

بررسی تأثیر دوخت لایه‌های تقویت‌کننده بر خواص خمشی کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی

سید ابوالفضل میردهقان اشکذری^۱، هوشنگ نصرتی^۲، مجید طهرانی^{۳*}، علیرضا دهقان دهقی^۴

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۳ دانشیار گروه فرش، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

^۴ کارشناسی ارشد مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

*مسئول مکاتبات: mtehrani@lit.sku.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

کامپوزیت چندلایه
خواص خمشی
پارچه شیشه
دوخت
تورق

به منظور جلوگیری از تورق و بهبود رفتار خمشی کامپوزیت‌های چندلایه، از روش دوخت لایه‌ها در راستای ضخامت استفاده می‌شود. در این پژوهش تأثیر پارامترهای دوخت بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های شیشه / اپوکسی بررسی شده است. بدین منظور، لایه‌های تقویت‌کننده شیشه‌ای با نخ دوخت صنعتی در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ترکیبی از این زاویه‌ها دوخته شدند. همچنین لایه‌های مختلف کامپوزیت با چیدمان‌های متفاوت به هم دوخته شدند. پس از مرحله آماده‌سازی تقویت‌کننده‌ها، کامپوزیت‌هایی هشت‌لایه با زمینه اپوکسی با روش دستی ساخته شد. نمونه‌های کامپوزیت ساخته‌شده با سه سرعت مختلف تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد دوخت لایه‌های میانی تقویت‌کننده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش استحکام و مدول خمشی دارد. همچنین نمونه‌هایی که در چند راستا دوخته شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که در یک راستا دوخته شده‌اند یا حتی دوختی روی آنها انجام نشده است، ۲۰ تا ۵۰ درصد استحکام خمشی کمتری دارند.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۰۶

۱ مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف را بررسی نمودند. این مطالعات نشان می‌دهد تأثیر دوخت بر خواص درون‌صفحه‌ای تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی از جمله نوع کامپوزیت (نوع الیاف، رزین و لایه‌چینی)، شرایط دوخت (نوع نخ، الگوی دوخت، تراکم دوخت، کشیدگی دوخت و قطر نخ) و نوع بارگذاری می‌باشد. کاراهان و همکاران [۶] تأثیر تراکم دوخت در راستای طولی (تاری) و عرضی (پودی) بر استحکام و مدول کششی در کامپوزیت دارای بافت تافته را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند شکستگی‌های لیف، تغییر شکل لیف و فضاهای اطراف نقاط دوخت سبب کاهش استحکام کششی می‌شود. یودهانتو و همکاران [۷] تأثیر آرایش دوخت بر خواص کششی کامپوزیت‌های چندلایه بدون سوراخ و سوراخ‌دار را مورد بررسی قرار دادند.

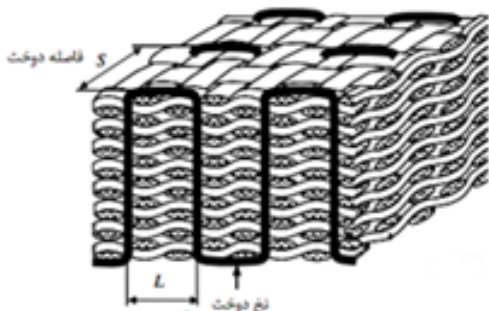
نتایج تحقیقات آنها نشان داد آسیب در نمونه‌های سوراخ‌دار از سوراخ و در نمونه‌های بدون سوراخ از مناطق پر رزین شروع می‌شود. در تحقیقی دیگر یودهانتو و همکاران [۸] خواص فشاری و مکانیزم‌های آسیب کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی دوخته‌شده را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد در نمونه‌های دوخته‌شده، مقاومت فشاری به دلیل شروع زود هنگام ترک در مناطق پر رزین کمتر شده است. تان و همکاران [۹] تأثیر تراکم و ضخامت نخ دوخت بر گسترش آسیب و استحکام تا حد شکست در کامپوزیت‌های دوخته‌شده را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند استحکام تا حد شکست

از مشکلات مهم کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های دوبعدی، مقاومت اندک آنها در برابر جدایی لایه‌هاست [۱]. مقاومت اندک در برابر ضربه و خصوصیات مکانیکی ضعیف آنها پس از ضربه، از دیگر معایب چندلایه‌های دوبعدی است [۲]. از اواخر دهه ۱۹۶۰، برای غلبه بر نقص‌های چندلایه‌های دوبعدی، انواع گوناگونی از مواد کامپوزیتی با ساختارهای لیفی سه‌بعدی با اتصال الیاف در راستای ضخامت تولید شدند [۳]. تقویت‌کننده‌های سه‌بعدی، با استفاده از روش‌های مختلف تولید منسوجات مانند روش تاری - پودی، حلقوی، بریدینگ، فرایند دوخت و پین‌گذاری در راستای ضخامت ساخته شدند [۲]. دوخت در راستای ضخامت یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود مقاومت در برابر تورق بین لایه‌های کامپوزیت‌هاست [۳]. به علاوه می‌توان با دوخت سازه‌های کامپوزیتی مجزا به یکدیگر، شکل‌های سه‌بعدی پیچیده‌ای ایجاد کرد؛ بنابراین نیازی به بست‌های مکانیکی نظیر پرچ‌ها و پیچ‌ها نخواهد بود و در نتیجه وزن و هزینه تولید قطعه کاهش می‌یابد [۴]. برای نخستین بار اوائل دهه ۱۹۸۰ در صنعت هوافضا، روش دوخت در تولید کامپوزیت‌های سه‌بعدی پیشرفته با موفقیت استفاده شد [۲]. پس از آن محققان زیادی تأثیر دوخت لایه‌های تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را بررسی نموده‌اند. موریتس و همکاران [۵] در پژوهش‌هایی تأثیر دوخت در راستای ضخامت بر ویژگی‌های مکانیکی درون‌صفحه‌ای

¹Z-pinning

۲.۲ آماده‌سازی لایه‌های تقویت‌کننده

برای دوخت لایه‌های تقویت‌کننده ابتدا لایه‌هایی از پارچه مورد استفاده به شکل مربع و به ابعاد ۲۵ سانتی‌متر بریده شد. سپس توسط ماشین دوخت Adler 271 با الگوی دوخت قفل‌شونده اصلاح شده به هم دوخته شد. در تمامی نمونه‌ها، پارامترهای دوخت شامل گام دوخت (S) و فاصله ردیف‌های دوخت (L) ثابت و به‌میزان ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۱ الف نمای از چندلایه دوخته‌شده و پارامترهای دوخت نشان داده شده است. انواع مختلف الگوهای دوخت وجود دارد. در الگوی دوخت قفل‌شونده اصلاح‌شده، برای به حداقل رساندن پیچ خوردگی‌های درون‌صفحه‌ای لیف درون ماده، حلقه‌های گذرنده از سوزن و نخ‌های قرقه، در یک سطح کامپوزیت تشکیل می‌شوند. نمای از الگوی دوخت و ماشین دوخت استفاده‌شده در این مطالعه به ترتیب در شکل ۱ ب و ۱ ج نمایش داده شده است [۲].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: نمای از الف) چندلایه دوخته‌شده و پارامترهای دوخت ب) الگوی دوخت قفل‌شونده اصلاح‌شده [۲]، ج) ماشین دوخت Adler 271

در بررسی اثر زاویه دوخت سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه و ترکیبی از این سه زاویه در نظر گرفته شد. تعداد لایه‌های پارچه برای دوخت در تمامی نمونه‌ها، ۸ لایه می‌باشند. نحوه لایه‌چینی و زاویه دوخت نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول در بخش لایه‌چینی، لایه‌هایی که درون پرانتز قرار دارند به هم دوخته شده‌اند.

با افزایش تراکم و ضخامت نخ دوخت افزایش می‌یابد. بلیسیک و همکاران [۱۰] مکانیزم جذب انرژی در ضربه سرعت پایین بر کامپوزیت‌های بافته‌شده شیشه / پلی‌استر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تراکم و تعداد راستاهای دوخت، مساحت مناطق آسیب‌دیده در پشت و روی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

آنها در تحقیقی دیگر دریافتند تراکم نخ دوخت بر سختی خمشی کامپوزیت‌های چندلایه تأثیرگذار است [۱۱]. والونز و همکاران [۱۲] اثر الگوی دوخت بر خواص مکانیکی خستگی و شبه‌استاتیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه شیشه را بررسی کردند.

چه و همکاران [۱۳] ویژگی‌های فشاری و برشی کامپوزیت ساندویچی دوخته‌شده را مورد بررسی قرار دادند. یودهانتو و همکاران [۱۴، ۱۵] به بررسی تأثیر تراکم دوخت بر خستگی، کاهش سختی و مکانیزم آسیب خستگی در کامپوزیت کربن - اپوکسی دوخته‌شده با نخ کتان پرداختند. آنها دریافتند افزایش تراکم دوخت تا حد مشخصی باعث بهبود استحکام کششی شده، اما از یک مقدار مشخص به بعد افزایش تراکم سبب کاهش استحکام کششی شده است. جانی هروان و همکاران [۱۶] نیز در تحقیقی مشابه به این نتیجه رسیدند که ضخامت نخ نقش مهمی بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های دوخته‌شده با تراکم متوسط ایفا نمی‌کند، اما تأثیر چشمگیری در کامپوزیت‌های دوخته‌شده با تراکم بالا دارد. نانتاگوپال و همکاران [۱۷] تأثیر ضخامت نخ دوخت و تراکم و راستای دوخت بر خواص ضربه‌ای و خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه پلی‌پروپیلن را بررسی نمودند. آنها دریافتند بهترین خواص خمشی و ضربه‌ای در نمونه‌های دوخته‌شده با نخ‌های ظریف‌تر و در راستای ± 45 به‌دست آمده است. دمیرسان و همکاران [۱۸] تأثیر نوع نخ دوخت را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های حلقوی - پودی بررسی نمودند. یودهانتو و همکاران [۱۹] تأثیر پارامترهای دوخت بر ویژگی‌های آسیب در کامپوزیت‌های دوخته‌شده سه‌بعدی را بررسی نمودند. بازبینی تحقیق‌های اشاره‌شده نشان می‌دهد تأثیر پارامترهای دوخت و نحوه چیدمان لایه‌های دوخته‌شده بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌ها کمتر بررسی شده است، لذا در پژوهش حاضر اثر پارامترهای دوخت شامل زاویه دوخت و نحوه چیدمان لایه‌های دوخته‌شده بر خواص خمشی کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی بررسی شده است.

۲ تجربیات

۱.۲ مواد اولیه

در این پژوهش از پارچه شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده و از نخ نایلون به‌عنوان نخ دوخت در راستای ضخامت استفاده شده است. ویژگی‌های پارچه شیشه‌ای و نخ دوخت استفاده شده در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. برای زمینه نمونه‌های کامپوزیتی از رزین اپوکسی ML-506 شرکت مکر ایران و سخت‌کننده HA11 تهیه‌شده از همان شرکت استفاده شد. مشخصات رزین اپوکسی استفاده‌شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات پارچه شیشه مورد استفاده

کد پارچه	جنس الیاف	ضخامت (mm)	وزن (gr/m ²)	تراکم تار و پودی (۱/cm)
COLANAF251	شیشه نوع E	۰/۲۸	۱۹۵	۶/۷

جدول ۲: مشخصات نخ دوخت مورد استفاده

جنس	نمره Tex	بیشینه نیرو N	مقاومت مخصوص gf/tex	ازدیاد طول (%)
نایلون	۸۰	۴۷/۶۶	۶۰/۷۵	۲۷/۶۷

جدول ۳: مشخصات رزین مورد استفاده به عنوان زمینه

جنس	مقاومت خمشی (kgf/cm ²)	استحکام کششی (kgf/cm ²)	مقاومت فشاری (kgf/cm ²)	مقاومت ضربه‌ای (kj/m ²)
اپوکسی ML-506	۹۶۰	۷۶۱	۹۷۴	۷/۸۵۰

جدول ۴: نحوه لایه‌چینی و دوخت نمونه‌ها

نمونه	لایه‌چینی	توضیحات
Un-Stitch	[G/G/G/G/G/G/G/G]	این نمونه دارای ۸ لایه پارچه بدون دوخت می‌باشد
A - ۰	[G/G/G/G/G/G/G/G]	در این نمونه، همه ۸ لایه پارچه تحت زاویه صفر درجه به هم دوخته شده‌اند
A - ۴۵	[(G/G/G/G/G/G/G/G)]	در این نمونه، همه ۸ لایه پارچه تحت زاویه ۴۵ درجه به هم دوخته شده‌اند
A - ۰, ۹۰	[(G/G/G/G/G/G/G/G)]	در این نمونه، همه ۸ لایه پارچه تحت زوایای ۰ و ۹۰ درجه به هم دوخته شده‌اند
A - ±۴۵	[(G/G/G/G/G/G/G/G)]	در این نمونه، همه ۸ لایه پارچه تحت زوایای ±۴۵ درجه به هم دوخته شده‌اند
A - ۰, ±۴۵, ۹۰	[(G/G/G/G/G/G/G/G)]	در این نمونه، همه ۸ لایه پارچه تحت زوایای صفر، ±۴۵ و ۹۰ درجه به هم دوخته شده‌اند
B - ۰	[(G/G/G/G)(G/G/G/G)]	در این نمونه، ۴ لایه پارچه بالا به هم و ۴ لایه پارچه پایین به هم، تحت زاویه صفر درجه دوخته شده‌اند
C - ۰	[G/G/(G/G/G/G)/G/G]	در این نمونه ۴ لایه پارچه میانی تحت زاویه صفر درجه به هم دوخته شده‌اند

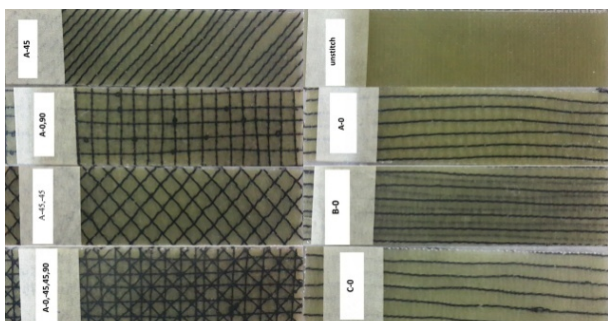
برای آزمایش خمش نشان داده شده است.

۳.۲ ساخت کامپوزیت‌ها

در این پژوهش برای تهیه کامپوزیت‌ها از روش لایه‌گذاری دستی^۱ استفاده شد. در حین ساخت، هر نمونه تحت فشاری معادل ۸ کیلوپاسکال قرار گرفت. پس از ساخت، برای تکمیل فرایند پخت، همه نمونه‌ها در شرایط محیط به مدت ۴ روز قرار گرفتند. در جدول ۵، مشخصات کامپوزیت‌های ساخته شده آورده شده است.

۴.۲ آزمایش خمش سه نقطه‌ای

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای براساس استاندارد ASTM D790-03 [۲۰] آماده شدند. در این استاندارد ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش خمش ۱۰۰ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر پیشنهاد شده است. قطعه‌های کامپوزیت به وسیله دستگاه CNC برش داده شدند تا احتمال وجود ترک‌های ناشی از برش در نمونه به حداقل برسد. در شکل ۲ نمونه‌های آماده‌سازی شده



شکل ۲: نمونه‌های برش داده شده کامپوزیتی

هر نمونه در سه سرعت ۱/۳، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و با سه تکرار در هر سرعت آزمایش شد. برای انجام آزمایش خمش، از دستگاه Zwick ساخت کشور آلمان، موجود در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده

¹hand lay-up

در شکل‌های ۴ تا ۶ تغییرات نیروی خمشی بر حسب خیز برای نمونه‌های مختلف به ترتیب در سرعت‌های ۱/۳، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با هم مقایسه شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد در همه نمونه‌ها با افزایش خیز، ابتدا نیروی خمشی به صورت خطی با شیب زیاد افزایش یافته است، سپس به صورت غیرخطی و تدریجی تا نقطه ماکزیمم (نقطه شکست) روندی افزایشی داشته است. افزایش نیرو به صورت خطی در قسمت ابتدایی برای همه سرعت‌ها اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده رفتار الاستیک کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی در این محدوده می‌باشد.

۱.۳ بررسی تأثیر دوخت و نحوه لایه‌چینی بر خواص خمشی

به منظور بررسی اثر نحوه لایه‌چینی بر خصوصیات خمشی، چهار نوع لایه‌چینی مختلف در نظر گرفته شده است. جدول ۶ نتایج استحکام خمشی در سرعت ۱/۳ را برای نمونه‌های $A-0$ ، $B-0$ و $C-0$ را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها راستای دوخت و تعداد لایه‌ها مشابه می‌باشد و تنها تفاوت در نحوه لایه‌چینی می‌باشد. نتایج با نمونه بدون دوخت (Unstich) مقایسه شده است. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد نمونه‌های $C-0$ و $A-0$ دارای بیشترین استحکام خمشی هستند و پس از آن نمونه‌های Unstich و $B-0$ قرار دارند. وقتی نمونه تحت نیروی خمشی قرار می‌گیرد، تنش نرمال به صورت خطی از یک ماکزیمم در فشردگی بر روی سطح بالا تا یک ماکزیمم برابر در کشش روی سطح پایین تغییر می‌کند. در این حالت برای نمونه $C-0$ بیشترین مقدار استحکام حاصل شده است. دلیل مقدار کمتر استحکام در نمونه $A-0$ نسبت به نمونه فوق می‌تواند به میزان دوخت زیادتر اعمال شده و در نتیجه آسیب بیشتر اعمال شده به نمونه‌ها نسبت به نمونه $C-0$ بازگردد. اما این دو نمونه هنوز استحکامی بالاتر از نمونه بدون دوخت دارند. برای نمونه $B-0$ کمترین مقدار استحکام به دست آمده است. در این نمونه وقتی نیرو اعمال می‌گردد، تنش فشاری در بالا و تنش کششی در لایه‌های پایین سبب جدایش تار خشی می‌گردند. در نمونه‌های قبل به دلیل اتصال لایه‌ها در محل تار خشی این اتفاق رخ نمی‌دهد. از طرفی دیگر، درصد پایین‌تر کسر حجمی الیاف در نمونه $B-0$ می‌تواند مؤید کمتر شدن استحکام آن نسبت به سایر نمونه‌ها باشد. لذا با توجه به این نتایج می‌توان دریافت الگوی دوخت لایه‌های میانی تقویت‌کننده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش استحکام خمشی دارد.

مشابه نتایج استحکام خمشی، نوع لایه‌چینی نمونه‌های کامپوزیتی بر مدول خمشی نیز تأثیرگذار است. مطابق با شکل ۸، مدول خمشی نمونه‌های مختلف با لایه‌چینی‌های متفاوت از بیشترین تا کمترین مقدار به ترتیب متعلق به $C-0$ ، $A-0$ ، Unstich و $B-0$ می‌باشند.

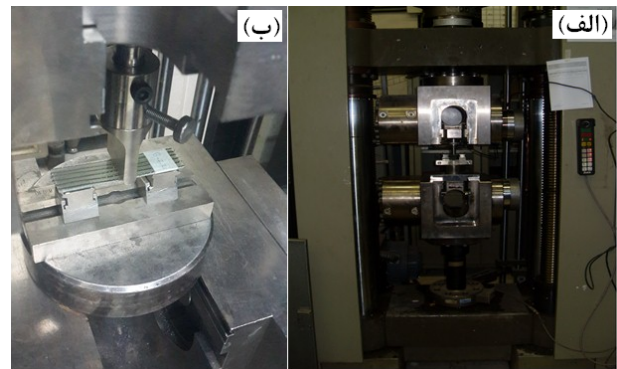
۲.۳ تأثیر زاویه دوخت بر خصوصیات خمشی

یکی از عوامل تأثیرگذار بر خواص خمشی کامپوزیت‌های دوخته‌شده، زاویه راستای دوخت با راستای طولی نمونه که تحت بار خمشی قرار می‌گیرد می‌باشد. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در این مطالعه شش زاویه دوخت مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۹ استحکام خمشی نمونه‌های دارای زاویه دوخت متفاوت با هم مقایسه شده است. در این نمونه‌ها تعداد

فاصله دو فک زیرین مطابق استاندارد برای آزمایش خمشی سه نقطه‌ای، ۵۰ میلی‌متر تنظیم شد. در شکل ۳ نمایی از دستگاه و فیکسچر استفاده شده برای آزمایش خمشی نمایش داده شده است.

جدول ۵: مشخصات کامپوزیت‌های ساخته شده

نمونه	ضخامت mm	کسر حجمی الیاف		چگالی	
		٪	gr/cm ³	حفره	٪
Unstich	۲/۱	۴۱/۳۶	۱/۴۰	۵/۳۱	
A - ۰	۲/۱	۴۴/۶۵	۱/۳۸	۸/۰۲	
A - ۴۵	۲/۴	۳۷/۲۷	۱/۳۶	۵/۵۱	
A - ±۴۵	۲/۴	۳۹/۸۲	۱/۳۴	۸/۳۳	
A - ۰، ۹۰	۲/۳	۴۱/۵۷	۱/۳۵	۸/۶۷	
A - ۰، ±۴۵، ۹۰	۲/۶	۴۳/۶۷	۱/۲۸	۱۲/۳۱	
B - ۰	۲/۶	۳۵/۶۹	۱/۳۴	۵/۶۸	
C - ۰	۲/۳	۴۰/۰۵	۱/۳۷	۶/۳۰	



شکل ۳: نمایی از الف) دستگاه زوئیک، ب) فیکسچر خمشی استفاده شده

۵.۲ تجزیه و تحلیل آماری

در این مطالعه داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایشات مختلف مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برای این منظور از آزمون دانکن و در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) استفاده گردید.

۳ نتایج و بحث

نتایج آزمایش خمشی سه نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف در سرعت‌های خمشی متفاوت در جدول ۶ آورده شده است. در این جدول به دلیل متفاوت بودن ضخامت نمونه‌های مورد آزمایش، استحکام و مدول الاستیک هر نمونه با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شده است.

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

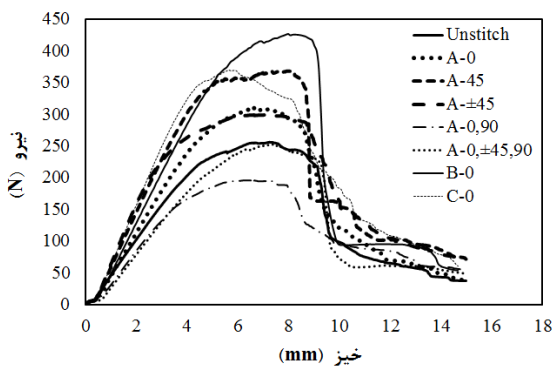
$$E_b = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2)$$

در این روابط، σ تنش خمشی، E_b مدول الاستیک در خمشی، P نیروی خمشی، L فاصله بین دو تکیه‌گاه زیرین، b و d به ترتیب متوسط عرض و ضخامت نمونه آزمایش شده و m معرف شیب بخش خطی نمودار نیرو - جابجایی می‌باشد.

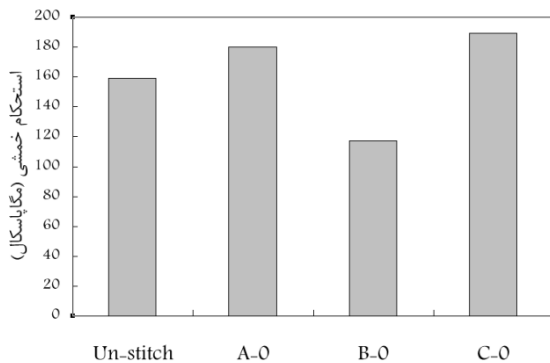
جدول ۶: نتایج آزمایش خمش برای نمونه‌های کامپوزیتی مختلف در سرعت‌های متفاوت

مدول خمشی (GPa)			بیشینه استحکام خمشی (MPa)			سرعت خمشی (mm/min)
۱۰۰	۱۰	۱/۳	۱۰۰	۱۰	۱/۳	
۹/۶۳	۸/۴۳	۷/۳۲	۲۰۹/۵۸	۱۷۳/۷۴	۱۵۹/۳۶	Unstitch
۸/۱۲	۷/۹۴	۷/۴۴	۲۱۰/۵۴	۱۹۹/۵۶	۱۸۰/۲۴	A - ۰
۵/۹۷	۵/۵۷	۵/۲۴	۱۷۷/۷۵	۱۶۳/۶۶	۱۴۸/۷۴	A - ۴۵
۵/۶۹	۵/۰۰	۴/۵۳	۱۵۲/۹۳	۱۳۴/۸۰	۱۰۰/۶۶	A - ±۴۵
۴/۹۷	۴/۸۸	۴/۰۵	۱۱۱/۱۶	۱۱۳/۴۸	۷۸/۷۸	A - ۰, ۹۰
۴/۲۰	۳/۹۴	۳/۷۸	۱۱۴/۲۷	۱۰۷/۵۵	۹۴/۲۰	A - ۰, ±۴۵, ۹۰
۷/۵۷	۶/۰۱	۵/۷۴	۱۹۲/۱۱	۱۳۳/۸۸	۱۱۷/۲۸	B - ۰
۱۰/۶۸	۸/۸۰	۸/۴۵	۲۳۹/۶۳	۱۸۹/۸۷	۱۸۹/۴۲	C - ۰

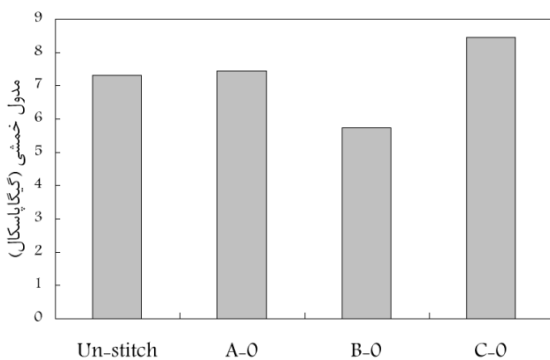
لایه‌ها و نحوه لایه‌چینی یکسان است و تنها تفاوت در زاویه دوخت آنها می‌باشد. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد نمونه‌ای که زاویه دوخت آن صفر درجه است دارای بیشترین استحکام خمشی نسبت به دیگر نمونه‌هاست و پس از آن نمونه بدون دوخت قرار دارد. نمونه A - ۴۵ در مقایسه با نمونه A - ۰ در شرایط یکسان، دارای استحکام خمشی پایین‌تری می‌باشد. این نتیجه بیانگر این است که وقتی راستای دوخت در راستای طول نمونه قرار گیرد تأثیر دوخت، عملکرد بهتری خواهد داشت. این نتیجه از آنجا ناشی می‌شود که در فرایند خمش بیشترین نیروی خمشی در راستای طول نمونه اعمال می‌شود [۲۱]: لذا قرارگیری نخ‌های دوخت در این راستا سبب کنترل بهتر تنش‌های طولی در این راستا می‌شود و استحکام خمشی را افزایش می‌دهد.



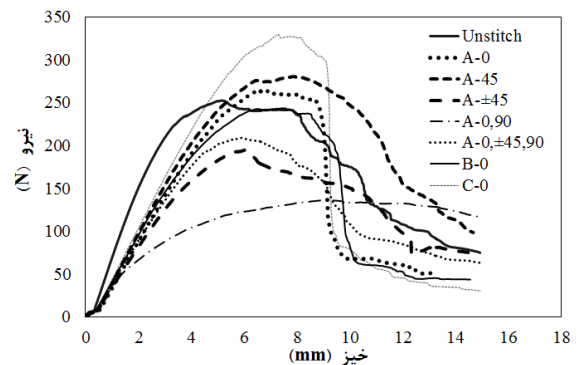
شکل ۶: نمودار نیرو - خیز نمونه‌ها در سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه



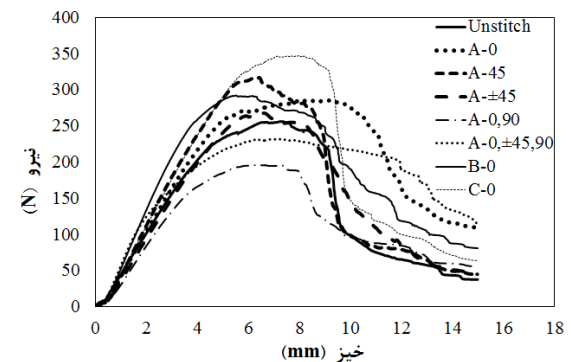
شکل ۷: استحکام خمشی نمونه‌های دارای لایه‌چینی متفاوت در سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۸: مدول الاستیسیته نمونه‌های دارای لایه‌چینی متفاوت در سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه

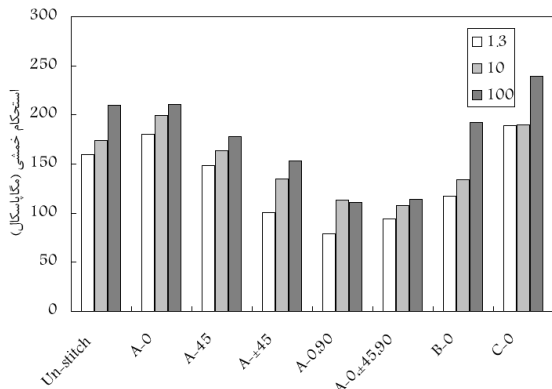


شکل ۴: نمودار نیرو - خیز نمونه‌ها در سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه

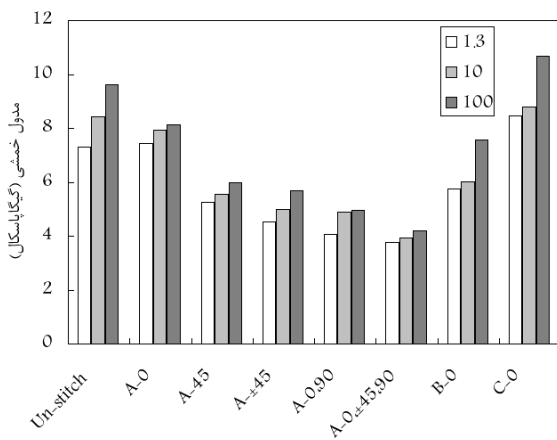


شکل ۵: نمودار نیرو - خیز نمونه‌ها در سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه

نمودارها مشاهده می‌شود تقریباً در همه نمونه‌ها با افزایش سرعت خمش، پارامترهای استحکام و مدول خمشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در توضیح این نتیجه باید توجه نمود که در سرعت خمش بالا، زمان بروز شکست کمتر است. لذا در این زمان کم، ماتریس به تدریج قادر به انتقال نیروی اعمال شده نخواهد بود و در نتیجه نیرو به‌صورت ناگهانی و با مقدار زیاد به تقویت‌کننده منتقل می‌شود؛ در حالی‌که در سرعت‌های پایین، زمان زیادتری برای انتقال نیرو و شروع و گسترش تدریجی شکست در دسترس می‌باشد که منجر به تخریب تدریجی و در نتیجه کاهش مقدار استحکام نهایی خواهد شد.



شکل ۱۱: استحکام خمشی نمونه‌های مختلف در سه سرعت متفاوت

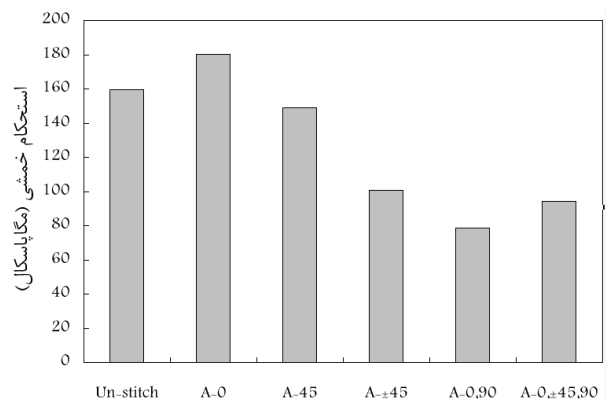


شکل ۱۲: مدول خمشی نمونه‌های مختلف در سه سرعت متفاوت

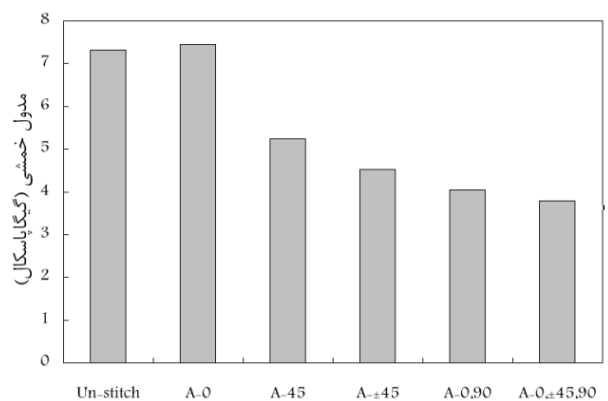
۴.۳ بررسی نحوه شکست در نمونه‌های مختلف کامپوزیت

طریقه شکست اجسام در فرایند خمش به سه صورت شکست کامل، لولایی و جزئی امکان‌پذیر است. در شکست کامل، قطعه به دو نیمه کاملاً جدا از هم شکسته می‌شود. در حالت شکست لولایی، تسلیم کامل مشاهده می‌شود، اما قطعه از هم جدا نمی‌شود و در شکست جزئی، رگه‌هایی از شکسته شدن وجود دارد اما قطعه شکل اصلی خود را حفظ می‌کند. تصاویر شکست نمونه‌های مختلف در سرعت‌های متفاوت در شکل ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که در این تصویرها مشاهده می‌شود شکست در همه نمونه‌ها به‌صورت لولایی بوده است. همچنین میزان آسیب وارد شده به نمونه‌های تحت سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه از سایر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد.

نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد نمونه‌هایی که در چند راستا دوخته شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که در یک راستا دوخته شده یا حتی دوختی روی آنها انجام نشده است، ۲۰ تا ۵۰ درصد استحکام خمشی کمتری دارند. این نتیجه به این دلیل است که افزایش تعداد راستاهای دوخت و بالا رفتن تعداد محل‌های دوخت در واحد سطح باعث افزایش میزان شکست‌های الیاف تقویت‌کننده اصلی و در نتیجه کاهش استحکام خمشی نمونه می‌شود. زاویه دوخت نسبت به راستای طول نمونه روی مدول خمشی نیز مؤثر است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد نتایج مدول خمشی در نمونه‌های مختلف مشابه نتایج استحکام خمشی می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود هنگامی‌که زاویه دوخت صفر درجه است مدول اندازه‌گیری شده کمی بیشتر از نمونه بدون دوخت است، اما در بقیه زاویه‌های دوخت مدول خمشی ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر از نمونه بدون دوخت شده است.



شکل ۹: استحکام خمشی نمونه‌های دارای زاویه‌های دوخت متفاوت در سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۰: مدول خمشی نمونه‌های دارای زاویه‌های دوخت متفاوت در سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه

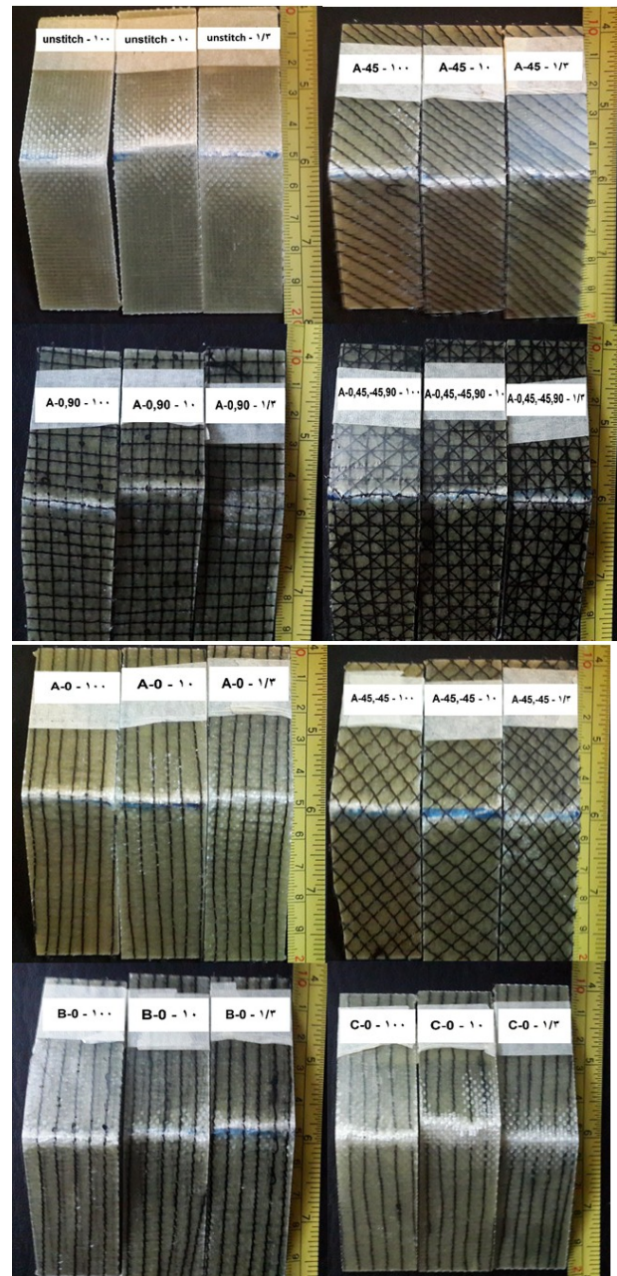
۳.۳ بررسی اثر سرعت آزمون بر خصوصیات خمشی

در این مطالعه برای بررسی تأثیر سرعت خمش بر عملکرد خمشی کامپوزیت‌ها، سه سرعت ۱/۳، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد و آزمون خمش بر اساس این سه سرعت انجام گرفت. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمودارهای مربوط به استحکام و مدول خمشی، در سه سرعت مذکور را برای همه نمونه‌های مورد آزمون نشان می‌دهد. مطابق آنچه در

نیرو به صورت ناگهانی و با مقدار زیاد به تقویت کننده منتقل می شود؛ در حالی که در سرعت های پایین، زمان زیادتری برای انتقال نیرو و شروع و گسترش تدریجی شکست در دسترس می باشد که منجر به تخریب تدریجی و در نتیجه کاهش مقدار استحکام نهایی خواهد شد. مد غالب شکست در همه نمونه ها، شکست به صورت لولایی بوده است. تقریباً در همه نمونه ها با افزایش سرعت خمش، پارامترهای استحکام و مدول خمشی به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است.

مراجع

- [1] R. Hesami, H. Hassani, S. Ajeli, A. Zadhoosh, Investigation into the energy absorption capacity of reinforced composite by 3D weft-knitted fabrics, *Journal of Textile Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 65-70, 2012. (in Persian)
- [2] L. Tong, A. P. Mouritz, M. K. Bannister, *3D fibre reinforced polymer composites*, London, Elsevier, 2002.
- [3] J. Nie, Y. Xu, L. Zhang, X. Yin, L. Cheng, J. Ma, Effect of stitch spacing on mechanical properties of carbon/silicon carbide composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2425-2432, 2008.
- [4] K. A. Dransfield, M. G. Bader, The effect of cross stitching with an aramid yarn on the delamination fracture toughness of CRFPs, *Proceeding of The 3rd International Conference on Deformation & Fracture of composites*, Liverpool, UK, pp. 414-423, 1995.
- [5] A. P. Mouritz, K. H. Leong, I. Herzberg, A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites, *Composites Part A*, Vol. 28, pp. 979-991, 1997.
- [6] M. Karahan, N. Karahan, Y. Ulcay, R. Eren, Investigation into the tensile properties of stitched and unstitched woven Aramid/Vinyl Ester composites, *Textile Research Journal*, Vol. 80, pp. 880-891, 2010.
- [7] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, H. Hoshi, The effects of stitch orientation on the tensile and open hole tension properties of carbon/epoxy plain weave laminates, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 563-571, 2012.
- [8] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, H. Hoshi, Compression properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 86, pp. 52-60, 2013.
- [9] K. T. Tan, A. Yoshimura, N. Watanabe, Y. Iwahori, T. Ishikawa, Effect of stitch density and stitch thread thickness on damage progression and failure characteristics of stitched composites under out-of-plane loading, *Composites Science and Technology*, Vol. 74, pp. 194-204, 2013.
- [10] K. Bilisik, G. Yolacan, Experimental characterization of multistitched two-dimensional (2D) woven E-Glass/Polyester composites under low-velocity impact load, *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, pp. 2145-2162, 2014.
- [11] K. Bilisik, G. Yolacan, Experimental determination of bending behavior of multilayered and multidirectionally-stitched E-Glass fabric structures for composites, *Textile Research Journal*, Vol. 82, pp. 1038-1049, 2012.



شکل ۱۳: تصویر شکست نمونه های مختلف در سرعت های متفاوت

۴ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تأثیر چیدمان دوخت لایه ها و زاویه دوخت بر عملکرد خمشی کامپوزیت های شیشه - اپوکسی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد:

دوخت لایه های میانی تقویت کننده تأثیر قابل ملاحظه ای بر افزایش مدول استحکام خمشی دارد. زمانی که راستای زاویه دوخت در راستای طول نمونه قرار گیرد تأثیر دوخت، عملکرد بهتری خواهد داشت. این نتیجه از آنجا ناشی می شود که در فرایند خمش بیشترین نیروی خمشی در راستای طول نمونه اعمال می گردد. در خصوص سرعت انجام آزمایش می توان گفت در سرعت خمش بالا، زمان بروز شکست کمتر است. لذا در این زمان کم، ماتریس به تدریج قادر به انتقال نیروی اعمال شده نخواهد بود و در نتیجه

- [12] K. Vallons, G. Adolphs, P. Lucas, S. Lomov, I. Verpoest, The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites, *Composites Part A*, Vol. 56, pp. 272-279, 2014.
- [13] L. Che, G. Xu, T. Zeng, S. Cheng, X. Zhou, S. Yang, Compressive and shear characteristics of an octahedral stitched sandwich composite, *Composite Structures*, Vol. 112, pp. 179-187, 2014.
- [14] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, H. Hoshi, Effect of stitch density on fatigue characteristics and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites, *Composites Part A*, Vol. 60, pp. 52-65, 2014.
- [15] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, H. Hoshi, Effect of stitch density on tensile properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites, *Composites Part B*, pp. 151-165, 2013.
- [16] J. Herwan, A. Kondo, S. Morooka, Effect of stitching parameter on mode II delamination properties of vectran stitched composites, 16th European Conference on Composite Materials ECCM, Seville, Spain, pp. 22-26, 2014.
- [17] V. Nanthagopal, T. Senthilram, V. R. Giri, Flexural and impact studies on stitched self-reinforced polypropylene composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 27, pp. 1504-1514, 2014.
- [18] O. Demircan, T. Kosui, S. Ashibe, A. Nakai, Effect of stitch and biaxial yarn types on tensile, bending, and impact properties of biaxial weft-knitted composites, *Advanced Composite Materials*, Vol. 20, pp. 239-260, 2013.
- [19] A. Yudhanto, G. Lubineau, I. A. Ventura, N. Watanabe, Damage characteristics in 3rd stitched composites with various stitch parameters under in-plane tension, *Composites Part A*, Vol 71, pp. 17-31, 2015.
- [20] Standard test method for void content of reinforced plastics, ASTM Standard D. 790, 2003.
- [21] M. Tehrani, Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 59-66, 2016. (in Persian)