

An Experimental Study of Buckling of FML Plate Reinforced with Nanoclay

AliReza Mohammadi¹, *Mehdi Yarmohammad Tooski²

1–MSc student, Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2–Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Citation: Mohammadi A.R., Yarmohammad Tooski M. An Experimental Study of Buckling of FML Plate Reinforced with Nanoclay. Metallurgical Engineering 2019; 22(3): 178-187 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.98376.1220>

 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.98376.1220>

ABSTRACT

Fiber-metal laminate, is known as FML in the composite structures. It is widely used in the aerospace industry due to good properties, weight optimization and other industrial properties such as fire resistance, high strength limit, impact resistance and corrosion. In addition, these materials have special characteristics such as high strength and low weight. The discussion of buckling behavior is one of the most important discussions of mechanical science. The present study examines the effects of nanoparticles (nanocleys) on the mechanical characteristic (buckling) of metal/ composite materials of epoxy basalt. Multi-layer fiber-epoxy base metal is made of two-layer aluminum alloy 2024 which the between of layers is located the nanocomposite core containing epoxy with nanoclay. The nanocomposite core consists of basalt fibers with the weight to area ratio (W/A) equal to 300 gr/m² EPR1080 resin, EA1080 hardener and bentonite clay nanoparticles with 0, 1, 3 and 5 percentages. It should be noted that, all specimens were made using hand lay up. Also, buckling tests have done using a tensile test device at a speed of 0.5 mm / min. The results of the buckling experiments indicate that the buckling load of FML beam with 5% of nanoclay rather than other percentages of it has better buckling load. Also, absorbed energy enhanced by increasing weight content of nano particle.

Keywords: FML, Nano clay, Buckling, Al 2024, Bazalt Fiber.

Received: 25 November 2018 | Accepted: 6 August 2019

■ ■

* *Corresponding Author:*

MehdiYarmohammadTooski, PhD

Address: Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 33722831

E-mail: m_yarmohammad@azad.ac.ir

مطالعه تجربی کمانش ورق FML تقویت شده با نانوس

علیرضا محمدی^۱، *مهدی یارمحمدتوسکی^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

چکیده

ساختارهای الیاف - فلز بانام اختصاری FML (Fiber Metal Laminates) در ساختارهای کامپوزیت شناخته می‌شوند. این ساختارها به دلیل خواص خوبی از جمله صرفه‌جویی وزنی و همچنین خواص صنعتی دیگری نظیر مقاومت در برابر آتش، حد تحمل بالا و مقاومت در برابر پایداری استاتیکی، ضربه و خوردگی به‌طور گسترده در صنایع هوایی کاربرد دارند. این مواد دارای خصوصیات خاصی همچون مقاومت بالا و وزن کم می‌باشند. رفتار کمانشی یکی از مهم‌ترین بحث‌های علم مکانیک است. بنابراین، مقاوم‌سازی و افزایش استحکام سازه‌ها در برابر پایداری استاتیکی یا رفتار کمانشی، بخش وسیعی از مطالعات پژوهشگران را تشکیل داده است. پژوهش پیش رو، به تأثیر نانو ذرات رس بر روی پایداری استاتیکی یا رفتار کمانشی فلز-مواد مرکب بازالت اپوکسی به‌صورت تجربی می‌پردازد. چندلایه الیاف - فلز، از دورویه آلومینیومی ۲۰۲۴ که بین آن‌ها هسته نانو کامپوزیتی بازالت اپوکسی حاوی نانو رس قرار دارد، ساخته شده است. هسته نانو کامپوزیتی شامل الیاف بازالت با وزن واحد سطح ۳۰۰ گرم بر مترمربع، رزین EPR1080، سخت‌کننده EA1080 و نانو ذرات رسی بنتونیت با درصدهای ۰، ۱، ۳ و ۵ می‌باشد. تمام نمونه‌های تحت آزمون کمانش با روش لایه‌چینی دستی ساخته شده است. آزمایش‌های کمانش با استفاده از دستگاه تست کشش با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های کمانش نشان‌دهنده این است که، تیر FML با ۵ درصد وزنی نانو رس نسبت به سایر درصدهای وزنی دارای بار بحرانی به‌مراتب بالاتری است. همچنین با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نانو رس، کمانش، آلومینیوم ۲۰۲۴، الیاف بازالت، FML.

دریافت: ۱۳۹۷/۹/۴ | پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۱۵

۱. مقدمه

برخی از عوامل مؤثر بر کمانش بر روی چندلایه‌های الیاف فلز که برخی از آنان با کامپوزیت‌های چندلایه نیز مشترک بوده شامل تورق اولیه که می‌تواند به مسائلی چون خطای ساخت لایه‌ها، مهارت متصل کردن لایه‌ها به یکدیگر و غیره وابسته بوده [8]، چیدمان لایه‌های کامپوزیتی [9]، شرایط مرزی، نوع و نحوه بارگذاری [10] می‌باشند. در حال حاضر، بررسی رفتار مکانیکی خصوصاً آنالیز پایداری چندلایه‌های الیاف فلز چه از لحاظ تئوری و چه عملی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به دلیل کاربرد گسترده این مواد، تحقیقات ارزشمند زیادی نیز در خصوص رفتارهای دیگر چندلایه‌های الیاف فلز انجام شده است که سان و همکارانش نقش مؤثری را در این زمینه داشتند [11]. در تحقیق تجربی رمرز و بورست [8] از تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای دستیابی به مکانیزم شکست در سطح میانی استفاده شد و جهت تفسیر مدل تخریب سطح میانی بکار

برای آماده‌سازی در صنعت هوافضا، مساله‌ی کاهش وزن در سازه‌های حساس، موضوعی بسیار چالش‌برانگیز می‌باشد زیرا این امر منجر به کاهش هزینه‌ها می‌گردد. در این صنعت، استفاده از صفحاتی که به‌صورت لایه‌های ساخته شده و با مواد تقویتی مستحکم شده‌اند، در جهت تولید ساختارهای کم‌وزن با مقاومت خمشی و مقاومت کمانش زیاد کاربرد زیادی دارد [5-1]. کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف فلز از چسباندن لایه‌های فلزی و کامپوزیتی متشکل از الیاف و رزین به هم ساخته می‌شوند. فلز به‌کاررفته اغلب، آلومینیوم است و الیاف به‌طور کلی بر اساس کارکرد مورد انتظار، الیاف آرامید، کربن یا شیشه هستند [6]. کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیوم تقویت شده با الیاف شیشه/ اپوکسی خواص منحصر به فردی از جمله مقاومت خستگی و خواص استاتیکی خوب، مقاومت به ضربه عالی و حساسیت به ترک خوب برخوردار هستند [7].

* نویسنده مسئول:

دکتر مهدی یارمحمدتوسکی

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی.

تلفن: ۳۳۷۲۲۸۳۱ (۲۱) ۰۹۸-

پست الکترونیکی: m_yarmohammad@azad.ac.ir

برهمکنش سطحی بین ماده پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. نوع و میزان برهمکنش‌ها نقش مهمی در خواص مختلف نانو کامپوزیت‌ها همچون حلالیت، خواص نوری، خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها دارد [13].

اگرچه امروزه تأثیر بهبوددهندگی نانو مواد در ساختارهای کامپوزیتی امری اثبات شده است، ولی استفاده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای واقعی نظیر، چندلایه‌های الیافی فلزی، به مواد بسیار خاص محدود شده است. در یکی از تحقیقات اخیر در زمینه چندلایه‌های الیافی فلزی هیبرید شده با نانو ذرات توسط کاری لو و همکاران [6]، اثر نانو رس بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی را مورد مطالعه قرار دادند. نجفی و همکاران [14]، تأثیر انواع فرآیندهای اختلاط نانو رس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی در ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی مورد بررسی قرار دادند. هاک و همکاران [15]، در تحقیقاتشان نشان دادند که با استفاده از درصد بسیار پایینی از نانو رس، افزایش قابل توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه رخ می‌دهد. نتایج حاکی از افزایش ۴۴٪، ۲۴٪ و ۲۳٪ در مقادیر استحکام برشی، استحکام خمشی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی حاوی نانو ذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های مرسوم الیاف شیشه-اپوکسی بود. علاوه بر این آن‌ها گزارش کردند که دمای تجزیه حرارتی نانو کامپوزیت، تقریباً ۲۶ درجه سانتی‌گراد بالاتر از حالت بدون نانو ذرات است. ایجاد فصل مشترک مستحکم بین ماده زمینه پلیمری و نانو رس، دلیل اصلی بهبود خواص کامپوزیت تقویت‌شده با نانو ذرات رس می‌باشد.

کرمنن و همکاران [16]، از روش‌های کیسه خلاء و پرس گرم برای تولید نانو کامپوزیت‌های الیاف شیشه/نانو رس/اپوکسی استفاده کردند. آن‌ها در نتایج خود دریافتند که مدول و استحکام خمشی در کامپوزیت‌های حاوی نانو رس در مقایسه با بدون نانو رس، به ترتیب ۶٪ و ۲۷٪ افزایش یافته است.

چان و همکارانش [17] مکانیزم تقویت‌کنندگی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی-نانو ذرات رسی و به صورت مشخص برهمکنش میان نانو ذرات رسی و ماتریس را بررسی نمودند. آن‌ها با افزودن تنها ۵ درصد وزنی نانو ذرات رسی به ماتریس اپوکسی افزایش ۳۴ و ۲۵ درصدی در مدول یانگ و استحکام کششی نانو کامپوزیت در مقایسه با اپوکسی خالص مشاهده نمودند. یاسمین و همکاران [18] با روش اختلاط برشی، نانو لایه‌های رس را در ماتریس اپوکسی پراکنده کردند. آن‌ها با افزودن نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی افزایش ۲۵ درصدی را در مدول الاستیک نانو اپوکسی شاهد بودند، اگرچه استحکام کششی ماده تغییر چندانی نداشت. کودهاری و همکارانش [19] تأثیر نانو رس بر ماده مرکب کربن/اپوکسی با الیاف بافته‌شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیشترین

رفت. در این تحقیق، کمانش محلی و رشد جدایش در یک صفحه‌ی تحت نیروی فشاری محاسبه شده است. مشاهده شد که چقرمگی شکست در سطوح تماس، نقش مهمی در رفتار فراکمانشی و پیشروی جدایش در مدل ایفا می‌کند [8] از آنجایی که هم کمانش و هم رشد جدایش به دست آمد، می‌توان برای آنالیز رفتار کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم تقویت‌شده با الیاف شیشه/اپوکسی خاص تحت نیروی فشاری استفاده نمود. وجود تفاوت زیاد در واکنش‌ها نشان می‌دهد که مشخصات جدایش می‌تواند تأثیر زیادی بر روی سفتی فراکمانش در صفحات داشته باشد. بنابراین شناسایی پارامترهای مواد در کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم تقویت‌شده با الیاف شیشه/اپوکسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [8].

نانو رس‌ها مواد منحصربه‌فردی هستند که به‌عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند. در زیر میکروسکوپ الکترونی با قدرت تفکیک بالا مشاهده می‌شود که نانو رس‌ها شامل صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند که در حدود ۱ نانومتر ضخامت و ۱۰۰ نانومتر قطر دارند.

در نانو رس‌ها دو خصوصیت مهم وجود دارد که باعث موفقیت آن‌ها در عرصه صنعت‌های مختلف شده است: ۱- خالص بودن آن که خصوصیات مکانیکی پلیمر را افزایش می‌دهند؛ ۲- ظرفیت تبدیلی کاتیونی رس که مخلوط شدن با پلیمر را مناسب می‌کند. هر دو این ویژگی‌ها باعث استحکام در پلیمرها می‌شود و به‌طور هم‌زمان مقاومت بالا و شکل‌پذیری از خود نشان می‌دهند، در واقع خواصی که باهم در یکجا جمع نمی‌شوند، در نانو رس‌ها وجود دارد [12].

وجود خواص فوق‌العاده‌ای مانند استحکام خمشی زیاد و وزن مخصوص پایین در کامپوزیت‌های صفحه‌ای منجر به استفاده‌ی گسترده از این مواد در سازه‌های صنعت هوافضا (که در آن‌ها نسبت استحکام به وزن بالا مورد نیاز است)، شده است. به‌منظور کاهش وزن هواپیماها، از کامپوزیت‌های صفحه‌ای به‌عنوان جایگزین مناسبی برای فلزات سنتی در بدنه‌ی بال‌ها، استفاده می‌شود. بدنه‌ی هواپیماهای پرسرعت نه‌تنها تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی قرار می‌گیرند، بلکه تحت گرمایش آیرودینامیکی نیز می‌باشند. افزایش دمای ایجاد شده ممکن است منجر به ایجاد کمانش در پوسته‌ی بدنه و کاهش ظرفیت تحمل بار گردند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانو کامپوزیت‌ها معمولاً باعث ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به‌طور یکنواخت به ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. با توزیع مواد پرکننده درون ماده پایه خصوصیات نظیر استحکام، چقرمگی، خواص تریبولژیکی و تخلخل تغییر می‌کند. ماده پایه می‌تواند ذرات را به‌گونه‌ای از هم جدا نگه دارد که رشد ترک به تأخیر افتد. به‌علاوه اجزاء نانو کامپوزیت‌ها بر اثر

شکل ۱ نمونه محکم شده در نگهدارنده‌ی متصل به دستگاه آزمون کمانش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. دستگاه آزمون کمانش

ساخت چندلایه‌های الیاف فلز حاوی نانو ذرات رس

به منظور ساخت چندلایه‌های الیاف-فلز از روش لایه گذاری دستی استفاده شد. در بخش آماده‌سازی صفحات آلومینیومی آماده‌سازی سطحی به روش اچ کردن توسط اسید سولفوریک (P2 Etch) به کار گرفته شد. ابتدا مواد زائد از سطوح صفحات جداسازی گردید و سپس توسط محلول استون، چربی زدایی گردید. در ادامه صفحات در محلول آلکالین تهیه شده که دارای خاصیت قلیایی بوده و ترکیب آن به صورت (۶ قسمت وزنی سدیم هیدروکساید در ۱۵۰ قسمت وزنی آب مقطر) بود به مدت ۸ دقیقه غوطه‌ور گردید. پس از شستشوی نمونه‌ها با آب، قطعات آلومینیومی به صورت مرطوب در محلول اچ P2 شامل ترکیب ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ و ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۵۰ گرم سولفات فریک (آهن ۳ سولفات) به مدت ۱۲ دقیقه غوطه‌ور گردید. شکل ۲ تغییرات ظاهری لایه آلومینیومی مورد استفاده را به ترتیب از راست به چپ: قبل، حین و پس از فرآیند اچ کردن نشان می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات سطح آلومینیوم در اثر فرآیند اچ کردن

بهبود خواص را در حالت ۲ درصد وزنی نانو رس مشاهده کردند. همچنین، هو و همکاران [20] با پراکنده کردن نانو رس در ماتریس اپوکسی، با درصدهای مختلف نشان دادند که بیشترین استحکام کششی نهایی در نمونه با ۵ درصد وزنی نانو رس به وجود می‌آید. اگرچه نرمی ماده به شدت کاهش و نمونه بعد از تنش نهایی به صورت ناگهانی می‌شکند.

در راستای تحقیقات قبلی، در تحقیق حاضر، سعی شده است که تأثیر افزودن نانو ذرات رس در سازه چندلایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با پارچه بازالت در میزان تغییرات نیروی کمانش مورد بررسی قرار گرفته و با مقایسه آن‌ها، حالت بهینه‌ی استفاده از این ذرات در ساخت این نوع از فلز-کامپوزیت‌ها به دست آید.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد

در این پژوهش نمونه‌های چندلایه الیاف فلز شامل دو رویه آلومینیومی و هسته کامپوزیتی حاوی نانو ذرات رس در ماتریس تشکیل شده است. رویه‌های آلومینیومی از جنس Al 2024-T3 با ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر انتخاب شد. در جدول ۱ خواص مکانیکی آلومینیوم استفاده شده آورده شده است. برای ساخت هسته نانو ماده مرکب هیبریدی، از پارچه بازالت بافته شده با وزن ۳۰۰ گرم بر واحد سطح استفاده شد. رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی بانام تجاری EPR1080 با سخت کننده EA1080 انتخاب گردید.

جدول ۱. خواص مکانیکی آلومینیوم 2024-T3

استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)
۴۳۴-۴۴۱	۲۸۹	۱۰-۱۵

دستگاه آزمون کمانش

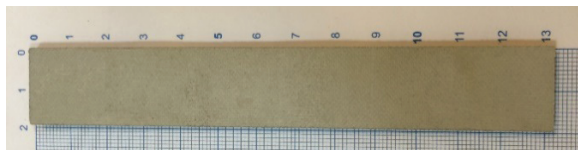
دستگاه مورد استفاده جهت آزمون کمانش نمونه‌های چندلایه الیاف - فلز، دستگاه‌ها نسفیلد با قابلیت اعمال بار تا 25kN بود که در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های دستگاه با استفاده از نیروسنج تعبیه شده بر فک بالایی متحرک، ثبت شد. نگهدارنده^۱ آزمون کمانش نیز مطابق استاندارد ASTM C364-99 بر روی این دستگاه قرار گرفت. جهت انجام آزمایش، نمونه در میان و وسط دو فیکسچر واقع در فک‌های بالایی و پایینی نگهدارنده، قرار گرفته و پیچ شدند. سپس فیکسچرها توسط پیچ‌های بلندتری که با آن‌ها درگیر است، محکم شده و مانع از سر خوردن فیکسچر شدند، به گونه‌ای که نمونه از بالا و پایین کاملاً گیردار و از لبه‌های جانبی آزاد بود.

2. $Fe_2(SO_4)_3$

1. Edgewise

مشخصات نمونه‌های آزمایش

جهت بررسی اثر درصد‌های مختلف وزنی ذرات نانو رس در کماتش تیرهای کامپوزیتی، صفحات ساخته شده، توسط دستگاه واتر جت برشکاری شد. ابعاد کلیه نمونه‌ها طبق استاندارد آزمون کماتش به ابعاد $20\text{mm}^2 \times 130$ برشکاری گردید. در شکل ۴ ابعاد نمونه برشکاری شده نمایش داده شده است.



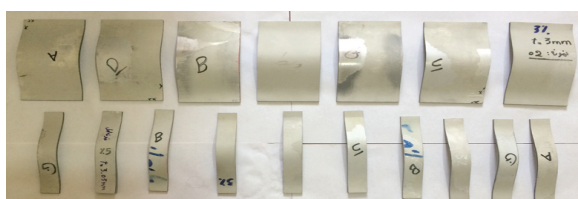
شکل ۴. نمونه جهت آزمون کماتش

شرایط آزمون کماتش

در این آزمون پس از قرار دادن نمونه درون نگهدارنده دستگاه فشار، در شرایط محیطی، با استفاده از کامپیوتر دستگاه، سرعت پیشروی فک بالایی (فک متحرک) 0.5 mm/min تعیین گردد که به صورت فشاری و رو به پایین پس از فشردن دکمه شروع دستگاه، حرکت خواهد کرد. از طرفی از آنجا که جابجایی محوری ایجاد شده در نمونه‌ها برای به دست آوردن نمودار نیرو-جابجایی، ضروری است، دستگاه مورد استفاده مجهز به سیستم جابجایی-کنترل بوده و در بازه‌هایی با فاصله 0.001 میلی‌متر خروجی‌ها را ذخیره می‌نماید. به منظور بررسی پروفیل تغییر شکل و میزان خیز در نمونه‌های آزمون کماتش، پس از انجام آزمون با استفاده از نرم‌افزار GetDATA Digitizer پروفیل تغییر شکل یا خیز استخراج گردید.

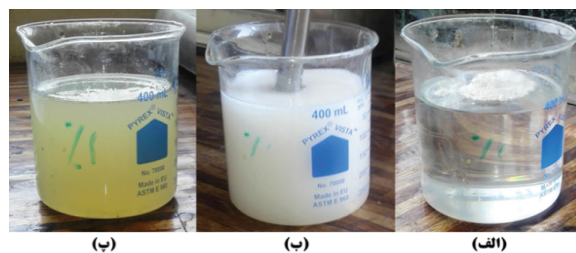
۳. نتایج و بحث

در این قسمت از پژوهش حاضر، ابتدا نتایج حاصل از صحت سنجی ساخت این چندلایه‌های الیاف فلز ارائه شده است. قابل ذکر می‌باشد که این صحت سنجی با استفاده از تصاویر میکروسکوپی و بررسی شرایط هندسی حاصل می‌گردد. در بخش‌های دیگر از نتایج اثر نانو ذرات رس روی رفتار کماتشی، حداکثر بار بحرانی، حداکثر جابه‌جایی طولی در لحظه کماتش و پروفیل تغییر شکل یا خیز نمونه‌ها پس از انجام آزمون کماتش ارائه خواهد شد. همچنین نمونه‌های آزمون کماتش پس از تغییر شکل، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمونه‌ها پس از آزمون کماتش

در بخش آماده‌سازی رزین جهت تولید نانو کامپوزیت‌های اپوکسی - نانو رس، نانو ذرات رس با درصد‌های وزنی ۰، ۱، ۳ و ۵ (نسبت به کل سیستم رزین (اپوکسی + سخت‌کننده))، به رزین اپوکسی اضافه شده و با همزن مکانیکی به صورت اختلاط برشی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ ساعت مخلوط گردید. سپس مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه تحت امواج فراصوتی قرار گرفت تا نانو ذرات رسی درون پایه اپوکسی پخش شوند. در شکل ۳ تغییرات ظاهری محلول رزین و ۱ درصد جرمی نانو رس مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، به ترتیب از راست به چپ شامل محلول رزین قبل از مخلوط کردن نانو رس، هنگام همگن‌سازی با دستگاه آلتراسونیک و بعد از وارد کردن انرژی آلتراسونیک نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات ظاهری رزین مورد استفاده

پس از ساخت مخلوط رزین اپوکسی - نانو رس و بعد از انجام عملیات حباب زدایی و سرد شدن آن تا درجه حرارت محیط، میزان محاسبه شده از سخت‌کننده به مخلوط تهیه شده، اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط حاصل به روش دورانی آمیخته شد.

در این قسمت پس از آماده‌سازی لایه‌های آلومینیومی با ابعاد $140\text{mm}^2 \times 140$ ، از پارچه بازالت، چهار تکه مربعی به اندازه $200\text{mm}^2 \times 200$ ، بریده شد. در ادامه یک لایه پارچه داکرون به عنوان فیلم جداکننده استفاده شد تا نمونه به صفحه کار نچسبد. آنگاه یکی از صفحات آلومینیوم روی صفحه کار قرار گرفته، رزین روی آن ریخته شد و توسط قلم‌مو به آن آغشته گردید. در ادامه یک لایه پارچه بازالت روی آن قرار داده و دوباره عمل آغشته سازی رزین با قلم‌مو انجام شد. حباب‌های هوا در قطعه با حرکت قلم‌مو و فشار دادن الیاف خارج شدند. لایه گذاری و آغشته سازی تا چهار لایه بازالت ادامه یافت. سپس از یک لایه آلومینیوم به عنوان لایه نهایی استفاده شد و روی آن با پارچه داکرون پوشانده گردید. سپس بر روی نمونه تهیه شده شیشه گریس خورده گذاشته و برای اعمال فشار از چند وزنه استفاده گردید. قطعات به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا کاملاً رزین مورد استفاده پخت گردد.

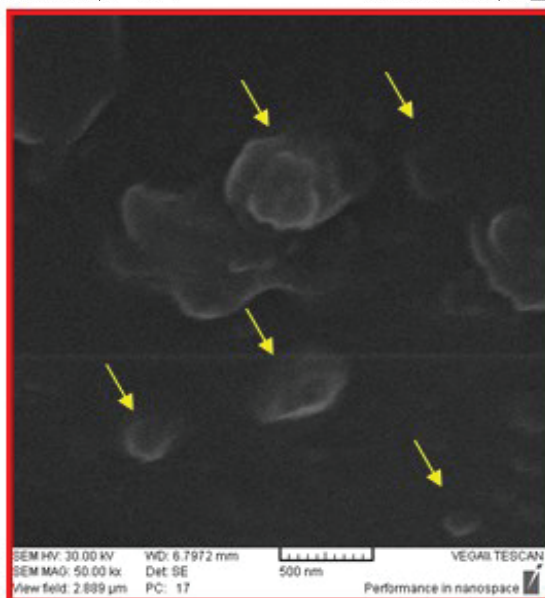
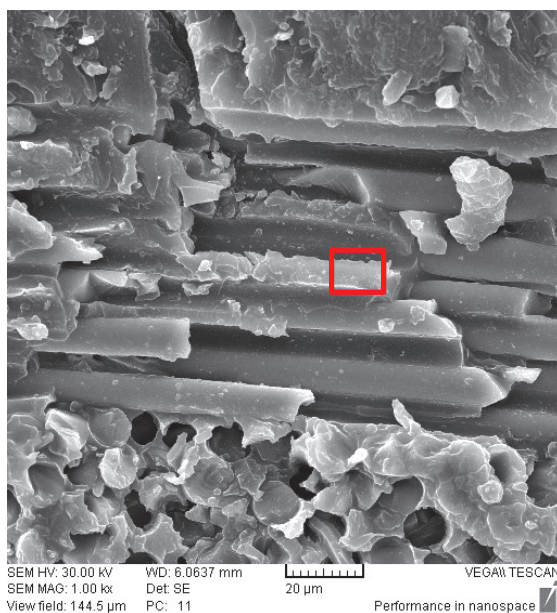
3. Hardener

صحت سنجی فرآیند ساخت

به منظور دست‌یابی به دقت و صحت در نتایج، نیاز به داشتن نمونه‌های کاملاً یکسان است. در جدول ۲ جرم مخصوص و ضخامت نمونه‌ها به‌عنوان دو پارامتر تأثیرگذار روی کمانش مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲. مشخصات ضخامت و جرم مخصوص نمونه‌ها

ضخامت (mm)	جرم مخصوص (g/cm ³)	درصد نانو ذرات (%)
3.23	0.5315	0
3.16	0.5400	1
3.2	0.5524	3
3.22	0.5134	5



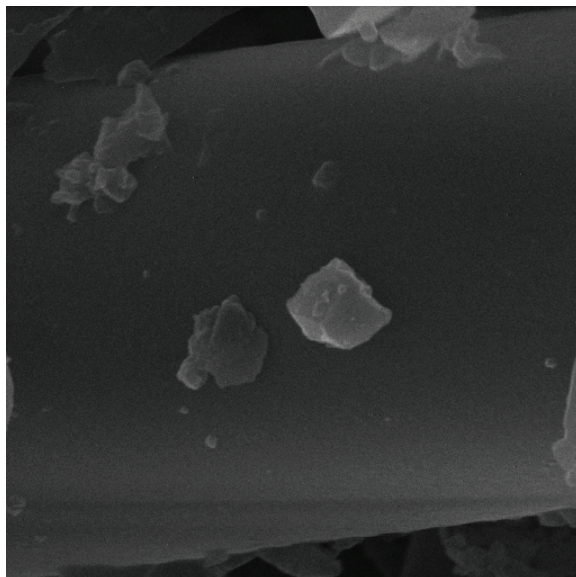
شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع

با توجه به شکل ۶، تکه‌های روشن در زمینه تیره که با پیکان علامت‌گذاری شده، نانو صفحات رس می‌باشند. همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شده، اندازه نانو ذرات استفاده شده در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ نانومتر هستند، بنابراین با دقت در شکل ۶ به‌وضوح مشخص است که ذرات نشان داده شده با پیکان همان ذرات نانو رس با ابعاد ذکر شده می‌باشند. به منظور نشان دادن وجود و توزیع مناسب این نانو ذرات، بررسی میکرو ساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی-رویشی نیاز است. بنابراین در این قسمت از پژوهش حاضر، از ساختار چندلایه‌های الیاف-فلزها با ۱۰٪، ۱٪، ۳٪ و ۵٪ عکس الکترون روبشی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شده و در شکل ۷ ارائه شده است.

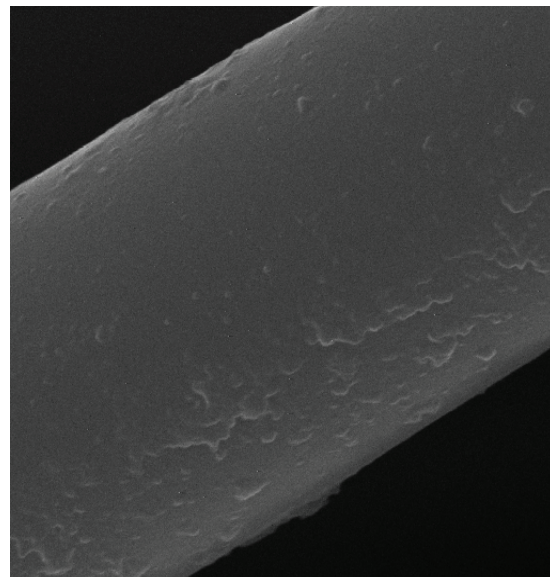
با توجه به نتایجی که در جدول ۲ داده شده است، می‌توان ادعا نمود که قطعات ساخته شده در یک سری، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و پروسه ساخت، تکرارپذیری خوبی از خود نشان می‌دهد. اندک تفاوت بین وزن یا ضخامت قطعات می‌تواند چند دلیل عمده داشته باشد. اول اینکه فرآیند ساخت قطعات و رزین زدن به روش لایه گذاری دستی است و امکان اینکه به تمام قطعات به‌صورت ۱۰۰٪ یکنواخت رزین زده شود، به‌هیچ‌عنوان وجود ندارد. دومین عامل می‌تواند تغییر شرایط محیطی در هنگام ساخت قطعه باشد. در شرایط کارگاه نمی‌توان دما و رطوبت را کنترل کرد. از این‌رو زمان خشک شدن و میزان آن، زمان سفت شدن یا پخت رزین متفاوت خواهد بود. تمام این عوامل دست‌به‌دست هم می‌دهد تا نتوان تمام قطعات یک سری را به شکل ۱۰۰٪ مشابه ساخت. اما با تمام این شرایط یکنواختی قطعات در حد مطلوب بوده و می‌توان مقاومت یکسانی برای تمام آن‌ها قائل بود.

بررسی توزیع نانو ذرات رس با بهره‌گیری از تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی

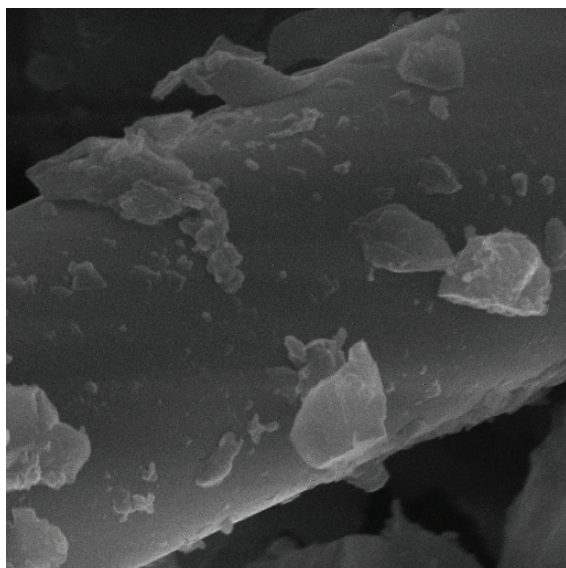
یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی اثر در صد وزنی نانو ذرات رس روی رفتار کمانشی چندلایه‌های الیاف-فلز بوده است. شکل ۶ وجود نانو ذرات رس در چندلایه‌های الیاف-فلز ساخته شده را تصدیق می‌کند. همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر شده، الیاف بازالت به‌صورت بافته شده می‌باشد. با توجه به شکل ۶، الیاف بازالت بافته شده که با زاویه ۰ و ۹۰ نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند به‌وضوح مشخص می‌باشند. همچنین نانو ذرات رس به‌صورت صفحه‌ای دیده می‌شوند. معمولاً نانو ذرات در تصاویر الکترونی روبشی به شکل لبه‌های تیز دیده می‌شوند.



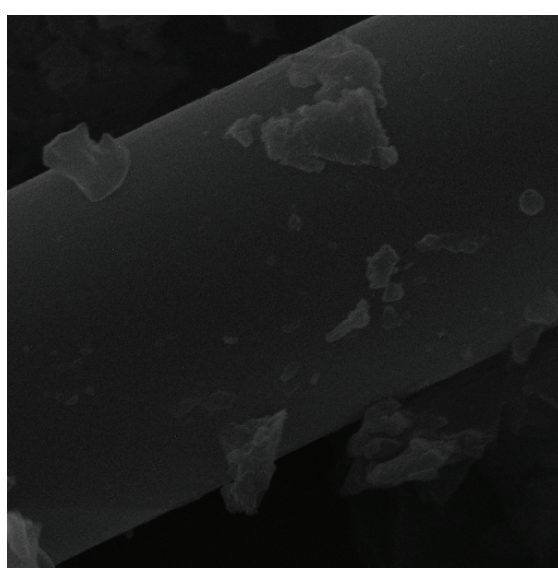
SEM HV: 30.00 kV WD: 18.7160 mm
SEM MAG: 10.00 kx Det: SE
View field: 14.45 μ m PC: 15
Performance in nanospace



SEM HV: 30.00 kV WD: 13.4710 mm
SEM MAG: 10.00 kx Det: SE
View field: 14.45 μ m PC: 14
Performance in nanospace



SEM HV: 30.00 kV WD: 18.6830 mm
SEM MAG: 10.00 kx Det: SE
View field: 14.45 μ m PC: 15
Performance in nanospace



SEM HV: 30.00 kV WD: 18.7260 mm
SEM MAG: 10.00 kx Det: SE
View field: 14.45 μ m PC: 15
Performance in nanospace

شکل ۷. تصویر الکترونی روبشی از نمونه‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نانو

بررسی اثر نانو ذرات رس روی رفتار کمانشی و پسا کمانشی چندلایه‌های الیاف - فلز

یکی از نوآوری این پژوهش بررسی اثر، درصد وزنی نانو ذرات رس روی رفتار کمانشی چندلایه‌های الیاف-فلز می‌باشد. در این قسمت رفتار کمانشی با در نظر گرفتن درصد وزنی‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد، نانو ذرات رس مورد مطالعه قرار گرفته است. بعد از انجام آزمون کمانش، نمودار نیرو-جابجایی برای این نمونه‌ها حاصل شده و در شکل ۸ ارائه شده است. بنابراین شکل ۸ اثر تغییر درصد وزنی نانو ذرات رس را روی رفتار کمانشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

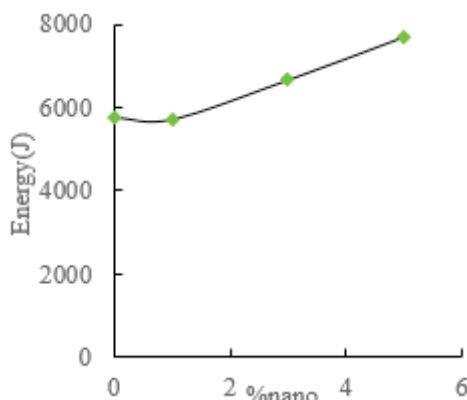
در شکل ۷ توزیع یکنواخت نانو ذرات رس در اطراف یک تار دیده می‌شود. در تصاویر الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰۰۰۰ درصد وزنی‌های ذکر شده قابل تشخیص است. به بیانی دیگر در تصاویر شکل ۷ حضور نانو ذرات رس با یک توزیع معقول در درصد وزنی‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی مشاهده می‌گردد. بنابراین از این دیدگاه، فرآیند ساخت این چندلایه‌های الیاف-فلز با کیفیت معقول و بالایی ساخته شده زیرا توزیع نانو ذرات یکنواخت دیده می‌شود.

در شکل ۹ جابجایی در لحظه وقوع پدیده کمانش در نمونه‌ها با ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانورس نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ با افزایش درصد وزنی نانورس جابجایی در لحظه وقوع پدیده کمانش کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده بهبود پایداری با افزایش درصد وزنی نانورس می‌باشد.

بررسی اثر نانو ذرات رس روی انرژی جذب‌شده در آزمون کمانش

انرژی جذب‌شده توسط یک جزء یکی دیگر از مشخصه‌های بسیار مهم آن جزء می‌باشد که مورد توجه محققان بوده و در طراحی مهندسی نقش بسیار مهمی دارد. انرژی متحمل شده در یک جزء با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو جابجایی قابل محاسبه می‌باشد. در شکل ۱۰ میزان جذب انرژی در نمونه‌ها با درصد‌های وزنی متفاوت نانورس در فرایند آزمون کمانش نشان داده شده است.



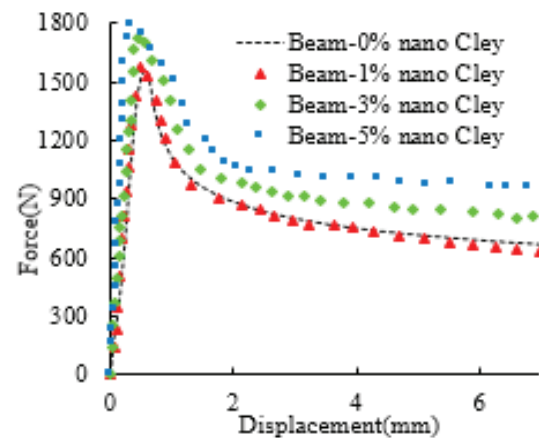
شکل ۱۰. میزان جذب انرژی در نمونه‌های آزمون کمانش

با توجه به شکل ۱۰ با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان در افزایش سفتی ماده یافت. به عبارت دیگر، با افزایش درصد نانو ذرات رس چقرمگی ماده افزایش یافته است. به منظور تأیید این تحلیل، محققان [21] نشان داده‌اند که افزودن نانورس در این نوع چندلایه‌های الیاف-فلز موجب افزایش چقرمگی شکست می‌شود و افزایش این پارامتر تأثیر مستقیم روی جذب انرژی جزء دارد.

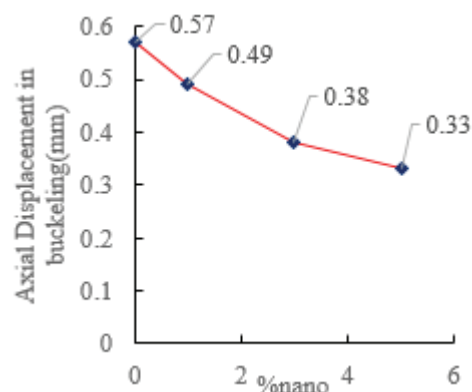
بررسی اثر نانو ذرات رس روی خیز نمونه‌ها

در شکل ۱۱ اثر درصد وزنی نانو ذرات رس روی پروفیل تغییر شکل عرضی هندسه تیر به ازای اعمال ۷ میلی‌متر جابجایی طولی ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱ با افزایش درصد وزنی نانورس تغییر شکل عرضی کاهش یافته که نشان‌دهنده بهبود پایداری می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۸ به‌وضوح مشخص است با افزایش درصد نانو رس، حداکثر نیرو (نیرو در لحظه وقوع پدیده کمانش) افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۸ مشهود است، نیروی بحرانی کمانشی در نمونه بدون نانورس برابر با ۱۵۳۴ نیوتون، در نمونه ۱٪ نانورس، برابر ۱۵۷۴ نیوتون و در نمونه ۳٪ نانورس برابر با ۱۷۴۸ نیوتون و همین‌طور برای نمونه با ۵ درصد نانورس برابر با ۱۷۸۸ نیوتون است. این نتایج حاکی از آن است که با توجه به روند افزایش درصد وزنی نانورس، بار بحرانی روند افزایشی داشته و بهترین نتیجه در شرایطی حاصل شده که ۵٪ وزنی نانورس در نظر گرفته شده است. دلیل این امر را می‌توان حضور نانو ذرات دانست که در هنگام تغییر شکل ماده نقش یک ناهمگنی را ایفا می‌کنند که موجب مقاومت در برابر سیلان ماده شده و به این ترتیب افزایش بار بحرانی کمانش حاصل می‌شوند.



شکل ۸. مقایسه رفتار کمانشی و بار بحرانی

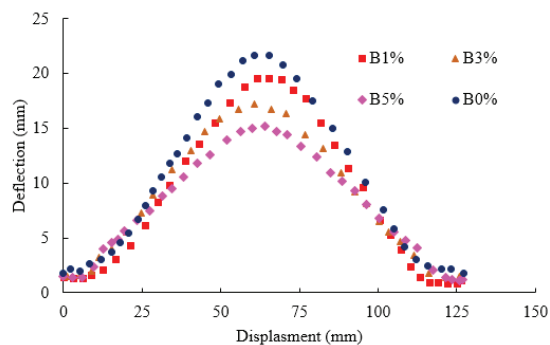


شکل ۹. جابجایی در لحظه وقوع پدیده کمانش

با توجه به شکل ۸، حداکثر نیرو برای نمونه با ۳ درصد نانورس ۱۷۴۸ نیوتون بوده و همین نیرو برای نمونه با ۵ درصد نانورس ۱۷۸۸ نیوتون می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش نانورس به درصد‌های بالاتر تغییر محسوسی در افزایش نیرو مشاهده نخواهد شد.

References

- [1] Degenhardt, R., Castro, S. G., Arbelo M. A., Zimmerman, R., Khakimova, R. and Kling A., "Future structural stability design for composite space and airframe structures," *Thin-Walled Structures*, Vol. 81, pp. 29-38, 2014.
- [2] Hadi, A. Shakheshi, S. Ovesy, H. R. Fazilati, J., "Thermal stability of FGM cylindrical shells on Pasternak elastic foundation under axial load", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 05, No. 02, pp. 200-207, 2018.
- [3] Nopour, H. KabiriAtaabadi, A. and Shokrieh, M.M., "Buckling of composite plate made of curvilinear fiber with linear and nonlinear fiber orientation variation", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 405-417, 2018.
- [4] Khalili, S.M.R. Sedigh, Y. and Hossein Ahari, S.M. M. M., "Experimental and numerical study of the buckling of semi-cylindrical composite lattice", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 269-276, 2016.
- [5] Ghannadpour, S. A. M. and Barekati, M., "Post-buckling analysis of anti-symmetric cross-ply composite plates under end-shortening", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 35-42, 2015.
- [6] Carrillo J. G. and Cantwell W., "Scaling effects in the tensile behavior of fiber-metal laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 7-8, pp. 1684-1693, 2007.
- [7] Van Rooijen, R., Sinke, J., De Vries, T. and Van Der Zwaag, S. "Property optimisation in fibre metal laminates," *Applied Composite Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 63-76, 2004.
- [8] Remmers, J. and De Borst R., "Delamination buckling of fibre-metal laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 15, pp. 2207-2213, 2001.
- [9] Mania, R. J., Kolakowski, Z., Bienias, J., Jakubczak, P. and Majerski, K., "Comparative study of FML profiles buckling and postbucklingbehaviour under axial loading," *Composite Structures*, Vol. 134, pp. 216-225, 2015.
- [10] Naik, N., Asmelash, A. and Kavala, V. R., "Interlaminar shear properties of polymer matrix composites: Strain rate effect," *Mechanics of Materials*, Vol. 39, No. 12, pp. 1043-1052, 2007.
- [11] Sun, L., Gibson, R. F., Gordaninejad, F. and Suhr, J., "Energy absorption capability of nanocomposites: a review," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No.14, pp. 2392-2409, 2009.
- [12] Tu Z.-c. and Ou-Yang Z.-c., "Single-walled and multiwalled carbon nanotubes viewed as elastic tubes with the effective Young's moduli dependent on layer number," *Physical Review B*, Vol. 65, No. 23, pp. 233-407, 2002
- [13] Li, Y., Wang, J., Gu, Z., Wang, Z., Luo, J. and Wu, D., "Tensile properties of long aligned double-walled carbon nanotube strands," *Carbon*, Vol. 43, No. 1, pp. 31-35, 2005.
- [14] Najafi, M., Ansari, R. and Darvizeh A., "Experimental study of the influence of mixing method of nanoclay on mechanical properties of polymer composites and fiber metal laminates," *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 63-80, 2017.
- [15] Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F. and Dean, D., "S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures," thermal and mechanical properties, *Journal of Composite materials*, Vol. 37, No. 20, pp. 1821-1837, 2003.
- [16] Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat,



شکل ۱۱. پروفیل تغییر شکل عرضی

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر افزودن نانو ذرات رس در ساختار چندلایه‌های الیاف-فلز، شامل دو رویه آلومینیومی 2024-T3 به ضخامت ۰.۷mm و هسته کامپوزیتی شامل الیاف بازالت و رزین اپوکسی حاوی ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانو ذرات رس، در بارگذاری استاتیکی فشاری روی این چندلایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی به شرح زیر هستند:

- ۱- با افزایش درصد نانو رس، حداکثر نیرو (نیرو در لحظه وقوع پدیده کمانش) افزایش می‌یابد. با افزایش درصد وزنی نانو رس، بار بحرانی روند افزایشی داشته و بهترین نتیجه در شرایطی حاصل شده که ۵٪ وزنی نانو رس در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۸، حداکثر نیرو برای نمونه با ۳ درصد نانو رس ۱۷۴۸ نیوتون بوده و همین نیرو برای نمونه با ۵ درصد نانو رس ۱۷۸۸ می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش نانو رس به درصدهای بالاتر تغییر محسوسی در افزایش نیرو مشاهده نخواهد شد.
- ۲- با افزایش درصد وزنی نانو رس جابجایی در لحظه وقوع پدیده کمانش کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده بهبود پایداری با افزایش درصد وزنی نانو رس می‌باشد
- ۳- با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان در افزایش سختی ماده یافت.
- ۴- با افزایش درصد وزنی نانو رس تغییر شکل عرضی کاهش یافته که نشان‌دهنده بهبود پایداری می‌باشد.
- ۵- با افزایش درصد نانو ذرات رس چقرمگی ماده افزایش یافته است.

- M. and Thomann, R., "Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 14, pp. 2259-2268, 2005.
- [17] Chan, M., Lau, K., Wong, T., Ho, M. and Hui, D., "Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 6, pp. 1708-1712, 2011.
- [18] Yasmin, A., Abot, J. L. and Daniel, I. M., "Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing," *Scriptamaterialia*, Vol. 49, No. 1, pp. 81-86, 2003.
- [19] Chowdhury, F., Hosur, M. and Jeelani, S., "Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, No. 1-2, pp. 298-306, 2006.
- [20] Ho, M. W., Lam, C. K., Lau, K. t., Ng, D. H. and Hui, D., "Mechanical properties of epoxy-based composites using nanoclays," *Composite structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 415-421, 2009.
- [21] Yazdani, M., Rahimi, H., Khatibi, A. and Hamzeh, S., "An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading," *Scientific Research and Essays*, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.