



ارزیابی رفتار مکانیکی کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکترورسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری های کششی و خمشی

سپهر شریعتی راد¹، حسین ابراهیم نژاد خالجیری^{2*}، علی اکبر قادی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

2- استادیار، گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

* زنجان، صندوق پستی 45371-38791، ebrahimnezhad@znu.ac.ir، ghadi@znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان

الیاف الکترورسی شده،

کامپوزیت هیبریدی،

پلی یورتان،

خواص مکانیکی.

در این کار پژوهشی تاثیر افزودن الیاف الکترورسی شده پلی یورتان بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بررسی شد. بدین منظور، کامپوزیت های حاوی لایه های مختلف الیاف پلی یورتان (0، 1، 2، 3 و 5) و 4 لایه الیاف شیشه به صورت هیبریدی با چیدمان های متقارن ساخته شدند. سپس تحت بارگذاری های کششی و خمشی، خواص مکانیکی آن ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تحت بارگذاری کششی، کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده دارای بیشترین استحکام کششی و مدول الاستیک بود، در حالی که افزودن یک لایه الیاف الکترورسی شده پلی یورتان، به ترتیب باعث کاهش 4.5 و 32.4 درصدی این خواص نسبت به کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده شد. در مقابل، افزودن یک لایه الیاف الکترورسی شده موجب افزایش 82 درصدی انرژی جذب شده، از 4.61×10^3 kJ/m³ به 8.39×10^3 kJ/m³ شد. همچنین، بیشترین کرنش شکست، برابر با 0.051 mm/mm، در کامپوزیت حاوی 5 لایه الیاف الکترورسی شده بدست آمد که نسبت به مقدار 0.026 mm/mm در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده، 96.2 درصد افزایش نشان داد. تحت بارگذاری خمشی، بیشترین استحکام خمشی در کامپوزیت حاوی 2 لایه الیاف الکترورسی شده، با مقدار 262 MPa، حاصل شد که در مقایسه با مقدار 150 MPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده، 74.7 درصد افزایش داشت. همچنین، مدول خمشی با افزایش تعداد لایه های الیاف الکترورسی شده افزایش یافت و از 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده به 18.72 GPa در نمونه حاوی 5 لایه رسید که بیانگر افزایش 67.3 درصدی است.

Assessing the mechanical behaviour of hybrid electrospun polyurethane-glass fibers/epoxy composite under the tensile and flexural loadings

Sepehr Shariati Rad¹, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri^{1*}, Aliakbar Ghadi^{1*}

1- Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

* P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, ebrahimnezhad@znu.ac.ir, ghadi@znu.ac.ir

Keywords

Electrospun fibers,
 Hybrid composite,
 Polyurethane,
 Mechanical properties.

Abstract

In this research work, the effect of adding electrospun polyurethane fibers on the mechanical properties of epoxy/glass fiber composites was investigated. For this purpose, composites containing different layers of polyurethane fibers (0, 1, 2, 3, and 5) and 4 layers of glass fibers were fabricated in a hybrid manner with symmetric layups. Then, their mechanical properties were evaluated under tensile and flexural loadings. Under tensile loading, the composite without electrospun fibers exhibited the highest tensile strength and elastic modulus, while the addition of one layer of electrospun polyurethane fibers resulted in 4.5% and 32.4% reductions in these properties, respectively, compared with the composite without electrospun fibers. In contrast, the addition of one layer of electrospun fibers resulted in an 82% increase in absorbed energy, from 4.61×10^3 kJ/m³ to 8.39×10^3 kJ/m³. Moreover, the highest fracture strain, equal to 0.051 mm/mm, was obtained in the composite containing 5 layers of electrospun fibers, which showed a 96.2% increase compared with the value of 0.026 mm/mm for the composite without electrospun fibers. Under flexural loading, the highest flexural strength was obtained in the composite containing 2 layers of electrospun fibers, with a value of 262 MPa, which represented a 74.7% increase compared with the value of 150 MPa for the composite without electrospun fibers. Furthermore, the flexural modulus increased with increasing number of electrospun fiber layers, from 11.19 GPa in the composite without electrospun fibers to 18.72 GPa in the specimen containing 5 layers, representing a 67.3% increase.

1- مقدمه

کامپوزیت های هیبریدی با ترکیب دو یا چند نوع تقویت کننده، به عنوان رویکردی مؤثر برای دستیابی همزمان به خواص مکانیکی مطلوب و بهبود عملکرد مورد توجه قرار گرفته اند. تقویت کننده های جدید از جمله تقویت کننده های پلیمری مانند الیاف کولار¹ و پلی اتیلن² رشد و توسعه مناسبی در سال های اخیر داشته اند [1-3] که قابلیت استفاده در کامپوزیت ها بخصوص کامپوزیت های هیبریدی را دارند. رشد و توسعه فناوری های نوین منجر به تولید الیاف پلیمری جدید شده است. یکی از روش های توسعه یافته به منظور تولید الیاف پلیمری، روش الکتروریسی³ می باشد که یک روش چندمنظوره و کارآمد برای تولید الیاف بسیار نازک است [4].

فرآیند الکتروریسی به این صورت عمل می کند که یک میدان الکتریکی قوی به محلول پلیمری ویسکوز در یک لوله موئین⁴ اعمال می شود. این میدان، دافعه های بین بارهای سطحی مایع ایجاد می کند که با کشش سطحی مخالفت می کند. هنگامی که میدان الکتریکی به اندازه کافی قوی باشد، سطح محلول به شکل یک مخروط تیلور درمی آید. در یک مقدار بحرانی از میدان الکتریکی، نیروی دافعه بر کشش سطحی غلبه کرده و یک جت باردار از محلول، از نوک مخروط خارج می شود. با شتاب گرفتن و نازک شدن جت در میدان الکتریکی، دافعه شعاعی بارها باعث تقسیم جت اولیه به رشته های متعدد می شود که این فرآیند پاشش⁵ نام دارد. این جت ها سپس جامد شده و به صورت الیاف جامد روی یک جمع کننده الکتریکی⁶ قرار می گیرند [5,6].

صغقی و همکاران [7] تاثیر نایلون 6.6 الکتروریسی شده بر مود I و II شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه را بررسی کردند. بدین منظور در ابتدا این محققان نایلون 6.6 با غلظت وزنی 14 درصد در حلال اسید فورمیک⁷/کلروفرم⁸ با نسبت 50:50 v/v حل کردند. سپس با اعمال ولتاژ 23 kV، سرعت تزریق 0.005 ml/min، قطر نازل 0.8 mm و فاصله نازل تا جمع کننده 10 cm در مدت زمان 60 min، فرآیند الکتروریسی نایلون 6.6 را انجام دادند. قطر الیاف الکتروریسی شده در این کار پژوهشی، 150 nm گزارش شد. نتایج بدست آمده نشان داد افزودن الیاف الکتروریسی شده نایلون 6.6 به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه باعث شد تا مود شکست I و II در این کامپوزیت، به ترتیب، 62 و 109 درصد بهبود یابد. نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپی نشان داد که نانوالیاف نایلون 6.6 با مکانیزم پل زنی باعث بهبود خواص مود I و II شکست در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه شده است.

نگوین و همکاران [8] نانوالیاف پلی استایرن با محدوده قطر 40-80 nm را به روش الکتروریسی سنتز کردند و تاثیر آن بر مود I تافنس شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف پلی استایرن را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن 0.07 wt.% نانوالیاف استایرن به پلیمر اپوکسی باعث شد تا فاکتور تمرکز تنش (K_{IC}) از $0.631 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به $0.839 \text{ MPa.m}^{1/2}$ افزایش یابد که بهبود 42.2 درصدی را نشان داد. همچنین تافنس شکست بین لایه های اولیه⁹ و پیشرونده¹⁰ به ترتیب به میزان 43 و 47 درصد بهبود یافتند. نتایج آنالیز میکروسکوپی در این کار پژوهشی نشان داد که بیرون کشیدگی¹¹ الیاف در حین لایه لایه شدگی اولیه¹² باعث بهبود تافنس شکست شده است.

نیسیانی و همکاران [9] تاثیر الیاف الکتروریسی شده و اصلاح شده پلی-اکریلونیتریل¹³ بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی الیاف کربن را بررسی کردند. در این کار پژوهشی از پلیمر اصلاح شده اکریلونیتریل متصل شده به گلیسیدیل متااکریلات¹⁴ استفاده و الکتروریسی شد که در بین لایه های الیاف کربن در کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن قرار داده شد. نتایج گزارش شده نشان داد که گلیسیدیل متااکریلات نه تنها باعث بهبود استحکام کششی نانوالیاف الکتروریسی پلی اکریلونیتریل شده است، بلکه باعث افزایش قطر الیاف نیز شده است. افزودن پلیمر گلیسیدیل متااکریلات باعث شده است که اندرکنش بین الیاف اکریلونیتریل و زمینه اپوکسی بهبود یابد که باعث بهبود 8، 9، 6 و 8 درصدی در خواص استحکام کششی، استحکام برشی، استحکام خمشی و جذب انرژی ضربه کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن حاوی الیاف اکریلونیتریل بدون اصلاح شده است. همچنین نسبت به کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن بدون نانوالیاف اکریلونیتریل، خواص ذکر شده به ترتیب، 28، 41، 32 و 21 درصد بهبود یافتند.

دانگ و همکاران [10] در ابتدا الیاف پلی لاکتیک اسید الکتروریسی شده را ساخته و سپس کامپوزیت اپوکسی/الیاف پلی لاکتیک اسید ساخته و خواص مکانیکی آن بررسی شد. میزان الیاف اضافه شده به زمینه اپوکسی، 3، 5 و 10 درصد وزنی بود. نتایج بدست آمده نشان داد که مدول خمشی در نمونه های حاوی 5 و 10 درصد وزنی الیاف الکتروریسی شده پلی لاکتیک اسید، به ترتیب 50.8 و 24 درصد بهبود یافت. استحکام خمشی این دو کامپوزیت نیز روند بهبود نشان داد که به ترتیب 31.6 و 4.8 درصد گزارش شد. نتایج آنالیز میکروسکوپی فصل مشترک قوی بین الیاف پلی لاکتیک اسید و زمینه اپوکسی را نشان داد. این محققان بیان کردند که نانوالیاف الکتروریسی شده با دارا بودن ساختار شبکه ای مانع مهمی در تحرک زنجیره های مولکولی اپوکسی می باشد که باعث بهبود خواص حرارتی زمینه اپوکسی شده است.

یکی از گروه های بزرگ پلیمری بسیار پرکاربرد در صنعت، خانواده پلیمرهای پلی یورتان می باشد. در میان این گروه، پلی یورتان ترموپلاستیک¹⁵ رفتاری بین یک الاستومر و یک پلاستیک را دارا می باشد. این ویژگی باعث شده است تا پلی یورتان ترموپلاستیک علاوه بر خاصیت ارتجاعی، خواص مکانیکی مناسبی از خود در مقایسه با الاستومرها نشان دهد [11,12]. بررسی های انجام شده نشان می دهد که الکتروریسی پلی یورتان ترموپلاستیک یکی از موضوعات بسیار نوین برای تولید مواد جدید برای کاربردهای جدید می باشد. استفاده از الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک به عنوان تقویت کننده در سازه های کامپوزیتی موضوعی است که تاکنون بررسی نشده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، تولید الیاف پلی یورتان الکتروریسی و استفاده از آن به عنوان تقویت کننده دوم در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه می باشد. لازم به ذکر است الیاف شیشه و پلی یورتان ترموپلاستیک با چیدمان های متفاوت در کامپوزیت زمینه اپوکسی قرار گرفته و خواص مکانیکی آن ها تحت بارگذاری های کششی و خمشی مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد لایه های الیاف پلی یورتان الکتروریسی شده در کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان ترموپلاستیک متغیر در نظر گرفته شده در این کار پژوهشی می باشد.

⁹ Interlaminar fracture toughness¹⁰ Propagation interlaminar fracture toughness¹¹ Pulling out¹² Delamination¹³ Polyacrylonitrile¹⁴ Glycidyl methacrylate¹⁵ Thermoplastic polyurethane¹ Kevlar² Polyethylene³ Electrospinning⁴ Spinneret⁵ Spraying⁶ Collector⁷ Formic acid⁸ Chloroform

2- بخش تجربی

1-2- معرفی مواد

در این پژوهش از الیاف شیشه کلاس E با چگالی سطحی 200 g/m^2 و با بافت ساده ساخت شرکت لینتک¹ کشور چین استفاده شده است. همچنین از رزین اپوکسی با نام تجاری KER 828 ساخت شرکت کومهو² (کره جنوبی) و هاردنر آمینی تتا³ خریداری شده از شرکت شیمی افسون استفاده شده است. پلیمر پلی‌یورتان ترموپلاستیک تهیه شده برای این پژوهش TPU با گرید 1190 ساخت شرکت WANHUA Wanthane واقع در چین است. به منظور حل کردن پلی‌یورتان ترموپلاستیک از حلال دی‌متیل‌فرمامید استفاده شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این حلال با فرمول شیمیایی $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ امکان حل کردن پلی‌یورتان ترموپلاستیک به منظور استفاده در فرآیند الکترووریسی به منظور ساخت الیاف با اندازه، شکل و زمان تبخیر مناسب را دارد.

2-2- فرآیند الکترووریسی الیاف پلی‌یورتان ترموپلاستیک

در ابتدا نیاز است تا محلول مورد نیاز برای ساخت الیاف الکترووریسی که شامل گرانول پلی‌یورتان و حلال دی‌متیل‌فرمامید DMF است، تهیه شود. بدین منظور، گرانول‌ها با نسبت 1 به 5 با حلال (1 gr پلیمر و 5 gr حلال) توسط دستگاه همزن در دمای اتاق به مدت 12 ساعت داخل بشر شیشه‌ای هم زده شدند تا محلول پلیمری یک دست ساخته شود. در قدم بعدی محلول پلیمری به حجم 5 mL با سرنگ اضافه و در داخل دستگاه الکترووریسی قرار داده شد. برای شروع ساخت الیاف، پارامترهای مختلف دستگاه تنظیم شد که شامل ولتاژ 14 kV، نرخ پاشش 3 mL/h، سرعت چرخش جمع‌کننده 500 rpm، فاصله نوک نازل تا جمع‌کننده 20 cm و گیج یا اندازه سوزن 18 بوده است که در این حالت جت به خوبی تشکیل و الیاف به درستی روی ورقه آلومینیومی جمع‌کننده در دمای اتاق جمع‌آوری شدند (شکل 1 الف)). بعد از اتمام فرآیند الکترووریسی ورقه‌های آلومینیومی حاوی الیاف در دمای محیط قرار داده شدند تا مقادیر ناچیز حلال به طور کامل تبخیر شود تا برای استفاده در زمینه کامپوزیت مناسب باشد [14,13].

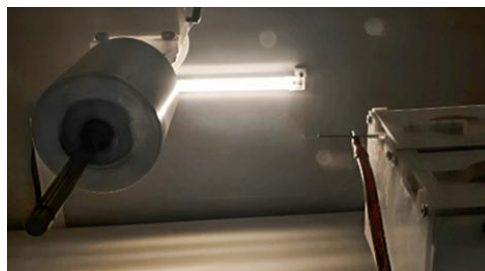
2-3- ساخت کامپوزیت

مرحله بعدی پژوهش، ساخت کامپوزیت زمینه اپوکسی ساده و کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف الکترووریسی می‌باشد. ابتدا الیاف شیشه در ابعاد $22 \times 12 \text{ cm}^2$ به تعداد 4 عدد برش داده شدند. در قدم بعدی نسبت الیاف شیشه و زمینه اپوکسی پیش از افزودن لایه‌های الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان، به ترتیب 50:50 wt.% در نظر گرفته شد. نسبت رزین به هاردنر برابر با 100 به 10 درصد وزنی می‌باشد. بعد از انجام این اقدامات، الیاف شیشه و اپوکسی آماده برای ساخت کامپوزیت شدند که نمونه اول، کامپوزیت حاوی الیاف شیشه (4 لایه الیاف) و بدون الیاف الکترووریسی شده بود که به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد.

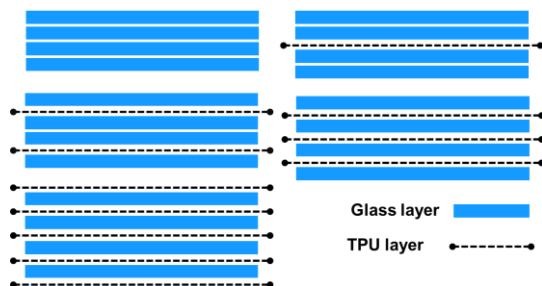
نمونه‌های بعدی به همین شکل با اضافه کردن الیاف الکترووریسی شده که به ترتیب حاوی 1، 2، 3 و 5 لایه الیاف پلی‌یورتان می‌باشد که مطابق شکل 1 (ب)، لایه‌چینی و ساخته شدند [15]. هر نمونه بعد از مدت 12 ساعت از قالب خارج و به مدت 7 روز در دمای اتاق قرار گرفتند تا فرآیند پخت آن کامل شود.

2-4- مشخصه‌یابی

نمونه‌های آزمون کشش با توجه به استاندارد ASTM D3039 و با ابعاد $200 \times 20 \text{ mm}^2$ بریده و با سرعت کشش 2 mm/min کشیده شدند. همچنین، نمونه‌های آزمون خمش با توجه به استاندارد ASTM D790 با ابعاد $100 \times 15 \text{ mm}^2$ آماده شده و با سرعت 1 mm/min آزمایش شدند. ضخامت نمونه‌های ساخته شده 0.8 mm می‌باشد که طول سنج در آزمون خمش 32 برابر آن در نظر گرفته شد. به منظور بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی- گسیل میدانی⁴ (FESEM) استفاده شد.



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)

Fig. 1. The Fabrication process of composites: a) electrospinning process of thermoplastic polyurethane; b) designed different stacking sequences in hybrid glass fibers-TPU fibers/epoxy composites; c) prepared samples

شکل 1 فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها: الف) فرآیند الکترووریسی پلی‌یورتان ترموپلاستیک، ب) طراحی چیدمان‌های مختلف در کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف TPU، ج) نمونه‌های آماده شده

³ Triethylenetetramine⁴ Field emission scanning electome microscope¹ Lintex² Kumhu

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی رفتار مکانیکی تحت بارگذاری کششی

شکل 2 نمودار تنش-کرنش مربوط به کامپوزیت های اپوکسی/الیاف شیشه حاوی لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان را نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان داده های ارزشمندی از رفتار تنش-کرنش کامپوزیت های ساخته شده بدست آورد که تاثیر هیبرید کردن الیاف الکتروریسی شده با الیاف شیشه را نشان می دهد. این داده های ارزشمند شامل استحکام کششی، کرنش شکست، مدول الاستیک و مساحت زیر نمودار تنش-کرنش می باشند. خلاصه نتایج حاصل از نمودارهای تنش-کرنش در جدول 2 آورده شده است. شکل 3 براساس داده های بدست آمده از شکل 2 و جدول 1 رسم شده است. براساس شکل 3 می توان مشاهده کرد که استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف پلی یورتان الکتروریسی شده در حدود 312 MPa می باشد. افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده باعث شده است تا میزان استحکام کششی اندکی کاهش یافته و به مقدار 298 MPa برسد. این روند کاهشی با اضافه شدن دو لایه الیاف الکتروریسی بیشتر شده، به طوری که میزان استحکام کششی به 262 MPa رسید.

با مقایسه کامپوزیت حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده با دیگر کامپوزیت ها می توان دریافت که کمترین میزان استحکام کششی در این کامپوزیت بدست آمده است. استحکام کششی در نمونه حاوی سه لایه الیاف الکتروریسی شده تقریباً اختلاف اندکی با استحکام کششی کامپوزیت حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی دارد. در نمونه حاوی 5 لایه الیاف الکتروریسی شده استحکام کششی مجدد روند نزولی نشان داده و به مقدار 281 MPa رسید.

این رفتار غیر یکنواخت را می توان به تغییر در چیدمان لایه ای و میزان حضور الیاف الکتروریسی شده در ناحیه بین لایه های الیاف شیشه نسبت داد. حضور لایه های الکتروریسی شده می تواند ضخامت ناحیه غنی از رزین و مسیر انتقال بار بین لایه های تقویتی را تغییر دهد. این موضوع می تواند بر میزان انتقال تنش از زمینه به الیاف شیشه و در نتیجه بر استحکام کششی کامپوزیت اثرگذار باشد. در مطالعات انجام شده بر کامپوزیت های شیشه/اپوکسی حاوی لایه های الکتروریسی شده نیز نشان داده شده است که حضور ساختارهای نانو یا میکروالیاف الکتروریسی شده می تواند ناحیه غنی از رزین بین لایه های تقویتی را تغییر داده و بر پاسخ مکانیکی کامپوزیت اثر بگذارد [17,16]. از طرف دیگر، پلی یورتان ترموپلاستیک دارای رفتار الاستومری و استحکام پایین تری نسبت به زمینه اپوکسی و الیاف شیشه است [18]. بنابراین افزایش مقدار آن در فصل مشترک بین لایه های الیاف شیشه می تواند موجب کاهش ظرفیت انتقال بار و در نتیجه کاهش استحکام کششی شود.

مطالعات پیشین نشان می دهد که حضور لایه های نانوالیافی در کامپوزیت های شیشه/اپوکسی می تواند ساختار ناحیه بین لایه ای، مسیر انتشار ترک و پاسخ مکانیکی کامپوزیت را تغییر دهد [16,7]. از سوی دیگر، شبکه الیاف الکتروریسی شده می تواند با ایجاد پل زنی، بیرون کشیدگی و شکست الیاف و همچنین انحراف یا پین شدن ترک، مسیر انتشار ترک را تغییر داده و انرژی مورد نیاز برای شکست را تحت تاثیر قرار دهد [19]. بنابراین، اثر لایه های الکتروریسی شده بر استحکام تنها تابع تعداد لایه ها نبوده و به نحوه توزیع آن ها، میزان نفوذ رزین و برهم کنش آن ها با زمینه و الیاف شیشه نیز وابسته است. این عوامل می توانند توضیحی برای افزایش جزئی استحکام در نمونه حاوی سه لایه و وجود رفتار غیر یکنواخت در استحکام کششی باشد.

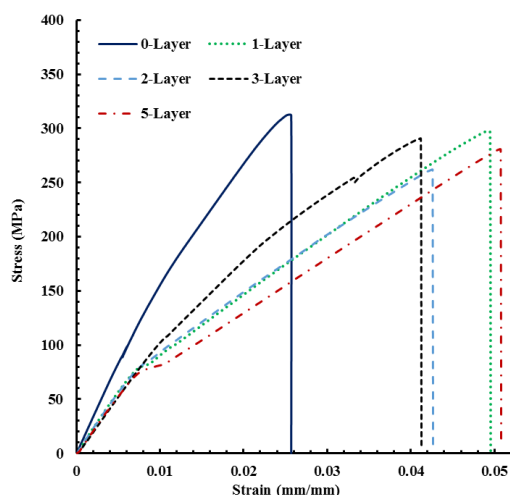


Fig. 2. The stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 2 نمودار تنش-کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

جدول 1 خلاصه نتایج حاصل از نمودار تنش-کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

Table 1 The summary results obtained from stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (mm/mm)	مدول الاستیک (GPa)	انرژی جذب شده (10^3 kJ/m^3)
0-Layer	312	0.026	16.93	4.61
1-Layer	298	0.050	11.44	8.39
2-Layer	262	0.043	11.31	6.43
3-Layer	291	0.041	10.42	6.99
5-Layer	281	0.051	10.52	7.90

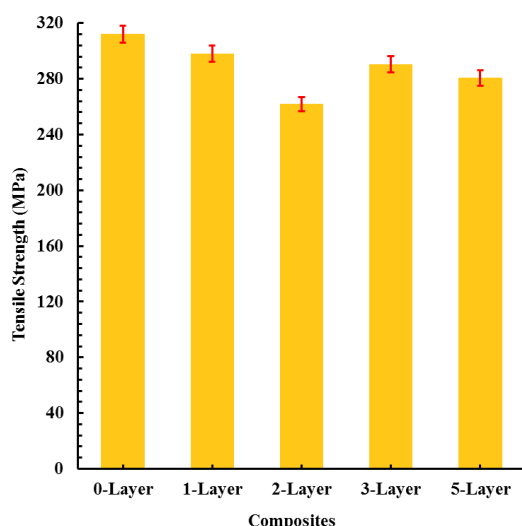


Fig. 3. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the fracture strength of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 3 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان بر استحکام شکست کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

شکل 5 کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی تعداد مختلفی از لایه‌های الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده دارای کرنش شکست 0.026 mm/mm است. با افزودن یک لایه الیاف الکترورسی شده، کرنش شکست به 0.050 mm/mm افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه تغییر شکل‌پذیری کامپوزیت است. این افزایش را می‌توان به ماهیت الاستومری پلی‌یورتان و قابلیت تغییر شکل بالاتر آن نسبت به اجزای سخت‌تر کامپوزیت نسبت داد. حضور شبکه الیاف پلی‌یورتان در ناحیه بین‌لایه‌ای می‌تواند با ایجاد یک ناحیه انعطاف‌پذیرتر، امکان تحمل تغییر شکل بیشتری را پیش از شکست فراهم کند. مطالعات انجام‌شده بر کامپوزیت‌های حاوی لایه‌های الکترورسی شده نیز نشان داده‌اند که حضور نانوالیاف در ناحیه بین‌لایه‌ای می‌تواند رفتار تغییر شکل و مکانیزم انتشار ترک را تحت تأثیر قرار دهد [8,7]. با افزایش تعداد لایه‌های الیاف الکترورسی شده به دو و سه لایه، کرنش شکست به ترتیب به 0.043 mm/mm و 0.041 mm/mm کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به تغییر در ساختار و شرایط انتقال بار در ناحیه بین‌لایه‌ای نسبت داد. افزایش تعداد لایه‌های الکترورسی شده می‌تواند مقدار فاز پلی‌یورتان افزایش داده و در نتیجه نحوه توزیع تنش و انتقال بار بین زمینه اپوکسی و الیاف شیشه را تغییر دهد. با افزایش تعداد لایه‌ها به 5 لایه، کرنش شکست مجدداً افزایش یافته و به 0.051 mm/mm رسید که بیشترین مقدار در میان نمونه‌های مورد بررسی است. این افزایش مجدد می‌تواند ناشی از افزایش سهم فاز انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان و تغییر در رفتار تغییر شکل ناحیه بین‌لایه‌ای باشد. در مجموع، رفتار غیر یکنواخت کرنش شکست در این کامپوزیت‌های هیبریدی را می‌توان حاصل برهم‌کنش هم‌زمان بین ماهیت الاستومری الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان، تعداد و چیدمان لایه‌های الکترورسی شده، ساختار بین‌لایه‌ای و شرایط انتقال بار دانست [8,7].

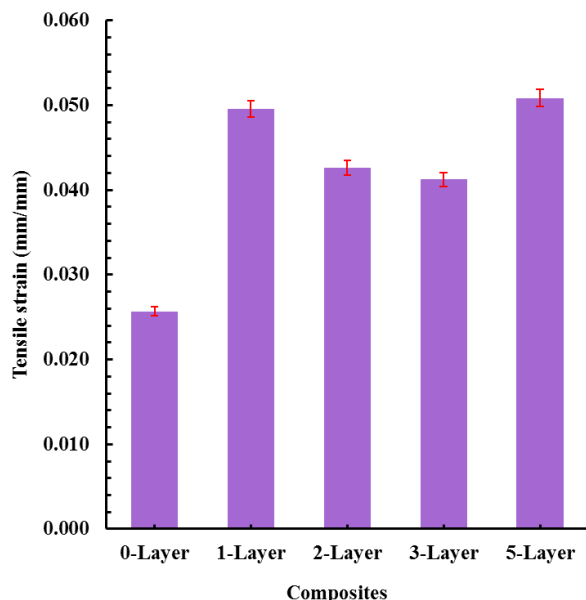


Fig. 5. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the fracture strain of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites under the tensile loading

شکل 5 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان بر کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان تحت بارگذاری کششی

شکل 4 مدول الاستیک در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی لایه‌های مختلف الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. براساس این شکل و جدول 1 می‌توان دریافت که نمونه کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با مدول الاستیک 16.93 GPa دارای بیش‌ترین مدول الاستیک در مقایسه با کامپوزیت‌های هیبریدی است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی‌یورتان به دلیل ماهیت الاستومری خود، مدول الاستیک بسیار پایین‌تری در مقایسه با زمینه اپوکسی و الیاف شیشه دارند؛ بنابراین، جایگزینی بخشی از ساختار سخت کامپوزیت با لایه‌های الکترورسی شده پلی‌یورتان می‌تواند سختی مؤثر کامپوزیت را کاهش دهد. این رفتار با نتایج گزارش‌شده برای کامپوزیت‌های حاوی لایه‌های الکترورسی شده نیز مطابقت دارد، که در آن کاهش سختی یا مدول در اثر حضور فازهای پلیمری نرم‌تر در ساختار کامپوزیت به تفاوت مدول اجزای تشکیل‌دهنده و تغییر شرایط انتقال بار نسبت داده شده است [8,7]. نمونه‌های دارای یک و دو لایه الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان دارای مدول الاستیک مشابهی هستند که به ترتیب برابر با 11.44 GPa و 11.31 GPa می‌باشند. این مقادیر نشان‌دهنده کاهش 32.4 و 33.2 درصدی مدول الاستیک نسبت به کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده هستند. با افزایش تعداد لایه‌های الیاف پلی‌یورتان، مدول الاستیک همچنان در محدوده مقادیر پایین‌تر قرار گرفته و به ترتیب به 10.42 GPa و 10.52 GPa برای کامپوزیت‌های دارای سه و پنج لایه الیاف الکترورسی شده می‌رسد. این روند کاهشی را می‌توان به افزایش سهم فاز پلی‌یورتان با مدول پایین و تغییر در شرایط انتقال بار در ساختار چندلایه نسبت داد. در واقع، از آنجا که بار اعمالی در راستای کشش باید از زمینه اپوکسی و ناحیه بین‌لایه‌ای به الیاف شیشه منتقل شود، افزایش سهم یک فاز الاستومری در ساختار می‌تواند سختی مؤثر و ظرفیت انتقال بار سازه را کاهش دهد. بنابراین، این روند کاهشی را می‌توان حاصل برهم‌کنش بین اختلاف مدول اجزای تشکیل‌دهنده، مقدار فاز پلی‌یورتان و تغییر شرایط انتقال بار در ساختار هیبریدی دانست [8,7].

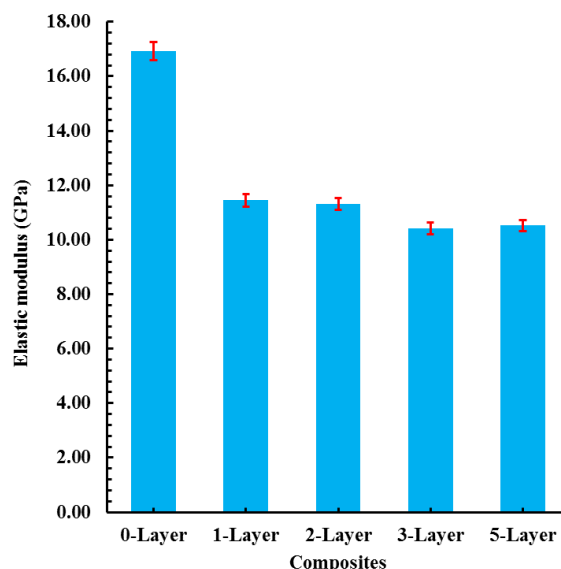


Fig. 4. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the elastic modulus of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 4 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان بر مدول الاستیک کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

2-3- بررسی رفتار مکانیکی تحت بارگذاری خمشی

شکل 7 نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی حاوی لایه های مختلف الیاف پلی یورتان الکتروریسی شده را نشان می دهد. خلاصه نتایج حاصل از این آزمون در جدول 2 آورده شده است.

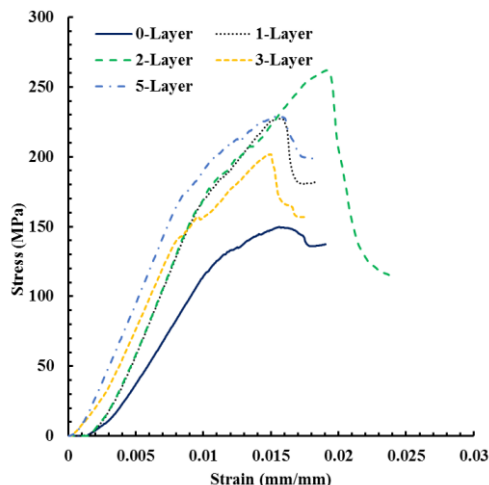


Fig. 7. The stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the flexural loading

شکل 7 نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری خمشی

جدول 2 خلاصه نتایج حاصل از نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری خمشی

Table 2 The summary results obtained from stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the flexural loading

کد نمونه	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	کرنش خمشی (mm/mm)
0-Layer	150	11.18	0.019
1-Layer	227	15.51	0.018
2-Layer	262	16.88	0.024
3-Layer	201	17.26	0.017
5-Layer	229	18.72	0.018

شکل 8 براساس داده های محاسبه شده در جدول 2 رسم شده است که نشان دهنده تغییرات استحکام خمشی بر حسب تعداد لایه های الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان می باشد. براساس این شکل، نمونه کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه دارای استحکام خمشی 150MPa می باشد. با افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده، میزان استحکام شکست افزایش یافته و به 227 MPa می رسد. این خاصیت در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده روند بهبود خود را ادامه داده و به مقدار 262 MPa می رسد. در کامپوزیت هیبریدی حاوی سه لایه الیاف الکتروریسی شده استحکام خمشی با یک کاهش در مقایسه با کامپوزیت های یک لایه و دو لایه در استحکام خمشی مواجه شد، به طوری که مقدار آن به 201MPa رسید. در نمونه حاوی 5 لایه الیاف الکتروریسی شده دوباره استحکام خمشی بهبود یافته و به 229 MPa رسید. با توجه به داده های بدست آمده می توان دریافت که کامپوزیت حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان و بدون الیاف الکتروریسی شده به ترتیب، بیشترین و کمترین میزان استحکام خمشی در مقایسه با دیگر کامپوزیت های هیبریدی داشتند.

شکل 6 میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت های هیبریدی مورد مطالعه قبل از شکست تحت بارگذاری کششی را نشان می دهد. براساس این شکل کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان با انرژی شکست $4.61 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ کمترین میزان انرژی جذب شده تا قبل از شکست را در مقایسه با کامپوزیت های هیبریدی مورد مقایسه دارد. با توجه به شکل 6 می توان دریافت که کامپوزیت هیبریدی حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده بیشترین انرژی جذب شده قبل از شکست تحت بارگذاری کششی را دارد. به طوری که در مقایسه با نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده، به مقدار 82.0 درصد بهبود در انرژی جذب شده مشاهده می شود. در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده یک افت محسوسی در جذب انرژی نسبت به نمونه حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی مشاهده می شود. در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده میزان جذب انرژی بدست آمده برابر با $6.43 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ می باشد که 23.4 درصد کاهش نسبت به نمونه حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده و 21.7 درصد بهبود نسبت به نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده را نشان می دهد. با افزایش تعداد لایه ها به 3 و 5 لایه روند انرژی جذب شده به صورت افزایشی می باشد، به طوری که در این نمونه ها انرژی جذب شده به ترتیب $6.99 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ و $7.90 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ می باشند.

براساس بررسی های انجام شده، انرژی جذب شده وابسته به تنش شکست و کرنش شکست می باشد. با توجه به این که استحکام شکست نمونه حاوی یک لایه بسیار نزدیک به استحکام شکست نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده می باشد، اما کرنش شکست این نمونه در مقایسه با کرنش شکست نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده، تقریباً دو برابر می باشد. همین امر باعث شده است، که انرژی شکست در این نمونه در مقایسه با دیگر کامپوزیت ها بیشترین مقدار باشد. این امر می تواند نشان دهنده بهبود رفتار شکست در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه تنها با افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده (بدون تغییر ضخامت) باشد [20].

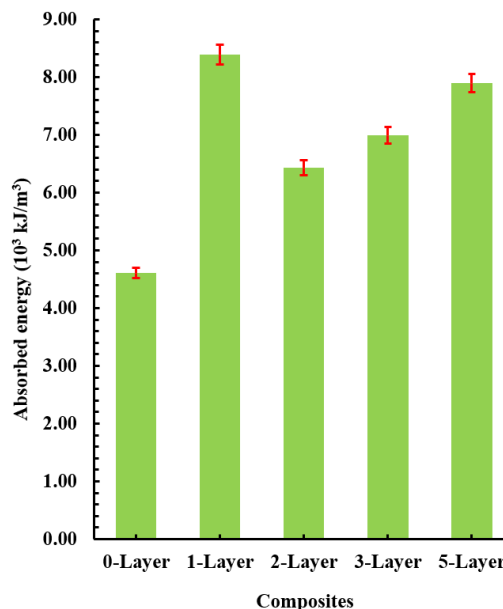


Fig. 6. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the absorbed energy of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 6 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان بر انرژی جذب شده کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

کششی نیست و می‌توان انتظار داشت که یک لایه الکترووریسی شده در بارگذاری خمشی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بارگذاری کششی از خود نشان دهد.

شکل 9 مدول خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکترووریسی شده دارای مدول خمشی 11.18 GPa می‌باشد. در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی یک، دو، سه و پنج لایه الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان مدول خمشی به ترتیب 15.51، 17.26، 16.88 و 18.72 GPa می‌باشد. این بدین معنی است که با افزایش تعداد لایه‌های الیاف الکترووریسی شده، مدول خمشی نیز بهبود یافته و در نهایت در نمونه حاوی پنج لایه الیاف الکترووریسی شده به بیشترین مقدار خود یعنی 18.72 GPa می‌رسد که نسبت به مقدار 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترووریسی شده، نشان‌دهنده افزایش 67.3 درصدی است. با مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدول الاستیک و مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده می‌توان دریافت که الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان با دارا بودن خاصیت الاستومری پلی‌یورتان باعث بهبود خاصیت برگشت‌پذیری در بارگذاری‌های خمشی می‌شود. این رفتار را می‌توان به تفاوت مکانیزم انتقال بار و تغییر شکل کامپوزیت در بارگذاری خمشی نسبت داد. در آزمون خمشی، پاسخ کلی نمونه تنها به سختی اجزای تشکیل‌دهنده وابسته نیست، بلکه رفتار ناحیه بین‌لایه‌ای و نحوه توزیع تنش در هنگام اعمال بار نیز نقش مهمی دارد. شبکه الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان می‌تواند در ناحیه بین‌لایه‌ای با زمینه اپوکسی برهم‌کنش داشته و تغییر شکل موضعی و انتشار آسیب را تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که حضور لایه‌های الکترووریسی شده در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی می‌تواند رفتار مکانیکی و پاسخ بین‌لایه‌ای کامپوزیت را تغییر دهد.

بنابراین، افزایش تدریجی مدول خمشی با افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی شده را می‌توان به تغییر در رفتار ناحیه بین‌لایه‌ای، توزیع تنش و محدود شدن تغییر شکل موضعی در ساختار هیبریدی نسبت داد. همچنین، ماهیت الاستومری پلی‌یورتان امکان تحمل تغییر شکل و بازتوزیع تنش در ناحیه بین‌لایه‌ای را فراهم می‌کند و می‌تواند از تمرکز شدید تغییر شکل در یک ناحیه جلوگیری کند. در نتیجه، اگرچه پلی‌یورتان به‌تنهایی دارای سختی کمتری نسبت به الیاف شیشه است، حضور کنترل‌شده آن در ساختار چندلایه می‌تواند پاسخ خمشی کل کامپوزیت را از طریق تغییر رفتار بین‌لایه‌ای تحت تأثیر قرار دهد. افزایش پیوسته مدول خمشی از 11.18 GPa در نمونه بدون الیاف الکترووریسی شده به 18.72 GPa در نمونه حاوی پنج لایه نیز نشان می‌دهد که در شرایط آزمون حاضر، افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی شده موجب تغییر مطلوب پاسخ خمشی کامپوزیت شده است. از این رو، رفتار مدول خمشی را نمی‌توان صرفاً بر اساس مدول پایین‌تر پلی‌یورتان نسبت به الیاف شیشه تفسیر کرد، بلکه باید نقش هم‌زمان چیدمان لایه‌ای، رفتار بین‌لایه‌ای، انتقال تنش و قابلیت تغییر شکل پلی‌یورتان را نیز در نظر گرفت [21-23].

شکل 10 رفتار کرنشی کامپوزیت‌های هیبریدی و غیرهیبریدی ساخته شده تحت بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان دریافت که میزان کرنش خمشی قبل از شکست در نمونه‌های حاوی یک، سه و پنج لایه تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با نمونه بدون الیاف الکترووریسی شده نشان نداد. این نتایج می‌تواند فرضیه بهبود رفتار برگشت‌پذیری در کامپوزیت‌های ساخته شده را تایید نماید.

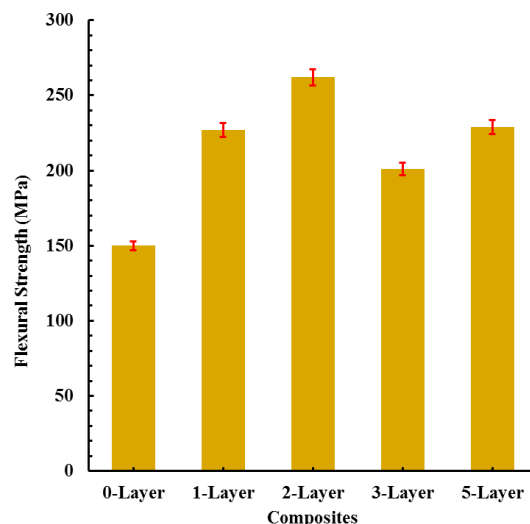


Fig. 8. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural strength of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 8 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

با نگاه عمیق‌تر به نتایج بدست آمده، دو رفتار قابل توجه در خواص مکانیکی مشاهده می‌شود. با تغییر چیدمان در لایه‌چینی کامپوزیت‌های هیبریدی روند بهبود استحکام خمشی تغییر می‌کند. همچنین با مقایسه داده‌های استحکام کششی می‌توان دریافت که لایه‌های الیاف الکترووریسی شده در بارگذاری عمود بر این الیاف مقاومت خوبی از خود نشان داده، اما در بارگذاری کششی چنین رفتاری مشاهده نمی‌شود.

این تفاوت در پاسخ کامپوزیت تحت بارگذاری‌های مختلف را می‌توان به نقش متفاوت لایه‌های الکترووریسی‌شده در انتقال بار و کنترل آسیب نسبت داد. در بارگذاری خمشی، ایجاد تنش‌های کششی و فشاری در مقطع کامپوزیت موجب می‌شود نواحی بین‌لایه‌ای و برهم‌کنش میان لایه‌های تقویتی نقش مهمی در آغاز و انتشار آسیب داشته باشند. در این شرایط، شبکه الیاف الکترووریسی‌شده می‌تواند با ایجاد برهم‌کنش با زمینه و ترک‌های در حال رشد، موجب تغییر مسیر انتشار ترک و افزایش مقاومت در برابر گسترش آسیب شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده از لایه‌های الیافی الکترووریسی‌شده در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی می‌تواند با فعال کردن مکانیزم‌هایی مانند پل‌زنی الیاف، انحراف مسیر ترک و جلوگیری از گسترش سریع آسیب، رفتار بین‌لایه‌ای کامپوزیت را بهبود دهد [7، 8]. در مقابل، در بارگذاری کششی، بخش عمده بار در راستای الیاف شیشه و درون صفحه کامپوزیت منتقل می‌شود و بنابراین ظرفیت تحمل بار بیشتر به عملکرد الیاف شیشه و انتقال مؤثر تنش از زمینه به این الیاف وابسته است. در این حالت، حضور فاز پلی‌یورتان با ماهیت الاستومری و انعطاف‌پذیری بالاتر می‌تواند انتقال مستقیم بار به الیاف شیشه را تحت تأثیر قرار دهد و الزاماً به افزایش استحکام کششی منجر نشود. از سوی دیگر، افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی‌شده می‌تواند نحوه توزیع این فاز در ساختار چندلایه و برهم‌کنش آن با لایه‌های شیشه و زمینه اپوکسی را تغییر دهد. بنابراین، اثر آن بر خواص مکانیکی به نوع و جهت بارگذاری وابسته خواهد بود. از این جهت، افزایش مقاومت در برابر آسیب بین‌لایه‌ای یا بهبود استحکام خمشی لزوماً به معنای افزایش استحکام

گذاشته و الیاف با کیفیت مطلوب را ندهد. بنابراین با انتخاب دقیق عامل های تاثیرگذار می توان از تشکیل این زائده ها جلوگیری نمود.

با نگاه دقیق تر به تصویر میکروسکوپی الیاف الکترووریسی شده می توان دریافت که سطح الیاف الکترووریسی شده کاملاً صاف نمی باشد و اندکی زبری در سطح دیده می شود. وجود زبری سطح باعث ایجاد اتصال مناسب بین زمینه اپوکسی و الیاف الکترووریسی شده می شود. به عبارت دیگر، وجود سطح ناصاف در حین ساخت کامپوزیت باعث می شود تا زمینه مایع آن سطح را خیس نماید و پس از فرآیند پخت باعث تشکیل قفل های مکانیکی² شود [24]. تشکیل این قفل های مکانیکی باعث بهبود چسبندگی الیاف به زمینه و امکان انتقال مناسب تر بار به الیاف شود.

شکل 12 آنالیز میکروسکوپی از سطح مقطع شکست کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان الکترووریسی شده را نشان می دهد. در این شکل، برای الیاف شیشه و پلی یورتان، مکانیزم شکست الیاف، پدیده بیرون کشیدگی الیاف و همچنین عبور ترک از میان الیاف برای الیاف شیشه مشاهده می شود. شکست الیاف نشان دهنده مشارکت الیاف در انتقال و تحمل بار اعمال شده تا رسیدن به نقطه شکست است. همچنین، بیرون کشیدگی الیاف و تغییر مسیر ترک در ساختار کامپوزیت از جمله مکانیزم هایی هستند که می توانند با افزایش مسیر انتشار ترک و مصرف انرژی بیشتر در فرآیند شکست، بر رفتار شکست و قابلیت جذب انرژی کامپوزیت اثرگذار باشند. با نگاه دقیق تر به شکل 12، لایه الکترووریسی شده قرار گرفته بین لایه های الیاف شیشه نیز قابل مشاهده است. در ناحیه مورد بررسی، نشانه مشخصی از جدایش گسترده بین لایه ای در فصل مشترک لایه الیاف شیشه و لایه الکترووریسی شده مشاهده نمی شود. این مشاهده می تواند بیانگر چسبندگی مناسب در این ناحیه باشد که احتمالاً به بهم کنش مناسب میان زمینه اپوکسی و الیاف الکترووریسی شده مربوط است [21,20]. بنابراین، شکست مشاهده شده را نمی توان صرفاً به جدایش بین لایه ای نسبت داد، بلکه مجموعه ای از مکانیزم های شکست شامل شکست الیاف، بیرون کشیدگی الیاف و عبور یا تغییر مسیر ترک در ساختار کامپوزیت در فرآیند شکست نقش دارند.

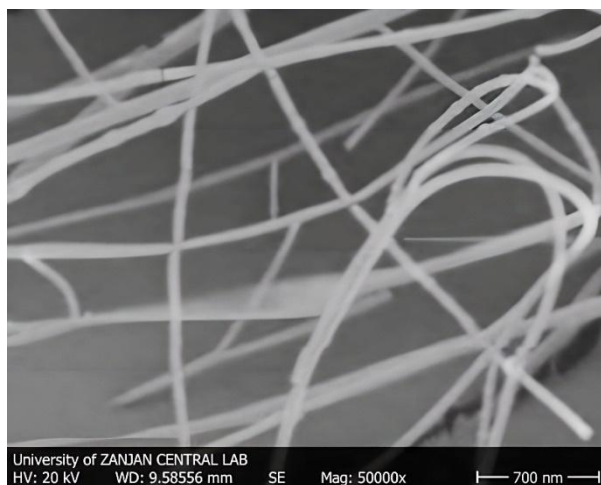


Fig. 11. The FESEM analysis from electrospun polyurethan fibers for using in hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 11 آنالیز FESEM از الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان به منظور استفاده در کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

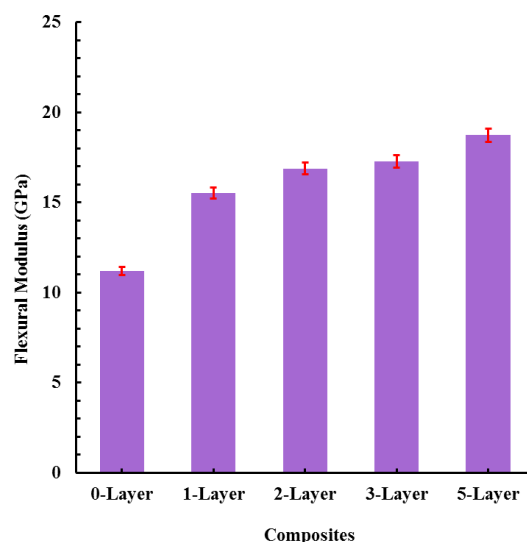


Fig. 9. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural modulus of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 9 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان بر مدول خمشی کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

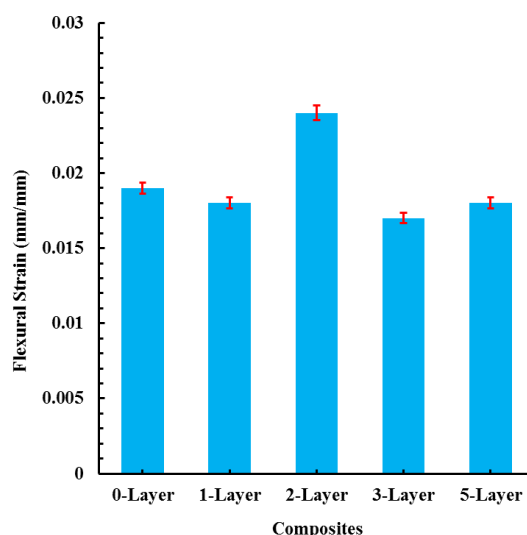


Fig. 10. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural strain of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 10 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان بر کرنش خمشی کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

3-3- بررسی میکروساختاری

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از الیاف پلی یورتان الکترووریسی شده است. با توجه به این شکل قطر الیاف الکترووریسی شده در محدوده 50-100 nm اندازه گیری شد. میانگین قطر الیاف اندازه گیری شده 64 nm با انحراف معیار 12 nm می باشد. همچنین میانه اندازه قطر الیاف در حدود 61 nm می باشد. این تصویر نشان می دهد در حین فرآیند سنتز الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان، زائده های کروی شکل¹ تشکیل نشده است. تشکیل این زائده ها می تواند بر فرآیند سنتز الیاف الکترووریسی شده تاثیر

¹ Bead

² Mechanical locks

همچنین، با استفاده از این آنالیز مشخص شد که شکست الیاف، بیرون کشیدگی الیاف و عبور ترک از میان الیاف، از جمله مکانیزم های مشاهده شده در فرآیند شکست این کامپوزیت های هیبریدی بودند.

5- منابع

- [1] Raju, A., Shanmugaraja, M., "Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 9291-9296, 2021.
- [2] Ebrahimnezhad Khaljiri, H., Eslami Farsani, R., Khorsand, H., Abbas Banaie, K., "Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [3] Singh, J., Kumar, M., Kumar, S., Mohapatra, S. K., "Properties of glass-fiber hybrid composites: a review," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 56, No. 5, pp. 455-469, 2017.
- [4] Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Experimental investigation of the synthetic polymeric nanofibers prepared via electrospinning," In *Electrospun Nanofibres*, CRC Press, Boca Raton, pp. 56-77, 2023.
- [5] Xue, J., Wu, T., Dai, Y., Xia, Y., "Electrospinning and electrospun nano fibers : methods, materials, and applications," *Chemical Reviews*, Vol. 119, No. 8, pp. 5298-5415, 2019.
- [6] Al-abduljabbar, A., Farooq, I., "Electrospun polymer nanofibers: processing, properties, and applications," *Polymers*, Vol. 15, No. 1, 65, 2023.
- [7] Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A., Minak, G., "Influence of electrospun nanofibers on the interlaminar properties of unidirectional epoxy resin/glass fiber composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 34, No. 11, pp. 907-914, 2015.
- [8] Nguyen, D. D., Vu, C. M., Choi, H. J., "Improvement of the mode I interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy composites using polystyrene electrospun nanofibres," *Polymer Bulletin*, Vol. 75, No. 11, pp. 5089-2189, 2018.
- [9] Neisiany, R. E., Khorasani, S. N., Naeimirad, M., Lee, J. K. Y., Ramakrishna, S., "Improving mechanical properties of carbon/epoxy composite by incorporating functionalized electrospun polyacrylonitrile nanofibers," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 302, No. 5, 1600551, 2017.
- [10] Dong, Y., Mosaval, T., Haroosh, H. J., Umer, R., Takagi, H., Lau, K. T., "The potential use of electrospun polylactic acid nanofibers as alternative reinforcements in an epoxy composite system," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 52, No. 9, pp. 618-623, 2014.
- [11] Cui, M., Chai, Z., Lu, Y., Zhu, J., Chen, J., "Developments of polyurethane in biomedical applications: A review," *Resources Chemicals and Materials*, Vol. 2, No. 4, pp. 262-276, 2023.
- [12] Das, A., Mahanwar, P., "A brief discussion on advances in polyurethane applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 93-101, 2020.
- [13] Yang, Z., Peng, H., Wang, W., Liu, T., "Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 116, No. 5, pp. 2658-2667, 2010.

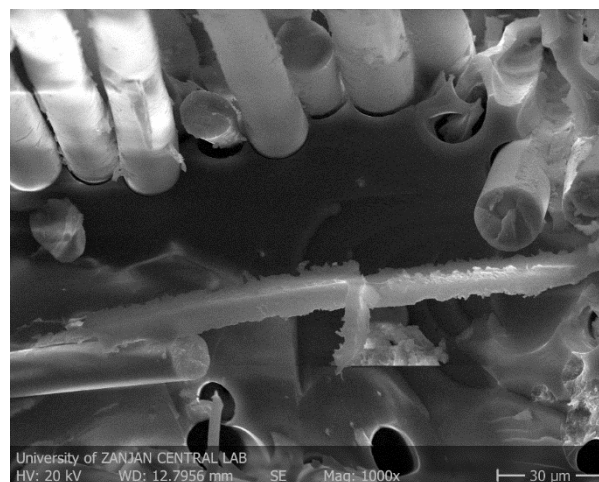


Fig. 12. The FESEM analysis from the fracture surface of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites

شکل 12 آنالیز FESEM از سطح مقطع شکست کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

4- جمع بندی

در این کار پژوهشی الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک به صورت چیدمان های متفاوت ساخته و به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه اضافه شد. کامپوزیت های هیبریدی ساخته شده تحت بارگذاری های کششی و خمشی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی به صورت زیر است:

1- در میان کامپوزیت های هیبریدی ساخته شده، کامپوزیت حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان دارای بیشترین استحکام کششی بود که مقدار عددی آن 298 MPa می باشد. همچنین، بیشترین مدول الاستیک در میان کامپوزیت های هیبریدی در این کامپوزیت مشاهده شد که مقدار آن 11.44 GPa می باشد. بیشترین انرژی جذب شده نیز به این کامپوزیت تعلق داشت که مقدار آن برابر با $8.39 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ بود. در مقایسه با کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده، افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده موجب کاهش 4.5 درصدی استحکام کششی و کاهش 32.4 درصدی مدول الاستیک شد، در حالی که انرژی جذب شده 82 درصد افزایش یافت.

2- بیشترین کرنش شکست تحت بارگذاری کششی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 5 لایه به دست آمد که مقدار آن برابر با 0.051 mm/mm بود. این مقدار در مقایسه با مقدار 0.026 mm/mm در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده، نشان دهنده افزایش 96.2 درصدی کرنش شکست است. 3- کامپوزیت حاوی 2 لایه الیاف الکتروریسی شده با استحکام خمشی 262 MPa، بیشترین استحکام خمشی را در مقایسه با کامپوزیت های هیبریدی و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه داشت. این مقدار در مقایسه با استحکام خمشی 150 MPa در کامپوزیت بدون الیاف الکتروریسی شده، افزایش 74.7 درصدی را نشان داد.

4- مدول خمشی با افزایش تعداد لایه های الیاف الکتروریسی شده بهبود یافت، به طوری که در نمونه حاوی 8 لایه الیاف الکتروریسی شده مقدار آن به 18.72 GPa رسید. این مقدار در مقایسه با مقدار 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکتروریسی شده، بیانگر افزایش 67.3 درصدی مدول خمشی است.

5- با استفاده از آنالیز میکروسکوپی مشخص شد که الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک دارای میانگین قطر 64 nm هستند و سطحی زبر دارند.

- [14] Kucinska-Lipka, J., Gubanska, I., Janik, H., Sienkiewicz, M., "Fabrication of polyurethane and polyurethane based composite fibres by the electrospinning technique for soft tissue engineering of cardiovascular system," *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 46, No. 2015, pp. 166-176, 2015.
- [15] Bavafa Bigdilou, M., Eslami-Farsani, R., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar- ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540, 2020.
- [16] De Schoenmaker, B., Van der Heijden, S., De Baere, I., Van Paepegem, W., De Clerck, K., "Effect of electrospun polyamide 6 nanofibres on the mechanical properties of a glass fibre/epoxy composite", *Polymer testing*, Vol. 32, No. 8, pp. 1495-1501, 2013.
- [17] Metin, F., Avci, A., "Compression and interlaminar shear properties of nanoparticle doped hybrid nanofiber interleaved glass/epoxy composites," *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, Vol. 22, No. 2021, pp.1-9, 2021.
- [18] Zhou, Z., Tang, W., Xu, T., Zhao, W., Zhang, J., Bai, C., "Flexible strain sensors based on thermoplastic polyurethane fabricated by electrospinning: A review," *Sensors*, Vol. 24, No. 15, 4793 , 2024.
- [19] Mahato, B., Lomov, S. V., Shiverskii, A., Owais, M., Abaimov, S. G., A review of electrospun nanofiber interleaves for interlaminar toughening of composite laminates. *Polymers*, Vol. 15, No. 6, 1380, 2023.
- [20] Ghadi, A., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Ghezelbash, A., "The simultaneous effect of graphene and nanoclay on the mechanical properties of multi-scale composite by dispersing and coating," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 37, pp. 4732-4738, 2025.
- [21] Palazzetti, R., "Flexural behavior of carbon and glass fiber composite laminates reinforced with Nylon 6, 6 electrospun nanofibers," *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 27, pp. 3407-3413, 2015.
- [22] Metin, F., Avci, A., "In-plane quasi-static and out-of-plane dynamic behavior of nanofiber interleaved glass/epoxy composites and finite element simulation," *Composite Structures*, Vol. 270, 114085, 2021.
- [23] Palazzetti, R., Zucchelli, A. J. C. S., "Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials—a review," *Composite Structures*, Vol. 182, pp. 711-727, 2017.
- [24] Taşyürek, M., Kara, M., "Low-velocity impact response of pre-stressed glass fiber/nanotube filled epoxy composite tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 7, pp. 915-926, 2021.
- [25] Dhilipkumar, T., Rajesh, M., "Effect of using multiwall carbon nanotube reinforced epoxy adhesive in enhancing glass fiber reinforced polymer composite through cocure manufacturing technique," *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 8, pp. 758-3772, 2021.
- [26] Monticeli, F. M., Pitanga, M. Y., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., "Mode I and mode II delamination of carbon/glass/epoxy hybrid composite: A statistics-based analysis," *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 8, pp. 3857-3869, 2021.