

Improvement of tensile strength of multilayer glass/epoxy composites by addition of short glass fibers

Seyed Abolfazl Mirdehghan^{1*}, Hooshang Nosraty¹, Roya Hosseini Ghavam Abadi¹

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

Article Information	Abstract
<p>Article history:</p> <p>Received: 2023-09-06 Accepted: 2024-03-02</p>	<p>Glass fiber/epoxy composites are widely used in many fields such as aerospace and automobile industries due to their lightweight, high specific strength, and low price. In multilayer composites, due to the relatively weak interlayer properties compared to the in-plane resistance, it is important to pay attention to interlaminar properties. Therefore, to achieve high mechanical performance for these composites, it is necessary to improve the load transfer and surface bonding properties at the fiber/matrix interface. In the current study, the effect of adding short glass fibers of 16 μm and different lengths on the tensile strength of multilayer glass fiber/epoxy composites has been investigated. In order to study the effect of the weight percentage of short glass fibers on the tensile strength of composites, multilayer composite samples with short glass fibers of 10 mm length and 6 different weight percentages (1, 3, 5, 7, 10 and 15 percent) were made. The results showed that increasing the weight percentage of short fibers increases the strength of the composite, and with the addition of short fibers more than a certain amount, the tensile strength decreases. Also, the sample reinforced with 3 wt.% short fibers with 10 mm length (sample L10-W3) has the highest tensile strength and specific stress among the other samples, and the strength of this sample compared to the sample without short fibers, was increased by 27 %. In order to investigate the effect of the length of short fibers on the tensile strength of composites, samples were prepared with the short fibers of 3 wt.% and with the length of 10 mm, 2 mm and milled fibers. The results showed that the sample made of short fibers with the length of 10 mm (sample L10-W3) has the highest tensile strength among the other samples. The enhancement in tensile strength is because short fibers were filled within the undulated region of fabric and therefore bridging the short fibers between the composite layers was occurred.</p>
<p>Keywords:</p> <p>Multilayer composite, Short glass fibers, Tensile strength, Glass/epoxy composite.</p>	

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail address: mirdehghan@aut.ac.ir



بهبود استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی با افزودن الیاف شیشه خردشده

سید ابوالفضل میردهقان^{۱*}، هوشنگ نصرتی^۱، رویا حسینی قوام آبادی^۱

۱- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲	<p>کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی به دلیل سبک بودن، استحکام ویژه بالا و قیمت پایین، به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند صنایع هوافضا و خودرو استفاده می‌شوند. در کامپوزیت‌های چندلایه، به دلیل خواص مکانیکی نسبتاً ضعیف بین‌لایه‌ای در مقایسه با مقاومت درون‌صفحه‌ای لایه‌ها، توجه به خصوصیات بین‌لایه‌ای حائز اهمیت است. بنابراین به منظور دستیابی به عملکرد مکانیکی بالا برای این کامپوزیت‌ها، بهبود قابلیت‌های انتقال بار و پیوند سطحی در فصل مشترک الیاف/ماتریس ضروری است. در این مطالعه، تأثیر افزودن الیاف شیشه خردشده با ظرافت ۱۶ میکرومتر و با درصد وزنی‌های متفاوت و طول‌های مختلف بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی بررسی شده است. به منظور مطالعه تأثیر درصد وزنی الیاف شیشه خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌ها، نمونه‌های کامپوزیت چندلایه با افزودن الیاف شیشه خردشده به طول ۱۰ میلی‌متر و با ۶ درصد وزنی متفاوت (۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ درصد) ساخته شد. نتایج نشان داد افزایش درصد وزنی الیاف خردشده ابتدا باعث افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود و با اضافه شدن الیاف خردشده بیش از یک مقدار مشخص، استحکام کششی کاهش می‌یابد. همچنین نمونه تقویت شده با ۳ درصد وزنی الیاف خردشده با طول ۱۰ میلی‌متر (نمونه L10-W3)، بالاترین مقدار استحکام کششی و تنش مخصوص را در بین نمونه‌ها داشته و استحکام این نمونه نسبت به نمونه شاهد که فاقد الیاف خردشده می‌باشد، ۲۷ درصد بیشتر است. به منظور بررسی تأثیر طول الیاف خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌ها، نمونه‌های کامپوزیتی با درصد وزنی الیاف خردشده یکسان ۳ درصد و با طول الیاف خردشده ۱۰ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و الیاف آسیاب شده تهیه شد. نتایج نشان داد نمونه‌ای که از الیاف کوتاه با طول ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است (نمونه L10-W3)، در بین سایر نمونه‌های تولید شده، دارای بیشترین استحکام کششی می‌باشد. بهبود استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی ناشی از قرارگیری الیاف کوتاه در بین نواحی درهم‌روی نخ‌های تار و پود پارچه و پل‌زنی الیاف خردشده بین لایه‌های کامپوزیت است.</p>
واژه‌های کلیدی:	

نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده در معرض آزمون خمش قرار گرفته و با هم مقایسه شدند. نمونه‌های حاوی الیاف خردشده شیشه، همگی استحکام خمشی بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی خالص نشان دادند و نمونه حاوی ۱٪ الیاف خردشده شیشه بالاترین استحکام خمشی را در بین همه نمونه‌ها ارائه نمود.

جوهر و همکاران [۲]، به بررسی رفتار لایه‌لایه‌شدگی در مودهای I و II شکست کامپوزیت وینیل‌استر (Vinyl ester) تقویت شده با الیاف شیشه خردشده پرداختند. چن و همکاران [۳]، از الیاف شیشه خردشده‌ی اصلاح شده با اکسید گرافن (Graphene oxide) برای بهبود تنش برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، تنش برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۸/۴ درصد پس از افزودن الیاف خردشده شیشه و الیاف خردشده شیشه اصلاح شده با گرافن اکسید افزایش یافته است. گرافن اکسید به طور قابل توجهی

مقدمه ۱
تجاری‌سازی و کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف در حال شتاب گرفتن است. بنابراین تکنیک‌های جدید به‌منظور بهبود خواص مکانیکی آن‌ها به طور مداوم توسط محققان در سراسر جهان بررسی می‌شود. کلید بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، بهبود قابلیت‌های انتقال بار و پیوند سطحی در فصل مشترک الیاف/ماتریس است. ایده‌ی ساخت کامپوزیت‌های چندلایه حاوی رزین اصلاح شده با الیاف کوتاه می‌تواند شرایط فوق را تأمین و ساختار کامپوزیت را تقویت کند. تحقیقات زیادی بر روی این موضوع انجام شده است که در ادامه به بررسی نتایج برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. دساری و همکاران [۱] در مطالعه خود از الیاف خردشده‌ی شیشه با طول ۰/۵-۰/۲ سانتی‌متر و درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ در رزین اپوکسی استفاده کردند. سپس رزین اصلاح شده را برای تقویت کامپوزیت‌های ساخته شده با پارچه شیشه چندلایه مورد استفاده قرار دادند.

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: mirdehghan@aut.ac.ir

استفاده از الیاف شیشه خردشده با طول‌های مختلف و درصد‌های وزنی متفاوت بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر کامپوزیت‌هایی از پارچه شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده و رزین اپوکسی اصلاح شده با الیاف کوتاه شیشه به‌عنوان ماتریس تهیه گردید. در این بخش خصوصیات مواد اولیه، نحوه‌ی ساخت کامپوزیت، مراحل آماده‌سازی و چگونگی انجام آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲ خصوصیات مواد اولیه

در این تحقیق از پارچه شیشه تاری-پودی از نوع E با بافت ساده (تافته) و الیاف کوتاه شیشه از نوع E استفاده شد. بر مبنای نتایج اندازه‌گیری خواص پارچه در آزمایشگاه، تراکم تاری و پودی پارچه ۳/۳ در سانتی‌متر، وزن واحد سطح پارچه ۳۸۵ گرم بر مترمربع، ضخامت آن ۰/۴ میلی‌متر و نمره نخ روینگ (Roving) تشکیل دهنده بافت پارچه ۱۴۰۰ تکس (Tex) به دست آمد. به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی الیاف کوتاه در ساختمان کامپوزیت، نمونه‌های کامپوزیت از الیاف شیشه خردشده با ظرافت ۱۶ میکرومتر و با طول ۱۰ میلی‌متر و با درصد‌های وزنی مختلف (۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ درصد) نسبت به رزین اپوکسی، تولید شد. همچنین به منظور بررسی اثر طول الیاف خردشده، نمونه‌های کامپوزیتی با ۳ درصد وزنی از الیاف خردشده شیشه با ظرافت ۱۶ میکرومتر و طول‌های ۱۰ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و همچنین الیاف شیشه آسیاب شده با ابعاد ۲۰۰ میکرومتر ساخته شد.

رزین مورد استفاده در این پژوهش، رزین اپوکسی با نام تجاری ۸۲۸ KER، است. در اینجا از عامل سخت‌کننده با نسبت وزنی ۱۵ درصد استفاده شده است. قبل از آغشته‌سازی نمونه به رزین، باید رزین و عامل پخت به خوبی با یکدیگر مخلوط شوند تا محلولی کاملاً شفاف و یکدست به وجود آمده و هیچ‌گونه اثری از عامل پخت باقی نماند. بهترین زمان برای استفاده و یا تزریق رزین، قبل از زمان ژل شدن است و بعد از این زمان دمای رزین شروع به افزایش می‌کند و دیگر قابل استفاده نیست. زمان ژل شدن برای این رزین ۳۰ دقیقه به دست آمد.

۲-۲ فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها

در این مطالعه برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت از روش کیسه خلا استفاده شد. برای این منظور، از شیشه‌های مسطح با ابعاد مناسب به عنوان قالب استفاده و سپس به‌منظور جلوگیری از چسبیدن نمونه به قالب، سطح شیشه با ماده رهاساز یا واکس (Wax) پوشانده شد. برای تهیه رزین حاوی الیاف خردشده شیشه، ابتدا الیاف کوتاه که از قبل به مقدار لازم وزن شده است، به تدریج داخل رزین اپوکسی ریخته شده و سپس به آرامی با استفاده از همزن برقی عمل اختلاط انجام گردید. پس از انجام عمل اختلاط، ماده سخت‌کننده (Hardener) به ترکیب رزین و الیاف خردشده اضافه شد و عملیات

زبری سطح الیاف کوتاه شیشه را افزایش داده و چسبندگی سطحی بین الیاف کوتاه شیشه و رزین اپوکسی را بهبود بخشیده است.

پارک و همکاران [۴]، گزارش دادند الیاف خردشده شیشه می‌تواند خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/پلی‌وینیل‌کلراید (Polyvinyl chloride) را به طور موثری بهبود دهد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد استحکام کششی ۳/۹ درصد، استحکام خمشی ۷/۱ درصد و تنش برشی بین‌لایه‌ای ۸/۷ درصد در مقایسه با نمونه مشابه بدون الیاف کوتاه شیشه افزایش یافته است. ما و همکاران [۵]، گزارش دادند استحکام بین‌لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه شیشه را می‌توان با الیاف خردشده شیشه افزایش داد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد استحکام بین‌لایه‌ای کامپوزیت تقویت شده با پارچه شیشه که توسط الیاف شیشه خردشده، اصلاح شده است، ۴۸/۱ درصد نسبت به کامپوزیت‌های معمولی بدون الیاف کوتاه افزایش یافته است.

در مطالعه جانوگ لی و همکاران [۶]، برای افزایش خواص مکانیکی، نواحی موجدار نخ در کامپوزیت شیشه/پلی‌وینیل‌کلراید با الیاف شیشه خردشده که تحت عملیات تکمیل سطحی با سیلان (Silane) قرار گرفته بود، پر شد و سپس خواص فیزیکی، خواص حرارتی، خواص دینامیکی و خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده بررسی گردید. مطالعات آن‌ها نشان داد ضریب رعنائی بهینه الیاف شیشه خردشده برای هر کدام از خواص مکانیکی فوق‌متفاوت است. این موضوع نشان می‌دهد کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه و الیاف خردشده، هر یک از خواص مکانیکی را با مکانیزم متفاوتی تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، اصلاح سطحی با سیلان، سازگاری اجزای کامپوزیت را افزایش می‌دهد و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. پوتان و همکاران [۷]، برای تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه/پلی‌وینیل‌کلراید از عامل اتصال دهنده سیلان برای بهبود تعامل سطحی بین الیاف شیشه خردشده و ماتریس استفاده نمودند. در این مطالعه، حداکثر استحکام کششی با ۱۰ درصد وزنی الیاف خردشده مشاهده شد و استحکام کششی نمونه‌ها با استفاده از عامل اتصال دهنده سیلان افزایش یافت.

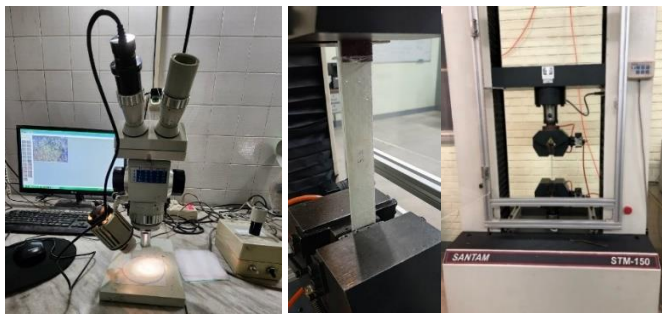
در مطالعه سوین پارک و همکاران [۸]، کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/پلی‌وینیل‌کلراید با افزودن الیاف خردشده شیشه با طول‌ها و درصد‌های مختلف وزنی تهیه و خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده ارزیابی شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد طول بحرانی الیاف خردشده شیشه برای استحکام خمشی و مقاومت برشی متفاوت است. همچنین آن‌ها بیان کردند در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف خردشده، مقدار بیش از حد الیاف می‌تواند باعث نقص ناشی از تجمع الیاف کوتاه شود.

همانگونه که در تحقیقات فوق بیان شد، یکی از روش‌های افزایش استحکام، بهبود فصل مشترک تقویت‌کننده و ماتریس در کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از الیاف خردشده مانند الیاف شیشه می‌باشد. از طرفی تأثیر وجود الیاف کوتاه در فصل مشترک لایه‌ها بر روی خواص استحکام کششی نمونه‌های تقویت شده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه تأثیر

۳-۲ آزمایش‌ها

در این مطالعه جهت محاسبه درصد حجمی حباب از استاندارد ASTM D 2734 و جهت محاسبه چگالی کامپوزیت‌ها به صورت تجربی از روش غوطه‌وری مطابق با استاندارد ASTM D792 استفاده شده است. آزمون کشش بر روی کامپوزیت‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ASTM D3039 انجام شد. در این استاندارد ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش ۲۵۰ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر پیشنهاد داده شده است. به منظور آماده سازی کامپوزیت‌ها به ابعاد موردنیاز، نمونه‌های تولید شده به ابعاد ۲۵۰×۲۵ میلی‌متر برش داده شد. در این تحقیق ۹ نمونه کامپوزیت ساخته شد و از هر نمونه ساخته شده ۵ آزمون برای آزمون کشش آماده گردید. برای انجام آزمایش کشش از دستگاه SANTAM مدل STM-150 با ظرفیت لودسل (Loadcell) ۱۵۰ کیلو نیوتن استفاده شد. برای این منظور، فاصله دو فک دستگاه ۱۵۰ میلی‌متر و سرعت فک متحرک ۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. با هدف عدم شکست نمونه در گیره‌های دستگاه، در دو انتهای نمونه، تب (Tab) از جنس سمباده چسبانده شد. شکل ۳ (الف) و (ب)، تصویر دستگاه کشش مورد استفاده و نمونه قرار گرفته در فیکسچر دستگاه را نشان می‌دهد. در این مطالعه تصویربرداری میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری استریو (Stereo) مدل زایس (Zeiss) (شکل ۳ (ج))، با لنز دینو (dino) و بزرگنمایی ۳۵۰ انجام شد. همچنین در این مطالعه تجزیه و تحلیل‌های آماری آنوا (Anova) با استفاده از نرم افزار Minitab انجام شده است.

همزدن تا رسیدن به یک مخلوط یکنواخت ادامه یافت. در مرحله بعد یک لایه پارچه مش برای توزیع بهتر رزین بر روی قالب قرار گرفت تا محدوده کار مشخص شود و پس از آن خمیر آب‌بندی دورتادور نمونه چسبانده شده و لایه چینی انجام شد؛ به این صورت که ابتدا پارچه داکرون بر روی پارچه مش و سپس یک لایه پارچه شیشه بر روی آن قرار گرفت و رزین حاوی الیاف خرد شده به مقدار لازم و به طور یکنواخت روی لایه توزیع شد. این عملیات بین هر کدام از لایه‌های تقویت کننده ادامه یافت و در نهایت داکرون و مش بر روی چهار لایه پارچه شیشه قرار داده شد. حداکثر توجه به منظور اینکه پارچه‌های شیشه کاملاً بر روی هم منطبق باشند و تحت زاویه قرار نگیرند، صورت پذیرفت. همچنین ضمن توجه به خیس شدن کامل لایه پارچه، توزیع رزین حاوی الیاف خرد شده بر روی سطح پارچه‌ها کاملاً یکنواخت انجام شد. لازم به ذکر است رزین استفاده شده در زیر اولین لایه و بر روی آخرین لایه پارچه شیشه، فاقد الیاف کوتاه است و صرفاً الیاف کوتاه در بین لایه‌ها استفاده شد. در گام بعد لوله ماریچ به شلنگ ورودی پمپ خلأ متصل و کیسه خلأ طوری قرار داده شد که تمام نمونه را دربرگیرد. در نهایت پمپ خلأ روشن و بعد از زمان ژل شدن رزین که حدود ۱ ساعت به طول انجامید، فرآیند خروج رزین اضافی به اتمام رسید و پمپ خاموش شد. نمونه‌ها در این شرایط باقی مانده و بعد از ۷۲ ساعت و اتمام فرآیند پخت رزین، از قالب خارج و برای آزمون کشش آماده سازی شد. شکل ۱ تصاویر ساخت نمونه کامپوزیت به روش کیسه خلأ را نشان می‌دهد.



شکل ۳ (الف) تصویر دستگاه آزمون کشش، (ب) نمونه قرار گرفته در داخل فک دستگاه کشش، (ج) میکروسکوپ استریو

شکل ۳ (الف) تصویر دستگاه آزمون کشش، (ب) نمونه قرار گرفته در داخل فک دستگاه کشش، (ج) میکروسکوپ استریو

۳ بحث و بررسی نتایج

در این بخش به منظور بررسی تأثیر استفاده از الیاف خرد شده بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه، نتایج مربوط به آزمون استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده بررسی می‌شود. در جدول ۱ جزئیات نمونه های کامپوزیت ساخته شده و نتایج مربوط به آزمون کشش ارائه شده است. با هدف سهولت در بیان نتایج، از علائم اختصاری برای نمونه‌های تولید شده استفاده شده است. برای این منظور، پارامتر طول الیاف خرد شده با L و درصد وزنی الیاف خرد شده با W نشان داده شده است. به عنوان مثال اندیس 0 برای L و W در نمونه L_0-W_0 معرف نمونه شاهد بوده و بیانگر آن است که الیاف خرد شده در ساختمان این کامپوزیت وجود ندارد.



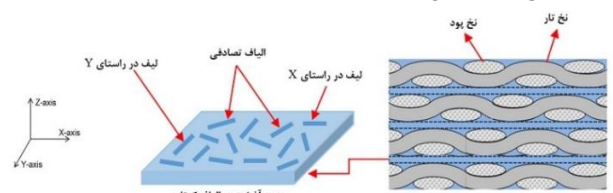
الف) لایه چینی انجام شده



ب) نمونه پس از روشن شدن پمپ خلأ و مکش رزین‌های اضافی

شکل ۱ ساخت کامپوزیت به روش کیسه خلأ

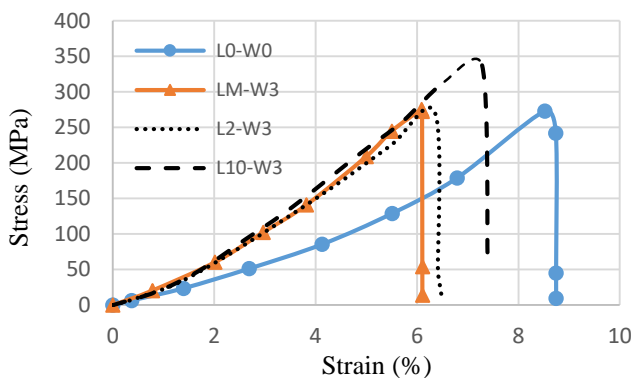
در شکل ۲ تصویر شماتیک مقطع کامپوزیت‌های چندلایه تقویت شده با الیاف شیشه خرد شده نشان داده شده است.



شکل ۲ تصویر شماتیک مقطع کامپوزیت چندلایه تقویت شده با الیاف شیشه خرد شده

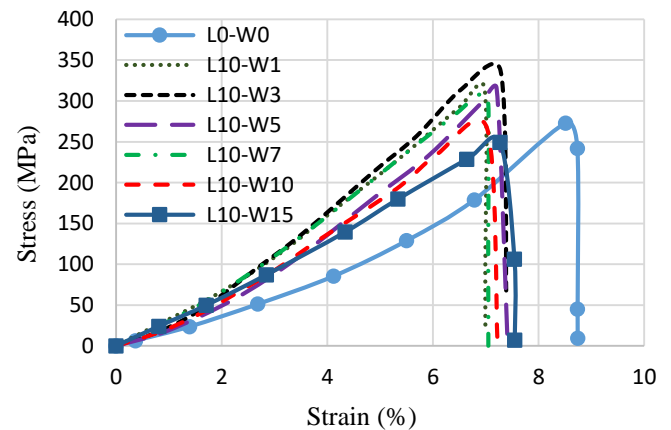
جدول ۱ جزئیات نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده و نتایج آزمون کشش

ردیف	کد نمونه	ضخامت (mm)	چگالی تئوری (g/cm ³)	چگالی تجربی (g/cm ³)	درصد حفره (%)	نیروی ماکزیمم		تنش ماکزیمم		کار تا حد شکست
						میانگین (N)	CV%	میانگین (MPa)	CV%	
۱	L0-W0	۱/۴۲	۲/۰۱	۱/۹۸	۱/۴۹	۹۶۹۴	۴/۵۹	۲۷۳/۰۶	۴/۵۹	۵۰۹۱۶
۲	LM-W3	۱/۴۶	۱/۹۳	۱/۸۹	۲/۰۷	۱۰۰۵۵	۵/۲۴	۲۷۵/۴۷	۵/۳۸	۳۹۲۷۲
۳	L2-W3	۱/۵۱	۱/۹۰	۱/۸۵	۲/۶۳	۱۰۱۷۳	۴/۷۶	۲۶۹/۴۹	۵/۰۷	۴۳۲۲۴
۴	L10-W1	۱/۴۴	۲/۰۳	۱/۹۷	۲/۹۶	۱۱۳۶۷	۵/۵۳	۳۱۵/۷۶	۵/۶۰	۵۳۸۴۳
۵	L10-W3	۱/۴۶	۱/۹۲	۱/۸۷	۲/۶۰	۱۲۳۰۹	۲/۸۴	۳۳۷/۲۴	۲/۹۲	۶۲۳۸۹
۶	L10-W5	۱/۴۸	۱/۸۷	۱/۸۲	۲/۶۷	۱۱۶۷۱	۶/۰۴	۳۱۵/۴۳	۶/۲۹	۵۳۶۳۰
۷	L10-W7	۱/۵۳	۱/۸۲	۱/۷۸	۲/۲۰	۱۱۷۴۷	۴/۸۸	۳۰۷/۱۰	۵/۲۵	۵۷۸۷۹
۸	L10-W10	۱/۵۷	۱/۷۹	۱/۷۳	۳/۳۵	۱۰۴۵۷	۴/۵۹	۲۶۶/۴۳	۵/۰۷	۵۱۸۰۱
۹	L10-W15	۱/۶۱	۱/۶۹	۱/۶۴	۲/۹۶	۱۰۰۴۶	۵/۴۵	۲۴۹/۵۹	۶/۱۷	۵۵۲۸۶



شکل ۳ رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها

شکل ۴ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها با طول الیاف خرد شده ۱۰ میلی‌متر و درصد‌های وزنی متفاوت و شکل ۵ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها با درصد وزنی الیاف خرد شده یکسان ۳ درصد و طول الیاف خرد شده مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودارها مشخص است، نمونه‌ها دارای رفتار خطی تا نقطه ماکزیمم هستند و بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم و عبور از ناحیه الاستیک، دچار شکست و افت ناگهانی می‌شوند. همانطور که از شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود نمونه L10-W3، بیشترین میزان تنش و نمونه L0-W15، کمترین میزان تنش را نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌های چندلایه دارای الیاف کوتاه، کرنش کمتری نسبت به نمونه شیشه خالص داشته‌اند. نمودارهای شکل ۴ و ۵ بیانگر آن است که شیب نمودار تنش-کرنش نمونه شیشه خالص از سایر نمونه‌ها کمتر بوده و در نتیجه مدول کششی نمونه‌های حاوی الیاف کوتاه از نمونه شیشه خالص بیشتر است.



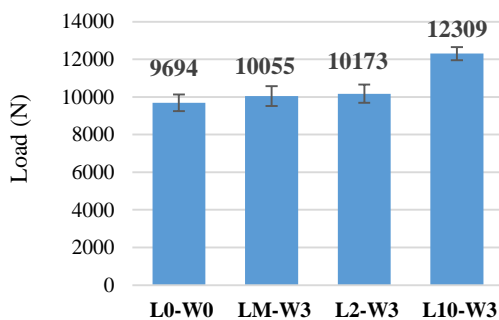
شکل ۵ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیتی با طول الیاف خرد شده یکسان ۱۰ میلی‌متر و درصد‌های وزنی متفاوت

۳-۲ بررسی تأثیر درصد وزنی الیاف خرد شده همانگونه که بیان شد به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی الیاف خرد شده بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه، نمونه‌های کامپوزیتی حاوی الیاف خرد شده با طول ۱۰ میلی‌متر و با درصد‌های متفاوت وزنی ساخته شد. در شکل ۶ نمودار میله‌ای مقایسه درصد وزنی الیاف خرد شده بر استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد نمونه L10-W3 بالاترین استحکام را در بین نمونه‌ها داشته و استحکام این نمونه نسبت به نمونه شاهد که فاقد الیاف خرد شده می‌باشد، ۲۷ درصد بیشتر است. نتایج تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها با استفاده از نرم افزار Minitab در سطح اطمینان ۹۵ درصد موید این موضوع می‌باشد. بررسی نمودار شکل ۶ و نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد افزایش درصد الیاف خرد شده در کامپوزیت تا حد مشخصی سبب افزایش استحکام نمونه می‌شود و سپس افزوده شدن به مقدار الیاف خرد شده، استحکام نهایی را کاهش می‌دهد. استحکام نمونه L10-W15 که در ساختمان آن درصد الیاف کوتاه بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها وجود دارد، ۳/۶۴ درصد نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده و با نمونه L10-W10 اختلاف معناداری ندارد. این دو نمونه پایین‌ترین میزان استحکام را

۳-۳ بررسی تأثیر طول الیاف خردشده

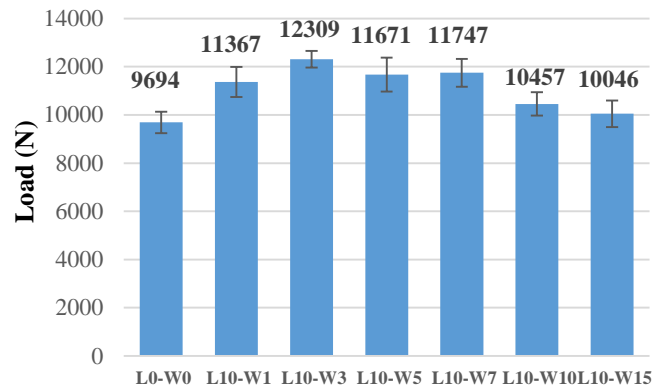
همانگونه که در بخش قبل بیان شد، نمونه با ۳ درصد وزنی نسبت به سایر نمونه‌ها نتیجه بهتری نشان داد. با توجه به این موضوع و به منظور بررسی تأثیر طول الیاف خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه، نمونه‌های کامپوزیتی با درصد وزنی الیاف خردشده یکسان ۳ درصد و طول‌های متفاوت ۱۰ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و الیاف آسیاب‌شده تهیه شد. سپس آزمون کشش بر روی نمونه‌های تهیه شده انجام و با نمونه شاهد مقایسه گردید. در شکل ۸ نمودار تأثیر طول الیاف خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌ها نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، نمونه L_{10} - W_3 ، در بین سایر نمونه‌های تولید شده دارای بیشترین استحکام کششی می‌باشد. استحکام کششی این نمونه ۲۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. همچنین نمونه L_{10} - W_3 ، ۲۲/۴ درصد نسبت به نمونه L_M - W_3 و ۲۱ درصد نسبت به L_2 - W_3 ، استحکام بیشتری داشته است. پایین‌ترین استحکام کششی مربوط به نمونه شاهد بوده است. این موضوع نشان می‌دهد افزودن الیاف خردشده، استحکام کششی نمونه چندلایه را افزایش داده است. نمونه‌های L_M - W_3 و L_2 - W_3 به ترتیب ۳/۷۳ و ۴/۹۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش استحکام داشته‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد موید این موضوع می‌باشد که بین استحکام نمونه‌های L_M - W_3 و L_2 - W_3 اختلاف معناداری وجود ندارد.

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۱ و مباحث مطرح شده در بخش قبل، با هدف حذف اثر تغییرات ضخامت و چگالی، تنش مخصوص (تنش تقسیم بر چگالی تجربی) نمونه‌ها محاسبه و در شکل ۹ با یکدیگر مقایسه شده است. روند نتایج در شکل ۹ تقریباً مشابه با روند نتایج مربوط به استحکام کششی در شکل ۸ می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، نمونه L_{10} - W_3 در بین سایر نمونه‌های تولید شده دارای بیشترین مقدار تنش مخصوص می‌باشد. تنش مخصوص این نمونه ۳۰/۷۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. همچنین تنش مخصوص نمونه L_{10} - W_3 ، ۲۳/۷۵ درصد نسبت به نمونه L_M - W_3 و W_3 و ۲۳/۷۵ درصد نسبت به L_2 - W_3 ، بیشتر بوده است. پایین‌ترین تنش مخصوص مربوط به نمونه شاهد بوده است. این موضوع نشان می‌دهد افزودن الیاف خردشده، تنش مخصوص نمونه چندلایه را افزایش داده است. تنش مخصوص نمونه‌های L_M - W_3 و L_2 - W_3 با یکدیگر اختلاف معناداری ندارند و به ترتیب ۵/۷۳ و ۵/۶۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بیشتر می‌باشند.



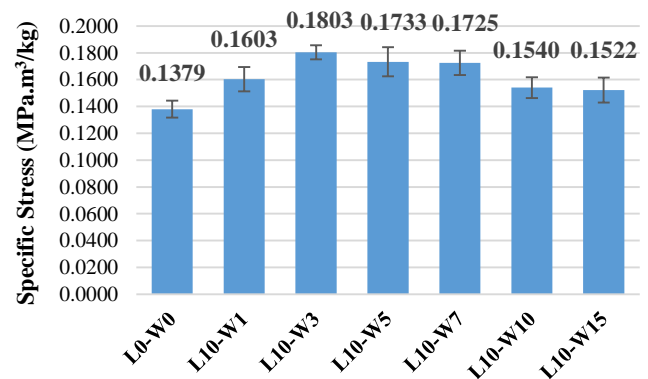
شکل ۸ مقایسه تأثیر طول الیاف خردشده بر استحکام کششی نمونه کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی

نسبت به سایر نمونه‌های حاوی الیاف کوتاه از خود نشان دادند. نمونه‌های L_{10} - W_5 و L_{10} - W_7 نیز با یکدیگر اختلاف معناداری ندارند و در یک گروه قرار دارند.



شکل ۶ تأثیر درصدهای متفاوت وزنی الیاف خردشده بر استحکام کششی نمونه کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، می‌توان دریافت نمونه‌های تولید شده دارای اختلاف ضخامت و چگالی می‌باشند. بنابراین با هدف حذف اثر ضخامت و تغییرات چگالی، تنش مخصوص (تنش تقسیم بر چگالی تجربی) نمونه‌ها محاسبه و در شکل ۷ با یکدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود روند نتایج مشابه با روند نتایج مربوط به استحکام کششی در شکل ۶ می‌باشد. نمونه L_{10} - W_3 بالاترین مقدار تنش مخصوص را در بین نمونه‌ها داشته و تنش مخصوص این نمونه نسبت به نمونه شاهد که فاقد الیاف خردشده می‌باشد، ۳۰/۷۵ درصد بیشتر است. همچنین تنش مخصوص نمونه L_{10} - W_{15} ، ۱۰/۳۷ درصد نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده و با نمونه L_{10} - W_{10} اختلاف معناداری ندارد. این دو نمونه پایین‌ترین میزان تنش مخصوص را نسبت به سایر نمونه‌های حاوی الیاف کوتاه از خود نشان دادند. تنش مخصوص نمونه‌های L_{10} - W_5 و L_{10} - W_7 نیز با یکدیگر اختلاف معناداری ندارند. به منظور تحلیل دقیق‌تر موضوع، در ادامه تأثیر طول الیاف خردشده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

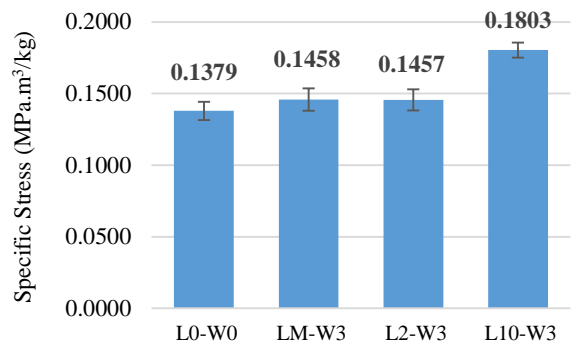


شکل ۷ تأثیر درصدهای متفاوت وزنی الیاف خردشده بر تنش مخصوص نمونه کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری کششی

همین دلیل استحکام کششی کاهش می‌یابد. در تحقیقات نیز به این موضوع اشاره شده است [۴]. لازم به ذکر است برخی از محققین، به بررسی تأثیر افزودن الیاف خردشده شیشه بر زمان پخت رزین، درجه پیوندهای عرضی و یا توزیع آن‌ها به عنوان عاملی موثر بر بهبود استحکام کششی پرداخته‌اند که در این صورت ضرورت دارد آزمون‌های DMTA نیز بر روی نمونه‌های حاوی رزین و الیاف شیشه خردشده انجام شود که در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است [۹].

۳-۴ کارتا حد شکست کامپوزیت‌ها

کارتا حد شکست از مشخصه‌های قابل استفاده برای مقایسه مواد مختلف می‌باشد که مقدار آن برابر با مساحت زیر نمودار نیرو-ازدیاد طول می‌باشد. با توجه به این موضوع، کارتا حد شکست نمونه‌ها تابع ۲ پارامتر نیرو و ازدیاد طول می‌باشد. بر این اساس، مقدار کارتا حد شکست نمونه‌های مختلف محاسبه و مقادیر آن در جدول ۱ گزارش و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌های L_2-W_3 و L_M-W_3 کار تا حد شکست کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. در این نمونه‌ها به ترتیب از الیاف آسیاب شده و الیاف با طول کوتاه ۲ میلی‌متر به میزان ۳ درصدوزنی استفاده شده است. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۱ و نمودار شکل ۸، در این دو نمونه میزان نیروی شکست کمتر از سایر نمونه‌های دارای الیاف کوتاه می‌باشد و لذا کار تا حد شکست در این دو نمونه از مقادیر پایینی برخوردار است. از طرفی دیگر نمونه کامپوزیت شیشه خالص بدون الیاف کوتاه، دارای ازدیاد طول بیشتری نسبت به این دو نمونه می‌باشد. به همین دلیل مقدار کار تا حد شکست آن از مقادیر کار تا حد شکست نمونه‌های L_M-W_3 و L_2-W_3 بالاتر است. نمونه $L_{10}-W_3$ بالاترین مقدار کارتا حد شکست را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۱ و بالاتر بودن نیروی شکست این نمونه در بین سایر نمونه‌ها، انرژی مورد نیاز برای شکست این نمونه نیز از نمونه‌های دیگر بیشتر بوده است. بعد از نمونه $L_{10}-W_3$ به ترتیب نمونه‌های $L_{10}-W_7$ و نمونه $L_{10}-W_{15}$ دارای کارتا حد شکست بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند. مقادیر کارتا حد شکست نمونه‌های $L_{10}-W_1$ ، $L_{10}-W_5$ و $L_{10}-W_{10}$ دارای اختلاف چندانی نیستند. همانگونه که از جدول ۱ و نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، نمونه‌های چندلایه دارای الیاف کوتاه، نیروی شکست بیشتر و ازدیاد طول کمتری نسبت به نمونه شیشه خالص داشته‌اند. مطابق با تصویر ارائه شده در شکل ۲، بخشی از فضای به وجود آمده در اثر درهم‌روی نخ‌های تار و پود در بین لایه‌های پارچه در نمونه ۴ لایه خالص، توسط رزین پر می‌شود و الیاف در این ناحیه‌ها حضور ندارند. در نمونه‌های ساخته شده از الیاف کوتاه، بخشی از الیاف کوتاه در این نواحی قرار می‌گیرند و جایگزین این ناحیه غنی از رزین می‌شوند. بنابراین ساختمان این کامپوزیت‌ها به دلیل وجود الیاف کوتاه و بالارفتن کسر حجمی الیاف، ماهیت تردتری پیدا نموده است و در نتیجه ازدیاد طول کمتری از خود نشان می‌دهد؛ اما با توجه به مقادیر بالاتر



شکل ۹ مقایسه تأثیر طول الیاف خردشده بر تنش مخصوص نمونه کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری کششی

با توجه به نتایج به دست آمده در این بخش می‌توان دریافت نمونه‌ای که از الیاف خردشده با طول ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است، استحکام بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. با در نظر گرفتن نتایج بخش قبل می‌توان بیان نمود که در زمان تولید کامپوزیت، هنگامی که نمونه در فرآیند ساخت تحت فشار ناشی از شرایط خلأ قرار می‌گیرد، لایه‌ها متراکم می‌شوند. در این حالت الیاف خردشده که در بین لایه‌ها قرار دارند، عامل اتصال و پل زنی دولایه می‌شوند و با برقراری اتصال بین لایه‌های کامپوزیت، استحکام کششی بهبود می‌یابد. بنابراین بهبود استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی ناشی از قرارگیری الیاف خردشده در بین نواحی درهم‌روی نخ‌های تار و پود پارچه و در نتیجه پل زنی الیاف خردشده بین لایه‌های کامپوزیت می‌باشد. به عبارتی دیگر در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه، ساختمان بافت دارای نواحی موجدار است که تنها رزین در آن نواحی وجود دارد. این امر خواص مکانیکی آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین استفاده از الیاف خردشده می‌تواند با قرارگیری در این نواحی، فصل مشترک لایه‌ها را بهبود بخشد. به نظر می‌رسد در مورد الیاف با طول ۲ میلی‌متر و الیاف آسیاب شده این اتفاق نیفتاده است و الیاف خردشده به دلیل عدم پل زنی بین دو لایه به دلیل طول ناکافی، در آزمون کشش نقش تأثیرگذاری در استحکام نمونه نداشته‌اند. این موضوع با نتایج به دست آمده از برخی از تحقیقات همخوانی دارد [۷ و ۱۰].

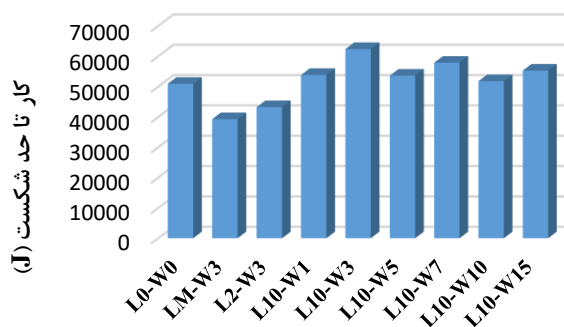
به طور کلی می‌توان بیان نمود دو عامل "طول الیاف کوتاه" و "درصد الیاف کوتاه" بر روی نتایج تأثیرگذار بوده و برای خواص مکانیکی مختلف مانند خواص برشی، خمشی و کششی، مکانیزم اثرگذاری این دو عامل متفاوت می‌باشد [۶]. تحقیقات نشان می‌دهد با اضافه شدن الیاف کوتاه، تا حد مشخصی استحکام افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. در توجیه این موضوع، استدلال‌های مختلفی ارائه شده است. برخی دلیل این امر را افزایش مقدار الیاف و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت و توده‌ای شدن الیاف کوتاه می‌دانند [۷ و ۱۰]. به نظر می‌رسد در مقادیر کم، الیاف کوتاه در فضای بین لایه‌های کامپوزیت در محل تموج ناشی از درهم‌روی نخ‌های تار و پود قرار می‌گیرد. بعد از یک مقدار مشخص، با افزودن الیاف کوتاه، لایه‌ای از الیاف کوتاه در بین لایه‌های تقویت‌کننده کامپوزیت تشکیل می‌شود و این لایه باعث افزایش ضخامت و کاهش کسر حجمی نهایی کامپوزیت می‌گردد و به

پیوند سطحی در فصل مشترک الیاف/ماتریس است. الیاف خردشده شیشه می‌تواند به عنوان تقویت کننده ثانویه (ریزپرکننده‌های در مقیاس میکرو) در ماتریس همراه با الیاف بافته شده به عنوان فاز اصلی تقویت کننده عمل کند. در تحقیق حاضر تأثیر افزودن الیاف شیشه خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/اپوکسی بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی الیاف خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت چندلایه، نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف خردشده با طول یکسان ۱۰ میلی‌متر و با درصد‌های متفاوت وزنی ساخته شد. نتایج نشان داد نمونه $L_{10}-W_3$ (الیاف خردشده با طول ۱۰ میلی‌متر و ۳ درصد وزنی) بالاترین استحکام و تنش مخصوص را در بین نمونه‌ها داشته است. افزایش درصد وزنی الیاف خردشده در کامپوزیت تا حد مشخصی سبب افزایش استحکام نمونه می‌شود و سپس افزوده شدن به مقدار الیاف خردشده، استحکام نهایی را کاهش می‌دهد.

به منظور بررسی تأثیر طول الیاف خردشده بر استحکام کششی کامپوزیت‌های چندلایه، نمونه‌های کامپوزیتی با درصد وزنی الیاف خردشده یکسان ۳ درصد و طول‌های متفاوت ۱۰ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و الیاف آسیاب شده تهیه شد. نتایج نشان داد نمونه‌ای که از الیاف خردشده با طول ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است ($L_{10}-W_3$)، در بین سایر نمونه‌های تولید شده دارای بیشترین مقدار استحکام کششی و تنش مخصوص می‌باشد؛ زیرا در حالتی که الیاف با طول ۱۰ میلی‌متر در بین لایه‌ها و در محل درهم‌روی نخ‌های تار و پود قرار دارند، عامل اتصال و پل‌زنی بین لایه‌ها می‌شوند و با برقراری این اتصال، استحکام بین لایه‌ای بهبود می‌یابد. بنابراین استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت متأثر از طول الیاف کوتاه می‌باشد.

نیروی شکست در این نمونه‌ها، میزان کار تا حد شکست بالاتر از نمونه کامپوزیت شیشه خالص است.



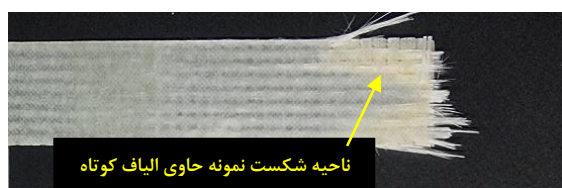
شکل ۱۰ کار تا حد شکست نمونه‌های کامپوزیت

۳-۵ شکست نمونه‌ها

تصاویر مربوط به شکست نمونه $L_{10}-W_3$ و نمونه شیشه خالص در شکل ۱۱ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۱۱ (الف) مشاهده می‌شود، برای نمونه $L_{10}-W_3$ ناحیه شکست نسبت به نمونه کامپوزیت شیشه خالص گسترش یافته است. گسترش ناحیه شکست در شکل ۱۱ (ب) بهتر نشان داده شده است. در نمونه حاوی الیاف خردشده، به دلیل آنکه الیاف در بین لایه‌ها قرار می‌گیرند، می‌تواند به عنوان عاملی برای اتصال و چسبندگی بهتر دو لایه عمل کند و به عبارتی دیگر سبب پل‌زنی بین دو لایه شود. در شکل ۱۱ (ج) تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نحوه پل‌زدن الیاف کوتاه در بین نمونه‌ها پس از شکست نمونه آورده شده است.

۴ نتیجه‌گیری

بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، متأثر از



الف



ب



ج

شکل ۱۱- تصاویر شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش: (الف) کامپوزیت شیشه خالص و کامپوزیت $L_{10}-W_3$ حاوی الیاف کوتاه، (ب) گسترش ناحیه شکست نمونه $L_{10}-W_3$ حاوی الیاف کوتاه، (ج) نحوه پل‌زنی الیاف کوتاه در بین لایه‌ها

[8] Park SB, Lee JS and Kim JW, Effects of short glass fibers on the mechanical properties of glass fiber fabric/PVC composites, *Mater. Res. Express*, 4 035301, 2017, DOI: 10.1088/2053-1591/aa6142.

[9] Pedrazzoli D, Pegoretti A, and Kalaitzidou K, "Synergistic effect of exfoliated graphite nanoplatelets and short glass fiber on the mechanical and interfacial properties of epoxy composites," *Composites Science and Technology*, 98, 15-21, 2014.

در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه، ساختمان بافت دارای نواحی موجدار است که تنها رزین در آن نواحی وجود دارد. این امر خواص مکانیکی آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین استفاده از الیاف خردشده می‌تواند با قرارگیری در این نواحی، فصل مشترک لایه‌ها را بهبود بخشد. علاوه بر این، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف خردشده تا حد زیادی تحت تأثیر نسبت ابعاد الیاف خردشده می‌باشد. روند نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها نشان می‌دهد نمونه‌های چندلایه حاوی الیاف خردشده، کرنش کمتری نسبت به نمونه خالص داشته‌اند.

نتایج موید آن است که نمونه حاوی الیاف با ۳ درصد وزنی و طول ۱۰ میلی‌متر ($L_{10}-W_3$) کار واحد شکست بیشتری نسبت به نمونه شاهد و سایر نمونه‌ها داشته است. این موضوع بیانگر آن است که انرژی مورد نیاز برای شکست این نمونه از نمونه‌های دیگر بیشتر بوده است. با بررسی تصاویر شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کششی می‌توان دریافت افزودن الیاف کوتاه منجر به گسترش ناحیه شکست می‌شود.

مراجع

[1] Dasari S, Lohani S, Sumit Dash S, A novel study of flexural behavior of short glass fibers as secondary reinforcements in GFRP composite, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.161>.

[2] Johar M, Low KO, Israr HA & Wong KJ, Mode I and mode II delamination of a chopped strand mat E-glass reinforced vinyl ester composite, *Plastics, Rubber and Composites*, 2018, DOI: 10.1080/14658011.2018.1515287.

[3] Chen-Yang D et al, Improved interlaminar shear strength of glass fiber/epoxy composites by graphene oxide modified short glass fiber, *Mater. Res. Express*, 6, 085324. 2019, DOI 10.1088/2053-1591/ab2254.

[4] Park SB, Lee JS and Kim JW, Effects of short glass fibers on the mechanical properties of glass fiber fabric/PVC composites, *Mater. Res. Express*, 4 035301, 2017, DOI: 10.1088/2053-1591/aa6142.

[5] Ma P and Nie X, Interface improvement of multi axial warp-knitted layer composite with short glass fiber Fibers, *Polym.*, 18, 1413-1419, 2017,

[6] Jaewoong L, Su BP, Joon SL and Jong WK, Improvement in mechanical properties of glass fiber fabric/PVC composites with chopped glass fibers and coupling agent, *Mater. Res. Express*, 4 0753032017, 2017, DOI: 10.1088/2053-1591/aa76fa.

[7] Pothan LA, Potschke P, Habler R and Thomas S, The static and dynamic mechanical properties of banana and glass fiber woven fabric-reinforced polyester composite, *J. Compos. Mater.*, 39(11), 1007-1025, 2005, <https://doi.org/10.1177/0021998305048737>.