



## 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 بروج<sup>1</sup>، محمد رضا محدث مجتهدی<sup>2\*</sup> و علیرضا خاوندی<sup>3</sup>

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: .....

پذیرش: .....

### کلیدواژگان

کامپوزیت گرمانرم تقویت شده با

الیاف، الیاف کامینگل،

پلی فنیلن سولفید،

پرس 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 Boroj<sup>1</sup>, Mohammad Reza Mohaddes Mojtahedi<sup>1\*</sup>, Alireza Khavandi<sup>2</sup>

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

کامپوزیت های گرمانرم به دلیل ترکیبی از خواص منحصربه فرد شامل چقرمگی شکست بالا، مقاومت به ضربه عالی، پایداری شیمیایی و قابلیت بازیافت، به عنوان جایگزین های قدرتمند برای کامپوزیت های گرماسخت سنتی و فلزات در کاربردهای سازه ای پیشرفته ظهور کرده اند [1، 2]. برخلاف زمینه های گرماسخت که دارای شبکه ای برگشتناپذیر هستند، پلیمرهای گرمانرم را می توان به دفعات ذوب و شکل دهی کرد که این ویژگی، ضمن فراهم آوردن امکان تولید سریع و اقتصادی، به توسعه اقتصاد چرخشی در صنعت مواد کمک شایانی می کند [3، 4]. با این حال، دستیابی به پتانسیل کامل این مواد مستلزم غلبه بر چالش ذاتی آن ها، یعنی گرانبوی بالای مذاب پلیمری است که می تواند منجر به آغشته سازی ناقص الیاف تقویت کننده و در نتیجه، تضعیف یکپارچگی ساختاری و خواص مکانیکی محصول نهایی شود [5].

تکنیک های ساخت کامپوزیت های گرمانرم به طور قابل توجهی به شکل و طول الیاف تقویت کننده وابسته است. در میان این روش ها، فرآیند پرس گرم یا قالب گیری فشاری به دلیل انعطاف پذیری بالا در استفاده از پیش فرم های مختلف (مانند پارچه ها، الیاف کوتاه یا نوارهای تک جهته) و قابلیت تولید قطعات با هندسه تخت یا دارای انحنا می لایم، یکی از متداول ترین روش ها برای ساخت ورق های کامپوزیتی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی است [6].

در این میان، پلی فنیلن سولفید (PPS)<sup>1</sup> 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 ویژه ای را به خود جلب کرده است. این ویژگی ها PPS را برای کاربردهای که نیازمند پایداری در محیط های خشن هستند، ایده آل می سازد. با این حال، شکنندگی ذاتی و رفتار تبلور پیچیده آن، ایجاب می کند که برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، با الیاف مناسب تقویت گردد.

آغشته سازی کامل الیاف تقویت کننده با زمینه پلیمری، کلید دستیابی به کامپوزیت هایی با عملکرد بالاست. برای تسهیل این فرآیند در پلیمرهای گرانبوی بالا، راهکارهای متعددی توسعه یافته است که از آن جمله می توان به آغشته سازی با پودر، استفاده از فیلم های پلیمری و یا پلیمریزاسیون درجا اشاره کرد [7، 8، 9]. استفاده از الیاف هیبریدی شامل الیاف تقویت کننده و پلیمرهای گرمانرم، یکی از روش های جدید آغشته سازی در پروسه تولید کامپوزیت های گرمانرم می باشد که به دلیل نزدیکی هر دو جزء الیاف تقویت کننده و الیاف پلیمری، محصول نهایی کیفیت بالایی را دارا می باشد.

نخ های هیبریدی کامپنل<sup>2</sup>، که در آن رشته های الیاف تقویت کننده و زمینه پلیمری به صورت یکنواخت و همگن در هم آمیخته شده اند، یک راهکار بسیار مؤثر برای حل مشکل آغشته سازی ارائه می دهند [10، 11]. این ساختار منحصربه فرد با به حداقل رساندن مسیر جریان مذاب پلیمر، فرآیند یکپارچه سازی را در حین پرس گرم به شدت تسریع و تسهیل کرده و منجر به ساختاری با حفرات کمتر و فصل مشترک قوی تر می شود [12، 13، 14].

پیشینه تحقیقات نشان می دهد که استفاده از نخ های هیبریدی در ساخت کامپوزیت های گرمانرم با زمینه های مختلف پلیمری مانند پلی پروپیلن، پلی آمید و پلی اتیلن ترفتالات به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [15، 16، 17]. این مطالعات نشان داده اند که کیفیت توزیع الیاف در نخ هیبریدی و شرایط فرآیندی، تأثیر مستقیمی بر خواص نهایی محصول دارد. در پژوهشی توسط Zhang و همکاران، کامپوزیت های شیشه/PPS با آرایش

تک جهته تولید شدند و استحکام کششی طولی حدود 300 تا 350 MPa و استحکام برشی میان لایه ای حدود 20 MPa گزارش شد. نتایج این مطالعه نشان داد هم راستایی مناسب الیاف و توزیع یکنواخت زمینه نقش مهمی در بهبود انتقال بار و افزایش خواص مکانیکی دارند [18]. در مطالعه ای دیگر، Kim و همکاران رفتار مکانیکی کامپوزیت های گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه کوتاه را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد استحکام کششی نمونه های دارای الیاف کوتاه تصادفی به طور محسوسی کمتر از ساختارهای تک جهته است. این کاهش عملکرد به جهت گیری تصادفی الیاف، کوتاه بودن طول مؤثر الیاف و افزایش تمرکز تنش نسبت داده شد [19]. Mazur و همکاران تأثیر نخ های هیبریدی کامپنل را بر کیفیت آغستگی در کامپوزیت های گرمانرم بررسی کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد استفاده از ساختار کامپنل موجب کاهش فاصله نفوذ مذاب تا الیاف، بهبود توزیع زمینه و کاهش حفرات داخلی می شود و در نتیجه استحکام برشی میان لایه ای بهبود می یابد [20]. با وجود پیشرفت های چشمگیر در زمینه کامپوزیت های گرمانرم، بررسی پیشینه تحقیق نشان می دهد که استفاده از نخ های هیبریدی کامپنل شیشه/پلی فنیلن سولفید (Glass/PPS) و تولید کامپوزیت از آن ها با استفاده از روش پرس گرم (Hot press) یک رویکرد کاملاً نوین محسوب می شود. از این رو، ساخت این نوع کامپوزیت و ارزیابی خواص مکانیکی آن، نوآوری اصلی پژوهش حاضر به شمار می رود و خلأ اطلاعاتی موجود در این حوزه را برطرف می سازد. در این تحقیق، به طور مشخص به بررسی تأثیر آرایش الیاف بر خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی ساخته شده از نخ هیبریدی کامپنل شیشه/PPS پرداخته می شود. هدف اصلی، مقایسه کمی عملکرد مکانیکی نمونه های تقویت شده با الیاف پیوسته و تک جهته با نمونه های حاوی الیاف کوتاه و با آرایش تصادفی است. برای این منظور، ورق های کامپوزیتی با استفاده از فرآیند پرس گرم تولید شده و خواص کلیدی آن ها، شامل استحکام برشی میان لایه ای (ILSS)<sup>3</sup> و استحکام کششی، اندازه گیری و تحلیل می گردد تا درک عمیق تری 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 کامپنل با نام تجاری کامپوفیل<sup>4</sup>، محصول شرکت جوشی بود. این نخ از درهم آمیزی یکنواخت رشته های پیوسته شیشه (به عنوان فاز تقویت کننده) و رشته های پلی فنیلن سولفید (PPS) (به عنوان زمینه گرمانرم) از طریق فرآیند دمش هوای پرفشار حاصل شده است. این ساختار پیش آغشته، توزیع همگن دو فاز را تضمین کرده و فرآیند یکپارچه سازی در مراحل بعدی را تسهیل می نماید.

### 2-2- ارزیابی ماده اولیه

#### 2-2-1- ارزیابی خواص الیاف

جهت ارزیابی الیاف کامپنل شیشه/PPS، خواص فیزیکی مانند قطر الیاف، مساحت سطح، چگالی حجمی و چگالی خطی، مورد مطالعه قرار گرفت. محاسبه نمره نخ با توجه به استاندارد ISO 1889 مطابق فرمول زیر انجام گرفت که در 5 تکرار، نمونه هایی به طول 10 متر به صورت تصادفی از بخش های مختلف بسته الیاف جدا شده و مورد سنجش وزنی قرار گرفت. اندازه گیری نمره نخ بر روی نخ های کامپنل پیوسته و پیش از فرآیند برش به الیاف کوتاه انجام شد.

<sup>3</sup>interlaminar shear strength

<sup>4</sup> CompoFil

<sup>1</sup> Polyphenylene sulfide

<sup>2</sup> Commingled

رفتار حرارتی، شامل دماهای انتقال فاز مانند دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)، تبلور (Tc) و ذوب (Tm)، با استفاده از دستگاه DSC<sup>۳</sup> (مدل DSC S800) و مطابق با استاندارد ASTM D3418 مطالعه شد. نمونه‌ای به وزن تقریبی 10 میلی‌گرم در یک بوتله 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/PPS

به منظور ایجاد یک درک بنیادین از رفتار کامپوزیت‌های شیشه/PPS 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 خرد شده (ضخامت 1 میلی‌متر): نخ کامپوزیت 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 خرد شده (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 کامپوزیت 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 خرد شده به طول 2.5 سانتی‌متر

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

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 ( $mm^2$ )  
 $\rho$  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 منطبق با آزمون ASTM D792 با غوطه ور نمودن 5 گرم الیاف در آب مقطر انجام گرفت.

بررسی قطر الیاف با استفاده از میکروسکوپ پروجکتیو (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 ISO137 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 (SEM)

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 ایکس ( $EDS^2$ ) بود که برای تحلیل کیفی و کمی عناصر تشکیل‌دهنده هر یک از فازهای الیاف به کار گرفته شد. آزمون EDS به صورت موضعی بر روی رشته‌های مجزای شیشه و PPS در نخ هیبریدی کامپوزیت 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 TGA<sup>۳</sup> (مدل TGA 209 F3) 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.

<sup>3</sup> Thermogravimetric analysis  
<sup>4</sup> Differential Scanning Calorimetry

<sup>1</sup> scanning electron microscopy  
<sup>2</sup> Energy Dispersive Spectroscopy

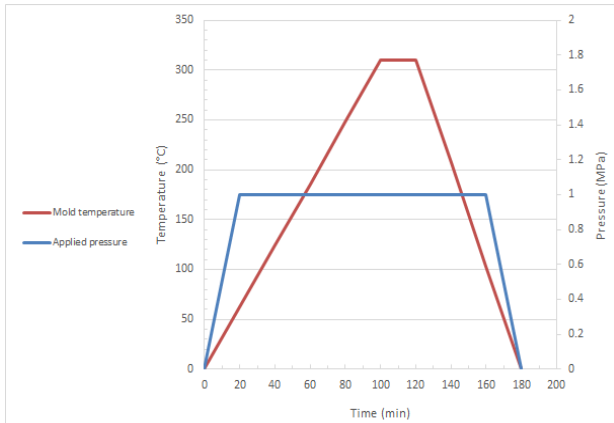


Fig. 4 Temperature-pressure application chart over time for sheet production

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

#### 2-4- ارزیابی ورق های تولید شده

##### 2-4-1- ارزیابی استحکام برشی میان لایه ای

استحکام برشی میان لایه ای نمونه های کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D2344 و با استفاده از آزمون برش شعاع کوتاه (Short-Beam Shear) اندازه گیری شد. آزمون ها بر روی دستگاه یونیورسال (مدل 5566) انجام گرفت (شکل 5). نمونه هایی با ابعاد 30×10 میلی متر از ورق های تولیدی بریده شده و با فاصله دو فک 20 میلی متر و سرعت بارگذاری 2 میلی متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. با نتایج به دست آمده و فرمول زیر می توان مقدار ILSS را محاسبه کرد:

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

ILSS استحکام برشی میان لایه ای، MPa

$P_b$  نیروی شکست، N

b و d به ترتیب عرض و ضخامت نمونه ها، mm

تعداد 5 نمونه در دما و رطوبت محیط به منظور گزارش ILSS 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 ILSS



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 تک جهته جهت تولید ورق

##### 2-3-1- روش تولید ورق کامپوزیتی

فرآیند تولید ورق ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیک مجهز به هیتزهای کارتریجی و سیستم کنترل دما انجام شد. برای ساخت هر ورق، ابتدا قالب فولادی با ابعاد داخلی 205×205 میلی متر با واکس جداکننده پوشش داده می شد. سپس یک لایه فیلم جداکننده (کاپتون) و پارچه تفلون در کف قالب قرار می گرفت. پس از چیدن الیاف (خرد شده یا تک جهته) درون قالب، لایه های جداکننده بالایی نیز قرار داده می شدند. مجموعه قالب در میان صفحات پرس قرار گرفته و تحت سیکل دما-فشار مشخصی (شکل 4) قرار می گرفت. این سیکل شامل یک مرحله گرمایش تا دمای 310 درجه سانتی گراد، یک دوره نگهداری به مدت 20 دقیقه تحت فشار 1 مگاپاسکال برای اطمینان از ذوب کامل PPS و آغشته سازی الیاف، و در نهایت یک مرحله خنک سازی کنترل شده تا دمای محیط بود.

#### 2-4-2- استحکام کششی کامپوزیت ها

خواص کششی ورق های کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM D3039 و با استفاده از دستگاه یونیورسال ( آمریکا، مدل 5566) تعیین گردید (شکل 6). نمونه های آزمون با ابعاد 250×25 میلی متر توسط برش واتر جت تهیه شدند تا از آسیب حرارتی به لایه ها جلوگیری شود. پس از برش واتر جت، لایه نمونه ها به صورت چشمی و نیز میکروسکوپ نوری بررسی شدند و نشانه آشکاری از جدایش لایه ای یا ایجاد شیار مؤثر مشاهده نشد. آزمون ها با سرعت کرنش ثابت 2 میلی متر بر دقیقه در دمای محیط انجام شد و کرنش از طریق جابه جایی فک های دستگاه آزمون یونیورسال محاسبه شد و از اکستنسومتر استفاده نگردید. برای آزمون کشش، 5 نمونه برای هر حالت آزمایش شده است تا تکرار پذیری نتایج و انحراف معیار استاندارد تضمین شود.

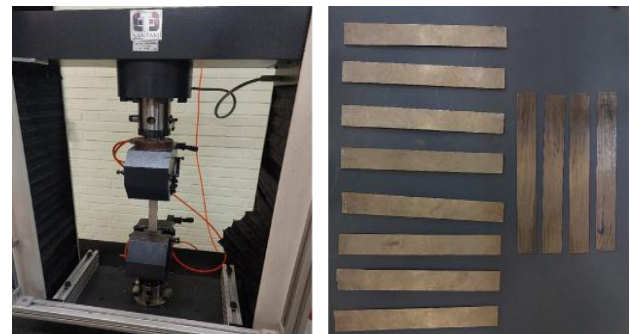


Fig. 6 Image of composite samples for tensile strength testing

شکل 6 تصویر نمونه های کامپوزیتی حین انجام آزمون استحکام کششی

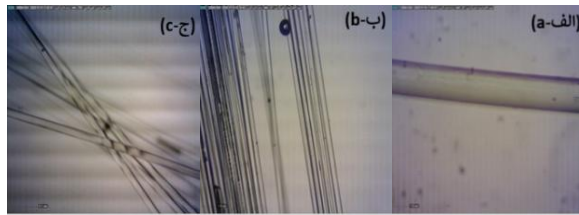


Fig. 7 Optical microscope images of: (a) single fiber surface, (b) fiber bundle surface, and (c) longitudinal knot on the fiber surface

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

#### 2-4-3- مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور تحلیل سازوکارهای شکست و ارزیابی کیفیت فصل مشترک الیاف-زمینه پلیمری، سطوح شکست نمونه های کامپوزیتی پس از آزمون های 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 الیاف<sup>1</sup> و کیفیت چسبندگی در فصل مشترک را فراهم آورد.

#### 3- نتایج و بحث

##### 3-1- مشخصه یابی الیاف

مشخصه یابی دقیق خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی نخ هیبریدی کامپوزیت، به عنوان پیش نیاز اصلی برای درک رفتار کامپوزیت نهایی، در این بخش ارائه می گردد.

##### 3-1-1- تصاویر میکروسکوپ نوری

با وجود اینکه بررسی های اولیه با میکروسکوپ نوری (شکل 7، بخش های الف-ا، ب-ب و ج-ج) یکنواختی قطر الیاف (با میانگین  $20.9 \pm 1.2$  میکرومتر) را تأیید کرد، تشابه ظاهری کامل الیاف شیشه و PPS امکان تفکیک آن ها را با این روش مقدور نساخت. از این رو، برای شناسایی دقیق تر و بررسی جزئیات مورفولوژیکی، به مطالعه با میکروسکوپ الکترونی روبشی نیاز بود.

##### 3-1-2- تصاویر میکروسکوپ SEM

تصاویر SEM (شکل 8) به وضوح نشان دهنده دو فاز متمایز در الیاف هستند: الیاف روشن تر (A) که مربوط به شیشه و الیاف تیره تر (B) که نشان دهنده PPS است. این کنتراست، که با تحلیل EDS تأیید شد، امکان تحلیل دقیق تر

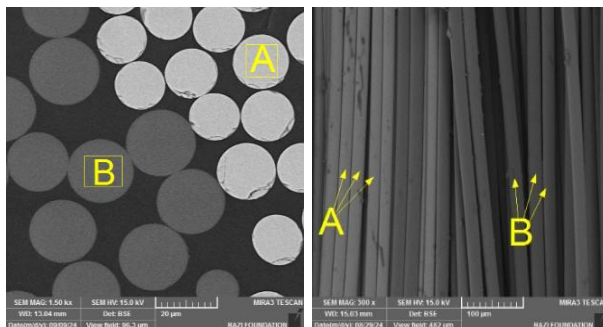


Fig. 8 SEM microscope images of the cross-sectional and longitudinal surfaces of the two fiber components (A glass fibers and B PPS fibers)

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح مقطع عرضی و طولی دو جزء الیاف (A الیاف شیشه و B الیاف PPS)

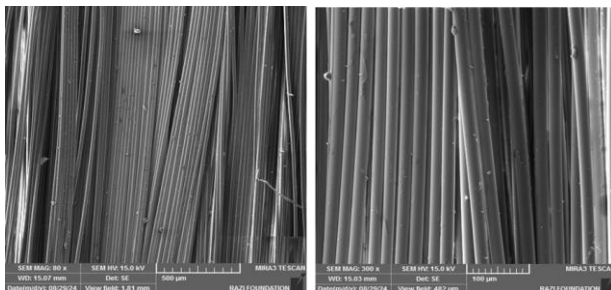


Fig. 9 SEM microscope images of the longitudinal surface of the fibers at different magnifications

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح طولی الیاف در بزرگنمایی های مختلف

<sup>1</sup> fiber pull-out

### 3-1-3 آزمون EDS

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

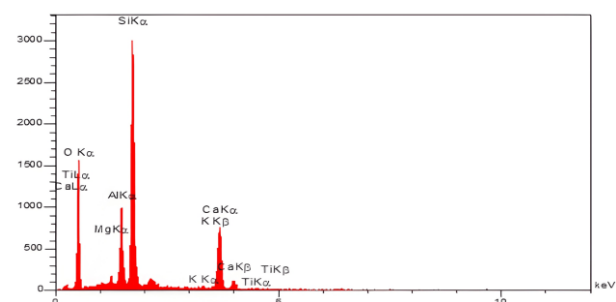


Fig. 10 EDS analysis of glass fibers

شکل 10 نمودار EDS الیاف شیشه

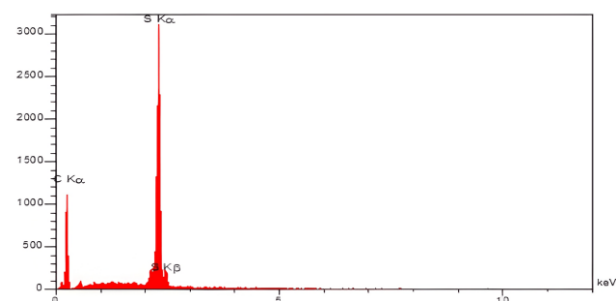


Fig. 11 EDS analysis of PPS

شکل 11 نمودار EDS الیاف PPS

نتایج نشان می‌دهد که الیاف شیشه (جدول 1) از سیلیسیم، اکسیژن و کربن تشکیل شده است، در حالی که الیاف PPS (جدول 2) عمدتاً حاوی کربن و گوگرد است. وجود نسبت بالای کربن، به استحکام و پایداری شیمیایی PPS کمک می‌کند و آن را در برابر حرارت و مواد شیمیایی مقاوم می‌سازد، در حالی که گوگرد به PPS خاصیت مقاومتی در برابر عوامل خوردنده می‌دهد. این ترکیب عناصر، PPS را به ماده‌ای مناسب برای کاربردهایی با شرایط محیطی سخت تبدیل می‌کند.

جدول 1 درصد عناصر تشکیل دهنده الیاف شیشه

Table 1 Percentage of elements constituting glass fibers

عنصر	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 PPS

Table 2 Percentage of elements constituting PPS fibers

عنصر	درصد وزنی (%)
C	78.30
S	21.70
جمع کل	100.00

### 4-1-3 آزمون حرارتی

آزمون DSC (شکل 12) یک پیک ذوب اندوترمیک مشخص را در حدود دمای 290 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که مؤید دمای ذوب پلیمر PPS است. عدم مشاهده پیک‌های واضح برای دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) و تبلور (Tc) را می‌توان به تأثیر محدودکنندگی شبکه الیاف شیشه بر دینامیک زنجیره‌های پلیمری PPS نسبت داد که این پدیده در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف رایج است.

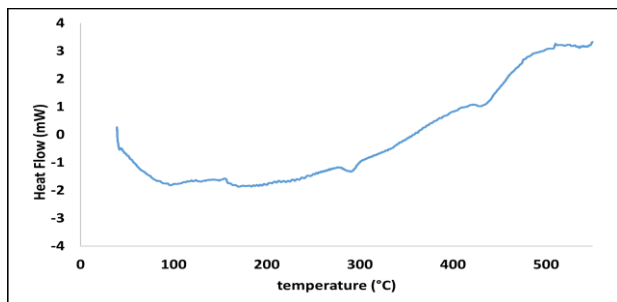


Fig. 12 DSC test chart of glass fiber and PPS combination

شکل 12 نمودار آزمون DSC ترکیب الیاف شیشه و PPS

نتایج آزمون TGA (شکل 13) پایداری حرارتی بالای نخ هیبریدی را تأیید می‌کند. فرآیند تخریب اصلی از حدود دمای 500 درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود. بر اساس وزن باقی‌مانده 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 سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار TGA مشخص است در دماهای پایین‌تر از 150 درجه سانتی‌گراد تغییرات وزنی، عمدتاً به خروج رطوبت فیزیکی جذب شده و تبخیر ترکیبات فعال سطحی همانند سایزینگ و روغن ریسندگی موجود بر روی الیاف و شروع فرسایش PPS نسبت داده می‌شود ولی به طور کلی اگرچه گذار شیشه‌ای ماهیت تغییر وزنی ندارد، اما ظهور پیک در دمای 99.37 °C نشان‌دهنده شروع افزایش تحرک زنجیره‌های آمورف است. در این لحظه، مواد فرار با وزن مولکولی پایین (نظیر رطوبت محبوس در فصل مشترک یا اجزای سبک عامل جفت‌کننده الیاف) که تا پیش از این در شبکه صلب پلیمر محبوس بودند، امکان خروج می‌یابند. این کاهش وزن بسیار ناچیز، توسط سنسورهای دقیق TGA ثبت شده و هم‌زمانی تقریبی آن با بازه متداول  $T_g$  برای PPS ممکن است به‌عنوان یک امضای حرارتی برای  $T_g$  در نمودار مشتق ظاهر شده باشد. با این حال، شناسایی قطعی  $T_g$  همچنان بیشتر بر مبنای آزمون‌های حرارتی نظیر DSC قابل استناد است.

نوسان جزئی مشاهده‌شده در حدود 267 °C در نمودار DTG نیز می‌تواند ناشی از تغییرات بسیار محدود در جرم نمونه با آزاد شدن ترکیبات سبک باقی‌مانده در ساختار پلیمر باشد. اگرچه این دما در محدوده‌ای قرار دارد که با رخداد تبلور سرد در PPS همپوشانی دارد، اما با توجه به ماهیت گرمی آزمون TGA، نسبت دادن قطعی این تغییر به فرآیند تبلور مجدد امکان‌پذیر نیست. بنابراین این تغییر تنها به‌عنوان یک نوسان حرارتی احتمالی در این بازه دمایی گزارش می‌شود رخداد تبلور اساساً از نوع تغییرات گرمایی است و تأیید رخداد تبلور نیازمند آزمون‌های گرماسنجی نظیر DSC است ولی بازآرایی زنجیره‌های آمورف به ساختار منظم بلوری و تغییر در هدایت حرارتی نمونه و آزادسازی انرژی تبلور احتمالاً باعث ایجاد نوسانی ناچیز در تعادل وزنی دستگاه شده است.

در نمونه های تقویت شده با الیاف کوتاه، مقادیر استحکام کششی در دو ضخامت 1 و 2 میلی متر (به ترتیب  $56 \pm 10$  و  $61 \pm 10$  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 گرا دیان 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 لایه به حد تسلیم برسد، لایف از درون ماتریس بیرون (Pull out) کشیده می شود.

نکته دیگر قابل توجه در نتایج خواص مکانیکی ناهمسانگردی (Anisotropy) بسیار قوی در نمونه های با الیاف ممتد تک جهت 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 ILSS در جهت طولی ( $18.7 \text{ MPa}$ ) و عرضی ( $0.6 \text{ MPa}$ ) 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 مهاربندهای میکروسکوپی از اشاعه ی ترک های برشی درون لایه های جلوگیری می کنند. در مقابل، در جهت عرضی، مقاومت برشی بین لایه ها صرفاً به چسبندگی ماتریس PPS 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 ( $289 \text{ MPa}$ ) ناشی از تحمل بار مستقیم توسط الیاف پیوسته با مدول بالا است.

استحکام کششی بسیار پایین در جهت عرضی ( $5 \pm 1 \text{ MPa}$ ) در مقایسه با استحکام ذاتی پلیمر PPS 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 نیروهای ضعیف واندرالس می 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 PPS/Glass، 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 ILSS

بعد از بررسی های صورت گرفته، در جدول 3 خواص کامل الیاف ذکر شده است.

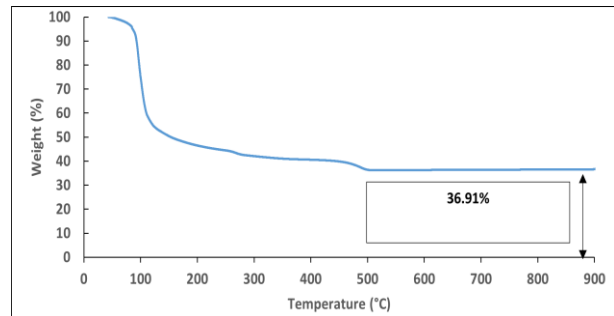


Fig. 13 TGA diagram of glass fiber/PPS Commingled fibers

شکل 13 نمودار TGA الیاف کامپنجل الیاف شیشه/PPS

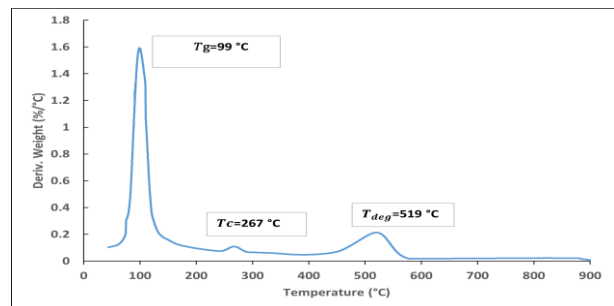


Fig. 14 Derivative of TGA diagram of glass fiber/PPS fiber Commingled fibers

شکل 14 مشتق نمودار TGA الیاف کامپنجل الیاف شیشه/PPS

جدول 3 خواص الیاف کامپنجل الیاف شیشه / PPS

Table 3 Properties of glass fiber/PPS Commingled fibers

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

### 2-3- بررسی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی

نتایج آزمون های ILSS 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 ILSS و استحکام کششی به وضوح نشان می دهند که آرایش الیاف نقش تعیین کننده ای در خواص مکانیکی کامپوزیت های الیاف شیشه / PPS تولید شده به روش پرس گرم دارد و اهمیت آرایش و پیوستگی الیاف در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در کامپوزیت های الیاف شیشه / PPS را تأیید می کند.

با توجه به اطلاعات به دست آمده استحکام کششی نمونه تک جهت طولی تقریباً 5 برابر بیشتر از نمونه الیاف چایید است. در مورد ILSS نیز، نمونه تک جهت طولی حدود 3 برابر مقاوم تر از نمونه الیاف چایید 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 جهت 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.

### 3-3- تصاویر SEM 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 غیر ایده 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 غیر یکنواخت تراکم الیاف می تواند به ایجاد نقاط ضعف موضعی منجر شود.

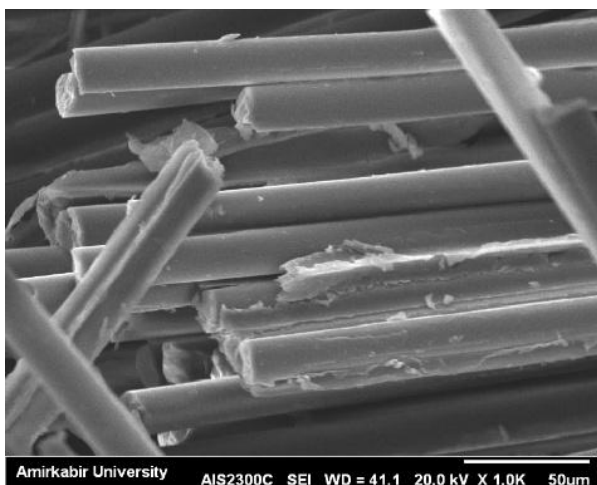


Fig. 17 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with unidirectional fibers (magnification 450x)

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

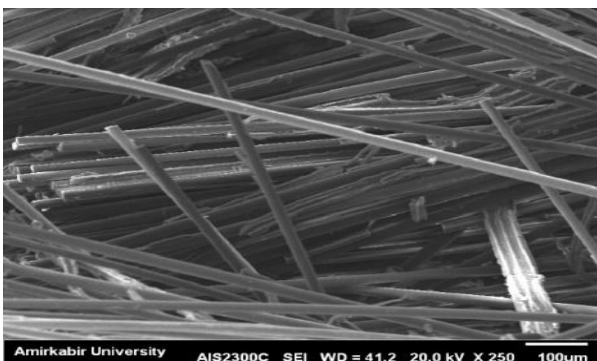


Fig. 18 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with short random fibers (250x magnification)

شکل 18 تصاویر SEM 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/PPS که با روش پرس گرم ساخته شده اند، مورد ارزیابی قرار داد. یافته های کلیدی، برتری قاطع کامپوزیت های تقویت شده با

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 (ILSS) ورق PPS/Glass  
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 PPS/Glass  
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

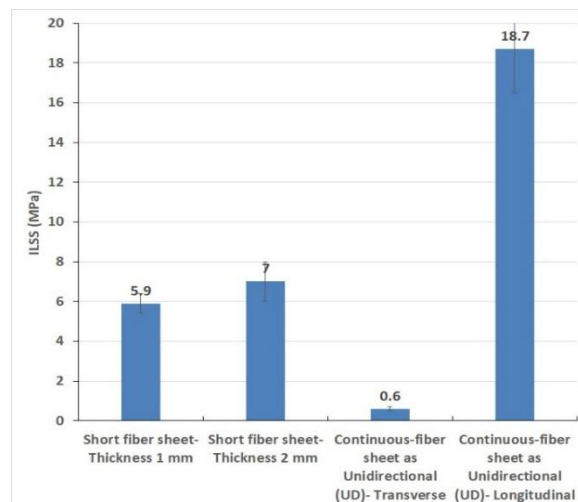


Fig. 15 Interlaminar shear strength (ILSS) test chart of PPS/Glass sheet

شکل 15 نمودار آزمون استحکام برشی میان لایه ای (ILSS) ورق PPS/Glass

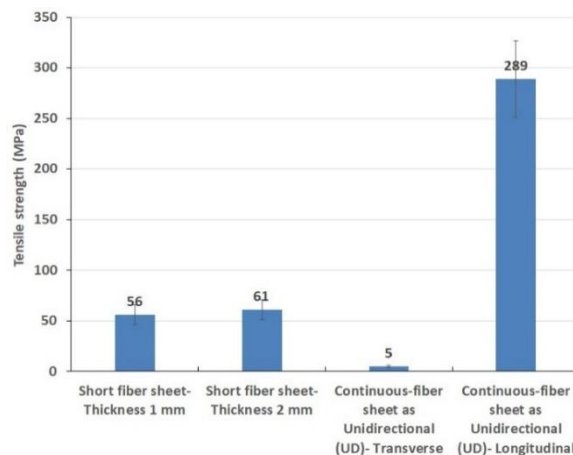


Fig. 16 PPS/Glass sheet tensile strength test chart

شکل 16 نمودار آزمون استحکام کششی ورق PPS/Glass

- [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., Nimbai, 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.
- [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.

الیاف پیوسته و تک جهته 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 ماکروسکوپییک 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 کامپنگل 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.
- [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] Koerd, 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., Bailleul, 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.