Journal of Marine Science and Technology

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

Available Online: *http://jmst.kmsu.ac.ir*

Original Article

Investigation of flexural behavior and Mode-I fracture of polymer composites reinforced with polypropylene and glass fibers containing Flyash and cement

Fatemeh Moalaee [1], Nima Shahni Karamzadeh [1]*, Hamid Reza Karimi [2]

1. Department of Marine Engineering - Civil, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr. Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

[*] **Corresponding Author Email:** N.Karamzadeh@kmsu.ac.ir

Received: 11 August 2026 **Revise Date:** 22 September 2026 **Accepted:** 15 November 2026

ABSTRACT

The main objective of this study is to investigate the effect of four key parameters, fiber type (glass and polypropylene), fiber length (12 and 50 mm), mineral filler type (Portland cement and fly ash), and filler weight percentage (0, 20, and 40%), on the flexural strength and fracture toughness of epoxy composites. Unlike most previous studies, for this purpose, 45 different mix designs were developed, and flexural and fracture toughness tests were performed on the samples. In addition, to identify the failure mechanisms, the fracture surfaces of selected samples were examined using scanning electron microscopy. The results showed that the addition of fibers alone (without filler) significantly improved the mechanical performance, such that the sample containing 1.5 wt.% of glass fibers with a length of 50 mm recorded the highest flexural strength (84 MPa) and fracture toughness (2.2 MPa·m^0.5), which represented increases of 68% and 76%, respectively, compared to the pure resin sample. In contrast, the addition of mineral fillers alone caused a significant decrease in both parameters, such that at 40 wt.% of cement, the strength decreased by 58%. In the simultaneous presence of fibers and filler, samples with 20 wt.% of filler showed acceptable performance (for example, a combination of 20% cement with 1.5% 50-mm glass fibers provided a strength of 70.9 MPa), but at a high filler percentage (40%), the loss of properties could not be fully compensated. Glass fibers performed better than polypropylene fibers at all levels, and increasing the fiber length from 12 to 50 mm was particularly effective in improving fracture toughness (contributing to 42% of the changes), although this effect was reduced to less than 15% in the presence of 40% filler.

Keywords: Polymer composite, fibers, filler, mechanical behavior, fracture.

1. INTRODUCTION

Polymer composites are widely used as engineering materials because of their high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and ease of processing. Nevertheless, the relatively low strength and stiffness of polymer matrices and their tendency toward brittle fracture can limit their application in structural and mechanically demanding components. Fiber reinforcement is an effective approach to improving load-

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons. org/licenses/ by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

bearing capacity and fracture resistance. Glass fibers provide high strength and stiffness, whereas polypropylene (PP) fibers offer low density, flexibility, and favorable toughness. Fiber length is also an important parameter because longer fibers can enhance load transfer, crack bridging, and fiber pull-out mechanisms. Mineral fillers are another common approach to modifying the mechanical properties and reducing the cost of polymer composites. Portland cement and fly ash are attractive fillers because of their availability and different particle characteristics. However, excessive filler contents can lead to particle agglomeration, stress concentration, reduced matrix continuity, and premature crack initiation. Previous studies have largely focused on relatively low filler contents, while systematic investigations of high filler concentrations and their interaction with fiber reinforcement remain limited.

Therefore, this study systematically investigates the effects of fiber type, fiber length, filler type, and filler content on the flexural strength and fracture toughness of epoxy-based polymer composites. A total of 45 mix designs were prepared using glass or polypropylene fibers with lengths of 12 and 50 mm, Portland cement or fly ash as mineral fillers, and filler contents of 0, 20, and 40 wt.%. Fiber contents of 0, 1, and 1.5 wt.% were considered. No hybrid combination of different fiber types or different fillers was used, allowing the independent effects of the investigated parameters to be evaluated.

2. MATERIALS AND METHODS

A bisphenol-A epoxy resin with a polyamine hardener was used as the polymer matrix. Discontinuous glass and polypropylene fibers with lengths of 12 and 50 mm were incorporated as reinforcement. Portland cement Type II and fly ash were used as mineral fillers. The reference formulation consisted only of epoxy resin and hardener at a weight ratio of 2:1. The experimental formulations incorporated fibers at 0, 1, and 1.5 wt.% and mineral fillers at 0, 20, and 40 wt.% relative to the polymer matrix. Flexural strength was evaluated according to ASTM C78, with three specimens prepared for each formulation. Fracture toughness was determined according to ASTM C1421 using notched specimens. Mechanical tests were performed at a loading rate of 5 mm/min using a testing system with a force resolution of 1 N and a displacement resolution of 10 μm. Each test was repeated three times. In addition, selected fracture surfaces were examined using scanning electron microscopy at an accelerating voltage of 20 kV and a magnification of 1000× to characterize fiber–matrix adhesion, filler distribution, particle agglomeration, fiber pull-out, and crack propagation.

3. RESULTS

The reference epoxy resin exhibited a flexural strength of 50 MPa and a fracture toughness of 1.25 MPa·m^0.5. The addition of mineral fillers without fibers reduced both properties. With 20 wt.% Portland cement, flexural strength and fracture toughness decreased to 35 MPa and 0.924 MPa·m^0.5, respectively. At 40 wt.% cement, these values decreased further to 20 MPa and 0.612 MPa·m^0.5. Fly ash produced similar results, with flexural strength and fracture toughness of 34 MPa and 0.852 MPa·m^0.5 at 20 wt.% and 19 MPa and 0.60 MPa·m^0.5 at 40 wt.%. In contrast, fiber reinforcement without mineral fillers increased both mechanical properties. The highest values were obtained for the composite containing 1.5 wt.% of 50-mm glass fibers, with a flexural strength of 84 MPa and a fracture toughness of 2.2 MPa·m^0.5. These values represented increases of 68% and 76%, respectively, compared with the unreinforced epoxy. Glass fibers exhibited higher performance than polypropylene fibers under comparable conditions. Increasing the fiber length from 12 to 50 mm resulted in average increases of approximately 30–40% in flexural strength and 20–30% in fracture toughness. At 20 wt.% filler, fiber addition partially increased the measured properties. For example, the incorporation of 1 wt.% 12-mm glass fibers into the 20 wt.% cement formulation increased flexural strength from 35 to 48 MPa and fracture toughness from 0.924 to 1.392 MPa·m^0.5. Using 1 wt.% 50-mm glass fibers increased the flexural strength to 57 MPa in the cement-containing formulation. At 40 wt.% filler, the mechanical properties remained lower. The formulation containing 40 wt.% cement and 1.5 wt.% 50-mm glass fibers exhibited a flexural strength of 49.7 MPa and a fracture toughness of 1.236 MPa·m^0.5. Statistical analysis showed that fiber type accounted for approximately 38% of the variation in flexural strength, while fiber length accounted for approximately 42% of the variation in fracture toughness. Increasing the filler content from 20 to 40 wt.% resulted in average reductions of approximately 45% in flexural strength and 35% in fracture toughness.

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The results demonstrate that fiber reinforcement and mineral filling produce substantially different effects on epoxy-composite performance. Long glass fibers provided the most effective improvement in both flexural strength and fracture toughness, with the optimum tested formulation containing 1.5 wt.% of 50-mm glass fibers. The higher performance of glass fibers relative to polypropylene fibers is associated with their higher stiffness and stronger interaction with the epoxy matrix.

Mineral fillers, in contrast, reduced mechanical performance when used alone, particularly at 40 wt.%. Although fly ash has finer particles and can provide improved particle packing, its advantage was limited at high concentrations by particle agglomeration. At 20 wt.% filler, the differences between cement and fly ash were relatively small.

Fiber reinforcement was able to partially compensate for the reduction caused by 20 wt.% filler. However, this compensation was insufficient at 40 wt.%, indicating a substantial change in the governing fracture behavior. SEM observations showed fiber pull-out and crack-bridging features in fiber-reinforced specimens, whereas high filler contents were associated with particle clustering, interfacial separation, and crack propagation through filler-rich regions.

Based on the mechanical and microstructural observations, a critical filler concentration of approximately 30–35 wt.% was identified. Below this range, long fibers play a dominant role in crack bridging and energy absorption. Above this range, filler agglomeration and particle–matrix separation increasingly control fracture behavior and reduce the effectiveness of fiber reinforcement.

In Press

Journal of Marine Science and Technology

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

مقاله پژوهشی

Available Online: *http://jmst.kmsu.ac.ir*

بررسی رفتار خمشی و شکست مود–I کامپوزیت های پلیمری مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن و شیشه حاوی خاکستربادی و سیمان

فاطمه معلایی [۱]، نیما شهنی کرم زاده [۱*]، حمیدرضا کریمی [۲]

۱. گروه مهندسی دریا–عمران، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

* **نویسنده مسئول، پست الکترونیک:** N.Karamzadeh@kmsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۶/۳۱ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۸/۲۴

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، بررسی مستقل تأثیر چهار پارامتر کلیدی شامل جنس الیاف (شیشه و پلی‌پروپیلن)، طول الیاف (۱۲ و ۵۰ میلی‌متر)، نوع پرکننده معدنی (سیمان پرتلند و خاکستربادی) و درصد وزنی پرکننده (صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد) بر استحکام خمشی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های اپوکسی است. برخلاف اغلب پژوهش‌های پیشین، بدین منظور، ۴۵ طرح اختلاط مختلف ساخته شد و آزمون‌های خمش و چقرمگی شکست بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. همچنین، برای شناسایی مکانیزم‌های شکست، سطوح شکست نمونه‌های منتخب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف به‌تنهایی (بدون فیلر) عملکرد مکانیکی را به‌شدت بهبود می‌بخشد، به‌گونه‌ای که نمونه حاوی ۱٫۵ درصد وزنی الیاف شیشه با طول ۵۰ میلی‌متر، بیشترین استحکام خمشی (۸۴ مگاپاسکال) و چقرمگی شکست (۲٫۲ مگاپاسکال‌مجذور متر) را ثبت کرد که به‌ترتیب افزایشی ۶۸ درصد و ۷۶ درصد نسبت به نمونه خالص رزین نشان می‌دهد. در مقابل، افزودن پرکننده‌های معدنی به‌تنهایی باعث کاهش چشمگیر هر دو پارامتر گردید، به‌گونه‌ای که در ۴۰ درصد وزنی سیمان، استحکام تا ۵۸ درصد کاهش یافت. در حضور همزمان الیاف و فیلر، نمونه‌های دارای ۲۰ درصد وزنی فیلر عملکرد قابل‌قبولی از خود نشان دادند (به‌عنوان مثال، ترکیب ۲۰ درصد سیمان با ۱٫۵ درصد الیاف شیشه ۵۰ میلی‌متری استحکامی برابر با ۷۰٫۹ مگاپاسکال ارائه داد)، اما در درصد بالای فیلر (۴۰ درصد)، افت خواص به‌طور کامل قابل جبران نبود. الیاف شیشه در تمامی سطوح، عملکرد برتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن داشت و افزایش طول الیاف از ۱۲ به ۵۰ میلی‌متر، به‌ویژه در بهبود چقرمگی شکست مؤثر بود (سهم ۴۲ درصد در تغییرات)، هرچند این اثر در حضور ۴۰ درصد فیلر به کمتر از ۱۵ درصد کاهش یافت.

واژگان کلیدی: کامپوزیت پلیمری، الیاف، پرکننده، رفتار مکانیکی، شکست

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons. org/licenses/ by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

۱. مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری در دهه‌های اخیر به عنوان دسته ای از مواد مهندسی مطرح شده‌اند که به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت ذاتی در برابر خوردگی و سهولت فرآیندپذیری، دامنه وسیعی از صنایع هوافضا و خودرو تا ساخت وسایل پزشکی و بسته‌بندی را در برگرفته‌اند. با وجود این مزایا، محدودیت‌های ذاتی پلیمرها به ویژه استحکام کششی و مدول الاستیسیته پایین و نیز رفتار شکننده در بارگذاری‌های ضربه‌ای، پژوهشگران را به سمت استفاده از عوامل تقویت‌کننده سوق داده است (Eterigho-Ikelegbe et al., 2021; El-Sagheer et al., 2022).

الیاف به عنوان مؤثرترین گزینه برای افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکانیزم شکست از شکننده به نیمه‌شکننده یا چقرمه شناخته می‌شوند. دو خانواده اصلی الیاف که توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند، الیاف شیشه با استحکام بالا، مدول نسبتاً زیاد و قیمت اقتصادی و الیاف پلی‌پروپیلن با چگالی بسیار پایین، چقرمگی مناسب و ماهیت بازیافت‌پذیر هستند (Mirsayar et al., 2017; Mousavi et al., 2024). با این حال، طول الیاف یکی از پارامترهای کلیدی است که رفتار مکانیکی کامپوزیت را تعیین می‌کند. الیاف کوتاه‌تر معمولاً توزیع یکنواخت‌تری در ماتریس دارند و قالب‌پذیری بهتری ایجاد می‌کنند، اما الیاف بلندتر می‌توانند با افزایش سطح تماس و بهبود مکانیزم‌های بیرون‌کشیدگی، چقرمگی شکست را به میزان قابل توجهی افزایش دهند (De et al., 2024; Naser et al., 2019).

در کنار الیاف، افزودن پرکننده‌های ذره‌ای معدنی یکی دیگر از راهبردهای متداول برای تعدیل خواص مکانیکی، کاهش هزینه تمام شده و تغییر رفتار سطح مقطع شکست در کامپوزیت‌های پلیمری است. در میان طیف گسترده پرکننده‌های معدنی، دو ماده پودر خاکستربادی (دوده سیلیکا با ابعاد ذرات زیر میکرون و فعالیت پوزولانی بالا) و سیمان پرتلند (با ترکیب پیچیده سیلیکات‌ها و آلومینات‌های کلسیم و توزیع دانه‌بندی گسترده‌تر) به دلیل در دسترس بودن، هزینه پایین و پتانسیل برهمکنش شیمیایی و فیزیکی با ماتریس پلیمری، گزینه‌هایی جذاب به شمار می‌روند (Shahbazian and Mirsayar, 2023). نکته حائز اهمیت آن است که هر دوی این فیلرها برخلاف الیاف، ماهیت شکننده و بسیار سخت دارند. بنابراین، افزودن آن‌ها به ماتریس پلیمری می‌تواند دو اثر متضاد ایجاد کند، از یک سو با افزایش مدول و سختی کامپوزیت، استحکام فشاری و مقاومت به سایش را بهبود می‌بخشند و از سوی دیگر در صورت توزیع نامناسب یا غلظت بالاتر از حد بهینه، به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و موجب آغاز و پیشروی زودهنگام ترک‌ها و در نتیجه کاهش چقرمگی شکست و کرنش نهایی می‌شوند (Karunakaran et al., 2022; Shao et al., 2020; Singh et al., 2019).

بررسی جامع منابع علمی موجود نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین را می‌توان در چند حوزه دسته‌بندی کرد. حوزه اول مطالعات مربوط به اثر طول الیاف است. تحقیقات متعددی بر روی کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن با طول‌های مختلف انجام شده است. به طور کلی، یک اجماع نسبی وجود دارد که افزایش طول الیاف تا یک مقدار بحرانی (معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بسته به جنس الیاف و ماتریس) می‌تواند استحکام کششی و به ویژه چقرمگی شکست را افزایش دهد. با این حال، در طول‌های بسیار بلند، مشکلاتی نظیر ایجاد گره‌خوردگی الیاف، توزیع ناهمگن و کاهش تراکم پذیری ظاهر می‌شود که می‌تواند خواص را کاهش دهد (Cai et al., 2023; Castro et al., 2020; Jeong et al., 2023). حوزه دوم مطالعات مربوط به اثر فیلرهای معدنی در کامپوزیت‌ها است. کارهای گسترده‌ای بر روی خاکستربادی و سیمان به عنوان فیلر در ماتریس‌های پلیمری گزارش شده است. بیشتر این مطالعات بر روی درصدهای پایین (کمتر از ۱۵ درصد وزنی) متمرکز بوده‌اند. یافته‌های رایج حاکی از آن است که افزودن مقادیر بهینه خاکستربادی (معمولاً ۲ تا ۵ درصد) می‌تواند مدول یانگ و استحکام فشاری را افزایش دهد، در حالی که سیمان به دلیل واکنش‌پذیری شیمیایی بالقوه با برخی ماتریس‌ها، رفتار پیچیده‌تری نشان می‌دهد. شکاف تحقیقاتی عمده در این حوزه، نبود مطالعات سیستماتیک در درصدهای بالای فیلر (مانند ۲۰ و ۴۰ درصدوزنی) است. در این محدوده، پدیده‌هایی نظیر تجمع ذرات، کاهش چسبندگی سطح مشترک و تغییر مکانیزم غالب شکست از بیرون‌کشیدگی الیاف به شکست درون ماتریس یا جدایش ذره–ماتریس بسیار محتمل‌تر است، اما اطلاعات کمی در مورد مرز گذار و آستانه بحرانی آن وجود دارد. حوزه سوم مطالعات ترکیبی (الیاف و فیلر) است. معدود پژوهش‌هایی که همزمان به اثر الیاف و فیلرهای معدنی پرداخته‌اند، عمدتاً از سیستم‌های هیبریدی (یعنی ترکیب چند نوع الیاف یا چند نوع فیلر با یکدیگر) استفاده کرده‌اند. این موضوع تحلیل اثر مستقل هر متغیر را دشوار ساخته است (Golestaneh et al., 2010; Gong et al., 2015; Kim et al., 2013).

با بررسی پیشینه، خلأ دانشی آشکاری در زمینه مطالعه نظام‌مند اثر مستقل نوع الیاف و فیلر بر رفتار مکانیکی و شکست کامپوزیت‌های پلیمری، در شرایطی که هیچ ترکیب هیبریدی میان الیاف و نه میان فیلرها وجود ندارد، مشاهده می‌شود. همچنین، مقایسه مستقیم تأثیر خاکستربادی در برابر سیمان در درصدهای زیاد و نیز مقایسه اثر طول الیاف بر روی رفتار شکست در حضور هر یک از این فیلرها، در ادبیات فنی به ندرت یافت می‌شود. درک رفتار مکانیکی کامپوزیت‌هایی با درصد بالای فیلر معدنی (تا ۴۰ درصد وزنی) از چند جنبه حائز اهمیت است. اولاً، با افزایش درصد فیلر،

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

ماهیت ماده از یک کامپوزیت «پلیمر–تقویت‌شده–با–فیلر» به یک ماده «ماتریس معدنی–پیوندخورده–با–پلیمر» نزدیک می‌شود. در چنین آستانه‌هایی، مکانیزم شکست ممکن است تغییری کیفی پیدا کند. از ترک‌خوردگی درون ماتریس پلیمری و بیرون‌کشیدگی الیاف به سمت ترک‌خوردگی درون توده‌های فیلر، جدایش در سطح مشترک فیلر–پلیمر و حتی شکست ترد از طریق اتصال ریزمترک‌ها. ثانیاً، حضور همزمان الیاف با طول های متفاوت می‌تواند اثر متقابل جالبی با درصد بالای فیلر داشته باشد. الیاف بلندتر ممکن است به عنوان پل‌های مکانیکی عمل کرده و ترک‌های ناشی از تجمع فیلر را مهار کنند، اما از سوی دیگر، وجود ذرات سخت و فراوان می‌تواند منجر به سایش و آسیب سطحی الیاف در حین فرآیند اختلاط شود که این اثر برای الیاف بلندتر به دلیل زمان اختلاط طولانی‌تر یا تنش برشی بیشتر، احتمالاً شدیدتر خواهد بود. الیاف کوتاه‌تر اگرچه احتمال کمتری برای آسیب مکانیکی حین فرآیند دارند، اما ممکن است نتوانند ترک‌های بحرانی را به طور مؤثری مهار کنند (Açıkbaş et al., 2018; Ahirwar et al., 2024).

نکته دیگر، تفاوت ماهیت شیمیایی سطح الیاف شیشه (با تمایل به ایجاد پیوند هیدروژنی) و الیاف پلی‌پروپیلن (با انرژی سطح پایین) است. این تفاوت بر نحوه چسبندگی این الیاف به ماتریس پلیمری و نیز برهمکنش آن‌ها با ذرات فیلر تأثیر مستقیم دارد. برای مثال، ذرات آبدوست خاکستربادی ممکن است تمایل بیشتری برای تجمع بر روی سطح الیاف شیشه داشته باشند تا بر روی سطح الیاف پلی‌پروپیلن. چنین توزیع ترجیحی فیلر می‌تواند ناحیه بینابینی الیاف–ماتریس را به شدت تحت تأثیر قرار داده و مکانیزم انتقال تنش را تغییر دهد (Lin et al., 2023; Zanotti et al., 2018).

تحقیق حاضر با طراحی عاملی، فرصتی برای کمی کردن اثر چهار پارامتر (جنس الیاف، طول الیاف، نوع فیلر و درصد فیلر) بر رفتار مکانیکی و مکانیزم‌های شکست فراهم می‌کند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند راهنمای عملی برای مهندسان مواد در طراحی کامپوزیت‌های پلیمری با استحکام و چقرمگی قابل تنظیم، به ویژه در کاربردهایی که نیاز به درصد بالای فیلرهای معدنی ارزان‌قیمت وجود دارد (مانند قطعات ساختمانی، خودروهای اقتصادی یا پوشش‌های مقاوم سایشی) باشد.

یکی از تمایزهای اساسی تحقیق حاضر نسبت به بسیاری از کارهای پیشین در این است که در اینجا هیچ ترکیب هیبریدی میان الیاف مختلف و همچنین هیچ ترکیب هیبریدی میان دو نوع فیلر (خاکستربادی و سیمان) صورت نمی‌پذیرد. به عبارت دقیق‌تر، هر نمونه کامپوزیتی تنها شامل یک نوع الیاف در یک طول مشخص (شیشه ۱۲ میلی‌متر، شیشه ۵۰ میلی‌متر، پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متر یا پلی‌پروپیلن ۵۰ میلی‌متر) و یک نوع فیلر (خاکستربادی یا سیمان) در یکی از درصدهای وزنی ۰، ۲۰ یا ۴۰ است. چنین طراحی آزمایشی امکان ارزیابی مستقل و بدون اثر متقابل پیچیده میان انواع مختلف الیاف یا میان دو فیلر را فراهم می‌کند. این رویکرد از نظر روش‌شناختی بسیار ارزشمند است، زیرا اثر خالص هر متغیر مستقل را بر روی رفتار مکانیکی و مکانیزم‌های شکست جداگانه قابل اندازه‌گیری و مدل‌سازی می‌کند.

از نظر روش‌شناسی، ارزیابی رفتار شکست در چنین سیستم‌هایی نیازمند ترکیبی از آزمون‌های مکانیکی ماکروسکوپیک همراه با بررسی‌های ریزساختاری دقیق با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی است. تصاویر از سطح شکست می‌توانند اطلاعات حیاتی در مورد نحوه توزیع ذرات فیلر، کیفیت چسبندگی آن‌ها به ماتریس، شواهدی از بیرون‌کشیدگی، شکست یا جدایش الیاف و نیز الگوی انتشار ترک فراهم آورند.

۲ – مواد و روش ها

در این مطالعه از رزین اپوکسی نوع آلیفاتیک بر پایه بیس‌فنول همراه با هاردنر پلی‌آمین استفاده گردید. این رزین به دلیل ویسکوزیته پایین، قابلیت ترشوندگی مناسب و نفوذپذیری بالا در میان الیاف و ذرات پرکننده را دارا بوده و از این رو برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری حاوی درصد بالای فیلر و الیاف گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود. به طور کلی، رزین‌های اپوکسی به عنوان الیگومرهایی تعریف می‌شوند که حداقل دارای یک گروه اپوکسی (یا اکسیران) در هر مولکول بوده و قابلیت پخت شبکه‌ای از طریق عامل‌های پخت (هاردنر) را دارند.

الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه به کار رفته در این تحقیق از نوع الیاف غیرپیوسته (قطع شده) در دو طول مجزای ۱۲ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر است. سیمان مصرف شده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند ضد سولفات متوسط (تیپ دو) مطابق با استاندارد ملی ایران بوده که محصول کارخانه سیمان خوزستان است. خاکستربادی به کار رفته در این پژوهش، محصول جانبی حاصل از احتراق در نیروگاه‌های حرارتی است. ترکیب شیمیایی این ماده به طور عمده شامل اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن، کلسیم و منیزیم است.

In Press

In Press / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717



شکل ۱- الیاف پلی پروپیلن (بالا) و الیاف شیشه (پایین)

Fig. 1- PP and glass fiber used in this study

سیمان مورداستفاده در تحقیق جاری سیمان تیپ دو با ترکیبات عنصری ذکر شده در جدول ۱ می باشد. ترکیبات مذکور با استفاده از آزمایش XRD در شرکت فولاد جهان آرا اروند (خرمشهر، ایران) و به کمک دستگاه مدل Thermo Scientific optim'x شرکت ARL انجام گرفت.

خاکستربادی مورداستفاده در این تحقیق محصول شرکت فرافزون شیمی، دارای ترکیبات عنصری ذکر شده در جدول ۲ می باشد. ترکیبات شیمیایی مذکور با استفاده از آزمایش XRD در شرکت جهان آرا اروند (خرمشهر، ایران) و به کمک دستگاه مدل Thermo Scientific optim'x شرکت ARL انجام گرفت. از آنجا که مجموع درصد سیلیس اکسید و آلومینیوم اکسید و آهن اکسید این محصول بیشتر از ۷۰ درصد و میزان سلفور اکسید آن کمتر از ۵ درصد می باشد. میزان رطوبت اولیه محصول نیز در حدود ۱/۳ درصد اندازه گیری شد.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده براساس درصد وزنی اندازه گیری شده به کمک روش XRD (مقادیر با بیش از ۱ درصد وزنی).

Table 1. Chemical composition of the cement used, expressed as weight percentage and determined via the XRD method (values exceeding 1 wt%).

Mg Kα	S Kα	Al Kα	Fe Kα	Si Kα	Ca Kα
1.2	2.6	2.7	5.2	16.2	17.9

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی خاکستربادی مورد استفاده براساس درصد وزنی اندازه گیری شده به کمک روش XRD.

Table 2. Chemical composition of the fly ash used, expressed as weight percentage, determined using the XRD method.

SO_3	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
0.29	0.008	1.75	3.9	91.22
	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
	0.37	0.11	0.72	1.12

به منظور ارزیابی اثربخشی خاکستربادی مورد استفاده در مخلوط، آزمایش تعیین فعالیت پزولانی مطابق با استاندارد INSO6713 و INSO3433 انجام گرفت. شاخص فعالیت پزولانی معیاری برای سنجش واکنش‌پذیری پزولان‌ها در ترکیب با سیمان پرتلند است. این شاخص نشان می‌دهد که یک ماده پزولانی تا چه اندازه می‌تواند در واکنش‌ها شرکت کرده و منجر به تشکیل فازهای سیمانی ثانویه (مانند ژل C–S–H) شود که باعث افزایش مقاومت و دوام بتن می‌گردند. به این منظور مطابق با روش توصیه شده، دو سری شش عددی نمونه مکعبی از مخلوط کنترل (ساخته شده از سیمان خالص) و مخلوط با جایگزینی ۲۰ درصد از سیمان با خاکستر بادی ساخته شد و مطابق توصیه استاندارد به مدت ۲۸ روز عمل آوری گردید. همچنین سه سری دیگر از همین مخلوط، با

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

جایگزینی ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نیز برای تکمیل مطالعات آزمایش شدند. براساس محاسبات، مقدار شاخص فعالیت معادل ۱۱۴٪ درصد بدست آمد (۲/۵۴ ± ۳۷/۹ مگاپاسکال برای مخلوط کنترل و ۰/۸۳ ± ۴۳/۵۱ مگاپاسکال برای مخلوط حاوی خاکستر بادی).

به منظور دستیابی به نمونه کامپوزیتی با خواص مکانیکی و عملکرد مطلوب، نخستین گام، انتخاب اجزای تشکیل‌دهنده مواد (شامل ماتریس پلیمری، الیاف و پرکننده‌های معدنی) بود. گام بعدی، فرآیندی است که به طرح اختلاط مرسوم است و طی آن ترکیب صحیح و نسبت بهینه اجزای کامپوزیت تعیین می‌گردد. تعیین نسبت‌های طرح اختلاط نمونه کامپوزیتی، مرحله‌ای کلیدی است که امکان رسیدن به ترکیب مناسب رزین و هاردنر، فیلرها (سیمان و میکروسلیس) و الیاف (شیشه و پلی‌پروپیلن) را بر اساس مشخصات هر یک فراهم می‌سازد.

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش قالب‌گیری دستی استفاده شد. ابتدا رزین اپوکسی آلیفاتیک با هاردنر پلی‌آمین به نسبت وزنی دو واحد رزین اپوکسی و یک واحد هاردنر در دمای اتاق (۲۵±۲ درجه سلسیوس) مخلوط شد. همزنی اولیه با همزن مکانیکی با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه انجام گرفت تا مخلوطی کاملاً یکنواخت حاصل شود. سپس پرکننده معدنی (سیمان پرتلند تیپ دو یا خاکستربادی) در درصدهای وزنی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد نسبت به ماتریس پلیمری، به‌صورت تدریجی و در چند مرحله به مخلوط اضافه شد. در هر مرحله، همزنی با سرعت ۱۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت تا تجمع ذرات به حداقل برسد. پس از آن، الیاف (شیشه یا پلی‌پروپیلن) در طول‌های ۱۲ و ۵۰ میلی‌متر و درصدهای وزنی ۰، ۱ و ۱/۵ درصد به‌آرامی و با سرعت پایین ۳۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شدند تا از گره‌خوردگی و آسیب مکانیکی الیاف، به‌ویژه الیاف بلند ۵۰ میلی‌متری، جلوگیری شود. سپس مخلوط برای حذف حباب‌های هوا به مدت ۱ دقیقه تحت خلأ ۱- بار قرار گرفت. در نهایت، مخلوط در قالب‌های سیلیکونی ریخته شد و چرخه پخت به‌صورت زیر اعمال گردید. پخت اولیه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، سپس پس‌پخت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت. پس از خنک‌سازی تدریجی تا دمای اتاق، نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای آزمون‌های مکانیکی آماده شدند. هر طرح اختلاط سه بار تکرار شد تا تکرارپذیری نتایج تضمین گردد.

تمامی مراحل ساخت نمونه‌ها، پخت و آزمون‌های مکانیکی در آزمایشگاه مواد با شرایط محیطی کنترل‌شده انجام شد. دمای محیط در حین قالب‌گیری، پخت و آزمون‌های مکانیکی در محدوده ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی در محدوده ۲۰ درصد حفظ گردید. این شرایط برای هر ۴۵ طرح اختلاط به‌صورت یکسان اعمال شد تا تأثیر نوسانات محیطی بر خواص مکانیکی به حداقل برسد. برای کنترل رطوبت، رزین و هاردنر قبل از مصرف در ظروف دربسته و در دسیکاتور نگهداری شدند و پس از باز کردن، در کوتاه‌ترین زمان ممکن مصرف گردیدند. اختلاط مواد در محفظه و با حداقل تماس با هوای مرطوب انجام شد. پس از اختلاط، مخلوط برای حذف حباب‌های هوا به مدت ۵ دقیقه تحت خلأ ۱- بار قرار گرفت. پخت اولیه و پس‌پخت در آون با دمای کنترل‌شده و بدون رطوبت اضافی انجام شد. آزمون‌های خمش و چقرمگی شکست نیز در همان شرایط محیطی انجام گردید. برای اطمینان از تکرارپذیری، نمونه‌های شاهد نیز در همین شرایط ساخته و آزمون شدند.

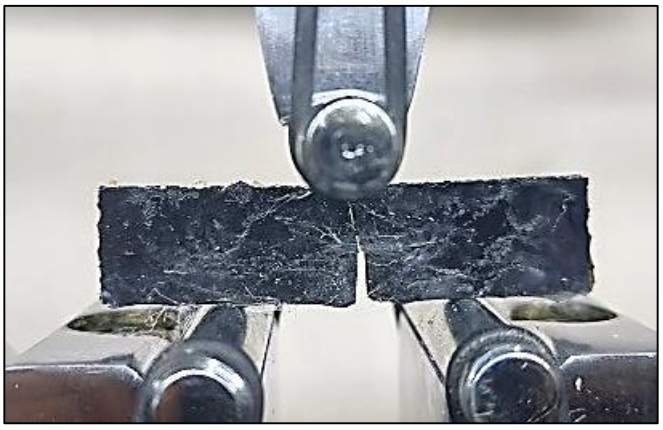
در گروه دوم، اثر دو نوع فیلر و دو نوع الیاف در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سیمان پرتلند تیپ دو و میکروسلیس هر کدام در سه سطح وزنی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی نسبت به ماتریس پلیمری به نمونه‌ها افزوده شدند. دو نوع الیاف شامل الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه در دو طول مجزای ۱۲ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر و در سه سطح وزنی ۰، ۱ و ۱،۵ درصد وزنی نسبت به ماتریس پلیمری استفاده گردیدند.

برای بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی، دو سری آزمایش مجزا بر اساس استانداردهای معتبر انجام پذیرفت. در سری اول، آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C78 اجرا گردید. نمونه‌های مورد آزمایش دارای ابعاد استاندارد بوده و برای هر طرح اختلاط، تعداد سه نمونه تهیه و آزمایش شد. بر اساس الزامات استاندارد، تکیه‌گاه‌های تحتانی دستگاه خمش در فاصله‌ای از یکدیگر قرار گرفتند که فاصله مرکز تا مرکز آنها معادل یک سوم طول دهانه باشد. در سری دوم، از استاندارد ASTM C1421 برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده ستفاده گردید. در این روش، ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی با ابعاد استاندارد ساخته شدند و سپس در میانه هر نمونه، یک ترک اولیه (شکاف یا ناچ) با ابعاد متغیر مطابق با اصول استاندارد ایجاد گردید. نمونه دارای ترک اولیه در دستگاه قرار داده شد و نیروی شکست آن ثبت گردید.

برای آزمایش‌ها، از دستگاه بارگذاری با دقت ۱ نیوتن در بارگذاری و ده میکرون در جابجایی استفاده شد. پس از تنظیم فاصله تکیه‌گاه‌ها و قرار دادن نمونه‌ها روی دستگاه، آزمایش‌ها با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. هر آزمایش سه بار تکرار شد تا دقت تضمین گردد. شکل ۲ نمونه‌هایی از اجرای آزمایش را نشان می‌دهد.

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**



شکل ۲- مثالی از نمونه تست شده

Fig. 2- Examples of tested specimen

۳. نتایج و بحث

به منظور تفسیر رفتار مکانیکی و شناسایی مکانیزم‌های حاکم بر شکست، سطوح شکست نمونه‌های منتخب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی تصاویر با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت، بزرگنمایی ثابت ۱۰۰۰ برابر و با آشکارساز الکترون‌های ثانویه تهیه شدند تا توپوگرافی سطح با بالاترین وضوح ممکن ثبت شود.

در تصویر۳-الف، نمونه حاوی الیاف شیشه (۱۲ میلی‌متر)، زمینه پلیمری اپوکسی به‌خوبی قابل تشخیص است. ذرات خاکستربادی به‌صورت نسبتاً یکنواخت در سراسر ماتریس توزیع شده‌اند، هرچند در برخی نواحی محدود، تجمع خوشه‌ای ذرات مشاهده می‌شود که ناشی از درصد نسبتاً بالای فیلر و برهمکنش‌های واندروالسی بین ذرات ریزدانه است. سطح الیاف شیشه عاری از هرگونه آسیب یا خوردگی سطحی مشهود بوده و چسبندگی نسبتاً خوبی در فصل‌مشترک الیاف–ماتریس دیده می‌شود. این پدیده را می‌توان به ماهیت قطبی سطح الیاف شیشه و توانایی آن در ایجاد پیوند هیدروژنی با گروه‌های اپوکسی ماتریس نسبت داد.

در تصویر ۳–ب از نمونه حاوی الیاف شیشه (۵۰ میلی‌متر) بدون فیلر، تغییر محسوسی در مکانیزم شکست مشاهده می‌شود. حفره‌های برجای‌مانده از جدایش الیاف شیشه به‌وضوح در تصویر قابل شناسایی هستند که نشان از چسبندگی ضعیف سطح مشترک الیاف/ اپوکسی است. شواهدی از بیرون‌کشیدگی الیاف شیشه در سطح شکست دیده می‌شود که با طول زیاد الیاف (۵۰ میلی‌متر) سازگار است. این الیاف بلند، علی‌رغم ماهیت آبگریز و انرژی سطح پایین که چسبندگی شیمیایی را کاهش می‌دهد، با مکانیزم اصطکاکی و بیرون‌کشیدگی، انرژی قابل‌توجهی را جذب کرده و مانع از رشد ناگهانی ترک می‌شوند

ریز ساختار نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن (۵۰ میلی‌متر) و خاکستربادی (۴۰درصد وزنی) در شکل ۳–ج نشان داده شده است. این ریزنگار پیچیدگی‌های ناشی از حضور همزمان درصد بالای فیلر سخت و الیاف بلند را به خوبی نمایان می‌سازد. در اینجا درصد بالای خاکستربادی منجر به تشکیل خوشه‌های بزرگ‌تر و متراکم‌تری از ذرات شده است که در برخی نواحی، فصل‌مشترک الیاف–ماتریس را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش چسبندگی مؤثر الیاف به زمینه گردیده است. مسیر انتشار ترک به وضوح از میان این خوشه‌های ذرات عبور می‌کند و اتصال ریزترک‌ها به یکدیگر، زمینه‌ساز شکست ترد در این مناطق شده است. اگرچه الیاف بلند تلاش نموده‌اند تا با ایجاد پل‌های مکانیکی از بازشدگی ترک جلوگیری کنند، اما ترک‌های ناشی از تجمع ذرات به قدری گسترده هستند که نهایتاً منجر به جدایش کامل الیاف از ماتریس در برخی نقاط گردیده است.

مقایسه تطبیقی تصاویر نشان می‌دهد که نوع فیلر تأثیر مستقیمی بر کیفیت سطح مشترک دارد. خاکستربادی به دلیل فعالیت پوزولانی و ابعاد بسیار ریز، چسبندگی بهتری با ماتریس ایجاد می‌کند، اما در درصدهای بالا به شدت مستعد تجمع است. سیمان با وجود توزیع دانه‌بندی گسترده‌تر، تمایل بیشتری به جدایش نشان می‌دهد که خود می‌تواند با ایجاد حفره‌های ریز، تا حدی به انحراف ترک کمک کند. از سوی دیگر، مقایسه الیاف نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن علیرغم چسبندگی شیمیایی ضعیف‌تر، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، مکانیزم بیرون‌کشیدگی غالب را دارند، در حالی که الیاف شیشه با چسبندگی بهتر، در درصدهای بالای فیلر دچار آسیب سطحی و کاهش کارایی پل‌زنی می‌شوند.

In Press

In Press / **DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**



شکل ۳- عکس ها از ریزساختار نمونه های آزمایش شده

Fig. 3- Microstructure of samples

به منظور ارزیابی عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده، دو پارامتر کلیدی استحکام خمشی (σf) و چقرمگی شکست (KIc) برای طرح های اختلاط اندازه‌گیری شدند و در جدول ۳ ارائه شدند. بررسی نمونه‌های فاقد الیاف (گروه شاهد) نشان می‌دهد که افزودن هر دو نوع فیلر معدنی (سیمان پرتلند و خاکستربادی) به‌طور قابل‌توجهی استحکام خمشی و چقرمگی شکست را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، در نمونه خالص رزین اپوکسی، استحکام خمشی برابر با ۵۰ مگاپاسکال و چقرمگی شکست ۱/۲۵ مگاپاسکال‌مجذور متر ثبت شد. با افزودن ۲۰ درصد وزنی سیمان، این مقادیر به ترتیب به ۳۵ مگاپاسکال (کاهش ۲۹درصد) و ۰/۹۲۴ مگاپاسکال‌مجذور متر (کاهش ۲۵درصد) رسیدند. در ۴۰ درصد سیمان، کاهش شدیدتری مشاهده شد به‌طوری که استحکام به ۲۰ مگاپاسکال (کاهش ۵۸ درصد) و چقرمگی به ۰/۶۱۲ مگاپاسکال‌مجذور متر (کاهش ۵۱ درصد) تنزل یافت.

In Press / **DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

جدول ۳- ترکیبات مخلوط های آزمایش شده در تحقیق جاری و نتایج بدست آمده از آزمایش آنها

Table 3. Compositions of the mixtures tested in the current study and the results obtained from their testing

درصد رزین	درصد فیلر	نوع فیلر	درصد الیاف	طول الیاف (میلیمتر)	نوع الیاف	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	چقرمگی شکست (MPa√m)
100	0	بدون فیلر	0	-	بدون فیلر	50.03	1.24
80	20	سیمان	0	-	بدون فیلر	35.35	0.92
60	40	سیمان	0	-	بدون فیلر	20.73	0.61
80	20	خاکستربادی	0	-	بدون فیلر	34.25	0.85
60	40	خاکستربادی	0	-	بدون فیلر	19.42	0.60
100	0	بدون فیلر	1	12	شیشه	54.98	1.45
80	20	سیمان	1	12	شیشه	48.00	1.39
60	40	سیمان	1	12	شیشه	22.47	0.92
80	20	خاکستربادی	1	12	شیشه	42.59	1.21
60	40	خاکستربادی	1	12	شیشه	23.13	0.89
100	0	بدون فیلر	1	50	شیشه	67.50	2.09
80	20	سیمان	1	50	شیشه	57.60	1.86
60	40	سیمان	1	50	شیشه	36.65	1.18
80	20	خاکستربادی	1	50	شیشه	50.84	1.84
60	40	خاکستربادی	1	50	شیشه	38.18	1.06
100	0	بدون فیلر	1	12	پلی پروپیلن	48.65	1.60
80	20	سیمان	1	12	پلی پروپیلن	34.47	1.39
60	40	سیمان	1	12	پلی پروپیلن	23.42	0.93
80	20	خاکستربادی	1	12	پلی پروپیلن	35.56	1.48
60	40	خاکستربادی	1	12	پلی پروپیلن	24.87	0.78
100	0	بدون فیلر	1	50	پلی پروپیلن	64.28	1.75
80	20	سیمان	1	50	پلی پروپیلن	47.56	1.62
60	40	سیمان	1	50	پلی پروپیلن	28.71	1.10
80	20	خاکستربادی	1	50	پلی پروپیلن	49.09	1.45
60	40	خاکستربادی	1	50	پلی پروپیلن	31.64	1.18
100	0	بدون فیلر	1.5	12	شیشه	79.26	1.85
80	20	سیمان	1.5	12	شیشه	66.33	1.49
60	40	سیمان	1.5	12	شیشه	39.36	1.07
80	20	خاکستربادی	1.5	12	شیشه	61.53	1.48
60	40	خاکستربادی	1.5	12	شیشه	32.75	1.02
100	0	بدون فیلر	1.5	50	شیشه	84.00	2.20
80	20	سیمان	1.5	50	شیشه	70.91	1.75
60	40	سیمان	1.5	50	شیشه	49.75	1.24
80	20	خاکستربادی	1.5	50	شیشه	64.36	1.66
60	40	خاکستربادی	1.5	50	شیشه	42.55	1.30
100	0	بدون فیلر	1.5	12	پلی پروپیلن	65.89	1.52

In press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

1.21	51.27	پلی پروپیلن	12	1.5	سیمان	20	80
1.04	37.53	پلی پروپیلن	12	1.5	سیمان	40	60
1.30	55.85	پلی پروپیلن	12	1.5	خاکستربادی	20	80
0.98	39.71	پلی پروپیلن	12	1.5	خاکستربادی	40	60
2.02	71.32	پلی پروپیلن	50	1.5	بدون فیلر	0	100
1.54	53.89	پلی پروپیلن	50	1.5	سیمان	20	80
1.14	43.85	پلی پروپیلن	50	1.5	سیمان	40	60
1.42	52.80	پلی پروپیلن	50	1.5	خاکستربادی	20	80
1.19	42.33	پلی پروپیلن	50	1.5	خاکستربادی	40	60

خاکستربادی عملکرد مشابهی نشان داد، به‌گونه‌ای که در ۲۰درصد وزنی، استحکام به ۳۴ مگاپاسکال و چقرمگی به ۰/۸۵۲ مگاپاسکال‌مجذور متر کاهش یافت که اختلاف ناچیزی با سیمان در همین درصد دارد. در ۴۰ درصد وزنی خاکستربادی، مقادیر به ۱۹ مگاپاسکال و ۰/۶ مگاپاسکال‌مجذور متر رسید که باز هم مشابه سیمان است. این کاهش شدید خواص را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد. اول ماهیت شکننده و سخت ذرات معدنی که به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و آغازگر ترک می‌شوند، و دوم افزایش درصد فیلر منجر به کاهش نسبت وزنی رزین و در نتیجه کاهش چسبندگی و افزایش تخلخل موضعی می‌گردد. اگرچه خاکستربادی به دلیل ابعاد زیرمیکرونی خود پتانسیل بیشتری برای پر کردن حفرات و بهبود چسبندگی دارد، اما در درصدهای بالا، تجمع ذرات این مزیت را خنثی می‌کند.

نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف (بدون فیلر) نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجهی در هر دو پارامتر مکانیکی نسبت به نمونه خالص هستند. بیشترین استحکام خمشی در نمونه حاوی ۱٫۵درصد وزنی الیاف شیشه به طول ۵۰ میلی‌متر با مقدار ۸۴ مگاپاسکال ثبت شد که نسبت به نمونه خالص افزایشی معادل ۶۸ درصد را نشان می‌دهد. چقرمگی شکست این نمونه نیز با مقدار ۲/۲ مگاپاسکال‌ریشه متر، افزایشی ۷۶ درصد نسبت به حالت بدون الیاف داشت.

مقایسه دو نوع الیاف نشان می‌دهد که الیاف شیشه در تمامی شرایط (طول و درصد یکسان) عملکرد برتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارند. به‌عنوان مثال، در طول ۵۰ میلی‌متر و ۱/۵ درصد وزنی، استحکام الیاف شیشه حدود ۱۸درصد بیشتر از الیاف پلی‌پروپیلن است. این برتری به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر و چسبندگی شیمیایی بهتر الیاف شیشه با ماتریس اپوکسی (از طریق پیوند هیدروژنی) است که انتقال تنش مؤثرتری را فراهم می‌آورد. همچنین، افزایش طول الیاف از ۱۲ به ۵۰ میلی‌متر، به‌طور میانگین باعث افزایش ۳۰ تا ۴۰ درصد در استحکام و ۲۰ تا ۳۰ درصد در چقرمگی گردیده است که ناشی از افزایش سطح تماس و بهبود مکانیزم بیرون‌کشیدگی و پل‌زنی ترک است.

افزودن همزمان الیاف و فیلرهای معدنی، رفتار پیچیده‌تری را نشان می‌دهد که به‌شدت به نوع و درصد هر یک از اجزا وابسته است. به‌طور کلی، حضور الیاف تا حدی افت خواص ناشی از فیلر را جبران می‌کند، اما این جبران‌کنندگی در درصدهای بالای فیلر (۴۰ درصد) به‌طور قابل‌توجهی محدود می‌شود.

الف) در حضور ۲۰درصد وزنی فیلر:

با افزودن ۱درصد الیاف شیشه ۱۲ میلی‌متری به نمونه حاوی ۲۰درصد سیمان، استحکام از ۳۵ به ۴۸ مگاپاسکال (افزایش ۳۶ درصد) و چقرمگی از ۰/۹۲۴ به ۱/۳۹۲ مگاپاسکال‌مجذورمتر (افزایش ۵۰ درصد) رسید. در حضور خاکستربادی (۲۰ درصد) و همان الیاف، استحکام به ۴۲ و چقرمگی به ۱/۲۱ رسید که نشان می‌دهد سیمان در ترکیب با الیاف، عملکرد نسبی بهتری دارد. در طول ۵۰ میلی‌متر و ۱ درصد الیاف شیشه، استحکام با سیمان به ۵۷ و با خاکستربادی به ۵۰/۸ مگاپاسکال رسید که تأثیر مثبت طول بلندتر الیاف را به‌وضوح نشان می‌دهد. برای الیاف پلی‌پروپیلن (۵۰ میلی‌متر، ۱درصد)، بیشترین استحکام در حضور سیمان ۴۷/۵ و در حضور خاکستربادی ۴۹ مگاپاسکال ثبت شد که اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند و در مجموع کمتر از الیاف شیشه هستند.

ب) در حضور ۴۰ درصد وزنی فیلر:

در این سطح، حتی حضور الیاف با درصد بالا (۱/۵ درصد) نیز نتوانست افت شدید خواص را جبران کند. به‌عنوان مثال، نمونه حاوی ۴۰ درصد سیمان و ۱/۵ درصد الیاف شیشه ۵۰ میلی‌متری استحکامی برابر با ۴۹/۷ مگاپاسکال و چقرمگی ۱/۲۳۶ مگاپاسکال‌مجذورمتر داشت که نسبت به نمونه مشابه با ۲۰ درصد سیمان (۷۱ مگاپاسکال) کاهش چشمگیری نشان می‌دهد.

در حضور ۴۰ درصد خاکستربادی و ۱/۵ درصد الیاف شیشه ۵۰ میلی‌متری، مقادیر به ۴۱/۵ مگاپاسکال و ۱/۲۹۶ مگاپاسکال‌مجذور متر رسید که باز هم کمتر از حالت سیمان است. جالب‌توجه آنکه در درصد بالای فیلر، تفاوت بین دو نوع الیاف و دو طول مختلف، به‌مراتب کمتر از حالت بدون فیلر یا ۲۰ درصد فیلر است. به‌عنوان

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

مثال، در ۴۰ درصد سیمان و ۱/۵ درصد الیاف، استحکام برای شیشه ۵۰ میلی‌متر ۴۹/۷ و برای پلی‌پروپیلن ۵۰ میلی‌متر ۴۳/۸ مگاپاسکال است که اختلاف تنها ۱۳درصد را نشان می‌دهد، در حالی‌که در غیاب فیلر این اختلاف حدود ۱۸درصد بود. این پدیده بیانگر آن است که در درصدهای بالای فیلر، مکانیزم غالب شکست از بیرون‌کشیدگی الیاف به شکست درون توده‌های فیلر و جدایش سطح مشترک تغییر می‌کند و بنابراین نقش الیاف در مهار ترک تضعیف می‌شود.

به منظور کمی‌سازی اثر متقابل پارامترها، تحلیل‌های آماری بر روی داده‌ها انجام شد (شکل ۳) که نتایج عبارتند از:

نوع الیاف بیشترین تأثیر را بر استحکام خمشی دارد (سهم ۳۸ درصد در تغییرات)، به‌گونه‌ای که الیاف شیشه به‌طور میانگین ۲۲ درصد استحکام بیشتری نسبت به پلی‌پروپیلن ایجاد می‌کنند.

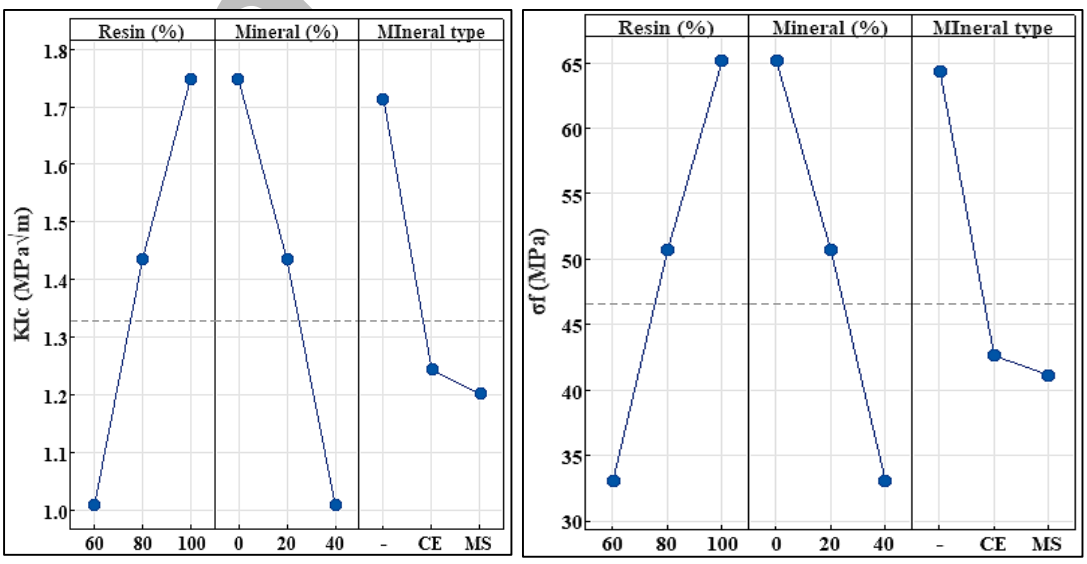
درصد فیلر تأثیر معکوس و بسیار قوی بر هر دو پارامتر دارد، به‌طوری که افزایش از ۲۰ درصد به ۴۰ درصد وزنی، به‌طور میانگین باعث کاهش ۴۵ درصد استحکام و ۳۵ درصد چقرمگی می‌شود.

طول الیاف مهم‌ترین عامل در تعیین چقرمگی شکست است (سهم ۴۲ درصد)، به‌گونه‌ای که افزایش طول از ۱۲ به ۵۰ میلی‌متر، چقرمگی را به‌طور میانگین ۳۴ درصد افزایش می‌دهد، اما این اثر در حضور ۴۰ درصد فیلر به کمتر از ۱۵درصد کاهش می‌یابد.

نوع فیلر تأثیر نسبتاً کمی در سطح ۲۰ درصد دارد (اختلاف کمتر از ۵ درصد بین سیمان و خاکستربادی)، اما در ۴۰ درصد، خاکستربادی عملکرد اندکی بهتر در چقرمگی (به‌ویژه در ترکیب با الیاف شیشه) نشان می‌دهد که ناشی از توزیع ریزتر و چسبندگی بهتر آن است.

تطابق نتایج مکانیکی با مشاهدات ریزساختاری (بخش ۴-۱) نشان می‌دهد که در نمونه‌های با فیلر پایین (۲۰درصد) و الیاف بلند (۵۰ میلی‌متر)، مکانیزم غالب شکست از نوع بیرون‌کشیدگی الیاف همراه با پل‌زنی ترک است که منجر به جذب انرژی بالا و افزایش چقرمگی می‌شود. با افزایش فیلر به ۴۰ درصد، صرف‌نظر از نوع الیاف، مکانیزم شکست به سمت جدایش ذرات فیلر از ماتریس و ترک‌خوردگی درون توده‌های فیلر گرایش پیدا می‌کند. در این حالت، کرنش نهایی کاهش یافته و شکست تردتر رخ می‌دهد. الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل چسبندگی شیمیایی ضعیف، در حضور فیلرهای معدنی عملکرد کمتری دارند و افزایش طول آن‌ها (از ۱۲ به ۵۰ میلی‌متر) تأثیر کمتری نسبت به الیاف شیشه دارد.

برای ارزیابی معناداری آماری اثرات اصلی و متقابل، تحلیل رگرسیون چندمتغیره بر داده‌های استحکام خمشی و چقرمگی شکست انجام شد. نتایج نشان داد که اثر اصلی هر چهار پارامتر بر هر دو پارامتر مکانیکی از نظر آماری معنادار است برای مقاومت خمشی مقدار ضریب پی () برای تمام پامتر ها از ۰,۰۰۵ کمتر بودهکه نشاندهنده اثر گذاری پارامترهای مذکور است. چنین اعدادی برای چقرمگی شکست نیز مشاهده شد. برای اطمینان از قابلیت بازتولید مقادیر مشاهده شده، آزمون اعتبارسنجی متقابل انجام شد که برای هر دو پارامتر، آستانه نشاندهنده اعتبار مدل ایجاد شده بود. نکته قابل توجه در این مدلسازی، تشخیص وجود اثرات متقابل یا غیرخطی بود که به خصوص برای مقاومت خمشی نشاندهنده الزام به در نظر گرفتن این موارد بود. به صورت کلی یافته‌ها نشان می‌دهد که مشاهدات توصیفی نمودارهای تعاملی از پشتوانه آماری برخوردار است و اثرات متقابل باید در تفسیر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها لحاظ شوند.



شکل ٤- نمودارهای تعاملی از نتایج بدست آمده

Fig. 4- Interaction plots of results

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

٤- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر همزمان و مستقل جنس الیاف، طول الیاف، نوع پرکننده معدنی و درصد وزنی پرکننده بر رفتار مکانیکی و مکانیزم‌های شکست کامپوزیت‌های اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تجربی، تحلیل‌های آماری و مشاهدات ریزساختاری، مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر خلاصه می‌شوند.

تأثیر منفی پرکننده‌های معدنی به‌تنهایی: افزودن سیمان پرتلند و خاکستربادی به ماتریس اپوکسی (در غیاب الیاف)، به‌دلیل ماهیت شکننده ذرات و ایجاد نقاط تمرکز تنش، باعث کاهش شدید استحکام خمشی (تا ۵۸ درصد) و چقرمگی شکست (تا ۵۱ درصد) می‌شود. هرچند خاکستربادی به دلیل ابعاد زیرمیکرونی، پتانسیل بهتری در پر کردن حفرات دارد، اما در درصدهای بالا (۴۰ درصد)، پدیده تجمع این مزیت را خنثی می‌کند و عملکردی مشابه سیمان از خود نشان می‌دهد.

تأثیر قابل‌توجه الیاف در بهبود خواص: استفاده از الیاف به‌تنهایی، به‌ویژه الیاف شیشه با طول ۵۰ میلی‌متر و درصد وزنی ۱/۵ درصد بیشترین میزان استحکام (۸۴ مگاپاسکال) و چقرمگی (۲/۲ مگاپاسکال‌مجذورمتر) را فراهم می‌آورد که به‌ترتیب افزایشی ۶۸ درصد و ۷۶ درصد نسبت به رزین خالص محسوب می‌شود. الیاف شیشه در تمامی شرایط، عملکرد برتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارد که این برتری به دلیل چسبندگی شیمیایی بهتر (از طریق پیوند هیدروژنی) و مدول الاستیسیته بالاتر الیاف شیشه با ماتریس اپوکسی است.

نقش کلیدی طول الیاف در چقرمگی: طول الیاف، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده چقرمگی شکست (سهم ۴۲ درصد در تغییرات) شناخته شد. افزایش طول از ۱۲ به ۵۰ میلی‌متر، با بهبود مکانیزم‌های بیرون‌کشیدگی و پل‌زنی ترک به‌طور میانگین باعث افزایش ۳۴ درصد در چقرمگی می‌گردد. با این حال، در حضور ۴۰ درصد وزنی فیلر، سهم این پارامتر به شدت کاهش می‌یابد (کمتر از ۱۵ درصد)، زیرا ذرات سخت و فراوان، مسیر انتشار ترک را تغییر داده و مکانیزم بیرون‌کشیدگی را تضعیف می‌کنند.

جبران‌ناپذیری افت خواص در درصدهای بالای فیلر: اگرچه حضور الیاف تا حد زیادی افت خواص ناشی از ۲۰ درصد فیلر را جبران می‌کند (به‌عنوان مثال، ترکیب ۲۰ درصد سیمان با ۱/۵ درصد الیاف شیشه ۵۰ میلی‌متری، استحکامی برابر با ۷۱ مگاپاسکال ارائه می‌دهد)، اما در درصد ۴۰ درصد فیلر، حتی بالاترین درصد الیاف (۱/۵ درصد) نیز قادر به بازیابی کامل خواص نیست. در این آستانه، مکانیزم شکست از حالت نیمه‌شکننده و مبتنی بر بیرون‌کشیدگی الیاف، به شکست ترد ناشی از جدایش ذرات فیلر از ماتریس و ترک‌خوردگی درون توده‌های فیلر تغییر می‌یابد.

مقایسه عملکرد دو نوع فیلر :در سطح ۲۰ درصد وزنی، تفاوت معنی‌داری بین عملکرد سیمان و خاکستربادی مشاهده نشد. اما در سطح ۴۰ درصد وزنی، خاکستربادی عملکرد بهتری در چقرمگی شکست (به‌ویژه در ترکیب با الیاف شیشه) نشان می‌دهد که ناشی از توزیع دانه‌بندی ریزتر و چسبندگی سطحی بهتر آن است. با این حال، سیمان در ترکیب با الیاف بلند شیشه، استحکام خمشی بالاتری ارائه می‌دهد که احتمالاً به دلیل برهمکنش شیمیایی پیچیده‌تر آن با گروه‌های اپوکسی است.

آستانه بحرانی گذار مکانیزم شکست: بر اساس تحلیل داده‌ها، یک آستانه بحرانی برای غلظت فیلر در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد وزنی شناسایی شد. مادون این آستانه، الیاف (به‌ویژه طول بلند) نقش غالب در مهار ترک و افزایش چقرمگی دارند. مافوق این آستانه، تجمع ذرات فیلر و تشکیل خوشه‌های سخت، منجر به ایجاد ترک‌های درون‌ذره‌ای شده و کارایی الیاف را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

References:

Açıkbaş, G., Özcan, S. and Çalış Açıkbaş, N., 2018. Production and characterization of a hybrid polymer matrix composite. *Polymer Composites*, *39*(11), pp.4080-4093. Doi: 10.1002/pc.24471.

Ahirwar, D., Purohit, R. and Dixit, S., 2024. Eco-friendly recycled glass fiber and bamboo fiber reinforced epoxy-SiO 2 polymer hybrid composite: Development and mechanical characterization. *Polymer Composites*, *45*(7), pp.6093-6110. Doi: 10.1002/pc.28181.

Cai, H., Ye, J., Wang, Y., Shi, Y., Saafi, M. and Ye, J., 2023. Microscopic failure characteristics and critical length of short glass fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, *266*, p.110973. Doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110973

Castro, R.G., Amorim, F.C. and Reis, J.M.L., 2020. Effects of fiber length on the performance of piassava-reinforced epoxy composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *234*(11), pp.1431-1438. Doi: 10.1177/1464420720944982.

De, B., Bera, M., Bhattacharjee, D., Ray, B.C. and Mukherjee, S., 2024. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications,

In Press

***In Press* / DOI: 10.22113/jmst.2026.596593.2717**

recycling, and waste management. *Progress in Materials Science*, *146*, p.101326. Doi: 10.1016/j.pmatsci.2024.101326

El-Sagheer, I., Abd-Elhady, A.A., Sallam, H.E.D.M., Naga, S.A. and Sayed, S.A.A., 2022. Flexural and fracture behaviors of functionally graded long fibrous polymeric composite beam-like specimens. Composite Structures, 300, p.116140. Doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116140

Eterigho-Ikelegbe, O., Yoro, K.O. and Bada, S., 2021. Coal as a filler in polymer composites: a review. Resources, Conservation and Recycling, 174, p.105756. Doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105756.

Golestaneh, M., Amini, G., Najafpour, G.D. and Beygi, M.A., 2010. Evaluation of mechanical strength of epoxy polymer concrete with silica powder as filler. *World Applied Sciences Journal*, *9*(2), pp.216-220.

Gong, L.X., Hu, L.L., Zang, J., Pei, Y.B., Zhao, L. and Tang, L.C., 2015. Improved interfacial properties between glass fibers and tetra-functional epoxy resins modified with silica nanoparticles. *Fibers and Polymers*, *16*(9), pp.2056-2065. Doi: 10.1007/s12221-015-5338-2

Jeong, Y.J., Kim, H.T., Kim, J.D., Kim, J.H., Kim, S.K. and Lee, J.M., 2023. Evaluation of mechanical properties of glass fiber-reinforced composites depending on length and structural anisotropy. *Results in Engineering*, *17*, p.101000. Doi: 10.1016/j.rineng.2023.101000.

Karunakaran, K., Singh, S.S. and Kitey, R., 2022. Investigating the role of filler shape on the dynamic mechanical properties of glass-filled epoxy composites. *Polymer Composites*, *43*(10), pp.6912-6925. Doi: 10.1002/pc.26737

Kim, D., Chung, I. and Kim, G., 2013. Study on mechanical and thermal properties of fiber-reinforced Epoxy/Hybrid-silica composite. *Fibers and Polymers*, *14*(12), pp.2141-2147. Doi: 10.1007/s12221-013-2141-9.

Lin, C., Kanstad, T., Jacobsen, S. and Ji, G., 2023. Bonding property between fiber and cementitious matrix: A critical review. *Construction and Building Materials*, *378*, p.131169. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131169

Mirsayar, M.M., Shi, X. and Zollinger, D.G., 2017. Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen. Engineering Solid Mechanics, 5(4), 293–306. Doi: 10.5267/j.esm.2017.8.001

Mousavi, S., Ghasemi, M. and Dehghani, M., 2024. Investigating the fracture toughness of the self compacting concrete using ENDB samples by changing the aggregate size and percent of steel fiber. Engineering Solid Mechanics, 12(1), pp.17-26.

Naser, M.Z., Hawileh, R.A. and Abdalla, J.A., 2019. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*, *198*, p.109542. Doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109542

Shahbazian, B. and Mirsayar, M., 2023. Fracture mechanics of cellular structures: past, present, and future directions. *Eng. Solid Mech*, *11*(2), pp.231-242.

Shao, S., Tian, Y., Zhou, H., Song, Y., Lian, H., Wu, H., Duan, Q. and Xie, Q., 2020. Effect of morphology and particle size of bismuth ferrite filler on the surface insulation of epoxy resin composites. *Polymer Composites*, *41*(11), pp.4514-4525. Doi: 10.1002/pc.25728

Singh, S.S., Chakraborty, P. and Kitey, R., 2019. Deformation characteristics of glass-filled epoxy composite under compression: role of filler shape and volume fraction. *Polymer Composites*, *40*(12), pp.4726-4741. Doi: 10.1002/pc.25341

Zanotti, C., Rostagno, G. and Tingley, B., 2018. Further evidence of interfacial adhesive bond strength enhancement through fiber reinforcement in repairs. *Construction and Building Materials*, *160*, pp.775-785. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.140