



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



تأثیر لایه‌چینی الیاف و محیط‌های حرارتی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف بازالت/الیاف کربن لایه‌نازک تک‌جهته

سید محمد صالح موسوی بفرولی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، عبدالرضا گرانمایه³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این مطالعه تأثیرات دماهای مختلف محیطی و لایه‌چینی الیاف بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از رزین اپوکسی، الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت‌های هیبریدی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی 2 لایه الیاف نازک تک‌جهته کربن و 6 لایه الیاف بازالت ساخته شدند. نمونه‌ها با سه نوع مختلف لایه‌چینی به طوری که موقعیت الیاف نازک تک‌جهته کربن از مرکز به سطوح نمونه‌ها تغییر می‌کرد، آماده شدند. همچنین، تأثیر دما بر رفتار خمشی نمونه‌ها با استفاده از دماهای 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نمونه‌ها دارای شکست تدریجی بودند و به دلیل حضور الیاف نازک تک‌جهته کربن، رفتار شبه‌انعطاف‌پذیر نشان دادند. نتایج نشان دادند که با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها، استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها به شدت افزایش یافت. به عنوان نمونه، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی نمونه‌هایی که الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها قرار داشتند، حدود 42 درصد بالاتر از مدول خمشی نمونه‌های با الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز بود. با این وجود، مقادیر کرنش شکست نمونه‌ها با نزدیک کردن الیاف نازک تک‌جهته کربن به مرکز نمونه‌ها افزایش داشت. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش مقادیر استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها شده، در حالی که مقادیر کرنش افزایش یافته است.

دریافت: 1400/03/07

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژه‌ها:

کامپوزیت هیبریدی، الیاف کربن لایه نازک، خواص خمشی، شبه‌انعطاف‌پذیری، دماهای مختلف محیطی

Effects of stacking sequence of fibers and thermal environments on the flexural properties of the basalt fibers/thin-ply unidirectional carbon fibers/epoxy hybrid composites

Seyed Mohammad Saleh Mousavi-Bafrouyi¹, Reza Eslami-Farsani^{2*}, Abdolreza Geranmayeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

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

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

Keywords

Hybrid composite, Carbon fibers thin-ply, Flexural properties, Pseudo-ductility, Different environmental temperatures

Abstract

In this study, the effects of different environmental temperatures and stacking sequences of fibers on the flexural properties of the hybrid composites including epoxy resin, basalt fibers, and thin-ply unidirectional (UD) carbon fibers were investigated. The hybrid composites were prepared by hand lay-up method with 2 layers of carbon thin-ply and 6 layers of basalt fibers. The samples were fabricated with three different stacking sequences of fibers in which the position of thin-ply UD carbon fibers changed from the center to the outermost layers. Also, the temperature effects on the flexural properties of samples were investigated by applying different temperatures of 25, 60, and 95 °C. All samples were fractured gradually and showed pseudo-ductility phenomenon due to thin-ply UD carbon fibers. Results showed that by placing the thin-ply UD carbon fibers at the outermost layers, the flexural strength and modulus of samples increased significantly. For example, at the temperature of 25 °C, the flexural modulus of the samples was about 42% higher than that of the sample with thin-ply UD carbon fibers at the center of samples. However, the strain values of samples increased by nearing the thin-ply UD carbon fibers to the center layers. Also, results indicated that increasing the temperature caused the reduction of flexural strength and modulus of samples while the strain values increased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mousavi-Bafrouyi, S. M. S., Eslami-Farsani, R., Geranmayeh, A., "Effects of stacking sequence of fibers and thermal environments on the flexural properties of the basalt fibers/thin-ply unidirectional carbon fibers/epoxy hybrid composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1514-1521, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.530377.1725>

1- مقدمه

دادن الیاف کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌توان استحکام و مدول خمشی را به شدت بهبود بخشید، به طوری که با قرار دادن تنها یک لایه الیاف کربن در سمت بیرونی نمونه‌ها، استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها به ترتیب 20 و 42 درصد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با قرار دادن تمامی الیاف کربن در سمت بیرونی کامپوزیت‌ها که در معرض نیروی خمشی است، می‌توان به بهینه‌ترین حالت از نظر کرنش شکست دست یافت.

کامپوزیت‌های متداول پلیمری معمولاً دارای استحکام فوق‌العاده، وزن پایین و البته شکست‌های ناگهانی هستند. یکی دیگر از مزایای استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی بالا بردن امنیت کامپوزیت‌ها و تغییر نوع شکست آن‌ها به حالت تدریجی است. حالت شکست تدریجی کامپوزیت‌های هیبریدی اصطلاحاً پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری^۳ نامیده می‌شود [11 و 12]. مطالعات در زمینه شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری را معمولاً می‌توان به دو دسته شامل استفاده از الیاف با زوایای لایه‌چینی مختلف [13-15] و همچنین استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی با خواص مکانیکی مختلف [16-19] طبقه‌بندی کرد. فولر^۴ و همکاران [14] به بررسی رفتار کششی کامپوزیت‌های با الیاف نازک کربن (0.03 میلی‌متر) با زوایای مختلف لایه‌چینی 45-15 درجه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حین آزمون کشش می‌توان به یک منحنی تنش-کرنش غیرخطی دست یافت. آن‌ها بیان کردند که رخ دادن پدیده شبه‌انعطاف-پذیری در این کامپوزیت‌ها به دلیل جهت‌گیری مجدد الیاف به سمت راستی بازگذاری کشش است.

به عنوان یکی دیگر از راهکارهای افزایش انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری، مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که ترکیب الیاف با کرنش بالا و الیاف با کرنش پایین با ضخامت‌های کنترل شده می‌تواند منجر به پدیده شبه-انعطاف‌پذیری و شکست تدریجی در کامپوزیت‌های هیبریدی شود. اغلب مطالعات صورت گرفته در مورد رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های هیبریدی مربوط به استفاده از الیاف نازک تک‌جهته کربن است [16-18]. تحقیقات مذکور نشان داده‌اند که 4 مکانیزم شکست می‌تواند در مورد کامپوزیت‌های هیبریدی بر اساس ضخامت نسبی الیاف با کرنش کم و الیاف کرنش زیاد رخ دهد. این چهار مکانیزم شامل موارد زیر هستند:

- 1- یک شکست ترد گسترش یافته در کل ضخامت کامپوزیت
- 2- یک ترک درون لایه‌های با کرنش پایین و سپس یک تورق ناگهانی بین الیاف با کرنش کم و کرنش زیاد
- 3- خرد شدن الیاف با کرنش کم
- 4- خرد شدن الیاف با کرنش کم به همراه تورق موضعی که تنها در این حالت است که رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری بدست می‌آید.

سبزل^۵ و همکاران [20] از الیاف تک‌جهته کربن بسیار نازک با ضخامت 29 میکرومتر در بین لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، پیش از این که الیاف شیشه دچار شکست شود، الیاف کربن مورد استفاده می‌تواند چندین بار در راستای طولی مورد شکست قرار گیرند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که با هیبرید کردن الیاف با کرنش کم و الیاف با کرنش زیاد می‌توان به رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری بازگذاری‌های کششی و فشاری دست یافت.

امروزه کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص منحصر بفرد خود مانند استحکام و سفتی ویژه بالا توجه خاصی را در کاربردهای مختلف پیدا کرده‌اند. در برخی از این کاربردها، کامپوزیت ممکن است در شرایط مختلفی مانند دماهای بالا و محیط‌های خورنده قرار داشته باشند. بنابراین، لازم است که کامپوزیت‌های پلیمری دارای خواص مناسبی حتی در دماهای بالا و محیط‌های خورنده باشند. یکی از مهم‌ترین انواع کامپوزیت‌های پلیمری، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف هستند. این نوع از کامپوزیت‌ها به دلیل مزایای خود به طور گسترده‌ای در کاربردهای مهمی مانند بدنه هواپیما و بدنه خودرو استفاده می‌شوند. به طور کلی مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های پلیمری شامل الیاف شیشه، کربن، آرامید و بازالت هستند [4-1].

با وجود تمامی مزایای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، معمولاً این نوع از کامپوزیت‌ها دارای چقرمگی پایینی هستند که این مشکل منجر به ایجاد شکست ناگهانی در شرایط بارگذاری‌های مختلف می‌شوند. امروزه، راهکارهای مختلفی در جهت بهبود چقرمگی پایین کامپوزیت‌های پلیمری معرفی شده است. از مهم‌ترین راهکارهای بهبود چقرمگی کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان به استفاده از پلیمرهای گرمانرم و همچنین افزودن نانوذرات به زمینه‌های پلیمری اشاره کرد. یکی دیگر از روش‌های مؤثر در بهبود افزایش چقرمگی کامپوزیت‌های الیافی، استفاده هم‌زمان از دو یا چند الیاف به عنوان تقویت‌کننده به منظور ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی است. به طور کلی، دلیل اصلی در استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی، دستیابی به مزایای هر دو الیاف و کاهش معایب آن‌ها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین انواع کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف کربن و الیاف شیشه است. در این نوع کامپوزیت‌ها از الیاف شیشه به دلیل درصد ازدیاد طول بالا و از الیاف کربن به دلیل استحکام زیاد استفاده می‌شود [2 و 7-15].

با وجود مزایای فراوان کامپوزیت‌های هیبریدی، متغیرهای فراوانی بر خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها مؤثر است. از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار می‌توان به نسبت وزنی/حجمی الیاف تقویت‌کننده، خواص الاستیک الیاف و حالت قرارگیری الیاف و یا نوع لایه‌چینی آن‌ها اشاره کرد. نجفی و همکاران [8] به بررسی تأثیر نوع لایه‌چینی بر رفتار خمشی و ضربه در کامپوزیت‌های هیبریدی شامل الیاف کربن و الیاف بازالت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که انرژی ویژه جذب‌شده کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در اثر افزودن الیاف بازالت بهبود یافت. با افزودن 20، 40، 60 و 80 درصد وزنی الیاف بازالت، انرژی ویژه جذب‌شده کامپوزیت‌های هیبریدی به ترتیب 58، 140، 159 و 212 درصد افزایش یافته است.

در یک مطالعه دیگر، سوباجیو^۱ و همکاران [9] به بررسی تأثیر لایه‌چینی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت/الیاف کربن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌ها به شدت به نوع قرارگیری الیاف بازالت و الیاف کربن در نمونه‌ها وابسته است. نتایج آن‌ها نشان حالتی که الیاف بازالت در لایه‌های بیرونی قرار گرفته‌اند، بالاترین میزان انعطاف‌پذیری حاصل شده است، در حالی که با قرار دادن الیاف کربن در لایه‌های بیرونی، خواص خمشی بهبود یافت. در مطالعه‌ای دیگر، پراستی^۲ و همکاران [10] به بررسی تأثیر درصد وزنی و همچنین نوع قرارگیری الیاف در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن/الیاف شیشه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با قرار

⁴ Fuller
⁵ Czel

¹ Subagia
² Prusty
³ Pseudo-ductility

بعد از لایه‌گذاری، به منظور حذف حباب‌های هوا در کامپوزیت، از فشار 0.05 مگاپاسکال استفاده شد. در نهایت به منظور تکمیل فرایند پخت، نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت 7 روز قرار گرفتند. کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده در این تحقیق از 2 لایه الیاف نازک تک‌جهته کربن و 6 لایه الیاف بازالت تشکیل شدند. به طور میانگین، ابعاد نمونه‌ها برابر با 13×7×1.5 میلی‌متر بود. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، در این نوع از کامپوزیت‌ها، موقعیت الیاف نازک تک‌جهته کربن از مرکز به سطوح بیرونی نمونه‌ها تغییر کرد. کدهای ارائه شده، B و C به ترتیب بیانگر الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن، و اعداد بعد از حروف نشان‌دهنده تعداد لایه‌ها هستند.

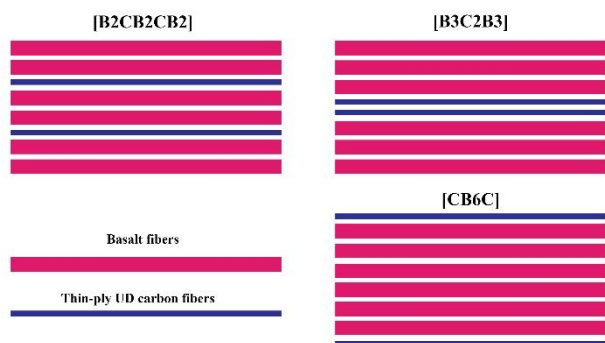


Fig. 1 The schematic image of hybrid composites with different stacking sequences.

شکل 1 تصویر شماتیکی از کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف.

همچنین، به منظور بررسی تأثیر دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده، نمونه‌ها در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت قرار گرفتند. سپس، کوره خاموش شده و نمونه‌ها به مدت 5 ساعت در آن به منظور خنک شدن قرار گرفتند.

3-2- مشخصه‌یابی

در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر دما و لایه‌چینی‌های مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی، از آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D790 در دمای محیط (با استفاده از دستگاه هانسفیلد⁴ HK255) استفاده شد. به طور میانگین مقادیر استحکام، مدول و کرنش نمونه‌ها به ترتیب از روابط 1 تا 3 بدست آمد. لازم به ذکر است که هر نمونه 3 بار مورد آزمایش قرار گرفت و مقادیر میانگین گزارش شدند.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

$$E_b = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (2)$$

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

در روابط بالا، σ_f ، استحکام خمشی (مگاپاسکال)، P ، بیشترین نیرو در منحنی‌های تنش-کرنش (نیوتن)، L ، طول نمونه طبق استاندارد خمشی که بر روی فک‌های دستگاه قرار می‌گیرد (میلی‌متر)، b ، عرض نمونه (میلی‌متر)، d ، ضخامت نمونه (میلی‌متر)، D ، میزان جابجایی در نقطه اولین افت نیرو (میلی‌متر) و m ، شیب ناحیه خطی منحنی نیرو-جابجایی است [21].

با این وجود، مطالعات بسیار محدودی مبنی بر دستیابی به رفتار شبه-انعطاف‌پذیری در آزمون‌های خمشی صورت گرفته است و عوامل تأثیرگذار بر رخداد این پدیده در حین آزمون خمشی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، همان‌طور که گفته شد، کامپوزیت‌های پلیمری معمولاً در معرض رطوبت و محیط‌های حرارتی هستند. بنابراین، عملکرد آن‌ها می‌تواند در اثر قرارگیری در شرایط مختلف دمایی و محیطی تغییر کند. از این رو، مطالعه تأثیرات محیطی بر خواص کامپوزیت‌های پلیمری از اهمیت بالایی برخوردار است. با این وجود، تاکنون مطالعات بسیار محدودی مبنی بر تأثیر دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی صورت گرفته است. بر این اساس، هدف مطالعه حاضر ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن با لایه‌چینی‌های مختلف است. در این مطالعه، رفتار خمشی و امکان دستیابی به رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های هیبریدی در حین آزمون خمشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، به منظور بررسی تأثیر شرایط محیطی، نمونه‌های ساخته شده در دماهای مختلف محیطی (25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد) به مدت 2 ساعت قرار می‌گیرند و تأثیرات آن بر رفتار خمشی کامپوزیت‌ها مطالعه می‌شود.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در پژوهش حاضر، از الیاف بازالت با نام تجاری آرمباس¹ (کشور ارمنستان) و الیاف تک‌جهته نازک کربن با نام تجاری تکسترم² (کشور سوئد) استفاده شد. برای زمینه پلیمری کامپوزیت نیز رزین اپوکسی (EPL 1012) به همراه هاردنر (EPH 112) با نسبت رزین به هاردنر 100:13 بکار گرفته شد. جدول‌های 1 و 2 به ترتیب به ارائه خواص مکانیکی و حرارتی و مشخصات کلی الیاف بازالت و الیاف تک‌جهته نازک کربن مورد استفاده در این تحقیق می‌پردازند.

2-2- ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی

در این پژوهش به منظور ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف از روش لایه‌گذاری دستی³ استفاده شد.

جدول 1 مشخصات الیاف بازالت استفاده شده در این تحقیق

مقدار	خاصیت
380	چگالی (گرم بر مترمربع)
0.19	ضخامت (میلی‌متر)
8-22	قطر الیاف (میکرومتر)
سیلانی	نوع پوشش سطحی
-260-370	دمای کاری (درجه سانتی‌گراد)
80-95	مدول کششی (گیگاپاسکال)

جدول 2 مشخصات الیاف تک‌جهته نازک کربن استفاده شده در این تحقیق

مقدار	خاصیت
38	چگالی (گرم بر مترمربع)
0.1	ضخامت (میلی‌متر)
350	نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)
294	مدول کششی (گیگاپاسکال)
5490	استحکام کششی (مگاپاسکال)
1.9	ازدیاد طول (درصد)

³ Hand lay-up

⁴ Hounsfield

¹ ARMBAS

² TeXtreme

تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است، با این وجود نمونه [CB6C] کمترین میزان افت در استحکام را در بین نمونه‌ها دارد. به عنوان مثال، استحکام خمشی نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C]، به ترتیب 7.72 درصد، 8.84 درصد و 4.62 درصد نسبت به دمای 25 درجه سانتی‌گراد افت پیدا کرده‌اند.

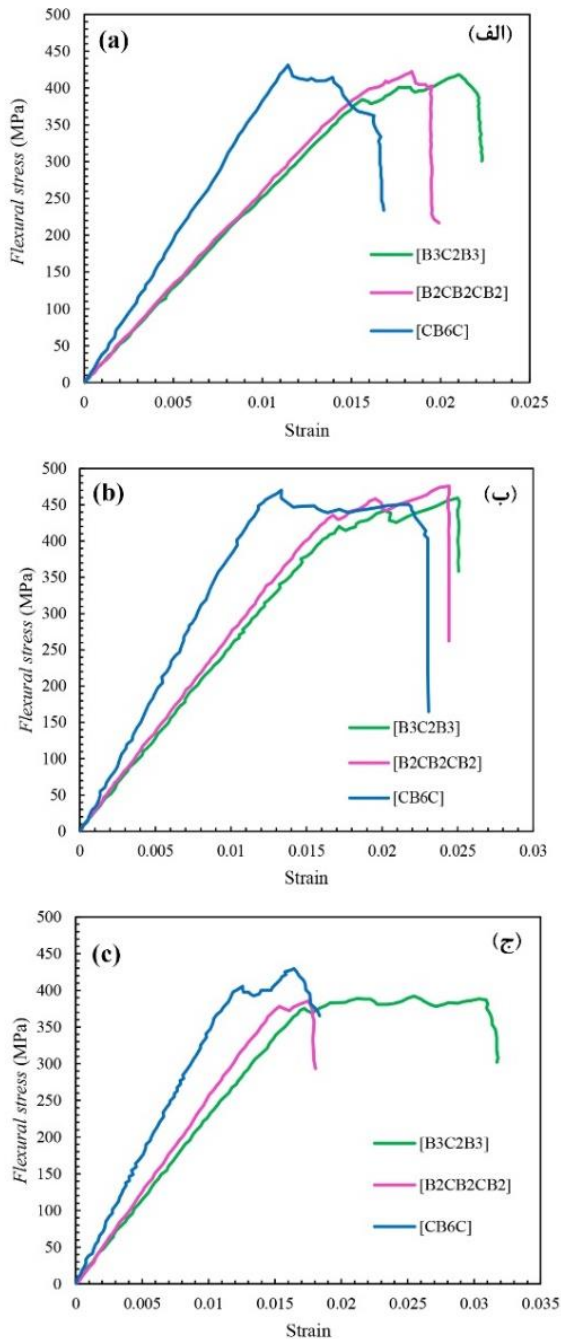


Fig. 2 The flexural stress-strain curves of the hybrid composites with different stacking sequences subjected different environmental temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 2 منحنی‌های تنش- کرنش خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف محیطی، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

همچنین به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^1) مدل TESCAN ساخت کشور چک استفاده شد. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از پدیده تجمع بارهای الکترونی بر روی سطح نمونه در حین تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی، از پوشش-دهی طلا با استفاده از روش کندوپاش² استفاده شد.

3- نتایج و بحث

شکل 2 نشان‌دهنده منحنی‌های تنش- کرنش خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی در دماهای مختلف 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که مشخص است، در تمامی نمونه‌ها شکست از نوع تدریجی بوده و پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری در تمامی نمونه‌ها دیده می‌شود. رخ دادن پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری را می‌توان به حضور الیاف نازک تک‌جهته کربن در نمونه‌ها نسبت داد. با این وجود مشخص است که با توجه به موقعیت قرارگیری الیاف نازک تک‌جهته کربن، رفتار نمونه‌ها از نظر استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری بسیار متفاوت است. به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل 2-الف-ا دیده می‌شود، کامپوزیت‌های [CB6C] دارای مدول خمشی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند، اما کرنش شکست آن‌ها پایین‌تر است. از طرف دیگر، اگرچه در نمونه‌های [B3C2B3] مقادیر استحکام و مدول خمشی پایین‌تری مشاهده می‌شود، اما این نمونه‌ها در تمامی دماها دارای کرنش شکست و همچنین کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نوع لایه‌چینی تأثیر قابل توجهی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده در این مطالعه دارد. با توجه به این که الیاف نازک تک‌جهته کربن منجر به تغییرات بسیار ناچیزی در ضخامت نمونه‌ها شده‌اند، می‌توان بیان کرد با توجه به کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت، استفاده از این الیاف در موقعیت‌های مختلف می‌تواند منجر به افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری آن بدون تغییرات ابعادی شود. البته دیده می‌شود که قرار گرفتن نمونه‌ها در دماهای محیطی مختلف، منجر به تغییرات قابل توجه خواص خمشی آن‌ها شده است.

شکل 3 نشان‌دهنده استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه-چینی‌های مختلف در دماهای 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که دیده می‌شود، کامپوزیت‌های [CB6C] دارای بالاترین استحکام خمشی در تمامی دماها هستند. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مقادیر 422.5، 422.3 و 451.1 مگاپاسکال به ترتیب برای کامپوزیت‌های هیبریدی [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] بدست آمد. همچنین، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی کامپوزیت‌های [CB6C] حدود 42 درصد نسبت به مقدار مدول خمشی نمونه‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] بالاتر بود. در طی بارگذاری‌های خمشی، قسمت‌های مختلف نمونه در معرض نیروهای متفاوتی براساس موقعیت نسبت به نیروی بارگذاری قرار می‌گیرند.

به طور کلی، یکی از سطوح بیرونی نمونه تحت نیروهای فشاری و سطح دیگر تحت نیروی کششی قرار دارد. همان‌طور که دیده می‌شود، با نزدیک کردن الیاف نازک تک‌جهته کربن به سمت بیرونی‌ترین لایه‌ها، استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در آزمون خمش، خواص مکانیکی لایه‌های بیرونی دارای تأثیر بیشتری نسبت به سایر لایه‌های کامپوزیت‌های هیبریدی هستند و با قرار دادن الیاف کربن با استحکام مکانیکی بالاتر در سطوح بیرونی می‌توان استحکام خمشی را بهبود بخشید. همچنین مشخص است که با افزایش دما از 25 تا 95 درجه سانتی‌گراد، استحکام خمشی

² Sputtering

¹ Scanning Electron Microscopy

شکل 5 نشان‌دهنده مقادیر کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی است. همان‌طور که دیده می‌شود، برخلاف استحکام و مدول خمشی، با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های هیبریدی، مقادیر کرنش شکست نمونه‌ها به شدت کاهش پیدا کرده است. در تمامی دماها، بالاترین و پایین‌ترین مقادیر کرنش شکست، به ترتیب مربوط به نمونه‌های [B3C2B3] و [CB6C] است. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مقادیر کرنش شکست 0.021، 0.018 و 0.011 به ترتیب برای نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] بدست آمد. همچنین، مشخص است که به طور کلی افزایش دما منجر به افزایش کرنش شکست نمونه‌ها شده است. به عنوان نمونه، با افزایش دما از 25 تا 95 درجه سانتی‌گراد، کرنش شکست نمونه [B3C2B3] حدود 21.4 درصد افزایش یافته است.

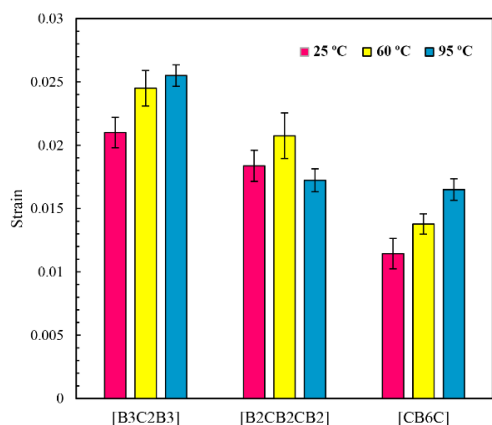


Fig. 5 The strain at break values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 5 مقادیر کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

همان‌طور که نشان داده شد، دما و نوع قرارگیری الیاف، تأثیر قابل توجهی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده در این مطالعه دارند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که افزایش دما دارای دو تأثیر متفاوت بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری است. گفته می‌شود که افزایش دما می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری از طریق افزایش سفتی پلیمر و چسبندگی پلیمر/الیاف شود [22]. از طرف دیگر، ضریب انبساط حرارتی در اجزای کامپوزیت‌ها با یکدیگر متفاوت است. لذا، اختلاف بدست آمده در انبساط اجزای کامپوزیت در اثر افزایش دما می‌تواند منجر به رخ دادن پدیده تورق¹ و در نتیجه افت خواص مکانیکی شود [23 و 24]. بنابراین می‌توان گفت که رقابتی بین اثرات مثبت و منفی دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری وجود دارد. این تأثیر دوگانه در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است [22 و 25]. به عنوان مثال، شیشوان² و آکبولوت³ [25] تأثیر سیکل‌های دمایی را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف بازالت و الیاف شیشه بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌ها را تا دمای +120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه حرارت دادند و در دمای -40 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه خنک کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی تا یک تعداد مشخص، منجر به افزایش مدول کششی و خمشی نمونه‌ها شد، در حالی که افزایش بیشتر تعداد سیکل‌های حرارتی باعث افت خواص شد.

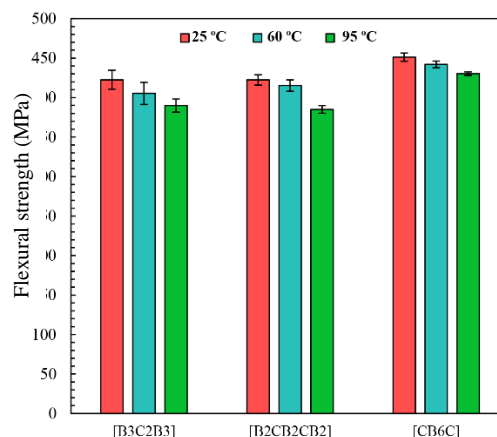


Fig. 3 The flexural strength values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 3 مقادیر استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

شکل 4 نشان‌دهنده مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی در دماهای مختلف است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوع قرارگیری الیاف بازالت و الیاف کربن، تأثیر بسیار قابل توجهی بر مدول خمشی نمونه‌ها دارد. مطابق با شکل‌های 2 و 4، با قراردادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های هیبریدی، به طور قابل توجهی مدول خمشی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی نمونه [CB6C] برابر با 37.12 گیگاپاسکال است که این مقدار حدود 42 درصد بالاتر از مدول خمشی کامپوزیت‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] است. همچنین مشخص است که بالاتر بودن مدول خمشی کامپوزیت‌های [CB6C] نسبت به سایر نمونه‌های در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد نیز حفظ می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به بالاترین مقادیر استحکام و مدول خمشی، لازم است که الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌های کامپوزیت‌های هیبریدی قرار گیرند.

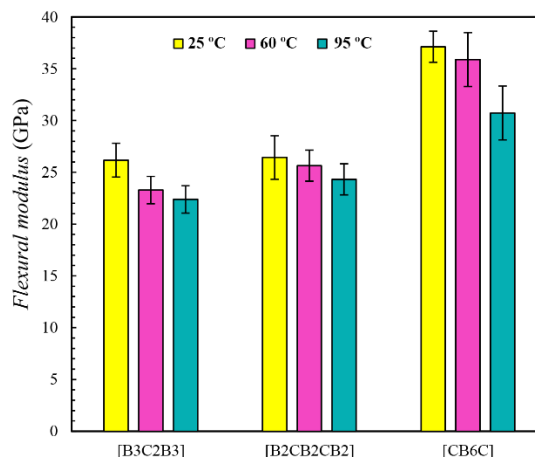


Fig. 4 The flexural modulus values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 4 مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

³ Akbulut

¹ Delamination

² Shishevan

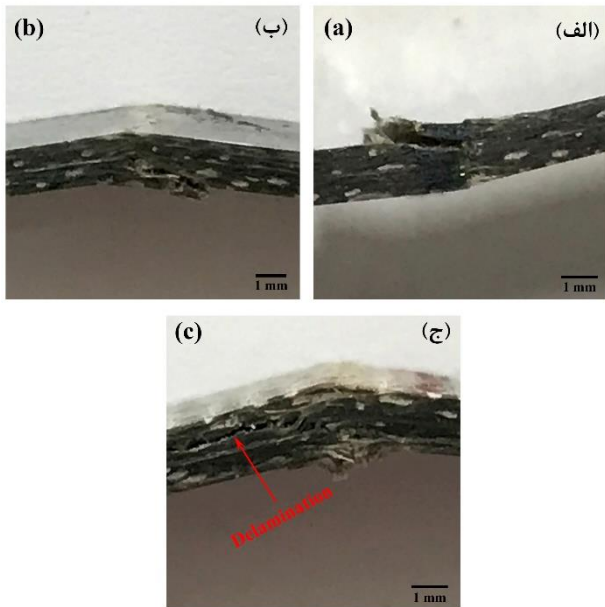


Fig. 6 The fracture surface of [B3C2B3] sample at different temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 6 سطوح شکست کامپوزیت‌های [B3C2B3] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

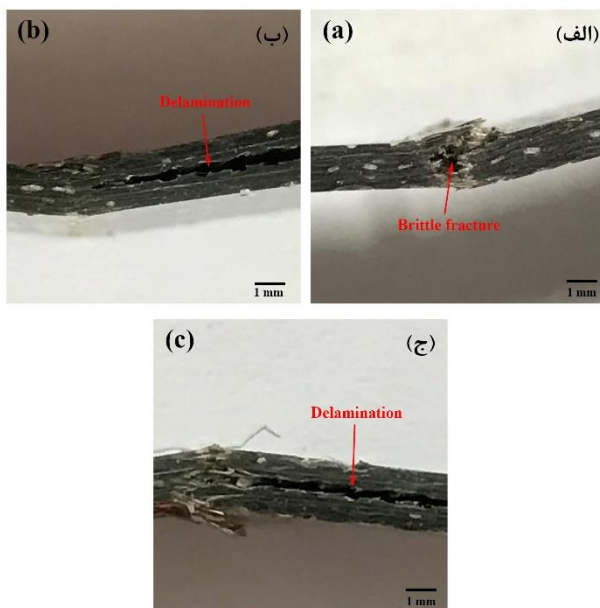


Fig. 7 The fracture surface of [B2CB2CB2] sample at different temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 7 سطوح شکست کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

همچنین، با توجه به شکل 8، مشخص است که اگرچه در نمونه [CB6C] با افزایش دما پدیده تورق دیده می‌شود، اما این نمونه، شکست تردتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از وجود فصل مشترک کمتر بین الیاف بازالت و الیاف کربن در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها باشد.

ضریب انبساط حرارتی رزین اپوکسی، الیاف بازالت و الیاف کربن به ترتیب برابر با $6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ، $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ و $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ است [26]. با توجه به تفاوت ضریب انبساط حرارتی الیاف بازالت و الیاف کربن، فرارگیری این دو نوع الیاف در کنار یکدیگر، منجر به افت بیشتر خواص در اثر افزایش دما می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های [CB6C] افت کمتری را در مقایسه با کامپوزیت‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] از خود نشان دادند. این می‌تواند به دلیل این باشد که در کامپوزیت‌های [CB6C]، تعداد فصل مشترک‌های بین الیاف بازالت و الیاف کربن کمتر از کامپوزیت‌های با لایه چینی‌های دیگر است. از طرف دیگر، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شد، تمامی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده در این پژوهش دارای رفتار شکست تدریجی و اصطلاحاً دارای رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری بودند. یکی از متغیرهای تأثیرگذار در این رفتار مواد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری است. کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری از شروع رفتار شکست تدریجی تا شکست نهایی نمونه محاسبه می‌شود. [27]. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما تا یک حد مشخص، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافت. به عنوان مثال، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] به ترتیب 0.37، 1.33 و 3.04 برابر با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. در مورد کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] و [CB6C]، دمای بهینه از نظر میزان شبه‌انعطاف‌پذیری برابر با 60 درجه سانتی‌گراد است، زیرا با افزایش دما از 60 به 95 درجه سانتی‌گراد، میزان شبه‌انعطاف‌پذیری در آن‌ها کاهش می‌یابد. با این وجود در نمونه [B3C2B3]، با افزایش دما از 60 به 95 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری حدود 90 درصد افزایش پیدا کرده است. افزایش مقادیر کرنش در کامپوزیت‌های هیبریدی در اثر افزایش دما را می‌توان به پدیده نرم‌شدگی¹ نسبت داد. به طور کلی، نرم‌شدگی و کاهش سفتی نمونه‌ها می‌تواند منجر به افزایش کرنش شکست نمونه‌ها شود. همچنین، همان‌طور که گفته شد، رخ دادن هم‌زمان خرد شدن الیاف نازک تک‌جهته کربن به همراه ایجاد تورق‌های موضعی منجر به وقوع پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش دما از طریق افزایش میزان تورق‌های موضعی منجر به بالا رفتن مقادیر کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری شده است.

شکل‌های 6 تا 8 به ترتیب نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپی از سطوح شکست کامپوزیت‌های هیبریدی [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] در دماهای مختلف هستند. همان‌طور که در شکل‌های 6 دیده می‌شود، میزان پدیده تورق در نمونه [B3C2B3] در دماهای 25 و 60 درجه سانتی‌گراد چندان چشمگیر نیست. با این وجود، مشخص است که افزایش دما به 95 سانتی‌گراد، منجر به افزایش پدیده تورق در نمونه [B3C2B3] شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش تأثیرگذاری اختلاف در ضریب انبساط حرارتی بین الیاف بازالت و الیاف کربن باشد. سطوح شکست کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] در شکل‌های 7 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان پدیده تورق در نمونه‌های [B2CB2CB2] بیشتر از سایر نمونه‌های کامپوزیت است که می‌تواند به دلیل بالاتر بودن تعداد فصل مشترک در این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها باشد.

¹ Softening

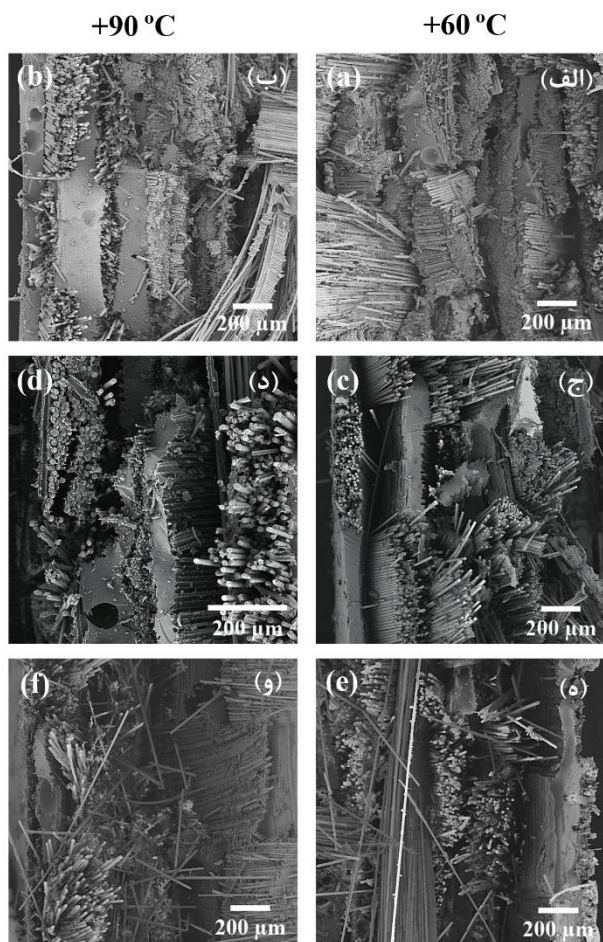


Fig. 9 The fracture surfaces of composite samples subjected to temperatures of 60 and 95 °C, (a and b) [B3C2B3] samples, (c and d) [B2CB2CB2] samples, (e and f) [CB6C].

شکل 9 سطوح شکست نمونه‌های کامپوزیتی در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد، (الف و ب) نمونه‌های [B3C2B3]، (ج و د) نمونه‌های [B2CB2CB2]، (ه، و) نمونه‌های [CB6C].

2- نتایج آزمون خمش نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای رفتار شبه-انعطاف‌پذیری بودند. با این وجود، میزان کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها متأثر از دما و نوع قرارگیری الیاف در کامپوزیت‌ها بود. به طور کلی نتایج نشان داد که کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، افزایش دما به طور کلی منجر به افزایش کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها شد، به طوری که با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] به ترتیب 0.37، 1.33 و 3.04 برابر افزایش یافت.

3- نتایج نشان داد که افزایش دما سبب افت خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل پدیده تورق در اثر اختلاف در ضریب انبساط حرارتی اجزای کامپوزیت‌ها شده است. کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] به دلیل دارا بودن تعداد فصل‌مشترک‌های بیشتر بین الیاف بازالت و الیاف کربن دچار تورق بیشتر و در نتیجه افت خواص بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها شدند.

5- مراجع

- [1] Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M., Bashirzadeh, R. and Freeman, B., "Temperature Effects on Kevlar/Hybrid and Carbon Fiber Composite Sandwiches under Impact Loading" Composite Structures, Vol. 78, No. 2, pp. 197-206, 2007.

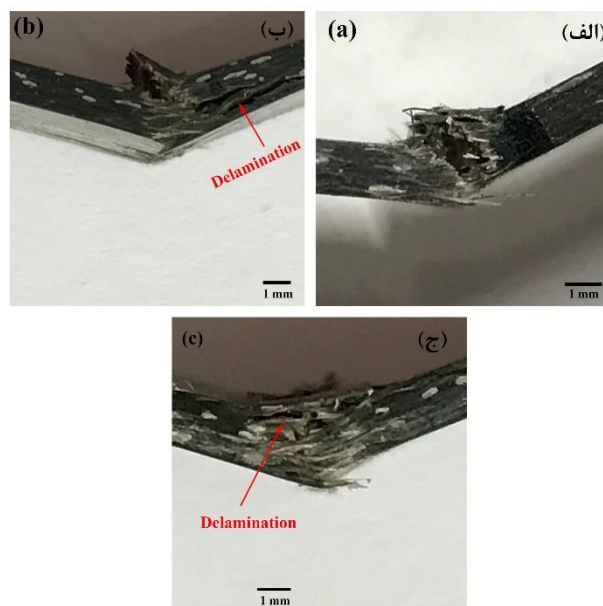


Fig. 8 The fracture surface of [CB6C] sample at different temperatures of. (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 8 سطوح شکست کامپوزیت‌های [CB6C] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

به منظور بررسی بهتر سطوح شکست کامپوزیت‌های هیبریدی، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل 9 نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های کامپوزیتی در دو دمای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که دیده می‌شود، در هر دو دمای مذکور، نمونه‌های [B2CB2CB2] دچار پدیده تورق بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها شده‌اند. این نتایج در تطابق با تصاویر ماکروسکوپی بوده و به خوبی نشان‌دهنده آن است که وجود تعداد فصل‌مشترک‌های بیشتر الیاف بازالت/الیاف کربن می‌تواند منجر به افزایش پدیده تورق شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر لایه‌چینی و دماهای مختلف بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی-الیاف بازالت/الیاف کربن لایه نازک تک‌جهته پرداخته شد. در این تحقیق، سه نوع کامپوزیت هیبریدی متفاوت از نظر لایه چینی با کدهای [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. در این کدها، B و C به ترتیب بیانگر الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن، و اعداد بعد از حروف نشان‌دهنده تعداد لایه‌ها هستند. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- نتایج نشان داد که با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی نمونه‌ها، استحکام و مدول خمشی به طور جدی افزایش یافت. اگرچه افزایش دما منجر به افت استحکام و مدول خمشی تمامی نمونه‌ها شد، اما نمونه‌های [CB6C] دارای کمترین میزان افت خواص بودند. برخلاف استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها، کامپوزیت‌های [B3C2B3] دارای بالاترین مقدار کرنش بودند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به منظور بهبود استحکام و مدول خمشی، قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها راهکاری مناسب است. از طرف دیگر، برای بهبود کرنش و چقرمگی، لازم است که الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز نمونه‌ها قرار گیرند.

- Part A: Applied Science and Manufacturing, 72, 75-84" Composites: Part A, Vol. 72, pp. 75-84, 2015.
- [19] Jalalvand, M., Czél, G. and Wisnom, M. R., "Damage Analysis of Pseudo-Ductile Thin-Ply Ud Hybrid Composites—a New Analytical Method" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 83-93, 2015.
- [20] Czél, G. and Wisnom, M., "Demonstration of Pseudo-Ductility in High Performance Glass/Epoxy Composites by Hybridisation with Thin-Ply Carbon Prepreg" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 52, pp. 23-30, 2013.
- [21] ASTM, I., "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials" ASTM D790-07, 2007.
- [22] Azimpour-Shishevan, F., Akbulut, H. and Mohtadi-Bonab, M., "Effect of Thermal Cycling on Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fibre-Reinforced Epoxy Composites" Bulletin of Materials Science, Vol. 43, No. 1, pp. 1-10, 2020.
- [23] Dasari, S., Saurabh, S., Mahato, K. K., Prusty, R. K. and Ray, B. C., "Mechanical Properties of Glass/Carbon Inter-Ply Hybrid Polymer Composites at Different in-Situ Temperatures" Materials Today: Proceedings, Vol. 39, pp. 1192-1197, 2021.
- [24] Rathore, D. K., Prusty, R. K., Mohanty, S. C., Singh, B. P. and Ray, B. C., "In-Situ Elevated Temperature Flexural and Creep Response of Inter-Ply Glass/Carbon Hybrid Frp Composites" Mechanics of Materials, Vol. 105, pp. 99-111, 2017.
- [25] Shishevan, F. A. and Akbulut, H., "Effects of Thermal Shock Cycling on Mechanical and Thermal Properties of Carbon/Basalt Fiber-Reinforced Intraply Hybrid Composites" Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 441-449, 2019.
- [26] Khalili, S. M. R., Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Thermal Cycling on the Tensile Behavior of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers" Mechanics of Composite Materials, Vol. 52, No. 6, pp. 807-816, 2017.
- [27] Sun, J., "Pseudo-Ductility in Cfrp Laminates through the Ply Weakening Method", 2019.
- [2] Halvorsen, A., Salehi-Khojn, A., Mahinfalah, M. and Nakhaei-Jazar, R., "Temperature Effects on the Impact Behavior of Fiberglass and Fiberglass/Kevlar Sandwich Composites" Applied Composite Materials, Vol. 13, No. 6, pp. 369-383, 2006.
- [3] Aghamohammadi, H., Abbandanak, S., Eslami-Farsani, R. and Siadati, S., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the Flexural Properties of Fiber Metal Laminates" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020.
- [4] Fazlollah-Poor, M., Eslami-Farsani, R. and Aghamohammadi, H., "Experimental Investigation of the Effect of Shape Memory Alloy Wire Embedding on the Low-Velocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates Composites at Different Temperatures" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1057-1063, 2020.
- [5] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Design and Characterisation of Advanced Pseudo-Ductile Unidirectional Thin-Ply Carbon/Epoxy-Glass/Epoxy Hybrid Composites" Composite Structures, Vol. 143, pp. 362-370, 2016.
- [6] Eslami Farsani, R., Ebrahim Nejad Khaljiri, H., Khorsand, H. and Abbas Banaee, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [7] Swolfs, Y., Geboes, Y., Gorbatikh, L. and Pinho, S. T., "The Importance of Translaminar Fracture Toughness for the Penetration Impact Behaviour of Woven Carbon/Glass Hybrid Composites" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 103, pp. 1-8, 2017.
- [8] Najafi, M., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Hybridization Effect of Basalt and Carbon Fibers on Impact and Flexural Properties of Phenolic Composites" Iranian Polymer Journal, Vol. 23, No. 10, pp. 767-773, 2014.
- [9] Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., "Effect of Stacking Sequence on the Flexural Properties of Hybrid Composites Reinforced with Carbon and Basalt Fibers" Composites Part B: Engineering, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [10] Prusty, R. K., Rathore, D. K., Singh, B. P., Mohanty, S. C., Mahato, K. K. and Ray, B. C., "Experimental Optimization of Flexural Behaviour through Inter-Ply Fibre Hybridization in Frp Composite" Construction and Building Materials, Vol. 118, pp. 327-336, 2016.
- [11] Bunsell, A. and Harris, B., "Hybrid Carbon and Glass Fibre Composites" Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 157-164, 1974.
- [12] Manders, P. W. and Bader, M., "The Strength of Hybrid Glass/Carbon Fibre Composites" Journal of materials science, Vol. 16, No. 8, pp. 2246-2256, 1981.
- [13] Fuller, J. and Wisnom, M., "Exploration of the Potential for Pseudo-Ductility in Thin Ply Cfrp Angle-Ply Laminates Via an Analytical Method" Composites Science and Technology, Vol. 112, pp. 8-15, 2015.
- [14] Fuller, J. and Wisnom, M., "Pseudo-Ductility and Damage Suppression in Thin Ply Cfrp Angle-Ply Laminates" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 64-71, 2015.
- [15] Fuller, J., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Combining Fibre Rotation and Fragmentation to Achieve Pseudo-Ductile Cfrp Laminates" Composite Structures, Vol. 142, pp. 155-166, 2016.
- [16] Czél, G., Jalalvand, M., Wisnom, M. R. and Czigány, T., "Design and Characterisation of High Performance, Pseudo-Ductile All-Carbon/Epoxy Unidirectional Hybrid Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 111, pp. 348-356, 2017.
- [17] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Demonstration of Pseudo-Ductility in Unidirectional Hybrid Composites Made of Discontinuous Carbon/Epoxy and Continuous Glass/Epoxy Plies" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 72, pp. 75-84, 2015.
- [18] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M., "Ductility in Unidirectional Hybrid Composites Made of Discontinuous Carbon/Epoxy and Continuous Glass/Epoxy Plies. Composites