



بررسی تجربی رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم - اپوکسی / الیاف بازالت حاوی نانوذرات رس

فرید بهاری سامبران¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، حسین ابراهیم‌نژاد خالجیری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

در تحقیق حاضر تأثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح‌شده/ اصلاح‌نشده، با درصد‌های وزنی مختلف بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم T3-2024- رزین اپوکسی/ الیاف بازالت بررسی شد. ابتدا به منظور ایجاد برهمکنش مناسب بین نانوذرات رس و زمینه اپوکسی، عملیات اصلاح سطحی با عامل کوبلینگ سیلان بر روی نانوذرات رس انجام شد که در ادامه ایجاد گروه‌های عاملی بر روی سطح نانوذرات رس توسط آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) ثابت شد. نانوذرات رس اصلاح‌شده با درصد‌های وزنی 0، 1، 3 و 5 درصد به زمینه اپوکسی افزوده شد و سپس جهت پخش و توزیع مطلوب‌تر آن در زمینه از دستگاه همزن مکانیکی و آلتراسونیک استفاده شد. همچنین به منظور برهمکنش و چسبندگی بهتر بین زمینه و ورق آلومینیومی، عملیات مکانیکی و شیمیایی بر روی ورق آلومینیوم انجام شد. در ادامه مخلوط‌های حاصل همراه با الیاف بازالت بافته‌شده و لایه‌های آلومینیوم در ساخت کامپوزیت لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های ساخته‌شده جهت بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رس تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند که حداکثر تأثیر نانوذرات اصلاح‌شده بر افزایش استحکام خمشی و انرژی شکست در 3 درصد وزنی آن اتفاق افتاد. این خواص در مورد نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده نسبت به نمونه مشابه اصلاح‌شده تضعیف شد. علاوه بر این مدول خمشی با افزایش نانوذرات رس به صورت پیوسته افزایش یافت. همچنین به منظور بررسی مکانیزم شکست بخش پلیمری از میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی بیانگر این بودند که افزودن نانوذرات رس باعث بهبود برهمکنش بین زمینه و الیاف بازالت شده و منجر به بهبود خواص خمشی می‌شود.

چند لایه‌های الیاف- فلز

نانوذرات رس

اصلاح سطحی

آزمون خمش

Experimental investigation of flexural behavior of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites containing nanoclay particles

Farid Bahari-Sambran, Reza Eslami-Farsani*, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Fiber metal laminates
Nanoclay
Surface modification
Flexural test

Abstract

In this study, the effect of different weight percent of modified/ unmodified nanoclay particles on the flexural properties of fiber metal laminates (FMLs) made of basalt fibers/epoxy-2024-T3 aluminum sheets was investigated. As a first step, the surface of nanoclay was modified by silane coupling agent which the creation of functional groups on the surface of nanoclay particles was confirmed by Fourier transform infrared (FT-IR) analyses. The modified nanoclay with different weight percent of 0, 1, 3 and 5 was added into the epoxy matrix and then for better distribution and dispersion of nanoparticles in the matrix, the mechanical and ultrasonication machines were used. Also, for better interaction and adherence between matrix and aluminum sheets, the mechanical and chemical treatment were conducted. Then the mixture of epoxy and nanoclay with woven basalt fibers and aluminum sheets were used to fabricate FMLs. To survey the effect of nanoparticles on mechanical properties, the 3-point bending test was used. The results show that the maximum effect of adding nanoclay particles on flexural strength and absorbed energy was in 3 wt.% of modified nanoclay, these properties of fibre metal laminates, containing 3 wt.% unmodified nanoclay was weakend in comparison similar specimen, containing modified nanoclay. Furthermore, the flexural modulus was increased by increasing the weight percent of nanoparticles. Also, to investigate the fracture mechanism of polymeric part, the field emission scanning electron microscope (FESEM) was used. The microscopic images were revealed that adding nanoclay particles are caused improvement of interaction between matrix and basalt fibers, consequently, are caused improving the flexural properties.

1- مقدمه

استحکام ویژه بالایی است دارای برتری چشمگیری نسبت به

الیاف فلزی هستند. در این میان کامپوزیت‌های لایه‌ای

الیاف- فلز، مواد کامپوزیتی هیبریدی هستند که از لایه‌های

در دهه‌های اخیر مواد کامپوزیتی توجه بسیاری از محققان را به

خود جلب کرده است. کامپوزیت‌ها در مواردی که نیاز به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani*, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Experimental investigation of flexural behavior of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites containing nanoclay particles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-54, 2018 (in Persian)

ب- میان لایه‌های²: در صورتی که فضای گالری افزایش یابد، به نحوی که زنجیره‌های پلیمری قادر به نفوذ بین آن‌ها باشند.

ج- ورقه‌ای شدن³: در صورتی که صفحات کوچک نانو رس به طور کامل از هم جدا شده و در زمینه‌ی پلیمری پخش شده باشند [6].

اگر توزیع نانوذرات رس در زمینه پلیمری به صورت یکنواخت بوده و به نوعی امتزاج‌پذیر باشد، خواص مورد انتظار به صورت مطلوب قابل حصول خواهد بود. دلیل اصلی برای افزودن پرکننده به پلیمرها افزایش مدول و یا سفتی از طریق مکانیزم‌های تقویت با استفاده از نظریه‌های مربوط به کامپوزیت‌ها است. صفحه‌های نانو رس که به صورت پراکنده و در یک ردیف قرار دارند، برای افزایش سفتی بسیار مؤثر هستند [7].

محمد و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح‌شده با درصد‌های وزنی مختلف (0، 1، 2، 3 و 4 درصد) بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی پرداختند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها بیانگر این بود که افزودن نانوذرات رس تا 3 درصد وزنی باعث افزایش سفتی تا 20 درصد می‌شود. اما افزودن این نانوذرات کاهش ناچیز استحکام کششی نانو کامپوزیت را به همراه دارد. آن‌ها نشان دادند که افزودن نانوذرات رس بر انرژی شکست تأثیر نمی‌گذارد، زیرا مکانیزم اصلی مقاومت در برابر ترک انحراف ترک می‌باشد که در آن اتلاف انرژی ناچیز است [8].

سواجیا و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات تورمالین با درصد‌های وزنی مختلف (0، 0/5، 1، 1/5 و 2 درصد) بر خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت پرداختند و نشان دادند که بیشترین بهبود در خواص خمشی مربوط به 1 درصد وزنی تورمالین می‌باشد که موجب افزایش 16 درصدی استحکام خمشی و همچنین افزایش 153 درصدی مدول خمشی می‌شود [4].

وایی‌هو و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رس به روش اختلاط مکانیکی با درصد‌های وزنی 0 تا 8 بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی پرداختند. نتایج خاص از تحقیقات آن‌ها نشان داد که نمونه‌های حاوی 5 درصد وزنی نانوذرات رس دارای بیشترین استحکام کششی و سختی هستند [9].

رستمیان و همکاران به بررسی تجربی تأثیر افزودن نانوذرات

نازک فلزی و چسب‌های تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. به این صورت که لایه‌ی پلیمری تقویت‌شده با الیاف به‌عنوان هسته بین دو لایه فلزی قرار می‌گیرد [1]. از ویژگی‌های کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز می‌توان به مواردی همچون مقاومت به خستگی، استحکام، چقرمگی شکست، مقاومت به ضربه و قابلیت جذب انرژی بالا اشاره کرد. لذا کاربرد این نوع از کامپوزیت‌ها به‌ویژه در صنایع هوایی و فضایی توسعه پیدا کرده است [2].

الیاف شیشه، کربن و کولار جز متداول‌ترین الیاف تقویت‌کننده در زمینه اپوکسی می‌باشند. در این میان الیاف بازالت که نوعی از الیاف معدنی به شمار می‌آیند به علت خصوصیت‌هایی که در مقایسه با الیاف شیشه، کربن و کولار دارد، بیشتر مورد توجه بوده است. استحکام بالا، چسبندگی عالی به رزین، عایق صوتی، جذب رطوبت کم، مقاومت بالا در برابر خوردگی شیمیایی، عدم وجود مشکل از نظر زیست‌محیطی، گستره دمای عملیاتی بالا و هزینه تولید کم نسبت به الیاف کربن از ویژگی‌های بارز الیاف بازالت است [3]. همچنین الیاف بازالت دارای استحکام کششی بالا نسبت به الیاف شیشه و کرنش شکست بالا نسبت به الیاف کربن می‌باشند؛ بنابراین کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت می‌توانند جایگزین کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه در کاربردهای مختلفی نظیر هوا و فضا، حمل‌ونقل و خودروسازی شوند [5،4].

در بخش نانوفناوری، نانو کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. این بخش با شناسایی رس‌های لایه‌ای که به صورت قابل توجهی قابلیت بهبود خواص مکانیکی را از طریق اصلاح سیستم پلیمری دارد، توسعه پیدا کرده است. خاک رس شناخته‌شده به‌عنوان مونت-موریلونیت¹ شامل صفحات کوچکی با یک لایه هشت‌وجهی داخلی که بین دو لایه‌ی سیلیکات چهاروجهی قرار گرفته است، می‌باشد. لایه‌های هشت‌وجهی ممکن است به‌عنوان یک صفحه اکسید آلومینیوم که تعدادی از اتم‌های آلومینیوم با منیزیم جایگزین شده‌اند، در نظر گرفته شود. لایه‌های رس در حالت طبیعی خود به صورت دسته‌هایی از صفحات است که برهمکنش بین این صفحات و زنجیره‌های پلیمری را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

الف- امتزاج ناپذیر: در صورتی که فضای بین صفحات کوچک که در اصطلاح به آن گالری گفته می‌شود، کم باشد، زنجیره‌های پلیمری قادر به نفوذ بین این صفحات نخواهند بود.

² Intercalation

³ Exfoliation

¹ Montmorillonite

میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از رزین اپوکسی اپون 828 به همراه عامل سخت‌کننده پلی‌آمینی¹ تا² خریداری شده از شرکت شیمی افسون به‌عنوان ماده زمینه استفاده شد. الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت، الیاف بازالت با بافت اطلس (BAS 350.1270.A)، ضخامت 0/19 میلی‌متر و چگالی سطحی 350g/m^2 محصول شرکت بازالتکس³ می‌باشد. نانوذرات رس (مونت‌موریلونیت k10)، محصول شرکت سیگما آلدریج⁴ به‌عنوان فاز تقویت‌کننده نانومقیاس مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ایجاد چسبندگی مناسب بین ورق‌های آلومینیومی و زمینه پلیمری، محلول سدیم هیدروکسید به‌عنوان محلول اچ به‌کار رفت. همچنین به‌منظور توزیع مناسب نانوذرات رس و نیز ایجاد برهمکنش مناسب بین زنجیره‌های پلیمری و لایه‌های رس از عامل کوپلینگ تری-گلیسیداکسی پروپیل تری‌متوکسی سیلان⁵ (3-GPTS) تولید شده توسط شرکت مرک⁶ آلمان استفاده شد.

2-2- آماده‌سازی و انجام عملیات سطحی بر روی ورق‌های آلومینیومی

ورق‌های آلومینیومی 2024-T3 با ابعاد 25×150 میلی‌متر مربع بریده شده، سپس به‌منظور ایجاد چسبندگی خوب بین ورق‌های آلومینیومی و زمینه پلیمری دو نوع عملیات سطحی مکانیکی و شیمیایی بر روی ورق‌ها انجام شد. ابتدا ورق‌های آلومینیومی آماده شده با استفاده از سمباده شماره 100 تحت زاویه 45 درجه (شکل 1) تحت عملیات مکانیکی قرار گرفتند. سپس در محلول 0/5 درصد هیدروکسید سدیم در دمای 60 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 دقیقه قرار داده شدند تا خورگی شیمیایی اتفاق افتاده و چسبندگی لازم در فصل مشترک زمینه پلیمری و ورق آلومینیومی حاصل شود.

2-3- اصلاح سطحی نانوذرات رس

برای عامل دار کردن نانوذرات رس، این نانوذرات در محلول اتانول و آب مقطر با استفاده از دستگاه آلتراسونیک پروبی توزیع شدند. در ادامه، عامل سیلانی (3-GPTS) به آن اضافه شد. سپس مخلوط حاصل جهت جداسازی نانوذرات رس اصلاح سطحی شده از مایع تحت عملیات سانتریفیوژ با دور 4000 rpm قرار گرفت. برای جدا کردن ترکیبات سیلانی واکنش نداده با

رس و نانوذرات سیلیکا بر استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه پرداختند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها بیانگر بهبود استحکام خمشی کامپوزیت در 4 درصد وزنی نانوذرات رس تا 11 درصد و 3/5 درصد نانوذرات سیلیکا تا 63 درصد بود [11]. در تحقیقی دیگر شرما و همکاران [12] بر روی تأثیر افزودن نانورس در زمینه پلیمری تحقیق کردند. نتایج نشان داد افزودن 4 درصد وزنی نانورس باعث بهبود خواص کششی و خمشی شده است، اما سختی فقط تا 2 درصد وزنی نانورس افزایش یافته است.

پل و همکاران به مطالعه خواص کششی کامپوزیت چند لایه اپوکسی - الیاف شیشه بافته شده پرداختند. در مطالعات آن‌ها نانوذرات رس با درصدهای وزنی 0، 3، 5، 7 و 10 به زمینه افزوده شدند. نتایج آن‌ها نشان داد افزودن نانوذرات رس در درصدهای پایین تأثیر منفی بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت دارد. همچنین طبق نتایج ایشان بیشترین میزان جذب انرژی با افزودن 5 درصد نانوذرات رس حاصل شد [13].

فراتنه و همکاران به بررسی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم-اپوکسی/الیاف بازالت در مقایسه با همین کامپوزیت‌های لایه‌ای حاوی الیاف شیشه پرداختند. نتایج حاصل از مقایسه کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف بازالت-آلومینیوم و الیاف شیشه-آلومینیوم بیانگر تأثیر مثبت الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه بر روی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز بود [10].

رفیق و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رس به چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج نشان داد افزودن 1/5 درصد وزنی نانو به این سازه کامپوزیتی باعث 11% بهبود در چقرمگی شکست شده است. همچنین پدیده آگلومره شدن در 3 درصد وزنی نانورس دیده شد [14]. با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده، هدف اصلی در پژوهش حاضر بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح سطحی شده بر خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم-2024-T3-رزین اپوکسی/الیاف بازالت، تعیین مقدار بهینه نانوذرات رس بر اساس بیشترین تأثیر بر استحکام خمشی و همچنین مقایسه تأثیر نانوذرات رس اصلاح سطحی شده و اصلاح سطحی نشده بر خواص خمشی این کامپوزیت‌هاست.

2- بخش تجربی

1-1- مواد

در پژوهش حاضر ورق آلومینیومی 2024-T3 با ضخامت 0/5

¹ Polyamine hardner

² TETA (EPIKURE 3234)

³ Basaltex

⁴ Sigma-Aldich

⁵ 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane coupling agent

⁶ Merck

محیط و با استفاده از دستگاه پرس، تحت فشار 5 bar قرار گرفت. پس از پخت و خروج نمونه‌ها به‌منظور پخت کامل و حصول حداکثر استحکام، انجام آزمون خمش پس از 20 روز انجام گرفت.

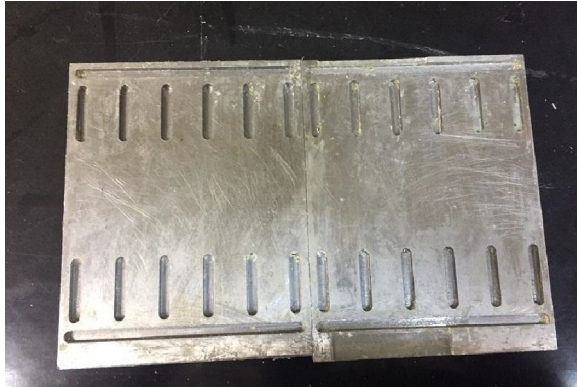


Fig. 2 Schematic of flexural specimens fixture

شکل 2 شماتیک قالب ساخت نمونه‌های خمش

2-5- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

در انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای نمونه‌های الیاف- فلز از استاندارد ASTM D790 و دستگاه کوپا 10 تنی استفاده شد و نمونه‌های با ابعاد 150×25 میلی‌متر مربع (مطابق شکل 3) بر روی دو تکیه‌گاه تحت آزمون قرار گرفتند [15]. در این آزمون فاصله بین دو تکیه‌گاه مطابق استاندارد ASTM، 32 برابر ضخامت نمونه‌های آزمایش (که مقدار نهایی آن برابر با 1/9 میلی‌متر بود)، در نظر گرفته شد. سپس نمونه‌ها طبق رابطه (1) با نرخ کرنش معین بارگذاری شدند و نمودار نیروی خمشی برحسب جابجایی توسط دستگاه رسم شد. شایان ذکر است که نتایج حاصل با استفاده از معادلات (2) و (3) برای محاسبه تنش خمشی و کرنش خمشی مورد استفاده قرار گرفت [16,15]. برای دستیابی به دقت بالا در این آزمون و مطابق استاندارد، تعداد نمونه‌های آزمایش برای هر نوع نمونه ساخته شده، 5 عدد در نظر گرفته شد و نتایج حاصل به صورت مقدار میانگین گزارش شد.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (1)$$

$$\delta_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{\pi L^2} \quad (3)$$

در این معادلات، R نرخ بارگذاری، Z مقدار ثابت 0.01 P میزان بار اعمالی برحسب نیوتون، L فاصله بین دو تکیه‌گاه برحسب میلی‌متر، d ضخامت نمونه‌های الیاف- فلز برحسب

نانوذرات رس، ماده حاصله با اتانول شست‌وشو داده و سپس به‌صورت کامل در آون خشک شد.



Fig. 1 Surface treatments on 2024-T3 aluminum sheets (a) mechanical treatment (b) mechanical and chemical treatment

شکل 1 عملیات سطحی انجام شده بر روی ورق آلومینیومی 2024-T3 (a) عملیات مکانیکی و شیمیایی (b) عملیات مکانیکی و شیمیایی

2-4- ساخت نمونه

برای آماده‌سازی ماده زمینه ابتدا نانوذرات رس اصلاح سطحی شده با درصد‌های وزنی (1، 3 و 5 درصد) به رزین مورد نظر اضافه شده، سپس با استفاده از هم‌زن مکانیکی به مدت 20 دقیقه با دور 2000 rpm هم زده شدند. در ادامه به‌منظور توزیع مناسب نانوذرات رس اصلاح‌شده در زمینه و نیز شکسته شدن کلوخه‌های نانوذرات رس، مخلوط مورد نظر به مدت 60 دقیقه تحت امواجอัลتراسونیک با استفاده از دستگاه هموژنایزر پروبی (ساخت شرکت فاپن) قرار گرفت. در ادامه، عامل سخت‌کننده به میزان 10 درصد وزنی رزین به مخلوط آماده شده، اضافه شده و به صورت کامل هم زده شد. مخلوط آماده شده همراه با چهار لایه الیاف بازالت بافته‌شده با نسبت وزنی رزین به الیاف 50 به 50 در ساخت کامپوزیت لایه‌ای استفاده شد.

عملیات ساخت کامپوزیت به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد. جهت مقایسه نتایج، نمونه‌های بدون نانوذرات رس به همین روش ساخته شدند. در این عملیات از یک قالب فولادی جهت قرار گرفتن نمونه‌ها قبل از پخت و اعمال فشار متوازن به آن استفاده شد (شکل 2). به‌منظور جلوگیری از چسبندگی سطح آلومینیوم به قالب فولادی و آسیب نمونه‌ی ساخته شده به هنگام جدا کردن از یک لایه تفلون در فصل مشترک قالب و ورق آلومینیومی استفاده شد. پس از قرارگیری نمونه‌های ساخته شده درون قالب، این مجموعه به مدت 24 ساعت در دمای

می‌باشد. این پیک در طیف مربوط به نانوذرات رس اصلاح‌نشده وجود ندارد و موید پیوند 3-GPTS به نانوذرات رس است.

میلی‌متر، b عرض نمونه خمشی و D میزان جابجایی نمونه در نقطه میانی آن می‌باشد.

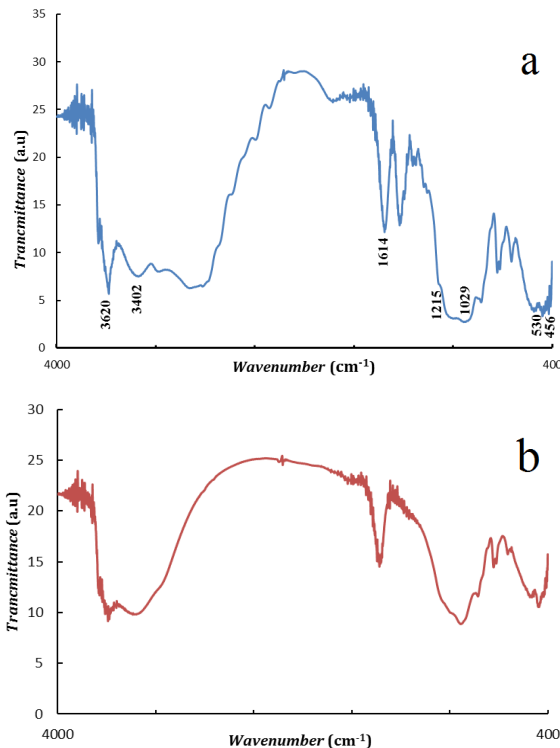


Fig. 4 FT-IR spectra of (a) nanoclay/3-GPTS and (b) nanoclay
شکل 4 طیف FT-IR مربوط به نمونه‌های پودری (a) نانوذرات رس/3-GPTS و (b) نانوذرات رس

3-2- نتایج آزمون خمش

نتایج حاصل از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز، حاوی درصد‌های وزنی متفاوت نانوذرات رس در جدول 1 آورده شده است با توجه به بیشترین تأثیر نانوذرات رس اصلاح شده در 3 درصد وزنی آن، نمونه‌های حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح نشده جهت مقایسه، ساخته و تحت آزمون‌های مشابه قرار گرفتند.

Table 1 Results of three point flexural test of fiber metal laminate specimens

جدول 1 نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی الیاف-فلز

| مدول خمشی (GPa) | کرنش خمشی (درصد) | استحکام خمشی (MPa) | درصد وزنی نانوذرات رس |
|-----------------|------------------|--------------------|-----------------------|
| 50/59 | 1/30 | 502/87 | 0 |
| 74/3 | 1/68 | 568/10 | 1 |
| 99/56 | 2/85 | 766/94 | 3 |
| 122/22 | 1/52 | 641/30 | 5 |
| 94/86 | 1/47 | 583/31 | 3 um* |

*um (unmodified nanoclay) به معنای نانوذرات رس اصلاح نشده است.



Fig. 3 Three point flexural test of fiber metal laminate specimen
شکل 3 نمونه کامپوزیتی الیاف-فلز تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

2-6- مطالعه میکروسکوپی

به‌منظور مطالعه سطح جدایش و شکست نمونه‌های آزمایش شده و تشخیص مکانیزم‌های تأثیر نانوذرات رس بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های الیاف-فلز، مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3 TESCAN-XMU انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوری (FT-IR)²

شکل 4، نمودار FT-IR مربوط به نانوذرات رس اولیه و نانوذرات رس اصلاح سطحی شده را نشان می‌دهد که با دستگاه Jasco-460 plus گرفته شده است. طیف FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح شده نمایانگر یک پیک پهن در 3402 cm^{-1} است که بیانگر ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل می‌باشد. همچنین پیک مربوط به 1614 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی H-O-H می‌باشد [17]. باند مربوط به 3620 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل متصل به اتم‌های آلومینیوم است که در طیف مربوط به نانوذرات رس اولیه وجود ندارد [18]. جذب در 1029 cm^{-1} نیز به دلیل ارتعاش کششی Si-O و Si-O-Si می‌باشد [14].

جذب پیک‌های 530 cm^{-1} و 456 cm^{-1} بیانگر ارتعاش خمشی گروه‌های Si-O-Si و Si-O-Al در نانوذرات رس اصلاح شده است [19]. علاوه بر این طیف FT-IR نشان‌دهنده‌ی یک پیک در 1215 cm^{-1} است که مربوط به ارتعاش حلقه اپوکسید

¹ Field Emission Scanning Electron Microscope

² Fourier Transform Infrared Spectroscopy

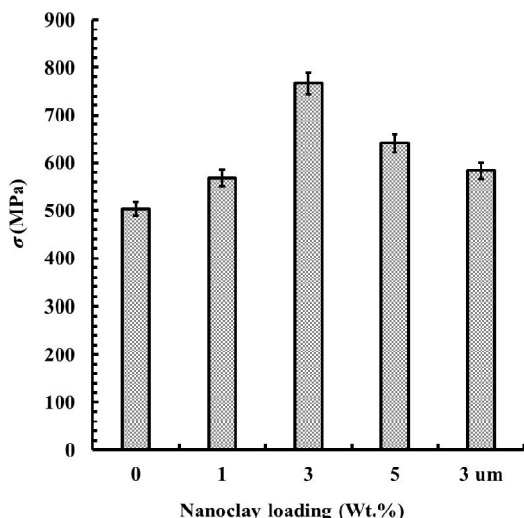


Fig. 5 Flexural strength of fiber metal laminates at different nanoclay loading

شکل 5 تأثیر افزودن نانوذرات رس بر استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی الیاف - فلز

3-2-2-2-2-2-2-3-2-3 مدول خمشی

نتایج تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانوذرات رس بر مدول خمشی نمونه‌های کامپوزیت الیاف - فلز در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، با حضور نانوذرات رس اصلاح‌شده به میزان 1، 3 و 5 درصد، مدول خمشی کامپوزیت لایه‌ای به ترتیب به میزان 46، 96 و 141 درصد، نسبت به نمونه فاقد نانوذرات رس افزایش می‌یابد. حضور نانوذرات رس اصلاح‌شده با مدول ذاتی بالا نسبت به زمینه پلیمری منجر به افزایش مدول خمشی ماده شده و از طرف دیگر با ایجاد درگیری و محدودیت در تحرک زنجیره پلیمری سبب افزایش سفتی و مدول کامپوزیت لایه‌ای می‌شود. اما کاهش جزئی مدول در نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده نسبت به نمونه حاوی 3 درصد نانوذرات رس اصلاح‌شده را می‌توان به کلوخه شدن نانوذرات رس اصلاح‌نشده نسبت داد که از تأثیر آن بر افزایش سفتی ماده کاسته است [21].

3-2-3-3-2-3-3-2-3-3 انرژي جذب‌شده

تأثیر افزودن نانوذرات رس بر انرژي لازم برای شکست کامپوزیت‌های لایه‌ای حاوی نانوذرات رس در شکل 7 قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش میزان نانوذرات رس اصلاح‌شده تا 3 درصد وزنی انرژي لازم برای شکست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. انرژي شکست کامپوزیت لایه‌ای با افزایش نانوذرات رس اصلاح‌شده به مقدار 1

3-2-1-2-3 استحکام خمشی

تأثیر افزودن نانوذرات رس بر استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت الیاف - فلز در شکل 5 نشان داده شده است. مطابق با این شکل، تغییرات استحکام خمشی نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی نانوذرات رس ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار استحکام خمشی مربوط به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس است که استحکام خمشی آن به میزان 52 درصد نسبت به نمونه بدون نانوذرات رس (نمونه شاهد) افزایش یافته است.

افزایش استحکام ناشی از افزودن نانوذرات رس در کامپوزیت لایه‌ای الیاف - فلز به دلیل بهبود خواص فصل مشترک بین زمینه اپوکسی و الیاف بازالت می‌باشد. این موضوع سبب انتقال هر چه بهتر بار از زمینه به الیاف می‌شود و با توجه به استحکام بالای الیاف بازالت نسبت به زمینه اپوکسی، افزایش استحکام خمشی کامپوزیت با زمینه‌ی اپوکسی را به همراه دارد. از طرف دیگر افزایش نانوذرات رس منجر به افزایش مدول یانگ زمینه پلیمری می‌شود. این افزایش به سبب مدول ذاتی بالای نانوذرات رس نسبت به زمینه اپوکسی است که در کل باعث افزایش مدول زمینه حاوی نانوذرات رس می‌شود. علاوه بر این درگیری و در هم‌روی بین زنجیره‌های پلیمری و لایه‌های رس باعث افزایش مدول می‌شود. این افزایش مدول و سفتی در زمینه باعث کاهش تنش برشی در فصل مشترک بین لایه آلومینیومی و کامپوزیت شده و استحکام خمشی کامپوزیت لایه‌ای الیاف - فلز افزایش می‌یابد.

با افزودن بیشتر نانوذرات رس (5 درصد وزنی)، استحکام خمشی کامپوزیت لایه‌ای در مقایسه با نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده به میزان 16/4 درصد کاهش می‌یابد. کاهش استحکام نمونه حاوی 5 درصد نانوذرات رس اصلاح‌شده نسبت به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده را می‌توان ناشی از کاهش چسبندگی بین زمینه اپوکسی و الیاف بازالت دانست که این موضوع به علت تشکیل توده‌های غیرپیوسته از ذرات رس در زمینه است. علاوه بر آن تشکیل کلوخه‌های رس در درصدهای وزنی بالا به‌عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده و استحکام خمشی را کاهش می‌دهند [20]. با توجه به شکل 5 استحکام خمشی نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده (3 um) نسبت به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده، 24 درصد کاهش می‌یابد. این کاهش استحکام خمشی را می‌توان به کلوخه شدن نانوذرات رس اصلاح‌نشده نسبت داد.

مشترک بین زمینه اپوکسی با الیاف بازالت و ورق آلومینیوم است، اما عامل کاهش انرژی شکست در نمونه حاوی 5 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده و 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده نسبت به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده، کلوخه شدن نانوذرات رس و پیرو آن تضعیف خواص فصل مشترکی می‌باشد.

3-3- نتایج مطالعه سطوح شکست و جدایش نمونه‌ها

سطح جدایش بین زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت و ورق آلومینیومی در شکل 8 نشان داده شده است. این بخش از نمونه، نقطه وسط نمونه خمشی بوده و قسمتی است که تحت بیشترین تنش کششی بوده است. سطح جدایش و شکست نمونه بدون نانوذرات رس در شکل 8a نشان داده شده است. مد شکست در این مورد بیرون‌زدگی الیاف و شکستگی الیاف است. در حالی که در نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس (شکل 8b) الیاف در بسیاری از بخش‌ها به کامپوزیت چسبیده و از همدیگر جدا نشده‌اند [22].

شکل 9a سطح شکست نمونه شاهد را نشان می‌دهد. الیاف بازالت دارای سطحی تمیز و بدون چسبندگی رزین هستند، اما در مورد نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده (شکل 9b)، در سطح شکست، زمینه اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات رس اصلاح‌شده به صورت نقطه‌های پراکنده به الیاف بازالت چسبیده و در بیشتر بخش‌ها از آن جدا نشده‌اند.

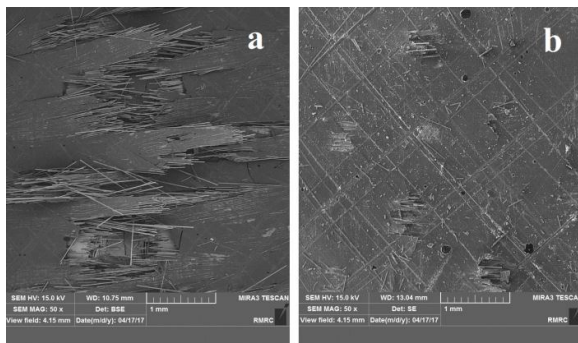


Fig. 8 FESEM micrograph of the separation surface of nano composite and aluminum (a) without nanoclay (b) 3 wt.% modified nanoclay

شکل 8 تصویر FESEM از سطح جدایش بین لایه کامپوزیتی زمینه اپوکسی و ورق آلومینیومی (a) بدون نانوذرات رس (b) حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس

شکل 9c نیز سطح شکست نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده را نشان می‌دهد که در آن زمینه در بخش‌هایی به الیاف چسبیده است، اما میزان چسبندگی آن

درصد وزنی به میزان 46 درصد و به ازای افزایش 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده به میزان 195 درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. این افزایش انرژی شکست در 5 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده نسبت به نمونه شاهد به 49 درصد می‌رسد.

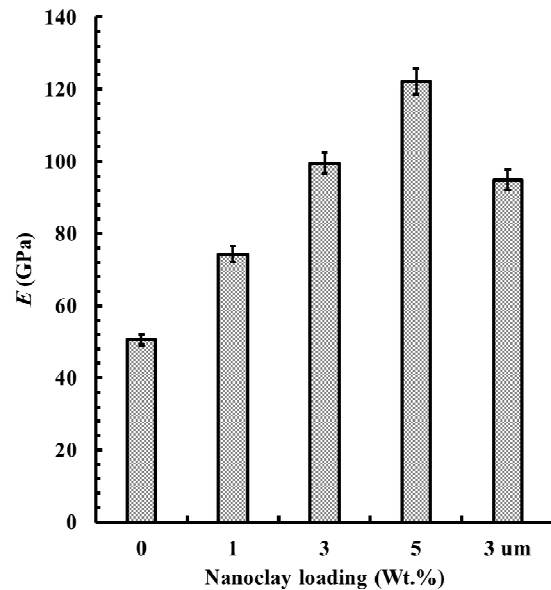


Fig. 6 Flexural modulus of fiber metal laminates at different nanoclay loading

شکل 6 تأثیر افزودن نانوذرات رس بر مدول خمشی نمونه‌های کامپوزیتی الیاف-فلز

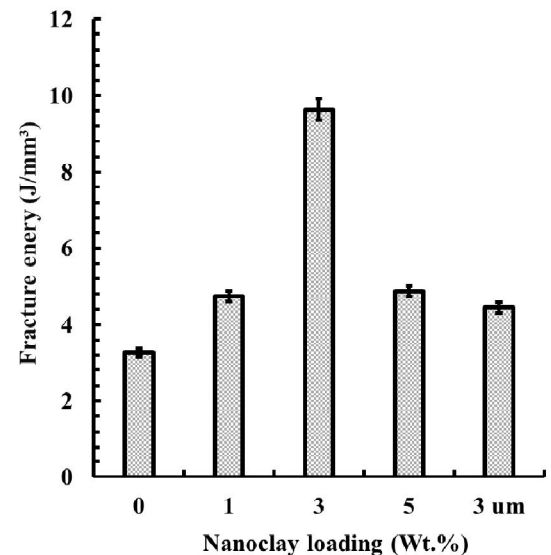


Fig. 7 Fracture energy of fiber metal laminates at different nanoclay loading

شکل 7 تأثیر افزودن نانوذرات رس بر انرژی شکست کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز

دلیل افزایش انرژی شکست در ارتباط با بهبود خواص فصل

رس، عدم جدایش بین زمینه و الیاف بیانگر چسبندگی مطلوب بین زمینه و الیاف است که منجر به شکستگی الیاف در نقاط تحت کشش شده است [۲۲،۲۳].
 شکل 10، تصویر FESEM از سطح شکست سه نمونه نانوکامپوزیت لایه‌ای حاوی نانوذرات رس را نشان می‌دهد.

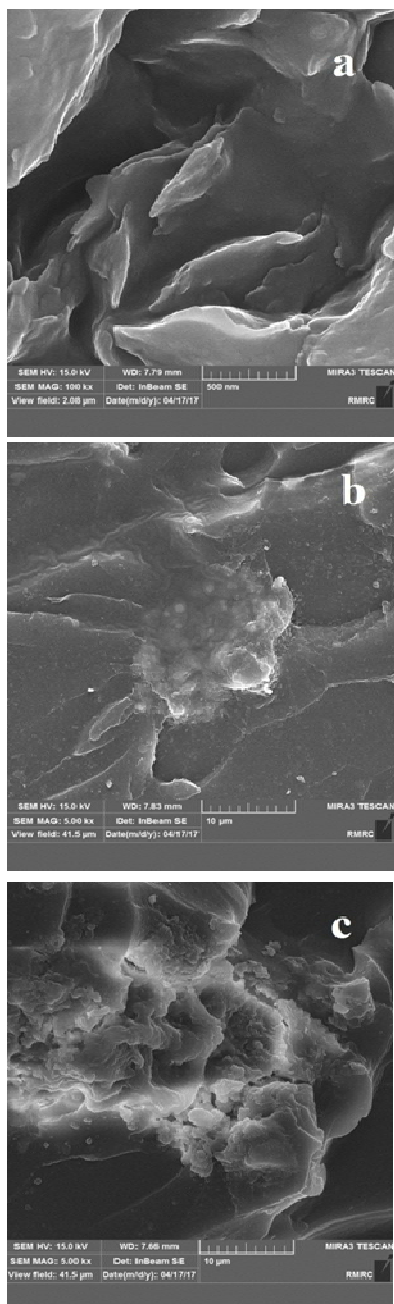


Fig. 10 FESEM micrograph of the fracture surface of laminate nanocomposites containing (a) 3 wt.% modified nanoclay (b) 5 wt.% modified nanoclay (c) 3 wt.% unmodified nanoclay
 شکل 10 تصویر FESEM از سطح شکست نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای حاوی (a) 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده (b) 5 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده (c) 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده

کمتراز نمونه حاوی 3 درصد نانوذرات رس اصلاح‌شده است.

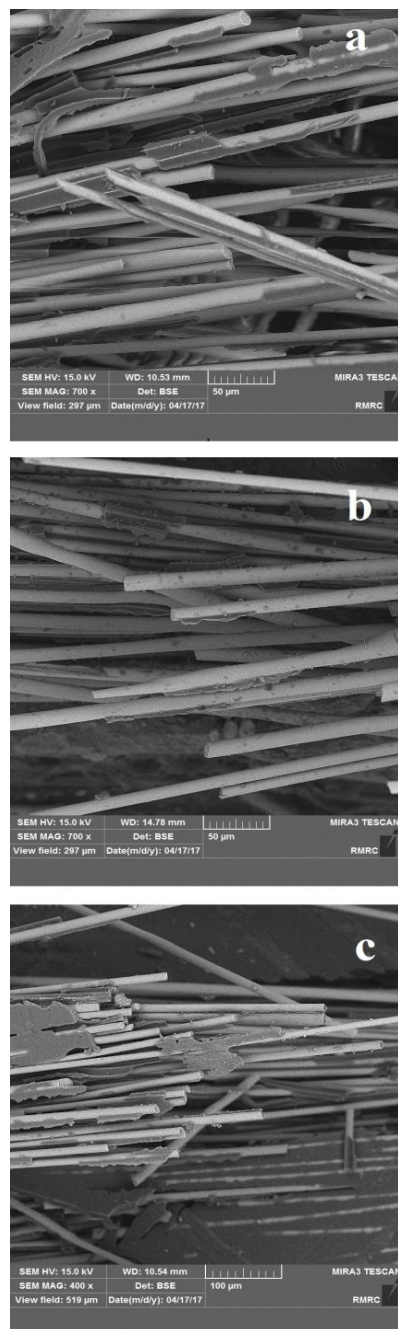


Fig. 9 FESEM micrograph of the fracture surface of laminate nanocomposites (a) without nanoclay (b) containing 3 wt.% modified nanoclay (c) containing 3 wt.% unmodified nanoclay
 شکل 9 تصویر FESEM از سطح شکست نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای بدون نانوذرات رس (a) حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده (b) حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده (c)

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در نمونه بدون نانوذرات رس شکستگی در زمینه اتفاق افتاده و این پدیده همراه با جدایش بین زمینه و الیاف است؛ اما در مورد نمونه‌های حاوی نانوذرات

- response of fibre-metal laminates—A review, *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [2] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, O. Çoban, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [3] J. Sim, C. Park, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 504-512, 2005.
- [4] I. A. Subagia, L. D. Tijing, Y. Kim, C. S. Kim, F. P. Vista IV, H. K. Shon, Mechanical performance of multiscale basalt fiber-epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 611-617, 2014.
- [5] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza, A review on basalt fibre and its composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 74, pp. 74-94, 2015.
- [6] K. Naresh, K. Rajalakshmi, A. Vasudevan, S. Senthil Kumaran, R. Velmurugan, Effect of nanoclay and different impactor shapes on glass/epoxy composites subjected to quasistatic punch shear loading, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Published Online, 2018.
- [7] D. Paul, L. M. Robeson, Polymer nanotechnology: nanocomposites, *Polymer*, Vol. 49, No. 15, pp. 3187-3204, 2008.
- [8] M. T. Bashar, P. Mertiny, Mechanical and Mode-I Fracture Properties of Epoxy-Clay Nanocomposites Prepared by Ultrasonic Dispersion Method, Vacuum, Vol. 1200, No. 2hr, pp. 600C, 2014.
- [9] M.-W. Ho, C.-K. Lam, K.-t. Lau, D. H. Ng, D. Hui, Mechanical properties of epoxy-based composites using nanoclays, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 415-421, 2006.
- [10] L. Ferrante, F. Sarasini, J. Tirillò, L. Lampani, T. Valente, P. Gaudenzi, Low velocity impact response of basalt-aluminium fibre metal laminates, *Materials & Design*, Vol. 98, pp. 98-107, 2016.
- [11] Y. Rostamiyan, A. Fereidoon, M. Rezaeiashtiyani, A. H. Mashhadzadeh, A. Salmankhani, Experimental and optimizing flexural strength of epoxy-based nanocomposite: Effect of using nano silica and nano clay by using response surface design methodology, *Materials & Design*, Vol. 69, pp. 96-104, 2015.
- [12] B. K. Sharma, G. Sharma, A. Rahaman, Mechanical and thermal properties of nanoclay/glass fiber/epoxy laminated composite, *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, pp. 3116-3119, 2017.
- [13] M. H. Pol, G. H. Liaghat, E. M. Yeganeh, A. Afrouzian, Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical

مطابق با شکل 10a (نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده)، صفحات رس از همدیگر فاصله گرفته‌اند، به طوری که زنجیره‌های پلیمری در بین این لایه‌ها حضور دارند و با هم درگیر هستند. این تصویر به وضوح صفحات رس اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. در شکل 10b (سطح شکست نمونه حاوی 5 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده)، کلوخه‌ای با اندازه حدوداً 15 میکرون متشکل از لایه‌های رس مشاهده می‌شود. این کلوخه با ایجاد تمرکز تنش در اطراف خود سبب به وجود آمدن ترک‌ها و شیارهای ریزی در کنار خود شده است. شکل 10c نیز تصویری از سطح شکست نمونه‌ای حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده را نشان می‌دهد که در آن نیز نانوذرات رس به جای توزیع یکنواخت در زمینه به همدیگر چسبیده و کلوخه تشکیل داده‌اند. این کلوخه علاوه بر ایجاد تمرکز تنش در اطراف خود مانع درگیری زنجیره‌های پلیمری در آن محدوده شده که نتیجه آن تردی و شکنندگی زمینه می‌باشد [9].

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر افزودن نانوذرات رس اصلاح‌شده با درصد‌های وزنی 1، 3 و 5 و همچنین اثر افزودن نانوذرات رس اصلاح‌نشده با 3 درصد وزنی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم 2024-T3-رزین اپوکسی/الیاف بازالت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد حداکثر تأثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح‌شده بر روی استحکام خمشی و انرژی شکست در 3 درصد وزنی این نانوذرات اتفاق می‌افتد. در این مقدار از نانوذرات رس اصلاح‌شده استحکام خمشی و انرژی شکست به ترتیب به میزان 52 و 196 درصد نسبت به نمونه بدون نانوذرات رس افزایش نشان داد؛ اما در مورد مدول خمشی افزایش پیوسته آن با افزایش مقدار نانوذرات رس اصلاح‌شده مشاهده شد.

تضعیف خواص خمشی در نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌نشده نسبت به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح‌شده مشاهده شد که با توجه به تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌ها دلیل آن به هم پیوستن لایه‌های رس و کلوخه شدن آن است. همچنین مطالعه سطح شکست نمونه‌ها، بهبود خواص فصل مشترک بین زمینه و الیاف بازالت در نمونه‌های حاوی نانوذرات رس را نشان داد.

5- مراجع

- [1] G. B. Chai, P. Manikandan, Low velocity impact

- [19] A. K. Mishra, S. Allauddin, R. Narayan, T. M. Aminabhavi, K. Raju, Characterization of surface-modified montmorillonite nanocomposites, *Ceramics International*, Vol. 38, No. 2, pp. 929-934, 2012.
- [20] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, 2015.
- [21] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, Enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na⁺-montmorillonite nanoclay, *Polymer Testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [22] A. Thiagarajan, K. Kaviarasan, R. Vigneshwaran, K. Venkatraman, The nano clay influence on mechanical properties of mixed glass fibre polymer composites, *Int. J. ChemTech Res*, Vol. 6, No. 3, pp. 1840-1843, 2014.
- [23] G. Withers, Y. Yu, V. Khabashesku, L. Cercone, V. Hadjiev, J. Souza, D. Davis, Improved mechanical properties of an epoxy glass-fiber composite reinforced with surface organomodified nanoclays, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 72, pp. 175-182, 2015.
- properties of glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, 2015 (in persian فارسی).
- [14] A. Rafiq, N. Merah, R. Boukhili, M. Al-Qadhi, Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite, *Polymer Testing*, Vol. 57, pp. 1-11, 2017.
- [15] A. S. D. o. M. Properties, Standard test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, in *Proceeding of, American Society for Testing Materials*.
- [16] G. S. Dhaliwal, G. M. Newaz, Experimental and numerical investigation of flexural behavior of carbon fiber reinforced aluminum laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 35, No. 12, pp. 945-956, 2016.
- [17] D. Romanzini, V. Piroli, A. Frache, A. J. Zattera, S. C. Amico, Sodium montmorillonite modified with methacryloxy and vinylsilanes: Influence of silylation on the morphology of clay/unsaturated polyester nanocomposites, *Applied Clay Science*, Vol. 114, pp. 550-557, 2015.
- [18] W. Gates, Infrared spectroscopy and the chemistry of dioctahedral smectites, in *Proceeding of, Clay Minerals Society*, pp. 125.