

An Experimental Study on Flexural Properties of Jute Fiber/Aluminum Laminates

Sara Alirezaei Shahraki, Soheil Dariushi*, and Mohammad Hosain Beheshty

Department of Composite, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 4 May 2020, accepted: 22 August 2020

ABSTRACT

Hypothesis: Fiber metal laminates (FMLs) are made up of fibrous composites layers and metal sheets that are stacked alternatively and joined together with polymeric resin. The purpose of this study is to investigate the flexural properties of environmental friendly and cost-effective fiber metal laminates. In recent decades, natural fiber composites have become popular due to their recyclability, renewability and low cost, and their applications in various industries are growing. Combining natural composites with aluminum layers and manufacturing fiber metal laminates led to improved mechanical properties and increased resistance to environmental factors such as moisture, heat and sunlight.

Methods: Jute fiber-based fiber metal laminates and composites containing jute fibers were made using epoxy and vinyl ester resins by hand lay-up method. The flexural properties of composites and fiber metal laminates were investigated using a three-point bending test. After performing mechanical tests, scanning electron microscopy images were prepared to check the fracture surface. For comparison, similar samples were made and tested using glass fibers.

Findings: The results of the tests showed that the use of aluminum layers along with composites containing jute fibers increases the flexural modulus and the ultimate strength of the samples. Samples made with vinyl ester resin had better bending properties than epoxy matrix composites due to proper bonding between jute fibers and vinyl ester. The vinyl ester resin could penetrate into the void space inside the jute fibers. In addition, scanning electron microscopy images showed that due to the rough surface and special form of jute fibers, better adhesion was created between the jute fibers with vinyl ester resin and epoxy in comparison with glass fibers.

Keywords:

fiber metal laminate,
jute fiber,
aluminum,
eco-friendly,
natural fibers composite

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: s.dariushi@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Alirezaei Shahraki S., Dariushi S., and Beheshty M.H., An Experimental Study on Flexural Properties of Jute Fiber/Aluminum Laminates, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **33**, 351-362, 2020.

بررسی تجربی خواص خمشی چندلایه‌ای‌های آلومینیم-الیاف کنف

سارا علیرضایی شهرکی، سهیل داریوشی*، محمدحسین بهشتی

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۱

چکیده

فرضیه: چندلایه‌ای‌های فلز-الیاف (FMLs) از ورقه‌های فلزی و لایه‌های کامپوزیت الیافی متصل شده به یکدیگر با رزین پلیمری، تشکیل می‌شوند. هدف از این پژوهش، بررسی خواص خمشی چندلایه‌ای‌های فلز-الیاف دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه از نظر اقتصادی است. در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به دلیل تجدیدپذیری، بازیافت پذیری و هزینه کم مورد توجه قرار گرفته‌اند و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف رو به رشد است. ترکیب کامپوزیت‌های طبیعی با لایه‌های آلومینیم و ساخت چندلایه‌ای‌های فلز-الیاف طبیعی می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر عامل‌های محیطی مانند رطوبت، گرما و نور خورشید شود. **روش‌ها:** چندلایه‌ای‌های فلز-الیاف بر پایه الیاف کنف و نیز کامپوزیت‌های دارای الیاف کنف با دو نوع رزین اپوکسی و وینیل استر با روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. خواص خمشی کامپوزیت‌ها و چندلایه‌ای‌های فلز-الیاف تهیه شده با آزمون خمش سه نقطه‌ای بررسی شد. پس از انجام آزمون‌های مکانیکی عکس‌های میکروسکوپ الکترونی پویشی برای بررسی سطح شکست تهیه شد. برای مقایسه، نمونه‌های مشابه با استفاده از الیاف شیشه با روش لایه‌گذاری دستی نیز ساخته و بررسی شدند.

یافته‌ها: نتایج آزمون‌ها نشان داد، استفاده از لایه‌های آلومینیم در کنار کامپوزیت‌های دارای الیاف کنف موجب افزایش مدول خمشی و استحکام نهایی نمونه‌ها می‌شود. نمونه‌های ساخته شده با رزین وینیل استر به دلیل برقراری اتصال مناسب با الیاف کنف و نیز نفوذ به فضای خالی داخل الیاف، خواص خمشی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های با ماتریس اپوکسی داشتند. افزون بر این، عکس‌های میکروسکوپی الکترونی پویشی نشان داد، به دلیل وجود ناصافی سطح و شکل ویژه الیاف کنف، چسبندگی بهتری میان الیاف کنف با رزین وینیل استر و اپوکسی در مقایسه با الیاف شیشه ایجاد شده است.

واژه‌های کلیدی

چندلایه‌ای فلز-الیاف،
الیاف کنف،
آلومینیم،
دوستدار محیط زیست،
کامپوزیت الیاف طبیعی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

s.dariushi@ippi.ac.ir

مقدمه

در طول سال‌های اخیر، استفاده از مواد زیست‌سازگار در مهندسی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. پژوهشگران در پی مواد تجدیدپذیر، بازیافت‌پذیر، پایدار، سبز و زیست‌تخریب‌پذیر برای جایگزینی برخی مواد سنتزی هستند [۳-۱]. از این میان، می‌توان به کامپوزیت‌های پلیمری اشاره کرد که اغلب با محیط زیست‌سازگار نیستند. کامپوزیت‌های پلیمری معمولاً دارای الیاف سنتزی مانند شیشه و کربن و رزین‌های گرماسخت هستند که به‌آسانی بازیافت‌پذیر نیستند [۴]. افزون بر این، الیاف سنتزی برای سلامتی انسان خطرناک هستند، زیرا طی مراحل تولید، استفاده و اصلاح، ذراتی از الیاف در محیط رها می‌شود که موجب بروز بیماری‌هایی برای انسان می‌شود. تلاش پژوهشگران برای غلبه بر این مشکلات و عیب‌ها، به توسعه کامپوزیت‌های سبز یا زیست‌کامپوزیت‌ها و کامپوزیت‌های بر پایه الیاف طبیعی منجر شده است. [۵]. ویژگی‌های مهم الیاف طبیعی مقرون به‌صرفه بودن آن‌ها، چگالی کم و خواص ویژه زیاد است [۶]. برتری دیگر الیاف طبیعی در مقایسه با نوع سنتزی این است که برای از میان بردن الیاف می‌توان با سوزاندن آن‌ها در کوره از انرژی حاصل از سوختن آن‌ها استفاده کرد [۷]. الیاف کف اقتصادی، فراوان و در دسترس و دارای استحکام و مدول بیشتری از اغلب پلاستیک‌ها هستند [۸]. همان‌طور که محیط پیرامون ما روزبه‌روز در معرض آلودگی قرار می‌گیرد، نیاز به جایگزینی الیاف سنتزی با الیاف طبیعی برای تولید کامپوزیت افزایش می‌یابد [۹].

طی سه دهه گذشته در هنگام رقابت میان مواد فلزی و کامپوزیت‌های پلیمری دسته تازه‌ای از مواد ظهور یافته‌اند که این مواد جدید چندلایه‌های فلز-الیاف (Fibers Metal Laminates, FMLs) نامیده شدند. چندلایه‌های فلز-الیاف در حقیقت مواد هیبریدی به‌شمار می‌آیند که از ورق‌های فلزی در کنار کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. پژوهشگران بسیاری خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های دارای الیاف طبیعی را بررسی کرده‌اند. در پژوهش‌های انجام‌شده مرور جامعی بر انواع الیاف، ماتریس‌های پلیمری، شرایط ساخت و بررسی رفتار کامپوزیت‌های ساخته‌شده با بارگذاری‌های مختلف ارائه شده است. در ادامه، برخی کارهای اخیر با تأکید بر پژوهش‌های داخل کشور مرور می‌شوند.

مرادی و همکاران [۱۰] خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف طبیعی پنبه، پشم و کف را بررسی کردند که نمونه پنبه-اپوکسی خواص کششی، خمشی و برشی بیشتری نشان دادند. احمدی و همکاران [۱۱] خواص کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف خرما را بررسی کردند. به‌طور کلی، افزودن الیاف خرما

موجب بهبود استحکام کششی کامپوزیت نسبت به ماتریس خالص نمی‌شود که این مسئله می‌تواند به دلیل چسبندگی ضعیف الیاف و ماتریس و وجود عیب‌های ساختاری در نمونه‌ها باشد. Chandrasekar و همکاران [۱۲] خواص مکانیکی FMLهای تقویت‌شده با الیاف هیبریدی کربن، کتان و نخل را بررسی کردند. نتایج نشان داد، استحکام کششی، فشاری و خستگی چندلایه‌های الیاف آلومینیم-الیاف کتان-کربن نسبت به نمونه‌های FMLهای دارای الیاف نخل-کربن و نیز نمونه دارای هر سه نوع الیاف کتان، نخل و کربن بسیار بیشتر است. اما، مقاومت بین‌لایه‌ای در نمونه هیبریدی هر سه نوع الیاف از دو نوع نمونه دیگر بیشتر بوده است. Raghavendra و همکاران [۱۳] کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کف را بررسی کرده و با کامپوزیت‌های شیشه و اپوکسی خالص مقایسه کردند. نتایج آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بیانگر بهبود خواص کامپوزیت کف-اپوکسی نسبت به خواص رزین اپوکسی بود، اگرچه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی نسبت به کامپوزیت‌های کف-اپوکسی بهتر بوده است. Ramnath و همکاران [۱۴] رفتار مکانیکی الیاف کف و کتان را در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بررسی کردند. در این پژوهش، خواص مکانیکی کامپوزیت هیبریدی (کف، کتان و شیشه) و کامپوزیت‌های بر پایه کف و شیشه با کامپوزیت‌های شیشه مقایسه شد. نتایج نشان داد، استحکام کششی نهایی کامپوزیت هیبریدی در مقایسه با کامپوزیت الیاف کف بیشتر بود. اگرچه درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیاف کف زیر کشش، بیشتر از نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی بود. Wang و همکاران [۱۵] اثر فرایند اصلاح الیاف کف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کف-اپوکسی را بررسی کردند. فرایند اصلاح الیاف کف بر چسبندگی لایه‌های کامپوزیت و خواص مکانیکی آن مؤثر است. Khan و همکاران [۱۶] خواص فیزیکی-مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کف را بررسی کردند. در این بررسی کاربردهای کامپوزیت‌های کف در زمینه‌های مختلف مطرح شده بود. افزون بر این، فرایندهای مختلف اصلاح الیاف برای بهبود خواص چسبندگی میان الیاف کف و ماتریس پلیمری مطالعه شد. Gogna و همکاران [۱۷] نشان دادند، کامپوزیت‌های الیاف کف، جایگزین‌های مناسبی برای کامپوزیت‌های الیاف سنتزی هستند. این کامپوزیت‌ها برتری‌هایی از جمله هزینه‌های تولید و چگالی کم، خواص مکانیکی زیاد و انرژی تولید بسیار کمتر دارند. Singh و همکاران [۱۸] اثر جزء حجمی الیاف کف و دمای پخت را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سبز پلی‌لاکتیک اسید-کف بررسی کردند. براساس نتایج، حداکثر استحکام کششی و خمشی در ۳۰٪ حجمی از الیاف و دمای پخت ۱۶۰°C به‌دست آمد. همچنین این گروه در مطالعه‌ای اخیر [۱۹] اثر اصلاح

خودروسازی یا ساختمان هموار کند. در این راستا، خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و FMLهای ساخته‌شده با استفاده از ورق‌های آلومینیم و الیاف کف و شیشه بررسی شده است. نمونه‌ها با دو رزین اپوکسی و وینیل استر ساخته‌شده و زیر بارگذاری خمشی قرار گرفتند. همچنین، سطح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپی الکترونی بررسی شدند.

تجربی

مواد

در این پژوهش، رزین اپوکسی دی‌گلیسیدیل اتر بیس فنول A با نام تجاری Epikote 828 تهیه‌شده از شرکت Momentive آمریکا به کار گرفته شد. این رزین دارای وزن هم‌ارز $190-184$ g/equiv، چگالی $1/16$ kg/L و گرانیروی 600 cp در دمای 30°C بود. رزین وینیل استر استفاده‌شده، 301 V بر پایه بیس فنول A تهیه‌شده از شرکت فراپل جم با چگالی نسبی $1/12$ kg/L بود. گرانیروی و زمان ژل شدن این رزین در دمای محیط به ترتیب برابر با 450 ± 20 cp و 17 ± 1 min بود. از ورق آلومینیم T3-2024 با ضخامت $0/8$ mm استفاده شد. الیاف تک‌جهتی شیشه نوع E از شرکت Jushi چین با وزن واحد سطح 300 g/m² تهیه شدند. همچنین، از الیاف کف تابیده‌شده (yam) با نمره 466 tex استفاده شد که از شرکت بازرگانی بهار کاشان خریداری شده بود. پلی‌آمین H46-A به‌عنوان عامل پخت محیطی رزین اپوکسی (با نسبت ۱:۲ رزین به سخت‌کننده) و آغازگر متیل اتیل کتون پراکسید ($1/5$ phr) و شتاب‌دهنده نفتنات کبالت ($0/1$ phr) برای پخت رزین وینیل استر استفاده شدند.

دستگاه‌ها

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D 790 با دستگاه سنتام مدل STM 150 ساخت ایران انجام شد. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با ابعاد $60 \times 12/7 \times 1/5$ mm³ و نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کف با ابعاد $60 \times 12/7 \times 2/8$ mm³ تهیه شدند. همچنین چندلایه‌های آلومینیم-الیاف شیشه با ابعاد $100 \times 12/7 \times 3/1$ mm³ و چندلایه‌های آلومینیم-الیاف کف با ابعاد $100 \times 12/7 \times 4/6$ mm³ تحت آزمایش قرار گرفتند. همچنین، فاصله دو تکیه‌گاه و مقدار بارگذاری برای تمام نمونه‌ها در آزمون خمش یکسان و به ترتیب برابر با 48 mm و $1/3$ mm/min بود. در این آزمون پنج نمونه از هر گروه بررسی شدند و متوسط نتایج به‌همراه انحراف معیار گزارش شد. برای بررسی شکل‌شناسی، ارزیابی

قلیایی را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سبز کف-اپوکسی بررسی کردند. محلول 5% سدیم هیدروکسید برای اصلاح این الیاف به‌عنوان نقطه بهینه با بیشترین خواص مکانیکی به‌دست آمد. Sayeed و همکاران [۲۰] استحکام کششی و مدول یانگ کامپوزیت‌های کف را در مقایسه با سایر الیاف طبیعی بررسی کردند. هزینه‌های تولید و کاربرد الیاف نیز بر اساس خواص مکانیکی آن‌ها مطالعه شد. زارعی و همکاران [۲۱] استحکام برشی و کششی بین‌لایه‌ای در FMLهای تقویت‌شده با الیاف ترکیبی کف-بازالت را بررسی کردند. نفوذ نکردن مناسب رزین در الیاف موجب ایجاد فضای خالی در کامپوزیت و کاهش خواص کامپوزیت شده است. بیشترین استحکام کششی و مدول کشسانی در نمونه‌های الیاف کف فشرده‌شده میان الیاف بازالت به‌دست آمد. Ayaskant و همکاران [۲۲] خواص کششی چندلایه‌های آلومینیم الیاف کربن و کف را مطالعه کردند. در این پژوهش، اثر لایه‌گذاری و تعداد لایه‌ها بر مدول و استحکام کششی نمونه‌ها بررسی شده است. Vasumathi و Vela [۲۳] نمونه‌های آلومینیم-الیاف کربن و کف و نیز منیزیم-الیاف کربن و کف را با آزمون‌های کشش، خمش و ضربه بررسی کردند. نتایج نشان داد، استحکام کششی و خمشی FMLهای ساخته‌شده به‌طور مستقیم با تعداد لایه‌ها متناسب است. اما، مدول خمشی به‌طور معکوس متناسب با تعداد لایه‌هاست. Kuan و همکاران [۲۴] خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و FMLهای ساخته‌شده با ماتریس پلی‌پروپیلن و الیاف طبیعی را با کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن مقایسه کردند. کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های فلز-الیاف پلی‌پروپیلن-پلی‌پروپیلن خواص بهتری از سایر نمونه‌ها نشان دادند.

کیفیت برجسته FMLها، مقاومت در برابر رشد ترک و افزایش عمر خستگی، خواص ضربه مناسب، سفتی و چقرمگی زیاد و مقاومت در برابر شعله و عامل‌های محیطی است [۲۵]. برای طراحی ساختار بهینه، به مواد جدیدی با ویژگی‌هایی مانند وزن کم، مقاومت مناسب در برابر خستگی، ضربه و خوردگی، خاصیت چکش‌خواری خوب و مدول کشسانی زیاد به‌طور هم‌زمان نیاز است [۲۶].

در مطالعه حاضر، از ایده ساخت FMLها استفاده شد تا خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی کف افزایش یابد. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی در کنار برتری‌های بسیاری که به آن‌ها اشاره شد، دارای عیب‌هایی مانند استحکام کم، جاذب رطوبت‌بودن و آسیب‌پذیری در برابر عامل‌های محیطی مانند رطوبت، دمای زیاد و نور آفتاب هستند [۲۰]. استفاده از لایه‌های آلومینیم در کنار لایه‌های کامپوزیت الیاف طبیعی موجب رفع یا بهبود این مشکلات می‌شود. استفاده از الیاف طبیعی در ساخت FMLها به‌دلیل کاهش قیمت و قابلیت بازیافت بهتر می‌تواند راه را برای استفاده از این مواد در صنایعی مانند

ورق‌های آلومینیمی، FMLها با دو لایه آلومینیم در دو طرف نمونه و چهار لایه الیاف با زاویه $0/90/90/0$ تهیه شدند. فشار اعمال‌شده برای آماده‌سازی نمونه‌ها 50 مرتبه به مدت 2 h بود و فرایند پخت در دمای 50°C انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی سازگاری و چسبندگی الیاف-ماتریس

توسعه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی مستلزم داشتن درک مناسبی از ترکیبات شیمیایی، پیوندهای سطحی و چسبندگی سطحی الیاف طبیعی با ماتریس است. برای بررسی چسبندگی و سازگاری الیاف استفاده‌شده در ماتریس‌های مختلف عکس‌های میکروسکوپی SEM از نمونه‌های کامپوزیتی و سطح مقطع آن‌ها تهیه شد. همان‌طور که در شکل ۱ (a) نشان داده شده، در کامپوزیت GV بیرون‌زدگی الیاف در حالی دیده می‌شود که سطح الیاف بیرون‌زده شکست تمیزی نداشته است. سطح به‌جامانده از شکست در بخش رزین، نسبت به نمونه شکل ۱ (b)، ناصافی بیشتری نشان داد که این دلیلی بر چسبندگی بهتر بود. بنابراین، مشاهدات مزبور حاکی از چسبندگی نسبتاً مناسب رزین وینیل استر با الیاف شیشه است. شکل ۱ (b) نشانگر سطح شکست کامپوزیت GE است. در این کامپوزیت بیرون‌زدگی الیاف در حالی دیده می‌شود که سطح الیاف بیرون‌زده بدون هر نوع رزین است. حفره‌های ایجادشده در اثر خروج الیاف بدون شکستگی رزین بوده و این مشاهدات نشانگر آن است که رزین اپوکسی با الیاف شیشه چسبندگی کمتری داشته است.

شکل ۲ عکس‌های میکروسکوپی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کف و چسبندگی آن‌ها به هر دو ماتریس را نشان می‌دهد. در شکل ۲ (a) که سطح شکست کامپوزیت JV را نشان می‌دهد، بیرون‌زدگی جزئی الیاف دیده می‌شود. در این نمونه مقدار بیشتری رزین به الیاف چسبیده و رزین داخل الیاف هم نفوذ کرده است. این مسئله موجب افزایش اتصال و چسبندگی می‌شود. با وجود اینکه الیاف کف مقاومت کمتری نسبت به الیاف شیشه دارند اما، به دلیل سطح ناصاف و نیز نفوذ رزین به حفره‌ها داخل الیاف درهم‌گیری مکانیکی میان رزین و الیاف کف ایجاد شده است. این موضوع موجب ایجاد فصل مشترک در دو سطح بیرونی و درونی الیاف شده که در نتیجه موجب انتقال تنش مناسب‌تر از رزین به الیاف می‌شود.

سطح شکست کامپوزیت JE در شکل ۲ (b) نسبتاً صاف بوده و نفوذ رزین اپوکسی به فضاهای خالی داخل الیاف نیز بسیار کم است. سطح

چسبندگی آمیزه‌ها به الیاف و بررسی نحوه شکست نمونه‌ها، سطح مقطع شکست آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی بررسی شد. بدین منظور، ابتدا سطح نمونه‌ها با لایه نازکی از طلا پوشش یافت و سپس مورد آزمون قرار گرفتند. در این پژوهش، از میکروسکوپ الکترونی پویشی TESCAN VEGA II استفاده شد.

روش‌ها

ساخت نمونه‌ها

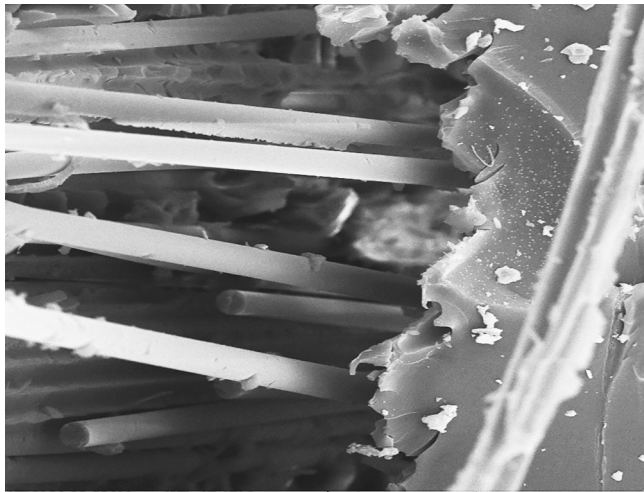
هشت گروه نمونه شامل چهار گروه نمونه کامپوزیتی و چهار گروه نمونه از FMLها تهیه شدند. نحوه لایه‌گذاری و کدگذاری این نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. در تهیه نمونه‌های کامپوزیتی، چهار لایه الیاف با زاویه‌های $0/90/90/0$ روی هم قرار گرفتند و با رزین مدنظر به روش دستی آغشته شدند. سپس، زیر فشار 50 bar در دمای 50°C و زمان 90 min تحت پرس پخت شدند. از آنجا که برای ساخت نمونه‌ها از چهارچوب آهنی در داخل دستگاه پرس استفاده شد، مقدار رزین و الیاف به‌گونه‌ای تنظیم شد که درصد وزنی الیاف در تمام نمونه‌های ساخته‌شده مساوی با یکدیگر و برابر با $1 \pm 30\%$ باشد.

برای تهیه نمونه‌های FML، ابتدا باید ورق‌های آلومینیم اصلاح سطح شوند. بدین منظور، ابتدا محلولی بازی شامل 30 g سدیم هیدروکسید و 1 g سدیم فسفات در 1 L آب تهیه شد و ورق‌های آلومینیمی به مدت 10 min در این محلول قرار گرفتند. در مرحله بعد، اصلاح با عامل اسیدی انجام شد. بدین منظور، ابتدا محلول اسیدی با 50 g سدیم دی‌کرومات و 300 g سولفوریک اسید در 1 L آب مقطر تهیه شد. سپس، ورق‌های آلومینیمی به مدت 12 min در آن تحت فرایند اصلاح قرار گرفتند [27]. پس از اصلاح سطح

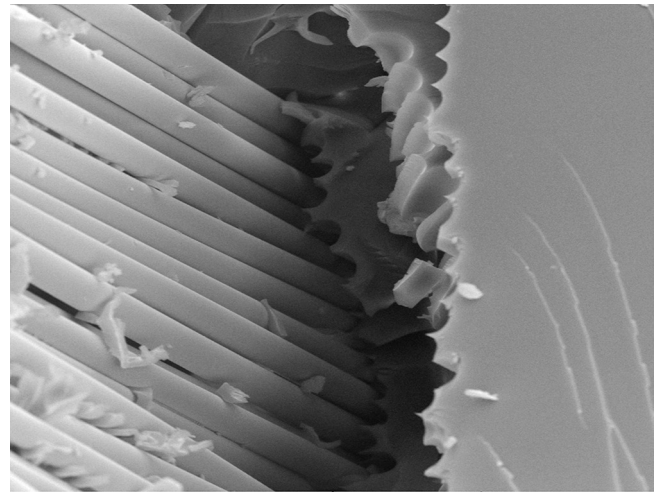
جدول ۱- کدگذاری و لایه‌گذاری نمونه‌ها.

Table 1. Samples coding and lay-up.

Code	Fiber	Resin	Metal laminate	Lay-up
JE	Jute	Epoxy	-	0/90/90/0
AJE	Jute	Epoxy	Aluminum	Al/0/90/90/0/Al
JV	Jute	Vinyl ester	-	0/90/90/0
AJV	Jute	Vinyl ester	Aluminum	Al/0/90/90/0/Al
GE	UD glass	Epoxy	-	0/90/90/0
AGE	UD glass	Epoxy	Aluminum	Al/0/90/90/0/Al
GV	UD glass	Vinyl ester	-	0/90/90/0
AGV	UD glass	Vinyl ester	Aluminum	Al/0/90/90/0/Al



(a)



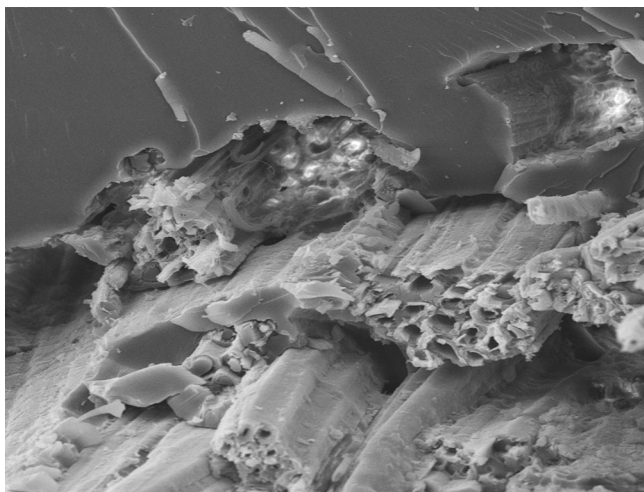
(b)

شکل ۱- عکس‌های SEM سطح شکست نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰: (a) GV و (b) GE.

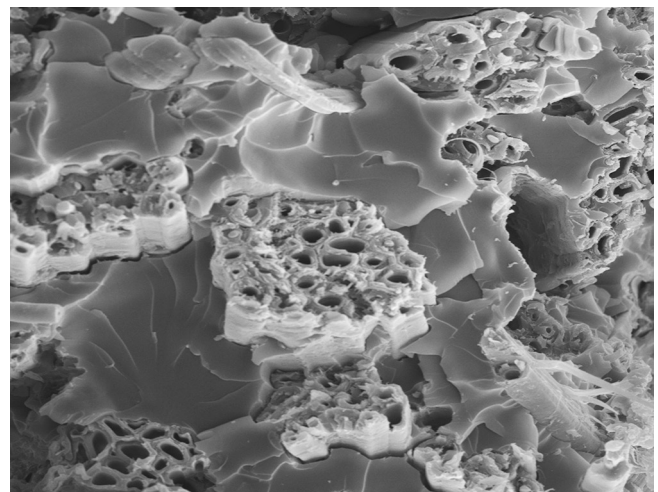
Fig. 1. SEM images of fracture surface of samples with magnification 1000x: (a) GV and (b) GE.

یکسان باشد. در اینجا چون مقداری از رزین وینیل استر به فضاهای خالی داخل الیاف کف نفوذ کرده است، این موضوع موجب افزایش شایان توجه استحکام الیاف می‌شود و طول بیشتر الیاف بیرون‌زده در شکل ۲ (a) نشانگر اتصال ضعیف‌تر نیست. همان‌طور که دیده می‌شود، رزین وینیل استر باقی‌مانده روی الیاف بیشتر از رزین اپوکسی است. پس اتصال کف و وینیل استر نیز به دلیل وجود دو سطح تماس (داخل و خارج) و نیز مقدار رزین باقی‌مانده روی آن بهتر از اتصال

الیاف بیرون‌زده، کوتاه و نسبتاً تمیز بوده و رزین کمتری روی سطح الیاف دیده می‌شود. این موضوع ناشی از آن است که رزین اپوکسی استفاده‌شده در این پژوهش گرانبه‌تری به مراتب بیشتری از رزین وینیل استر داشته و به همین دلیل قابلیت نفوذ کمتری در الیاف دارد. معمولاً نتیجه‌گیری می‌شود، هر چقدر طول الیاف بیرون‌زده از ماتریس کمتر باشد، نشانگر چسبندگی بهتر الیاف و رزین است [۱۴]. اما، این نتیجه زمانی درست است که استحکام الیافی که مقایسه می‌شوند،



(a)



(b)

شکل ۲- عکس‌های SEM سطح شکست نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰: (a) JV و (b) JE.

Fig. 2. SEM images of fracture surface of samples with magnification 1000x: (a) JV and (b) JE.

آلومینیم پایینی دیده می‌شود، اما لایه کامپوزیتی میانی دچار شکست ماتریس و لایه‌لایه‌شدگی موضعی در ناحیه بارگذاری شده و لایه آلومینیمی بالایی وارد فاز پلاستیک می‌شود و تغییرشکل دائمی داده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، کامپوزیت GE دارای استحکام خمشی بیشتری نسبت به کامپوزیت JE است. کامپوزیت GE رفتار کاملاً خطی نشان داد و در نقطه بیشینه تنش، شکست رخ داده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، کامپوزیت GE شکستی ترد دارد و در کرنش کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها شکست اتفاق افتاده است. اما، کامپوزیت JE نسبت به کامپوزیت GE رفتار کاملاً متفاوتی نشان داد. در این کامپوزیت رفتاری نرم مانند نمونه‌های دارای آلومینیم دیده شد که به دلیل وجود الیاف طبیعی کنف و فضای خالی درون الیاف بوده است. در کامپوزیت JE ابتدا ناحیه خطی بسیار کوچکی دیده شد. اما در ادامه، شکست تدریجی اتفاق افتاد و الیاف به‌طور جزئی از ماتریس جدا شدند. همان‌طور که دیده می‌شود، شکست نهایی در کرنش بزرگتری نسبت به GE رخ داده است. با توجه به نتایج آزمون، چندلایه‌های فلز-الیاف AGE استحکام و مدول خمشی و نیز کرنش در شکست بیشتری نسبت به نمونه‌های AJE نشان دادند. با اضافه‌شدن لایه‌های آلومینیمی، برای کامپوزیت شیشه-اپوکسی استحکام خمشی کاهش و برای کنف-اپوکسی افزایشی بوده است.

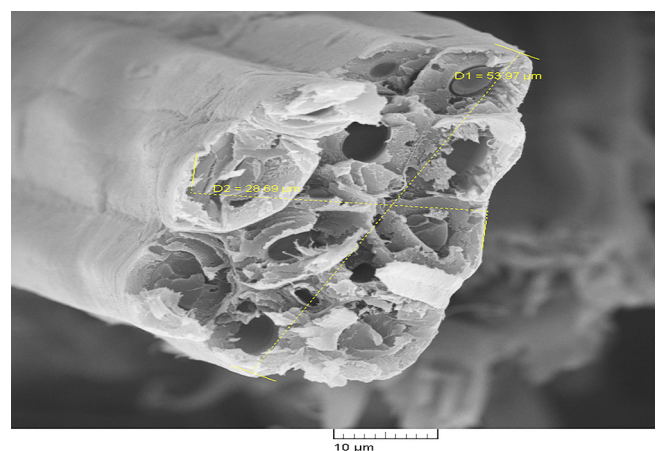
شکل ۵ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های JV، GV، AJV و AGV را نشان می‌دهد که همگی با ماتریس وینیل استر ساخته شدند. در این بخش نیز دیده می‌شود، نمونه GV رفتار ترد نشان داد و رفتار چندلایه‌ای‌های آلومینیم-الیاف به‌صورت کشسان-کشسان بوده است. چندلایه‌های دارای آلومینیم قابلیت تحمل تغییرشکل‌های بزرگتری را نشان دادند. در مقایسه کامپوزیت JV و چندلایه‌ای AJV می‌توان گفت، لایه‌های آلومینیم موجب بهبود تمام خواص شدند و مدول کشسان، استحکام و کرنش شکست و در کل مقدار جذب انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش دادند [۲۴].

همچنین در سطح شکست نمونه AJV دیده می‌شود، لایه کامپوزیتی دچار شکست شده است. اما دو ورق آلومینیم تغییرشکل پلاستیک دادند و بدون پارگی باقی ماندند. در ضمن، جدایشی میان ورق‌های آلومینیمی و لایه کنف-وینیل استر وجود ندارد. این به دلیل چسبندگی خوب این رزین با لایه‌های فلز است. نمونه AJV نیز مدول و استحکام بسیار بیشتری نسبت به نمونه JV نشان داده و تا حدی به خواص نمونه AGV نزدیک شده است. این موضوع را می‌توان به اتصال مناسب وینیل استر و الیاف کنف و ورق آلومینیم و نیز ورود رزین به بخش داخلی الیاف کنف مربوط دانست.

کنف و اپوکسی بوده است. از طرفی هر چقدر سطح الیاف صاف و صیقلی‌تر باشد، اتصال به آن سطح سخت‌تر و چسبندگی ضعیف‌تر می‌شود. این اتفاق در الیاف شیشه رخ می‌دهد که سطحی صاف و صیقلی دارند و موجب می‌شود، چسبندگی کاهش یابد و الیاف راحت‌تر از داخل ماتریس خارج شوند. اما، در الیاف طبیعی کنف به دلیل ناهمواری سطح، نفوذ رزین بهتر بوده و چسبندگی بیشتر است. عکس SEM از سطح مقطع الیاف کنف و ابعاد آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی خواص خمشی چندلایه‌های کامپوزیتی

نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای هر یک از نمونه‌های ساخته‌شده بررسی شد. همچنین، بیشینه تنش تحمل‌پذیر و شیب ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون خمش محاسبه و به ترتیب به‌عنوان استحکام خمشی و مدول خمشی گزارش شده است. برای روشن شدن نتایج، این نتایج در چهار دسته با یکدیگر مقایسه شدند. در دسته اول و دوم به ترتیب نمونه‌های ساخته‌شده با رزین اپوکسی و وینیل استر بررسی شدند. در این دو دسته، نوع ماتریس یکی بوده و اثر تغییر الیاف نشان داده شده است. در دسته سوم و چهارم به ترتیب نمونه‌های ساخته‌شده با الیاف کنف و شیشه مطالعه شدند. در این دو دسته، نوع الیاف یکی بوده و اثر تغییر ماتریس بررسی شده است. شکل ۴ منحنی تنش-کرنش خمشی کامپوزیت‌های GE و JE و چندلایه‌های فلز-الیاف AGE و AJE را نشان می‌دهد. در تمام این نمونه‌ها از رزین اپوکسی استفاده شده است، پس می‌توان اثر نوع الیاف و وجود لایه‌های آلومینیم را بررسی کرد. در نمونه‌های AGE لایه کامپوزیتی از لایه آلومینیمی جدا شده و شکستی در ورق

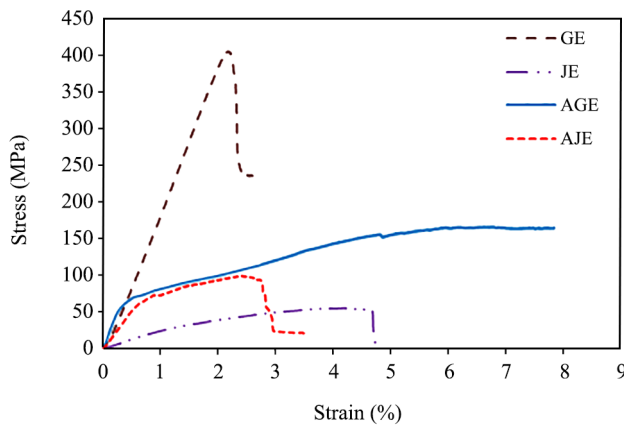


شکل ۳- عکس‌های SEM از سطح مقطع الیاف کنف.

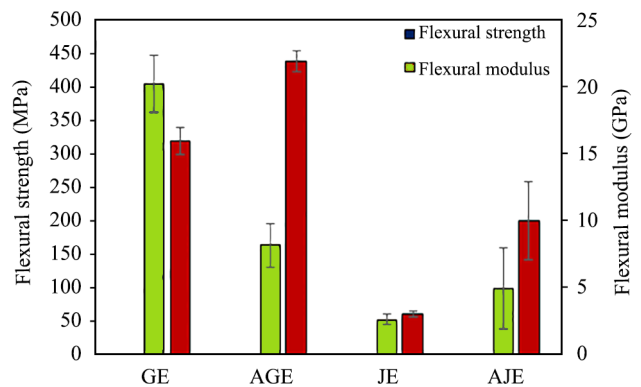
Fig. 3. SEM images of jute fiber cross section.

با این رزین و در نتیجه چسبندگی بیشتر آن باشد. شکل ۶ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های AGE و AGV، GE، GV، AGE و AGV را نشان می‌دهد. در تمام این نمونه‌های از الیاف شیشه استفاده شده است. در بارگذاری خمشی چسبندگی الیاف به رزین اهمیت زیادی دارد. همان‌طور که بیان شد، اتصال الیاف شیشه به رزین وینیل استر بهتر از اتصال این الیاف به رزین اپوکسی است. این موضوع موجب شده است، در مقایسه نمونه‌های GE و GV و نیز AGE و AGV، نمونه‌های ساخته‌شده با رزین وینیل استر، استحکام و مدول خمشی بیشتری نشان دهند. در اینجا به‌وضوح مشخص شد، اگر چه در بارهای کششی مقدار استحکام اجزای تشکیل‌دهنده نمونه (الیاف و رزین) اهمیت بسیار زیادی دارد، اما در بارهای خمشی مقدار چسبندگی اجزا به یکدیگر اثر بیشتری دارد [۲۳].

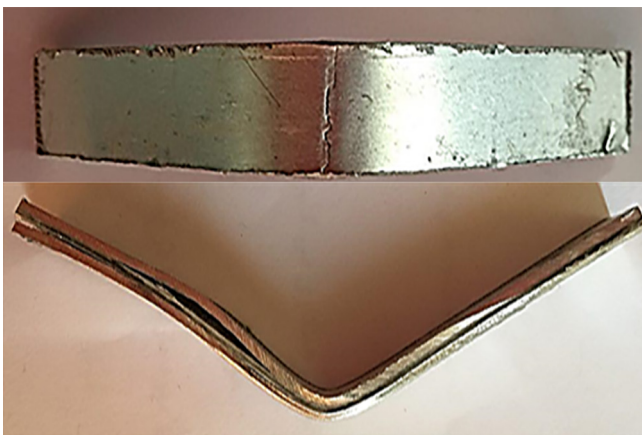
شکل ۶ منحنی تنش-کرنش کامپوزیت‌های JE، JV، AJV و AJE را نشان می‌دهد. در تمام این نمونه‌ها از الیاف کف استفاده شده است. با مقایسه نتایج اثر نوع ماتریس را می‌توان بررسی کرد. در این دسته از نمونه‌ها، استحکام نمونه JV به دلیل اتصال بهتر ماتریس به الیاف و نفوذ ماتریس به داخل الیاف از نمونه JE بیشتر بوده اما مدول نمونه JE از نمونه JV کمی بیشتر بوده است که دلیل آن بیشتر بودن مدول رزین اپوکسی از وینیل استر است. همچنین، به دلیل اتصال بهتر الیاف به ماتریس وینیل استر استحکام و مدول خمشی و کرنش در شکست AJV بهتر از AJE بود. به طوری که استحکام نمونه AJV، ۹۷٪ بیشتر از AJE و برای JV حدود ۲۹٪ بیشتر از JE بود. دلیل دیگری که در این باره می‌توان بیان کرد، شاید ناشی از گرانروی کمتر رزین وینیل استر نسبت به اپوکسی و بهتر خیس کردن سطح آلومینیم



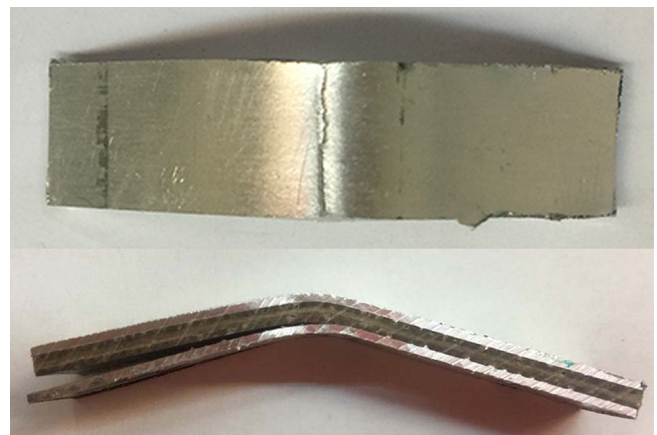
(a)



(b)



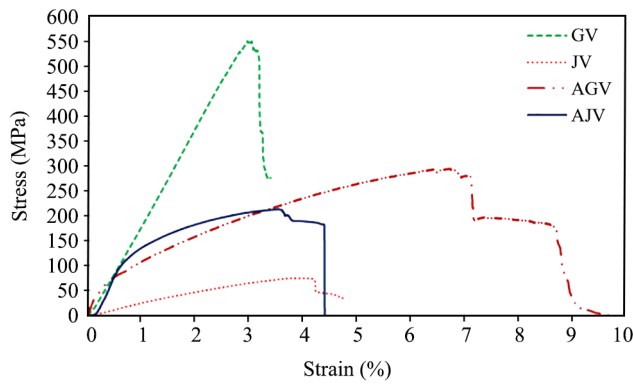
(c)



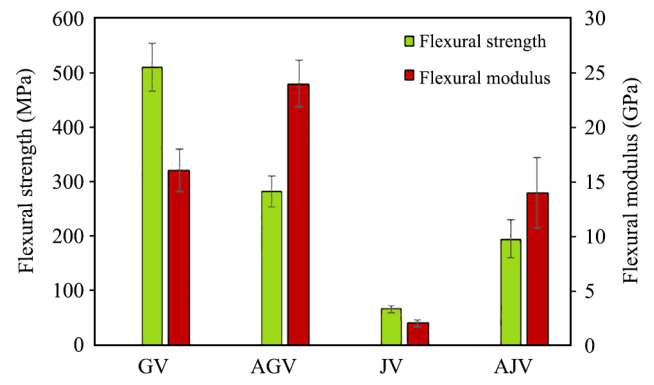
(d)

شکل ۴- مقایسه نمونه‌های ساخته‌شده با رزین اپوکسی: (a) منحنی تنش-کرنش، (b) نمودار استحکام و مدول خمشی و تصویر (c) نمونه AGE و (d) نمونه AJE.

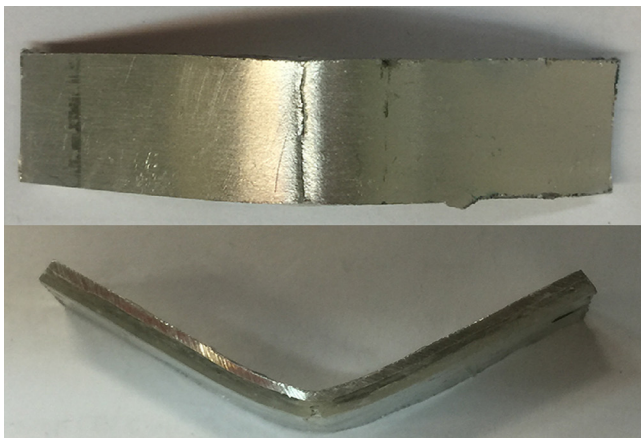
Fig. 4. Comparison of specimens manufactured with epoxy resin: (a) stress-strain curve, (b) flexural strength and modulus, (c) AGE specimen, and (d) AJE specimen image.



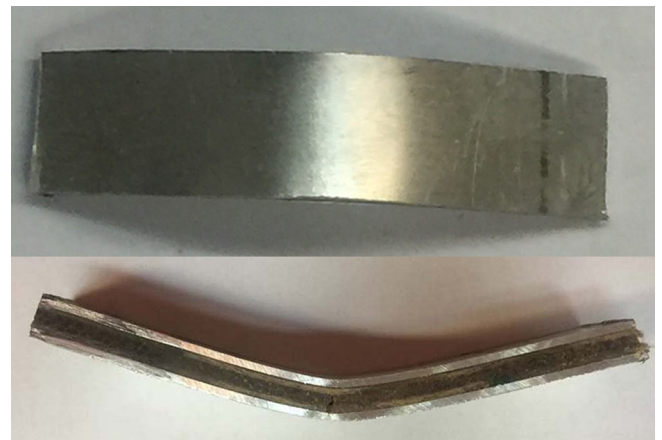
(a)



(b)



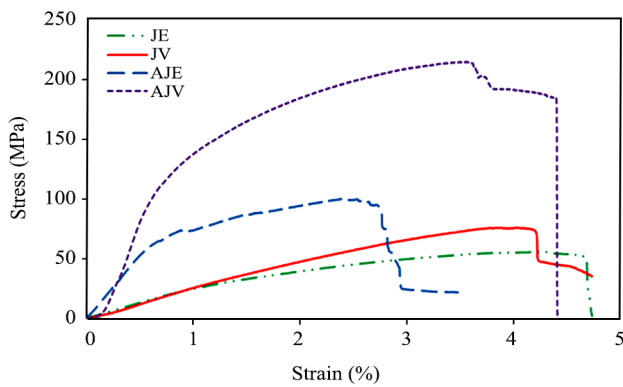
(c)



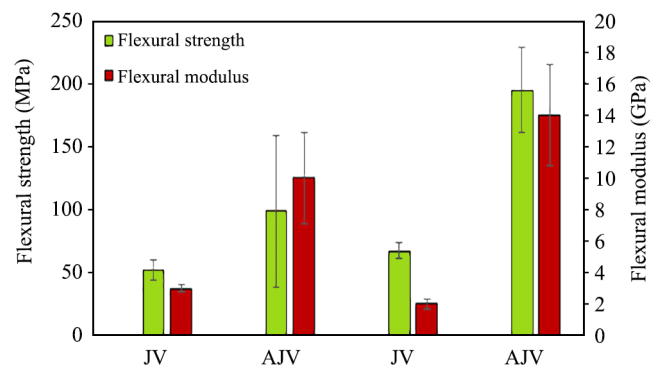
(d)

شکل ۵- مقایسه نمونه‌های ساخته‌شده با رزین وینیل استر: (a) منحنی تنش-کرنش (b) نمودار استحکام و مدول خمشی و تصویر (c) نمونه AGV و (d) نمونه AJV.

Fig. 5. Comparison of specimens manufactured with vinyl ester resin: (a) stress-strain curve, (b) flexural strength and modulus, (c) AGV specimen, and (d) AJV specimen image.



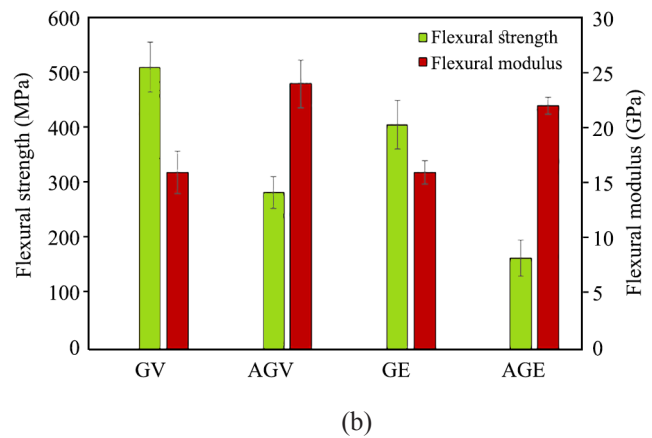
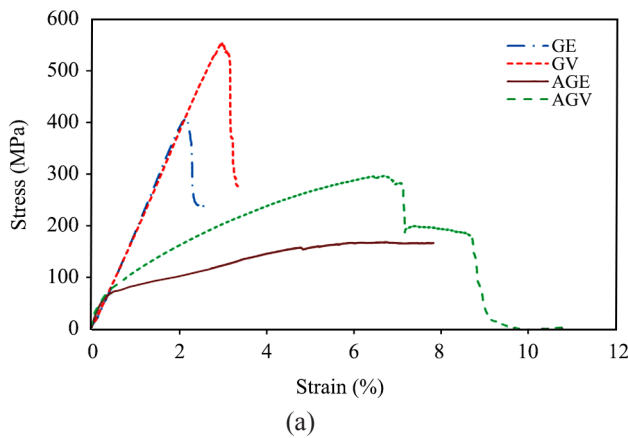
(a)



(b)

شکل ۶- مقایسه نمونه‌های ساخته‌شده با الیاف کنف: (a) منحنی تنش-کرنش و (b) نمودار استحکام و مدول خمشی.

Fig. 6. Comparison of specimens manufactured with jute fiber: (a) stress-strain curve and (b) flexural strength and modulus.



شکل ۷- مقایسه نمونه‌های ساخته‌شده با الیاف شیشه: (a) منحنی تنش-کرنش و (b) نمودار استحکام و مدول خمشی.

Fig. 7. Comparison of specimens manufactured with glass fiber: (a) stress-strain curve and (b) flexural strength and modulus.

مطابق نتایج این پژوهش، در مقایسه رفتار خمشی کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های فلز-الیاف ساخته‌شده با الیاف کف می‌توان گفت که لایه‌های آلومینیم موجب افزایش شایان توجه مدول کشسانی و استحکام خمشی شده و مقدار جذب انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش دادند. در بارگذاری خمشی FMLها یکی از مهم‌ترین عامل‌های اثرگذار بر استحکام سازه، قدرت اتصال لایه‌های فلز و کامپوزیت به یکدیگر است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته‌شده با الیاف شیشه بسیار بیشتر از نمونه‌های ساخته‌شده با الیاف کف بود، اما خواص چندلایه‌های آلومینیم-الیاف کف به دلیل اتصال خوب لایه کامپوزیتی به لایه آلومینیمی به خواص چندلایه‌های آلومینیم-الیاف شیشه نزدیک شد. با توجه به اینکه چگالی الیاف کف تقریباً نصف الیاف شیشه است، جذب انرژی ویژه چندلایه‌های آلومینیم-الیاف کف به‌طور شایان توجهی ارتقا یافته و نزدیک به چندلایه‌های دارای الیاف شیشه شده است. عکس‌های میکروسکوپی الکترونی پوشی نشان داد، رزین وینیل اتصال بهتری با الیاف کف و شیشه داشته و حتی در فضای خالی داخل الیاف کف نفوذ کرده است. این مسئله موجب شد، در نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، کامپوزیت‌ها و FMLهای ساخته‌شده با رزین وینیل استر عملکرد بهتری را نشان دهند. با لحاظ کردن خواص مناسب الیاف کف از جمله چگالی (کاهش وزن سازه) و هزینه کمتر (کاهش قیمت سازه)، تجدیدپذیری و بازیافت‌پذیری به چرخه طبیعت می‌توان به‌خوبی از این الیاف به‌عنوان جایگزین مناسبی به‌جای الیاف سنتزی در ساخت چندلایه‌های فلز-الیاف استفاده کرد.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، رفتار هر دو نمونه GE و GV در ناحیه کشسان خطی تقریباً یکسان است. با این تفاوت که اثر الیاف شیشه بر خواص مکانیکی رزین وینیل استر نسبت به رزین اپوکسی به دلیل چسبندگی و سازگاری بهتر و برهم‌کنش شیمیایی و مکانیکی قوی‌تر موجب شده که کامپوزیت GV استحکام خمشی بیشتری را نشان دهد. همین عامل موجب بیشتر شدن مدول و استحکام خمشی نمونه AGV نسبت به نمونه AGE شد. شکل ۷ نشان می‌دهد، وجود آلومینیم در هر دو نمونه AGV و AGE نسبت به GE و GV سبب شده است که استحکام نهایی کاهش اما مدول خمشی و کرنش در شکست به مقدار شایان توجهی افزایش یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از مدول بیشتر آلومینیم نسبت به کامپوزیت شیشه و از طرفی قابلیت تغییر شکل بیشتر آلومینیم باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر در راستای استفاده از الیاف طبیعی تجدیدپذیر برای جایگزینی الیاف سنتزی در ساخت چندلایه‌های فلز-الیاف انجام شده است. الیاف طبیعی هر چند برتری‌های مناسبی مانند بازیافت‌پذیری و تجدیدپذیری دارند. اما از نظر سفتی و استحکام از الیاف سنتزی مانند کربن و شیشه ضعیف‌تر هستند. با افزودن لایه‌های آلومینیمی می‌توان خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی را به‌طور چشمگیری ارتقا بخشید و چندلایه‌های فلز-الیاف دارای الیاف طبیعی را به‌عنوان ساختاری با خواص مکانیکی مناسب برای استفاده در صنایعی مانند حمل‌ونقل یا ساختمان معرفی کرد.

اختصارات

AJV	Aluminum/Jute/Vinyl ester FML	JV	Jute/vinyl ester composite
AJE	Aluminum/Jute/ Epoxy FML	JE	Jute/ Epoxy Composite
AGV	Aluminum/Glass/Vinyl ester FML	GV	Glass/Vinyl ester Composite
AGE	Aluminum/Glass/Epoxy FML	GE	Glass/Epoxy Composite

مراجع

- Najafi M., Ansari R., and Darvizeh A., Experimental Characterization of a Novel Balsa Cored Sandwich Structure with Fiber Metal Laminate Skins, *Iran. Polym. J.*, **28**, 87-97, 2019.
- Kale R.D., Jadhav N.C., and Pal S., Fabrication of Green Composites Based on Rice Bran Oil and Anhydride Cross-Linkers, *Iran. Polym. J.*, **28**, 471-482, 2019.
- Ranjbar-Mohammadi M., Shaki H., and Kargozar S., Fabrication of Nanofibrous Hybrid Scaffolds from Polylactic Acid-Graphene and Gelatin for Application in Bone Tissue Engineering, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 563-574, 2019.
- Razavi M., Tabatabaee Ghomi. M., Taheri-Behrooz F., and Liaghat G., Effect of Bending Load on the Electrical Conductivity of Carbon/Epoxy Composites Filled with Nanoparticles, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 79-92, 2019.
- Masoodi, R. and Pillai K.M., A Study on Moisture Absorption and Swelling in Bio-Based Jute-Epoxy Composites, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **31**, 285-294, 2012.
- Saheb D.N. and Jog J.P., Natural Fiber Polymer Composites: A Review, *Adv Polym. Technol.*, **18**, 351-363, 1999.
- Kumar R., Kumar K., Sahoo P., and Bhowmik S., Study of Mechanical Properties of Wood Dust Reinforced Epoxy Composite, *Proc. Mat. Sci.*, **6**, 551-556, 2014.
- Gowda T.M., Naidu A.C.B., and Chhaya R., Some Mechanical Properties of Untreated Jute Fabric-Reinforced Polyester Composites, *Compos. Part A-Appl. Sci.*, **30**, 277-284, 1999.
- Bisaria H., Gupta M.K., Shandilya P., and Srivastava R.K., Effect of Fibre Length on Mechanical Properties of Randomly Oriented Short Jute Fibre Reinforced Epoxy Composite, *Mater. Today*, **2**, 1193-1199, 2015.
- Moradi E., Zeinedini A., and Heidari-shahmaleki E., Mechanical Properties of Laminated Composites Reinforced by Natural Fibers of Cotton, Wool and Kenaf under Tensile, Flexural and Shear Loadings, *J. Sci. Technol. Compos. (Persian)*, **6**, 99-108, 2019.
- Ahmadi M.S., Gholami M., Tavanaie M.A., and Khajeh Mehrizi M., Tensile and Flexural Properties of Epoxy-Date Palm Fiber Composites, *J. Sci. Technol. Compos. (Persian)*, **5**, 69-78, 2018.
- Chandrasekar M., Ishak M.R., Salit M.S., Leman Z., Jawaid M., and Naveen J., Mechanical Properties of a Novel Fibre Metal Laminate Reinforced with the Carbon, Flax, and Sugar Palm Fibres, *BioResources*, **13**, 5725-5739, 2018.
- Raghavendra G., Ojha S., Acharya S., and Pal S., Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites and Comparison with the Glass and Neat Epoxy Composites, *J. Compos. Mater.*, **48**, 2537-2547, 2014.
- Ramnath B.V., Elanchezhian C., Nirmal P.V., Kumar G.P., Kumar V.S., Karthick S., Rajesh S., Suresh K., Experimental Investigation of Mechanical Behavior of Jute-Flax Based Glass Fiber Reinforced Composite, *Fibers Polym.*, **15**, 1251-1262, 2014.
- Wang H., Memon H.A.M., Hassan E., Miah M.S., and Ali M.A., Effect of Jute Fiber Modification on Mechanical Properties of Jute Fiber Composite, *Materials*, **12**, 1226, 2019.
- Khan J.A. and Khan M.A., The Use of Jute Fibers as Reinforcements in Composites. *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, 1st ed., Woodhead, 3-34, 2015.
- Gogna E., Kumar R.A., Sahoo A.K., and Panda A.A., Comprehensive Review on Jute Fiber Reinforced Composites, Singapore, Springer, 459-467, 2019.
- Singh J.I.P., Singh S., and Dhawan V., Influence of Fiber Volume Fraction and Curing Temperature on Mechanical Properties of Jute/PLA Green Composites, *Polym. Polym. Compos.*, **28**, 2020. DOI: org/10.1177/0967391119872875
- Singh J.I.P., Singh S., and Dhawan V., Effect of Alkali Treatment on Mechanical Properties of Jute Fiber-Reinforced

- Partially Biodegradable Green Composites Using Epoxy Resin Matrix, *Polym. Polym. Compos.*, **28**, 2020. DOI: org/10.117/0967391119880046
20. Sayeed M.M.A., Sayem A.S.M., and Haider J., Opportunities with Renewable Jute Fiber Composites to Reduce Eco-Impact of Nonrenewable Polymers, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, 810-821, 2020.
21. Zareei N., Geranmayeh A., and Eslami-Farsani R., Interlaminar Shear Strength and Tensile Properties of Environmentally-Friendly Fiber Metal Laminates Reinforced by Hybrid Basalt and Jute Fibers, *Polym. Test.*, **75**, 205-212, 2019.
22. Ayaskant H. and Kumar K.R.V., Study on Tensile Behaviour of Carbon Jute Aluminium Fiber Metal Laminates, *Int. J. Mech. Product. Eng.*, **4**, 2016.
23. Vasumathi M. and Vela M., Effect of Alternate Metals for Use in Natural Fiber Reinforced Fiber Metal Laminates under Bending, Impact and Axial Loadings, *Procedia Engineer*, **64**, 562-570, 2013.
24. Kuan H.T.N., Cantwell W.J., Hazizan M.A., and Santulli C., The Fracture Properties of Environmental-Friendly Fiber Metal Laminates, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **30**, 499-508, 2011.
25. Krishnakumar S., Fiber Metal Laminates-The Synthesis of Metals and Composites, *Mater. Manuf. Process.*, **9**, 295-354, 1994.
26. Sugiman S. and Crocombe A.D., The Static and Fatigue Response of Metal Laminate and Hybrid Fibre-Metal Laminate Doublers Joints under Tension Loading, *Compos. Struct.*, **94**, 2937-2951, 2012.
27. Lefebvre D.R., Ahn B.K., Dillard D.A., and Dillard J.G., The Effect of Surface Treatments on Interfacial Fatigue Crack Initiation in Aluminum/Epoxy Bonds, *Int. J. Fract.*, **114**, 191-202, 2002.