

ماهنامه علمى پژوهشى

دسے، مکانیک مدر س



mme.modares.ac.ir

تأثیرات افزودن نانولولههای کربنی چندجداره بر خواص مکانیکی رزین ایوکسی و کامیوزیت های لایه ای شیشه/ایو کسی

محمود مهرداد شكريه^{1*}، افشين زينالديني²، سيدمحمد قريشي³

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 کارشناسیارشد، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران * تهران، صندوق يستى shokrieh@iust.ac.ir ،16846-13114

چکیدہ	اطلاعات مقاله
هدف تحقیق کنونی، مطالعه میزان اثربخشی وجود نانولولههای کربنی چندجداره با طول بلند، بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیتها لایهای تقویتشده با الیاف تکجهته شیشه است؛ بنابراین خواص مکانیکی پلیمر (پوکسی خالص)، نانوکامپوزیت حاوی 5/0درصد وز نانولولههای کربنی چند جداره، کامپوزیتهای لایهای شیشه/ اپوکسی و نانوکامپوزیتهای لایهای شیشه/اپوکسی حاوی 5/0درصد وز نانولولههای کربنی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مختلف استخراج میشود. مدول و استحکام کششی، خمشی و برشی پلیمر اپوکسی نانولولههای کربنی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مختلف استخراج میشود. مدول و استحکام کششی، خمشی و برشی پلیمر اپوکسی نانولولههای کربنی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مختلف استخراج میشود. مدول و استحکام کششی، خمشی و برشی پلیمر اپوکسی	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 14 اردیبهشت 1394 پذیرش: 12 تیر 1394 ارائه در سایت: 24 مرداد 1394 کلید <i>واژگان:</i> ایهکس
لایهای الیاف شیشه/اپوکسی و نانوکامپوزیتهای لایهای الیاف شیشه/اپوکسی تقویتشده با 5/0درصد وزنی نانولولههای کربنی چند جدار مقادیر سفتی و استحکام کششی طولی و عرضی و همچنین سفتی و استحکام خمشی و برشی داخل صفحهای مقایسه میشوند. نتاب آزمایشهای مربوط به نمونههای کششی نانوکامپوزیتهای لایهای نشان میدهند که حضور نانولولههای کربنی چند جداره با طول بلند سب افزایش چسبندگی و برهم کنش الیاف لایههای مجاور شده و سبب میشود که مکانیزمهای تخریبی چون شکست الیاف در آزمایش طول و یا جدایش لایهای در آزمایش برش داخل صفحهای به طور قابل ملاحظهای به تأخیر افتد. میتوان بیان داشت که بهبود خواص مکانیک کامپوزیتهای لایهای در آزمایش برش داخل صفحهای به طور قابل ملاحظهای به تأخیر افتد. میتوان بیان داشت که بهبود خواص مکانیک استحکام برشی نانوکامپوزیتهای لایهای به در زنین با افزودن نانولولههای کربنی نمود بیشتری دارد. برای نمونه مقدار استحکام کششی طول	، پر سیی الیاف شیشه خواص مکانیکی کامپوزیت لایهای نانولوله کربنی چندجداره

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

Mahmood Mehrdad 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 A DTIOLE INFORMATION

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 04 May 2015 Accepted 03 July 2015 Available Online 15 August 2015	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 <i>wt.</i> % MWCNT/epoxy nano-composites, E-glass/epoxy laminated composites
<i>Keywords:</i> Epoxy multi-walled carbon nanotubes glass fiber	and 0.5 <i>wt.</i> % 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

mechanical properties laminated composites

Please cite this article using:

fiber laminated composites and glass fiber laminated nano-composites reinforced with 0.5 wt.% MWCNTs were determined. Experimental results of tensile specimens of laminated nanocomposites 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.

این دسته از مواد امری اجتنابناپذیر است. با توجه به محدودیت وزنی سازههایی که از مواد کامپوزیتی ساخته میشوند، تلاشهایی در جهت بهبود با كاربرد روز افزون كامپوزيتهاي لايهاي، تلاش جهت بهبود خواص مكانيكي

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

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)

خواص مكانيكي بدون افزايش 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 مىدهند.در اين ميان، نانولوله هاى كربنى علاوهبر اين كه استحكام بسيار بالايي 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 کامیوزیتهای لایهای است. دلیل این انتخاب در دسترسبودن و ارزانتربودن به واسطه تولید انبوه این نانولولههاست؛ بنابراین تمایل بیشتری به استفاده از این نانولولههای کربنی در کاربردهای صنعتی است. تحقیقهای گستردهای انجام شده است تا از نانوذرهها و بهویژه نانولولههای کربنی در تولید مواد مرکب با کارایی بالا استفاده شود [1-3]. شکریه و همکاران [4] اثر افزودن نانولولههای کربنی چندجداره بر مقادیر پارامترهای مکانیکی نانوکامیوزیتهای 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 كردند. در مقاله مدول و استحكام خمشي نانوكاميوزيت 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 بین لایه ای را مطالعه کردند. مطالعه قیان و همكاران [7] نشان دادند كه با افزودن 1درصد وزنى نانولولهكربنى به رزين، سفتى الاستيك كامپوزيت حاصل بين 36 تا 42درصد و استحكام كششى 25درصد افزایش مییابد. اسچادلر و همکاران [8] دریافتند که سفتی مؤثر رزین اپوکسی مسلحشده با نانولوله کربنی با افزودن 5درصد وزنی نانولوله کربنی، به میزان 40درصد 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 70درصد در استحکام کششی بهترتیب با افزودن 1 تا 4درصد وزنی نانولوله، قابل حصول است.

به طور کلی تصور می شود که تأثیر نانولوله های 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 به عنوان تقویت کننده در ماده زمینه نقش خواهد داشت و



شکل 1 شمای کلی از مراحل انجام مطالعات تجربی در تحقیق حاضر می گیرد. در گام بعدی، اثر افزودن نانولولههای کربنی چند جداره بر خواص مکانیکی پلیمرها، زمینه کامپوزیتهای لایهای، مطالعه می شود. در این مرحله، خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای¹ استخراج می شود. در گام سوم، پلیمرهای تقویت شده با الیاف، کامپوزیتهای لایه ای³ الیاف شیشه/ اپوکسی مشخصه سازی می شوند. در گام آخر، با افزودن نانولوله های کربنی چند جداره در کامپوزیت های لایه ای، نانوکامپوزیت های لایه ای⁴ ایجاد و خواص مکانیکی آن ها به روش تجربی اندازه گیری می شوند. در نهایت، با مقایسه نتایج تجربی به دست آمده از چهار مرحله، می توان اثر افزودن نانولوله های کربنی چند جداره و الیاف شیشه و یا ترکیبی از آن ها بر مقدار خواص مکانیکی پلیمر

2- انتخاب مواد اوليه

2-1- رزين

خالص در میان انواع پلیمرهای مختلف، اپوکسیها به دلیل خواص مکانیکی بسیار انولوله خوب و مقاومت شیمیایی بالا کاربردهای صنعتی زیادی بهویژه در صنایع مد آیا حساس مانند صنایع هوافضا دارند. به این دلیل محققین مختلف تلاشهای شت و فراوانی را برای بهبود خواص مکانیکی آنها استفاده کردهاند. رزین اپوکسی دهد. ایپون 826 به جهت کاربرد صنعتی آن بهعنوان پلیمر پایه انتخاب شد (جدول قواص 1). الیاف 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 گرانروی متوسط انتخاب میشود، همچنین ماندگاری بالا (عدمتغییر خواص این رزین در

2- Nano composites

3- Laminated composites

4- Laminated nano composites

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9

یا آن که می تواند در حضور الیاف نیز اثر تقویت کنندگی متفاوتی نشان دهد. برای این منظور به بررسی اثر افزودن نانولولههای کربنی بر مقدار خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیتهای لایهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه خواهیم پرداخت. برای دستیابی به این هدف، چهار مرحله آزمایش های تجربی برای استخراج خواص مکانیکی درنظر گرفته می شود (شکل 1). در ابتدا خواص مکانیکی پلیمر خالص¹ به صورت تجربی مورد بررسی قرار

1- Pristine resin

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

2-2- نانولولەھاى كربنى

نانولولههای کربنی مورد استفاده در این مطالعه از شرکت نانوآمور² [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- الياف

الیاف شیشه سری «ایی» به دلایلی چون مقرون به صرفه بودن و کاربرد بسیار وسیعتر در صنعت کامپوزیت نسبت به الیاف دیگر بهعنوان 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 بـرای اســتخراج خـواص

مكانيكي مربوطه

در این مرحله پس از انتخاب رزین، مشخصه سازی مکانیکی رزین خالص انجام می گیرد. برای دستیابی به این مهم انجام چندین آزمایش ضروری به حدول 1 نسبت ترکیمی رزین و سخت کننده*

	یب و سال می او سال می محمد ا	
ى(g/m³)	نسبت ترکيب(واحد) چگال	نام مادہ
1/16	100	ايپون 826
1/10	13	اپيكيور3234

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



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

جدول 2 مشخصات نانولولههای کربنی

نظر می رسد. نمونه هایی مطابق استاندار دهای ASTM D638 [11] و ASTM D638 می ساخته D790 [12] که به ترتیب روش انجام آزمایش کشش و خمش است، ساخته می شوند. این دسته از آزمایش ها و نتایجی که از انجام این آزمایش ها به دست می آیند، در جدول 4 به صورت خلاصه آور ده شده اند.

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

در این مرحله پس از انتخاب نانولولههای کربنی، مشخصه سازی مکانیکی رزین تقویت شده با نانولولههای کربنی انجام می گیرد. نمونهها مطابق استاندارد ASTM D638 [11] و ASTM D790 [12] ساخته شده و مورد آزمایش کشش و خمش سه نقطه قرار گرفته اند. این دسته از آزمایشها و نتایجی که از انجام این آزمایشها به دست می آیند، در جدول 4 به صورت خلاصه آورده شده اند.

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، مشخصه سازی مکانیکی رزین تقویت شده با الیاف انجام می گیرد. آزمایش کشش در راستای الیاف، آزمایش کشش در راستای عمود بر الیاف، خمش و برش از جمله آزمایش های انجام گرفته در این بخش هستند. نمونه ها مطابق استانداردهای م500 ASTM [12] و ASTM D3039 [13] و ASTM م518 [14] ساخته می شوند. در بخشی از جدول 5 این دسته از آزمایش ها و نتایج حاصل از انجام آن ها به صورت خلاصه آورده شده اند.

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	
نتايج	نوع آزمايش
مدول یانگ و استحکام نهایی کششی	کشش
مدول و استحکام نهایی خمشی	خمش سه نقطه

جدول 5 آزمایشهای مورد نیازبرای استخراج خواص مکانیکی رزین تقویتشده با الیاف و رزین تقویتشده با هیبریدی ازالیاف و نانولولههای کربنی

		<i>,</i> ,	فطر داخلي	فطر خارجي		
نتايج	نوع آزمایش	طول(µm)	(nm)	(nm)	نام ماده	
سفتی کششی طولی (E1) و استحکام کششی نهایی	کشش در راستای الیاف	10-30	5-15	30-50	نانولولەكربنى چندجدارە	
طولی (XT) سفتی کششی عرضی (E2) و استحکام کششی	جدول 3 مشخصات الياف شيشه کشش در استای عمود بر الياف					
نهایی عرضی (۲۲) سفتی برشی داخل صفحهای (G) و استحکام برشی	كثثالف مدري	درصد وزنی نخ عرضی	مِگالی سطحی (g/m²)	بافت	نام ماده	
نهایی داخل صفحهای (S) سفت خمش طول (<i>Fi</i> t) و استحکام خمش	مسلم اليات طربتاري	2/88	236	تکجهته	الياف شيشه	
ستی عبسی طولی (<i>۸</i>) نهایی طولی (<i>B</i>)	خمش سه نقطه ۲-TETA (Trieth)		e-tetramine)			

2- Nanoamor

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9

الیاف، آزمایش کشش در راستای عمود بر الیاف، خمش سه نقطه و برش انجام گرفته است. نمونههای آزمایش مطابق استانداردهای ASTMD790 [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 دستآمده از دستگاه خلاء در فشار 20 میلی بار و به مدت 5 دقیقه استفاده میشود. پس از انجام این مراحل، محلول آماده شده در قالبهایی به عمق 5 میلی متر ریخته میشود. نمونه ها برای انواع زنوع دمبلی بوده است (شکل 5). پخت نخستین نمونه ها به مدت 7 روز در دمای اتاق به انجام رسیده و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 150 درجه سانتی گراد تحت فراپخت قرار گرفته اند.

4-2-نمونەھاي نانوكامپوزيتى

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 100درصد تغییر معئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف نیز به خوبی مشاهده میتوانند مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف باشد. در این تحقیق مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف باشد. در این تحقیق مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف ماند. در این تحقیق مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف ماند. در این تحقیق مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف ماند. در این تحقیق مسئول تنوع بالای نتایج ارائهشده در مقالات مختلف ماند. در این تحقیق محلان شد تا میزان اثرگذاری هر پارامتر ساختی بر نتایج بررسی شود و تا حد ممکن یک روش ساخت بهینه برای ساخت بهدست 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 اندازه گیری میزان تقویت کننده مورد نظر با توجه به درصد وزنی، این ماده به رزین اپوکسی اضافه می شود. نخستین گام پس از مخلوط کردن نانولوله های کربنی با رزین، همزدن مخلوط است. برای این کار از یک همزن مکانیکی دور بالا¹ با پره های سه تایی استفاده شد. این مرحله از انجام کار برای این است که پراکندگی یکنواختی از پرکننده ها در داخل مخلوط به دست آید. روشن است که این روش هیچ تأثیر ملموسی بر باز شدن کلوخه های نانولوله کربنی نخواهد داشت. مقالات مختلف زمان های متفاوتی را برای این مرحله پیشنهاد کرده اند. در برخی مطالعات تأثیر این

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 2000 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 می شود. برای توزیع نانولوله های کربنی در ماتریس، روش امواج مافوق صوت به کار گرفته می شود، (شکل 3). در روش امواج مافوق صوت، ارسال این امواج سبب جداشدن کلوخههای نانولوله کربنی می شود. دستگاه استفاده شده در این تحقیق قابلیت ارسال امواج تا توان 400 وات راداراست، ولی در این تحقيق با استفاده اوليه از اعداد گزارششده توسط محققين پيشين و همچنين انجام سعى و خطا، از توان 100 وات استفاده شد [17 و 18]. توزيع نانولولههای کربنی با استفاده امواج مافوق صوت برای درصد وزنی 0/5 به مدت 30 دقيقه انجام گرفت. روش تعيين زمان بهينه براي توزيع به كمك امواج مافوق صوت با استفاده از اندازه گیری تغییرات گرانروی برحسب زمان موجدهی است. در این روش که توسط شکریه و همکاران [19] معرفی شده رفتار گرانروی برحسب زمان امواج مافوق صوت ثبت میشود. گرانروی توسط یک ویسکومتر مخروط و صفحه دقت بالا³ انجام شده است. در هر مرحله 5 میلیلیتر از نمونه تحت آزمایش سنجش گرانروی قرار می گیرد. شکل 4 تغییرات گرانروی را برحسب زمان نشان میدهد. گرانروی افزایش مییابد تا به یک مقدار بیشینه میرسد. در این شرایط توزیع در شرایط بهینه قرار دارد و با افزایش زمان انرژیدهی، مقدار گرانروی کاهش مییابد. برای جلوگیری از افزایش دمای بیش ازحد مخلوط، ظرف حاوی آن در مدت اعمال امواج داخل یک ظرف بزرگ آب در دمای صفر درجه قرار داشت.







2- Ultrasonic waves3- Brookfield HDV II Pro

1- Heidolph RZR2102

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9

4-2-3- افزودن سخت کننده و حباب گیری

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 قالبریزی شده را نشان می دهد.

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 پخت چندلایهایها در وبرای نمونههای خمشی 10×5/2 سانتیمتر بوده است. پخت چندلایهایها در دمای اتاق به مدت 7 روز انجام شده و سپس به مدت فراپخت 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 سوزاندن¹24درصد بهدست آمده است. میانگین ضخامت اسمی هر لایه از کامپوزیت الیاف شیشه و رزین اپوکسی میانگین ضخامت اسمی هر لایه از کامپوزیت الیاف شیشه و رزین اپوکسی

4-4-نمونههای نانوکامپوزیت لایهای

نمونههای نانوکامپوزیت لایهای با استفاده از ترکیبی از روشهای ارائهشده در بخشهای 4-3 و 4-2 ساخته میشوند. در ابتدا با استفاده از روشی که در بخش 4-2 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

5- انجام آزمایشهای مکانیکی

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

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 2009 ASTM [13] و ASTM محت کششی راستای استانداردهای 2009 مکت (سفتی) کششی و استحکام شکست کششی راستای طولی و عرضی، مدول و استحکام شکست برشی داخل صفحهای آزمایش شدند. نرخ بارگذاری 2 میلی متر بر دقیقه لحاظ شده است. با توجه به این که جابه جایی گزارش شده توسط دستگاه با خطای زیادی همراه است، برای محاسبه مدول الاستیسیته کششی ماده از جابه جایی سنج² استفاده شد (شکل 7). جهت ایجاد خطای کمتر در انجام آزمایشها، از بارسنج³ با ظرفیت از بارسنج با ظرفیت در آزمایش نمونههای کامپوزیت ها و همچنین از بارسنج با ظرفیت 20 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 (شکل8). نرخ بارگذاری 2 میلیمتر بر دقیقه لحاظ شده است.

6- نتايج و تفسير آنها

6-1-آزمایش کشش

کامپوزیتهای لایهای و نانوکامپوزیتهای لایهای در دسته مواد همسان گرد عرضی قرار دارند [20]. از آنجایی که الیاف انتخاب شده در این تحقیق تکجهته هستند، بنابراین برای این نمونه ها 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. در حالی که برای پلیمر خالص و نانوکامپوزیت ها انجام یک آزمایش کشش، به دلیل همسان گرد



شکل 7 یک نمونه از آزمایش کشش



شکل 6 صفحه کامپوزیت لایهای ساختهشده به روش چیدمان دستی

2- Extensometer3- Load cell

1- Burn out

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9



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 همسان گرد می توان نوشت که $E_1 = E_2$ و $X_T = Y_T$ ؛ بنابراین خواص کششی چهار ماده در دو بخش 6-1-1 و 6-1-2 ارائه مىشود.

6-1-1- آزمایش در راستای طولی

در این بخش نمونههای کششی کامپوزیتهای لایهای و نانوکامپوزیتهای لایهای با جهت گیری الیاف تک جهته در راستای طول نمونه مورد آزمایش قرار می گیرند. نمونههای قالبریزی شده پلیمر خالص و نانو کامپوزیت ها برای 9 استخراج سفتی کششی و استحکام کششی آزمایش میشوند. در شکل مقادیر سفتی کششی در راستای الیاف نمونههای کامپوزیت لایهای با ترکیب 42درصد حجمی الیاف شیشه، و نانوکامپوزیت لایهای با ترکیب 42درصد حجمي الياف شيشه و 5/0درصد وزني نانولولههاي كربني و مقدار سفتي کششی اپوکسی و اپوکسی تقویتشده با 0/5درصد وزنی نانولولههای کربنی بهصورت نمودار میلهای مشاهده میشود. همانطور که در شکل 9 مشاهده می شود مقدار سفتی کششی مربوط به پلیمر اپوکسی تقویت شده 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 26درصد 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 تخريب شدهاند که بيانگر اين 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 لایا نانوکامپوزیتهای لایهای در شکل 11 ترسیم شدهاند. مقدار استحکام نانوکامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص بیشتر از 5 درصد افزایش همانطور که از شکل 11 می توان دریافت مقدار استحکام کششی در الياف نانوكامپوزيت لايهاي نسبت به كامپوزيت لايهاي افزايش چشم ً درصد داشته است؛ بنابراین میتوان گفت که افزودن نانولولههای کربنے بیشتری بر استحکام کامیوزیتهای لایهای شیشه/ ایوکسی در مقای اپوکسی خالص داشته است و دلیل آن را میتوان به ایجاد اتصال مس میان پلیمر و الیاف به وسیله نانولولههای کربنی و همچنین تقویت الیاف



شکل 9 مقایسه مقدار *E*1 برای چهار ماده مختلف



شکل 10 نمونههای کششی در راستای الیاف کامیوزیت لایهای شیشه/ ایوکسی و نانوكامپوزيت شيشه/ نانولوله/ اپوكسي پس از آزمايش



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].

بهای و	هنگام فرایند ازمایش مشاهده شد که پدیده شکست الیاف در
كششى	نانوکامپوزیت لایهای دیرتر از کامپوزیت لایهای آغاز شده است، ولی با سرعت
نيافته،	بیشتری کل چند لایه تخریب میشود. میتوان این گونه استنتاج کرد که
راستای	تغییر در مقدار استحکام در راستای طولی تا حد زیادی ناشی از ایجاد اتصال
گیر 34	میان الیاف لایههای مجاور به واسطه نانولولههای طویل بوده و ممکن است در
ى تأثير	شرایط آزمایش یک تک لایه مقدار رشد کمتری را نشان دهد. شکل 12
یسه با	حضور نانولولههای کربنی را در بزرگنمایی 200.000 برابر در ناحیه از الیاف
ستحكم	بلند تخریب شده با بزرگنمایی 200 برابر نشان میدهد. ملاحظه میشود که
	الیاف تکجهته به شدت تغییر راستا داده و دچار بینظمی شدید شدهاند.

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9



شکل 12 تصویر SEM ناحیه تخریب در نانو کامپوزیت 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 نانو کامپوزیتهای لایهای را با مقادیر مدول و استحکام کششی نمونههای رزین خالص و نانو کامپوزیت مقایسه می کند. همان طور که مشاهده می شود برخلاف سفتی، استحکام مکانیکی در راستای عرضی کامپوزیتهای لایهای کمتر از استحکام رزین خالص و نانو کامپوزیت است. دلیل اصلی می تواند بروز تمرکز تنشهای شدید ناشی از حضور الیافی باشد که موجب تسریع در واماندگی رزین (مود تخریب غالب) می شوند. در شکل 15 نمونههای کششی در راستای عمود بر الیاف کامپوزیتهای لایه ای و نانو کامپوزیتهای لایه ای پس از آزمایش مشاهده می شود.







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

6-2-آزمایش خمش

کامپوزیتهای لایهای و نانوکامپوزیتهای لایهای با جهتگیری الیاف تکجهته در راستای طول نمونه و همچنین نمونههای قالبریزیشده 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 (*Ef*) در راستای الیاف نمونههای کامپوزیت لایهای شیشه و اپوکسی و نانوکامپوزیت لایهای با 0/5درصد وزنی نانولولههای کربنی، مقدار مدول خمشی اپوکسی و اپوکسی تقویتشده با 5/0درصد وزنی نانولولههای کربنی بهصورت نمودار میلهای مشاهده میشود. در حالت بارگذاری خمشی سه نقطه مقدار مدول خمشی نانوكامپوزيت نسبت به اپوكسى خالص 11درصد افزايش مىيابد، همچنين با افزودن نانولولههای کربنی مقدار مدول خمشی نانو کامپوزیتهای لایهای نسبت به کامپوزیتهای لایهای 9درصد افزایش یافته است. نمودار مقادیر استحکام خمشی ایوکسی خالص و نانوکامپوزیت، و استحکام خمشی (B) در راستای الیاف نمونه های کامپوزیت لایه ای و نانو کامپوزیت های لایه ای 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 تقویتشده با الیاف شیشه تکجهته است؛ بنابراین با انجام آزمایشهای مربوط به برش و استفاده از روابط ارائهشده در استاندارد ASTM مربوط به برش و استفاده از روابط ارائهشده در استاندارد D3518 نمودارهای بار-جابهجایی این آزمایشها را نشان میدهد.

20

(GPa) E_f



مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9



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 -جابهجایی 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

پدیده جدایش لایهای تا حد قابل توجهی به تأخیر افتاده و کرنش بحرانی به میزان قابل توجه 52درصد 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- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر نانولولههای کربنی چند جداره با طول بلند بر خواص مکانیکی کششی، برشی و خمشی رزین خالص و رزین تقویت شده با الیاف بلند ارزیابی شد. برای بهینه سازی روش توزیع نانوذره ها از ارزیابی پیوسته گرانروی با زمان انرژی دهی مافوق صوت استفاده شد. می توان بیان داشت که بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت های لایه ای نسبت به رزین با افزودن نانولوله های کربنی نمود بیشتری دارد، همچنین تحت بارگذاری های مختلف خواص مکانیکی نمونه های کششی تقویت شده با نانولوله ها در راستای الیاف بیشترین افزایش را نشان دادند. در حالی که برای نمونه های کششی تقویت شده با نانولوله ها در راستای عمود بر الیاف کاهش خواص مکانیکی







میدهد. مقدار استحکام برشی با افزودن نانولولههای کربنی به پلیمر و کامپوزیتهای لایه یه مقدار قابل توجهی افزایش مییابد. این افزایش برای نانوکامپوزیتها 61درصد و برای نانوکامپوزیتهای لایه یا 26درصد نسبت به نمونههای مشابه بدون وجود نانولولههاست. در لایه چینی ₃₅ [45-45+] به کار رفته در آزمایش برش، واماندگی ناشی از تجمیع ترکهای ماتریسی¹ و تورق لبه ای² ناشی از آن بوده که الیاف دچار پارگی نمی شوند، اما تخریب نهایی صورت می گیرد. مشاهده شد که با افزودن نانولولههای چند جداره بلند،

1- Matrix-cracking

2- Edge delamination

مہندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دورہ 15، شمارہ 9

- [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 ±45° Laminate, Annual book of ASTM standards, ASTM D3518, 2013.
- [15] A. Claude, C. Gilbert, N. Eddine, E. Bounia, E. Péré3, 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. Warrier, A. Godara, O. Rochez, L. Mezzo, F. Luizi, L. Gorbatikh, 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 نمونه های برشی و خمشی نیز افزایش خواص مکانیکی با افزودن نانولوله های کربنی به دست آمد. نشان داده شد که نانولوله های با طول بلند سبب افزایش چسبندگی و دسته ای شدن الیاف لایه های مجاور شده و موجب می شود که خواص مکانیکی چند لایه تک جهته رشد قابل توجهی نسبت به چند لایه تقویت نشده داشته باشد که در این میان تأخیر در مکانیز م تخریب شکست الیاف در آزمایش کشش در راستای طولی و تأخیر در مکانیز م جدایش لایه ای در آزمایش برش داخل صفحه ای از مهم ترین این موارد بوده است که ناشی از اتصال الیاف لایه های مجاور توسط نانولوله های 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.

133

مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9