



بررسی خواص الیاف هیبریدی کامینگل شیشه/ پلی فنیلن سولفید و ارزیابی تاثیر آرایش الیاف بر خواص برشی میان لایه ای و کششی کامپوزیت های گرمانرم ساخته شده

میثم باقری بروج¹، محمد رضا محدث مجتهدی^{2*}، علیرضا خاوندی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-4413، mojtahed@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1404/11/09

پذیرش: 1405/03/17

کلیدواژگان

کامپوزیت گرمانرم تقویت شده با الیاف، الیاف کامینگل، پلی فنیلن سولفید، برس گرم.

در این مطالعه، ابتدا خواص الیاف هیبریدی کامینگل شیشه و پلی فنیلن سولفید از جمله خواص فیزیکی، حرارتی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه تأثیر آرایش الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت های گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه در زمینه پلی فنیلن سولفید نیز بررسی شد. ورق های کامپوزیتی با استفاده از نخ هیبریدی کامینگل شیشه/ پلی فنیلن سولفید و از طریق فرآیند پرس گرم در دو پیکربندی متفاوت ساخته شدند: (1) تقویت شده با الیاف پیوسته و تک جهته و (2) تقویت شده با الیاف کوتاه و با آرایش تصادفی. هدف اصلی، مقایسه مستقیم استحکام برشی میان لایه ای و خواص کششی این دو ساختار به منظور درک نقش جهت گیری الیاف در عملکرد نهایی محصول بود. نتایج آزمون های مکانیکی نشان دهنده ناهمسانگردی شدید در نمونه های تک جهته بود؛ به طوری که استحکام کششی در جهت طولی (289 مگاپاسکال) به مراتب بالاتر از جهت عرضی (5 مگاپاسکال) و نمونه های با الیاف خرد شده (61 مگاپاسکال) بود. به طور مشابه، مقدار استحکام برشی میان لایه ای در نمونه تک جهته (18.7 مگاپاسکال) به شکل چشمگیری بیشتر از نمونه های با الیاف تصادفی (7 مگاپاسکال) بود. نوآوری اصلی این مطالعه، تمرکز بر الیاف شیشه/ پلی فنیلن سولفید استفاده از نخ هیبریدی کامینگل به منظور بهبود آغشتگی و یکپارچه سازی الیاف و زمینه، و مقایسه مستقیم دو آرایش تقویت کننده شامل الیاف پیوسته تک جهته و الیاف کوتاه با توزیع تصادفی است.

Investigation of the properties of glass/polyphenylene sulfide commingled hybrid fibers and evaluation of the effect of fiber arrangement on the interlaminar shear and tensile properties of fabricated thermoplastic composites

Meysam Baghery Boroj¹, Mohammad Reza Mohaddes Mojtahedi^{1*}, Alireza Khavandi²

1- Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- School of Material Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mojtahed@aut.ac.ir

Keywords

Fiber-reinforced thermoplastic composite, Commingled Fibers, Polyphenylene sulfide, Hot press

Abstract

In this study, the properties of glass/polyphenylene sulfide commingled hybrid fibers were first investigated, including physical, thermal, and SEM images, and then the effect of fiber arrangement on the mechanical properties of glass-fiber reinforced thermoplastic composites in polyphenylene sulfide was also investigated. Composite sheets were fabricated using glass-comingled/PPS hybrid yarns through a hot pressing process in two different configurations: (1) reinforced with continuous, unidirectional fibers and (2) reinforced with short fibers and randomly arranged. The main objective was to directly compare the interlaminar shear strength (ILSS) and tensile properties of these two structures in order to understand the role of fiber orientation in the final product performance. The results of mechanical tests showed strong anisotropy in unidirectional samples; such that the tensile strength in the longitudinal direction (289 MPa) was much higher than that in the transverse direction (5 MPa) and chopped fiber samples (61 MPa). Similarly, the ILSS value of the unidirectional sample (18.7 MPa) was significantly higher than that of the random fiber samples (7 MPa). The main novelty of this study is its focus on glass/PPS fibers, the use of hybrid commingled yarn to improve impregnation and integration of the fibers and matrix, and the direct comparison of two reinforcement configurations, namely continuous unidirectional fibers and short fibers with random distribution.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های گرمانرم به دلیل ترکیبی از خواص منحصربه‌فرد شامل چقرمگی شکست بالا، مقاومت به ضربه عالی، پایداری شیمیایی و قابلیت بازیافت، به عنوان جایگزین‌های قدرتمند برای کامپوزیت‌های گرماسخت سنتی و فلزات در کاربردهای سازه‌ای پیشرفته ظهور کرده‌اند [1، 2]. برخلاف زمینه‌های گرماسخت که دارای شبکه‌ای برگشت‌ناپذیر هستند، پلیمرهای گرمانرم را می‌توان به دفعات ذوب و شکل‌دهی کرد که این ویژگی، ضمن فراهم آوردن امکان تولید سریع و اقتصادی، به توسعه اقتصاد چرخشی در صنعت مواد کمک شایانی می‌کند [3، 4]. با این حال، دستیابی به پتانسیل کامل این مواد مستلزم غلبه بر چالش ذاتی آن‌ها، یعنی گرانروی بالای مذاب پلیمری است که می‌تواند منجر به آغشته‌سازی ناقص الیاف تقویت‌کننده و در نتیجه، تضعیف یکپارچگی ساختاری و خواص مکانیکی محصول نهایی شود [5].

تکنیک‌های ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم به طور قابل توجهی به شکل و طول الیاف تقویت‌کننده وابسته است. در میان این روش‌ها، فرآیند پرس گرم یا قالب‌گیری فشاری به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در استفاده از پیش‌فرم‌های مختلف (مانند پارچه‌ها، الیاف کوتاه یا نوارهای تک‌جهته) و قابلیت تولید قطعات با هندسه تخت یا دارای انحنا ملایم، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی است [6].

در این میان، پلی‌فنیلن سولفید¹ به عنوان یک پلیمر مهندسی با عملکرد بالا، به دلیل مقاومت حرارتی استثنایی (دمای ذوب حدود 280°C)، پایداری ابعادی عالی و مقاومت برجسته در برابر طیف وسیعی از مواد شیمیایی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این ویژگی‌ها پلی‌فنیلن سولفید را برای کاربردهایی که نیازمند پایداری در محیط‌های خشن هستند، ایده‌آل می‌سازد. با این حال، شکنندگی ذاتی و رفتار تبلور پیچیده آن، ایجاب می‌کند که برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، با الیاف مناسب تقویت گردد.

آغشته‌سازی کامل الیاف تقویت‌کننده با زمینه پلیمری، کلید دستیابی به کامپوزیت‌هایی با عملکرد بالاست. برای تسهیل این فرآیند در پلیمرهای گرانروی بالا، راهکارهای متعددی توسعه یافته است که از آن جمله می‌توان به آغشته‌سازی با پودر، استفاده از فیلم‌های پلیمری و یا پلیمریزاسیون درجا اشاره کرد [7، 8، 9]. استفاده از الیاف هیبریدی شامل الیاف تقویت‌کننده و پلیمرهای گرمانرم، یکی از روش‌های جدید آغشته‌سازی در پروسه تولید کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشد که به دلیل نزدیکی هر دو جزء الیاف تقویت‌کننده و الیاف پلیمری، محصول نهایی کیفیت بالایی را دارا می‌باشد.

نخ‌های هیبریدی کامینگل²، که در آن‌ها رشته‌های الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری به صورت یکنواخت و همگن در هم آمیخته شده‌اند، یک راهکار بسیار مؤثر برای حل مشکل آغشته‌سازی ارائه می‌دهند [10، 11]. این ساختار منحصربه‌فرد با به حداقل رساندن مسیر جریان مذاب پلیمر، فرآیند یکپارچه‌سازی را در حین پرس گرم به شدت تسریع و تسهیل کرده و منجر به ساختاری با حفرات کمتر و فصل مشترک قوی‌تر می‌شود [12، 13، 14].

پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نخ‌های هیبریدی در ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم با زمینه‌های مختلف پلیمری مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌امید و پلی‌اتیلن ترفتالات به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [15، 16، 17]. این مطالعات نشان داده‌اند که کیفیت توزیع الیاف در نخ هیبریدی و شرایط فرآیندی، تأثیر مستقیمی بر خواص نهایی محصول دارد. در پژوهشی توسط ژانگ و همکاران، کامپوزیت‌های شیشه/پلی‌فنیلن سولفید با

آرایش تک‌جهته تولید شدند و استحکام کششی طولی حدود 300 تا 350 مگا پاسکال و استحکام برشی میان‌لایه‌ای حدود 20 مگا پاسکال گزارش شد. نتایج این مطالعه نشان داد هم‌راستایی مناسب الیاف و توزیع یکنواخت زمینه نقش مهمی در بهبود انتقال بار و افزایش خواص مکانیکی دارند [18]. در مطالعه‌ای دیگر، کیم و همکاران رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت‌شده با الیاف شیشه کوتاه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد استحکام کششی نمونه‌های دارای الیاف کوتاه تصادفی به‌طور محسوسی کمتر از ساختارهای تک‌جهته است. این کاهش عملکرد به جهت‌گیری تصادفی الیاف، کوتاه بودن طول مؤثر الیاف و افزایش تمرکز تنش نسبت داده شد [19]. مازور و همکاران تأثیر نخ‌های هیبریدی کامینگل را بر کیفیت آغستگی در کامپوزیت‌های گرمانرم بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد استفاده از ساختار کامینگل موجب کاهش فاصله نفوذ مذاب تا الیاف، بهبود توزیع زمینه و کاهش حفرات داخلی می‌شود و در نتیجه استحکام برشی میان‌لایه‌ای بهبود می‌یابد [20]. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه کامپوزیت‌های گرمانرم، بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نخ‌های هیبریدی کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید (شیشه/پلی‌فنیلن سولفید) و تولید کامپوزیت از آن‌ها با استفاده از روش پرس گرم یک رویکرد کاملاً نوین محسوب می‌شود. از این رو، ساخت این نوع کامپوزیت و ارزیابی خواص مکانیکی آن، نوآوری اصلی پژوهش حاضر به شمار می‌رود و خلأ اطلاعاتی موجود در این حوزه را برطرف می‌سازد. در این تحقیق، به طور مشخص به بررسی تأثیر آرایش الیاف بر خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی ساخته‌شده از نخ هیبریدی کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید پرداخته می‌شود. هدف اصلی، مقایسه کمی عملکرد مکانیکی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته و تک‌جهته با نمونه‌های حاوی الیاف کوتاه و با آرایش تصادفی است. برای این منظور، ورق‌های کامپوزیتی با استفاده از فرآیند پرس گرم تولید شده و خواص کلیدی آن‌ها، شامل استحکام برشی میان‌لایه‌ای³ و استحکام کششی، اندازه‌گیری و تحلیل می‌گردد تا درک عمیق‌تری از رابطه میان ساختار و خاصیت در این دسته از مواد پیشرفته حاصل شود.

2- تجربیات

2-1- ماده اولیه

ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش، نخ هیبریدی کامینگل با نام تجاری کامپوفیل⁴، محصول شرکت جوشی بود. این نخ از درهم‌آمیزی یکنواخت رشته‌های پیوسته شیشه (به عنوان فاز تقویت‌کننده) و رشته‌های پلی‌فنیلن سولفید (پلی‌فنیلن سولفید) (به عنوان زمینه گرمانرم) از طریق فرآیند دمش هوای پرفشار حاصل شده است. این ساختار پیش‌آغشته، توزیع همگن دو فاز را تضمین کرده و فرآیند یکپارچه‌سازی در مراحل بعدی را تسهیل می‌نماید.

2-2- ارزیابی ماده اولیه

2-2-1- ارزیابی خواص الیاف

جهت ارزیابی الیاف کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید، خواص فیزیکی مانند قطر الیاف، مساحت سطح، چگالی حجمی و چگالی خطی، مورد مطالعه قرار گرفت.

محاسبه نمره نخ با توجه به استاندارد ایزو 1889 مطابق فرمول زیر انجام گرفت که در 5 تکرار، نمونه‌هایی به طول 10 متر به صورت تصادفی از

³interlaminar shear strength

⁴ CompoFil

¹ Polyphenylene sulfide

² Commingled

رفتار حرارتی، شامل دماهای انتقال فاز مانند دمای انتقال شیشه‌ای، دمای تبلور و دمای ذوب، با استفاده از دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی^۴ (مدل S800) و مطابق با استاندارد ASTM D3418 مطالعه شد. نمونه‌ای به وزن تقریبی 10 میلی‌گرم در یک بوته آلومینیومی قرار داده شد و در اتمسفر نیتروژن با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای 550 درجه سانتی‌گراد گرم شد.

2-3- ساخت ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

به منظور ایجاد یک درک بنیادین از رفتار کامپوزیت‌های شیشه/پلی فنیلن سولفید و ایزوله کردن تأثیر آرایش الیاف از متغیرهای فرآیندی پیچیده، سه نوع ورق کامپوزیتی با استفاده از روش پرس گرم تولید گردید. این مرحله مقدماتی امکان مقایسه مستقیم میان دو معماری تقویت‌کننده اصلی را فراهم آورد: الیاف کوتاه با توزیع تصادفی و الیاف پیوسته با آرایش تک‌جهته.

برای این منظور، سه پیکربندی مجزا طراحی شد: 1. ورق با الیاف خردشده (ضخامت 1 میلی‌متر): نخ کامینگل به طول 2.5 سانتی‌متر برش داده شد (شکل 1) و به صورت کاملاً تصادفی و یکنواخت درون یک قالب مربعی به ابعاد 205×205 میلی‌متر توزیع گردید (شکل 2). هدف، ایجاد یک ساختار همسانگرد با ضخامت نهایی تقریبی 1 میلی‌متر بود. 2. ورق با الیاف خردشده (ضخامت 2 میلی‌متر): این نمونه مشابه نمونه اول تهیه شد، با این تفاوت که مقدار الیاف افزایش یافت تا ورقی با ضخامت نهایی تقریبی 2 میلی‌متر حاصل شود. این کار به منظور بررسی تأثیر جزئی افزایش کسر حجمی الیاف در ساختارهای تصادفی انجام گرفت. 3. ورق با الیاف تک‌جهته (ضخامت 1.7 میلی‌متر): در این حالت، رشته‌های پیوسته نخ کامینگل با دقت و به صورت کاملاً موازی در راستای طول قالب چیده شدند (شکل 3) تا یک ساختار کاملاً ناهمسانگرد با حداکثر خواص مکانیکی در یک جهت ایجاد شود. برای انجام یک مقایسه علمی، کسر حجمی الیاف در تمامی نمونه‌ها برابر می‌باشد تا تنها اثر آرایش الیاف به عنوان متغیر مستقل ارزیابی شود.



Fig. 1 Image of fibers cut to 2.5 cm in length

شکل 1 تصویر الیاف خردشده به طول 2.5 سانتی‌متر

بخش‌های مختلف بسته الیاف جدا شده و مورد سنجش وزنی قرار گرفت. اندازه‌گیری نمره نخ بر روی نخ‌های کامینگل پیوسته و پیش از فرآیند برش به الیاف کوتاه انجام شد.

$$T_x = \frac{P \times 1000}{L} \quad (1)$$

نمره نخ بر حسب تکس T_x

P وزن الیاف بر حسب گرم

L طول الیاف بر حسب متر

مساحت سطح الیاف نیز از تقسیم نمره نخ بر چگالی حجمی مطابق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$A = \frac{T_x}{\rho} \times 10^{-3} \quad (2)$$

A مساحت سطح الیاف (mm^2)

ρ چگالی حجمی بر حسب $\frac{g}{cm^3}$

با توجه به اینکه نمره نخ بر حسب tex ($g/1000 m$) و چگالی بر حسب g/cm^3 بیان می‌شود، ضریب 3-10 برای تبدیل واحدها و محاسبه سطح مقطع بر حسب mm^2 استفاده شده است.

تعیین چگالی حجمی الیاف مطابق با آزمون ASTM D792 با غوطه ور نمودن 5 گرم الیاف در آب مقطر انجام گرفت.

بررسی قطر الیاف با استفاده از میکروسکوپ پروجکتینا (آلمان) با بزرگنمایی 382.5 برابر، انجام گرفت. 10 نمونه الیاف به صورت تصادفی از میان دسته الیاف جدا شد و به صورت افقی بر روی یک شیشه چیده شد و با یک شیشه پوششی پوشانده شد. روی شیشه روکش، یک خط علامت کشیده شده بود که با حرکت عمودی نمونه، ضخامت الیاف در طول خط با دقت 0.1 میکرومتر مطابق با استاندارد ایزو 137 مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی مورفولوژی الیاف با ارزیابی تصاویر الیاف تهیه شده از میکروسکوپ نوری زایس (آلمان) و نرم افزار مربوط به آن نیز انجام شد (بزرگ نمایی 40×).

2-2-2- مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱

برای بررسی دقیق ریخت‌شناسی سطح و مقطع الیاف و همچنین شناسایی ترکیب عنصری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (کره جنوبی، مدل AIS 2100) استفاده شد. نمونه‌ها با ولتاژ شتاب‌دهنده 15 کیلوولت مورد بررسی قرار گرفتند. این دستگاه مجهز به آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس² بود که برای تحلیل کیفی و کمی عناصر تشکیل‌دهنده هر یک از فازهای الیاف به کار گرفته شد. آزمون آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس به صورت موضعی بر روی رشته‌های مجزای شیشه و پلی فنیلن سولفید در نخ هیبریدی کامینگل انجام شد. بدین منظور، نقاط مشخصی از هر فاز به صورت جداگانه انتخاب و ترکیب عنصری آن‌ها تحلیل گردید.

2-2-3- آزمون گرمایی

رفتار تخریب حرارتی و کسر وزنی اجزای تشکیل‌دهنده نخ هیبریدی با استفاده از آزمون گرماسنجی وزنی^۳ (مدل F3 209) و بر اساس استاندارد ASTM E1131 ارزیابی شد. نمونه‌ای به وزن تقریبی 4.5 گرم در اتمسفر نیتروژن و با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از دمای محیط تا 900 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا منحنی کاهش وزن بر حسب دما ثبت گردد.

¹ scanning electron microscopy

² Energy Dispersive Spectroscopy

³ Thermogravimetric analysis

⁴ Differential Scanning Calorimetry

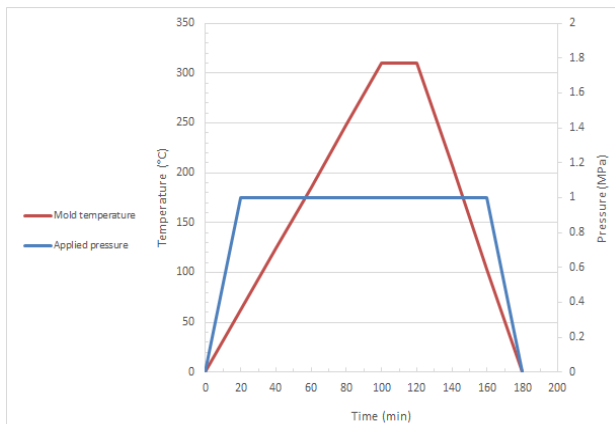


Fig. 4 Temperature-pressure application chart over time for sheet production

شکل 4 نمودار اعمال دما-فشار بر حسب زمان جهت تولید ورق

4-2- ارزیابی ورق‌های تولید شده

1-4-2- ارزیابی استحکام برشی میان لایه‌ای

استحکام برشی میان لایه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D2344 و با استفاده از آزمون برش شعاع کوتاه¹ اندازه‌گیری شد. آزمون‌ها بر روی دستگاه یونیورسال (آمریکا، مدل 5566) انجام گرفت (شکل 5). نمونه‌هایی با ابعاد 30×10 میلی‌متر از ورق‌های تولیدی بریده شده و با فاصله دو فک 20 میلی‌متر و سرعت بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. با نتایج به دست آمده و فرمول زیر می‌توان مقدار استحکام برشی میان لایه‌ای را محاسبه کرد:

$$ILSS = 0.75 \frac{P_b}{b \times d} \quad (3)$$

ILSS استحکام برشی میان لایه‌ای، MPa

P_b نیروی شکست، N

b و d به ترتیب عرض و ضخامت نمونه‌ها، mm

تعداد 5 نمونه در دما و رطوبت محیط به منظور گزارش استحکام برشی میان لایه‌ای برای کامپوزیت تهیه شده از هر یک از حالات، ارزیابی شد.



Fig. 5 Devices and equipment used to perform the ILSS test

شکل 5 دستگاه و فک استفاده شده جهت انجام آزمون استحکام برشی میان لایه‌ای



Fig. 2 Image of a frame containing chopped fibers for producing sheets with a random arrangement

شکل 2 تصویر قاب حاوی الیاف خرد شده جهت تولید ورق با آرایش تصادفی



Fig. 3 Image of a frame containing unidirectional fibers for sheet production

شکل 3 تصویر قاب حاوی الیاف تک‌جهته جهت تولید ورق

1-3-2- روش تولید ورق کامپوزیتی

فرآیند تولید ورق‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیک مجهز به هیت‌های کارت리지 و سیستم کنترل دما انجام شد. برای ساخت هر ورق، ابتدا قالب فولادی با ابعاد داخلی 205×205 میلی‌متر با واکس جداکننده پوشش داده می‌شد. سپس یک لایه فیلم جداکننده (کاپتون) و پارچه تفلون در کف قالب قرار می‌گرفت. پس از چیدن الیاف (خرد شده یا تک‌جهته) درون قالب، لایه‌های جداکننده بالایی نیز قرار داده می‌شدند. مجموعه قالب در میان صفحات پرس قرار گرفته و تحت سیکل دما-فشار مشخصی (شکل 4) قرار می‌گرفت. این سیکل شامل یک مرحله گرمایش تا دمای 310 درجه سانتی‌گراد، یک دوره نگهداری به مدت 20 دقیقه تحت فشار 1 مگاپاسکال برای اطمینان از ذوب کامل پلی فنیلن سولفید و آغشته‌سازی الیاف، و در نهایت یک مرحله خنک‌سازی کنترل شده تا دمای محیط بود.

¹ Short-Beam Shear

2-4-2- استحکام کششی کامپوزیت‌ها

توزیع و مورفولوژی هر جزء را فراهم می‌آورد. اندازه‌گیری دقیق قطرها نشان داد که قطر الیاف شیشه 18.1 ± 2.1 میکرومتر و قطر الیاف پلی فنیل سولفید برابر با 21.2 ± 0.9 میکرومتر است. یکنواختی بالای قطر الیاف پلی فنیل سولفید به فرآیند تولید دقیق آن (ذوب‌ریسی) نسبت داده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی الیاف نشان‌دهنده توزیع مناسب و درهم‌تنیدگی دو فاز است. این آرایش که در آن الیاف شیشه توسط الیاف پلی فنیل سولفید احاطه شده‌اند، برای دستیابی به آغشته‌سازی کامل در طی فرآیند پرس گرم بسیار مطلوب است.

همانطور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، سطح طولی الیاف شیشه و پلی فنیل سولفید کاملاً صاف و عاری از هرگونه ترک، خراش یا نقص قابل مشاهده است. این ویژگی سطحی یکنواخت، برای تضمین دوام و مقاومت بالا در برابر تنش‌های مکانیکی در کامپوزیت نهایی، حیاتی است.

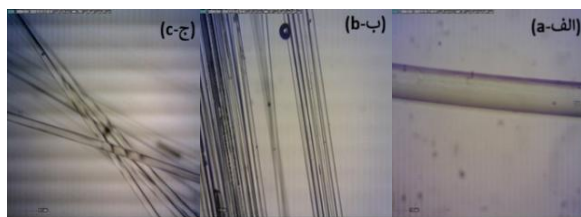


Fig. 7 Optical microscope images of: (a) single fiber surface, (b) fiber bundle surface, and (c) longitudinal knot on the fiber surface

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری، (الف) سطح تک لیف، (ب) سطح دسته الیاف، (ج) گره طولی در سطح الیاف الف

خواص کششی ورق‌های کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM D3039 و با استفاده از دستگاه یونیورسال (آمریکا، مدل 5566) تعیین گردید (شکل 6). نمونه‌های آزمون با ابعاد 250×25 میلی‌متر توسط برش واترجت تهیه شدند تا از آسیب حرارتی به لایه‌ها جلوگیری شود. پس از برش واترجت، لایه نمونه‌ها به صورت چشمی و نیز میکروسکوپ نوری بررسی شدند و نشانه آشکاری از جدایش لایه‌ای یا ایجاد شیار مؤثر مشاهده نشد. آزمون‌ها با سرعت کرنش ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه در دمای محیط انجام شد و کرنش از طریق جابه‌جایی فک‌های دستگاه آزمون یونیورسال محاسبه شد و از کرنش سنج استفاده نگردید. برای آزمون کشش، 5 نمونه برای هر حالت آزمایش شده است تا تکرارپذیری نتایج و انحراف معیار استاندارد تضمین شود.

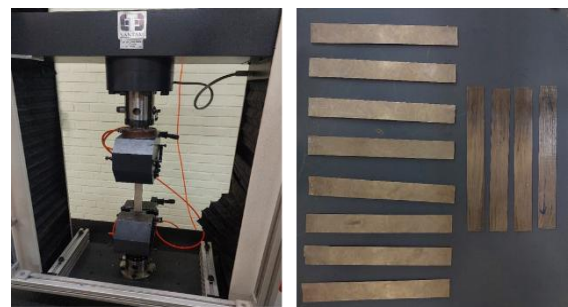


Fig. 6 Image of composite samples for tensile strength testing

شکل 6 تصویر نمونه‌های کامپوزیتی حین انجام آزمون استحکام کششی

3-4-2- مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور تحلیل سازوکارهای شکست و ارزیابی کیفیت فصل مشترک الیاف-زمینه پلیمری، سطوح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پس از آزمون‌های مکانیکی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (کره جنوبی، مدل AIS 2100) مورد مطالعه قرار گرفت. این بررسی امکان مشاهده دقیق نحوه شکست زمینه پلیمری، بیرون کشیدگی الیاف¹ و کیفیت چسبندگی در فصل مشترک را فراهم آورد.

3- نتایج و بحث

3-1- مشخصه‌یابی الیاف

مشخصه‌یابی دقیق خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی نخ هیبریدی کامپوزیت، به عنوان پیش‌نیاز اصلی برای درک رفتار کامپوزیت نهایی، در این بخش ارائه می‌گردد.

3-1-1- تصاویر میکروسکوپ نوری

با وجود اینکه بررسی‌های اولیه با میکروسکوپ نوری (شکل 7، بخش‌های الف-ا، ب-ب و ج-ج) یکنواختی قطر الیاف (با میانگین 20.9 ± 1.2 میکرومتر) را تأیید کرد، تشابه ظاهری کامل الیاف شیشه و پلی فنیل سولفید امکان تفکیک آن‌ها را با این روش مقدر نداشت. از این رو، برای شناسایی دقیق‌تر و بررسی جزئیات مورفولوژیکی، به مطالعه با میکروسکوپ الکترونی روبشی نیاز بود.

3-1-2- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل 8) به وضوح نشان‌دهنده دو فاز متمایز در الیاف هستند: الیاف روشن‌تر (A) که مربوط به شیشه و الیاف تیره‌تر (B) که نشان‌دهنده پلی فنیل سولفید است. این کنتراست، که با تحلیل آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس تأیید شد، امکان تحلیل دقیق‌تر

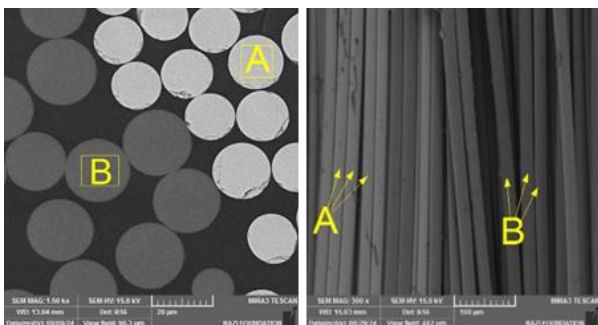


Fig. 8 SEM microscope images of the cross-sectional and longitudinal surfaces of the two fiber components (A glass fibers and B PPS fibers)

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی و طولی دو جزء الیاف (A الیاف شیشه و B الیاف پلی فنیل سولفید)

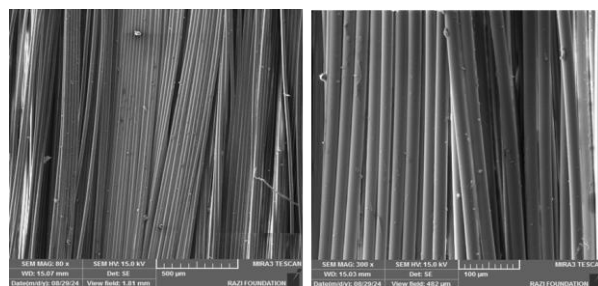


Fig. 9 SEM microscope images of the longitudinal surface of the fibers at different magnifications

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح طولی الیاف در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

¹ fiber pull-out

3-1-3- آزمون آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس

جهت تفکیک دو جزء الیاف شیشه و پلی فنیل سولفید ، آزمون طیفسنجی پراش انرژی نیز بر روی الیاف انجام شد (شکل 10 و 11).

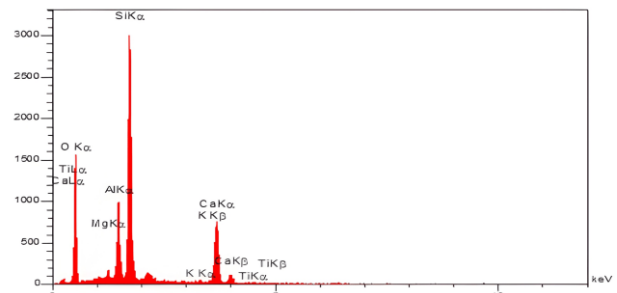


Fig. 10 EDS analysis of glass fibers

شکل 10 نمودار آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس الیاف شیشه

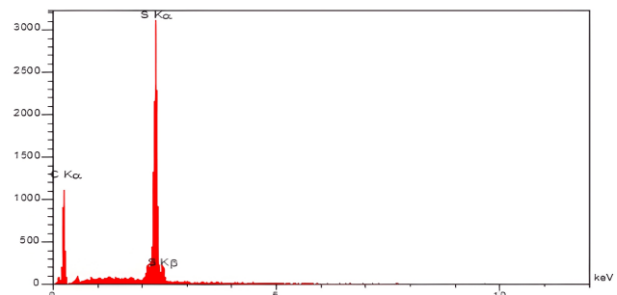


Fig. 11 EDS analysis of PPS

شکل 11 نمودار آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس الیاف پلی فنیل سولفید

3-1-4- آزمون حرارتی

آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (شکل 12) یک پیک ذوب اندوترمیک مشخص را در حدود دمای 290 درجه سانتی گراد نشان می دهد که مؤید دمای ذوب پلیمر پلی فنیل سولفید است. عدم مشاهده پیک های واضح برای دمای انتقال شیشه ای و دمای تبلور را می توان به تأثیر محدودکنندگی شبکه الیاف شیشه بر دینامیک زنجیره های پلیمری پلی فنیل سولفید نسبت داد که این پدیده در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف رایج است.

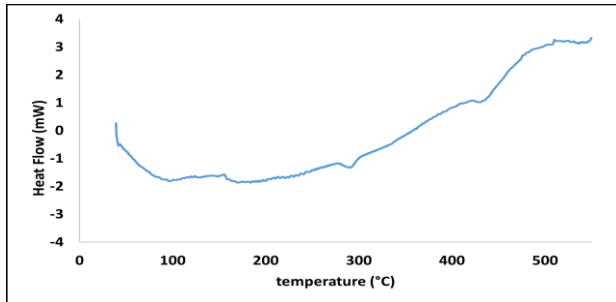


Fig. 12 DSC test chart of glass fiber and PPS combination

شکل 12 نمودار آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی ترکیب الیاف شیشه و پلی فنیل سولفید

نتایج آزمون گرماسنجی وزنی (شکل 13) پایداری حرارتی بالای نخ هیبریدی را تأیید می کند. فرآیند تخریب اصلی از حدود دمای 500 درجه سانتی گراد آغاز می شود. بر اساس وزن باقی مانده پس از تجزیه کامل فاز پلیمری، کسر وزنی الیاف شیشه در کامپوزیت برابر با 36.91٪ محاسبه شد. نمودار مشتق وزن (شکل 14) نیز قله تخریب اصلی را در دمای 519 درجه سانتی گراد نشان می دهد. همان گونه که از نمودار آزمون گرماسنجی وزنی مشخص است در دماهای پایین تر از 150 درجه سانتی گراد تغییرات وزنی عمدتاً به خروج رطوبت فیزیکی جذب شده و تبخیر ترکیبات فعال سطحی همانند سائزینگ و روغن ریسندگی موجود بر روی الیاف و شروع فرسایش پلی فنیل سولفید نسبت داده می شود ولی به طور کلی اگرچه گذار شیشه ای ماهیت تغییر وزنی ندارد، اما ظهور پیک در دمای 99.37°C نشان دهنده شروع افزایش تحرک زنجیره های آمورف است. در این لحظه، مواد فرار با وزن مولکولی پایین (نظیر رطوبت محبوس در فصل مشترک یا اجزای سبک عامل جفت کننده الیاف) که تا پیش از این در شبکه صلب پلیمر محبوس بودند، امکان خروج می یابند. این کاهش وزن بسیار ناچیز، توسط سنسورهای دقیق آزمون گرماسنجی وزنی ثبت شده و همزمانی تقریبی آن با بازه متداول T_g برای پلی فنیل سولفید ممکن است به عنوان یک امضای حرارتی برای T_g در نمودار مشتق ظاهر شده باشد. با این حال، شناسایی قطعی T_g همچنان بیشتر بر مبنای آزمون های حرارتی نظیر گرماسنجی روبشی تفاضلی قابل استناد است. نوسان جزئی مشاهده شده در حدود 267°C در نمودار مشتق منحنی گرماسنجی وزنی نیز می تواند ناشی از تغییرات بسیار محدود در جرم نمونه با آزاد شدن ترکیبات سبک باقی مانده در ساختار پلیمر باشد. اگرچه این دما در محدوده ای قرار دارد که با رخداد تبلور سرد در پلی فنیل سولفید همپوشانی دارد، اما با توجه به ماهیت جرمی آزمون گرماسنجی وزنی، نسبت دادن قطعی این تغییر به فرآیند تبلور مجدد امکان پذیر نیست. بنابراین این تغییر تنها به عنوان یک نوسان حرارتی احتمالی در این بازه دمایی گزارش می شود رخداد تبلور اساساً از نوع تغییرات گرمایی است و تأیید رخداد تبلور نیازمند آزمون های

نتایج نشان می دهد که الیاف شیشه (جدول 1) از سیلیسیم، اکسیژن و کربن تشکیل شده است، در حالی که الیاف پلی فنیل سولفید (جدول 2) عمدتاً حاوی کربن و گوگرد است. وجود نسبت بالای کربن، به استحکام و پایداری شیمیایی پلی فنیل سولفید کمک می کند و آن را در برابر حرارت و مواد شیمیایی مقاوم می سازد، در حالی که گوگرد به پلی فنیل سولفید خاصیت مقاومتی در برابر عوامل خوردنده می دهد. این ترکیب عناصر، پلی فنیل سولفید را به ماده ای مناسب برای کاربردهایی با شرایط محیطی سخت تبدیل می کند.

جدول 1 درصد عناصر تشکیل دهنده الیاف شیشه

Table 1 Percentage of elements constituting glass fibers

| عناصر | درصد وزنی (%) |
|--------|---------------|
| O | 54.88 |
| Mg | 0.56 |
| Al | 7.00 |
| Si | 23.53 |
| K | 0.16 |
| Ca | 13.80 |
| Ti | 0.06 |
| جمع کل | 100.00 |

جدول 2 درصد عناصر تشکیل دهنده الیاف پلی فنیل سولفید

Table 2 Percentage of elements constituting PPS fibers

| عناصر | درصد وزنی (%) |
|--------|---------------|
| C | 78.30 |
| S | 21.70 |
| جمع کل | 100.00 |

با توجه به اطلاعات به دست آمده استحکام کششی نمونه تک جهته طولی تقریباً 5 برابر بیشتر از نمونه الیاف خرد شده است. در مورد استحکام برشی میان لایه ای نیز، نمونه تک جهته طولی حدود 3 برابر مقاوم تر از نمونه الیاف خرد شده می باشد. این اختلاف را می توان به پیوستگی مسیر بار در امتداد الیاف ممتد نسبت داد، به گونه ای که در نمونه طولی، بخش عمده بار در راستایی اعمال می شود که فاز تقویت کننده بیشترین کارایی را در تحمل و توزیع تنش در آن دارد. در مقابل، آرایش تک جهته الیاف، ضعف قابل توجهی در خواص مکانیکی در جهت عمود بر الیاف ایجاد می کند، زیرا در این جهت، خواص عمدتاً به ماتریس پلیمری بستگی دارد.

در نمونه های تقویت شده با الیاف کوتاه، مقادیر استحکام کششی در دو ضخامت 1 و 2 میلی متر (به ترتیب 56 ± 10 و 61 ± 10 مگاپاسکال) با در نظر گرفتن بازه انحراف معیار، از نظر آماری تفاوت معناداری نشان نمی دهند. این تطابق نشان دهنده آن است که رفتار مکانیکی ورق های الیاف کوتاه در این پژوهش، کاملاً مستقل از ضخامت بوده و توزیع تصادفی و کسر حجمی الیاف در فرآیند تولید، بدون ایجاد گرادپان های مخرب در ضخامت های بالاتر، به خوبی حفظ شده است

استحکام کششی پایین نمونه های الیاف کوتاه نشان می دهد که طول الیاف خرد شده احتمالاً از طول بحرانی انتقال بار کمتر است. در این شرایط، پیش از آنکه تنش در لیف به حد تسلیم برسد، لیف از درون ماتریس بیرون کشیده می شود

نکته دیگر قابل توجه در نتایج خواص مکانیکی ناهمسانگردی¹ بسیار قوی در نمونه های با الیاف ممتد تک جهته است. خواص مکانیکی در جهت موازی با الیاف (طولی) به مراتب برتر از خواص در جهت عمود بر الیاف (عرضی) می باشد. تفاوت فاحش بین استحکام برشی میان لایه ای در جهت طولی (18.7 مگا پاسکال) و عرضی (0.6 مگا پاسکال) نشان می دهد که مقاومت در برابر جدا شدن لایه ها به شدت وابسته به جهت گیری الیاف است. در جهت طولی، الیاف پیوسته با ایجاد پل های قوی بین لایه ها، مقاومت بالایی را ارائه می دهند و بار کششی از طریق تنش های برشی در فصل مشترک از ماتریس به الیاف منتقل می شود. در جهت طولی، الیاف پیوسته مانع از لغزش صفحات ماتریس روی یکدیگر می شوند و الیاف شیشه مانند مهارنده های میکروسکوپی از اشاعه ی ترک های برشی درون لایه ای جلوگیری می کنند. در مقابل، در جهت عرضی، مقاومت برشی بین لایه ها صرفاً به چسبندگی ماتریس پلی فنیلن سولفید محدود می شود که بسیار ضعیف تر است. این پدیده در طراحی قطعاتی که تحت بارگذاری برشی خارج از محور قرار می گیرند، اهمیت ویژه ای دارد که همین روند در استحکام کششی نیز مشاهده می شود. استحکام بسیار بالای نمونه طولی (289 مگا پاسکال) ناشی از تحمل بار مستقیم توسط الیاف پیوسته با مدول بالا است.

استحکام کششی بسیار پایین در جهت عرضی 1 ± 5 مگا پاسکال در مقایسه با استحکام ذاتی پلیمر پلی فنیلن سولفید خالص، حاکی از تغییر نقش الیاف شیشه از فاز تقویت کننده به نقص های ساختاری بحرانی است. در بارگذاری عرضی، به دلیل ضعف برهم کنش های فصل مشترک، سطح الیاف به عنوان سایت های جوانه زنی ترک عمل کرده و با ایجاد تمرکز تنش شدید در فصل مشترک، موجب گسیختگی زودرس و ترد ماتریس پیش از رسیدن به ظرفیت باربری واقعی آن می شوند. در این حالت، مقاومت برشی صرفاً تابع

گرماسنجی نظیر گرماسنجی روبشی تفاضلی است ولی باز آرایشی زنجیره های آمورف به ساختار منظم بلوری و تغییر در هدایت حرارتی نمونه و آزاد سازی انرژی تبلور احتمالاً باعث ایجاد نوسانی ناچیز در تعادل وزنی دستگاه شده است. بعد از بررسی های صورت گرفته، در جدول 3 خواص کامل الیاف ذکر شده است.

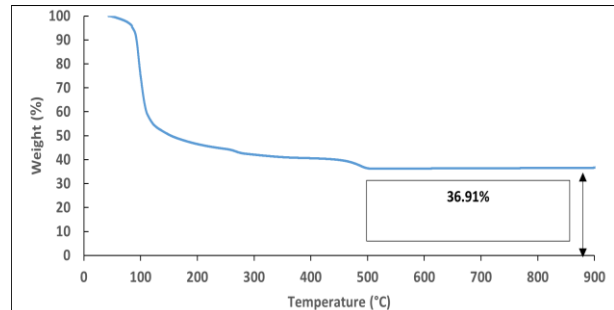


Fig. 13 TGA diagram of glass fiber/PPS Commingled fibers

شکل 13 نمودار آزمون گرماسنجی وزنی الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

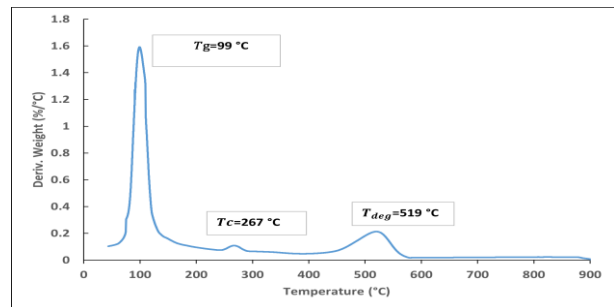


Fig. 14 Derivative of TGA diagram of glass fiber/PPS fiber Commingled fibers

شکل 14 مشتق نمودار آزمون گرماسنجی وزنی الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

جدول 3 خواص الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

Table 3 Properties of glass fiber/PPS Commingled fibers

| مقدار | شرح |
|---------------|---|
| 1.79 | دانسیته الیاف کامینگل شیشه/PPS ($\frac{g}{cm^3}$) |
| 1700 ± 50 | نمره نخ الیاف کامینگل شیشه/PPS (تکس) |
| 0.95 | مساحت سطح مقطع الیاف کامینگل شیشه/PPS (mm^2) |

2-3- بررسی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی

نتایج آزمون های استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی برای نمونه های کامپوزیتی با آرایش های مختلف الیاف در جدول 4 و 5 و همچنین شکل های 15 و 16 ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آزمون های استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی به وضوح نشان می دهند که آرایش الیاف نقش تعیین کننده ای در خواص مکانیکی کامپوزیت های الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید تولید شده به روش پرس گرم دارد و اهمیت آرایش و پیوستگی الیاف در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در کامپوزیت های الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید را تأیید می کند.

¹ Anisotropy

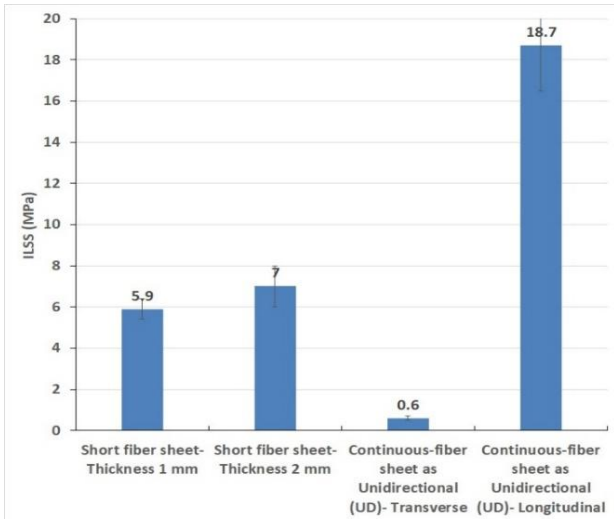


Fig. 15 Interlaminar shear strength (ILSS) test chart of PPS/Glass sheet

شکل 15 نمودار آزمون استحکام برشی میان لایه ای ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

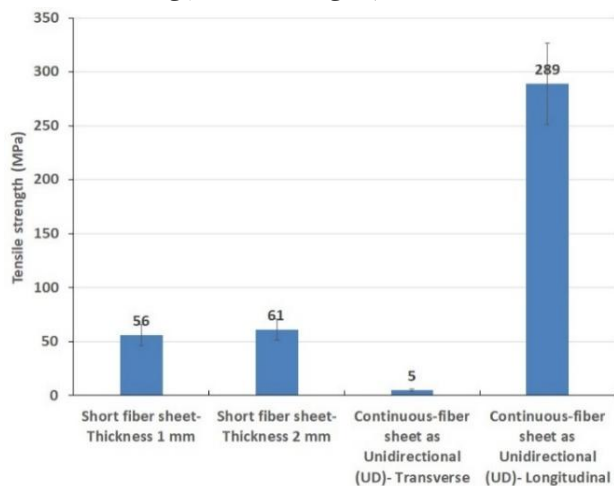


Fig. 16 PPS/Glass sheet tensile strength test chart

شکل 16 نمودار آزمون استحکام کششی ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

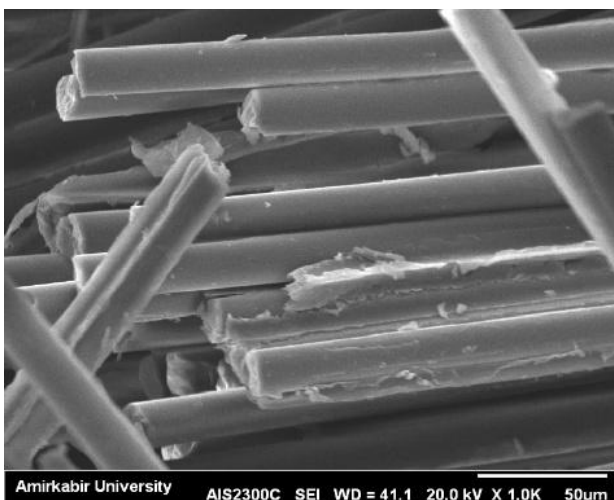


Fig. 17 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with unidirectional fibers (magnification 450x)

شکل 17 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق های کامپوزیتی تولید شده با الیاف تک جهته (بزرگنمایی 450 برابر)

نیروهای ضعیف واندروالسی و قفل مکانیکی ناشی از انقباض حرارتی ماتریس حول الیاف در حین فرآیند سردسازی است.

اختلاف بالای خواص مکانیکی در جهت طولی نسبت به عرضی، ثابت می کند که در کامپوزیت پلی فنیلن سولفید/ شیشه، خواص مکانیکی یک «کمیت ساختاری و سازه ای» است تا یک «خاصیت ذاتی ماده». این تفاوت رفتاری همچنین حاکی از آن است که سازوکار غالب آسیب در جهت طولی و عرضی یکسان نیست؛ به گونه ای که در جهت طولی، مشارکت فاز تقویت کننده در باربری بیشتر است، در حالی که در جهت عرضی، نقش ماتریس و فصل مشترک در کنترل شروع و گسترش آسیب برجسته تر می شود.

نمونه های تقویت شده با الیاف کوتاه، خواص مکانیکی نسبتاً همسان گرد تری را از خود نشان می دهند. توزیع تصادفی الیاف در تمام جهات، منجر به رفتار مکانیکی مشابه در جهات مختلف می شود. با این حال، به دلیل طول محدود الیاف و عدم پیوستگی آن ها در سراسر ساختار، مقادیر استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی در این نمونه ها به طور قابل توجهی پایین تر از مقادیر به دست آمده در جهت طولی نمونه های تک جهته است.

جدول 4 نتایج آزمون استحکام برشی میان لایه ای (استحکام برشی میان لایه ای) ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

Table 4 Interlaminar shear strength (ILSS) test results of PPS/Glass sheet

| ردیف | نمونه | ارزیابی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی ILSS (MPa) |
|------|----------------------------------|---|
| 1 | ورق الیاف ممتد تک جهته - طولی | 18.7±2.2 |
| 2 | ورق الیاف ممتد تک جهته - عرضی | 0.6±0.1 |
| 3 | ورق الیاف کوتاه ضخامت 2 میلی متر | 7±1 |
| 4 | ورق الیاف کوتاه ضخامت 1 میلی متر | 5.9±0.5 |

جدول 5 نتایج آزمون استحکام کششی ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

Table 5 Tensile strength test results of PPS/Glass sheet

| ردیف | نمونه | استحکام کششی (MPa) |
|------|----------------------------------|--------------------|
| 1 | ورق الیاف ممتد تک جهته - طولی | 289±38 |
| 2 | ورق الیاف ممتد تک جهته - عرضی | 5±1 |
| 3 | ورق الیاف کوتاه ضخامت 2 میلی متر | 61±10 |
| 3 | ورق الیاف کوتاه ضخامت 1 میلی متر | 56±10 |

3-3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ورق های کامپوزیتی

بررسی سطوح شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، درک عمیق تری از سازوکارهای شکست و کیفیت فصل مشترک الیاف-زمینه پلیمری فراهم می کند. در نمونه های تک جهته (شکل 17)، بیرون کشیدگی الیاف به عنوان یک سازوکار اصلی شکست قابل مشاهده است. در حالی که در برخی نواحی، زمینه پلیمری به خوبی الیاف را احاطه کرده است، در نقاط دیگر شکاف ها و جدایی هایی در فصل مشترک دیده می شود که می تواند نشان دهنده چسبندگی غیرایده آل و تأثیرگذار بر خواص برشی باشد.

در نمونه های با الیاف کوتاه و تصادفی (شکل 18)، آرایش نامنظم الیاف در جهات مختلف مشهود است. کیفیت آغشتگی در این نمونه ها نیز متغیر به نظر می رسد و توزیع غیریکنواخت تراکم الیاف می تواند به ایجاد نقاط ضعف موضعی منجر شود.

- [2] Khan, M. I., Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., "Investigation Of Impact Properties Of Para-Aramid Composites Made With A Thermoplastic-Thermoset Blend," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 35, No. 8, pp. 1147-1165, 2021.
- [3] Pegoretti, A., "Recycling Concepts For Short-Fiber-Reinforced And Particle-Filled Thermoplastic Composites: A Review," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 93-104, 2021.
- [4] Koerdts, M., Brüning, H., Von Oesen, A., Herrmann, A. S., "Modelling And Analysis Of The Thermal Characteristic Of Thermoplastic Composites From Hybrid Textiles During Compression Moulding," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 35, No. 1, pp. 127-146, 2019.
- [5] Mallick, P. K., "Chapter 5 - Thermoplastics And Thermoplastic-Matrix Composites For Lightweight Automotive Structures," *Materials, Design And Manufacturing For Lightweight Vehicles*, Vol. 2, No. 1, pp. 187-228, 2021.
- [6] Ebadi Shishegaran, M., Mehri Khansari, N., Ghorbani, H., "Experimental And Numerical Investigation Of Interlayer Fracture Of Glass/PP Continuous Fiber Thermoplastic Composite In Mixed Mode (I/II)," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 2536-2545, 2025.
- [7] Patou, J., Baillleul, J. L., Delaunay, D., Le Louët, B., "Influence Of Consolidation Process On Voids And Mechanical Properties Of Powdered And Commingled Carbon/PPS Laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 117, No. 1, pp. 260-275, 2019.
- [8] Dadou, A. H., Golzar, M., Akbari, D., Mohamadipour, M. H., "Visualization Of Flow And Void In Pultrusion Process Of Thermoplastic Composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 453-463, 2018.
- [9] Sattar, S., Nimal, A. S., Al-Ketan, O., Al-Rub, R. K. A., Liao, K., "Mechanical Behavior Of Long Discontinuous Glass Fiber Nylon Composite Produced By In-Situ Polymerization," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 154, No. 1, pp. 106779-106788, 2022.
- [10] Ono, M., Nakai, A., Ohtani, A., "Mechanical Properties Of Thermoplastic Composites Made Of Commingled Carbon Fiber/Nylon Fiber," *Polymers*, Vol. 13, No. 19, pp. 3206-3218, 2021.
- [11] Kravaev, P., Manke, M., Becker, M., Gries, T., "Influence Of Process Parameters On Filament Distribution And Blending Quality In Commingled Yarns Used For Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 27, No. 3, pp. 350-363, 2014.
- [12] Ueda, M., Ui, N., Ohtani, A., "Lightweight And Anti-Corrosive Fiber Reinforced Thermoplastic Rivet," *Composite Structures*, Vol. 188, No. 1, pp. 356-362, 2018.
- [13] Stolyarov, O., Seide, G., Gries, T., "15 - Commingled Composites," *Fiber Reinforced Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 439-460, 2021.
- [14] Ogale, V., Alagirusamy, R., "Properties Of GF/PP Commingled Yarn Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 21, No. 6, pp. 511-523, 2008.
- [15] Anil, A., Rama Prasad, V., Sudhakara, P., "Novel Eco-Friendly Commingled Polypropylene/Banana Fiber Composite: Studies On Thermal And Mechanical Properties," *Polymer Bulletin*, Vol. 73, No. 11, pp. 2987-3005, 2016.
- [16] Tomić, N., Putić, S., Pavlović, V., "Optimizing The Thermal Gradient And The Pulling Speed In A Thermoplastic Pultrusion Process Of PET/E Glass Fibers Using Finite Element Method," *Metallurgical & Materials Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 103-112, 2018.
- [17] Alagirusamy, R., Ogale, V., "Development And Characterization Of GF/PET, GF/Nylon, And GF/PP Commingled Yarns For Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 18, No. 3, pp. 269-285, 2005.
- [18] Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., Wang, C. H., "Glass Fiber Reinforced PPS Composites: Processing, Structure And Mechanical Properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 3, pp. 457-464, 2012.

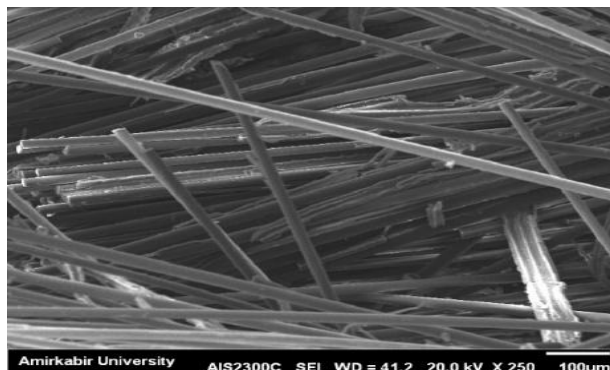


Fig. 18 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with short random fibers (250x magnification)

شکل 18 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق های کامپوزیتی

تولید شده با الیاف کوتاه رندوم (بزرگنمایی 250 برابر)

4- نتیجه گیری

این مطالعه به طور نظام مند، تأثیر معماری الیاف را بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت های گرمانرم شیشه/پلی فنیلن سولفید که با روش پرس گرم ساخته شده اند، مورد ارزیابی قرار داد. یافته های کلیدی، برتری قاطع کامپوزیت های تقویت شده با الیاف پیوسته و تک جهت را در کاربردهایی که تحت بارگذاری محوری قرار می گیرند، به اثبات رساند. این نمونه ها به دلیل پیوستگی ساختاری و انتقال بار کارآمد در طول الیاف، استحکام کششی و برشی میان لایه ای به مراتب بالاتری (به ترتیب حدود 5 و 3 برابر) نسبت به کامپوزیت های با الیاف کوتاه و آرایش تصادفی از خود نشان دادند.

با این حال، این عملکرد برتر به قیمت ایجاد ناهمسانگردی شدید در خواص تمام می شود؛ به طوری که مقاومت در جهت عمود بر الیاف به شدت کاهش می یابد. در مقابل، کامپوزیت های با الیاف خرد شده، خواص مکانیکی متعادل تر و همسانگردتری را ارائه می دهند که هرچند از نظر قدر مطلق ضعیف تر هستند، اما برای قطعات با هندسه پیچیده یا تحت بارگذاری های چندجهته، گزینه مناسب تری محسوب می شوند. تحلیل های میکروسکوپی نیز با آشکار ساختن سازوکارهای شکست متفاوت در دو ساختار، این مشاهدات ماکروسکوپی را تأیید نمود. در نهایت، این پژوهش نشان می دهد که انتخاب استراتژی تقویت (الیاف پیوسته در برابر خرد شده) یک تصمیم مهندسی حیاتی است که باید بر اساس درک دقیقی از شرایط بارگذاری و نیازهای کاربردی قطعه نهایی اتخاذ گردد و یک راه حل واحد برای تمام کاربردها وجود ندارد.

نتایج این مطالعه می تواند در صنایع پیشرفته نظیر هوافضا، خودرو، و تولید قطعات سازه ای که نیازمند طراحی دقیق آرایش الیاف هستند کاربرد داشته باشد. استفاده از نتایج حاضر می تواند بهینه سازی انتخاب نوع آرایش الیاف را بر اساس الزامات عملکردی و اقتصادی تسهیل کند. برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود اثر عامل های فرایندی دیگر نظیر دما و فشار پرس گرم، و نیز استفاده از انواع دیگر پلیمرهای گرمانرم در ترکیب با الیاف هیبریدی کامینگل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.

5- مراجع

- [1] Bahrami Gh, M., Mosalmani, R., Shishehsaz, M., "Micromechanical Modeling Of Creep Behavior Of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite And Long-Fiber Reinforced Composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2479-2489, 2024.

- [19] Kim, H. S., Lee, B. H., Choi, S. W., "Mechanical Properties Of Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites," Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 5, pp. 1256-1261, 2008.
- [20] Mazur, R. L., Ferreira, M., Amico, S. C., "Processing And Mechanical Behavior Of Commingled Glass Fiber/Thermoplastic Composites," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 28, No. 9, pp. 1234-1248, 2015.