



بررسی اثر ذرات سیلیکا فیوم اصلاح شده بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های کششی و خمشی

حسنا عزیزی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، محمدرضا واعظی³، علی شکوه‌فر^{2†}

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

2- استاد تمام، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد تمام، مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

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

اطلاعات مقاله: چکیده

دریافت: 1402/04/16
پذیرش: 1402/06/19

کلیدواژگان:
کامپوزیت زمینه پلیمری، الیاف بازالت، سیلیکا فیوم، اصلاح سطحی، خواص مکانیکی

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به دلیل سبکی، و استحکام و سفتی ویژه بالا از پرکاربردترین انواع کامپوزیت‌ها هستند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف از مهم‌ترین کامپوزیت‌ها هستند و الیاف بازالت یکی از انواع الیاف معدنی مهمی است که در زمینه پلیمری استفاده می‌شود. در این پژوهش، اثر افزودن ذرات سیلیکا فیوم (که تاکنون در کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف استفاده نشده است) بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های خمشی و کشش مورد مطالعه قرار گرفت. ذرات سیلیکا فیوم با سیلان اصلاح سطحی شده و سپس با درصد‌های مختلف (2، 4 و 6 درصد وزنی) با استفاده از همزن مکانیکی و امواج التراسونیک داخل زمینه اپوکسی توزیع شدند. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزودن ذرات سیلیکا فیوم، بیشترین میزان بهبود در خواص استحکام و مدول کششی، و همچنین استحکام و مدول خمشی مربوط به نمونه حاوی 4 wt.% سیلیکا فیوم به ترتیب برابر با 22، 34، 27 و 40 درصد بهبود نسبت به نمونه فاقد سیلیکا فیوم بوده است. از طرفی نتایج آزمون‌های مکانیکی و بررسی ریزساختاری پس از شکست نشان داد که بهبود فصل مشترک بین الیاف و زمینه در نتیجه توزیع مناسب این ذرات داخل زمینه تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی دارد. همچنین توزیع نامطلوب این ذرات منجر به افت خواص مکانیکی در بارگذاری‌های مختلف می‌شود.

Investigating the effect of modified silica fume on the mechanical behavior of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loading

Hosna Azizi¹, Reza Eslami-Farsani^{1*}, Mohammad Reza Vaezi², Ali Shokuhfar^{1†}

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

2- Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

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

Keywords

Polymer matrix Composites,
Basalt fibers,
Silica fume,
Surface modification,
Mechanical properties

Abstract

Polymer matrix composites are one of the most widely used types of composites due to their lightness, and special strength and stiffness. Fibers-reinforced composites are the most important composites, and basalt fibers are one of the important types of mineral fibers that are used in the matrix of polymers. In this research, the effect of addition of silica fume particles (which has not been used in fibers reinforced polymer composites) on the mechanical properties of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loadings was studied. The silica fume particles are surface modified with silane and then with different percentages (2, 4 and 6 wt.%) were distributed inside the epoxy matrix using a mechanical stirrer and ultrasonic waves. Hand lay-up method was used to make composite samples. The results of this research showed that with the addition of silica fume particles, the greatest improvement in the properties of the tensile strength and modulus, as well as the bending strength and modulus of the sample containing 4 wt.% silica fume is 22, 34, 27 and 40% respectively in compared to the sample without silica fume. On the other hand, the results of mechanical tests and microstructural examination after failure showed that the improvement of the interface between the fibers and the matrix as a result of the proper distribution of these particles inside the matrix has a significant effect on improving the mechanical properties. Also, the unfavorable distribution of these particles leads to the loss of mechanical properties under different loadings.

Please cite this article using:

Azizi, H., Eslami-Farsani, R., Vaezi, M. R., Shokuhfar, A., "Investigating the effect of modified silica fume on the mechanical behavior of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2218-2224, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2006000.1842>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

انجام نشده است. لذا استفاده از ذرات سیلیکا فیوم در کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف جز نوآوری‌های این تحقیق محسوب می‌شود. بر این اساس، رویکرد اصلی این تحقیق، بررسی اثر افزودن سیلیکا فیوم اصلاح سطحی شده با عامل سیلان بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های خمشی و کششی است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش از رزین اپوکسی ML-506 به همراه هاردنر پلی‌آمینی (با نسبت وزنی 2 به 1 نسبت به پایه اپوکسی) ساخت شرکت هلدینگ فجر استفاده شد. پارچه الیاف بازالت با بافت ساتن و وزن واحد سطح 300 g/m^2 (شرکت بازالتکس¹ بلژیک) نیز به عنوان تقویت‌کننده الیافی مورد استفاده قرار گرفت. ذرات سیلیکا فیوم سنتز شده به روش سل ژل با خلوص بیش از 98 درصد، سطح ویژه $202 \text{ m}^2/\text{g}$ و اندازه ذرات 25 نانومتر عنوان ذرات تقویت‌کننده استفاده شدند که در شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM²) از سطح ذرات سنتز شده نمایش داده شده است. از عامل سیلان (تری مرکاپتوپروپیل تری متوکسی سیلان³ از شرکت سیگما آلدریج با وزن مولکولی 196 g/mol و چگالی 1.06 g/cm^3 برای اصلاح سطحی ذرات سیلیکافیوم استفاده شد.

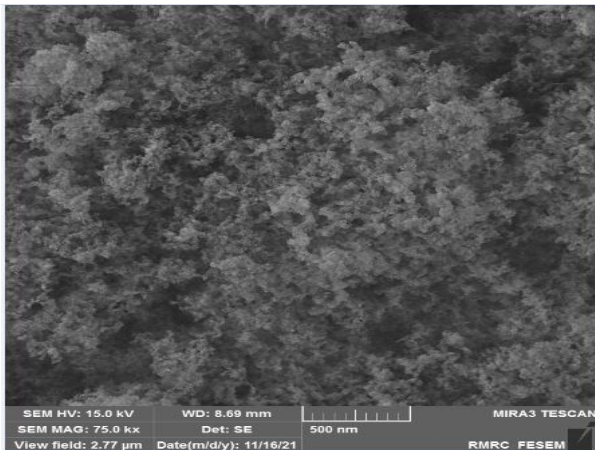


Fig. 1 SEM image of synthesized silica fume at 75 kx magnification
شکل 1 تصویر SEM از سیلیکا فیوم سنتز شده در بزرگنمایی 75 kx.

2-2- اصلاح سطحی ذرات سیلیکا فیوم

در ابتدا 5 گرم از عامل سیلان به 100 میلی‌لیتر محلول شامل 95 میلی‌لیتر متانول اضافه شد و به مدت 15 دقیقه اختلاط عامل سیلان با محلول توسط همزن مکانیکی صورت پذیرفت. در مرحله بعد 5 گرم از ذرات سیلیکا فیوم به محلول اضافه شد و مجدد به مدت 30 دقیقه اختلاط ذرات با محلول توسط همزن مکانیکی صورت پذیرفت. در نهایت مخلوط در دمای 100 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت در آن خلاء قرار داده شد. لازم به ذکر است که سیلیکا فیوم اصلاح‌شده با این روش برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت [16-18].

امروزه کاربرد کامپوزیت‌ها به مصارف پیشرفته محدود نمی‌شود و این مواد کاربردهای فراوانی در صنایع خودرو، لوازم خانگی و نظایر آن یافته‌اند. به طوری - که طبق آخرین تحقیقات، کامپوزیت‌ها در بیش از 30 درصد از محصولات مصرفی تجاری در بازار به کار برده می‌شوند [4-1]. الیاف بازالت به دلیل استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه و مقاومت بالاتر در محیط‌های قلیایی، همچنین به دلیل قیمت مناسب نسبت به الیاف کربن، در موارد زیادی جایگزین این دو نوع الیاف می‌شوند. الیاف بازالت دارای مقاومت ویژه بالاتر و ضریب رسانایی حرارتی کمتر و در نتیجه خواص دی‌الکتریک برجسته نسبت به الیاف شیشه هستند. به علاوه الیاف بازالت به دلیل دارا بودن Fe_2O_3 و TiO_2 ، از خاصیت انتقال امواج مغناطیسی بالایی برخوردارند [5-7].

سیلیکا فیوم ماده‌ای بدون بو و غیرقابل احتراق است که در دما و فشار محیط پایدار می‌باشد. دمای ذوب این ماده 2200 درجه سانتی‌گراد است. این ماده شامل رنگ‌های سفید و خاکستری بوده که عموماً رنگ آن از خاکستری کم‌رنگ تا خاکستری پررنگ متغیر است. سیلیکا فیوم پودری با وزن مخصوص 200-300 کیلوگرم بر مترمکعب با رنگ خاکستری متمایل به سفید است که محصول جانبی فرآیند تولید فروسیلیسیم می‌باشد. سیلیکا فیوم یک پودر فوق ریز کروی شکل است که به عنوان محصول جانبی جمع‌آوری می‌شود و اندازه ذرات آن در حد 1 میکرون با قطر متوسط 0.1 میکرون است [8-12].

در ارتباط با کاربرد سیلیکا فیوم در مواد پلیمری و کامپوزیت‌های پایه سیمانی و بتنی تحقیقات متعددی انجام شده است. ماجد [13]، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف کربن تقویت‌شده با سیلیکا فیوم را مورد بررسی قرار داد. ذرات سیلیکا فیوم در درصدهای وزنی مختلف (0.5-3) به زمینه کامپوزیت افزوده شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر بهبود در استحکام فشاری کامپوزیت به ازای توزیع 2 درصد وزنی سیلیکافیوم داخل زمینه حاصل شد. ویتک و تانیموتو [14]، به بررسی اثر درصد حجمی الیاف بازالت بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت پرداختند. با افزودن 32 درصد حجمی الیاف بازالت مقدار استحکام کششی و مدول کششی کامپوزیت برابر با 281 مگاپاسکال و 11.8 گیگاپاسکال و با افزودن 50 درصد حجمی الیاف، استحکام کششی و مدول کششی به مقدار 336 مگاپاسکال و 17.3 گیگاپاسکال افزایش یافت. استحکام خمشی کامپوزیت حاوی 24 درصد حجمی الیاف بازالت 73 مگاپاسکال و به ازای افزودن 51 درصد حجمی الیاف بازالت این مقدار به 122 مگاپاسکال افزایش یافت. سنگامش و همکارانش [15]، سنتز و مقایسه رفتار مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-سیلیکا فیوم را بررسی کردند در این پژوهش این محققین دریافتند که در آزمون فشار نمونه حاوی 10 درصد حجمی رفتار فشاری بهتری دارد که به دلیل توزیع مناسب سیلیکا فیوم در این درصد حجمی است در حالی که در 15 درصد حجمی کلوخه شدن ذرات وجود دارد.

با بررسی تحقیقات انجام شده مشخص شد که بیش‌ترین کاربرد ذرات سیلیکا فیوم در صنایع بتن و کامپوزیت‌های پایه سیمان است. تحقیقات انجام شده پیرامون افزودن سیلیکا فیوم در مواد پلیمری نشان داد که بیشتر تحقیقات روی افزودن این ماده در پلیمرهای خالص نظیر پلی‌استایرن، وینیل استر و ... متمرکز شده است. تاکنون تحقیقات برای استفاده از آن‌ها در کامپوزیت‌های پلیمری و بررسی میزان سازگاری آن‌ها با زمینه پلیمری و الیاف تقویت‌کننده

¹ Basaltex

² Scanning Electron Microscope

³ 3- Mercaptopropyltrimethoxysilane

3-2- توزیع ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه پلیمری

ذرات سیلیکا فیوم با مقادیر مشخص وزنی (0، 2، 4 و 6 درصد وزنی) به رزین اپوکسی افزوده شدند. فیوم سیلیکا دارای سطح ویژه‌ی بالایی است، لذا درصد‌های وزنی کمتر از 10 درصد جهت کار و ترکیب با رزین مناسب‌تر است. برای توزیع و اختلاط مناسب ذرات سیلیکا فیوم در اپوکسی از دستگاه هم‌زن مکانیکی (شرکت فاین‌تک¹ کره جنوبی) با قدرت 1500 دور بر دقیقه به مدت 30 دقیقه استفاده شد. پس از اتمام فرآیند هم‌زدن، به‌منظور شکست کلوخه‌های باقی‌مانده مخلوط رزین و ذرات سیلیکا فیوم از امواج فراصوت با استفاده از دستگاه فراصوت پروبی (شرکت فاین‌تک ایران) تحت توان 120 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز استفاده شد [19].

4-2- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، روش لایه‌گذاری دستی² با 6 لایه پارچه الیاف بازالت و رزین اپوکسی (با نسبت حجمی 50-50) مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نمونه‌های ساخته شده به مدت 3-4 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا عملیات پخت رزین صورت پذیرد. لازم به ذکر است که مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین اپوکسی انجام آزمون مکانیکی روی نمونه‌ها 7 روز پس از پخت اولیه نمونه‌ها انجام شد.

5-2- آزمون کشش

آزمون کشش روی نمونه‌های کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D3039 (با استفاده از دستگاه کوپا پژوهش) در دمای محیط صورت پذیرفت. نمونه‌ها بر اساس این استاندارد (با ابعاد 2.5×25×250 میلی‌متر) بریده شدند. سرعت اعمال بار برابر با 5 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و در ادامه منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از آزمون کشش برای بررسی رفتار کششی نمونه‌های تقویت‌شده با ذرات سیلیکا فیوم اصلاح‌شده مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد [20].

6-2- آزمون خمش سه نقطه‌ای

آزمون خمش روی نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از دستگاه کوپا (معرفی شده در بخش 2-5) مطابق با استاندارد ASTM D790 (با ابعاد 2.5×125×25 میلی‌متر) صورت پذیرفت. برای جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها حین آزمایش در هر طرف تکیه‌گاه باید حداقل 10 درصد از فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد. مطابق با استاندارد نسبت فاصله بین دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه برابر با 32 به 1 و نرخ بارگذاری نمونه‌ها برابر با 4.2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد [21].

7-2- بررسی ریزساختاری

به‌منظور بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ذرات سیلیکا فیوم از SEM (مدل VEGA - LMU) با ولتاژ کاری 25 kv استفاده شد. جهت بررسی روند اصلاح سطحی ذرات سیلیکا فیوم و تشکیل گروه‌های عاملی روی سطح این ذرات از دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR³ مدل Bruker) در محدوده موج 4000-500 cm⁻¹ استفاده شد.

3- نتایج و بحث

1-3- نتایج FT-IR

در شکل 2 طیف‌سنجی FT-IR ذرات سیلیکا فیوم اصلاح نشده و اصلاح‌شده با سیلان نشان داده شده است. در ارتباط با ذرات اصلاح نشده، پیک‌های حاصل در 1634.56 cm⁻¹ و 3434.7 cm⁻¹ به ترتیب ناشی از ارتعاش خمشی و کششی پیوند H-O-H بودند. پیک‌های ایجاد شده در 809.34 cm⁻¹ و 1517.49 cm⁻¹ به ترتیب مشخص‌کننده ارتعاش کششی و خمشی Si-OH هستند که مربوط به سیلیکا است. پیک‌های جذبی ایجاد شده در 1109 cm⁻¹ و 473.82 cm⁻¹ نیز به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی و خمشی نامتقارن سیلوکسان⁴ (Si-O-Si) هستند [22, 23]. حضور باندهای ارتعاشی Si-O-Si نشان‌دهنده حالت آمورف ذرات سنتز شده سیلیکا فیوم است. در ارتباط با ذرات سیلیکا فیوم اصلاح‌شده علاوه بر حضور پیک‌های قبلی، پیک‌های جذبی جدید در 917.5 cm⁻¹ و 2933.02 cm⁻¹ به وجود آمدند. پیک‌های حاصل شده در 917.5 cm⁻¹ و 2933.02 cm⁻¹ به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی CH₂ بودند. این مطلب به‌وضوح نشان داد که سطح ذرات سیلیکا فیوم به‌طور موفقیت‌آمیز توسط عامل سیلان اصلاح‌شده است [24].

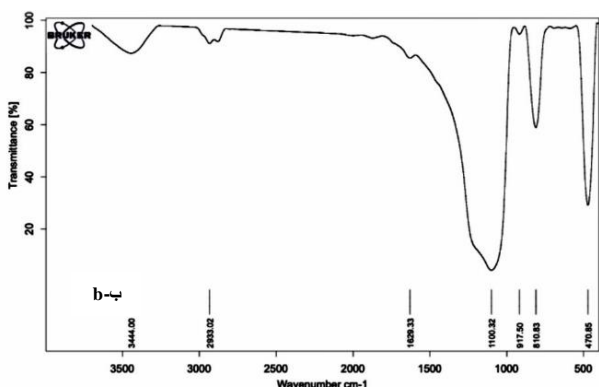
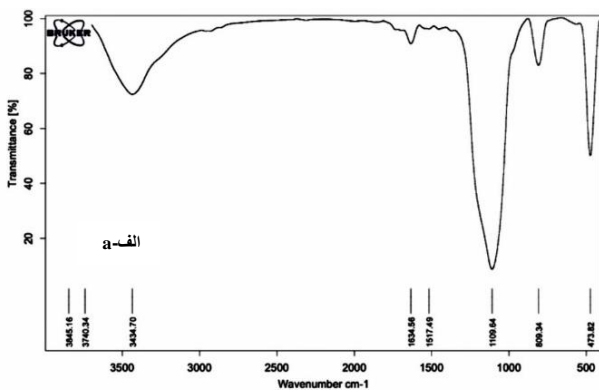


Fig. 2 Results of FT-IR analysis of silica fume particles, a) non treated, b) modified with silane agent.

شکل 2 نتایج طیف‌سنجی FT-IR سیلیکا فیوم، الف) اصلاح نشده، ب) اصلاح‌شده با سیلان.

⁴ Siloxane

¹ Finetech

² Hand lay up

³ Fourire-Transform Infrared Spectroscopy

2-3- نتایج آزمون‌های مکانیکی

1-2-3- استحکام و مدول کششی و خمشی

در جدول 1 نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای و کشش محوری آورده شده است.

مطلوب صورت پذیرد و استحکام کششی کامپوزیت بهبود یابد. همچنین با تقویت زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم، لغزش اصطکاکی¹ بین زمینه و الیاف محدود شده که در نتیجه انتقال تنش از زمینه به الیاف تقویت کننده به طور مطلوب انجام می‌شود و خواص مکانیکی افزایش می‌یابد [26].

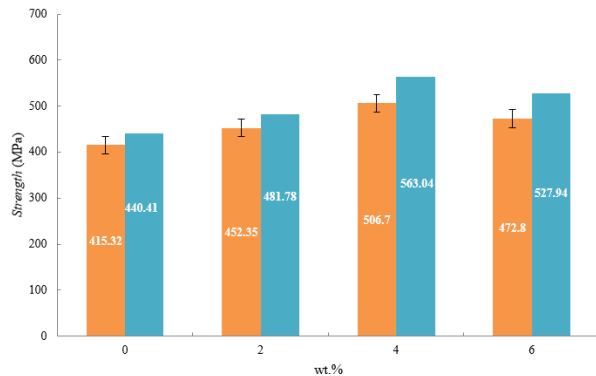


Fig. 3 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending strength of basalt fibers-epoxy composites.

شکل 3 تأثیر افزودن سیلیکا فیوم بر استحکام کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت.

عامل دوم، به مشخصات تقویت‌کنندگی ذرات سیلیکا فیوم مربوط می‌شود. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف، الیاف تقویت‌کننده به عنوان عنصر اصلی تحمل‌کننده بار اعمالی به شمار می‌رود. تقویت زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم باعث کاهش تمرکز تنش روی الیاف و فصل مشترک بین زمینه و الیاف بازالت می‌شود. از آنجا که مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست در مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی، پارگی الیاف و جدایش فصل مشترک الیاف و زمینه هستند، با کاهش تمرکز تنش روی الیاف تنش مورد نیاز برای وقوع مکانیزم‌های ذکر شده شکست افزایش می‌یابد [15]. افزودن مقادیر بالاتر ذرات سیلیکا فیوم (6 درصد وزنی)، باعث کاهش استحکام کامپوزیت نسبت به کامپوزیت‌های حاوی 4 درصد وزنی ذرات شد. دلیل این امر ناشی از توزیع نامناسب ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه اپوکسی کامپوزیت و تشکیل کلوخه‌های این ذرات در مقادیر بالا بود که منجر به کاهش کیفیت فصل مشترک شده و به عنوان مناطق تمرکز تنش برای جوانه‌زنی ترک به حساب می‌آیند [27].

تأثیر افزودن ذرات سیلیکا فیوم در داخل زمینه بر مدول کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت در شکل 4 نشان داده شده است. با افزودن ذرات سیلیکا فیوم، مدول کششی و خمشی به طور پیوسته افزایش یافت. برای نمونه‌های فاقد سیلیکا فیوم، مدول کششی و خمشی به ترتیب برابر با 13.38 و 15.72 گیگاپاسکال بود و با افزودن 4 درصد وزنی این ذرات، مدول کششی و خمشی به میزان 34 و 40 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد سیلیکا فیوم افزایش یافت. افزایش مدول کامپوزیت‌ها در اثر توزیع ذرات سیلیکا فیوم بدان علت است که توزیع این ذرات به عنوان مانع برای حرکت زنجیره‌های پلیمری در اثر اعمال تنش عمل می‌نمایند که منجر به افزایش مدول کششی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت می‌شود. از طرفی در مقایسه با اپوکسی خالص، ذرات سیلیکا فیوم دارای خواص مکانیکی بالاتری هستند، لذا افزایش مدول کششی در نتیجه افزودن آن‌ها داخل زمینه کامپوزیت قابل انتظار است.

جدول 1 نتایج آزمون کشش و خمش نمونه‌های کامپوزیتی حاوی سیلیکا فیوم

Table 1 Results of the tensile tests and bending test of composites containing silica fume

سیلیکا فیوم (%وزنی)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	مدول کششی (گیگاپاسکال)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	مدول خمشی (گیگاپاسکال)
0	415.32±16.6	13.38±0.67	440.41±13.07	15.72±0.65
2	452.35±2.08	15.25±0.76	481.78±16.78	18.54±0.86
4	506.70±25.33	18.05±0.89	563.04±22.30	22.16±1.02
6	472.80±23.16	19.28±0.96	527.94±25.09	24.26±1.18

شکل 3 تأثیر افزودن سیلیکا فیوم بر استحکام کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت را نشان می‌دهد. مطابق با شکل 3 روند تغییرات استحکام نشان می‌دهد که با افزودن ذرات سیلیکا فیوم از صفر تا 4 درصد وزنی ابتدا استحکام کششی تا 506.7 و استحکام خمشی تا 563.04 مگاپاسکال افزایش یافته و با افزودن مقادیر بیشتر (6 درصد وزنی)، استحکام کششی و خمشی به ترتیب تا 472.8 و 527.94 مگاپاسکال کاهش یافته‌اند. برای کامپوزیت‌های فاقد ذرات سیلیکا فیوم استحکام کششی و خمشی برابر با 415.32 و 440.41 مگاپاسکال بدست آمدند. بیشترین بهبود در استحکام کششی و خمشی با اختلاط 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه اپوکسی بدست آمد. در این حالت استحکام کششی و خمشی به ترتیب به 506.7 و 563.04 مگاپاسکال افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش 22 و 27 درصدی در استحکام است. اما افزودن 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم به ترتیب منجر به کاهش 6.69 و 6 درصدی در استحکام کششی و خمشی در مقایسه با کامپوزیت‌های شامل 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم شد.

همان‌طور که مشخص است تأثیر توزیع ذرات سیلیکا فیوم در یک مقدار مشخص بر خواص خمشی نمونه‌های کامپوزیتی بیشتر از تأثیر آن بر خواص کششی بود. این بدان علت است که تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای، به نمونه در بالای تار خنثی، تنش فشاری و پایین آن تنش کششی وارد می‌شود. در این حالت زمینه کامپوزیت نقش بارزتری را در مقایسه با زمانی که نمونه‌های کامپوزیتی تحت کشش محوری قرار می‌گیرند، ایفا می‌نماید. بنابراین با تقویت کردن زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم بهبود بیشتری در خواص خمشی در مقایسه با خواص کششی حاصل می‌شود.

افزایش استحکام کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت در نتیجه افزودن ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه ناشی از دو عامل بود. عامل اول، مربوط به بهبود فصل مشترک بین زمینه اپوکسی و الیاف تقویت‌کننده بازالت بود. هنگامی که مواد کامپوزیتی تحت تنش قرار می‌گیرند، تنش اعمالی از طریق فصل مشترک به تقویت‌کننده الیافی منتقل می‌شود. بنابراین کیفیت فصل مشترک الیاف و زمینه تأثیر بسزایی در خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی دارد. با توزیع ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه، چسبندگی بین الیاف و زمینه بهتر شده و باعث می‌شود که انتقال بار از زمینه پلیمری به الیاف تقویت‌کننده به طور

² Slippage

¹ Frictional

افزایش در جذب انرژی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت در نتیجه افزودن ذرات سیلیکا فیوم ناشی از مکانیزم انحراف ترک به وسیله این ذرات بود. وقتی ترک در حال اشاعه به ذرات تقویت کننده سیلیکا فیوم می‌رسد، توانایی عبور از این موانع را نداشته و آن‌ها را دور می‌زند. لذا به دلیل طولانی تر شدن مسیر حرکت ترک، انرژی جذب شده توسط ماده افزایش می‌یابد. همچنین از طرف دیگر در این مکانیزم با تغییر مسیر حرکت ترک، مد آن تغییر یافته و بخش زیادی از تنش وارده، از هیدرواستاتیک به برشی تبدیل می‌شود که صرف تغییر شکل ماده می‌شود و به طبع آن انرژی لازم برای شکست ماده را افزایش می‌دهد، بنابراین چقرمگی افزایش می‌یابد [32]. نکته لازم به ذکر آن است که با اصلاح سطحی ذرات سیلیکا فیوم به دلیل بهبود توزیع ذرات درون زمینه و فصل مشترک بین پلیمر و ذرات سیلیکا فیوم اثر بازدارندگی آن‌ها در برابر جوانه زنی و اشاعه ترک ارتقا یافته که نتیجه آن بالا رفتن جذب انرژی کامپوزیت است. کاهش در انرژی جذب شده به ازای توزیع 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با 4 درصد وزنی از این ذرات، به علت تشکیل کلوخه‌های ذرات سیلیکا فیوم در مقادیر بالا درون زمینه است که منجر به کاهش قابلیت جذب انرژی می‌شود [33].

3-3- بررسی ریزساختاری

در شکل 5، تصاویر SEM از نمونه‌های شاهد (نمونه‌های فاقد ذرات سیلیکا فیوم) و نمونه‌های حاوی ذرات سیلیکا فیوم توزیع شده درون زمینه آمده است. برای نمونه‌های شاهد که فاقد سیلیکا فیوم هستند (شکل 5-الف)، صاف بودن سطح شکست الیاف مؤید فصل مشترک ضعیف بین زمینه اپوکسی و الیاف تقویت کننده است. این در حالی است که برای نمونه‌های حاوی ذرات سیلیکا فیوم (شکل 5-ب)، پس از شکست کامپوزیت، مقداری از فاز زمینه پلیمری به سطح الیاف بازالت چسبیده است که این موضوع نشان دهنده چسبندگی مطلوب بین زمینه اپوکسی و الیاف در نتیجه توزیع ذرات سیلیکا فیوم درون رزین اپوکسی است. نتیجه‌ای که از مقایسه این دو تصویر می‌توان برداشت نمود این است که در نمونه‌های شاهد، جدایش فصل مشترک مکانیزم غالب شکست است و این در حالی است که در نمونه‌های با زمینه تقویت شده با ذرات سیلیکا فیوم مکانیزم غالب شکست، ترک خوردن زمینه است [34].

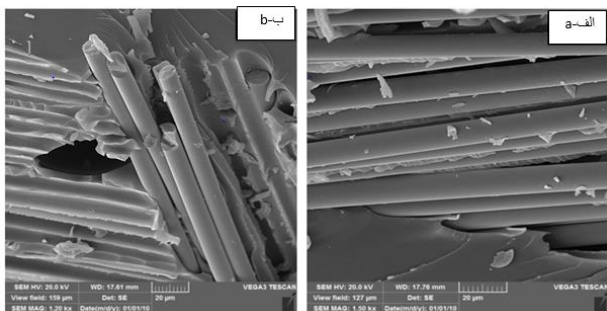


Fig. 5 SEM images of the fracture surface of epoxy-basalt fibers composite, a) without silica fume at 1.50 kx magnification, b) reinforced with 4 wt% silica fumes at 1.20 kx magnification.

شکل 5 تصویر SEM از سطح شکست کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت، الف) فاقد سیلیکا فیوم در بزرگنمایی 1.50 kx، ب) حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم در بزرگنمایی 1.20 kx.

در شکل 6 تصاویر میکروسکوپی از زمینه اپوکسی خالص و تقویت شده با سیلیکا فیوم نشان داده شده است. در ارتباط با نمونه‌های تقویت شده با سیلیکا

یکی از دلایل مؤثر در افزایش مدول کششی نمونه‌های کامپوزیتی به ازای افزودن ذرات سیلیکا فیوم، اصلاح سطحی این ذرات است که باعث افزایش چسبندگی بین سیلیکا فیوم و اپوکسی شده و در نتیجه عملکرد آن‌ها برای جلوگیری از حرکت زنجیره‌های پلیمری و افزایش سفتی، بهبود می‌یابد [28-30].

با مقایسه مدول کششی و خمشی کامپوزیت‌های حاوی 4 و 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم می‌توان دریافت که کاهش مدول کششی و خمشی در نمونه‌های حاوی 6 درصد وزنی سیلیکا فیوم به ترتیب به میزان 6.8 و 9.4 درصد در مقایسه با کامپوزیت حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم مربوط به توزیع نامناسب ذرات درون زمینه اپوکسی است. در نتیجه، چسبندگی بین زمینه و ذرات سیلیکا فیوم کاهش یافته و کارایی این ذرات برای افزایش مدول کامپوزیت‌ها افت می‌کند [31].

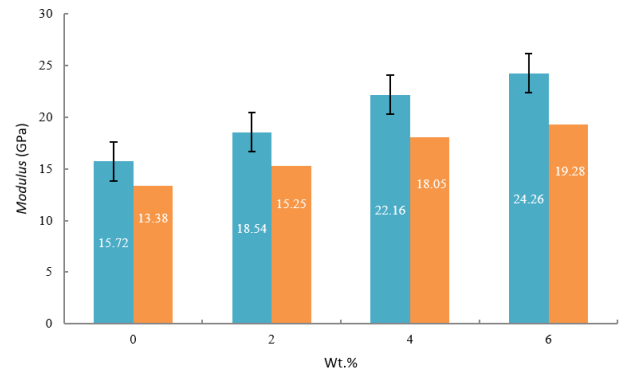


Fig. 4 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending modulus of basalt fibers-epoxy composites.

شکل 4 تأثیر افزودن سیلیکا فیوم بر مدول کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت.

3-2-2- انرژی جذب شده

در جدول 2 تغییرات انرژی جذب شده تحت بار کشش تک محوره و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت با افزودن ذرات سیلیکا فیوم نمایش داده شده است. برای نمونه‌های کامپوزیتی بدون ذرات سیلیکا فیوم میزان انرژی جذب شده در بارگذاری کششی و خمشی به ترتیب 9.52 و 13.17 ژول بر میلی‌متر مکعب بدست آمد. با توزیع 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه بیشترین بهبود در میزان انرژی جذب شده حاصل شد که در طی آن انرژی جذب شده کششی و خمشی به ترتیب به مقادیر 15.26 و 19.81 ژول بر میلی‌متر مکعب افزایش یافت. اما با افزودن 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم کاهش در میزان انرژی جذب شده کششی و خمشی تا مقدار 12.068 و 19.21 ژول بر میلی‌متر مکعب مشاهده شد.

جدول 2 تأثیر افزودن سیلیکا فیوم بر مقادیر انرژی جذب شده در بارگذاری کششی و خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت

Table 2 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending absorbed energy of epoxy-basalt fiber composite

سیلیکا فیوم (% وزنی)	انرژی شکست کششی (ژول بر میلی‌متر مکعب)	انرژی شکست خمشی (ژول بر میلی‌متر مکعب)
0	9.52±0.45	13.17±0.52
2	11.68±0.58	15.18±0.8
4	15.26±0.78	19.81±0.89
6	12.68±0.65	19.21±0.95

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ذرات سیلیکا فیوم با عامل سیلان اصلاح سطحی شده و سپس تأثیر افزودن این ذرات (در درصد‌های وزنی 0، 2، 4 و 6)، بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری‌های خمشی سه نقطه‌ای و کشش محوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی بدست آمده به شرح زیر است:

- 1- نتایج طیف‌سنجی FT-IR مشخص نمود که ذرات سیلیکا فیوم به‌طور موفقیت‌آمیزی با عامل سیلان اصلاح سطحی شده‌اند.
- 2- نتایج حاصل از آزمون خمشی سه نقطه‌ای و کشش نشان داد که بیشترین بهبود در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت به ازای افزودن 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم حاصل می‌شود. تحت این شرایط استحکام خمشی، مدول خمشی، و انرژی جذب‌شده به ترتیب 29، 41 و 47 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد ذرات سیلیکا فیوم افزایش یافتند. همچنین در ارتباط با خواص کششی، استحکام کششی، مدول کششی و انرژی جذب‌شده به ترتیب 22، 35 و 60 درصد افزایش یافتند.
- 3- کاهش استحکام (کششی و خمشی) کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت به ازای توزیع 6 درصد وزنی سیلیکا فیوم حاصل شد که این موضوع ناشی از کلوخه‌ای شدن این ذرات درون زمینه کامپوزیت بود.
- 4- نتایج بدست آمده از بررسی‌های SEM نشان داد که فصل مشترک بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه و توزیع مطلوب ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه اپوکسی تأثیر زیادی در بهبود خواص مکانیکی تحت بارگذاری‌های مختلف دارد.

5- مراجع

- [1] Campbell, F. C., "Structural Composite Materials," ASM international, 2010 .
- [2] Kumar, K. P., Sekaran, A. S., "Some Natural Fibers Used in Polymer Composites and Their Extraction Processes: A Review," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 33, No. 20, pp. 1879-1892, 2014.
- [3] Alderliesten, R., "On the Development of Hybrid Material Concepts for Aircraft Structures," Journal of Recent Patents on Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 25-38, 2009.
- [4] Nunna, S., Chandra, P. R., Shrivastava, S., Jalan, A.k. " A Review on Mechanical Behavior of Natural Fiber Based Hybrid Composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 31, No. 11, pp. 759-769, 2012.
- [5] Pareek, K. and Saha, P., "Basalt Fiber and Its Composites: An Overview," in Proceeding of the National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019), 2019.
- [6] Khandelwal, S. and Rhee, K. Y., "Recent Advances in Basalt-Fiber-Reinforced Composites: Tailoring the Fiber-Matrix Interface," Composites Part B: Engineering, Vol. 192, pp. 108011, 2020.
- [7] Yan, L., Chu, F., Tuo, W., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, P., Gao, Y., "Review of Research on Basalt Fibers and Basalt Fiber-Reinforced Composites in China (I): Physicochemical and Mechanical Properties," Journal of Polymers and Polymer Composites, Vol. 29, No. 9, pp. 1612-1624, 2021.
- [8] Diamond, S., Sahu, S., "Densified Silica Fume: Particle Sizes and Dispersion in Concrete," Journal of Materials and structures, Vol. 39, pp. 849-859, 2006.
- [9] Trewyn, B. G., Giri, S., Slowing, I. I. and Lin, V. S.-Y., "Mesoporous Silica Nanoparticle Based Controlled Release, Drug Delivery, and Biosensor Systems," Journal of Chemical communications, No. 31, pp. 3236-3245, 2007.
- [10] Imam, A., Kumar, V. and Shrivastava, V., "Review Study Towards Effect of Silica Fume on the Fresh and Hardened Properties of Concrete," Journal of Advances in concrete construction, Vol. 6, No. 2, pp. 145, 2018.

فیوم باندهای برشی زیادی در زمینه است که در نتیجه مقاومت بالای ذرات تقویت‌کننده سیلیکا فیوم در برابر رشد ترک بود و این در حالی است که برای زمینه اپوکسی خالص سطح شکست صاف بوده که مؤید شکست ترد است. در رابطه با زمینه حاوی سیلیکا فیوم ناهمواری‌هایی در سطح شکست ملاحظه می‌شود و انحراف ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری قابل مشاهده است که از دلایل اصلی افزایش جذب انرژی در نمونه‌های شامل سیلیکا فیوم به‌شمار می‌رود. شکل 7 سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت حاوی 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم را در بزرگ‌نمایی بالا نشان می‌دهد که مؤید وجود کلوخه‌های این ذرات در زمینه کامپوزیت است که عامل اصلی افت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت هستند. کلوخه‌ها در فصل مشترک الیاف و زمینه به جدایش آن‌ها در حین بارگذاری کمک می‌کنند و در نتیجه خواص مکانیکی کامپوزیت افت پیدا می‌کند. نمونه‌ای از ذرات کلوخه شده با کادر قرمز رنگ در شکل 7 مشخص شده‌اند.

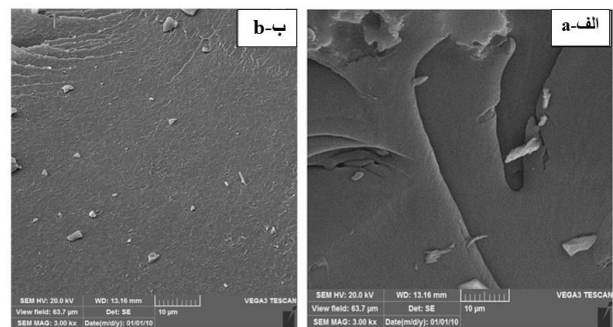


Fig 6 SEM images of the matrix of epoxy-basalt fibers composite, a) without silica fume, b) reinforced with 4 wt.% silica fumes at 3 kx magnification.

شکل 6 تصاویر SEM از زمینه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت، الف) فاقد سیلیکا فیوم، ب) حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم در بزرگنمایی 3 kx.

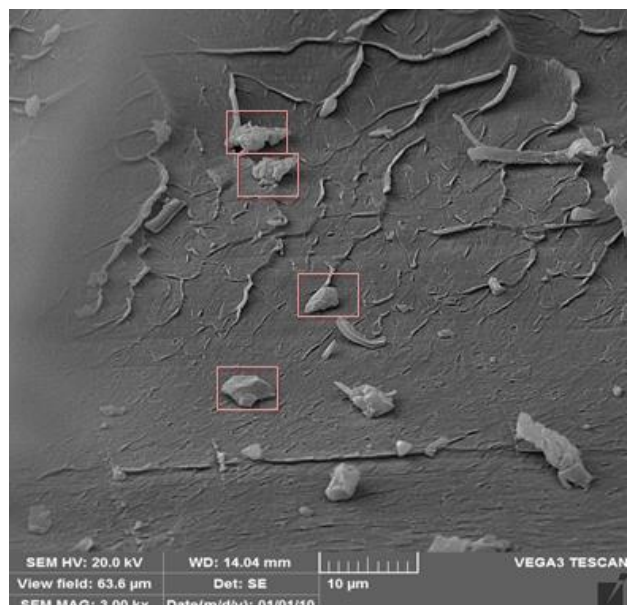


Fig 7 Agglomeration of silica fume particles (6 wt.%) in epoxy at 3 kx magnification.

شکل 7 آگلومراسیون ذرات سیلیکا فیوم (6 درصد وزنی) در زمینه اپوکسی در بزرگنمایی 3 kx.

- Organo-Montmorillonite Clay," *Malaysian Polymer Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 8-15, 2012.
- [29] Zulfli, N. H. M. and Shyang, C. W., "Flexural and Morphological Properties of Epoxy/Glass Fibre/Silane-Treated Organomontmorillonite Composites," *J Phys Sci*, Vol. 21, pp. 41-50, 2010.
- [30] Chen, C., Wang, H., Xue, Y., Xue, Z., Liu, H., Xie, X., Mai, Y.-W., "Structure, Rheological, Thermal Conductive and Electrical Insulating Properties of High-Performance Hybrid Epoxy/Nanosilica/Agnews Nanocomposites," *Composites Science and Technology*, Vol. 128, pp. 207-214, 2016.
- [31] Wang, Y., Wang, Y., Wan, B., Han, B., Cai, G., Chang, R., "Strain and Damage Self-Sensing of Basalt Fiber Reinforced Polymer Laminates Fabricated with Carbon Nanofibers/Epoxy Composites under Tension," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 113, pp. 40-52, 2018.
- [32] Rostamiyan, Y., Rezaei, M., "The Effect of Nano Zirconium Dioxide and Drilling on the Buckling Strength of Epoxy Based Nanocomposites," *Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol. 212, pp. 523-532, 2018.
- [33] Yadhav, B. L., Govindaraju, H., Kiran, M. and Suresha, B., "Three-Point Bending and Impact Behaviour of Carbon/Epoxy Composites Modified with Titanium Dioxide Nanoparticles," *Journal of Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, pp. 1755-1761, 2021.
- [34] Alsaadi, M., Bulut, M., Erklig, A. and Jabbar, A., "Nano-Silica Inclusion Effects on Mechanical and Dynamic Behavior of Fiber Reinforced Carbon/Kevlar with Epoxy Resin Hybrid Composites," *Journal of Composites Part B: Engineering*, Vol. 152, pp. 169-179, 2018.
- [11] Kyzas, G. Z. and Mitropoulos, A. C., "Introductory Chapter: Nanomaterials in the 2020s " In *Novel Nanomaterials-Synthesis and Applications*, IntechOpen, 2018.
- [12] Malhotra, V. M., "Condensed Silica Fume in Concrete," CRC Press, 2018 .
- [13] Majeed, A. H., "Enforcement of Epoxy with Silica Fume and Carbon Fiber," *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, Vol. 25, No. 1, pp. 74-77, 2018.
- [14] Wittek, T., and T. Tanimoto., "Mechanical properties and fire retardancy of bidirectional reinforced composite based on biodegradable starch resin and basalt fibres," *Journal of Express Polym Lett*, Vol. 2, No. 11, pp. 810-822 , 2008.
- [15] Ravishankar, K. and Kulkarni, S. M., "Synthesis and Comparison of Mechanical Behavior of Fly Ash-Epoxy and Silica Fumes-Epoxy Composite," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 225, No. 1, p. 012299, 2017.
- [16] Azizi, H. and Eslami-Farsani, R., "Study of Mechanical Properties of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Silane-Modified Nanozirconia," *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 51, No. 4, pp. 649-663, 2021.
- [17] Kazemi-Khasragh, E., Bahari-Sambran, F., Siadati, S. M. H., Eslami-Farsani, R. and Arbab Chirani, S., "The Effects of Surface-Modified Graphene Nanoplatelets on the Sliding Wear Properties of Basalt Fibers-Reinforced Epoxy Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, No. 39, pp. 47986, 2019.
- [18] Abdi, A., Eslami-Farsani, R., Khosravi, H., "Evaluating the Mechanical Behavior of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Surface-Modified Caco 3 Nanoparticles," *Journal of Fibers and Polymers*, Vol. 19, pp. 635-640, 2018.
- [19] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na+-Montmorillonite Nanoclay," *Journal of Polymer testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [20] Eslami Farsani, R., Ebrahim Nejad Khaljiri, H., Khorsand, H., Abbas Banaee, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [21] Abdollahi Azghan, M., Fallahnejad, M., Zamani, A., Eslami-Farsani, R., "Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 981-988, 2020.
- [22] Bakar, R. A., Yahya, R. and Gan, S. N., "Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk," *Journal of Procedia chemistry*, Vol. 19, pp. 189-195, 2016.
- [23] Mokhothu, T. H., Luyt, A. S. and Messori, M., "Preparation and Characterization of Epdm/Silica Composites Prepared through Non-Hydrolytic Sol-Gel Method in the Absence and Presence of a Coupling Agent," *Journal of Express Polymer Letters*, Vol. 8, pp. 809-822, 2014.
- [24] Lee, S. Y., Kim, J. S., Lim, S. H., Jang, S. H., Kim, D. H., Park, N.-H., Jung, J. W. and Choi, J., "The Investigation of the Silica-Reinforced Rubber Polymers with the Methoxy Type Silane Coupling Agents," *Journal of Polymers*, Vol. 12, No. 12, pp. 3058, 2020.
- [25] Ismail, H., Nordin, R., "Effect of Epoxidized Natural Rubber (Enr) and Ethylene-Co-Acrylic Acid Copolymer on Properties of Silica-Filled Natural Rubber/Recycle Rubber Powder Blends," *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 285-300, 2004.
- [26] Öztürk, B., Gedikli, H. and Kılıçarslan, Y. S., "Erosive Wear Characteristics of E-Glass Fiber Reinforced Silica Fume and Zinc Oxide-Filled Epoxy Resin Composites," *Journal of Polymer Composites*, Vol. 41, No. 1, pp. 326-337, 2020.
- [27] Azizi, H., Eslami-Farsani, R., "The Effect of Modified Zirconia Nanoparticles on the Mechanical Response of Basalt Fibers-Epoxy Composite under Tensile Loading," In *Persian Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 891-896, 2020.
- [28] Zulfli, M. and Chow, W., "Mechanical and Thermal Behaviours of Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites Containing