

Effect of Through-the-Thickness Yarn Fineness and Distance on Damage Behavior of Carbon-Phenolic 3D Composites

Behzad Najafloo¹, Amir Masoud Rezaoust^{2*}, and Masoud Latifi¹

1. Textile Excellence and Research Centers, Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran
2. Department of Composite, Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 1 July 2014, accepted: 2 September 2014

ABSTRACT

The effects of through-the-thickness yarn fineness and distance on the damage behavior of vacuum resin infused 3D carbon-phenolic composites were investigated. For this purpose, the carbon/phenolic composites with different tufting thread fineness (count) and distance ranging from 5.5 mm to 16.5 mm were produced to determine an optimum distance and count in the composites. Three-point bending test results show that the flexural strength of tufting composites may drop 17% to 34 % while through thickness reinforcements set up a mechanical connection between the plies and bridge over delamination cracks to avoid their penetration. The weakness is attributed to damaging effect of tufting method, misalignments of X-Y fibers in presence of Z direction reinforcement and stress concentration effect of produced holes for tufting. On the other hands, Z direction reinforcements prevent fibers delamination. Therefore, the laminate strength was increased and failure mechanism was changed from brittle to ductile fracture. In addition at the same through-thickness yarn count of tufting composites, with the increase in tufting distance, the flexural strength is reduced. But in the case of samples with tufting distance of 5.5 mm, the flexural strength reduced with increase in thorough-the-thickness yarn count, but for samples with tufting distance of 16 mm, showed some increases with the same count variations. After the failure stress in stress-displacement curve was increased for specimens with Z direction reinforcements.

Keywords:

3D composite,
tufting,
flexural strength,
failure mechanism,
delamination

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.rezaoust@ippi.ac.ir

اثر ظرافت و فاصله نخ‌های اتصال عمودی بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های سه‌بعدی کربن - فنولی

بهزاد نجفلو^۱، امیرمسعود رضادوست^{۲*}، مسعود لطیفی^۱

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، قطب علمی و پژوهشکده نساجی،

صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۹۳/۴/۱۰، پذیرش: ۹۳/۶/۱۱

چکیده

در این پژوهش، اثر ظرافت و فاصله نخ‌های اتصال عمودی بر رفتار شکست کامپوزیت‌های سه‌بعدی که به روش خیساندن رزین در خلأ تولید شدند، ارزیابی شده است. بدین منظور، کامپوزیت‌های سه‌بعدی کربن - فنولی با نمره نخ‌های مختلف در فواصل بافت عمودی متفاوت ۵/۵ mm تا ۱۶/۵ mm تهیه شدند تا مقادیر بهینه هر یک از آنها به دست آید. نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان داد، کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی در مقایسه با کامپوزیت‌های فاقد الیاف در جهت ضخامت، ۱۷٪ تا ۳۴٪ استحکام خمشی کمتری دارند. در حالی که نخ در جهت ضخامت، موجب اتصال مکانیکی بین لایه‌ها شده و از گسترش پدیده لایه‌لایه شدن در کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی جلوگیری می‌کند. ضعف کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی به دلیل صدمه‌های ناشی از وجود الیاف در جهت ضخامت است که موجب ایجاد نقاط تمرکز تنش و عدم هم‌راستایی الیاف صفحه‌ای می‌شود. از طرفی، وجود الیاف در جهت ضخامت از لایه‌لایه شدن کامپوزیت جلوگیری می‌کند. در نتیجه، مقاومت لایه‌ای آن افزایش یافته و سازوکار شکست نیز از حالت ترد به چقرمه تغییر می‌یابد. در حالی که در کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی با نمره نخ اتصال یکسان، با افزایش فاصله نخ در بافت عمودی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد، در نمونه‌های ۵/۵ mm با ازدیاد نمره نخ اتصال، استحکام خمشی کامپوزیت کاهش و در نمونه ۱۶/۵ mm افزایش نشان داد. همچنین، در نمونه کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی، تنش پس از شکست اصلی، نسبت به کامپوزیت‌های فاقد نخ اتصال، مقادیر بیشتری داشت.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت سه‌بعدی،
بافت عمودی،
استحکام خمشی،
سازوکار شکست،
لایه‌لایه شدن

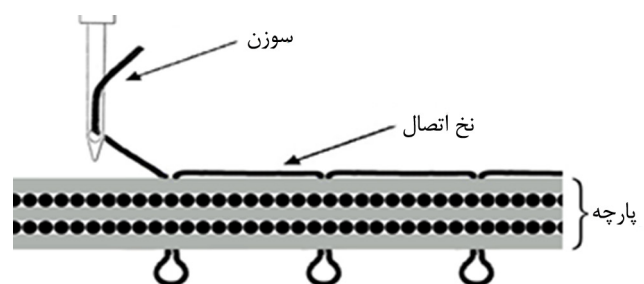
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

a.rezadoust@ippi.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر کامپوزیت‌ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. ویژگی و تمایز این سازه‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن زیاد و تنظیم خواص ناهمسانی آنهاست. کامپوزیت‌های تقویت شده کربنی به دلیل استحکام و قابلیت کارایی در دمای زیاد، به‌طور چشمگیری در صنعت هوافضا و خودرو استفاده می‌شوند [۴-۱]. اغلب کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات با قراردادن لایه‌هایی از پارچه روی هم و متصل کردن آنها به شکل ساختاری صلب، تولید می‌شوند. این لایه‌ها، ممکن است از پارچه‌ها و لایه‌های الیاف که در جهت‌های مختلف آرایش یافته‌اند، تشکیل شود. ضعف مهم این سازه‌ها تمایل زیاد آنها به لایه‌لایه شدن (delamination) است. برای جلوگیری از این پدیده لازم است تا پارچه‌های مزبور در بعد سوم نیز تقویت شوند [۵]. ضعف مهم دیگر کامپوزیت‌های دوبعدی، تضعیف خواص در جهت ضخامت این سازه‌ها بوده که در اثر جهت‌گیری الیاف در دو جهت است. به همین دلیل، از این سازه‌های دوبعدی نمی‌توان در کاربردهایی استفاده کرد که به مقاومت زیاد در جهت ضخامت نیاز دارند یا مقاومت برشی زیاد مدنظر است [۶]. به همین علت امروزه، استفاده از تقویت‌کننده‌های سه‌بعدی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در واقع، وجود الیاف در جهت ضخامت سازه موجب اتصال بهتر لایه‌ها می‌شود و پدیده لایه‌لایه شدن را نیز کاهش می‌دهد و از این راه موجب بهبود استحکام بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌ها می‌شود [۷، ۸]. روش‌های مختلفی در نساجی برای بافت منسوجات سه‌بعدی وجود دارد که می‌توان به بافندگی سه‌بعدی، نخ دوخت (stitching)، قیطان‌بافی (braiding)، سوزن‌زنی و بافت عمودی یا دوخت لبه آزاد (tufting) اشاره کرد. استفاده از هر یک از این روش‌ها به کاربرد کامپوزیت و خواص موردانتظار از آن بستگی دارد [۱۳-۷]. استفاده از نخ اتصال، از رایج‌ترین روش‌ها برای تقویت پارچه‌های دوبعدی است. این کار در دو قالب نخ دوخت یا بافت عمودی انجام می‌شود که تفاوت‌هایی با هم دارند. این روش موجب بهبود مقاومت در برابر لایه‌لایه شدن کامپوزیت‌های سه‌بعدی می‌شود.

مطالعات زیادی درباره نخ دوخت و اثر عوامل مختلف توسط



شکل ۱- نمایی از نحوه وجود نخ اتصال بافت عمودی در سازه.

پژوهشگران انجام شده است [۲۵-۱۴]. از جمله آنها می‌توان به مطالعه Wang و همکاران [۲۶] روی اثر نخ دوخت بر رفتار مکانیکی صفحه‌ای و ضربه‌ای این کامپوزیت‌ها اشاره کرد که موجب کاهش جدایی لایه‌ها در اثر دوخت می‌شود. در ادامه Massabo و همکاران [۲۷] نشان دادند، استفاده از نخ دوخت، مقاومت در برابر پدیده لایه‌لایه شدن را در شکست افزایش می‌دهد. همچنین Jingjiang و همکاران [۲۸] دریافتند، نخ دوخت استحکام کششی و برشی کامپوزیت‌های کربن - سیلیکون را در اثر به تأخیر انداختن پدیده لایه‌لایه شدن افزایش می‌دهد.

برخلاف این مطالعات، پژوهش‌های زیادی درباره بافت عمودی انجام نشده و اثر عوامل اثرگذار روی خواص مکانیکی آن بررسی نشده است. از معدود پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به کار Dell'Anno و همکاران [۲۹] اشاره کرد. آنها نشان دادند، بافت عمودی پدیده لایه‌لایه شدن را کاهش داده و استفاده از نخ اتصال شیشه‌ای در کامپوزیت تهیه شده موجب افزایش ۲۰٪ استحکام فشاری پس از ضربه شده است. روش بافت عمودی، به دلیل عدم نیاز به نخ دوم (بوبین) و اتصال بین نخ‌ها در مقایسه با روش دوخت، بسیار ساده‌تر است. در واقع در این روش، نخ اتصال دارای گره‌خوردگی نیست و تنها به دلیل اصطکاک موجود بین نخ اتصال و لایه‌های پارچه در جای خود ثابت است (شکل ۱) [۳۰، ۲۹].

در این پژوهش سعی شده است تا برای دستیابی به خواص مطلوب و بهینه، بافت عمودی به گونه‌ای به کار گرفته شود که کامپوزیت دارای بیشترین استحکام بین‌لایه‌ای و کمترین افت خواص صفحه‌ای باشد. بدین منظور، کامپوزیت تقویت شده کربنی با رزین فنولی با نخ‌های اتصال ۶، ۱۲ و ۲۴ k و فواصل ۵/۵، ۱۱ و ۱۶/۵ mm تهیه شد و تحت آزمون خمشی قرار گرفت، تا ضخامت و فاصله بهینه مشخص شود.

تجربی

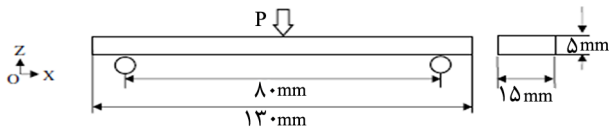
مواد

برای انجام این پژوهش از تقویت‌کننده کربن ساخت شرکت Toray و رزین فنولی تولید شرکت رزیتان استفاده شد. مشخصات این مواد در جدول ۱ آمده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، ۱۰ دسته نمونه با متغیرهای معین انتخاب شدند. ابتدا، برای مقایسه بهتر و شرایط یکسان صفحه‌ای برای تمام نمونه‌ها



شکل ۲- نمایی از آزمون خمش و ابعاد نمونه‌ها.

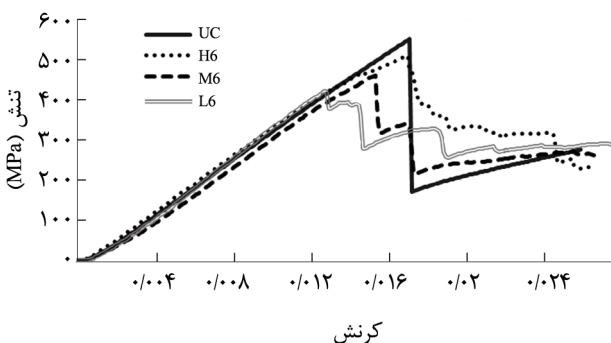
برای کاهش نوسانات حاصل از تغییر ضخامت نمونه‌ها، داده‌های به‌دست آمده از آزمون خمش، بر کسر حجمی تقسیم شد تا نتایج نرمال‌سازی شوند. روش تعیین کسر حجمی نمونه‌ها به این شکل بود که ابتدا با توجه به ابعاد، حجم هر نمونه محاسبه شد. سپس، با توجه به داشتن وزن الیاف کربن مصرف شده در ساخت پیش‌شکل گرفته و چگالی الیاف، حجم الیاف مصرفی معین و از تقسیم حجم الیاف به حجم نمونه، کسر حجمی الیاف محاسبه شد.

آزمون مکانیکی

برای مشاهده پدیده لایه‌لایه‌شدن و اثر بافت عمودی بر آن از آزمون خمش استفاده شد. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای سه تا پنج نمونه و برای هر گروه در دما و رطوبت محیط و مطابق استاندارد ASTM D790 انجام شد (شکل ۲) [۳۱]. برای انجام این آزمون دستگاه Universal STM-150 با حداکثر دامنه بارگذاری ۱۴۷ kN به‌کار گرفته شد. نسبت طول مقیاس به ضخامت، ۱۶:۱ انتخاب شد تا پدیده لایه‌لایه‌شدن بهتر مشاهده شود. تنش و کرنش هر یک از نمونه‌ها با توجه به منحنی نیرو - جابه‌جایی محاسبه شد.

نتایج و بحث

برای تحلیل بهتر نتایج و مشاهده دقیق‌تر اثر وجود نخ اتصال، همان‌طور



شکل ۳- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های UC، M6 و H6 در مقایسه با کامپوزیت UC.

جدول ۱- مشخصات رزین و تقویت‌کننده استفاده شده.

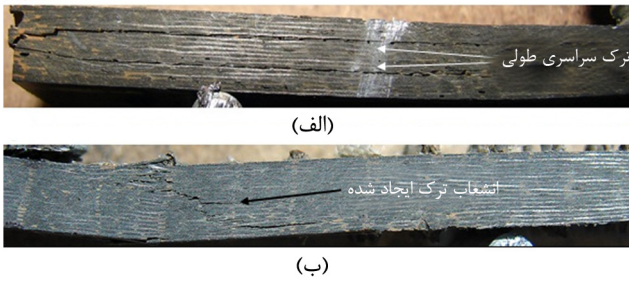
رزین فنولنی	الیاف کربن	خاصیت
۵۰	۳۵۳۰	استحکام کششی (MPa)
۹	۲۳۰	مدول کششی (GPa)
۰/۴	۱/۵	کرنش شکست (%)
۱/۲	۱/۷۶	چگالی (g/cm ³)

از ۳۴ لایه تک‌جهتی استفاده شد تا درصد کسر حجمی الیاف در صفحه ثابت بماند. متغیرهای بررسی شده، نمره الیاف مصرفی برای بافت و فاصله بافت‌ها از هم بود. لایه‌های تک‌جهتی، با آرایش ۰ و ۹۰ درجه روی هم چیده شده، بافت عمودی در سه فاصله ۵/۵، ۱۱ و ۱۶/۵ mm و نخ اتصال با مشخصات ۱۲، ۶ و ۲۴ k در جهت ضخامت، با سوزن وارد پیش‌شکل گرفته شدند. یادآور می‌شود، مقدار نمره الیاف کربن با تعداد رشته‌ها مشخص می‌شود و ۶ k یعنی نخ ۶۰۰۰ رشته‌ای است. برای آغشته‌سازی از روش خیساندن (infusion) با رزین استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا پیش‌شکل گرفته لایه‌های پارچه‌های UD پس از انجام بافت عمودی، داخل مخزن قرار داده شد. پس از اعمال خلأ، مجرای رزین باز شد تا رزین فضاهای خالی بین الیاف را فرا گیرد. در ادامه با ایجاد فشار ۵۰ bar، امکان نفوذ بهتر رزین درون ساختار فراهم شده و در انتها با قراردادن سازه درون گرم‌خانه با دمای ۱۵۰°C تا ۱۸۰°C عملیات پخت تکمیل شد. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده.

کد نمونه	نمره نخ اتصال (tex) ^۱	فاصله بافت عمودی (mm)	ضخامت لایه (mm)	تراکم نخ در اتصال (cm ²)
UC	-	-	۵ (۰/۰۵) ^۲	۰
H6	۳۹۶	۵/۵	۵/۰۳ (۰/۰۵)	۳/۳۰
H12	۸۰۰	۵/۵	۴/۸۲ (۰/۰۴)	۰/۸۲
H24	۱۶۰۰	۵/۵	۴/۵۵ (۰/۰۴)	۰/۳۷
M6	۳۹۶	۱۱	۴/۷۳ (۰/۰۵)	۳/۳۰
M12	۸۰۰	۱۱	۴/۱۴ (۰/۰۴)	۰/۸۲
M24	۱۶۰۰	۱۱	۴/۴۲ (۰/۰۴)	۰/۳۷
L6	۳۹۶	۱۶/۵	۴/۴۰ (۰/۰۳)	۳/۳۰
L12	۸۰۰	۱۶/۵	۴/۱۰ (۰/۰۳)	۰/۸۲
L24	۱۶۰۰	۱۶/۵	۴/۴۴ (۰/۰۷)	۰/۳۷

(۱) جرم برحسب گرم در ۱۰۰۰ متر و (۲) اعداد داخل پرانتز ضریب تغییرات محاسبه شده است.

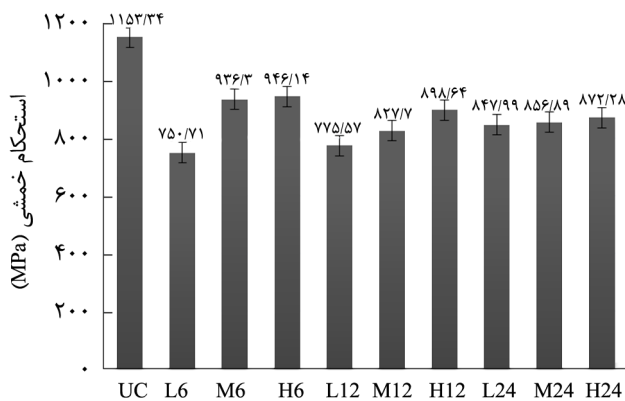


شکل ۶- (الف) ترک طولی در نمونه فاقد نخ اتصال و (ب) انشعاب ترک در نمونه‌های دارای بافت عمودی.

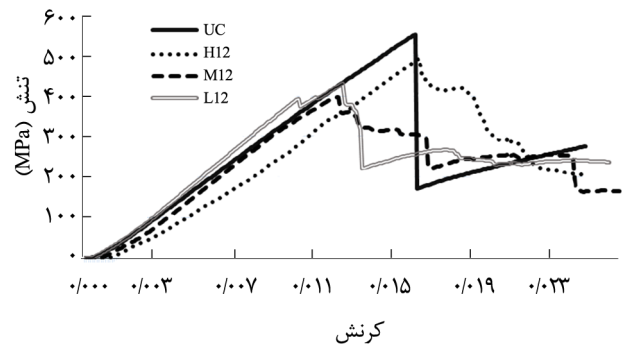
شکست بین‌لایه‌ای ضعیف، مستعد ترک‌های لایه‌لایه‌شونده هستند. بازبینی نمونه‌های دارای بافت عمودی و فاقد آن (شکل ۶) نشان می‌دهد، وجود بافت عمودی، رشد ترکی را که منجر به جدایی گسترده لایه‌ها می‌شود (شکل ۶-الف)، متوقف می‌کند. با ایجاد انشعاب در آن و وقوع سایر سازوکارهای شکست مانند کمناش (buckling)، مقاومت در برابر تورق نوع II (بازشدگی ترک) اصلاح شده و با کاهش سرعت رشد ترک مانع از سقوط تنش شکست می‌شود [۸] (شکل ۶-ب).

به بیان دیگر، با اتصال لایه‌ها به یکدیگر در مناطق پشت و جلوی ترک و تقویت بین‌لایه‌ای، این نخ‌های اتصال قابلیت تحمل مقدار مشخصی از تنش اعمال شده را دارند که موجب کاهش کرنش در لبه ترک و افزایش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای می‌شود. بدین ترتیب، روند رشد ترک آرام‌تر می‌شود. پس از شکست اولیه، به سبب وجود ترک در سازه، افزایش تنش پس از شکست در شکل‌های ۳ تا ۵ را می‌توان به افزایش چقرمگی بین‌لایه‌ای در نمونه‌های دارای نخ اتصال نسبت داد.

نکته دیگر، اثر بافت عمودی بر استحکام خمشی نمونه‌هاست. مقادیر استحکام خمشی برای تمام نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده



شکل ۷- استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی.

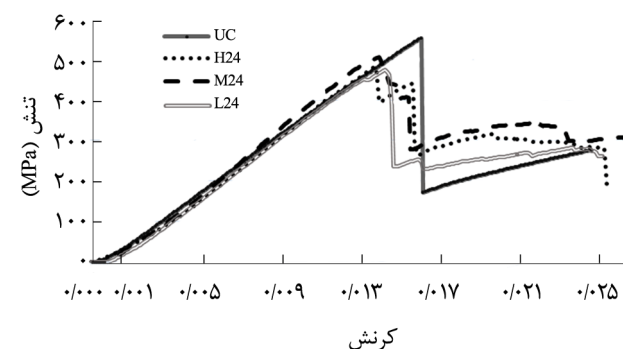


شکل ۴- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های H12، M12، L12، UC مقایسه با کامپوزیت UC.

که در بخش پیشین نیز اشاره شد، تمام نمونه‌ها با ۳۴ لایه تهیه شدند تا در حد امکان خواص صفحه‌ای یکسان باشد. تمام داده‌ها نیز بر کسر حجمی صفحه‌ای تقسیم شد تا حتی‌الامکان نوسانات حاصل از تغییرات درصد الیاف صفحه‌ای حذف شود.

در شکل‌های ۳ تا ۵ نمودارهای تنش - کرنش آزمون خمش نمونه‌های دارای نخ اتصال با فاصله‌های به ترتیب ۵/۵ mm تا ۱۶/۵ mm نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با وجود نخ بافت عمودی، سازوکار شکست از کاهش ناگهانی تنش و شکست ترد در کامپوزیت UC، به شکست چقرمه با حفظ سطح نیروی پیش‌برنده شکست در کامپوزیت‌های دارای نخ اتصال عمودی، تغییر یافته است. همچنین، کاهش نیروی کامپوزیت فاقد بافت عمودی (UC) از همه کامپوزیت‌های دارای بافت عمودی و صرف‌نظر از وزن و تراکم بافت، بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، هر نوع بافت عمودی قابلیت آن را دارد تا به نحوی کاهش شدید نیرو را پس از شکست اولیه کم کند.

هنگامی که کامپوزیت‌های چندلایه دوبعدی در معرض نیروهای ضربه‌ای یا خارج صفحه قرار می‌گیرند، به دلیل خواص چقرمگی



شکل ۵- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های H24، M24، L24، UC مقایسه با کامپوزیت UC.

نکته دیگر اینکه با افزایش نمره الیاف، استحکام خمشی کامپوزیت بهبود می‌یابد. این موضوع ناشی از این است که در نمره‌های کم، الیاف بافت عمودی قابلیت جلوگیری از جدایش لایه‌ها را ندارند و دچار شکست می‌شوند. ولی با افزایش نمره، در برابر گسترش ترک کلی جداکننده لایه‌ها مقاومت می‌کنند و استحکام کلی قطعه افزایش می‌یابد [۳۲].

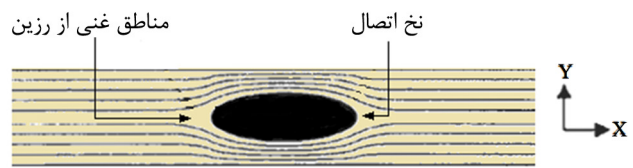
برای بررسی اثر فاصله بر خواص خمشی، نمونه‌ها در سه فاصله ۵/۵، ۱۱ و ۱۶/۵ mm به ترتیب با تراکم نخ اتصال ۰/۸۲ و ۰/۳۷ cm² و برای بررسی اثر نمره نخ اتصال هر یک از این سه دسته با سه نمره نخ مختلف ۳۹۶، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ tex تهیه شدند.

در هر فاصله مشخص، با افزایش نمره نخ رفتار متفاوتی از استحکام خمشی قابل مشاهده است. در واقع، در فاصله ۵/۵ mm با افزایش نمره و قطر نخ مقدار کج‌شدگی و عدم هم‌راستایی الیاف صفحه‌ای بیشتر می‌شود. در نتیجه، مقدار باربرداری الیاف کاهش می‌یابد و استحکام خمشی کم می‌شود (شکل ۸). حال اینکه در فاصله ۱۶/۵ mm، چون فاصله نخ اتصال به اندازه کافی زیاد است، عدم هم‌راستایی و آسیب‌دیدگی الیاف نقش اثرگذاری ندارد، بلکه با افزایش نمره نخ استحکام بین‌لایه‌ای افزایش یافته، در نتیجه استحکام خمشی بیشتر شده است.

در شکل ۹ با ثابت در نظر گرفتن نمره نخ، اثر فاصله مورد توجه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در نمره ثابت با افزایش فاصله، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش تعداد نخ‌های اتصال است. بدیهی است، با نزدیک شدن فاصله‌ها، شکست الیاف و عدم هم‌راستایی افزایش می‌یابد. اما، اثر تراکم تعداد نخ اتصال نقش غالب را دارد و موجب افزایش استحکام بین‌لایه‌ای و در نهایت افزایش استحکام خمشی می‌شود. حال آنکه برای نخ با نمره ۳۹۶ tex (شکل ۹)، به دلیل قطر کمتر نسبت به دو نخ دیگر و افزایش فاصله، کاهش شدیدتری در استحکام مشاهده می‌شود که برای دو نمونه بعدی این کاهش به دلیل قطر بیشتر نخ اتصال کمتر است. بنابر نتایج گفته شده، کمترین کاهش استحکام خمشی در بافت عمودی با کمترین فاصله و ظریف‌ترین نخ حاصل می‌شود و نیروی شکست پس از کاهش اولیه نیز در این نمونه‌ها در سطح بیشتری ادامه می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر فاصله و نمره نخ اتصال بر استحکام خمشی و نوع شکست کامپوزیت‌های سه‌بعدی تجزیه و تحلیل شد. بدین منظور،



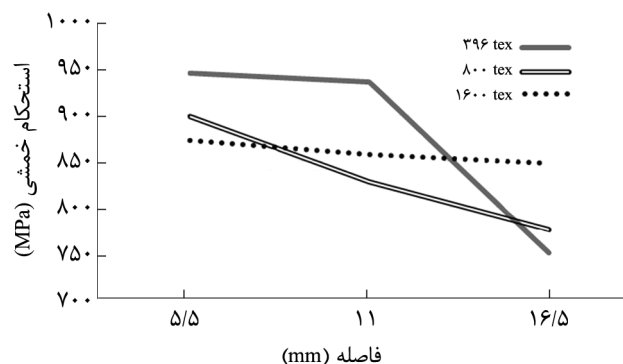
شکل ۸- نحوه قرار گرفتن نخ اتصال در پارچه UD.

شده است. همان‌طور که مشخص است، استحکام خمشی نمونه UC از سایر نمونه‌ها بیشتر است و کاهش استحکام از ۱۷٪ در نمونه H6 تا ۳۵٪ در نمونه L6 قابل مشاهده است. می‌توان دید، وجود نخ اتصال اثر کاهشی بر استحکام خمشی کامپوزیت داشته است. هنگام اعمال خمش بخش پایین سازه در حال کشش و بخش بالایی در حال فشار است. پس این الیاف صفحه‌ای هستند که نقش مهمی در باربرداری نیرو ایفا می‌کنند. با توجه به این مطلب، دلیل این کاهش را می‌توان در نتیجه عوامل زیر دانست:

- طول الیاف صفحه‌ای هنگام ورود سوزن بافت بر سازه خرد و کوتاه می‌شود، در نتیجه باربرداری الیاف و استحکام خمشی کاهش می‌یابد [۳۲].

- همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، با ورود سوزن بر سازه الیاف هم‌راستایی آنها به هم خورده و از حالت موازی خارج می‌شوند که این دلیل نیز موجب کاهش باربرداری الیاف می‌شود. همچنین، با تغییر موقعیت الیاف مناطق غنی از رزین ایجاد شده که این مناطق نیز موجب تسهیل در ایجاد ترک شده و در نهایت موجب کاهش خواص مکانیکی می‌شود [۳۲].

- ایجاد محل تمرکز تنش نیز عامل دیگر کاهش خواص مکانیکی است. در واقع با ورود نخ اتصال در صفحه و برهم زدن یکنواختی صفحه و ایجاد حفره در آن موجب کاهش استحکام خمشی می‌شود.



شکل ۹- مقایسه استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی با نمره نخ‌های ثابت در فاصله‌های مختلف.

آنها در اثر ورود سوزن در سازه است. در هر یک از کامپوزیت‌های دارای نخ اتصال و در هر فاصله مشخص، با افزایش نمره و قطر نخ مقدار استحکام بین‌لایه‌ای و باربرداری الیاف کاهش یافته و استحکام خمشی بهبود می‌یابد. نمره نخ اتصال و فاصله این نخ‌ها از هم دارای اثر متقابل است، به طوری که بسته به فاصله نخ اتصال، در فاصله‌های نزدیک‌تر، نخ‌های ظریف‌تر به علت ایجاد آسیب‌های کمتر روی الیاف صفحه‌ای خواص بهتری مشاهده می‌شود. در حالی که برای فاصله‌های بیشتر، بهبود خواص با نخ‌های ضخیم‌تر به دلیل بیشتر بودن استحکام بین‌لایه‌ای حاصل می‌شود.

نمونه‌هایی با نمره نخ اتصال مختلف در فاصله‌های مشخص تهیه شد. نمونه‌ها در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند و نتایج حاکی از آن است که با وجود نخ اتصال در کامپوزیت، سازوکار شکست نیز از حالت ترد به چقرمه یا حفظ سطح نیروی پیش‌برنده شکست، تغییر یافت. مقاومت در برابر جدایی لایه‌ها در نمونه‌های دارای نخ اتصال، به دلیل تشکیل پل اتصالی، کاهش سرعت رشد ترک و نیز انشعاب ترک برای مقاومت در برابر تورق نوع II، نسبت به نمونه‌های فاقد نخ اتصال بیشتر است.

استحکام خمشی نمونه‌های دارای نخ اتصال از ۱۷٪ تا ۳۵٪ کم می‌شود که به دلایلی مانند ایجاد عدم هم‌راستایی الیاف و خرد شدن

مراجع

- Shokrieh M.M. and Zeinedini A., A Novel Procedure for Prediction of Mixed Mode I/II of Fracture Toughness of Laminate Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **27**, 111-120, 2014.
- Mivehchi H., A New Applications for Fibre Composite Materials in Mechanical Engineering, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **5**, 62-72, 1991.
- Zamani J. and Moosabeiki V., Manufacturing Method of Carbon/Phenolic Composites and Its Implication on Ablative Characteristics, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **26**, 243-256, 2013.
- Bahramian A.R. and Seifi A., Evaluation of High Temperature Composites Thermal Properties under Different Heat Flux Conditions, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **27**, 151-160, 2014.
- Tan P., Tong L., Steven G.P., and Ishikawa T., Behavior of 3D Orthogonal Woven CFRP Composites, Part I. Experimental Investigation, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **31**, 259-271, 2000.
- Tan P., Tong L., and Steven G.P., Behavior of 3D Orthogonal Woven CFRP Composites, Part II. FEA and Analytical Modeling Approaches, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **31**, 273-281, 2000.
- Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., and Leong K.H., Review of Applications for Advanced Three-Dimensional Fibre Textile Composites, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **30**, 1445-1461, 1999.
- Tong L., Mouritz A.P., and Bannister M.K. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier, 107-241, 2002.
- Boisse P., *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, Cambridge, Woodhead, chapt. 6, 2011.
- Rugg K.L., Cox B.N., and Massabò R., Mixed Mode Delamination of Polymer Composite Laminates Reinforced through the Thickness by Z-Fibers, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **33**, 177-190, 2002.
- Partridge I.K. and Cartie' D.D.R., Delamination Resistant Laminates by Z-Fiber Pinning. Part I: Manufacture and Fracture Performance, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **35**, 55-64, 2005.
- Wittig J., Recent Development in Robotic Stitching Technology for Textile Structural Composites, *J. Text. Apparel Technol. Manage.*, **2**, 1-8, 2001.
- Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., and Leong K.H., Review of Applications for Advanced Three-Dimensional Fibre Textile Composites, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **30**, 1445-1461, 1999.
- Mouritz A.P., Leong K.H., and Herszberg I., A Review of the Effect of Stitching on the In-Plane Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Polymer Composites, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **28**, 979-991, 1997.
- Cox B.N., Massabò R., and Kedward K.T., Suppression of Delaminations in Curved Structures by Stitching, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **27**, 1133-1138, 1996.
- Dransfield K.A., Jain L.K., and Mai Y.W., On the Effects of Stitching in CFRPs-I. Mode I Delamination Toughness, *Compos. Sci. Technol.*, **58**, 815-827, 1998.

17. Jain L.K., Dransfield K.A., and Mai Y.W., On the Effects of Stitching in CFRPs-II. Mode II Delamination Toughness, *Compos. Sci. Technol.*, **58**, 829-837, 1998.
18. Sun X., Tong L., Wood M.D.K., and Mai Y.W., Effect of Stitch Distribution on Mode I Delamination Toughness of Laminated DCB Specimens, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 967-981, 2004.
19. Tan K.T., Watanabe N., and Iwahori Y., Effect of Stitch Density and Stitch Thread Thickness on Low-Velocity Impact Damage of Stitched Composites, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **41**, 1857-1868, 2010.
20. Tan K.T., Watanabe N., Iwahori Y., and Ishikawa T., Effect of Stitch Density and Stitch Thread Thickness on Compression after Impact Strength and Response of Stitched Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **72**, 587-598, 2012.
21. Tan K.T., Yoshimura A., Watanabe N., Iwahori Y., and Ishikawa T., Effect of Stitch Density and Stitch Thread Thickness on Damage Progression and Failure Characteristics of Stitched Composites under out-of-Plane Loading, *Compos. Sci. Technol.*, **74**, 194-204, 2013.
22. Yudhanto A., Watanabe N., Iwahori Y., and Hoshi H., Effect of Stitch Density on Tensile Properties and Damage Mechanisms of Stitched Carbon/Epoxy Composites, *Compos., Part B: Eng.*, **46**, 151-165, 2013.
23. Wood M.D.K., Sun X., Tong L., Katzos A., Rispler A.R., and Mai Y.W., The Effect of Stitch Distribution on Mode I Delamination Toughness of Stitched Laminated Composites-Experimental Results and FEA Simulation, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1058-1072, 2007.
24. Hosur M.V., Vaidya U.K., Ulven C., and Jeelani S., Performance of Stitched/Unstitched Woven Carbon/Epoxy Composites under High Velocity Impact Loading, *Compos. Struct.*, **64**, 455-466, 2004.
25. Yudhanto A., Watanabe N., Iwahori Y., and Hoshi H., The Effects of Stitch Orientation on the Tensile and Open Hole Tension Properties of Carbon/Epoxy Plain Weave Laminates, *Mater. Design*, **35**, 563-571, 2012.
26. Wu E. and Wang J., Behavior of Stitched Laminates under In-Plane Tensile and Transverse Impact Loading, *J. Compos. Mater.*, **29**, 2254-2289, 1995.
27. Massabo R. and Cox B.N., Concepts for Bridged Mode II Delamination Cracks, *J. Mech. Phys. Solid*, **47**, 1265-1300, 1999.
28. Jingjiang N., Effect of Stitch Spacing on Mechanical Properties of Carbon/Silicon Carbide Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 2425-2432, 2008.
29. Dell'Anno G., Cartié D.D., Partridge I.K., and Rezai A., Exploring Mechanical Property Balance in Tufted Carbon Fabric/Epoxy Composites, *Composites: Part A*, **38**, 2366-2373, 2007.
30. Cartié D.D.R., Dell'Anno G., Poulin E., and Partridge I.K., 3D Reinforcement of Stiffener-to-Skin T-Joints by Z-Pinning and Tufting, *Eng. Fract. Mech.*, **73**, 2532-2540, 2006.
31. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, D 790, 2010.
32. Tong L., Mouritz A.P., and Banninster M.K., *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier, 163-176, 2002.