مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1394، دوره 15، شماره 3، ص‌ص 411-418

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر افزودن نانوذرات رسی بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی: بررسی تجربی

رضا زمانی[1]، غلامحسین رحیمی[2*]، محمدحسین پل[3]، محمد هدایتیان[1]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
* تهران، صندوق پستی 14115-143، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 آذر 1393
پذیرش: 08 بهمن 1393
ارائه در سایت: 25 بهمن 1393

کلید واژگان:
بار کمانشی
پوسته مشبک
نانوکامپوزیت
نانوذرات رسی
هاردنر اف205

چکیده

در این مقاله تأثیر افزودن نانوذرات رسی به ماتریس پلیمری بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی- نانوذرات رسی بصورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. در تولید پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی از نانو مواد اپوکسی/نانورس به عنوان زمینه و از تارهای شیشه به عنوان الیاف استفاده شده است. مورفولوژی و خواص مکانیکی نانو مواد اپوکسی/نانورس سخت شده با هاردنر اف205 (با درصدهای وزنی 0، 1/5، 3 و 5 از نانوذرات رسی) با استفاده از آزمون‌های پراش اشعه ایکس و کشش استاندارد، تعیین شده است. این سازه‌ها با استفاده از روش پیچش الیاف ساخته شده‌اند. به منظور مطالعه اثر نانوذرات رسی بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی، این سازه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت محوری بصورت فشاری قرار گرفتند. نتایج مربوط به آزمون پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که زنجیره‌های پلیمری توانسته‌اند به فاصله بین صفحات نانوذرات رسی نفوذ کرده و فاصله صفحات آن را افزایش دهند که این امر نشان دهنده لایه‌لایه‌ای بودن ساختار این نانوکامپوزیت‌ها می‌باشد. نتایج تست کشش نیز بیانگر آن است که افزودن نانوذرات رسی به اپوکسی سبب افزایش مدول، استحکام کششی، کرنش شکست و انرژی جذب شده تا شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانورس آن می‌گردد. نتایج آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی نیز نشان دهنده بهبود رفتار کمانشی این سازه‌ها با افزایش نانوذرات رسی به زمینه، می‌باشد. بیشینه بهبود بار کمانشی نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی مربوط به نمونه‌های با 5 درصد وزنی از نانوذرات رسی به مقدار 10 درصد می‌باشد.

Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Nanocomposite Grid Shells: Experimental Investigation

Reza Zamani[1], Gholam Hosein Rahimi[1*], Mohammad Hosein Pol[2], Mohammad Hedayatian[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.
*P.O.B. 14115-143 Tehran, rahimi_gh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 December 2014
Accepted 28 January 2015
Available Online 14 February 2015

Keywords:
Buckling Load
Grid Stiffened Shell
Nanocomposite
Clay Nanoparticle
Epikure F205

ABSTRACT

The current study demonstrates the influence of nanoclay on buckling behavior of glass fiber reinforced polymer (GFRP) grid-stiffened nanocomposite shells. The nanocomposite grid shells were manufactured from continuous glass fiber using a specially designed filament winding machine. The epoxy/clay nanocomposites with different clay content (0%, 1.5%, 3% and 5% of clay) were used as the matrix of the grid stiffened structures. The state of dispersion and mechanical properties of the epoxy/clay nanocomposites were obtained by X-ray diffraction (XRD) method and uniaxial tensile test, respectively and also the grid structures were loaded under uniform axial compression test. The results of XRD show that the clay has been further intercalated by the epoxy matrix. The tensile test results show that the tensile modulus and strength, strain to break and energy to break of the epoxy/clay nanocomposites increase with adding clay loading into the epoxy resin. Furthermore, it is found that the critical buckling load of the cylindrical grid samples increases continuously with increasing the clay content up to 5 wt. %. The maximum value of improvement in the critical buckling load is about 10% for the samples with 5 wt. % of nanoclay.

1- مقدمه

سازه‌های مشبک کامپوزیتی که بعنوان سازه‌هایی بسیار مناسب در تحمل بارهای فشاری محوری شناخته می‌شوند، دارای قابلیت‌های بالایی بوده که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مقاومت به وزن بسیار بالا در مقایسه با سازه‌های ساده؛

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
R. Zamani, Gh. H. Rahimi, M. H. Pol, M. Hedayatian, Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Nanocomposite Grid Shells: Experimental Investigation, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

- توانایی بالا در تغییر مسیر بارهای تخریبی در بارگذاری‌های مختلف به دلیل بکار رفتن شبکه در ساختار آن‌ها؛
- مقاومت در برابر پدیده تورق به علت استفاده از ریب‌های تک جهته کامپوزیتی و قرار گیری الیاف در راستای ریب.

با توجه به این که طراحی مواد سبک‌تر همراه با مقاومت بالاتر، مورد توجه طراحان است، در دو دهه اخیر، حجم گسترده‌ای از پژوهش‌ها در زمینه‌ی طراحی سازه‌های پوسته‌ای، به استفاده از سازه‌های مشبک اختصاص دارد. واسلیف و رازین [1] طراحی، ساخت و تحلیل سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد کاربرد در صنایع هوافضا را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که راندمان وزنی این سازه‌ها به مراتب بیشتر از سازه‌های مشابه با تقویت کننده‌های غیر کامپوزیتی بوده و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه‌تر می‌باشند.

کیم مطالعاتی بر روی نحوه ساخت و تست استوانه‌ها و پانل‌های تقویت شده کامپوزیتی ایزوگرید انجام داد. وی، این نمونه‌ها را تحت بارگذاری محوری مورد آزمایش قرار داد تا مودهای کمانش متفاوت که امکان بروز بر روی این سازه‌ها را دارد، مشاهده نماید [2،3].

رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های فشاری محوری و پیچشی توسط بیساگنی و کوردیسکو به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت [4]. فرولونی و همکارانش [5] نیز ناپایداری سازه‌های توخالی تقویت شده تحت بار هیدرو استاتیک خارجی را برای کاربردهای صنایع فضایی، به روش المان محدود و تجربی مورد مطالعه قرار دادند.

در سال‌های 2009 تا 2011 یزدانی و رحیمی در تحقیقاتی جداگانه به بررسی پارامتریکی بر روی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی پرداختند و تأثیر چگالی و شکل تقویت کننده‌ها را بررسی کردند [6- 8]. نتایج کارهای آن‌ها نشان می‌داد که بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌های با شبکه‌های مثلثی و شش ضلعی به مراتب بیشتر از بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌های تقویت نشده و پوسته‌های تقویت شده با شبکه‌های لوزی می‌باشد، این در حالی است که برای پوسته‌های تقویت نشده در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی مشبکی که ضخامت پوسته خارجی در آن‌ها بسیار کم است، بار ویژه (نسبت مقاومت به وزن) بیشتر است. مشاهدات آن‌ها نشان می‌داد که در بارگذاری محوری، پوسته‌هایی که با شبکه‌های لوزی شکل ساخته شده بودند عملکرد مطلوب‌تری داشتند، همچنین آن‌ها دریافتند که در این نوع بارگذاری افزودن تعداد ریب‌های مارپیچ مفیدتر از افزودن تقویت کننده‌های محیطی است. علاوه بر این، آن‌ها این سازه‌ها را تحت بارگذاری نوسانی قرار دادند و بهترین شکل تقویت کننده‌ها را پیشنهاد کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که تحت بار نوسانی، پوسته‌های مشبک رفتاری به مراتب بهتر از پوسته‌های بدون تقویت کننده دارند.

رحیمی و همکارانش [9] اثر مساحت سطح مقطع و شکل پروفایل ریب بر استحکام کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی را با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار انسیس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که سازه-های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با شبکه مثلثی در مقایسه با استوانه‌های کامپوزیتی غیر مشبک دارای استحکام کمانشی بیشتر و در عین حال بار کمانشی ویژه کمتر می‌باشند.

در بررسی‌های صورت گرفته بر منابع تحقیق، تاکنون مطالعه‌ای بر روی سازه‌های مشبک نانوکامپوزیتی انجام نگرفته است و این در حالی است که استفاده از نانوذرات به عنوان تقویت کننده برای کامپوزیت‌های پلیمری در عین حال که وزن سازه را دچار تغییر زیادی نمی‌کنند، تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و غیره آن‌ها دارند. از این رو به سبب اینکه در کاربردهای هوایی، فضایی و نظامی نیاز به وجود سازه‌هایی با استحکام بالا و وزن کم احساس می شود، در این پژوهش از نانوذرات رسی به منظور تقویت پوسته‌های مشبک کامپوزیتی استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، تحقیق‌های بنیادی و کاربردی زیادی در زمینه نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانوذرات‌رسی صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که خواص ترمومکانیکی این دسته از نانوکامپوزیت‌ها، تنها با افزودن میزان کمی از سیلیکات‌های لایه‌ای (کمتر از 5 درصد وزنی) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این بهبود خواص، برهمکنش سطحی بالای میان ماتریس و سیلیکات لایه‌ای و همچنین نسبت ابعادی بالای نانوذرات رسی پراکنده شده در ماتریس پلیمری می‌باشد [10]. چان و همکارانش [11] مکانیزم تقویت‌کنندگی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانوذرات رسی و بصورت مشخص برهمکنش میان نانوذرات رسی و ماتریس را بررسی نمودند. آن‌ها با افزودن تنها 5 درصد وزنی نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی افزایش 34 و 25 درصدی در مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت در مقایسه با اپوکسی خالص مشاهده نمودند.

هیک و همکارانش [12]، به مطالعه تأثیرات نانوذرات رسی مانند مونت موریلونیت بر بهبود خواص مکانیکی و حرارتی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف پرداختند. آن‌ها دریافتند که تنها با افزایش 1 درصد وزنی نانو سیلیکات، استحکام برشی بین لایه‌ای، استحکام خمشی و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌ها بترتیب 44، 24 و 23 درصد نسبت به کامپوزیت‌های اپوکسی- الیاف شیشه بهبود می‌یابد. آن‌ها این بهبود خواص با افزودن مقدار ناچیز از نانوذرات رس را با دلایل زیر توجیه نمودند:

- بهبود خواص ماتریس به دلیل ساختار بین لایه‌ای (لاملار) آن؛
- برهم‌کنش یا اثر تشدید کننده بین ماتریس پلیمری، الیاف شیشه و نانوذرات رس؛
- بهبود چسبندگی بین ماتریس و الیاف به دلیل حضور نانورس.

کودهاری و همکارانش [13]، دریافتند که مقدار بهینه برای خواص مکانیکی و حرارتی، در نمونه‌هایی با 2 درصد وزنی نانورس اتفاق می‌افتد. نتایج کار آن‌ها نیز نشان می‌داد که نانو ذرات رسی باعث بهبود خاصیت چسبندگی بین ماتریس و الیاف می‌شود.

اقبال و همکارانش [14] نشان دادند که افزودن 3 درصد وزنی نانورس به ماتریس بالاترین مقاومت به ضربه را برای کامپوزیت‌های اپوکسی- الیاف کربن نتیجه خواهد داد. شفیع الله خان و همکارانش [15] اثر افزودن نانوذرات رسی را بر رفتار خستگی سیکلیک و خواص باقیمانده پس از اعمال تنش‌های دوره ای رفت و برگشتی کششی-کششی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌داد که افزودن نانوذرات رسی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن نه تنها باعث بهبود خواص مکانیکی آن‌ها در بارگذاری استاتیکی می‌گردد بلکه سبب بهبود عمر خستگی در یک بارگذاری دوره‌ای معین و افزایش خواص باقیمانده پس از اعمال بارگذاری خستگی نیز می‌گردد. آن‌ها دلیل این بهبود خواص در هر دو حالت بارگذاری استاتیکی و خستگی را به جهت تأثیر نانوذرات رسی در بهبود چسبندگی بین سطح مشترک ماتریس و الیاف کربنی می‌دانستند. در این پژوهش نیز، بیشترین بهبود در عمر خستگی، در نمونه‌های با 3 درصد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

وزنی نانورس به مقدار 74 درصد مشاهده شده است.

شارما و همکارانش [16] نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانوذرات رسی تقویت شده با الیاف شیشه را با استفاده از روش لایه چینی دستی تولید نمودند. نتایج آزمایشات نشان دهنده افزایش استحکام کششی نانوکامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه تا 3 درصد وزنی نانورس و کاهش استحکام کششی برای 5 درصد وزنی نانورس بود که این امر به دلیل پراکندگی بهتر نانوذرات رسی در اپوکسی در مقادیر کمتر نانورس بوده است. علاوه بر این، استحکام خمشی و سختی نمونه‌ها با افزایش میزان نانورس، افزایش نشان می‌داد و بیشترین مقدار آن مربوط به 5 درصد وزنی نانورس بود.

پل و همکارانش در پژوهش‌هایی جداگانه [17،18] نشان دادند با وجود این که کرنش شکست نانو مواد مرکب هیبریدی با افزایش درصد وزنی نانوذرات رسی تقریباً ثابت باقی می‌ماند، ولی افزایش حداکثری 15/5 درصدی در مدول یانگ و 11 درصدی در مقاومت شکست، در حالت 3 درصد وزنی نانوذرات مشاهده می‌شود و با افزایش بیشتر میزان نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی خواص مکانیکی کاهش چشم گیری می‌یابد.

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات رسی به ماتریس پلیمری بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی- نانوذرات رسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- آزمایش

2-1- مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش، شامل سیستم رزین اپوکسی، نانوذرات رسی اصلاح شده و الیاف شیشه است. اپوکسی مورد استفاده، سامانه دو جزئی شامل رزین اپوکسی دیگلیسیدیل اتر بیس فنول نوع آ[1] با نام تجاری ایپون 828 و سخت کننده سیکلو آلیفاتیک آمینی اصلاح شده با نام تجاری اف205 ساخته شده توسط شرکت شل می‌باشد که با نسبت وزنی 58:100 نسبت به پایه اپوکسی (قسمت اول) با آن مخلوط می‌شود. در این پژوهش از یک نانورس طبیعی اصلاح شده به شکل صفحه ای با نام تجاری کلویسیت سی-بی(مونت موریلونیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط شرکت ساترن کلی[2] آمریکا استفاده شده است. الیاف استفاده شده در این پژوهش نیز الیاف شیشه نوع E می‌باشند. این الیاف یک ترکیب از کلسیم، آلومینیوم، بور و سیلیکات بوده که ترکیبات قلیایی کمی نسبت به سایر انواع شیشه دارد. این نوع الیاف شیشه، مقاومت کششی و فشاری و سختی خوب، خواص الکتریکی خوب و قیمت نسبتاً پایینی دارد اما مقاومت نسبت به ضربه آن به نسبت ضعیف است.

2-2 ساخت نانوکامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با نانوذرات رسی

ابتدا برای خشک نمودن نانوذرات رسی، کلویسید سی بی به مدت 24 ساعت در درجه حرارت 80 درجه سانتی‌گراد در آون خلأ قرار داده شد. علاوه بر این با توجه به بالا بودن ویسکوزیته رزین انتخاب شده، رزین را تا دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه حرارت داده تا ویسکوزیته آن کاهش یابد. سپس نانوذرات رسی خشک شده با درصدهای وزنی 0، 1/5، 3 و 5 نسبت به کل سیستم رزین (اپوکسی و سخت کننده) به اپوکسی (ایپون 828) اضافه شده و با همزن مکانیکی بصورت اختلاط برشی با سرعت 3000 دور بر دقیقه به مدت 2 ساعت مخلوط گردید. در طول مدت هم زدن سعی شده تا دمای مخلوط، در 60 درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شود. سپس مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت 20 دقیقه تحت امواج فراصوتی3 با توان 150 kW/cm^2 و دامنه 5 µm قرار گرفت تا نانوذرات رسی درون پایه اپوکسی پخش شود. در طی این مرحله هر 5 دقیقه دستگاه خاموش شده و میله[4] دستگاه آلتراسونیک تمیز می‌گردید. پس از آن برای حذف حباب‌های ایجاد شده در مخلوط طی عمل اختلاط، اپوکسی- نانورس تهیه شده برای مدت 30 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد در آون خلأ قرار داده شد و پس از حباب زدایی در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا دمای آن تا درجه حرارت محیط کاهش یابد..

پس از انجام عملیات حباب زدایی، به منظور آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد تست کشش، میزان مناسب از سخت کننده اف205 به مخلوط تهیه شده اضافه می‌شود و به مدت 5 دقیقه به آرامی با دست هم زده می‌شود. سپس مخلوط آماده شده در قالب‌های سیلیکونی از پیش ساخته شده برای آزمون تست کشش، ریخته شده و به مدت لازم در درجه حرارت محیط قرار داده می‌شود تا پخت نهایی بصورت هوا پخت صورت گیرد. قابل ذکر است که بین 3 تا 5 نمونه جهت انجام تست کشش برای هر درصد وزنی از نانورس مورد استفاده قرار گرفته است.

2-3- ساخت پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی

برای ساخت نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی با روش پیچش الیاف، از الیاف شیشه نوع E و نانو رزین اپوکسی- نانورس، سخت شده با هاردنر اف205 ، که در بخش قبل روش آماده سازی آن توضیح داده شد، استفاده شده است. به طور متوسط برای هر نمونه نانوکامپوزیتی مشبک، حدود 310 گرم نانو رزین استفاده شده است؛ که حدود 110 گرم از نانو رزین برای مرحله رشته پیچی تقویت کننده‌های محیطی و مابقی مواد (حدود 200 گرم) برای مرحله رشته پیچی پوسته مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور دستیابی به رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی، از هر نمونه حداقل 3 مورد ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است.

شبکه استفاده شده برای تمامی نمونه‌ها از نوع لوزی بوده که دارای سه تقویت کننده مارپیچ ساعت‌گرد و سه تقویت کننده مارپیچ پادساعت‌گرد با زوایای ±30 درجه نسبت به محور پوسته می‌باشد. مقطع تقویت کننده‌ها، مربع شکل با ابعاد $6\times6\ mm^2$ است. تمامی نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی دارای طول 280 میلی‌متر و قطر خارجی 140 میلی‌متر بوده و ضخامت پوسته خارجی آن‌ها برابر با 2 میلی‌متر می‌باشد. زاویه الیاف در پوسته خارجی نسبت به محور استوانه به میزان ±57 درجه می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به این مطلب که این سازه‌ها تحت بارگذاری محوری کمانشی مورد تست و آزمایش قرار می‌گیرند، نیاز است که در حین بارگذاری از موازی بودن دو لبه قطعه اطمینان حاصل گردد تا بار فشاری بصورت یکنواخت در تمام نقاط لبه‌ای سازه اعمال گردد و همچنین از کمانش محلی در لبه‌های انتهایی نمونه‌ها قبل از کمانش کلی سازه جلوگیری شود، در لبه‌های انتهایی این سازه‌ها، رینگ‌هایی از جنس اپوکسی خالص تعبیه گردیده است.

نام گذاری نمونه‌ها در این مقاله با کد Fn می‌باشد که حرف F معرف نمونه‌های سخت شده با هاردنر اف205 بوده و n یک مقدار عددی بوده که بیانگر درصد نانوذرات رسی در ماتریس می‌باشد و رقم صحیح درصد نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی است. برای مثال F1 معرف نمونه‌های نانوکامپوزیتی

1- DGEBA
2- Southern Clay

3- Ultrasonic
4- Probe

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

اپوکسی/ نانورس سخت شده با هاردنر اف205 و با 1/5 درصد وزنی از نانوذرات رسی می‌باشد در شکل 1 تعدادی از نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی ساخته شده جهت انجام آزمون کمانش نشان داده شده است.

2-4- آزمون‌های مکانیکی

توزیع نانوذرات رسی در زمینه اپوکسی و مورفولوژی ساختار نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانورس، به روش پراش پرتو ایکس[1] بررسی شده است. خواص کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانورس نیز با استفاده از آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D638 تعیین شده است. برای بررسی رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی نیز، این نمونه‌ها تحت بار محوری فشاری قرار گرفته‌اند.

به منظور انجام آزمون کشش تک محوری و همچنین اعمال بار محوری فشاری بر نمونه‌های مشبک، از دستگاه استاندارد یونیورسیال اینسترون 5500R با ظرفیت اعمال بار 200 کیلونیوتن استفاده شده است.

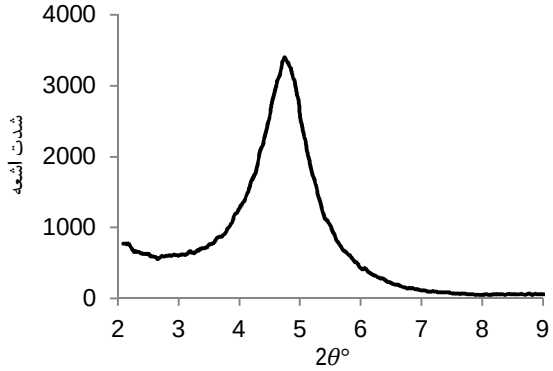
3- نتایج و بحث

3-1- نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس

3-1-1- آزمون پراش اشعه ایکس

آزمون پراش پرتوی ایکس امکان شناخت مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و چگونگی توزیع نانوذرات رسی در زمینه اپوکسی را فراهم می‌کند. در شکل 2 نتایج مربوط به پراش پرتوی ایکس نانوذرات رسی اصلاح شده، نشان داده شده است و همان طور که از شکل مشخص است نانوذرات رسی کلویسید سی بی دارای بیشینه مقداری در منحنی پراش اشعه ایکس در موقعیت $2\theta = 4/73°$ دارد که بر اساس رابطه براگ فاصله بین صفحه‌ای نانوذرات رسی برابر با 1/865 نانومتر می‌باشد.

شکل 1 پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی تولید شده به روش پیچش الیاف



شکل 2 پراش پرتوی ایکس مربوط به نانوذرات رسی اصلاح شده

نتایج مربوط به پراش پرتوی ایکس مربوط به نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانورس سخت شده با هاردنر اف205 با درصد های وزنی مختلف از نانوذرات رسی در جدول 1 نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های نانوکامپوزیتی، فاصله صفحات نانوذرات رسی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس حدوداً به بیش از 2 برابر افزایش یافته و زاویه پراش پرتوی ایکس تا حدود 2/5° کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج پراش پرتوی ایکس نشان می‌دهد که افزایش فاصله صفحات نانوذرات رسی و توزیع آن در ماتریس اپوکسی نانوکامپوزیت‌های تولید شده از نوع بین لایه‌ای[2] بوده و بیشترین بازشدگی صفحات نانوذرات رسی در نمونه‌های پخت شده با سخت کننده اف205 محتوی 5 درصد وزنی نانورس به مقدار Å 36/92 اتفاق می‌افتد.

تهیه نانوکامپوزیت‌هایی با مورفولوژی بین لایه‌ای بمعنای قرار گرفتن زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های نانوذرات رسی و در نتیجه افزایش فاصله صفحات نانوذرات رسی می‌باشد که این امر سبب افزایش سطح تماس شده و بهره برداری از مزایای فاز نانو را فراهم می‌سازد.

3-1-2- آزمون کشش تک محوری

آزمون کشش تک محوری، رایج‌ترین نوع آزمون‌های مواد برای تعیین مشخصات اولیه مکانیکی می‌باشد. این آزمون به طور گسترده‌ای برای مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌ها تحت استاندارد ASTM D-638، تحت آزمون قرار گرفته‌اند که برای این منظور از دستگاه اینسترون 5500R آزمایشگاه تست خواص مواد دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دقیق کرنش و مدول کششی، از یک اکستنسیومتر تک محوری استفاده شده است (شکل 3). نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده جهت انجام آزمون کشش نیز در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول1 نتایج مربوط به آزمون پراش اشعه ایکس برای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس.

کد نمونه	F0	F1	F3	F5
موقعیت ($2\theta°$)	4/73	2/82	2/92	2/78
فاصله صفحات نانورس (Å)	18/65	36/31	35/08	36/92

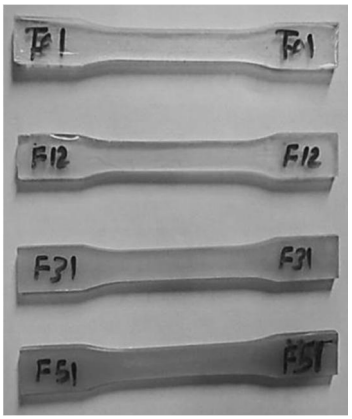
شکل3 نمونه نانوکامپوزیتی تحت کشش تک محوری

1- XRD

2- Intercalated

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]



شکل4 نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شده جهت انجام آزمون کشش تک محوری

در جدول 2 خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس (مدول کششی، استحکام کششی، کرنش تا شکست و انرژی شکست) برای درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات رسی نشان داده شده است.

همان‌طور که می‌توان دید، افزودن نانوذرات رسی کلویزیت سی بی به ماتریس اپوکسی باعث افزایش مدول کششی می‌شود و بیشترین مدول کششی برای نمونه‌های با 5 درصد وزنی نانوذرات رسی و به میزان 13/4 درصد می‌باشد. سایر خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها (استحکام کششی، کرنش تا شکست و جذب انرژی تا شکست) نیز با افزایش نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی افزایش می‌یابند اما بیشینه مقدار این خواص در نمونه‌های با 1/5 درصد وزنی نانورس اتفاق می‌افتد که به ترتیب به میزان 27/86، 30/58 و 72/90 درصد در مقایسه با اپوکسی خالص می‌باشد. بعبارت دیگر با افزودن نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی سخت شده با هاردنر اف205، نمونه‌های نرم‌تری نسبت به اپوکسی خالص حاصل می‌شود.

عوامل مؤثر در رفتار نمونه‌های نانوکامپوزیتی در برابر بارهای اعمالی را می توان بصورت زیر ارائه نمود:

- با انجام بررسی‌های دقیق بر روی سطح مشترک نانوذرات رسی و ماتریس پلیمری در کامپوزیت‌های پایه پلیمری در حضور نانوکلی، نشان داده شده است که سیلیکون موجود در نانوذرات رسی با اتم‌های اکسیژن و کربن موجود در اپوکسی و در نتیجه اپوکسی واکنش داده و باعث ایجاد پیوند شیمیایی بین سطح مشترک نانوذرات رسی و ماتریس اپوکسی می‌شود. بنابراین افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانوذرات رسی که در این پژوهش نتیجه شده است به دلیل وجود همین چسبندگی بین سطح مشترک ماتریس پلیمری و نانوذرات رسی می‌باشد [19،20].

جدول2 خواص مکانیکی اپوکسی با افزودن درصدهای مختلف نانوذرات رسی به آن.

کد نمونه	مدول کششی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	کرنش تا شکست (%)	انرژی شکست (kJ/m^2)
F0	2448/5	33/94	1/54	27/24
F1	2543/0	43/40	2/01	47/11
F3	2664/5	40/18	1/78	38/82
F5	2776/6	37/01	1/62	33/25

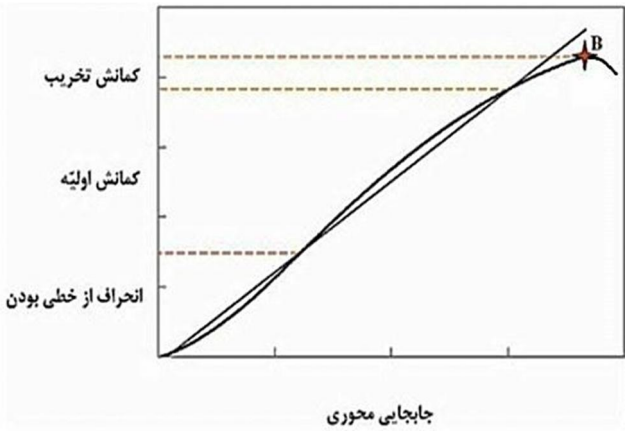
- نانوذرات رسی و دسته‌های تجمع شده آن‌ها بصورت اینترکلت در رزین اپوکسی می‌توانند همانند یک پرکننده صلب در رزین عمل کرده و مانع گسترش میکروترک‌ها در یک مسیر مستقیم شوند. اما از سوی دیگر، خود این ذرات به ویژه در تجمع در ابعاد بزرگتر می‌تواند باعث تمرکز تنش و در نتیجه افزایش تنش و جوانه زدن ترک شوند. این موضوع می‌تواند باعث کاهش استحکام به ویژه در درصدهای بالاتر از نانوذرات رسی گردد.
- از آنجایی که سیستم رزین انتخابی دارای ویسکوزیته نسبتاً بالایی بوده و همچنین با افزودن نانوذرات رسی به رزین اپوکسی، ویسکوزیته آن به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین در درصدهای وزنی بالا از نانوذرات رسی، پراکندگی مناسب نانوذرات رسی در زمینه حاصل نمی‌شود و همچنین امکان حذف کامل حباب‌های ایجاد شده در مراحل پراکندگی نانوذرات در زمینه در درصدهای وزنی بالا از نانوذرات امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین با افزایش درصد وزنی نانوذرات رسی در زمینه پلیمری، استحکام کششی این نانوکامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد و نمونه‌ها پیش از آن که به بیشینه تحمل خود برسند در مقادیر کمتری از بارهای اعمالی خواهند شکست [21].

3-2- پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی

3-2-1- آزمون کمانش

در روش تجربی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، نظیر تحقیقاتی که توسط کیم [3،2] و بیساگنی [4] بر روی کمانش پوسته‌ها و صفحات تقویت شده صورت پذیرفته است؛ بار کمانش مطابق با حداکثر بار اعمال شده بر پوسته پیش از کمانش می‌باشد. طبق مشاهدات در مواد کامپوزیتی بر خلاف مواد پلاستیکی، به محض آن که بار به نقطه بیشینه خود در نمودار می‌رسد و سازه دچار کمانش می‌شود، نمودار سقوط کرده و نقطه بیشینه دیگری در نمودار ملاحظه نمی‌شود (شکل 5).

کاهش شیب و انحنایی که در ابتدای نمودار مربوط به منحنی بار- جابجایی مشاهده می‌شود مربوط به مشکلات پیش آمده حین ساخت نمونه‌ها (همچون وجود نابجایی‌ها و خلل و فرجهایی در نمونه‌ها) می‌باشد که هنگام اعمال بار فشاری به نمونه، ابتدا این عیوب مرتفع شده و سپس ماده در برابر بار مقاومت نشان می‌دهد. بنابراین در ابتدای تست، با افزایش کمی در بار، جابجایی محوری سازه نسبتاً زیاد می‌باشد و پس از مدت زمان کوتاهی رفتار سازه به حالت خطی در می‌آید.



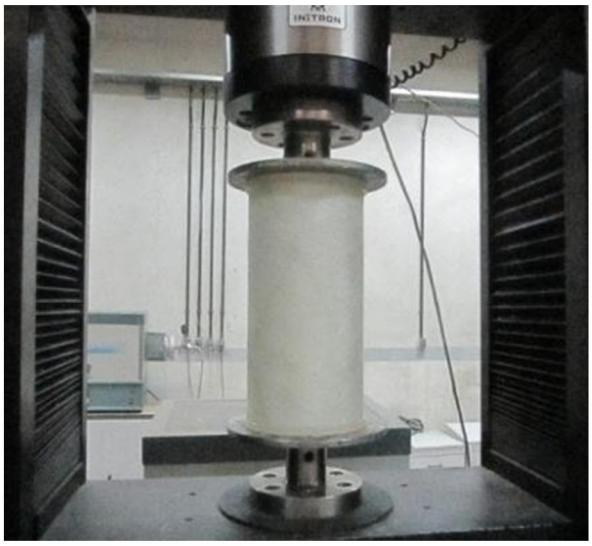
شکل5 شماتیکی از منحنی بار- جابجایی سازه‌های تمام کامپوزیتی مشبک [22]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

با توجه به پیچیدگی‌های موجود هنگام ساخت نمونه‌ها و مشکلات مربوط به ساخت، ساخت نمونه‌ها با وجود پارامترهای طراحی متنوع امکان پذیر نبود و بنابراین در ساخت نمونه‌ها سعی شده است که ابعاد نمونه‌ها، درصد حجمی الیاف، زاویه پیچش الیاف و سایر پارامترها برای تمامی نمونه‌ها مشابه بوده و تنها پارامتر طراحی، مقدار نانوذرات رسی در نمونه‌ها باشد تا بتوان نمونه‌های تولید شده را به درستی با یکدیگر مقایسه نمود. در شکل ۶ نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی ساخته شده جهت بررسی رفتار کمانشی آن‌ها، نشان داده شده است.

بمنظور تعیین خواص کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی و بررسی اثر نانوذرات رسی بر این خواص، نمونه‌ها را تحت بارگذاری محوری فشاری قرار داده و نمودار بار- جابجایی هر یک از نمونه‌ها را تعیین می‌نماییم. برای این منظور، سازه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت فشاری با سرعت ۱ میلی-متر بر دقیقه قرار گرفته‌اند (شکل ۷). همان‌طور که اشاره شد با توجه به اینکه مواد کامپوزیتی دارای ماهیتی شکننده بوده و اینکه منحنی‌های نیرو-جابجایی در این دسته از مواد بر خلاف پلاستیک‌ها دارای یک نقطه ماکزیمم است (که نشان دهنده بار کمانشی می‌باشد)؛ بار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی نقطه ای از منحنی بار-جابجایی است که نمودار به بیشینه مقدار خود برسد.

شکل ۶ نمونه های مشبک نانوکامپوزیتی.

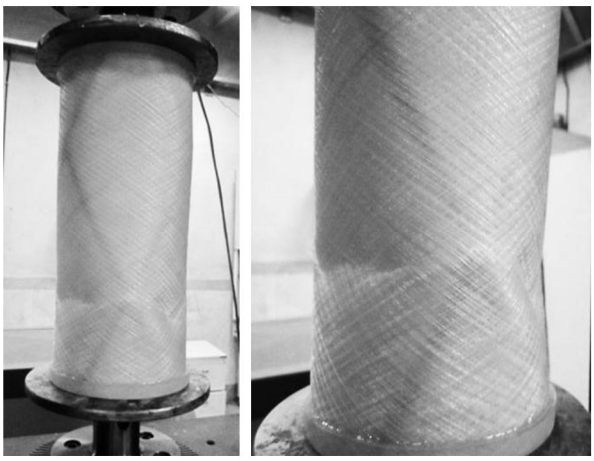


شکل ۷ پوسته مشبک نانوکامپوزیتی تحت بار محوری فشاری

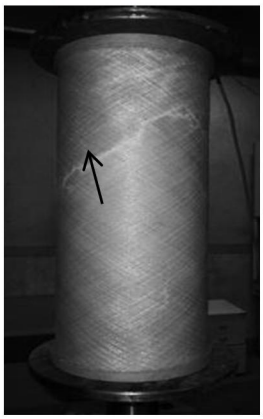
در شکل ۸ حالت کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی با شبکه لوزی در اثر بار محوری کمانشی ارائه شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است حالت کمانش نمونه‌ها تقریباً به حالت کمانش عمومی بوده و پوسته خارجی و تقویت کننده‌های تعبیه شده در سازه تقریباً بصورت همزمان دچار کمانش می‌شوند که این حالت بهترین شکل طراحی سازه‌های مشبک می‌باشد؛ چرا که سازه از حداکثر توانایی خود برای تحمل بار محوری استفاده می‌کند. علاوه بر این با بررسی کمانش پوسته‌های مشبک کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی با درصد مختلف از نانورس، نشان داده شد که افزودن نانوذرات رسی به زمینه پلیمری، تأثیر چندانی بر مد کمانش ندارد.

در صورتی که قبل از تخریب کامل سازه، فک دستگاه به حالت اولیه خود باز گردد؛ پوسته نیز به حالت اولیه خود بر خواهد گشت. تنها اثر بار اعمالی بر روی سازه به صورت خطوط سفید رنگی خواهد بود که نشان دهنده نواحی تخریب شده ماتریس است. در شکل ۹ تصویری از پوسته مشبک پس از بار برداری نشان داده شده است.

شکل ۱۰ نشان دهنده منحنی‌های بار- جابجایی مربوط به سازه‌های مشبک نانوکامپوزیتی در حضور ۰، ۱/۵، ۳ و ۵ درصد از نانوذرات رسی می‌باشد. از آن‌جایی که وزن نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقریباً با یکدیگر برابر است، بنابراین تغییرات پارامتر بار به وزن (بار ویژه) که از پارامترهای اساسی برای این دسته از سازه‌ها می‌باشد نیز همانند تغیرات مربوط به بار کمانشی سازه‌ها می‌باشد و در این مقاله، تنها تغییرات بار کمانشی با افزودن نانوذرات



شکل ۸ پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی پس از کمانش.



شکل ۹ پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی پس از بار برداری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

رسی به زمینه این سازه‌ها گزارش شده است. با مشاهده منحنی بار- جابجایی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی می‌توان دریافت که بار کمانشی این سازه‌ها با 0، 1/5، 3 و 5 درصد وزنی از نانوذرات رسی، به ترتیب به میزان 32776، 33298، 36010 و 36222 نیوتن می‌باشد که این مقادیر نشان می‌دهد با افزایش میزان نانوذرات رسی در زمینه این سازه‌ها، بار کمانشی آن‌ها نیز به صورت پیوسته با نرخ رشد کم افزایش می‌یابد و بیشترین بار کمانشی برای پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی با 5 درصد وزنی از نانوذرات رسی حاصل می‌گردد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانوذرات رسی در زمینه، سازه مشبک در مقادیر بزرگ‌تری از جابجایی دچار کمانش می‌شوند که این امر نشان دهنده افزایش مقاومت کمانشی این سازه‌ها با افزودن نانوذرات رسی به زمینه می‌باشد.

در جدول 3 نیز خلاصه‌ای از نتایج حاصله از آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه مقدار بار کمانشی و جابجایی تا کمانش مربوط به نمونه‌های با 5 درصد وزنی نانوذرات رسی، با افزایشی به ترتیب به میزان 10/51 درصد و 13/32 درصد نسبت به حالت اپوکسی خالص می‌باشد.

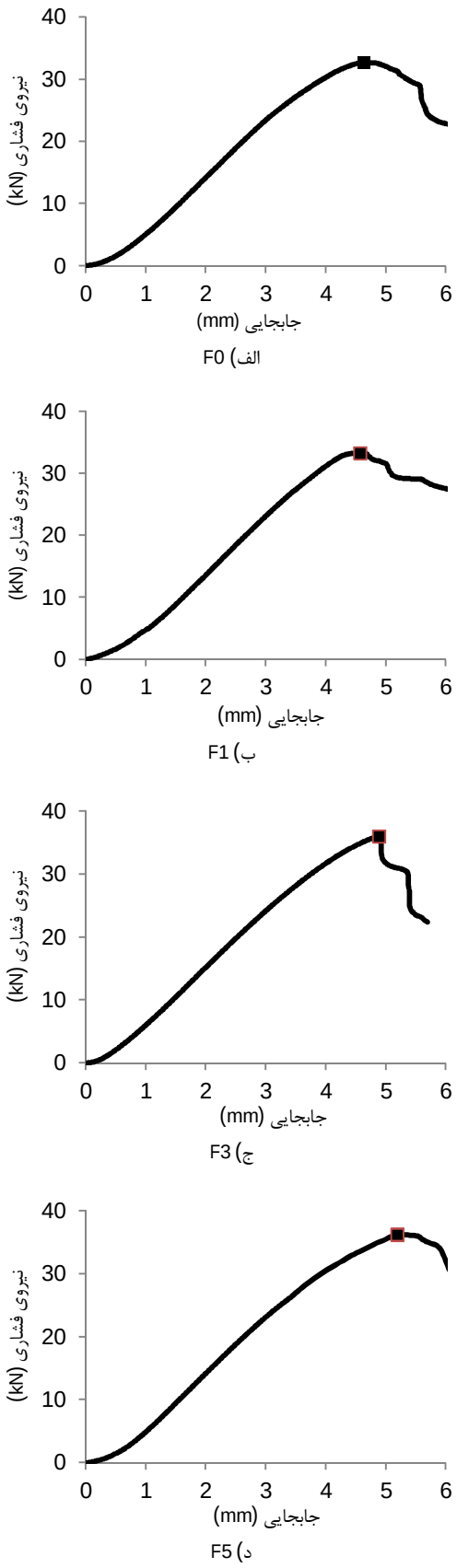
همان‌طور که در ابتدای این بخش اشاره شد نمودارهای بار- جابجایی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی در ابتدا دارای یک انحنای و کاهش شیب می‌باشند که مربوط به وجود عیوب در ساختار این سازه‌ها می‌باشد و پس از پر شدن این نابجایی‌ها، نمودار دارای رفتار خطی است. پس از قسمت خطی نمودار، نمونه به بیشینه بار کمانشی خود رسیده و سپس روند نزولی پی می‌گیرد.

بهبود مقاومت کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی با افزودن نانوذرات رسی به زمینه را می‌توان با دلایل زیر توجیه نمود:

- همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد مدول و استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس سخت شده با عامل پخت اف205 با افزایش نانوذرات رسی نسبت به حالت اپوکسی خالص افزایش می‌یابد.
- نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، سبب بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها می‌شود. [12،13،15،23و24]

جدول3 نتایج حاصل از آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی تحت بار محوری.

کد نمونه	بار کمانشی		جابجایی تا کمانش	
	تغییرات نسبت به اپوکسی خالص (%)	(N)	تغییرات نسبت به اپوکسی خالص (%)	(mm)
F0	0	32776	0	4/58
F1	1/59	33298	1/09	4/63
F3	9/87	36010	6/55	4/88
F5	10/51	36222	13/32	5/19



شکل10 منحنی‌های بار- جابجایی مربوط به آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی الف)F0 ب)F1 ج)F3 د)F5

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]

4- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات رسی به زمینه پوسته‌های مشبک کامپوزیتی بر رفتار کمانشی این سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. پوسته-های مشبک از جنس الیاف شیشه/اپوکسی- نانو رس بوده و با روش پیچاندن الیاف تولید شده‌اند. نانوذرات رس با درصدهای وزنی 0، 1/5، 3 و 5 درصد در سیستم رزین اپوکسی که با هاردنر اف205 تهیه می‌شود، ترکیب شده است. خواص مکانیکی و مورفولوژی نانو مواد اپوکسی- نانوذرات رسی پخت شده با هاردنر اف205 نیز با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس و تست استاندارد کشش مورد بررسی قرار گرفته است. پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی نیز تحت بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته و رفتار کمانشی آن‌ها تعیین شده است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که:

- مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانورس تولید شده به حالت بین لایه‌ای می‌باشد؛ تهیه نانوکامپوزیت‌هایی با مورفولوژی بین لایه-ای به معنای قرار گرفتن زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های نانوذرات رسی و در نتیجه افزایش فاصله صفحات نانوذرات رسی می‌باشد که این امر سبب افزایش سطح تماس شده و بهره برداری از مزایای فاز نانو را فراهم می‌سازد.
- افزودن نانوذرات رسی کلویزیت سی بی به ماتریس اپوکسی باعث افزایش مدول کشسی می‌شود و بیشترین مدول کشسی برای نمونه های با 5 درصد وزنی نانوذرات رسی و به میزان 13/4 درصد می‌باشد. سایر خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها (استحکام کششی، کرنش تا شکست و جذب انرژی تا شکست) نیز با افزایش نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی افزایش می‌یابند اما بیشینه مقدار این خواص در نمونه‌های با 1/5 درصد وزنی نانورس اتفاق می‌افتد که به ترتیب به میزان 27/86، 30/58 و 72/90 درصد در مقایسه با اپوکسی خالص می‌باشد.
- با توجه به نوع طراحی هندسی نمونه های مشبک، مد کمانش پوسته‌های مشبک به صورت کمانش عمومی می‌باشد.
- افزودن نانوذرات رسی به زمینه پلیمری، تأثیری بر مد کمانش پوسته‌های مشبک ندارد.
- بار کمانشی و جابجایی تا کمانش مربوط به پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی با افزایش میزان نانوذرات رسی در ماتریس، بصورت پیوسته افزایش یافته و بیشترین مقاومت کمانشی این سازه‌ها مربوط به نمونه‌های با 5 درصد وزنی از نانوذرات رسی می‌باشد. این بیشینه افزایش در پارامترهای بار کمانشی و جابجایی تا کمانش به ترتیب به مقدار 10/51% و 13/32% نسبت به پوسته های مشبک کامپوزیتی می‌باشد.

5- مراجع

[1] V. Vasiliev, A. Razin, Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications, *Composite structures,* Vol. 76, No. 1, pp. 182-189, 2006.

[2] T. D. Kim, Fabrication and testing of composite isogrid stiffened cylinder, *Composite structures,* Vol. 45, No. 1, pp. 1-6, 1999.

[3] T. D. Kim, Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel, *Composite structures,* Vol. 49, No. 1,pp. 21-25, 2000.

[4] C. Bisagni, P. Cordisco, Post-buckling and collapse experiments of stiffened composite cylindrical shells subjected to axial loading and torque, *Composite structures,* Vol. 73, No. 2, pp. 138-149, 2006.

[5] E. Frulloni, J. Kenny, P. Conti, L. Torre, Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications, *Composite structures,* Vol. 78, No. 4, pp. 519-528, 2007.

[6] M. Yazdani, G. H. Rahimi, A. A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading, *Scientific Research and Essay,* Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.

[7] M. Yazdani, G. H. Rahimi, The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.

[8] M. Yazdani, G. H. Rahimi, The behavior of GFRP-stiffened and-unstiffened shells under cyclic axial loading and unloading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.

[9] G. H. Rahimi, M. Zandi, S. F. Rasouli, Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading, *Aerospace Science and Technology,* Vol. 24, pp. 198-203, 2013.

[10] A. A. Azeez, K. Y. Rhee, S. J. Park, D. Hui, Epoxy clay nanocomposites–processing, properties and applications: A review, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 45, No. 1, PP. 308-320, 2013.

[11] M-l Chan, K-t Lau, T-t Wong, M-p Ho, D Hui, Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 42, No. 6, pp. 1708-1712, 2011.

[12] 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, No. 20, pp. 1821-1837, 2003.

[13] F. Chowdhury, M. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 421, No. 1, pp. 298-306, 2006.

[14] K. Iqbal, S. U. Khan, A. Munir, J. K. Kim, Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Science and Technology,* Vol. 69, No. 11, pp. 1949-1957, 2009.

[15] S. U. Khan, A. Munir, R. Hussain, J. K. Kim, Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites containing nanoclay, *Composites Science and Technology,* Vol. 70, No. 14, pp. 2077-2085, 2010.

[16] B. Sharma, S. Mahajan, R. Chhibber, R. Mehta, Glass Fiber Reinforced Polymer-Clay Nanocomposites: Processing, Structure and Hygrothermal Effects on Mechanical Properties, *Procedia Chemistry,* Vol. 4, pp. 39-46, 2012.

[17] M. H. Pol, G. H. Liaghat, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (In Persian)

[18] M. H. Pol, G. H. Liaghat, S. Mazdak, Effect of nanoclay particles on the ballistic behavior of glass/epoxy composites- experimental investigation, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 4, pp. 98-104, 2013. (In Persian)

[19] M.-l. Chan, K.-t. Lau, T. Wong, F. Cardona, Interfacial bonding characteristic of nanoclay/polymer composites, *Applied Surface Science,* Vol. 258, No. 2, pp. 860-864, 2011.

[20] M.-l. Chan, K.-t. Lau, T.-t. Wong, M.-p. Ho, D. Hui, Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 42, No. 6, pp. 1708-1712, 2011.

[21] B. Qi, Q. Zhang, M. Bannister, Y.-W. Mai, Investigation of the mechanical properties of DGEBA-based epoxy resin with nanoclay additives, *Composite structures,* Vol. 75, No. 1, pp. 514-519, 2006.

[22] M. Yazdani, *Analytical and Experimental Buckling Analysis of Grid Stiffened Composite Shells under Axial Loading,* PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2009. (In Persian)

[23] E. Bozkurt, E. Kaya, M. Tanoğlu, Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology,* Vol. 67, No. 15, pp. 3394-3403, 2007.

[24] A. Dorigato, S. Morandi, A. Pegoretti, Effect of nanoclay addition on the fiber/matrix adhesion in epoxy/glass composites, *Journal of Composite materials,* Vol. 46, No. 12, pp. 1439-1451, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.9.9]