



## بررسی تجربی تأثیر نانوذرات رس و سیلیکا در خواص مکانیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی

محمدحسین پل<sup>1\*</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2</sup>، عرفان مهربانی یگانه<sup>3</sup>، علی افروزیان<sup>4</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

2- استادمهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\*تفرش، صندوق پستی 14115-143، tafreshu.ac.ir، m\_h\_pol@

### چکیده

در این مقاله، تغییر خواص کششی ماده مرکب چندلایه شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده، بر اثر افزودن دو نوع نانو ذره مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. نانو مواد مرکب با 12 لایه الیاف شیشه بافته شده با کسر حجمی الیاف 40 درصد و به روش لایه چینی دستی تولید شده است. سیستم رزین نیز از یک دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع A (DGEBA) با نام تجاری ایپون 828 به عنوان پایه اپوکسی و یک پلی‌اکسیروپیلن دی‌آمین با وزن مولکولی 400gr/mol با نام تجاری جف‌آمین‌دی 400 به عنوان سخت‌کننده ساخته شده است. نانو رس معدنی و نانو سیلیکا به عنوان تقویت‌کننده به سیستم رزین (مجموع اپوکسی و سخت‌کننده) اضافه می‌شوند. نانو رس با نسبت‌های وزنی 0، 3، 5، 7 و 10 درصد و نانو سیلیکا نیز با نسبت‌های وزنی 0، 0/5، 1 و 3 درصد، درون رزین پخش می‌شوند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو رس در درصدهای پایین، تأثیر منفی بر خواص مکانیکی نانو ماده مرکب دارد. بیشترین افت خواص در 3 درصد وزنی مشاهده می‌شود. در 5 درصد وزنی نانو رس میزان جذب انرژی نمونه بیشینه است. در این حالت چقرمگی ماده 10% و استحکام کششی 7% افزایش را نشان می‌دهد. افزودن نانو سیلیکا به ماده مرکب برخلاف نانو رس، خواص را در درصدهای پایین بهبود می‌بخشد. به طوری که بیشترین افزایش خواص مکانیکی را می‌توان در نانو ماده مرکب با 0/5 درصد وزنی نانو سیلیکا مشاهده نمود. در این حالت استحکام کششی 10%، کرنش شکست 14% و چقرمگی ماده 27% افزایش پیدا می‌کند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 شهریور 1393

پذیرش: 26 شهریور 1393

ارائه در سایت: 06 آبان 1393

کلید واژگان:

نانو ماده مرکب

خواص مکانیکی

نانو رس

نانو سیلیکا

## Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites

Mohammad Hosein Pol<sup>1\*</sup>, Gholam Hosein Liaghat<sup>2</sup>, Erfan Mehrabani Yeganeh<sup>3</sup>, Ali Afrouzian<sup>4</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 14115-143 Tafresh, Iran, m\_h\_pol@tafreshu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 27 August 2014  
Accepted 17 September 2014  
Available Online 28 October 2014

#### Keywords:

Nanocomposite  
Mechanical properties  
Nanoclay  
Nanosilica

### ABSTRACT

In this paper, the tensile properties of 2D woven glass epoxy composite reinforced by two different nanoparticles have been investigated and compared. Hand lay-up method has been used to manufacture nanocomposites with 12 layers of 2D woven glass fibers with 40% fiber volume fraction. The nano-epoxy resin system is made of diglycidyl ether of bisphenol A (epon 828) resin with Jeffamine D400 as the curing agent. The composites were reinforced by adding organically modified montmorillonite nanoclay (Cloisite 30B) and nanosilica (SiO<sub>2</sub>) particles. The nanoclay particles were dispersed into the epoxy system in a 0%, 3%, 5%, 7% and 10% ratio in weight with respect to the matrix, while the spherical nanosilica particles were dispersed into the epoxy system in a 0%, 0.5%, 1% and 3% ratio in weight with respect to the matrix. The results show that low loading of nanoclay decreases the mechanical properties of nanocomposite, while significant improvements of nanocomposite mechanical properties are shown in low loading of nanosilica. Tensile strength and toughness of nanocomposite increase by 7% and 10% after adding 5 wt.% nanoclay. Loading of 0.5 wt.% nanosilica cause 10% and 27% improvement in tensile strength and toughness of nanocomposite.

### 1- مقدمه

ضربه‌ای مناسب، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد به منظور افزایش خواص مکانیکی چون استحکام و سختی، بهبود خواص حرارتی و کاهش اشتعال‌پذیری و نفوذپذیری مواد

در بسیاری از کاربردهای مهندسی، مواد مرکب به دلیل مزایایی چون استحکام و سختی به وزن زیاد، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و به‌ویژه خواص

Please cite this article using:

M. H. Pol, Gh. H. Liaghat, E. Mehrabani Yeganeh, A. Afrouzian, Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سفتی و چقرمگی ماده ایجاد می‌شود.

سیدیکوی و همکاران [10] به بررسی خواص نانو ماده مرکب کربن/اپوکسی تقویت شده با نانو رس پرداختند. آن‌ها نشان دادند در نانو ماده مرکب 3 درصد وزنی، مدول خمشی و چقرمگی شکست شبه‌استاتیک به- ترتیب 26 و 60 درصد افزایش می‌یابد، درحالی که تنها با افزودن 1 درصد نانو رس، چقرمگی شکست ضربه‌ای به شدت کاهش پیدا می‌کند.

تأثیر نانو سیلیکا بر ماده مرکب شیشه (تک جهت) اپوکسی توسط یودین و سان [11] بررسی شد. آن‌ها نشان دادند افزودن 15 درصد (وزنی) نانو سیلیکا، استحکام فشاری و مدول الاستیک را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. چن و همکاران [12] بهبود مدول و چقرمگی نانو ماده مرکب اپوکسی/نانو سیلیکا را شاهد بودند، بدون اینکه افزودن نانو ذرات سیلیکا تأثیری بر دمای کاری رزین داشته باشد. نتایج آزمایش خواص مکانیکی حاکی از بهبود 30 درصدی چقرمگی در درصدهای پایین نانو سیلیکا بوده است. تأثیر اضافه کردن نانو سیلیکا به ماده مرکب نایلون-پلی‌پروپیلن توسط جاکوب و همکارانش [13] انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه با 1 درصد وزنی نانو سیلیکا و 30 درصد وزنی الیاف نایلون، بالاترین استحکام کششی، مدول الاستیک و استحکام و مدول خمشی را دارد. همچنین، آن‌ها بیشترین استحکام ضربه‌ای را در نمونه با 1 درصد وزنی نانو سیلیکا و 10 درصد وزنی الیاف نایلون مشاهده نمودند.

کارپال و همکاران [14] با افزودن نانو رس به ماده مرکب شیشه/اپوکسی نشان دادند که با افزایش میزان نانو رس تا 5 درصد وزنی، استحکام کششی، مدول الاستیک، استحکام و مدول خمشی و استحکام برشی بین لایه‌ای افزایش می‌یابند، ولی با افزودن نانو رس بیشتر از 5 درصد، شاهد کاهش خواص مذکور بودند.

کنراد و همکاران [15] تأثیر افزودن 0/5 درصد حجمی نانو سیلیکا با دو قطر متفاوت، درون اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که افزودن نانو سیلیکا باعث زبری سطح شکست نمونه می‌شود. در هر دو قطر از نانو سیلیکا، مدول الاستیک به میزان 10 تا 20 درصد افزایش، کشیدگی تا شکست 5 تا 10 درصد کاهش و چقرمگی شکست 25 تا 30 درصد بهبود را نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که میزان جذب انرژی ضربه در نمونه حاوی نانو سیلیکا با قطر 30 نانومتر، 60 درصد و در نمونه حاوی ذرات 130 نانومتری، به میزان 30 درصد افزایش پیدا می‌کند. بررسی تأثیر نانو ذرات سیلیکا بر خواص ماده مرکب کربن- فنولیک توسط میرزاپور و همکارانش [16] نشان داد که استحکام خمشی با افزودن 3 درصد وزنی نانو سیلیکا، به میزان 13 درصد افزایش می‌یابد، اما در 5 درصد وزنی نانو سیلیکا، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند.

پل و همکاران [17] تأثیر افزودن نانو ذرات رس را بر مقاومت بالستیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان دادند که بیشترین جذب انرژی در ماده مرکب حاوی 3 درصد وزنی نانو رس و در سرعت نزدیک حد بالستیک روی می‌دهد.

رحیمی و همکاران [18] به مطالعه تأثیر افزودن نانو ذرات رسی بر خواص کششی و خمشی سیستم رزین اپوکسی سخت شده با سخت‌کننده تتا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدول کششی و خمشی و همچنین استحکام خمشی رزین اپوکسی با افزودن نانو ذرات رسی بهبود می‌یابد. حسینی و پل [19] با افزودن نانو ذرات رس به مواد مرکب چندلایه شیشه/اپوکسی ساخته شده با روش انتقال رزین به کمک خلا، نشان دادند که بیشترین افزایش خواص کششی و خمشی در حضور 3 و 7 درصد وزنی نانو

مرکب، مورد توجه فراوان قرار گرفته است. این بهبود در عملکرد عموماً، به- دلیل شکل فاز<sup>1</sup> بی‌نظیر و اصلاح خواص بین سطحی<sup>2</sup> رخ می‌دهد. از جمله نانومادی که به‌طور گسترده در مواد مرکب پایه پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به نانوذرات سیلیکا، نانو رس، نانوالیاف پلیمری الکترورسی<sup>3</sup> و نانولوله‌ها اشاره نمود. نانوذرات غیر ارگانیک مانند نانو رس و نانو سیلیکا، به دلیل قیمت پایین و ساخت و اصلاح ساده‌تر، کاربرد فراوانی به- عنوان ماده تقویت‌کننده در مواد مرکب پلیمری دارند.

طی چند سال اخیر، مطالعاتی در مورد نحوه تأثیر ذرات نانو بر مواد مرکب پایه پلیمری انجام شده است. گیلبرت و همکاران [1،2] نشان دادند، با افزودن درصدهای حجمی مختلف از نانو ذرات آهن به ماتریس پلیمری، چقرمگی شکست و استحکام برشی بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. تأثیر افزودن نانو ذرات رس توسط تیمرمن و همکاران [3]، مورد بررسی قرار گرفت، آن‌ها مقاومت به سیکل دمایی و همچنین خاصیت انبساط حرارتی مواد مرکب کربن/اپوکسی سنتی را با اضافه کردن نانو لایه‌های رس، به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیدند. افزودن نانو رس، کاهش عمده ترک‌های عرض را باعث شد.

هوگو و همکاران [4] با افزودن 1 درصد وزنی نانو سیلیکات به ماده مرکب شیشه/اپوکسی، شاهد افزایش 44 درصدی استحکام برشی بین لایه‌ای بودند. مقاومت خمشی و چقرمگی شکست نیز به ترتیب، 24 و 23 درصد افزایش را نشان دادند. این افزایش در خواص مکانیکی، عمدتاً ناشی از افزایش ناحیه تماس بین سطحی، بهبود خصوصیات پیوند و نوع شکل اینترکلیت/اکسفولیت ماتریس توجیه شد. خواص اپوکسی مخلوط شده با نانو ذرات سیلیکا با قطر متوسط 25 نانومتر، توسط ژانگ و همکاران [5] مورد مطالعه قرار گرفت. مدول الاستیک (استاتیک و دینامیک) و چقرمگی شکست، با بالا بردن میزان نانو سیلیکا تا 14 درصد حجمی (23 درصد وزنی)، افزایش پیدا کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع یکنواخت نانو ذرات سیلیکا می‌تواند سفتی و چقرمگی اپوکسی را به‌طور همزمان بهبود بخشد. بهبود بیشتر این خواص زمانی مشاهده شد که فاصله بین نانو ذرات سیلیکا کوچک‌تر از قطر نانو ذرات بودند.

یاسمین و همکاران [6]، با روش اختلاط برشی، نانو لایه‌های رس را در ماتریس اپوکسی پراکنده کردند. آن‌ها با افزودن نانو رس به میزان 10 درصد وزنی، افزایش 80 درصدی را در مدول الاستیک نانو اپوکسی شاهد بودند، اگرچه استحکام کششی ماده تغییر چندانی نداشت. کودهاری و همکارانش [7] تأثیر نانو رس بر ماده مرکب کربن/اپوکسی با الیاف بافته شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیشترین بهبود خواص را در حالت 2 درصد وزنی نانو رس مشاهده کردند. همچنین، هو و همکاران [8] با پراکنده کردن نانو رس در ماتریس اپوکسی، با درصدهای مختلف نشان دادند که بیشترین استحکام کششی نهایی در نمونه با 5 درصد وزنی نانو رس به وجود می‌آید. اگرچه نرمی ماده به شدت کاهش و نمونه بعد از تنش نهایی به صورت ناگهانی می‌شکند.

لیو و کنتپولو [9] به بررسی خواص نانو ماده مرکب TPO<sup>4</sup> متشکل از ماتریس پلی‌پروپیلن، جزء الاستومری اولفین و نانو ذرات سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) پرداختند. آن‌ها نشان دادند مدول کششی، خواص ضربه‌ای و خمشی در درصدهای پایین از نانو سیلیکا بهبود پیدا می‌کند و تعادل مناسبی مابین

1- Phase morphology  
2- Interfacial properties  
3- Electro-spun  
4- Thermoplastic PolyOlefin

رس به دست می‌آید. در این تحقیق، تأثیر افزودن دو نوع نانو ذره مختلف به مواد مرکب شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده، مورد بررسی قرار گرفته شده است. هدف اصلی این پژوهش مقایسه تأثیر دو نوع نانو ذره مختلف (نانو ذرات دارای ساختار لایه‌ای و کرووی) و همچنین اثر دو فرآیند پخت متفاوت، بر ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت بوده است. نانو ذرات رس با نسبت ۰ تا ۱۰ درصد وزنی و نانو ذرات سیلیکا با نسبت ۰ تا ۳ درصد وزنی به ماده مرکب شیشه/اپوکسی اضافه و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی نانو ماده مرکب، مطالعه شد.

## ۲- روش ساخت و مواد اولیه

### ۲-۱- مواد اولیه

نانومواد مرکب ساخته شده در این تحقیق، متشکل از یک ماده مرکب پایه پلیمری است که به آن دو نوع مختلف نانو ذره به صورت جداگانه اضافه می‌شود. برای ساخت ماده مرکب مذکور از الیاف شیشه نوع E دارای بافت دوبعدی و خواص طولی و عرضی مساوی، استفاده شده است. این الیاف دارای چگالی سطحی  $200 \text{ gr/m}^2$  و چگالی حجمی  $2400 \text{ kg/m}^3$  است. رزین پلیمری از دو بخش الف) یک دیگلیسیدیل‌تر بیسفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸، تولید شده توسط شرکت شل، به‌عنوان پایه اپوکسی و ب) یک پلی‌اکسیپروپیلن دی‌آمین با وزن مولکولی  $400 \text{ gr/mol}$  و با نام تجاری جف‌آمین‌دی ۴۰۰، ساخته شده توسط شرکت هانسن، به‌عنوان سخت‌کننده، تشکیل شده است.

دو نوع نانو ذره در این تحقیق استفاده شده است. نانو رس معدنی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه‌ای با نام تجاری مونتومریلیت اصلاح شده با نمک آمونیوم با نام تجاری کلوزیت 30B<sup>۱</sup> و نانو ذرات سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) به شکل کرووی، با ابعاد  $15-10 \text{ nm}$  و خلوص  $99/999$  درصد هستند.

### ۲-۲- ساخت نانومواد مرکب

برای ساخت نمونه‌ها، نانو ذرات رس با نسبت ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ و نانو ذرات سیلیکا با نسبت ۰، ۱/۵، ۱ و ۳ درصد وزنی از وزن کل رزین با جزء سخت‌کننده رزین مخلوط می‌شوند. کیفیت نانو مواد مرکب اساساً وابسته به نوع اصلاح سطحی ذرات نانو و پارامترهای فرآیند پخش کردن ذرات درون ماتریس است. با توجه به اینکه کیفیت پراکندگی نانو ذرات و همچنین وجود گاز در رزین تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی دارد، از این رو مخلوط کردن و گاززدایی مناسب رزین از اهمیت بالایی برخوردار است. برای تولید نانو رزین نخست مقدار مشخص از نانو ذره به جزء سخت‌کننده اضافه و به مدت ۶۰ دقیقه توسط همزن با سرعت  $3000 \text{ rpm}$  مخلوط می‌شود. سپس، برای حصول کیفیت مناسب اینترکلیت-اکسفولیت، توسط دستگاه اولتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه و باتوان  $150 \text{ kW/cm}^2$  سونیک می‌شود. پس از آن، به منظور اختلاط بهتر، بار دیگر به مدت ۱۵۰ دقیقه با سرعت  $3000 \text{ rpm}$  مخلوط می‌شود. برای گاززدایی، این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه درون آن خلاء قرار داده می‌شود. در نهایت برای تولید رزین، این مخلوط با اپوکسی ترکیب می‌شود. نسبت اختلاط جزء سخت‌کننده به پایه پلیمر، طبق پیشنهاد شرکت سازنده،  $55:100$  است.

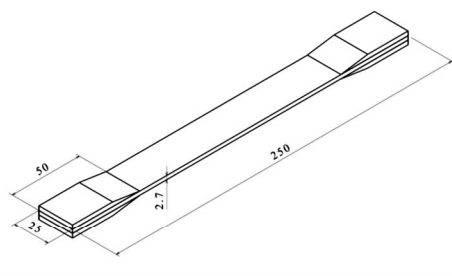
نانو مواد مرکب با ۱۲ لایه الیاف شیشه بافته شده با درصد حجمی الیاف ۴۰

## ۳- انجام آزمایش‌ها

ابعاد نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش کشش توسط استاندارد ASTM D3039 تعیین می‌شود. برای هر درصد نانو تعداد حداقل ۵ نمونه به منظور تکرار و اطمینان از نتیجه آزمایش ساخته شد. از این رو مجموعاً بیش از ۵۰ نمونه آزمایش تولید شد. قبل از انجام آزمایش‌های اصلی ده‌ها آزمایش فرعی کشش به منظور تعیین نوع اتصال و هندسه مناسب تب‌ها (به منظور عدم شکست نمونه از ابتدای تب) انجام شد. نتایج آزمایش‌های فرعی نشان دادند که استفاده از تب با زاویه انتهایی حدود ۸ درجه و چسب مناسب مابین تب و نمونه، موجب کاهش اثر تمرکز تنش و لغزش در دو انتهای قطعه شده و باعث ایجاد شکست استاندارد در نمونه‌ها می‌شود. نهایتاً، نمونه‌های نهایی مانند شکل ۱ تولید شدند. به منظور تکرارپذیری نتایج، برای هر درصد نانو بین ۳ تا ۵ بار آزمایش کشش با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه (شکل ۲) تکرار شد.

## ۴- نتایج و بحث

شکل ۳ و ۴ نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های رزین اپوکسی حاوی نانوذرات رس و نانوذرات سیلیکا را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است، کیفیت پخش‌شدگی نانو ذرات رس در زمینه اپوکسی،

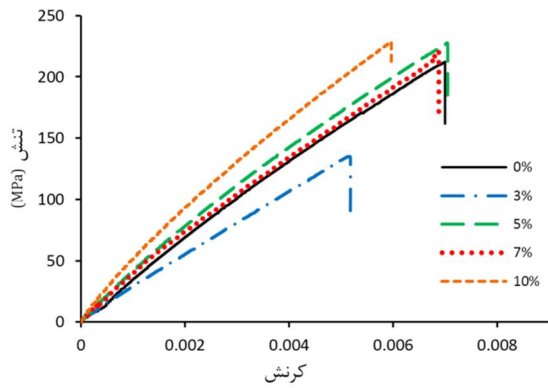


شکل ۱ نمونه تست کشش (ابعاد به میلی‌متر است)

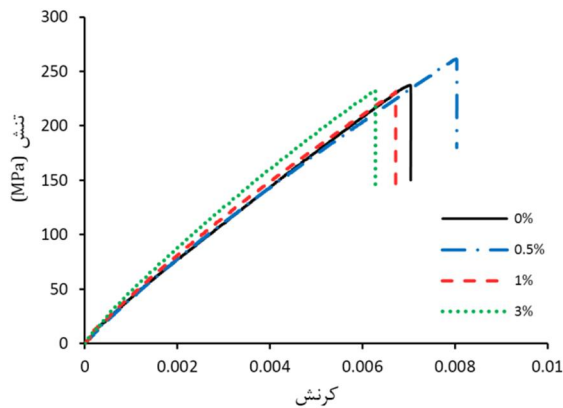


شکل ۲ نمونه تحت کشش، قبل و بعد از شکست

1- Cloisite30B



شکل 5 نمودار تنش-کرنش نانو ماده مرکب با درصدهای مختلف نانو رس



شکل 6 نمودار تنش-کرنش نانو ماده مرکب با درصدهای مختلف نانو سیلیکا

#### 4-1- تأثیر نحوه پخت ماده مرکب

همان گونه که از مقایسه خواص مکانیکی مواد مرکب بدون نانو، در جدول 2 مشخص است، هنگامی که پخت اولیه ماده مرکب در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  صورت می‌گیرد، می‌توان بهبود در خواص را نسبت به حالتی که پخت اولیه در دمای اتاق صورت می‌گیرد، شاهد بود. در این حالت استحکام کششی و چقرمگی ماده مرکب، افزایش 10 درصدی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت، فرآیند پخت اولیه با اعمال حرارت، کیفیت اتصال الیاف و ماتریس را در محصول نهایی افزایش می‌دهد.

#### 4-2- تأثیر ذرات نانو بر ماده مرکب

##### 4-2-1- مدول الاستیک

نتایج نشان می‌دهند که افزودن هر دو نوع نانو ذره مذکور، باعث افزایش مدول الاستیک نانو ماده مرکب می‌شود. با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، مدول الاستیک به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، به‌طوری که بیشترین افزایش در هر دو حالت، در بیشترین درصد وزنی نانو دیده می‌شود.

جدول 2 مقایسه تأثیر نحوه پخت بر خواص مکانیکی ماده مرکب بدون نانو

چقرمگی (MPa)	کرنش شکست (درصد)	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	دمای پخت اولیه
0/88	0/7	237	38/6	دمای پخت اولیه $80^{\circ}\text{C}$
0/79	0/7	212/5	37/7	پخت اولیه در دمای اتاق

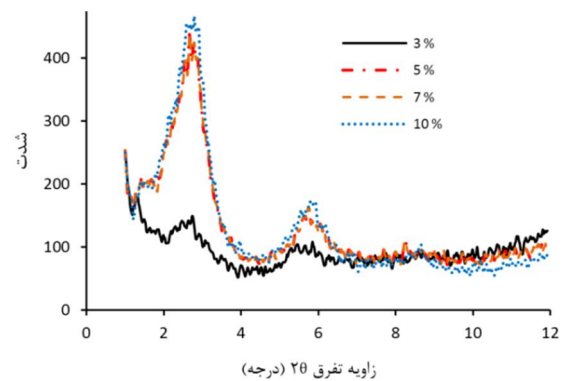
بیش از آنکه به‌صورت اکسفولیت باشد به‌صورت اینترکلیت است. نتایج نشان می‌دهند که در این حالت، فاصله صفحات نانو رس بیش از دو برابر حالت خالص آن (18/61Å) است.

کیفیت پخش اینترکلیت و اکسفولیت کامل باعث می‌شود تا مساحت بین سطحی ذرات نانو و زمینه پلیمری، نسبت به حالتی که ساختار نانو انباشته و متراکم است، افزایش پیدا کند.

شکل 4 بیانگر این موضوع است که با یک فرآیند ثابت پخش ذرات نانو، نانوذرات سیلیکا پراکنندگی بهتری را نسبت به نانو ذرات رس نشان می‌دهند. به‌طوری که کیفیت پخش‌شدگی نانو ذرات سیلیکا درون رزین اپوکسی کاملاً به‌صورت اکسفولیت است. در این حالت، نمودار پراش اشعه ایکس برای ذرات خالص نانو سیلیکا، فاصله ذرات نانو را  $110/13\text{\AA}$  نشان می‌دهد. خلاصه نتایج شکل 3 در جدول 1 ارائه شده است.

بعد از انجام آزمایش کشش، نمودار تنش-کرنش نانو ماده مرکب با درصدهای مختلف نانو رس، به‌صورت شکل 5 حاصل می‌شود. نمودار تنش-کرنش نانو ماده مرکب با درصدهای مختلف نانو سیلیکا نیز به‌صورت شکل 6 ارائه می‌شود.

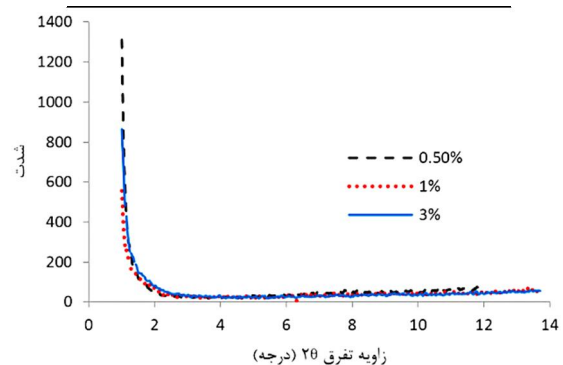
خلاصه نتایج آزمایش کشش را می‌توان در شکل 7 برای ماده مرکب حاوی نانو رس و شکل 8 برای نانو ماده مرکب حاوی نانو سیلیکا مشاهده نمود.



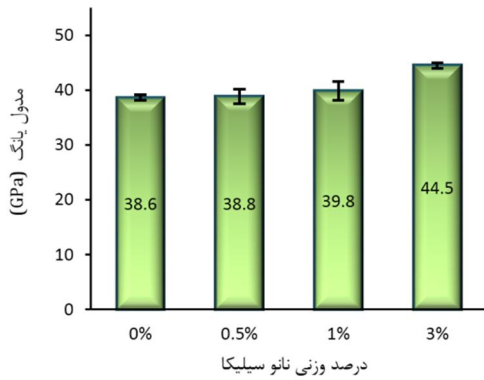
شکل 3 منحنی‌های پراش اشعه ایکس اپوکسی/نانو رس در درصدهای مختلف

جدول 1 زاویه جدایش و فاصله  $d$  نانو مواد مرکب برحسب درصد نانو رس

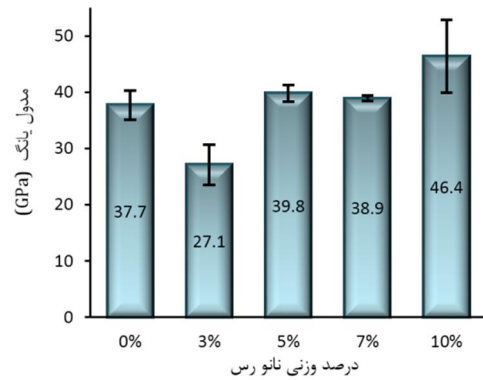
$d$ (Å)	$2\theta^{\circ}$	درصد وزنی نانو رس
38/16	2/69	3%
37/76	2/71	5%
38/70	2/65	7%
37/66	2/72	10%



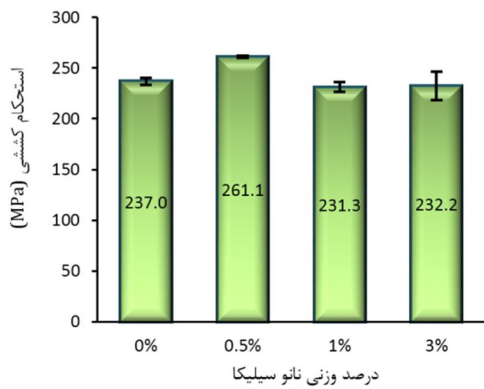
شکل 4 منحنی‌های پراش اشعه ایکس اپوکسی/نانو سیلیکا در درصدهای مختلف



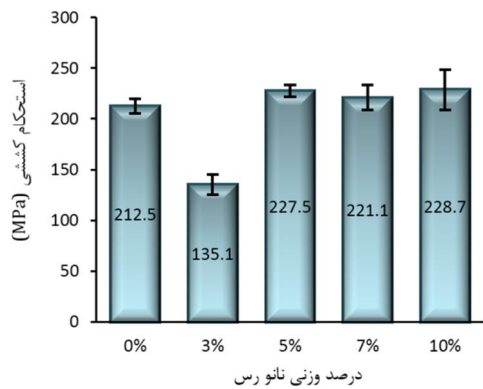
الف) تغییرات مدول الاستیک برحسب درصد وزنی نانو سیلیکا



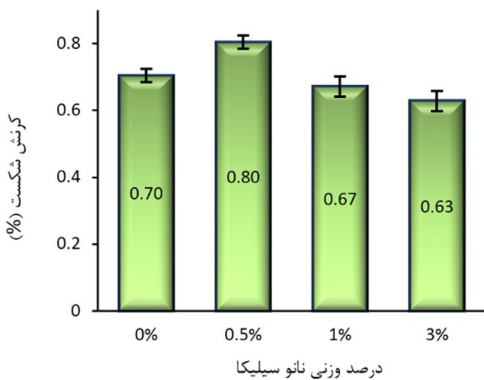
الف) تغییرات مدول الاستیک برحسب درصد وزنی نانو رس



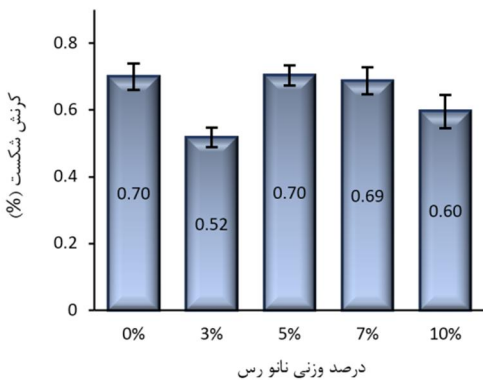
ب) تغییرات استحکام کششی برحسب درصد وزنی نانو سیلیکا



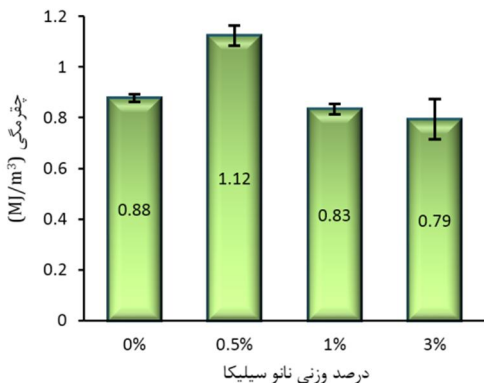
ب) تغییرات استحکام کششی برحسب درصد وزنی نانو رس



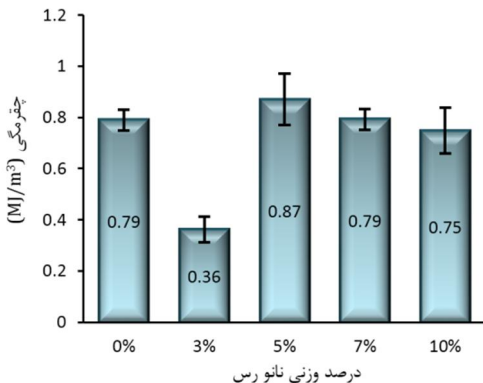
ج) تغییرات کرنش شکست برحسب درصد وزنی نانو سیلیکا



ج) تغییرات کرنش شکست برحسب درصد وزنی نانو رس



د) تغییرات چقرمگی برحسب درصد وزنی نانو سیلیکا



د) تغییرات چقرمگی برحسب درصد وزنی نانو رس

شکل 8 تغییرات خواص کششی نانو ماده مرکب برحسب درصدهای وزنی مختلف نانو سیلیکا

شکل 7 تغییرات خواص کششی نانو ماده مرکب برحسب درصدهای وزنی مختلف نانو رس

را ماده مرکب حاوی 3 درصد وزنی نانو رس و به میزان 54% ارائه می‌کند. با مشاهده نمودار 7-د و 8-د، می‌توان نتیجه گرفت که حالت بهینه به منظور افزایش خواص مکانیکی، برای ماده مرکب حاوی نانو رس در 5 درصد وزنی و برای ماده مرکب حاوی نانو سیلیکا در 0/5 درصد وزنی رخ می‌دهد.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر افزودن دو نوع نانو ذره مختلف به ماده مرکب شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نانو ذرات رس با نسبت‌های 0 تا 10 درصد وزنی و نانو ذرات سیلیکا با نسبت‌های 0 تا 3 درصد وزنی به ماده مرکب شیشه/اپوکسی اضافه و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی ماده مرکب، مطالعه شد.

بررسی نتایج نشان دادند که افزودن نانو رس در درصدهای پایین، تأثیر منفی بر خواص مکانیکی نانو ماده مرکب دارد. درحالی که افزودن نانو سیلیکا به ماده مرکب برخلاف نانو رس، خواص را در درصدهای پایین بهبود می‌بخشد.

افزایش مقدار ذرات نانو موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌شود. نتیجه این امر افزایش پیوسته مدول الاستیک با بیشتر کردن درصد وزنی ذرات نانو است.

در 5 درصد وزنی نانو رس میزان جذب انرژی نمونه بیشینه است. در این حالت چقرمگی ماده 10% و استحکام کششی 7% افزایش را نشان می‌دهد. نانو ماده مرکب با 0/5 درصد وزنی نانو سیلیکا، بیشترین افزایش خواص مکانیکی را ارائه می‌کند. در این حالت استحکام کششی 10%، کرنش شکست 14% و چقرمگی ماده 27% افزایش پیدا می‌کند.

کاهش کرنش شکست و افزایش مدول یانگ در درصدهای وزنی بالا بیانگر این موضوع است که با بالا بردن میزان غلظت ذرات نانو درون رزین، نانو ماده مرکب به سمت تردی پیش می‌رود.

#### 6- مراجع

- [1] E. N. Gilbert, B. S. Hayes, J. C. Seferis, Metal particle modification of composite matrices for customized density applications, *Polymer Composites*, Vol. 23, pp. 132-140, 2002.
- [2] E. N. Gilbert, B. S. Hayes, J. C. Seferis, Variable Density Composite Systems Constructed by Metal Particle Modified Prepregs, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, pp. 2045-2060, 2002.
- [3] J. F. Timmerman, B. S. Hayes, J. C. Seferis, Nanoclay reinforcement effects on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1249-1258, 2002.
- [4] A. Haque, M. Shamsuzzoha, F. Hussain, D. Dean, S2-Glass/Epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties, *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, pp. 1821-1837, 2003.
- [5] H. Zhang, Z. Zhang, K. Friedrich, C. Eger, Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content, *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1833-1842, 2006.
- [6] A. Yasmin, J. L. Abot, I. M. Daniel, Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing, *Scripta Materialia*, Vol. 49, pp. 81-86, 2003.
- [7] F. H. Chowdhury, M. V. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, pp. 298-306, 2006.
- [8] M. W. Ho, C. K. Lam, K. t. Lau, D. H. L. Ng, D. Hui, Mechanical properties of epoxy-based composites using nanoclays, *Composite Structures*, Vol. 75, pp. 415-421, 2006.
- [9] Y. Liu, M. Kontopoulou, The structure and physical properties of polypropylene and thermoplastic olefin nanocomposites containing nanosilica, *Polymer*, Vol. 47, pp. 7731-7739, 2006.
- [10] N. A. Siddiqui, R. S. C. Woo, J.-K. Kim, C. C. K. Leung, A. Munir, Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, pp. 449-460, 2007.
- [11] M. F. Uddin, C. T. Sun, Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 1637-1643, 2008.

مدول الاستیک در 10 درصد وزنی نانو رس، 23% و در 3 درصد وزنی نانو سیلیکا 15% نسبت به حالت خالص، افزایش نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 7-الف مشخص است، نانو رس در درصدهای وزنی پایین، باعث کاهش مدول الاستیک می‌شود. به طوری که نانو ماده مرکب با 3 درصد وزنی نانو رس، 28% کاهش مدول الاستیک را نشان می‌دهد.

افزایش پیوسته مدول الاستیک با بیشتر کردن درصد وزنی ذرات نانو، به دلیل پخش‌شدگی مناسب ذرات نانو داخل زمینه پلیمری رخ می‌دهد. افزایش مقدار ذرات نانو همراه با پخش‌شدگی مناسب این ذرات، باعث افزایش پیوند و چسبندگی بین سطحی ذرات نانو و زمینه پلیمری شده که موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌شود. نتیجه این امر افزایش مدول الاستیک نانو ماده مرکب است [6].

#### 4-2-2- استحکام کششی

مشاهده شکل 7-ب و 8-ب بیانگر این موضوع است که نانو ذرات سیلیکا برخلاف نانو ذرات رس، در درصدهای وزنی پایین باعث افزایش استحکام نانو ماده مرکب می‌شوند. افزودن 0/5 درصد وزنی نانو سیلیکا به ماده مرکب، استحکام آن را 10% افزایش می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر نانو سیلیکا استحکام تفاوت چندانی با حالت خالص نشان نمی‌دهد. این در حالی است که ماده مرکب با 3 درصد وزنی نانو رس، کاهش شدید استحکام (36% کاهش) را ارائه می‌کند. درصدهای وزنی بالاتر از 3 درصد نانو رس، دارای استحکام کششی تقریباً ثابتی هستند و حدود 7% بهبود را نشان می‌دهند.

در صورتی که مقدار نانو ذرات پخش شده در زمینه پلیمری مناسب باشند، وجود این ذرات نانو باعث کاهش تحرک ماتریس پلیمری در سطح مشترک بین ذرات نانو و ماتریس و همچنین سطح مشترک الیاف شیشه و ماتریس پلیمری می‌شود. این امر باعث انتقال بهتر تنش به الیاف شیشه و در نتیجه افزایش استحکام نانو ماده مرکب می‌شود [14].

از یک مقدار درصد وزنی به بعد، هرچه مقدار ذرات نانو افزایش پیدا کند، استحکام نانو ماده مرکب کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به تجمع توده‌های نانو ذره با افزایش مقدار نانو، نسبت داد که خود زمینه ساز رشد ترک و ایجاد تمرکز تنش در نانو ماده مرکب و شکست ماده در مقدار تنش‌های کمتر می‌شود [10، 4].

#### 4-2-3- کرنش شکست

در مورد کرنش شکست نیز درصدهای وزنی پایین نانو سیلیکا بهبود (14% افزایش در 0/5 درصد وزنی نانو سیلیکا) و درصدهای وزنی پایین نانو رس نزول (26% کاهش در 3 درصد وزنی نانو رس) را نشان می‌دهند. در درصدهای وزنی بالا، ذرات نانو مانع شکل‌گیری شبکه پیوسته در ماتریس پلیمری می‌شوند [16].

در هر دو نوع نانو ذره، کاهش کرنش شکست و افزایش مدول یانگ در درصدهای وزنی بالا بیانگر این موضوع است که با بالا بردن میزان غلظت ذرات نانو درون رزین، نانو ماده مرکب به سمت تردی پیش می‌رود درحالی که استحکام ماده تقریباً ثابت می‌ماند.

#### 4-2-4- چقرمگی

تأثیر همزمان مدول الاستیک، استحکام کششی و کرنش شکست ماده مرکب را می‌توان در سطح زیر نمودار تنش-کرنش یا به عبارت دیگر چقرمگی ماده، مشاهده نمود. بیشترین افزایش چقرمگی در ماده مرکب حاوی 0/5 درصد وزنی نانو سیلیکا و به میزان 27% مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش چقرمگی

- [16] A. Mirzapour, M. H. Asadollahi, S. Baghshaei, M. Akbari, Effect of nanosilica on the microstructure, thermal properties and bending strength of nanosilica modified carbon fiber/phenolic nanocomposite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 63, pp. 159-167, 2014.
- [17] M. H. Pol, G. Liaghat, E. Zamani, A. Ordys, Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites, *Journal of Composite Materials*, 2014.
- [18] Gh. H. Rahimi, R. Zamani, M. H. Pol, Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with clay, *Modares Mechanical Engineering*, 2014. (In Persian)
- [19] S. A. Hoseini, M. H. Pol, Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles, *Modares Mechanical Engineering*, 2014. (In Persian)
- [12] C. Chen, R. S. Justice, D. W. Schaefer, J. W. Baur, Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties, *Polymer*, Vol. 49, pp. 3805-3815, 2008.
- [13] S. Jacob, K. K. Suma, J. M. Mendez, K. E. George, Reinforcing effect of nanosilica on polypropylene-nylon fibre composite, *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 168, pp. 245-249, 2010.
- [14] J. J. Karippal, H. N. Narasimha Murthy, K. S. Rai, M. Sreejith, M. Krishna, Study of mechanical properties of epoxy/glass/nanoclay hybrid composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, pp. 1893-1899, 2011.
- [15] M. Conradi, M. Zorko, A. Kocijan, I. Verpoest, Mechanical properties of epoxy composites reinforced with a low volume fraction of nanosilica fillers, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 137, pp. 910-915, 2013.