



تأثیرات افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی

محمود مهرداد شکریه^{1*}، افشین زین‌الدینی²، سیدمحمد قریشی³

1-استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
2-دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
3-دانشجوی کارشناسی ارشد، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
*تهران، صندوق پستی 16846-13114، shokrieh@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 اردیبهشت 1394

پذیرش: 12 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

اپوکسی

الیاف شیشه

خواص مکانیکی

کامپوزیت لایه‌ای

نانولوله کربنی چندجداره

هدف تحقیق کنونی، مطالعه میزان اثربخشی وجود نانولوله‌های کربنی چندجداره با طول بلند، بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف تک‌جهته شیشه است؛ بنابراین خواص مکانیکی پلیمر (اپوکسی خالص)، نانوکامپوزیت حاوی 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره، کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی حاوی 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مختلف استخراج می‌شود. مدول و استحکام کششی، خمشی و برشی پلیمر اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره از آزمایش مشخصه‌سازی می‌شود. سپس برای کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی تقویت‌شده با 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره، مقادیر سفتی و استحکام کششی طولی و عرضی و همچنین سفتی و استحکام خمشی و برشی داخل صفحه‌ای مقایسه می‌شوند. نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های کششی نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نشان می‌دهند که حضور نانولوله‌های کربنی چند جداره با طول بلند سبب افزایش چسبندگی و برهم‌کنش الیاف لایه‌های مجاور شده و سبب می‌شود که مکانیزم‌های تخریبی چون شکست الیاف در آزمایش کشش طولی و یا جدایش لایه‌ای در آزمایش برش داخل صفحه‌ای به‌طور قابل ملاحظه‌ای به تأخیر افتد. می‌توان بیان داشت که بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای نسبت به رزین با افزودن نانولوله‌های کربنی نمود بیشتری دارد. برای نمونه مقدار استحکام کششی در راستای طولی و استحکام برشی نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای به ترتیب 34% و 26% نسبت به کامپوزیت لایه‌ای رشد می‌کنند.

Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites

Mahmood Mehرداد Shokrieh*, Afshin Zeinedini, Seyed Mohammad Ghoreishi

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran. University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 May 2015
Accepted 03 July 2015
Available Online 15 August 2015

Keywords:

Epoxy
multi-walled carbon nanotubes
glass fiber
mechanical properties
laminated composites

ABSTRACT

The purpose of the present research is to investigate effects of long multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on mechanical properties of epoxy resin and unidirectional glass fiber reinforced laminated polymeric composites. Therefore, mechanical properties of polymer (pristine resin), 0.5 wt.% MWCNT/epoxy nano-composites, E-glass/epoxy laminated composites and 0.5 wt.% MWCNT/E-glass/epoxy laminated nano-composites were evaluated. The tensile, flexural and shear moduli and strengths of epoxy polymer and nano-composites reinforced with 0.5 wt.% MWCNTs were experimentally characterized. Next, the longitudinal and transverse tensile stiffness and strength, also in-plane shear and flexural moduli and the strength of glass fiber laminated composites and glass fiber laminated nano-composites reinforced with 0.5 wt.% MWCNTs were determined. Experimental results of tensile specimens of laminated nano-composites reveal that the presence of the long MWCNTs improves the bounding properties of fibers in adjacent plies and postpones the failure mechanisms like fiber fracture under tension or edge delamination under shear loading conditions. It can be concluded that the improvement of mechanical properties in laminated composites is more significant than those of the pure epoxy with addition of long multiwall carbon nanotubes. For instance, the longitudinal tensile strength and shear strength of laminated nanocomposites increased by 34% and 26% in comparison with laminated composites, respectively.

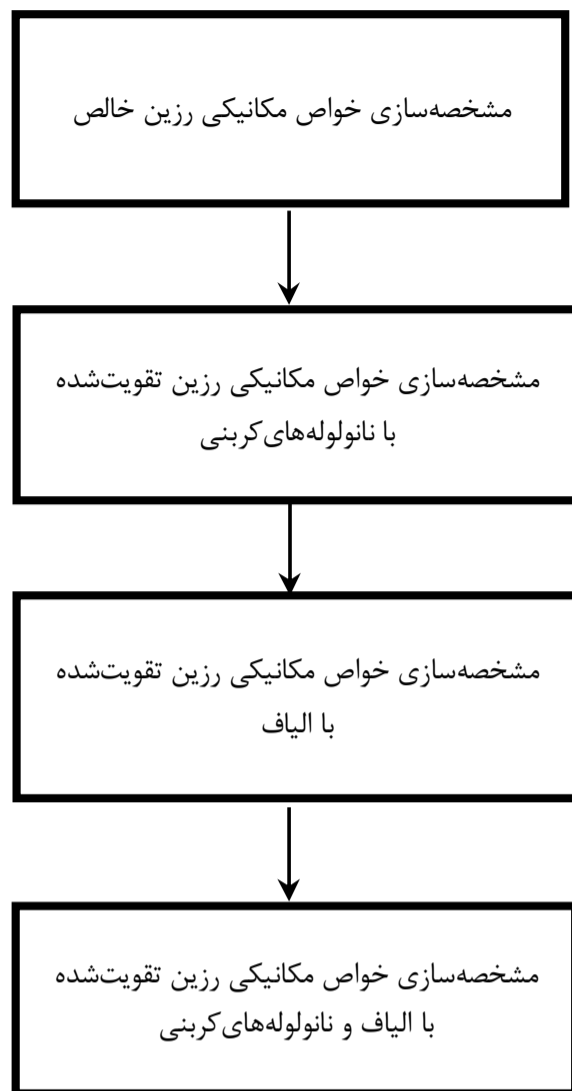
1- مقدمه

با کاربرد روز افزون کامپوزیت‌های لایه‌ای، تلاش جهت بهبود خواص مکانیکی این دسته از مواد امری اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به محدودیت وزنی سازه‌هایی که از مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند، تلاش‌هایی در جهت بهبود

Please cite this article using:

M. M. Shokrieh, A. Zeinedini, S. M. Ghoreishi, Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 125-133, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 شمای کلی از مراحل انجام مطالعات تجربی در تحقیق حاضر

می‌گیرد. در گام بعدی، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره بر خواص مکانیکی پلیمرها، زمینه کامپوزیت‌های لایه‌ای، مطالعه می‌شود. در این مرحله، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها² استخراج می‌شود. در گام سوم، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، کامپوزیت‌های لایه‌ای³ الیاف شیشه/ اپوکسی مشخصه‌سازی می‌شوند. در گام آخر، با افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره در کامپوزیت‌های لایه‌ای، نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای⁴ ایجاد و خواص مکانیکی آن‌ها به روش تجربی اندازه‌گیری می‌شوند. در نهایت، با مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده از چهار مرحله، می‌توان اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره و الیاف شیشه و یا ترکیبی از آن‌ها بر مقدار خواص مکانیکی پلیمر اپوکسی را مشاهده کرد.

2- انتخاب مواد اولیه

2-1- رزین

در میان انواع پلیمرهای مختلف، اپوکسی‌ها به دلیل خواص مکانیکی بسیار خوب و مقاومت شیمیایی بالا کاربردهای صنعتی زیادی به‌ویژه در صنایع حساس مانند صنایع هوافضا دارند. به این دلیل محققین مختلف تلاش‌های فراوانی را برای بهبود خواص مکانیکی آن‌ها استفاده کرده‌اند. رزین اپوکسی ایپون 826 به جهت کاربرد صنعتی آن به‌عنوان پلیمر پایه انتخاب شد (جدول 1).

از آنجایی که در این تحقیق، نمونه‌های رزین خالص و نانوکامپوزیت به روش قالب‌ریزی و نمونه‌های کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای به روش دستی ساخته می‌شوند، بنابراین رزین اپوکسی با گرانش متوسط انتخاب می‌شود، همچنین ماندگاری بالا (عدم تغییر خواص این رزین در

خواص مکانیکی بدون افزایش وزن صورت گرفته است. نانوذره‌ها از جمله افزودنی‌هایی هستند که بدون تغییر در وزن کامپوزیت لایه‌ای، رفتار مکانیکی این مواد تحت بارگذاری‌های کششی، خمشی و برشی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این میان، نانولوله‌های کربنی علاوه بر این که استحکام بسیار بالایی دارند، از انعطاف و پیچش‌پذیری خوبی نیز برخوردارند. نانولوله‌های کربنی دارای پیوندهای کوالانسی مستحکم در ساختار اتمی خود است و به این دلیل در برابر نیروهای کششی مقاومت و استحکام زیادی از خود نشان می‌دهند. از میان نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و چندجداره، هدف بررسی اثر افزودن نانولوله‌های چندجداره بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای است. دلیل این انتخاب در دسترس بودن و ارزان‌تر بودن به واسطه تولید انبوه این نانولوله‌هاست؛ بنابراین تمایل بیشتری به استفاده از این نانولوله‌های کربنی در کاربردهای صنعتی است. تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است تا از نانوذره‌ها و به‌ویژه نانولوله‌های کربنی در تولید مواد مرکب با کارایی بالا استفاده شود [1-3]. شکرپه و همکاران [4] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره بر مقادیر پارامترهای مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی استر را مورد بررسی قرار دادند. ایشان پارامترهای مکانیکی استحکام کششی، مدول کششی، استحکام خمشی و مدول خمشی نانوکامپوزیت‌های نانولوله/ پلی‌استر را مطالعه کردند. رامانا و همکاران [5] پارامترهای مکانیکی تحت بار خمشی را در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی نانوکامپوزیت‌های پلیمری اپوکسی را مطالعه کردند. در مقاله مدول و استحکام خمشی نانوکامپوزیت نانولوله‌ها/ اپوکسی در اثر افزودن درصد‌های وزنی مختلف از نانولوله‌ها به روش تجربی تعیین شده‌اند. چو و دنیل [6] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف کربن/ اپوکسی تحت بار فشاری را مورد بررسی قرار دادند. ایشان اثر افزودن نانولوله‌های مختلف بر مقادیر استحکام فشاری، مدول فشاری و استحکام برشی بین‌لایه‌ای را مطالعه کردند. مطالعه قیان و همکاران [7] نشان دادند که با افزودن 1 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به رزین، سفتی الاستیک کامپوزیت حاصل بین 36 تا 42 درصد و استحکام کششی 25 درصد افزایش می‌یابد. اسچادلر و همکاران [8] دریافتند که سفتی مؤثر رزین اپوکسی مسلح‌شده با نانولوله کربنی با افزودن 5 درصد وزنی نانولوله کربنی، به میزان 40 درصد در مقایسه با رزین اپوکسی تنها رشد از خود نشان می‌دهد. ژوو همکاران [9] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی در رزین اپوکسی را تحت بار کششی مشاهده کرده و متوجه شدند که رشدی معادل با 30 تا 70 درصد در استحکام کششی به‌ترتیب با افزودن 1 تا 4 درصد وزنی نانولوله، قابل حصول است.

به‌طور کلی تصور می‌شود که تأثیر نانولوله‌های کربنی باید بر رزین خالص نمود بیشتری داشته باشد و در حضور الیاف بلند تأثیر قابل توجهی از نانولوله مشاهده نخواهد شد. هدف اصلی مقاله حاضر این است که نشان دهد آیا حضور نانوذره تنها به‌عنوان تقویت‌کننده در ماده زمینه نقش خواهد داشت و یا آن که می‌تواند در حضور الیاف نیز اثر تقویت‌کنندگی متفاوتی نشان دهد. برای این منظور به بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر مقدار خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های لایه‌ای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه خواهیم پرداخت. برای دستیابی به این هدف، چهار مرحله آزمایش‌های تجربی برای استخراج خواص مکانیکی در نظر گرفته می‌شود (شکل 1).

در ابتدا خواص مکانیکی پلیمر خالص¹ به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار

2- Nano composites
3- Laminated composites
4- Laminated nano composites

1- Pristine resin

نظر می‌رسد. نمونه‌هایی مطابق استانداردهای ASTM D638 [11] و ASTM D790 [12] که به ترتیب روش انجام آزمایش کشش و خمش است، ساخته می‌شوند. این دسته از آزمایش‌ها و نتایجی که از انجام این آزمایش‌ها به دست می‌آیند، در جدول 4 به صورت خلاصه آورده شده‌اند.

3-2- گام دوم: آزمایش‌های رزین تقویت‌شده با نانولوله کربنی برای استخراج خواص مکانیکی

در این مرحله پس از انتخاب نانولوله‌های کربنی، مشخصه‌سازی مکانیکی رزین تقویت شده با نانولوله‌های کربنی انجام می‌گیرد. نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D638 [11] و ASTM D790 [12] ساخته شده و مورد آزمایش کشش و خمش سه نقطه قرار گرفته‌اند. این دسته از آزمایش‌ها و نتایجی که از انجام این آزمایش‌ها به دست می‌آیند، در جدول 4 به صورت خلاصه آورده شده‌اند.

3-3- گام سوم: آزمایش‌های رزین تقویت‌شده با الیاف برای استخراج خواص مکانیکی

پس از ساخت نمونه‌هایی از جنس رزین خالص و رزین تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، در این مرحله پس از انتخاب الیاف تک‌جهته، مشخصه‌سازی مکانیکی رزین تقویت‌شده با الیاف انجام می‌گیرد. آزمایش کشش در راستای الیاف، آزمایش کشش در راستای عمود بر الیاف، خمش و برش از جمله آزمایش‌های انجام گرفته در این بخش هستند. نمونه‌ها مطابق استانداردهای ASTM D790 [12]، ASTM D3039 [13] و ASTM D3518 [14] ساخته می‌شوند. در بخشی از جدول 5 این دسته از آزمایش‌ها و نتایج حاصل از انجام آن‌ها به صورت خلاصه آورده شده‌اند.

3-4- گام چهارم: آزمایش‌های رزین تقویت‌شده با الیاف و نانولوله کربنی برای استخراج خواص مکانیکی

پس از ساخت نمونه‌هایی از جنس رزین خالص، رزین تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی و رزین تقویت‌شده با الیاف، در این مرحله مشخصه‌سازی مکانیکی کامپوزیت ساخته شده از رزین، الیاف و نانولوله‌های کربنی مطالعه می‌شود. برای این منظور سه دسته آزمایش شامل آزمایش کشش در راستای

جدول 4 آزمایش‌های مورد نیاز برای استخراج خواص مکانیکی رزین خالص و رزین تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی

| نوع آزمایش | نتایج |
|-------------|--------------------------------|
| کشش | مدول یانگ و استحکام نهایی کششی |
| خمش سه نقطه | مدول و استحکام نهایی خمشی |

جدول 5 آزمایش‌های مورد نیاز برای استخراج خواص مکانیکی رزین تقویت‌شده با الیاف و رزین تقویت‌شده با هیبریدی از الیاف و نانولوله‌های کربنی

| نوع آزمایش | نتایج |
|-----------------------------|--|
| کشش در راستای الیاف | سفتی کششی طولی (E_1) و استحکام کششی نهایی طولی (X_T) |
| کشش در راستای عمود بر الیاف | سفتی کششی عرضی (E_2) و استحکام کششی نهایی عرضی (Y_T) |
| کشش الیاف ضربدری | سفتی برشی داخل صفحه‌ای (G) و استحکام برشی نهایی داخل صفحه‌ای (S) |
| خمش سه نقطه | سفتی خمشی طولی (E_{fx}) و استحکام خمشی نهایی طولی (B) |

شرایط انبارداری طولانی مدت) از دلایل مهم انتخاب آن است. برای این نوع رزین، از سخت‌کننده اپیکور 3234 با نام تجاری تتا¹ استفاده شده است.

2-2- نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی مورد استفاده در این مطالعه از شرکت نانوامور² [10] خریداری شده‌اند (شکل 2). تمام محصولات شرکت یادشده با استفاده از روش رسوب شیمیایی فاز بخار تولید شده‌اند. مشخصات نانولوله‌های کربنی چندجداره در جدول 2 ارائه شده است.

2-3- الیاف

الیاف شیشه سری «ای» به دلایلی چون مقرون به صرفه بودن و کاربرد بسیار وسیع‌تر در صنعت کامپوزیت نسبت به الیاف دیگر به عنوان الیاف بلند در قطعات کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای برگزیده شده‌اند. مشخصات الیاف انتخاب‌شده در این تحقیق در جدول 3 یاد شده است. الیاف به کار رفته برای ساخت نمونه‌ها، ساخت شرکت سونمز کشور ترکیه است.

3- فرایند آزمایشات

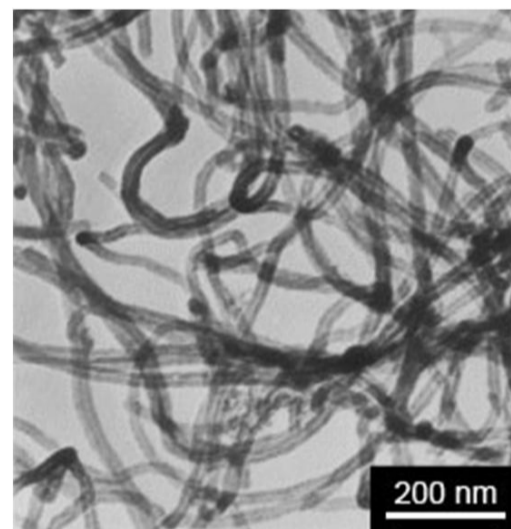
3-1- گام نخست: آزمایش‌های رزین خالص برای استخراج خواص مکانیکی مربوطه

در این مرحله پس از انتخاب رزین، مشخصه‌سازی مکانیکی رزین خالص انجام می‌گیرد. برای دستیابی به این مهم انجام چندین آزمایش ضروری به

جدول 1 نسبت ترکیبی رزین و سخت‌کننده*

| نام ماده | نسبت ترکیب (واحد) | چگالی (g/m^3) |
|-------------|-------------------|-------------------|
| ایپون 826 | 100 | 1/16 |
| اپیکور 3234 | 13 | 1/10 |

*Momentive Specialty Chemicals, Inc. (Ohio, U.S.)



شکل 2 تصویر از پودر نانولوله کربنی چندجداره استفاده‌شده [10]

جدول 2 مشخصات نانولوله‌های کربنی

| نام ماده | قطر خارجی (nm) | قطر داخلی (nm) | طول (μm) |
|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| نانولوله کربنی چندجداره | 30-50 | 5-15 | 10-30 |

جدول 3 مشخصات الیاف شیشه

| نام ماده | بافت | چگالی سطحی (g/m^2) | درصد وزنی نخ عرضی |
|------------|---------|------------------------|-------------------|
| الیاف شیشه | تک‌جهته | 236 | 2/88 |

1-TETA (Triethylene-tetramine)

2- Nanoamor

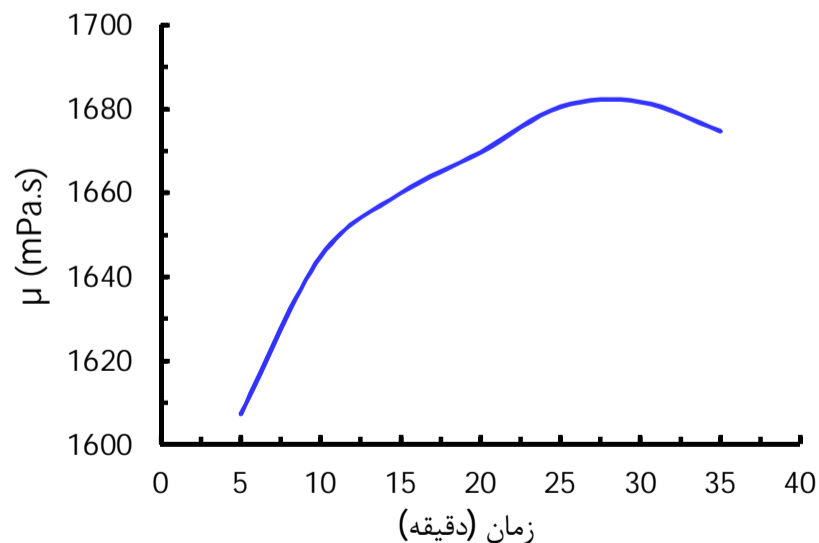
فرایند تا 24 ساعت ارزیابی شده است [15 و 16]. بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش زمان پس از حدود 25 دقیقه تأثیر چندانی بر کیفیت پراکندگی نخواهد داشت؛ بنابراین در این مرحله مخلوط به مدت 30 دقیقه و با سرعت 000.2 دور بر دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط شد.

4-2-2- تعیین زمان انرژی‌دهی مافوق صوت²

این مرحله سبب ایجاد یک توزیع یکنواخت از نانولوله‌های کربنی در ماتریس می‌شود. برای توزیع نانولوله‌های کربنی در ماتریس، روش امواج مافوق صوت به کار گرفته می‌شود، (شکل 3). در روش امواج مافوق صوت، ارسال این امواج سبب جدا شدن کلوخه‌های نانولوله کربنی می‌شود. دستگاه استفاده شده در این تحقیق قابلیت ارسال امواج تا توان 400 وات راداراست، ولی در این تحقیق با استفاده اولیه از اعداد گزارش شده توسط محققین پیشین و همچنین انجام سعی و خطا، از توان 100 وات استفاده شد [17 و 18]. توزیع نانولوله‌های کربنی با استفاده امواج مافوق صوت برای درصد وزنی 0/5 به مدت 30 دقیقه انجام گرفت. روش تعیین زمان بهینه برای توزیع به کمک امواج مافوق صوت با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات گرانی برحسب زمان موج‌دهی است. در این روش که توسط شکرپه و همکاران [19] معرفی شده رفتار گرانی برحسب زمان امواج مافوق صوت ثبت می‌شود. گرانی توسط یک ویسکومتر مخروط و صفحه دقت بالا³ انجام شده است. در هر مرحله 5 میلی‌لیتر از نمونه تحت آزمایش سنجش گرانی قرار می‌گیرد. شکل 4 تغییرات گرانی را برحسب زمان نشان می‌دهد. گرانی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه می‌رسد. در این شرایط توزیع در شرایط بهینه قرار دارد و با افزایش زمان انرژی‌دهی، مقدار گرانی کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد مخلوط، ظرف حاوی آن در مدت اعمال امواج داخل یک ظرف بزرگ آب در دمای صفر درجه قرار داشت.



شکل 3 دستگاه امواج مافوق صوت



شکل 4 نمودار تغییرات گرانی برحسب زمان انرژی‌دهی مافوق صوت برای 0/5 درصد وزنی نانولوله کربنی چند جداره

الیاف، آزمایش کشش در راستای عمود بر الیاف، خمش سه نقطه و برش انجام گرفته است. نمونه‌های آزمایش مطابق استانداردهای ASTM D790 [12]، ASTM D3039 [13] و ASTM D3518 [14] ساخته شده‌اند. آزمایش‌های مورد نیاز و نتایج حاصل از انجام آن به صورت خلاصه در جدول 5 آورده شده‌اند.

4- ساخت نمونه‌ها

4-1- نمونه‌های رزین خالص

نخستین گام برای ساخت نمونه‌های رزین خالص، ترکیب آن با سخت‌کننده است. بدین منظور رزین اپوکسی و سخت‌کننده تتا با نسبت 100 به 13 مخلوط می‌شوند. برای این کار از یک همزن مکانیکی دور بالا با پره‌های سه تایی به مدت 5 دقیقه استفاده شد. این مرحله از انجام کار برای این منظور است که یک محلول همگن از رزین و سخت‌کننده به دست آید. در گام دوم، برای کاهش حباب‌ها در محلول به دست آمده از دستگاه خلاء در فشار 20 میلی‌بار و به مدت 5 دقیقه استفاده می‌شود. پس از انجام این مراحل، محلول آماده شده در قالب‌هایی به عمق 5 میلی‌متر ریخته می‌شود. نمونه‌ها برای انواع خمشی تیرهای مستطیلی به ابعاد 2×10 سانتی‌متر و برای نمونه‌های کششی از نوع دمبلی بوده است (شکل 5). پخت نخستین نمونه‌ها به مدت 7 روز در دمای اتاق به انجام رسیده و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 150 درجه سانتی‌گراد تحت فرایخت قرار گرفته‌اند.

4-2- نمونه‌های نانوکامپوزیتی

هر چند مراحل ساخت نانوکامپوزیت‌ها در ظاهر چندان پیچیده و دارای مراحل زیادی نیست، ولی تغییر پارامترها در همین مراحل ساده می‌تواند نتایج را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در واقع یکی از مشکلاتی که در زمینه ساخت این مواد وجود دارد وابستگی بسیار بالای آن‌ها به عواملی است که در ساخت کامپوزیت‌های معمولی نقش مهمی ایفا نمی‌کنند. این پدیده حتی در مطالعه نتایج ارائه شده در مقالات مختلف نیز به خوبی مشاهده می‌شود. گاهی تغییر یک مرحله از روش تولید می‌تواند نتایج را تا 100 درصد تغییر دهد؛ بنابراین کیفیت ماده اولیه و تنظیم پارامترهای ساختی می‌توانند مسئول تنوع بالای نتایج ارائه شده در مقالات مختلف باشد. در این تحقیق پیش از آن که به تولید قطعه نهایی برای بررسی رفتار مکانیکی پرداخته شود تلاش شد تا میزان اثرگذاری هر پارامتر ساختی بر نتایج بررسی شود و تا حد ممکن یک روش ساخت بهینه برای ساخت به دست آید. در ادامه مراحل مختلفی که برای تولید نانوکامپوزیت در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است به صورت گام به گام بیان می‌شود.

4-2-1- هم‌زدن مخلوط

در نخستین گام ساخت، پس از اندازه‌گیری میزان تقویت‌کننده مورد نظر با توجه به درصد وزنی، این ماده به رزین اپوکسی اضافه می‌شود. نخستین گام پس از مخلوط کردن نانولوله‌های کربنی با رزین، هم‌زدن مخلوط است. برای این کار از یک همزن مکانیکی دور بالا¹ با پره‌های سه‌تایی استفاده شد. این مرحله از انجام کار برای این است که پراکندگی یکنواختی از پرکننده‌ها در داخل مخلوط به دست آید. روشن است که این روش هیچ تأثیر ملموسی بر باز شدن کلوخه‌های نانولوله کربنی نخواهد داشت. مقالات مختلف زمان‌های متفاوتی را برای این مرحله پیشنهاد کرده‌اند. در برخی مطالعات تأثیر این

2- Ultrasonic waves
3- Brookfield HDV II Pro

1- Heidolph RZR2102

4-2-3- افزودن سخت‌کننده و حباب‌گیری

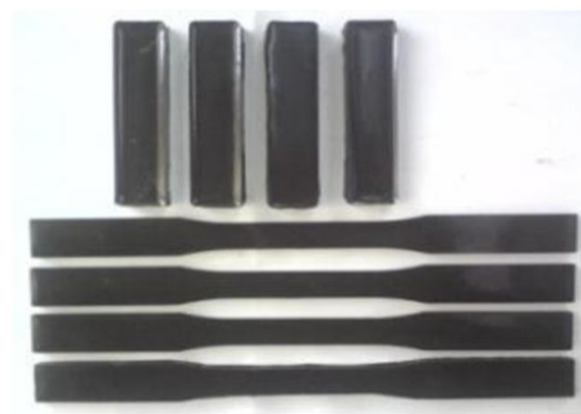
پس از توزیع نانولوله‌های کربنی به کمک امواج مافوق صوت، باید سخت‌کننده به مخلوط اضافه شود. مراحل پسین ساخت مانند موارد یادشده برای نمونه‌های رزین خالص تکرار شده است. شکل 5 نمونه‌های نانوکامپوزیت قالب‌ریزی‌شده را نشان می‌دهد.

4-3- نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای

روش‌های زیادی برای ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای وجود دارد. روش چیدمان دستی یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، نمونه‌ها به روش چیدمان دستی از 7 لایه تک‌جهته ساخته شده‌اند (شکل 6). سیستم انتخاب‌شده برای نمونه‌های یادشده شیشه/اپوکسی است. برای دستیابی به دقت بالا با استفاده از نتایج تجربی، از هر نمونه خاص 5 قطعه از صفحه مادر به ضخامت 2 میلی‌متر و با استفاده از تیغه الماسه برش داده شده است. ابعاد نمونه‌ها برای انواع کششی 25×2.5 سانتی‌متر و برای نمونه‌های خمشی 10×2.5 سانتی‌متر بوده است. پخت چندلایه‌ای‌ها در دمای اتاق به مدت 7 روز انجام شده و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 150 درجه سانتی‌گراد تحت فرایخت قرار گرفته‌اند. عمل فرایخت نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای پس از برش‌کاری منجر به کاهش ترک‌های زمینه‌ای ایجاد شده در اطراف محل برش‌کاری می‌شود. میانگین نسبت حجمی الیاف پس از آزمایش سوزاندن¹ 42 درصد به دست آمده است. میانگین ضخامت اسمی هر لایه از کامپوزیت الیاف شیشه و رزین اپوکسی 0/3 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

4-4- نمونه‌های نانوکامپوزیت لایه‌ای

نمونه‌های نانوکامپوزیت لایه‌ای با استفاده از ترکیبی از روش‌های ارائه‌شده در بخش‌های 3-4 و 2-4 ساخته می‌شوند. در ابتدا با استفاده از روشی که در بخش 2-4 اشاره شد محلول نانوکامپوزیتی آماده می‌شود، سپس با روش چیدمان دستی نمونه‌های نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای ساخته می‌شوند.



شکل 5 نمونه‌های استفاده‌شده برای انجام آزمایش‌های مکانیکی نانوکامپوزیت



شکل 6 صفحه کامپوزیت لایه‌ای ساخته‌شده به روش چیدمان دستی

5- انجام آزمایش‌های مکانیکی

جهت انجام تمامی آزمایش‌های مکانیکی از ماشین یونیورسال سنتام 150، استفاده می‌شود. در این بخش روش انجام هر یک از آزمایش‌های مکانیکی ارائه می‌شود.

5-1- آزمایش کشش و برش

نمونه‌های دمبلی شکل رزین خالص و نانوکامپوزیت‌ها براساس استاندارد [13] جهت تعیین سفتی کششی و استحکام شکست آزمایش شدند. نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت لایه‌ای مطابق استانداردهای ASTM D3039 [13] و ASTM D3518 [14] و به ترتیب برای تعیین مدول الاستیسیته (سفتی) کششی و استحکام شکست کششی راستای طولی و عرضی، مدول و استحکام شکست برشی داخل صفحه‌ای آزمایش شدند. نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه لحاظ شده است. با توجه به این که جابه‌جایی گزارش شده توسط دستگاه با خطای زیادی همراه است، برای محاسبه مدول الاستیسیته کششی ماده از جابه‌جایی سنج² استفاده شد (شکل 7). جهت ایجاد خطای کمتر در انجام آزمایش‌ها، از بارسنج³ با ظرفیت 5.000 نیوتن در آزمایش نمونه‌های رزین خالص و نانوکامپوزیت‌ها و همچنین از بارسنج با ظرفیت 50 کیلونیوتن در آزمایش نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت لایه‌ای استفاده شد.

5-2- آزمایش خمش سه نقطه

نمونه‌های رزین خالص و نانوکامپوزیت‌ها مطابق با استاندارد ASTM D638 [11] و نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت لایه‌ای که مطابق استاندارد ASTM D790 [12] برای تعیین مدول خمشی، استحکام خمشی آزمایش می‌شوند (شکل 8). نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه لحاظ شده است.

6- نتایج و تفسیر آن‌ها

6-1- آزمایش کشش

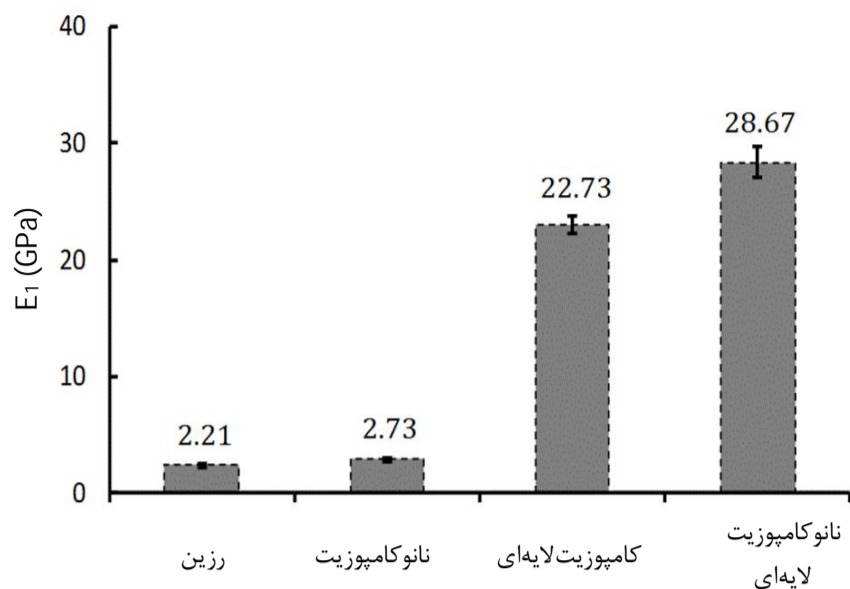
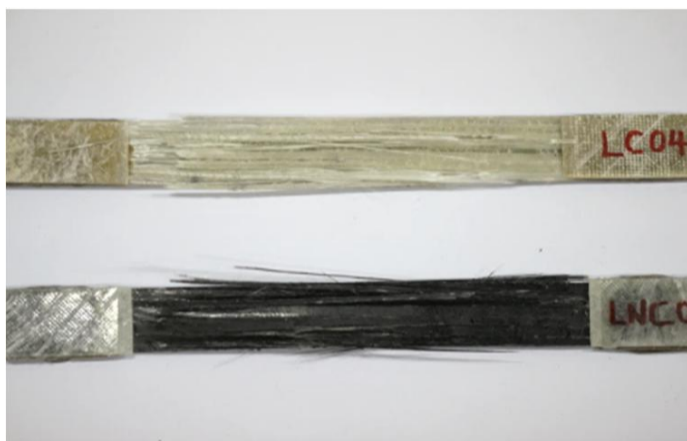
کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای در دسته مواد همسان‌گرد عرضی قرار دارند [20]. از آنجایی که الیاف انتخاب‌شده در این تحقیق تک‌جهته هستند، بنابراین برای این نمونه‌ها لازم است که مقادیر سفتی و استحکام کششی در راستای الیاف (راستای فرضی 1) و در راستای عمود بر الیاف (راستای فرضی 2) به صورت تجربی به دست آیند. درحالی که برای پلیمر خالص و نانوکامپوزیت‌ها انجام یک آزمایش کشش، به دلیل همسان‌گرد



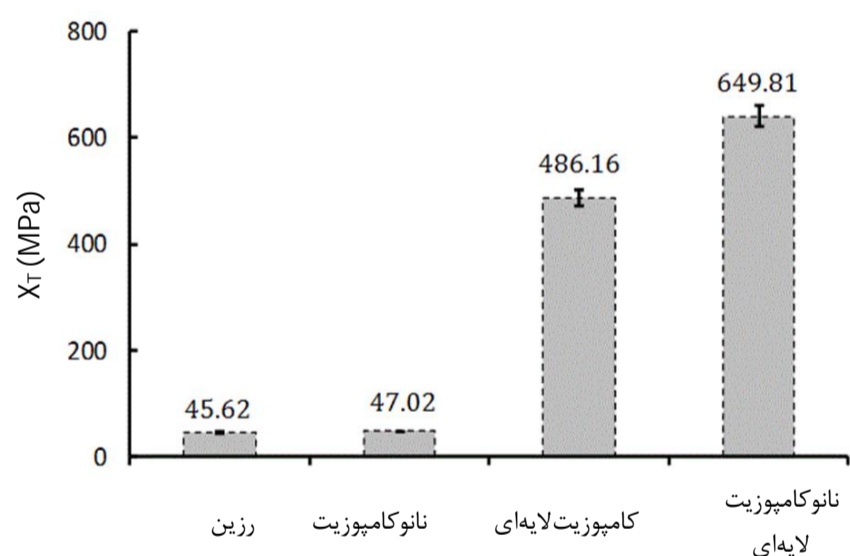
شکل 7 یک نمونه از آزمایش کشش

2- Extensometer
3- Load cell

1- Burn out

شکل 9 مقایسه مقدار E_1 برای چهار ماده مختلف

شکل 10 نمونه‌های کششی در راستای الیاف کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیت شیشه/نانولوله/اپوکسی پس از آزمایش

شکل 11 مقایسه مقدار X_T برای چهار ماده مختلف

شیشه با کنار هم قرار دادن آن‌ها به وسیله نانولوله‌های کربنی با طول در حدود 20 میکرون دانست. این رفتار پیشتر توسط واریر و همکاران مشاهده شده است [21].

هنگام فرایند آزمایش مشاهده شد که پدیده شکست الیاف در نانوکامپوزیت لایه‌ای دیرتر از کامپوزیت لایه‌ای آغاز شده است، ولی با سرعت بیشتری کل چند لایه تخریب می‌شود. می‌توان این‌گونه استنتاج کرد که تغییر در مقدار استحکام در راستای طولی تا حد زیادی ناشی از ایجاد اتصال میان الیاف لایه‌های مجاور به واسطه نانولوله‌های طویل بوده و ممکن است در شرایط آزمایش یک تک لایه مقدار رشد کمتری را نشان دهد. شکل 12 حضور نانولوله‌های کربنی را در بزرگ‌نمایی 200.000 برابر در ناحیه از الیاف بلند تخریب شده با بزرگ‌نمایی 200 برابر نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که الیاف تک‌جهته به شدت تغییر راستا داده و دچار بی‌نظمی شدید شده‌اند.

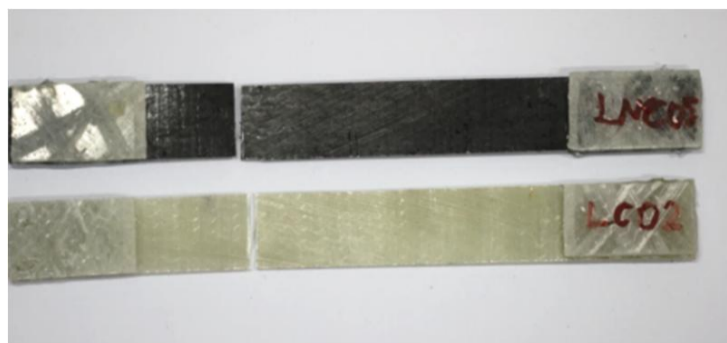


شکل 8 یک نمونه از آزمایش خمش سه نقطه

بودن این مواد، جهت استخراج سفتی کششی و استحکام کششی کافی است. به عبارت دیگر برای مواد همسان‌گرد می‌توان نوشت که $E_1 = E_2$ و $X_T = Y_T$ ؛ بنابراین خواص کششی چهار ماده در دو بخش 1-1-6 و 2-1-6 ارائه می‌شود.

1-1-6- آزمایش در راستای طولی

در این بخش نمونه‌های کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای با جهت‌گیری الیاف تک‌جهته در راستای طول نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نمونه‌های قالب‌ریزی‌شده پلیمر خالص و نانوکامپوزیت‌ها برای استخراج سفتی کششی و استحکام کششی آزمایش می‌شوند. در شکل 9 مقادیر سفتی کششی در راستای الیاف نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای با ترکیب 42 درصد حجمی الیاف شیشه، و نانوکامپوزیت لایه‌ای با ترکیب 42 درصد حجمی الیاف شیشه و 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و مقدار سفتی کششی اپوکسی و اپوکسی تقویت‌شده با 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به صورت نمودار میله‌ای مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود مقدار سفتی کششی مربوط به پلیمر اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی نسبت به پلیمر خالص نزدیک به 24 درصد افزایش داشته است، همچنین با افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت‌های لایه‌ای مقدار سفتی کششی در راستای الیاف 26 درصد افزایش یافته است. سفتی کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نسبت به رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت 10 برابر شده‌اند. شکل 10 نمونه‌های کششی در راستای الیاف کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 10 پیداست هر دو نمونه به‌طور کامل درگیر پدیده تخریب شده‌اند که بیانگر این مسئله است که نمونه‌ها به‌طور مناسبی ساخته و آزمایش شده‌اند. نمودار مقادیر استحکام کششی پلیمر و نانوکامپوزیت، استحکام کششی (X_T) در راستای الیاف نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای در شکل 11 ترسیم شده‌اند. مقدار استحکام کششی نانوکامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص بیشتر از 5 درصد افزایش نیافته، همان‌طور که از شکل 11 می‌توان دریافت مقدار استحکام کششی در راستای الیاف نانوکامپوزیت لایه‌ای نسبت به کامپوزیت لایه‌ای افزایش چشم‌گیر 34 درصد داشته است؛ بنابراین می‌توان گفت که افزودن نانولوله‌های کربنی تأثیر بیشتری بر استحکام کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی در مقایسه با اپوکسی خالص داشته است و دلیل آن را می‌توان به ایجاد اتصال مستحکم میان پلیمر و الیاف به وسیله نانولوله‌های کربنی و همچنین تقویت الیاف



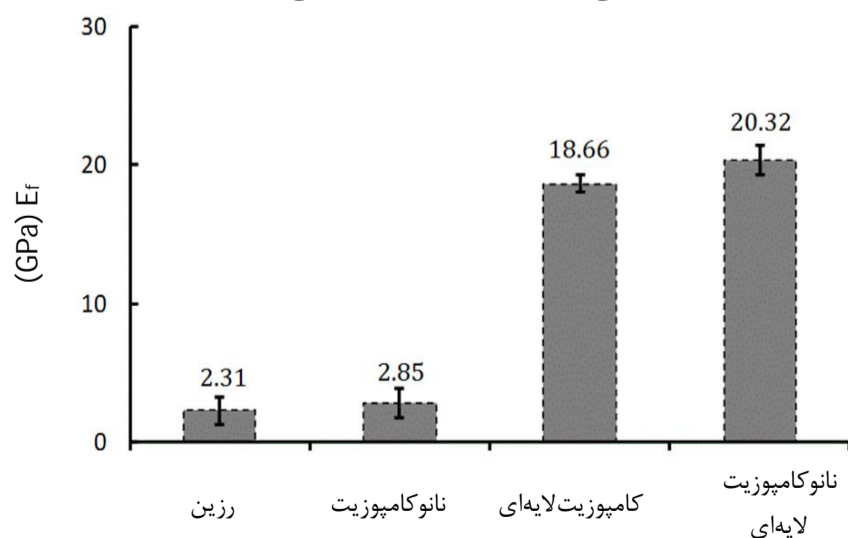
شکل 15 نمونه‌های کششی در راستای عمود بر الیاف کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیت شیشه/نانولوله/اپوکسی پس از آزمایش

6-2- آزمایش خمش

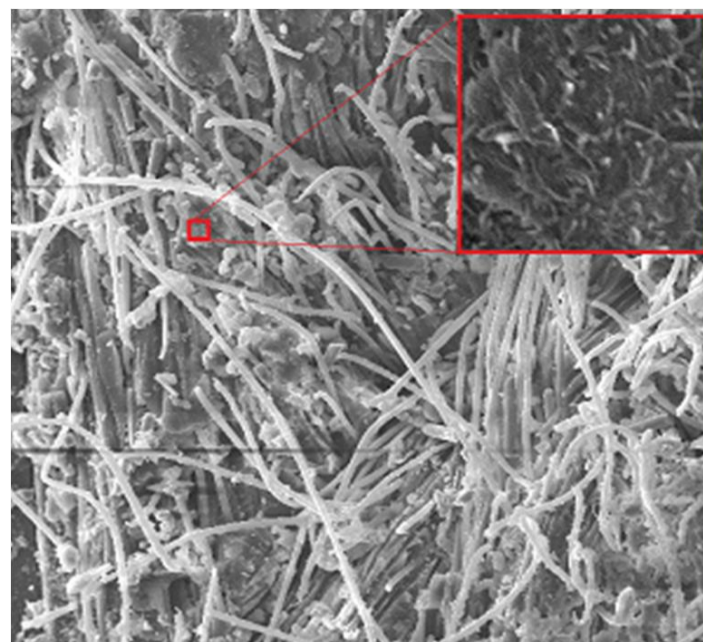
کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای با جهت‌گیری الیاف تک‌جهته در راستای طول نمونه و همچنین نمونه‌های قالب‌ریزی شده پلیمر خالص و نانوکامپوزیت‌ها برای استخراج سفتی و استحکام خمشی آزمایش شدند. نمونه‌های خمش پس از ساخت و آماده‌سازی، تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار گرفتند. در شکل 16 مقادیر سفتی خمشی (E_f) در راستای الیاف نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای شیشه و اپوکسی و نانوکامپوزیت لایه‌ای با 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، مقدار مدول خمشی اپوکسی و اپوکسی تقویت شده با 0/5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به صورت نمودار میله‌ای مشاهده می‌شود. در حالت بارگذاری خمشی سه نقطه مقدار مدول خمشی نانوکامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص 11 درصد افزایش می‌یابد، همچنین با افزودن نانولوله‌های کربنی مقدار مدول خمشی نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای 9 درصد افزایش یافته است. نمودار مقادیر استحکام خمشی اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت، و استحکام خمشی (B) در راستای الیاف نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای در شکل 17 ترسیم شده‌اند. افزایش استحکام خمشی در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی برای پلیمرها و کامپوزیت‌های لایه‌ای نیز مشابه با افزایش مقدار مدول خمشی است. در شکل 18 نمونه‌های خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نشان داده شده‌اند.

6-3- آزمایش برش

از جمله دیگر خواص مکانیکی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر مقدار مدول و استحکام برشی پلیمر اپوکسی و همچنین سفتی و استحکام برشی داخل صفحه‌ای کامپوزیت لایه‌ای اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه تک‌جهته است؛ بنابراین با انجام آزمایش‌های مربوط به برش و استفاده از روابط ارائه شده در استاندارد ASTM D3518 [16] مقادیر یادشده استخراج می‌شود. شکل 19 یک نمونه از نمودارهای بار-جابجایی این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



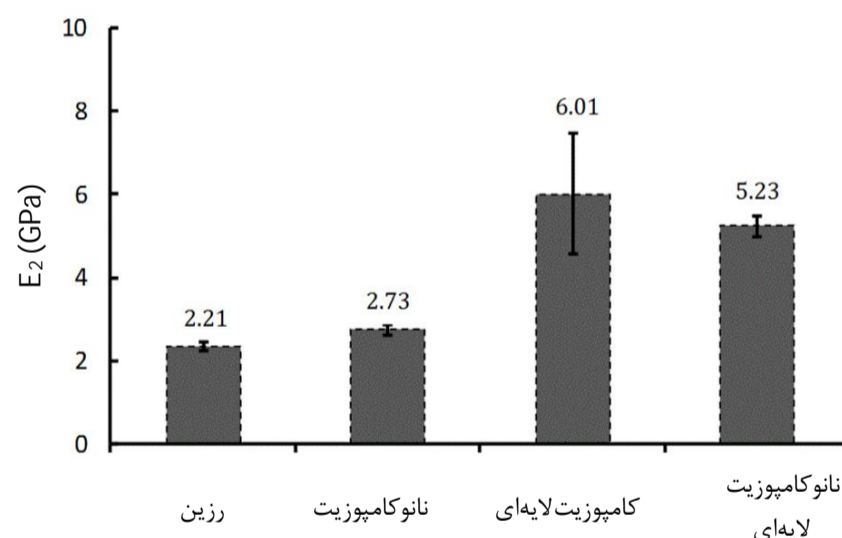
شکل 16 مقایسه مقدار E_f برای چهار ماده مختلف



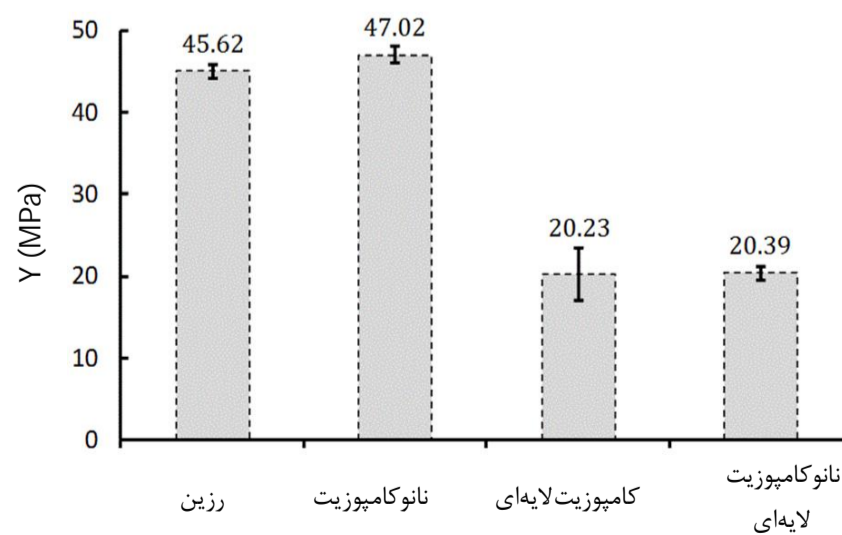
شکل 12 تصویر SEM ناحیه تخریب در نانوکامپوزیت لایه‌ای و حضور نانولوله‌های کربنی در بزرگ‌نمایی 200.000 برابر

6-1-2- آزمایش در راستای عرضی

شکل‌های 13، 14 به ترتیب مقادیر مدول کششی و استحکام در راستای عمود بر الیاف کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای را با مقادیر مدول و استحکام کششی نمونه‌های رزین خالص و نانوکامپوزیت مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود برخلاف سفتی، استحکام مکانیکی در راستای عرضی کامپوزیت‌های لایه‌ای کم‌تر از استحکام رزین خالص و نانوکامپوزیت است. دلیل اصلی می‌تواند بروز تمرکز تنش‌های شدید ناشی از حضور الیافی باشد که موجب تسریع در واماندگی رزین (مود تخریب غالب) می‌شوند. در شکل 15 نمونه‌های کششی در راستای عمود بر الیاف کامپوزیت‌های لایه‌ای و نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای پس از آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل 13 مقایسه مقدار E_2 برای چهار ماده مختلف

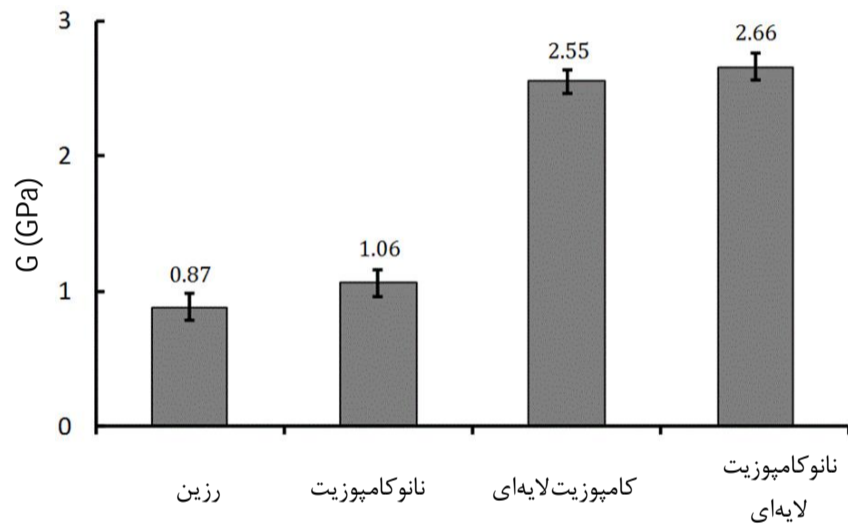


شکل 14 مقایسه مقدار Y_T برای چهار ماده مختلف

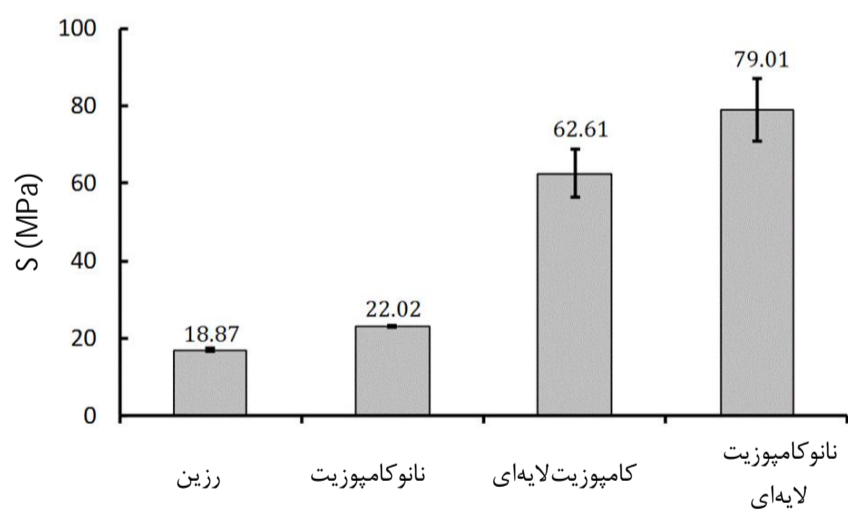
پدیده جدایش لایه‌ای تا حد قابل توجهی به تأخیر افتاده و کرنش بحرانی به میزان قابل توجه 52 درصد افزایش نشان می‌دهد. در شکل 22 نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت لایه‌ای پس از آزمایش مشاهده می‌شوند. واضح است که با افزودن نانولوله‌های کربنی با طول بلند، چسبندگی الیاف در لایه‌های مجاور افزایش یافته که موجب تأخیر در بروز واماندگی نهایی به واسطه جدایش لایه‌ها می‌شود.

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر نانولوله‌های کربنی چند جداره با طول بلند بر خواص مکانیکی کششی، برشی و خمشی رزین خالص و رزین تقویت‌شده با الیاف بلند ارزیابی شد. برای بهینه‌سازی روش توزیع نانوذره‌ها از ارزیابی پیوسته گرانی با زمان انرژی دهی مافوق صوت استفاده شد. می‌توان بیان داشت که بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای نسبت به رزین با افزودن نانولوله‌های کربنی نمود بیشتری دارد، همچنین تحت بارگذاری‌های مختلف خواص مکانیکی نمونه‌های کششی تقویت‌شده با نانولوله‌ها در راستای الیاف تقویت‌شده با نانولوله‌ها در راستای عمود بر الیاف کاهش خواص مکانیکی



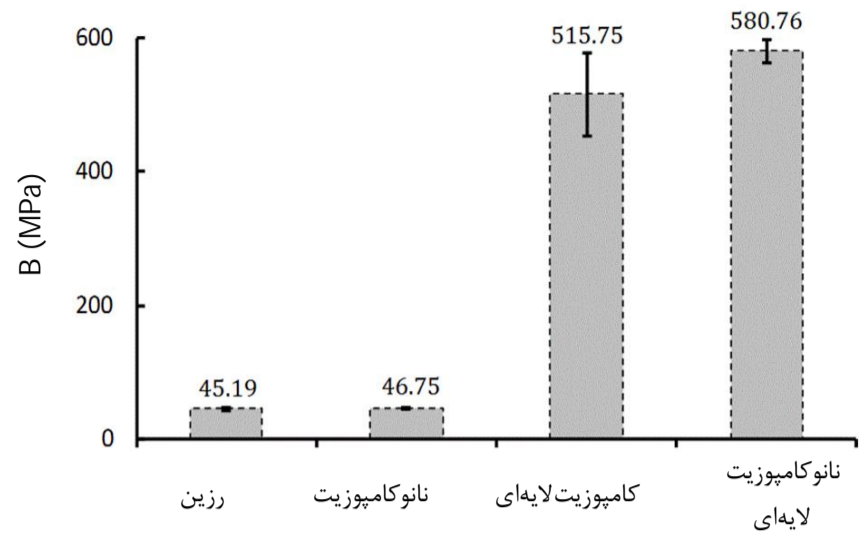
شکل 20 مقایسه مقدار G برای چهار ماده مختلف



شکل 21 مقایسه مقدار S برای چهار ماده مختلف



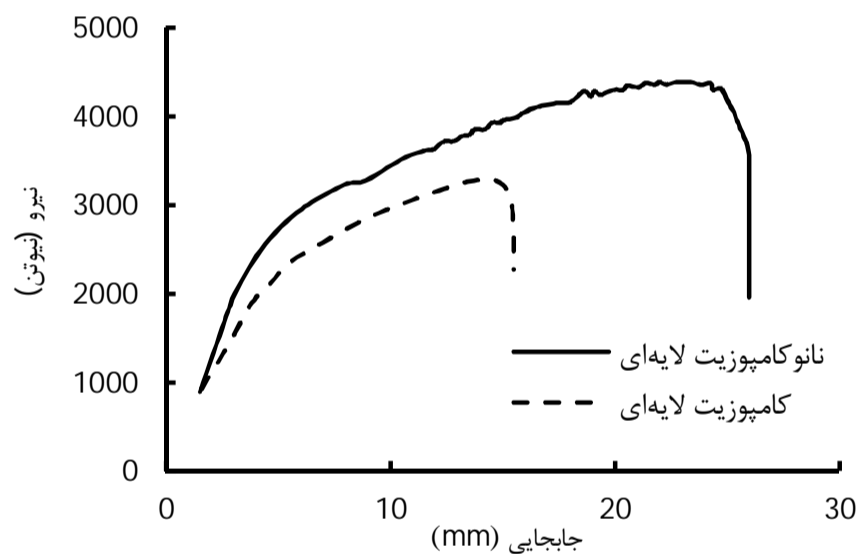
شکل 22 نمونه‌های آزمایش برش داخل صفحه‌ای کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیت شیشه/نانولوله/اپوکسی



شکل 17 مقایسه مقدار استحکام خمشی (B) برای چهار ماده مختلف



شکل 18 نمونه‌های خمشی پس از آزمایش



شکل 19 یک نمونه از نمودارهای بار-جابجایی آزمایش برش

در شکل 20 مقادیر مدول برشی مربوط به پلیمر اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت (G)، و سفتی برشی داخل صفحه‌ای (G₁₂) مربوط به کامپوزیت لایه‌ای و نانوکامپوزیت لایه‌ای ترسیم شده‌اند. هر چند مقدار مدول برشی نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای نسبت به کامپوزیت لایه‌ای افزایش می‌یابد، ولی در مقایسه با تقویت اپوکسی با آن نانولوله‌های کربنی افزایش کمتری را از خود نشان می‌دهد. شکل 21 نیز مقادیر استحکام‌های برشی چهار ماده را نشان می‌دهد. مقدار استحکام برشی با افزودن نانولوله‌های کربنی به پلیمر و کامپوزیت‌های لایه‌ای به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش برای نانوکامپوزیت‌ها 16 درصد و برای نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای 26 درصد نسبت به نمونه‌های مشابه بدون وجود نانولوله‌هاست. در لایه چینی $3S_{+45/-45}$ به کار رفته در آزمایش برش، واماندگی ناشی از تجمع ترک‌های ماتریسی¹ و تورق لبه‌ای² ناشی از آن بوده که الیاف دچار پارگی نمی‌شوند، اما تخریب نهایی صورت می‌گیرد. مشاهده شد که با افزودن نانولوله‌های چند جداره بلند،

1- Matrix-cracking
2- Edge delamination

- [8] L. Schadler, S. C. Giannaris, P. M. Ajayan, Load transfer in carbon nanotube epoxy composites, *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 26, pp. 3842–3844, 1998.
- [9] J. Zhu, H. Peng, F. Rodriguez-Macias, J. Margrave, V. Khabashesku, A. Imam, K. Lozano, E. Barrera, Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes, *Advanced Functional Materials*, Vol. 14, No.7, pp. 643–648, 2004.
- [10] *Nanostructured and Amorphous Materials, Inc.* <http://www.nanoamor.com>. September 2014.
- [11] *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual book of ASTM standards*, ASTM D 638, 2003.
- [12] *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual book of ASTM standards*, ASTM D 790, 2000.
- [13] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual book of ASTM standards*, ASTM D3039/D3039M, 2007.
- [14] *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate, Annual book of ASTM standards*, ASTM D3518, 2013.
- [15] A. Claude, C. Gilbert, N. Eddine, E. Bounia, E. Pér  3, L. Billon, Dispersion improvement of carbon nanotubes in epoxy resin using amphiphilic block copolymer, *Advanced Materials Research Vol. 112*, pp. 29-36, 2010.
- [16] A. Seisuke, T. Mizuno, A. Nishizawa, C. Subramaniam, D. N. Futaba and K. Hata, Influence of matching solubility parameter of polymer matrix and CNT on electrical conductivity of CNT/rubber composite, *Sci Rep*. Vol. 4, pp. 7232, 2014.
- [17] S. Shadlou, Fracture behavior of epoxy-based nanocomposites reinforced by MWCNTs, *PhD thesis*, Iran University of science and technology, 2011.
- [18] M. Esmkhani, Fatigue behavior of fibrous polymer composites with nano-particle additives. *Ph.D. thesis*, Iran University of science and technology, 2013.
- [19] M. M. Shokrieh, M. Esmkhani, F. Vahedi, H. R. Shahverdi, Improvement of mechanical and electrical properties of epoxy resin with carbon nanofibers, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 22, pp. 721–727, 2013.
- [20] S. W. Tsai, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Company, 1980.
- [21] A. Warri  r, A. Godara, O. Rochez, L. Mezzo, F. Luizi, L. Gorbati  kh, S. V. Lomov, A. W. V. Vuure, I. Verpoest, The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix, *Composites: Part A*, Vol. 41, pp. 532–538, 2010.

مشاهده شد. در نمونه‌های برشی و خمشی نیز افزایش خواص مکانیکی با افزودن نانولوله‌های کربنی به‌دست آمد. نشان داده شد که نانولوله‌های با طول بلند سبب افزایش چسبندگی و دسته‌ای‌شدن الیاف لایه‌های مجاور شده و موجب می‌شود که خواص مکانیکی چند لایه تک‌جهته رشد قابل توجهی نسبت به چند لایه تقویت‌نشده داشته باشد که در این میان تأخیر در مکانیزم تخریب شکست الیاف در آزمایش کشش در راستای طولی و تأخیر در مکانیزم جدایش لایه‌ای در آزمایش برش داخل صفحه‌ای از مهم‌ترین این موارد بوده است که ناشی از اتصال الیاف لایه‌های مجاور توسط نانولوله‌های کربنی طویل است.

8- مراجع

- [1] K. P. Ryan, M. Cadek, V. Nicolosi, S. Walker, M. Ruether, A. Fonseca, J. B. Nagy, W. J. Blau, J. N. Coleman, Multiwalled carbon nanotube nucleated crystallization and reinforcement in poly (vinyl alcohol) composites, *Synthetic Metals*, Vol. 256, pp. 332-5, 2006.
- [2] F. H. Gojny, K. Schulte, Functionalisation effect on the thermo-mechanical behaviour of multi-wall carbon nanotube/epoxy-composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 8-64, pp. 2303-2311, 2004.
- [3] P. Guo, X. Chen, X. Gao, H. Song, H. Shen, Fabrication and mechanical properties of well-dispersed multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 3331-3337, 2007.
- [4] M. M. Shokrieh, A. Saeedi, M. Chitsazzadeh, Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/polyester nanocomposites, *Journal of Nanostructure in Chemistry*, Vol. 3, pp. 20-25, 2013.
- [5] G. V. Ramana, B. Padya, R. N. Kumar, K. V. P. Prabhakar, P. K. Jain, Mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced polymer nanocomposites, *Indian journal of Engineering & Material Sciences*, Vol. 17, pp. 331-337, 2010.
- [6] J. Cho, I. M. Daniel, Reinforcement of carbon/epoxy composites with multi-wall carbon nanotubes and dispersion enhancing block copolymers, *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 533–536, 2008.
- [7] D. Qian, E. Dickey, R. Andrews, T. Rantell, Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites, *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 20, pp. 2868-2870, 2000.