های گذشته مشخص است، نانوذرات باعث بهبود خواص مختلف در پلیمرها و کامپوزیت‌های الیافی می‌شوند. این موضوع می‌تواند در جبران بعضی از نقص‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف و بهبود بعضی از خواص دلخواه بسیار مفید باشد. در این مطالعه با توجه به کاربردهای مختلف نانوذرات تیتانیم اکسید به‌عنوان مقاوم‌کننده در برابر تابش خورشید و جذب آب در پلیمرها و محصولاتمانند انواع پوشش‌های ژلی و پوشش‌های رویه مصرفی در صنعت کامپوزیت، به‌ویژه پره‌های توربین‌های بادی مگاواتی و شناورهای دریایی [۱۳]، خواص مکانیکی و اثر نانوذرات تیتانیم اکسید در کامپوزیت شیشه-اپوکسی بررسی شده است. توجه به این نکته ضروری است که به‌کارگیری نادرست نانوذرات در زمینه پلیمری می‌تواند به کاهش خواص کامپوزیت نهایی منجر شود. از این رو در پژوهش حاضر، ابتدا روش مناسبی برای پراکنش مناسب نانوذرات در زمینه پیشنهاد شده است. همچنین، ریزساختار نمونه‌های ساخته شده در حالت‌های مختلف مطالعه شده تا اثر نانوذرات در تغییر ریزساختارها بررسی شود که به درک صحیح تغییر رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های نهایی کمک می‌کند. ابتدا اثر نانوذرات تیتانیم اکسید در تغییر رفتار مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. سپس در دو حالت مختلف بارگذاری در جهت اصلی و راستای ۴۵° نسبت به راستای اصلی، آزمون‌های مکانیکی خمش و کشش انجام گرفته و اثر نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی و دلایل این تغییرات بررسی شده است. مطالعه دقیق رفتارهای مکانیکی نانوکامپوزیت‌های



(الف)



(ب)

شکل ۱- عکس‌های: (الف) TEM و (ب) SEM نانوذرات تیتانیم اکسید.

هیبریدی ساخته شده در بارگذاری‌های مختلف، می‌تواند به درک درستی از اثر نانوذرات منجر شود. ریزساختار و نحوه اتصال در فصل مشترک الیاف و زمینه نیز با دقت به کمک تصاویر SEM بررسی شد.

## تجربی

### مواد

برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی، از رزین اپوکسی EPOLAM 2002 و سخت‌کننده آن ساخت شرکت Axson فرانسه استفاده شد. خواص رزین استفاده شده در **جدول ۱** آمده است. گرانیوی رزین، سخت‌کننده و مخلوط نهایی در دمای محیط طبق داده‌های شرکت سازنده به ترتیب ۱۷۰۰، ۶۰ و ۹۵۰ mPa.s است.

نمونه‌ها با ترکیب ۱۰۰ واحد رزین و ۱۰ واحد سخت‌کننده ساخته شدند. تمام نمونه‌های نانوکامپوزیت‌ها در دمای ۶۰°C و زمان ۱۵ h یکجا و با هم پخت شدند. پارچه شیشه E-glass بافته شده نیز از شرکت Colan استرالیا با وزن سطحی ۱۹۵ g/m<sup>2</sup> و ضخامت خالص ۰/۲۸ mm استفاده شد. همچنین، از نانوذرات تیتانیم اکسید با اندازه ۱۰-۲۵ nm و شکل تقریباً کروی استفاده شد. خواص نانوذرات استفاده شده در **جدول ۲** آمده است. عکس TEM براساس داده‌های شرکت سازنده و SEM نانوذرات استفاده شده نیز در **شکل‌های ۱-الف و ۱-ب** نشان داده شده است.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

#### افزودن نانوذرات تیتانیم اکسید به زمینه اپوکسی

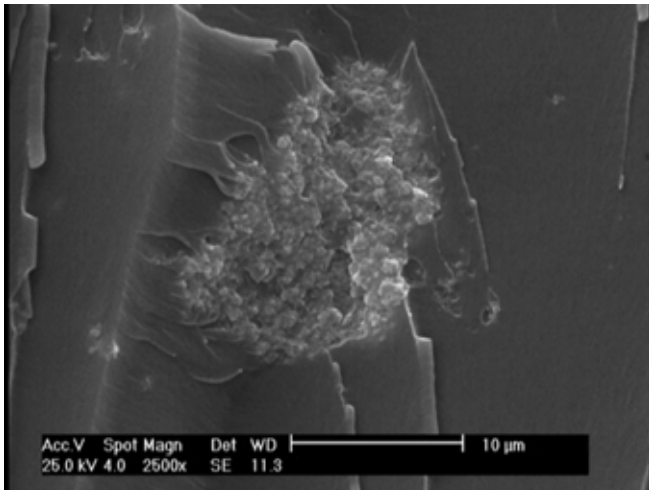
دستیابی به ساختار یکنواخت و پراکنش منظم نانوذرات در زمینه نقش اساسی در بهبود خواص نانوکامپوزیت حاصل نسبت به ماده پایه دارد.

جدول ۱- خواص مکانیکی و گرمایی رزین اپوکسی طبق کاتالوگ شرکت سازنده.

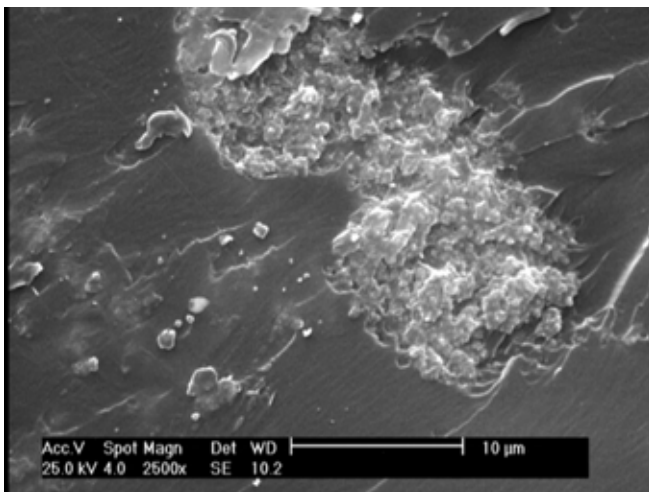
پلیمر ۸۶	کد تجاری	استحکام کششی (MPa)	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (MPa)	دمای انتقال شیشه‌ای (C°)	سختی (Shore D1)
ISO 868 :2003	ISO 527 :1993	ISO 178 :2001	ISO 178 :2001	ISO 178 :2001	ISO 11357 :2002	ISO 868 :2003
رزین اپوکسی	EPOLAM 2002	۶۰	۱۰۰	۲/۷۵۰	۶۵	۸۶

جدول ۲- خواص نانوذرات تیتانیم اکسید.

نانوذرات	اندازه متوسط (nm)	خلوص (%)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	تأمین کننده
TiO <sub>2</sub>	۱۰-۲۵	>۹۹	>۲۴۰	US Research Nanomaterials



(الف)



(ب)

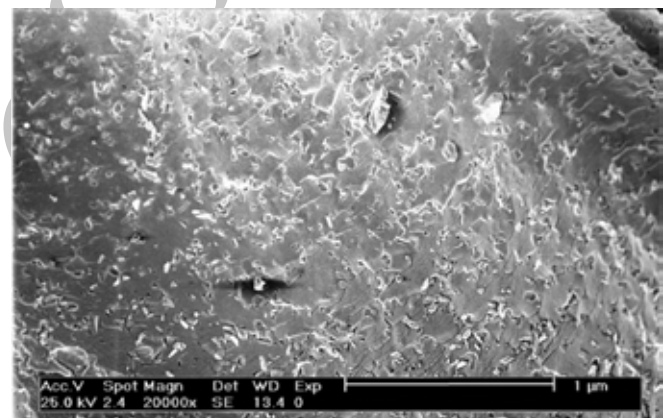
شکل ۳- تصویر SEM از پراکنش (الف) نامناسب و (ب) کلوخه‌ای نانوذرات در زمینه اپوکسی بدون استفاده از همزن فراصوت.

فراصوت آشکار می‌سازد که زمان، توان و سرعت همزن مکانیکی اثری بر پراکنش یکنواخت ذرات نداشته و در تمام نمونه‌های ساخته شده بدون کمک همزن فراصوت، تجمع کلوخه‌ای نانوذرات مشاهده شده است [۱۵].

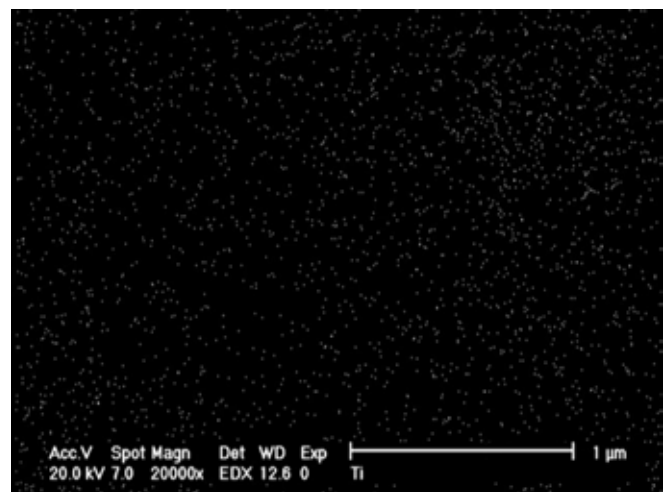
#### آماده‌سازی نمونه‌های اپوکسی و نانوپلیمری

نمونه‌های اپوکسی و نانوپلیمری، پس از ترکیب رزین با سخت‌کننده، با درصد مناسب، درون قالب‌هایی مطابق استاندارد ASTM D638 قالب‌گیری شده و پس از جلادهی با ضخامت یکسان، برای انجام آزمون کشش استفاده شدند. نمونه‌های اپوکسی-نانوذرات با مقادیر حجمی ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ نانوذرات تیتانیوم اکسید به ترتیب E-050، E-000، E-025 و E-100 نام‌گذاری شدند. نمونه‌های ساخته شده به

از این‌رو در پژوهش حاضر، از دو مرحله ترکیب با همزن مکانیکی و فراصوت‌دهی برای پراکنش یکنواخت نانوذرات در زمینه استفاده شد. نانوذرات با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ حجمی به رزین افزوده شد. مخلوط حاصل حدود ۱ h با همزن مکانیکی با سرعت ۳۰۰ rpm و نیز همزن کاوند فراصوت با توان ۱۲۰ W و بسامد ۲۰ kHz یکنواخت شد. پراکنش یکنواخت نانوذرات در زمینه اپوکسی در **شکل‌های ۲** به کمک تصویر SEM و نیز EDX نشان داده شده است. همان‌طور که از این تصاویر مشخص است، نانوذرات تقریباً یکنواخت پراکنده شده‌اند و تجمع محدودی از آنها در ریزساختار ماده مشاهده می‌شود. افزایش زمان استفاده از همزن فراصوت نیز اثری بر از بین بردن این نواحی تجمع نداشته است [۱۴]. **شکل ۳** پراکنش نامناسب و کلوخه‌ای نانوذرات را در زمینه اپوکسی نشان می‌دهد، زمانی که از همزن فراصوت استفاده نشده است. بررسی ریزساختار نمونه‌های مختلف ساخته شده بدون استفاده از همزن

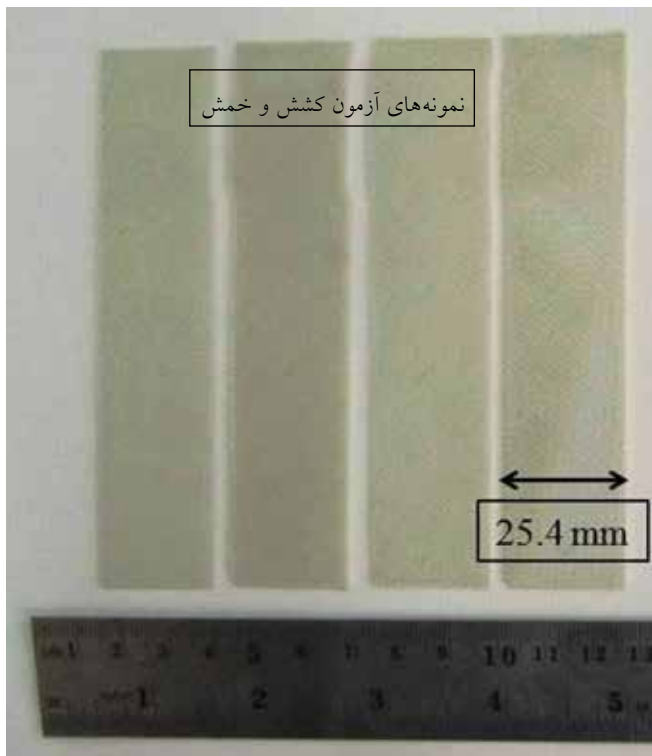


(الف)



(ب)

شکل ۲- توزیع نانوذرات تیتانیوم اکسید در زمینه اپوکسی: (الف) تصویر SEM و (ب) تصویر EDX.



شکل ۵- نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی برش کاری شده برای انجام آزمون کشش و خمش.

به استفاده از الیاف شیشه به شکل پارچه بافته شده با نسبت برابر تار و پود، درصد الیاف واقعی (الیافی که حین آزمون‌ها بار مکانیکی را تحمل می‌کنند)، نصف است. سایر نقص‌ها و شرایط ساخت نیز برای نمونه‌ها، کاملاً یکسان بوده و تنها تفاوت را می‌توان به نوع زمینه کامپوزیت نسبت داد.

#### آزمون کشش

نمونه‌های آزمون کشش پس از برش کاری و آماده‌سازی، با دستگاه کشش Universal ۲۰۰ تنی مدل Instron 8502 با سرعت کرنش ۱ mm/min براساس استاندارد ASTM D3039 بررسی شدند. نمونه‌ها با ابعاد ۱۵۰×۲۵/۴ mm برش کاری شدند. نحوه آزمون و بست دستگاه کشش در شکل ۶-الف نشان داده شده است. طبق استاندارد، از هر حالت پنج نمونه یکسان بررسی شده و نتایج نمونه‌هایی که در اثر شکست نادرست در بارهای بسیار کم یا شکست در محل گیره‌های آزمون کشش گسیخته شده، تکرار شده است. مدول کششی نمونه‌ها از نسبت استحکام کششی کشسان هر نمونه به کرنش در آن نقطه به دست آمده است.

#### آزمون خمش سه نقطه‌ای

آزمون خمش سه نقطه‌ای برای بررسی خواص خمشی کامپوزیت



شکل ۴- نمونه‌های دمبلی شکل اپوکسی-نانوذرات پس از قالب گیری. روش قالب گیری در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

#### آماده‌سازی کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی

پس از اضافه کردن نانوذرات به رزین، سخت‌کننده نیز به آن افزوده شده و ترکیب حاصل با چهارلایه پارچه شیشه، لایه چینی شد. برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا با لایه چینی دستی ورق کامپوزیت شیشه-اپوکسی ساخته شد. سپس، ورق درون کیسه خلأ قرار گرفت. استفاده از کیسه خلأ افزون بر کاهش تخلخل و حباب‌های هوای میان‌لایه‌ای، باعث کاهش درصد رزین موجود در کامپوزیت و اعمال فشار میان لایه‌ها نیز می‌شود.

نمونه‌های نهایی نیز با ابعاد مناسب برای انجام آزمون‌های خواص مکانیکی کشش و خمش با دستگاه جت آب برش کاری شدند. برش کاری نیز در دو جهت اصلی و ۴۵° نسبت به جهت اصلی انجام شده است. نمونه‌های برش کاری شده در جهت اصلی با کدهای GE-000، GE-025، GE-050 و GE-100 به ترتیب برای مقادیر ۰، ۲۵/۰، ۵۰/۰ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید و نمونه‌های برش کاری شده در جهت ۴۵° نسبت به جهت اصلی پارچه، با کدهای XG-000، XG-025، XG-050 و XG-100 به ترتیب برای مقادیر ۰، ۲۵/۰، ۵۰/۰ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید مشخص شدند. نمونه‌های بررسی شده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. تمام نمونه‌ها در حالت چهارلایه پارچه شیشه ساخته شدند. بنابراین، در دو بعد کاملاً یکسان بوده و تنها اختلاف نمونه‌ها را می‌توان به تفاوت محدود ضخامت نمونه‌ها در اثر تغییر گرانی رزین نسبت داد. در تمام آزمون‌های کشش و خمش، اثر این تفاوت (ضخامت نمونه‌ها)، لحاظ شده است. با توجه به ضخامت حدود ۱ mm نمونه‌ها و اندازه‌گیری چگالی کامپوزیت تولید شده، مقدار حجمی نمونه‌ها حدود ۵۰٪ محاسبه شد. توجه به این نکته ضروری است که با توجه

آزمون شده و نتایج نمونه‌هایی که در اثر شکست نادرست در بارهای بسیار کم گسیخته شده‌اند، تکرار شده است. مدول خمشی نمونه‌ها از نسبت استحکام خمشی کشسان هر نمونه به کرنش در آن نقطه به دست آمده است.

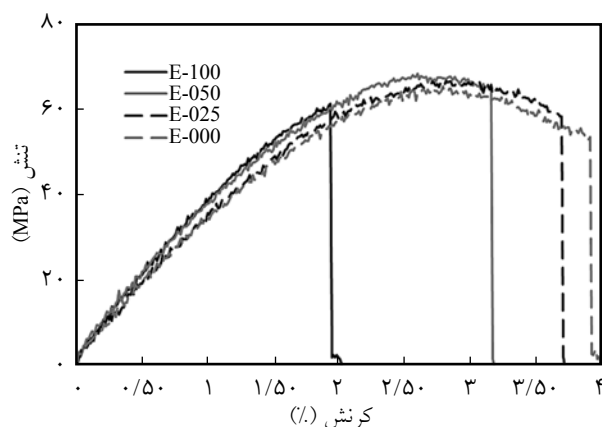
### میکروسکوپی الکترونی پوششی (SEM)

برای بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌های تولید شده، میکروسکوپ SEM با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰۰ برابر به کار گرفته شد. برای آماده‌سازی ابتدا نمونه‌ها در اندازه‌های مناسب برش و سپس با طلا پوشش داده شدند. دستگاه پوشش‌دهی از نوع JOEL ساخت ژاپن بود. در این دستگاه پاشش ذرات طلا به روش تخلیه پلاسمایی گاز در محیط آرگون انجام شد.

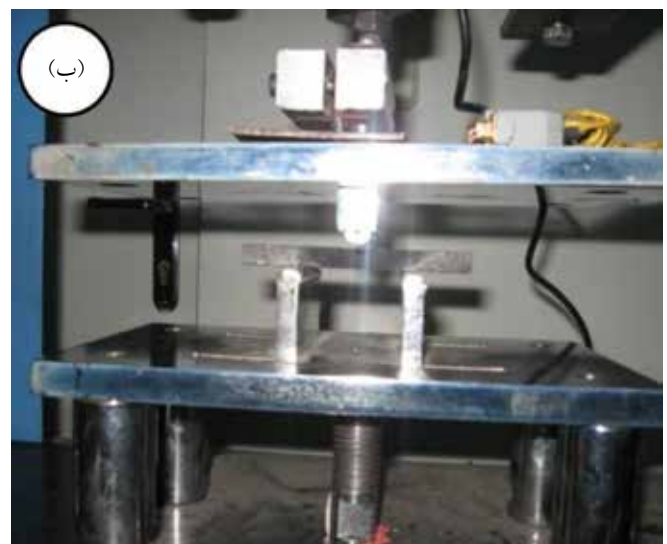
## نتایج و بحث

### نتایج آزمون کشش نمونه‌های اپوکسی و اپوکسی-نانوذرات

نتایج آزمون کشش نمونه‌های پلیمری، در شکل ۷ و جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج آزمون‌های کشش نشان می‌دهد، استحکام کششی نمونه‌های E-025 حدود ۶٪ نمونه E-050 و حدود ۷٪ نسبت به پلیمر اپوکسی افزایش یافته است. با وجود این، مقدار استحکام برای نمونه E-100 حدود ۶٪ کاهش نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه مدول یانگ نمونه‌های نانوپلیمری، نشان‌دهنده افزایش ۵، ۸ و ۱۴٪ به ترتیب برای نمونه‌های E-050، E-100 و E-100 است. به دلیل بررسی دقیق اثر محدود نانوذرات بر خواص مکانیکی رزین، داده‌های



شکل ۷- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های نانوپلیمری (اپوکسی-نانوذرات تیتانیوم اکسید).



شکل ۶- نمایی از بست آزمون کشش و خمش استفاده شده.

شیشه-اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی آن انجام شد. نمونه‌ها با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  mm و ضخامت حدود ۲ mm برش کاری شدند. آزمون با همان دستگاه آزمون کشش با سرعت کرنش ۱ mm/min براساس استاندارد ASTM D7264 انجام شد. فاصله دو نقطه پایینی بست خمش، ۸۰ mm در نظر گرفته شد. بست آزمون خمش در شکل ۶-ب نشان داده شده است. طبق استاندارد، از هر حالت، پنج نمونه یکسان

جدول ۳- نتایج آزمون کشش نمونه‌های نانوپلیمر (اپوکسی-نانوذرات).

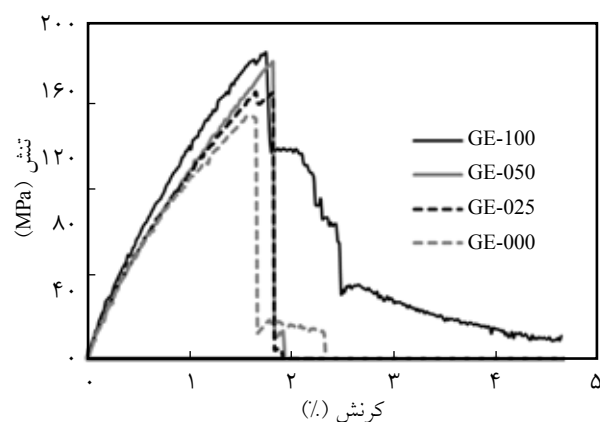
کد نمونه	استحکام (MPa)	درصد بهبود استحکام (%)	مدول یانگ (GPa)	بهبود مدول یانگ (%)	کرنش در نقطه استحکام نهایی (%)	کرنش در نقطه شکست (%)
E-000	64 ± 2/4	-	3/59 ± 0/183	-	2/77	3/89
E-025	68 ± 1/9	6	3/78 ± 0/120	5	2/89	3/69
E-050	69 ± 1/7	7	3/89 ± 0/159	8	2/36	3/19
E-100	60 ± 2/2	-6	4/12 ± 0/164	14	1/96	1/96

کرنش) و رفتار شکننده‌تر نمونه‌های حاوی نانوذرات است. نتایج آزمون‌های کشش نشان‌دهنده بهبود شایان توجه خواص مکانیکی است که در تناقض با دیدگاه مکانیک محیط پیوسته و نسبت منظر برای نانوذرات کروی است. درباره دلیل افزایش استحکام نمونه‌ها با وجود نسبت منظر ۱، توجه به این نکته ضروری است که سازوکار موجود در افزایش استحکام، افزون بر دیدگاه مکانیک محیط پیوسته، در اکثر موارد می‌تواند به دلیل شرکت نانوذرات در فرایند پلیمر شدن و تغییر ماهیت خواص مکانیکی پلیمر باشد. نانوذرات در سازوکارهای پیچیده به‌عنوان بستر ایجاد زنجیرهای پلیمری عمل می‌کنند و در نتیجه باعث بهبود خواص زنجیرهای پلیمری می‌شوند [۹]. همچنین، بررسی دقیق‌تر نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها نشان می‌دهد، کرنش در محل استحکام نهایی نمونه‌ها با افزایش درصد نانوذرات کاهش می‌یابد. این موضوع با توجه به کم‌تر بودن کرنش شکست الیاف در مقایسه با ماتریس و نیز برهم‌کنش بهتر الیاف و زمینه اپوکسی حاوی نانوذرات، باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی شده است [۱۵].

### نتایج آزمون کشش در راستای اصلی

نتایج آزمون کشش در راستای اصلی شامل اطلاعات مدول یانگ، استحکام نهایی کششی و کرنش در نقطه استحکام نهایی در **جدول ۴** نشان داده شده است. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد، افزودن نانوذرات به زمینه کامپوزیت، باعث بهبود قابل ملاحظه خواص کششی نمونه‌ها شده است. خلاصه نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد، با افزودن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید، استحکام کششی ۹/۶، ۲۲ و ۲۵/۹٪ نسبت به کامپوزیت شیشه-اپوکسی افزایش یافته است. همچنین، مدول یانگ در حالت کششی نیز با افزودن نانوذرات، ۲/۷، ۴ و ۱۷/۹٪ برای نمونه‌های GE-025، GE-050 و GE-100 رشد داشته است. بررسی دقیق نمودارهای تنش-کرنش کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌ها نشان می‌دهد، با افزودن نانوذرات، کرنش در محل

آزمون‌هایی که به دلایلی شامل وجود تخلخل و عیوب ساخت تنش‌های بسیار کم و امانده شده‌اند، از نتایج نهایی حذف شد. همان‌طور که از نتایج آزمون‌ها مشخص است، بهبود مدول یانگ ماده از قانون مخلوط‌ها پیروی کرده و نتایج به‌طور خطی افزایش یافته است. اما، برای استحکام، سازوکارهای حاکم پیچیده‌تر بوده و نیازمند بررسی دقیق‌تری است. دلیل کاهش استحکام در نمونه E-100 را می‌توان به رفتار بسیار شکننده نانوکامپوزیت تولید شده در درصد زیاد نانوذرات نسبت داد. در واقع، در درصدهای بیشتر نانوذرات، رفتار ماده شکننده‌تر شده و در نتیجه فاز پلاستیک و غیرخطی پس از محدوده کشسان حذف شده است. با وجود این، در نمونه E-100 با وجود کاهش استحکام، مدول کششی نمونه افزایش یافته است. دلایل دیگر کاهش استحکام در نمونه‌های E-100، مربوط به تجمع ذرات، که به تمرکز تنش اطراف کلوخه‌ها و رشد ترک بین ذرات منجر شده، عیوب حاصل از نقص آغشته‌سازی و نیز خارج نشدن حباب هوا در اثر افزایش زیاد گرانیوی است. نمودارهای **شکل ۸** کاهش کرنش شکست نمونه‌ها را با افزایش درصد نانوذرات نشان می‌دهند. این موضوع بیانگر کاهش جذب انرژی (مساحت زیر نمودار تنش-



شکل ۸- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.



جدول ۴- نتایج آزمون کشش نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.

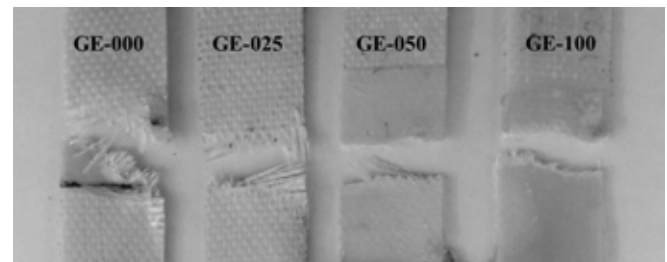
کد نمونه	استحکام (MPa)	درصد بهبود استحکام (%)	مدول یانگ (GPa)	بهبود مدول یانگ (%)	کرنش در نقطه استحکام نهایی (%)
GE-000	$145/32 \pm 6/9$	-	$10/77 \pm 0/38$	-	1/65
GE-025	$159/28 \pm 8/3$	9/6	$11/06 \pm 0/43$	2/7	1/82
GE-050	$177/31 \pm 4/7$	22/0	$11/20 \pm 0/27$	4/0	1/82
GE-100	$183/00 \pm 6/1$	25/9	$12/70 \pm 0/56$	17/9	1/78

GE-100 به ترتیب 1/07، 1/23، 1/30 و  $3/34 \text{ MJ/m}^3$  است. نتایج نشان می‌دهد، سطح زیر نمودار **شکل ۸** با افزایش مقدار نانوذرات افزایش یافته که حاکی از جذب انرژی بیشتر حین شکست و تغییر شکل پلاستیک نمونه‌هاست.

#### نتایج آزمون کشش در راستای ۴۵°

نتایج آزمون کشش در راستای ۴۵° شامل داده‌های مدول یانگ، استحکام نهایی کششی و کرنش در استحکام نهایی در **جدول ۵** آمده است. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد، افزودن نانوذرات به زمینه کامپوزیت، باعث بهبود قابل ملاحظه خواص کششی نمونه‌ها شده است. در حالت ۴۵° نسبت به جهت اصلی، رفتار ماده بسیار انعطاف پذیر بوده و نمودار تنش-کرنش تا محدوده کرنش ۱۰٪ کشیده شده است. خلاصه نتایج آزمون کشش نمونه‌ها در جهت ۴۵° نسبت به راستای اصلی نشان می‌دهد، با افزودن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید، استحکام کششی ۳/۵، ۸/۷ و ۱۱/۴٪ نسبت به کامپوزیت شیشه-اپوکسی افزایش یافته است. همچنین، مدول یانگ در حالت کششی نیز با افزودن نانوذرات ۴/۸، ۸/۳ و ۱۷/۵٪ برای نمونه‌های XG-025، XG-050 و XG-100 رشد داشته است. بررسی دقیق نمودارهای تنش-کرنش کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌ها نشان می‌دهد، با افزودن نانوذرات، کرنش در محل استحکام نهایی کم شده است. نمونه‌های شکسته شده XG-050، XG-025، XG-000 و

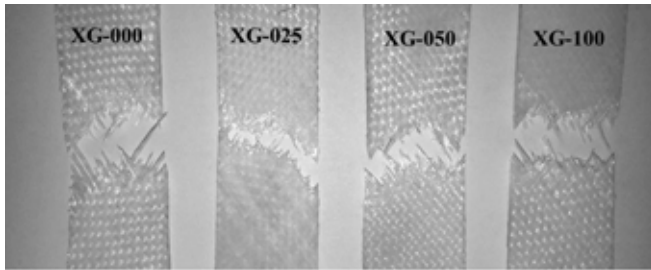
استحکام نهایی کاهش یافته است. کم بودن مقدار استحکام نهایی نمونه‌های ساخته شده نسبت به مراجع مختلف، را می‌توان به خواص متفاوت الیاف، نوع پارچه، نبود اتصال مناسب بین الیاف و زمینه، وجود حباب‌های هوا میان لایه‌ها و خطای ایجاد شده حین آزمون نسبت داد. نمونه‌های شکسته شده GE-000، GE-025، GE-050 و GE-100 و مساحت ناحیه شکست، در **شکل ۸** نشان داده شده است. بررسی رفتار شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی نیز نشان‌دهنده افزایش رفتار شکست ترد در نمونه‌های نانوکامپوزیتی است. **شکل ۹** نیز نشان‌دهنده کاهش مساحت ناحیه شکست کششی با افزودن نانوذرات در زمینه است. بررسی مقدار مساحت زیر نمودار تا لحظه شکست که مدول چقرمگی نامیده می‌شود، نشان می‌دهد، مقدار انرژی شکست برای نمونه‌های GE-000، GE-025، GE-050 و



شکل ۹- ناحیه شکست پس از آزمون کشش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.

جدول ۵- نتایج آزمون کشش نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای ۴۵°.

کد نمونه	استحکام (MPa)	درصد بهبود استحکام (%)	مدول یانگ (GPa)	بهبود مدول یانگ (%)	کرنش در نقطه استحکام نهایی (%)
XG-000	$76/99 \pm 3/6$	-	$4/28 \pm 0/13$	-	10/67
XG-025	$79/66 \pm 4/5$	3/5	$4/48 \pm 0/21$	4/8	10/17
XG-050	$83/70 \pm 4/8$	8/7	$4/64 \pm 0/17$	8/3	9/30
XG-100	$85/78 \pm 2/9$	11/4	$5/03 \pm 0/24$	17/5	9/00

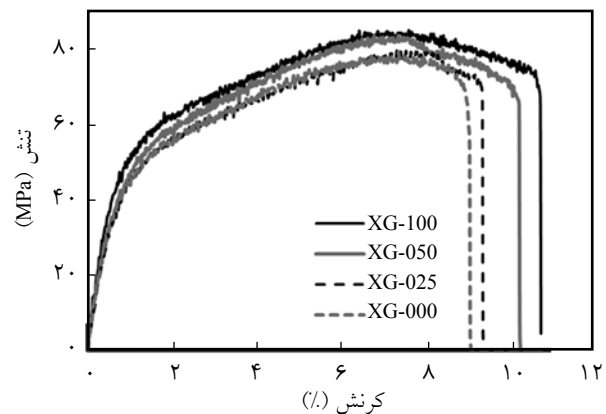


شکل ۱۱- ناحیه شکست پس از آزمون کشش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای  $45^\circ$ .

### نتایج آزمون خمش نمونه‌ها در راستای اصلی

نتایج آزمون خمش نانوکامپوزیت‌های هیبریدی شامل مدول یانگ خمشی، استحکام خمشی نهایی و کرنش در محل استحکام نهایی در جدول ۶ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج آزمون خمش در راستای اصلی نشان می‌دهد، با افزودن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید، استحکام خمشی به مقدار ۶/۶، ۱۲/۱ و ۲۶٪ و مدول یانگ نیز ۱۲/۵، ۱۸/۱ و ۱۹/۸٪ برای نمونه‌های GE-000، GE-025، GE-050 و GE-100 افزایش داشته است. بررسی مساحت ناحیه شکست که با نقاط سیاه در شکل ۱۳ نشان داده شده، بیانگر کاهش چند برابر ناحیه شکست در نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی نسبت به کامپوزیت شیشه-اپوکسی است.

طبق نتایج مدول چقرمگی، انرژی جذب شده برای نمونه‌های GE-000، GE-025، GE-050 و GE-100 به ترتیب برابر ۱/۴۶، ۱/۳۳، ۱/۱۹ و ۱/۱۷ MJ/m<sup>3</sup> است. بررسی روند تغییرات مدول چقرمگی برای نمونه‌ها در آزمون خمش نشان می‌دهد، این عامل با افزایش مقدار نانوذرات کاهش یافته است. این موضوع را می‌توان به توزیع متفاوت تنش و سازوکارهای اعمال بار در آزمون‌های خمشی و کششی نسبت داد، به طوری که در آزمون‌های خمش بر خلاف آزمون کشش، تنش‌های کششی و فشاری در نمونه به وجود آمده که باعث روند متفاوت جذب انرژی می‌شود. در حقیقت براساس روند متفاوت این دو آزمون، اثر نانوذرات TiO<sub>2</sub> و رفتار فصل مشترک الیاف و زمینه

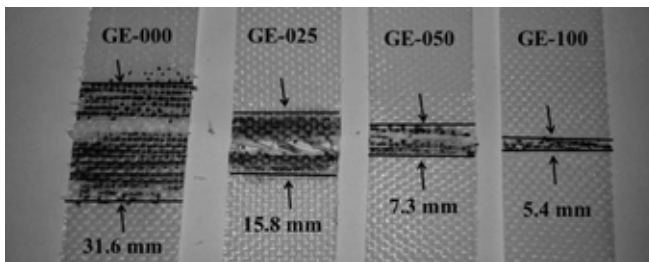


شکل ۱۰- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای  $45^\circ$ .

XG-100 و مساحت ناحیه شکست، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی رفتار شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی نیز حاکی از افزایش رفتار شکست ترد در نمونه‌های نانوکامپوزیتی است. در شکل ۱۱ کاهش مساحت ناحیه شکست کششی نیز با افزودن نانوذرات در زمینه مشاهده می‌شود. طبق محاسبه مدول چقرمگی، انرژی جذب شده برای نمونه‌های XG-000، XG-025، XG-050 و XG-100 به ترتیب برابر ۱/۷۳، ۱/۸۶، ۲/۳۲ و ۲/۶۴ MJ/m<sup>3</sup> است. براساس نتایج، سطح زیر نمودار با ازدیاد مقدار نانوذرات افزایش یافته و این موضوع نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر حین شکست و تغییر شکل پلاستیک نمونه‌هاست که مشابه رفتار جذب انرژی نمونه‌های راستای اصلی حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> است. مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۱ نشان می‌دهد، محل شکست در حالت اصلی با زاویه تقریباً عمود بر راستای نمونه‌ها و محل شکست نمونه‌های  $45^\circ$  نیز با زاویه  $45^\circ$  گسسته شده است. علت پارگی با زاویه  $45^\circ$  به دلیل ایجاد بیشینه تنش‌های اصلی در راستای  $45^\circ$  به دلیل چینش الیاف بوده که باعث پارگی نمونه‌ها به شکل مورب می‌شود.

جدول ۶- نتایج آزمون خمشی نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.

کد نمونه	استحکام (MPa)	درصد بهبود استحکام (%)	مدول یانگ (GPa)	بهبود مدول یانگ (%)	کرنش در نقطه استحکام نهایی (%)
GE-000	134/08 ± 7/8	-	9/01 ± 0/52	-	2/16
GE-025	142/96 ± 6/6	6/6	10/13 ± 0/36	12/5	1/83
GE-050	150/37 ± 8/4	12/1	10/64 ± 0/49	18/1	1/66
GE-100	170/24 ± 5/1	26/0	10/79 ± 0/67	19/8	1/66

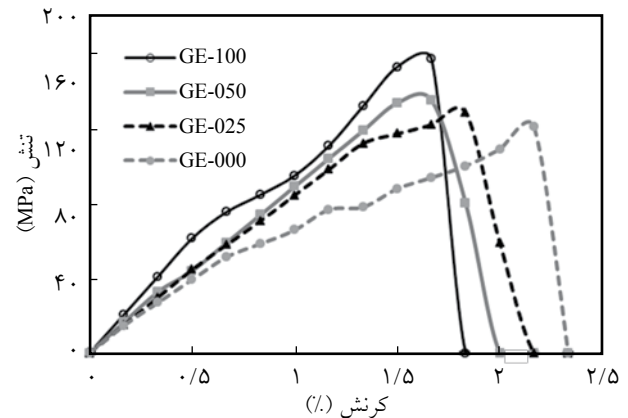


شکل ۱۳- ناحیه شکست پس از آزمون خمش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.

شکست ۱۵ نشان داده شده، حاکی از کاهش چند برابر ناحیه شکست در نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی نسبت به کامپوزیت شیشه-اپوکسی است. محاسبه مدول چقرمگی نشان می‌دهد، انرژی جذب شده برای نمونه‌های XG-000، XG-025، XG-050 و XG-100 به ترتیب برابر  $۱/۳۵$ ،  $۱/۱۴$ ،  $۱/۰۴$  و  $۰/۸۹$  MJ/m<sup>3</sup> است. این مقادیر مؤید رفتار خمشی مشابه برای نمونه‌های  $۴۵^\circ$  و راستای اصلی با افزایش مقدار نانوذرات TiO<sub>2</sub> در زمینه کامپوزیت است.

### بررسی فصل مشترک الیاف و زمینه پلیمری

بررسی ریزساختار نمونه‌های حاوی نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت بدون ذرات تیتانیم اکسید نشان می‌دهد، با اضافه شدن نانوذرات در زمینه پلیمری، چسبندگی بهتری بین الیاف و زمینه پلیمری، ایجاد شده و فصل مشترک ایجاد شده نقش بسیار مهمی در خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی، نهایی دارد. از سوی دیگر، با وجود افزایش محدود استحکام در نمونه‌های نانوپلیمری، افزایش شایان توجهی در خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی ایجاد شده که این موضوع در کنار درک نقش محدود پلیمر در خواص نهایی کامپوزیت ساخته شده از آن، بسیار جالب است. این پدیده یعنی افزایش قابل ملاحظه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی، فقط با بهبود فصل مشترک الیاف و پلیمر، توجیه پذیر است. بهبود چسبندگی



شکل ۱۲- نتایج آزمون خمش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای اصلی.

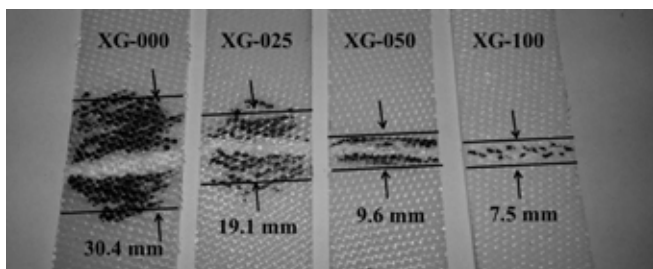
نمونه‌ها در دو حالت بارگذاری کششی و فشاری متفاوت است. همچنین، ناحیه تخریب پس از آزمون و ناحیه پلاستیک در حالت بارگذاری خمشی بسیار کمتر از حالت بارگذاری کششی است که این موضوع باعث کاهش اثر نانوذرات بر جذب انرژی نمونه‌های بررسی شده، می‌شود. به عبارت دیگر، در حالت بارگذاری کششی، تمام طول نمونه حین آزمون، دارای تنش نزدیک به استحکام نهایی شده و تغییر شکل پلاستیک در کل طول نمونه‌ها، اتفاق می‌افتد. در حالی که در بارگذاری خمشی، تنش‌های بیشه فقط در وسط نمونه رخ داده و متناسب با فاصله از تکیه‌گاه، در طول نمونه افزایش می‌یابد.

### نتایج آزمون خمش نمونه‌ها در راستای $۴۵^\circ$

نتایج آزمون خمش نانوکامپوزیت‌های هیبریدی شامل مدول یانگ خمشی، استحکام خمشی نهایی و کرنش در محل استحکام نهایی در جدول ۷ و شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج آزمون خمش در راستای اصلی نشان می‌دهد، با افزودن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ حجمی نانوذرات تیتانیم اکسید، استحکام خمشی به مقدار ۸/۳، ۱۳/۹ و ۲۳/۲٪ مدول یانگ نیز ۶/۳، ۹/۱ و ۱۴/۶٪ برای نمونه‌های XG-025،

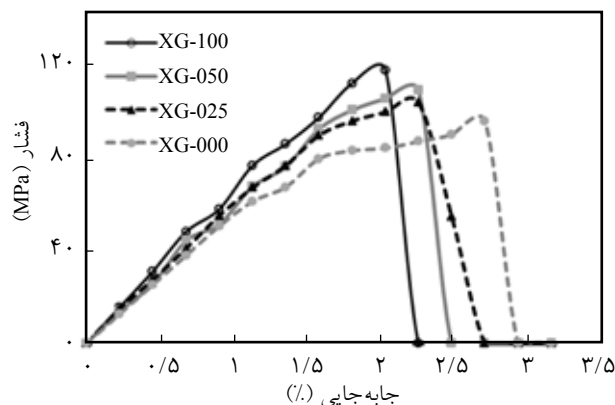
جدول ۷- نتایج آزمون خمشی نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای  $۴۵^\circ$ .

کد نمونه	استحکام (MPa)	درصد بهبود استحکام (%)	مدول یانگ (GPa)	بهبود مدول یانگ (%)	کرنش در نقطه استحکام نهایی (%)
XG-000	$۹۳/۹۸ \pm ۵/۴$	-	$۵/۶ \pm ۰/۲۷$	-	۲/۷۱
XG-025	$۱۰۱/۸۵ \pm ۴/۸$	۸/۳	$۵/۹ \pm ۰/۳۱$	۶/۳	۲/۴۸
XG-050	$۱۰۷/۰۵ \pm ۷/۳$	۱۳/۹	$۶/۱ \pm ۰/۱۸$	۹/۱	۲/۲۶
XG-100	$۱۱۵/۷۹ \pm ۴/۶$	۲۳/۲	$۶/۴ \pm ۰/۲۴$	۱۴/۶	۲/۰۳



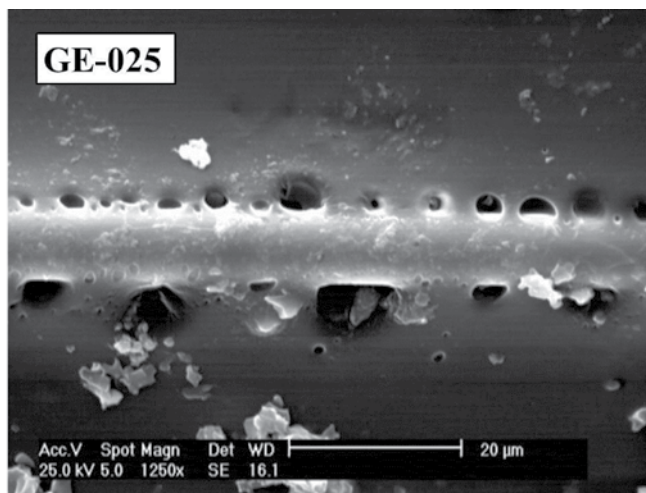
شکل ۱۵- ناحیه شکست پس از آزمون خمش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای  $45^\circ$ .

یک از لایه‌ها، به بهبود خواص میان‌لایه‌ها و مقاومت بیشتر در برابر ورقه‌ای شدن نیز منجر شود [۱۶]. همچنین، بهبود استحکام برشی میان‌لایه‌ای و کاهش shear lag میان لایه‌ها نیز می‌تواند از سایر عوامل اثرگذار بر بهبود خواص نانوکامپوزیت هیبریدی تولید شده

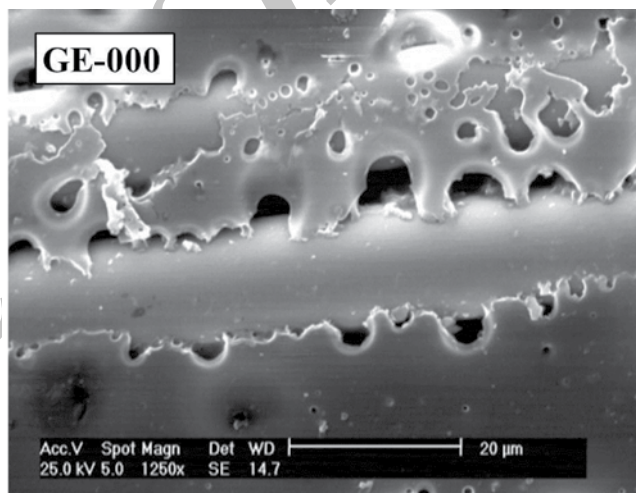


شکل ۱۴- نتایج آزمون خمش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی در راستای  $45^\circ$ .

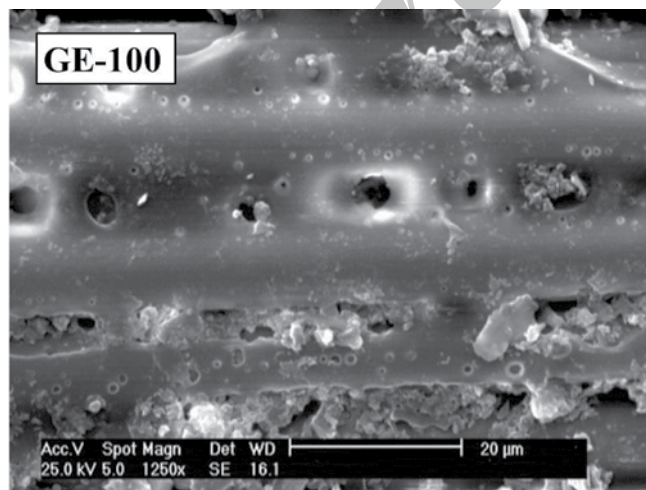
زمینه با الیاف می‌تواند افزون بر بهبود خواص مکانیکی درون هر



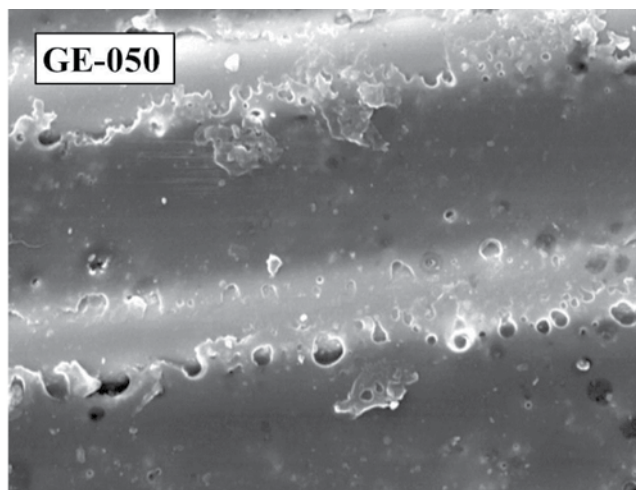
(ب)



(الف)

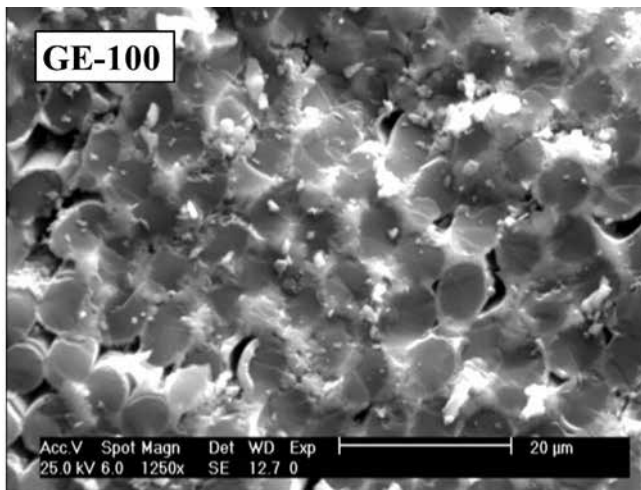


(د)

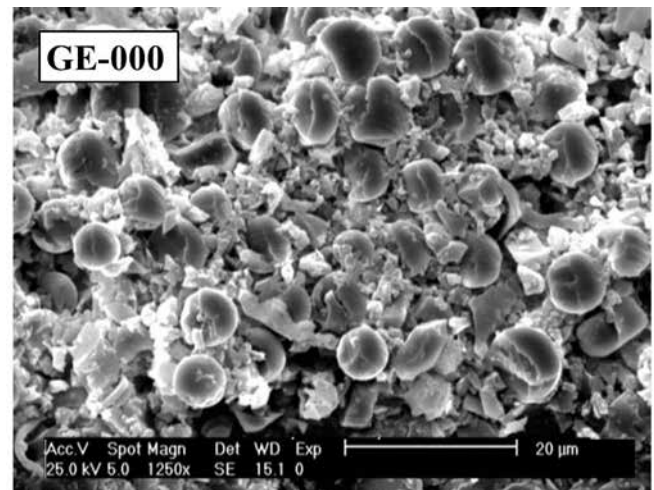


(ج)

شکل ۱۶- تصویر SEM مقایسه‌ای بین نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با مقادیر مختلف و کامپوزیت شیشه-اپوکسی.



(ب)



(الف)

شکل ۱۷- تصاویر SEM از ریزساختار سطح برش خورده نانوکامپوزیت هیبریدی: (الف) بدون نانوذرات و (ب) ۱٪ حجمی نانوذرات.

۱۱/۴٪ بهبود یافته است. افزایش ۱۷/۹ و ۱۷/۵٪ در مدول یانگ به ترتیب برای نمونه‌های GE-100 و XG-100 است. در حالت خمشی نیز استحکام نمونه‌های GE-100 و XG-100 به ترتیب ۲۶٪ و ۲۳/۳٪ و مدول یانگ ۱۹/۸ و ۱۴/۶٪ نسبت به کامپوزیت شیشه-اپوکسی بهبود یافته است. بهبود خواص مکانیکی در کنار رفتار شکننده تر نانوکامپوزیت‌ها و کاهش مساحت ناحیه شکست در نمونه‌ها، مشاهده شد. دلیل بهبود خواص مکانیکی فقط محدود به افزایش قابل توجه خواص مکانیکی اپوکسی در اثر وجود نانوذرات نیست، بلکه به تغییر قابل ملاحظه چسبندگی بین الیاف و زمینه پلیمری، مرتبط است. این بهبود چسبندگی می‌تواند بر چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیت و جلوگیری از سازوکارهای ورقه‌ای شدن نیز اثرگذار باشد. مساحت زیر نمودار تنش-کرنش که بیانگر انرژی جذب شده حین آزمون‌های کشش و خمش است، نشان‌دهنده افزایش جذب انرژی در آزمون کشش با افزودن نانوذرات در زمینه اما کاهش جذب انرژی در آزمون خمش است. این اختلاف رفتار به ماهیت و نحوه توزیع تنش متفاوت در این دو آزمون مربوط است.

## مراجع

- Wetzela B., Hauptert F., and Zhang M.Q., Epoxy Nanocomposites with High Mechanical and Tribological Performance, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 2055-2067, 2003.
- Walter R., Friedrich K., Privalko V., and Savadori A., On Modulus and Fracture Toughness of Rigid Particulate Filled High Density Polyethylene, *J. Adhes.*, **64**, 87-109, 1997.
- Nkeuwa W.N., Riedl B., and Landry V., UV-Cured Clay/Based Nanocomposite Topcoats for Wood Furniture. Part II: Dynamic Viscoelastic Behavior and Effect of Relative Humidity in the Mechanical Properties, *Prog. Org. Coat.*, **77**, 12-23, 2014.
- Qi B., Yuan Z., Lu S., Liu K., Li S., Yang L., and Yu J., Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Composites Containing

باشد [۱۷]. شکل‌های ۱۶ و ۱۷، تفاوت فصل مشترک در نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد که مؤید بهبود چشمگیر چسبندگی الیاف و ماتریس است [۱۸]. از سوی دیگر، با افزایش مدول یانگ در نمونه‌های نانوکامپوزیتی، برهم‌کنش بهتری بین الیاف با کرنش شکست کم و زمینه با کرنش شکست نسبتاً زیاد ایجاد شده که این موضوع نیز می‌تواند از علل افزایش استحکام و بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های هیبریدی باشد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، خواص مکانیکی شامل استحکام کششی و خمشی، مدول یانگ و کرنش شکست نمونه‌های نانوپلیمری و نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه-اپوکسی حاوی نانوذرات تیتانیم اکسید در دو جهت اصلی و ۴۵° نسبت به راستای اصلی الیاف بررسی شده است. براساس نتایج آزمون‌ها، استحکام کششی نمونه‌های ۱٪ حجمی در جهت اصلی ۲۵/۹ و نمونه ۴۵° نسبت به راستای اصلی،

- Graphene Oxide and Liquid Crystalline Epoxy, *Fibers Polym.*, **15**, 326-333, 2014.
5. Guchhait P.K., Bhandari S., Singh S., and Rahaman M., Study on the Effect of Nanosilica Particles on Morphology, Thermo-Mechanical and Electrical Properties of Liquid Polysulfide Modified Epoxy Hybrid Nanocomposites, *Int. J. Plast. Technol.*, **15**, 150-162, 2011.
  6. Ahmadi M., Moghbeli M.R., and Shokrieh M.M., Unsaturated Polyester-Based Hybrid Nanocomposite: Fracture Behavior and Tensile Properties, *J. Polym. Res.*, **19**, 9971-9979, 2012.
  7. Lin L.Y., Lee J.H., Hong C.E., Yoo G.H., and Advani S.G., Preparation and Characterization of Layered Silicate/Glass Fiber/Epoxy Hybrid Nanocomposites via Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 2116-2125, 2006.
  8. Manjunatha C.M., Bojja R., Jagannathan N., Kinloch A.J. and Taylor A.C., Enhanced Fatigue Behavior of a Glass Fiber Reinforced Hybrid Particles Modified Epoxy Nanocomposite under WISPERX Spectrum Load Sequence, *Int. J. Fatigue*, **54**, 25-31, 2013.
  9. Zulfi N.H.M., AbuBakar A., and Chow W.S., Mechanical and Thermal Properties Improvement of Nano Calcium Carbonate-Filled Epoxy/Glass Fiber Composite Laminates, *High Perform. Polym.*, **26**, 223-229, 2014.
  10. Markkul S., Malecki H.C., and Zupan M., Uniaxial Tension and Compression Characterization of Hybrid CNS-Glass Fiber-Epoxy Composites, *Compos. Struct.*, **95**, 337-345, 2013.
  11. Mansourian-Tabaei M., Jafari S.H., and Khonakdar H.A., A Comparative Study on the Influence of Nanoalumina and Carbon Nanotubes on Thermal Stability, Adhesion Strength and Morphology of Epoxy Adhesives, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 359-367, 2015.
  12. Mansourian-Tabaei M., Jafari S.H., and Khonakdar H.A., Lap Shear Strength and Thermal Stability of Diglycidyl Ether of Bisphenol A/Epoxy Novolac Adhesives with Nanoreinforcing Fillers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 40017, 2014.
  13. Karapappas P., Tsotra P., and Scobbie K., Effect of Nanofillers on The Properties of a State of the Art Epoxy Gelcoat, *eXPRESS Polym. Lett.*, **5**, 218-227, 2011.
  14. Atarian M., Salehi H.R., Atarian M., and Shokuhfar A., Effect of Oxide and Carbide Nanoparticles on Tribological Properties of Phenolic-Based Nanocomposites, *Iran Polym. J.*, **21**, 297-305, 2012.
  15. Salehi H.R. and Salehi M., Mechanical and Viscoelastic Behavior of TiO<sub>2</sub> Epoxy Nanocomposite, *The Bi-Annual International Conference on Experimental Solid Mechanics (X-Mech 2014)*, Tehran, Iran, 18-19 February 2014.
  16. Mackin T.J., Halverson T.L., and Sottos N.R., The Effect of Interfacial Properties on Damage Evolution in Model Composites, *Polym. Compos.*, **26**, 241-246, 2005.
  17. Warriar A., Godara A., Rochez O., Mezzo L., Luizi F., Gorbatiikh, Lomov S.V., VanVuure, and Verpoest, I., The Effect of Adding Carbon Nanotubes to Glass/Epoxy Composites in the Fibre Sizing and/or the Matrix, *Compos. Part A*, **41**, 532-538, 2010.
  18. Salehi H.R. and Salehi M., Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Mechanical behavior of TiO<sub>2</sub>-Glass/Epoxy Hybrid Nanocomposite, *The Bi-Annual International Conference on Experimental Solid Mechanics (X-Mech 2014)*, Tehran, Iran, 18-19 February 2014.