

Experimental Study on the Bending Behavior of 3D Woven Glass Fiber Sandwich Composite Panels

Abolfazl Mirdehghan¹, Hooshang Nosrati^{1*}, Mahmood M. Shokrieh², and Mehdi Akhbari³

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

2. Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Postal Code 16846-13114, Tehran, Iran

3. Textile Engineering Department, Kashan Branch, Islamic Azad University, Kashan, Iran

Received: 10 April 2020, Accepted: 26 July 2020

Abstract

Three-dimensional integrated woven sandwich composites (IWSCs) consist of two woven fabric faces and an integrated hollow core. The two parallel faces are bonded using pile yarns which keep a defined distance between the top and bottom. In order to characterize the mechanical properties, three-point bending test was performed on the IWSC sandwich composites. The results showed that by increasing the thickness of the composite and therefore increasing the moment of inertia, the flexural strength of the specimens increases. The average amount of bending force increase by increasing the thickness for different samples is equal to 80% to 120%. Also, by increasing the pile density, the flexural strength in hybrid and non-hybrid specimens increases. Therefore, the maximum flexural load is obtained from the composites with the highest thickness and pile density. On the other hand, due to the different arrangement of piles in the warp and weft directions, IWSC panels show different behavior in these two directions. The values of flexural strength in the direction of the warp are higher than the direction of the weft due to the higher density of pile yarns and therefore the higher shear strength of the structure in this direction. In different composites, this difference is 75% to 90%. The fracture properties of the composite under bending load show that due to the high strength and modulus of the face-sheets compared to the core section, the piles are more deformed and damaged and the face-sheets are not noticeably damaged. Also, the damage to the top face sheets of samples tested in the weft direction is greater than that of warp direction.

Keywords: sandwich composites, three-dimensional woven glass fabric, three-point bending test, bending strength, carpet weaving machine

(*) To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hnosrati@aut.ac.ir

بررسی تجربی رفتار خمشی کامپوزیت‌های پلیمری ساندویچی تقویت‌شده با پارچه سه‌بعدی بافته‌شده با الیاف شیشه

سید ابوالفضل میردهقان اشکذری^۱، هوشنگ نصرتی^{۱*}، محمود مهرداد شکریه^۲، مهدی اخباری^۳

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

۳- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان، دانشکده مهندسی نساجی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

چکیده

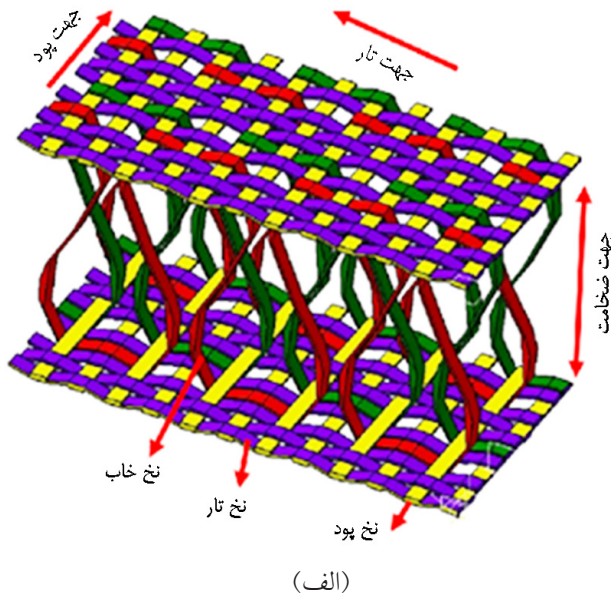
شکست کامپوزیت در اثر بار خمشی نشان می‌دهد، به دلیل استحکام و مدول زیاد صفحه‌های جانبی نسبت به خاب‌ها، تغییر شکل و آسیب بیشتری به آن‌ها وارد شده و به صفحه‌های جانبی آسیب‌چندانی وارد نمی‌شود. آسیب وارد شده به صفحه بالایی در نمونه‌های آزمون‌شده در راستای پود بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های ساندویچی، پارچه سه‌بعدی، خمش سه‌نقطه‌ای، استحکام خمشی، الیاف شیشه

۱ مقدمه

اغلب کامپوزیت‌ها با قراردادن لایه‌هایی از پارچه روی هم و متصل کردن آن‌ها به صورت یک ساختار صلب تولید می‌شوند. این لایه‌ها ممکن است از پارچه‌ها و لایه‌های الیافی تشکیل شوند که در جهت‌های مختلف آرایش یافته‌اند. ضعف کامپوزیت‌های چندلایه، استحکام ضربه‌ای کم و خواص مکانیکی ضعیف آن‌ها پس از ضربه است. به طوری که در اثر برخورد پرتابه‌هایی با سرعت کم، این ساختارها دچار جدایش لایه‌ها (delamination) می‌شوند. برای جلوگیری از این پدیده لازم است تا این پارچه‌ها در بعد سوم نیز تقویت شوند [۱]. روش‌های مختلفی برای تولید ساختارهای الیافی

کامپوزیت‌های ساندویچی بافته‌شده یک‌پارچه (IWSC) یا تقویت‌شده با پارچه سه‌بعدی بافته‌شده، شامل دو پارچه بافته‌شده در صفحه‌های بالا و پایین و یک هسته توخالی و ناپیوسته هستند. صفحه‌های جانبی به وسیله خاب‌ها، که در واقع نقش ایجاد ضخامت را برعهده دارند، به یکدیگر متصل شده‌اند. در این مطالعه، به منظور مشخصه‌یابی خواص مکانیکی، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی کامپوزیت‌های IWSC انجام شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد، با ازدیاد ضخامت کامپوزیت و در نتیجه افزایش ممان اینرسی سازه، استحکام خمشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. متوسط مقدار افزایش نیروی خمشی با ازدیاد ضخامت برای نمونه‌های مختلف، معادل ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ است. همچنین با افزایش تراکم خاب، استحکام خمشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، حداکثر بار خمشی از کامپوزیت‌هایی با بیشترین ضخامت و تراکم خاب به دست می‌آید. از سوی دیگر، به دلیل آرایش متفاوت خاب در دو راستای تار و پود، کامپوزیت‌های IWSC رفتار متفاوتی در این دو راستا نشان می‌دهند. مقادیر استحکام خمشی در راستای تار نسبت به راستای پود به دلیل تراکم بیشتر خاب‌ها و استحکام برشی زیادتر سازه در این راستا، افزون‌تر است. در کامپوزیت‌های مختلف این اختلاف ۷۵٪ تا ۹۰٪ است. ویژگی‌های



(الف)



(ب)

شکل ۱- کامپوزیت سه‌بعدی IWSC: (الف) نمای نمونه‌ای از ساختار بافت پارچه سه‌بعدی و (ب) مقطع نمونه کامپوزیت تولیدشده در این مطالعه در راستای تار.

به‌طور کامل متفاوت بوده و برای شناخت این مواد نیاز به آزمون‌ها و روش‌های جدید است [۱۴]. پژوهشگران به‌منظور مشخصه‌یابی خواص مکانیکی، آزمون‌های مختلف از جمله بررسی خواص خمشی روی کامپوزیت‌های ساندویچی تولیدی از پارچه‌های سه‌بعدی الیاف شیشه انجام داده‌اند که در ادامه کامپوزیت‌های ساندویچی بافته‌شده یک‌پارچه (IWSC) نامیده می‌شوند.

Judawisastra و همکاران [۱۵] رفتار خستگی در خمش و توسعه خرابی را در سازه‌های ساندویچی الیاف سه‌بعدی شیشه بررسی کردند که در فضاهای خالی هسته آن‌ها، اسفنج پلی‌یورتان وارد شده یا بدون اسفنج بودند. آن‌ها خواص هسته و استحکام خمشی آن را نیز با آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای به‌دست آوردند و به توصیف نمودارهای حاصل از خرابی نمونه‌ها در حین آزمون پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر رفتار بهتر سازه‌های دارای اسفنج بود.

سه‌بعدی به‌عنوان پیش‌شکل برای کامپوزیت‌ها وجود دارد. شیوه تولید با نوع مصرف نهایی کامپوزیت تعیین می‌شود [۲]. اغلب سازه‌های سه‌بعدی می‌توانند بدون آماده‌سازی خاص یا با اندک آماده‌سازی با ماشین‌های بافندگی معمولی تولید شوند [۳،۴]. مزیت پارچه‌های با ابعاد ضخامت درخور توجه، یک‌پارچگی ساختار بافت و دست‌یابی به اشکال هندسی و حجم‌هایی است که برای بسیاری از کاربردها مورد نیاز هستند [۵]. در مقایسه با روش‌های معمول تولید پارچه، راه منطقی تولید پارچه‌های پیش‌ساخته با شکل نهایی است تا پس از بافت نیازی به اصلاح و ترمیم نباشد. این موضوع به کاهش ضایعات مواد نیز منجر می‌شود [۶].

در همین راستا و به‌منظور حذف عیب جدایش رویه از هسته در کامپوزیت‌های ساندویچی متداول، دستگاه اصلاح‌شده بافت فرش ماشینی به‌منظور تولید پارچه‌های سه‌بعدی از الیاف شیشه ابداع شده است [۷]. کامپوزیت‌های ساندویچی تولیدشده با این نوع پارچه‌ها که به اختصار در بعضی از مقالات (IWSC) نامیده می‌شوند، شامل دو پارچه بافته‌شده در صفحه‌های بالا و پایین و یک هسته توخالی و ناپیوسته مطابق شکل ۱ هستند. صفحه‌های جانبی به‌کمک خاب‌ها (piles)، که در واقع نقش ایجاد ضخامت را برعهده دارند، به یکدیگر متصل شده‌اند [۸-۱۰].

پژوهشگران دانشگاه‌های Leuven بلژیک و Stuttgart آلمان ایده اولیه به‌کارگیری پارچه‌های سه‌بعدی در تولید کامپوزیت‌های ساندویچی را بررسی کرده‌اند [۱۱،۱۲]. مزایای این نوع سازه‌های ساندویچی به شرح زیر است:

۱- صفحه‌های ساندویچی در یک مرحله تولید می‌شوند، بنابراین در زمان و هزینه تولید صرفه‌جویی می‌شود.

۲- صفحه‌های بالا و پایین به‌طور یک‌پارچه با خاب‌ها به‌هم متصل می‌شوند، از این رو عیب جدایش رویه از هسته متفی است.

۳- بخش توخالی هسته می‌تواند با مواد مختلف پر شده یا به‌عنوان مسیر عبور جریان برق و قرارگیری تجهیزات فنی استفاده شود [۱۰]. این سازه قابلیت تأمین استحکام زیاد، وزن سبک، عایق گرمایی و خواص جذب صدا را دارد و در صنایع دریایی، ساختمان، نظامی و غیره به‌کار گرفته می‌شود [۹،۱۳].

اغلب مواد متداول مهندسی همگن و همسانگرد (isotropic) هستند، در حالی که مواد کامپوزیتی معمولاً ناهمگن و ناهمسانگرد هستند. در نتیجه، رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی از بیشتر مواد رایج مهندسی بسیار پیچیده‌تر است. اگرچه برخی از خواص مواد کامپوزیتی را می‌توان با اندکی اصلاح مطابق با روش‌های اندازه‌گیری رفتار مواد معمول به‌دست آورد، ولی سایر خواص آن‌ها

خواص خمشی در دمای نیتروژن مایع نسبت به دمای محیط، بهبود درخور توجهی یافته است. Kus و همکاران [۲۲] به بررسی اثر دما و نوع رزین بر خواص خمشی کامپوزیت‌های IWSC پرداختند. آن‌ها بیان کردند، با کاهش دما، مدول و میزان شکنندگی کامپوزیت افزایش می‌یابد. همچنین، خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها با رزین اپوکسی در مقایسه با رزین پلی‌استر در کلیه دماها بهتر است. در همین زمینه، برخی از پژوهشگران به بررسی تجربی و نظری خواص این ساختار از سایر جنبه‌ها نیز پرداخته‌اند [۲۳-۲۵]. در این مطالعه، به منظور مشخصه‌یابی خواص مکانیکی، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی کامپوزیت‌های IWSC انجام شد. در این راستا، با هدف بررسی هم‌زمان اثر ضخامت کامپوزیت و تراکم خاب‌ها بر رفتار خمشی نمونه‌ها، پارچه‌های سه‌بعدی با دو طول خاب مختلف و سه تراکم خاب متفاوت تولید شد و سایر پارامترهای بافت ثابت و بدون تغییر باقی ماند.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و روش‌ها

۲-۱-۱ تولید پارچه‌های سه‌بعدی

ماشین بافندگی فرش به سازوکارهای تشکیل دهنه برای ایجاد دو دهنه جداگانه مجهز است. هریک از این دو دهنه با سامانه پودگذاری مجزا بافته می‌شود و دو سطح اصلی فرش را به وجود می‌آورد. نخ تار ایجادکننده خاب میان دو دهنه با نخ‌های پود بافته می‌شود. بدین ترتیب، دو فرش به هم متصل با نخ‌های خاب، بافته می‌شود و پیش از پیچیده‌شدن روی غلتک برداشت با تیغه نوسان‌کننده، نخ‌های خاب از وسط بریده شده و دو سطح فرش از یکدیگر جدا می‌شوند. سپس، هر یک از فرش‌ها روی غلتک مجزا پیچیده می‌شود. شکل ۲ نمایی از دستگاه فرش ماشینی را نشان می‌دهد [۲۶].

به منظور ایجاد امکان بافت الیاف شیشه به صورت سه‌بعدی با توجه به ساختار پارچه سه‌بعدی شیشه، افزون بر تغییرات در سازوکار بافندگی فرش، لازم است تا تیغه نوسان‌کننده حذف و غلتک‌های برداشت نیز از سامانه خارج و تغییر شکل یابند. شکل ۳-الف تصویر مقطع بافت پارچه بافته‌شده در این مطالعه پیش از آغشته‌سازی به رزین و شکل ۳-ب نمایی از پارچه سه‌بعدی شیشه را نشان می‌دهد.

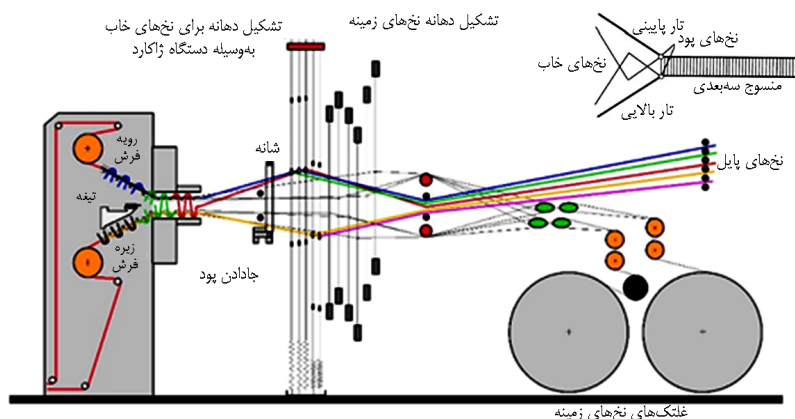
در این مطالعه، نمونه‌های پارچه‌های سه‌بعدی با دو ارتفاع خاب

Bannister و همکاران [۱۶] در پژوهشی به بررسی خواص خمشی کامپوزیت‌های ساندویچی IWSC تولیدشده با رزین وینیل استر پرداختند. در هسته تعدادی از نمونه‌ها اسفنج پلی‌یورتان تزریق شد و با نمونه‌های بدون اسفنج ساخته‌شده و کامپوزیت‌های ساندویچی معمولی مقایسه شدند که از پیش با اسفنج تهیه شده و در دو طرف آن‌ها دولایه پارچه چسبانده شده بود. در این نمونه‌ها، به علت آنکه اسفنج از کمناش خاب‌ها و فروپاشی آن‌ها تحت بارهای برشی جلوگیری می‌کند، خواص خمشی بهبود می‌یابد.

Corigliano و همکاران [۱۷] به مطالعه تجربی و عددی خواص فشاری و خمشی کامپوزیت‌های ساندویچی IWSC با هسته ترکیبی الیاف شیشه و اسفنج پرداختند. آن‌ها به تأثیر چشمگیر تزریق اسفنج بر خواص مکانیکی سازه اشاره و بیان کردند، در صورتی که با مدل اجزای محدود بتوان پیچیدگی‌های بیشتری از ساختار را در نظر گرفت، مدل دقیق‌تری است. Li و همکاران [۱۸] چند نمونه از کامپوزیت IWSC را طراحی و برخی از رفتارهای مکانیکی آن‌ها را به طور تجربی مطالعه کردند. نتایج حاصل از آزمون‌ها بیانگر نقش تعیین‌کننده نخ خاب در خواص برشی و فشاری کامپوزیت‌ها بود. اما، وابستگی رفتار خمشی و کششی کامپوزیت به خواص رویه‌ها بیش از مغزه (نخ‌های خاب) بود، به گونه‌ای که علت شکست ناشی از اعمال این دو نیرو، چین‌خوردگی سطح کامپوزیت اعلام شد. همچنین، تغییرات ارتفاع خاب و تراکم آن نیز اثر درخور توجهی بر خواص نهایی کامپوزیت نشان داد.

صدیقی و حسینی [۱۹] در پژوهش خود به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های IWSC پرداختند. آن‌ها نشان دادند، در بارگذاری خمشی با افزایش ضخامت ساندویچ، سفتی خمشی و بار تسلیم سازه افزایش می‌یابد. جهت تار، سفتی خمشی بیشتری نسبت به جهت پود نشان می‌دهد. آن‌ها در نهایت، با شبیه‌سازی ساختار کامپوزیت در نرم‌افزار آباکوس (Abaqus)، نتایج آزمایش‌های مکانیکی را با نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود مقایسه کردند.

Fan و همکاران [۲۰] آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای را به منظور به دست آوردن سازوکار شکست کامپوزیت‌های IWSC انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را روی ۱۶ نمونه مختلف با آرایش متفاوت خاب‌ها و ضخامت‌های مختلف انجام دادند. نتایج خمش در راستای پود نشان داد، استحکام نمونه‌ها به دلیل تراکم بیشتر، از راستای تار افزون‌تر است. Li و همکاران [۲۱] به بررسی خواص خمشی کامپوزیت‌های IWSC با ضخامت‌های مختلف در دمای محیط و در نیتروژن مایع (-196°C) پرداختند. نتایج نشان داد،



شکل ۲- نحوه تولید فرش در یک دستگاه فرش ماشینی [۱۶،۲۶].

با نسبت وزنی ۱۰۰ g به ۱۵ g با روش لایه‌گذاری دستی آغشته شدند. بدین صورت که ابتدا سطح قالب با ماده رهاساز آغشته و حدود ۴۰٪ از کل رزین اپوکسی استفاده‌شده روی سطح به‌طور یکنواخت توزیع شد. سپس، پارچه روی قالب آغشته به رزین پهن و سطح آن به آرامی و به‌طور یکنواخت غلتک‌کاری شد تا خاب‌ها در اثر نیروهای موئینگی شروع به جذب رزین از سطح زیرین کنند. پس از آن، ۶۰٪ باقی‌مانده رزین روی پارچه ریخته شد و فرایند غلتک‌زنی ادامه یافت تا رزین کاملاً در پارچه نفوذ کند و با جذب رزین به‌وسیله خاب‌ها و هم‌زمان با فرایند پخت کامپوزیت به ارتفاع مدنظر برسد. شکل ۴ تصاویر نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد.

پس از آغشته‌سازی و پخت اولیه، برای دستیابی به بهترین نتیجه، نمونه‌ها به‌مدت یک هفته در دمای محیط قرار گرفتند تا فرایند پخت تکمیلی انجام شود. کسر وزنی رزین در کامپوزیت تولیدی تقریباً معادل ۵۵٪ در نظر گرفته شد. به کنترل دمای محیط و گرانی رزین توجه ویژه‌ای شد تا از نفوذ یکنواخت رزین در پارچه سه‌بعدی اطمینان حاصل شود. در جدول‌های ۱ و ۲، خواص مکانیکی رزین و الیاف ارائه‌شده توسط تولیدکنندگان، آمده است. برای بررسی اثر ضخامت کامپوزیت و تراکم خاب بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مزبور، نمونه‌ها در دو ضخامت مختلف (H1 و H2) و سه تراکم خاب متفاوت (D1، D2 و D3) تولید شدند و تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. مشخصات نمونه کامپوزیت‌های تولیدشده در جدول ۳ درج شده است. در این نمونه‌ها، حروف H و D به‌ترتیب معرف ضخامت کامپوزیت و تراکم خاب است.

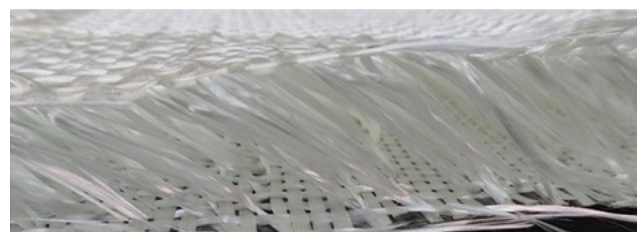
۳-۱-۲ ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای براساس استاندارد ASTM C393-00

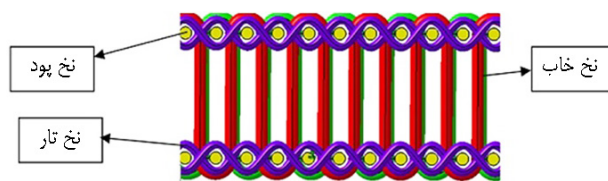
مختلف و سه تراکم خاب متفاوت تولید شدند. سایر پارامترهای بافت ثابت و بدون تغییر باقی ماندند. برای تار، پود و خاب موجود در ساختار بافت از الیاف روینگ شیشه نوع E با چگالی خطی ۶۰۰ tex (شرکت ساینفا فایبر دلجان) استفاده شد. کلیه نمونه‌ها در شرکت نوآوران صنعت سیلک تهیه و تولید شدند.

۲-۱-۲ تولید کامپوزیت

در این مطالعه، پارچه‌های سه‌بعدی بافته‌شده از الیاف شیشه در اغلب موارد با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی (hand layup) به کامپوزیت نهایی مدنظر تبدیل شده‌اند. همچنین، رزین‌های گرماسخت از قبیل پلی‌استر و اپوکسی بیشتر استفاده شده‌اند. برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی مدنظر، پارچه‌ها به رزین اپوکسی ML-506 و سخت‌کننده HA-11 (hardener)، ساخت گروه صنعتی مکرر

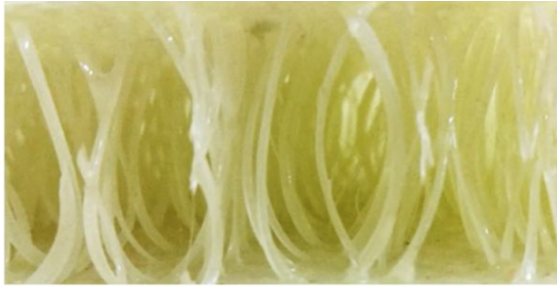


(الف)

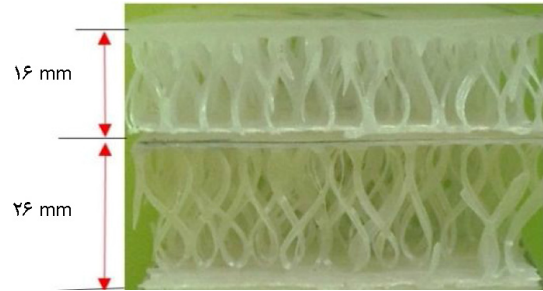


(ب)

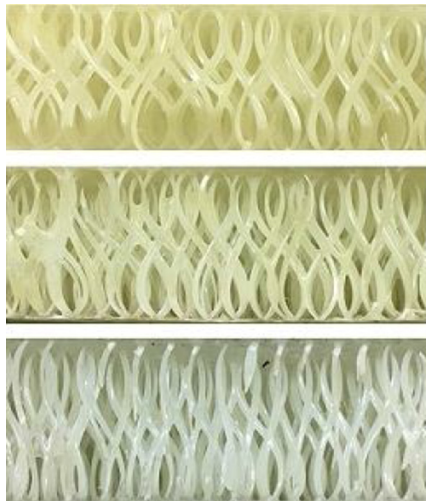
شکل ۳- پارچه سه‌بعدی: (الف) نمونه بافته‌شده پیش از آغشته‌سازی به رزین، (ب) نمایی از مقطع پارچه بافته‌شده.



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۴- تصویر مقطع کامپوزیت‌های تولیدی: (الف) با دو ضخامت مختلف در راستای تار، (ب) در راستای پود، (پ) دیواره‌های ساندویچی تولیدی و (ت) نمونه‌های کامپوزیت تولیدی با تراکم‌های خاب مختلف.

[۲۷] روی نمونه‌ها انجام شد. مطابق با این استاندارد، نمونه‌ها به ابعاد $180 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ آماده‌سازی شدند. روش‌های مختلفی برای برش نمونه‌های کامپوزیتی وجود دارد. در این مطالعه، نمونه‌ها به ابعاد یادشده با دستگاه برش جت آب مطابق با تصویر ۵-الف بریده شدند. با توجه به ضخامت متفاوت نمونه‌های مختلف و اثر طول سنجش (gauge length) بر رفتار خمشی نمونه‌ها، فاصله بین دو تکیه‌گاه برای همه نمونه‌ها معادل 13 cm در نظر گرفته شد. دستگاه آزمایش یونیورسال سنتام مدل STM ۱۵۰ با ظرفیت سلول بار 200 kg استفاده شد. سرعت آزمون (نرخ بارگذاری) مطابق با استاندارد، 1 mm/min انتخاب شد. هندسه آزمون خمش

جدول ۱- خواص مکانیکی رزین اپوکسی ML-506.

استاندارد ASTM	مقدار	ویژگی
D695M	۹۷۴	استحکام فشاری (kgf/cm^2)
D695M	۹۳۷۱	مدول فشاری (kgf/cm^2)
D790M	۹۶۰	استحکام خمشی (kgf/cm^2)
D790M	۳۶۴۵۴	مدول خمشی (kgf/cm^2)
D638M	۷۶۱	استحکام کششی (kgf/cm^2)
D638M	۲۷۸۹۰	مدول کششی (kgf/cm^2)
D2240	۸۲	سختی (Shore D)
D256	۷/۸۵۰	استحکام ضربه‌ای (kJ/m^2)

جدول ۲- خواص مکانیکی الیاف شیشه.

σ_u (MPa)	ν_{12}^f	G_{32}^f (GPa)	G_{12}^f (GPa)	E_{22}^f (GPa)	E_{11}^f (GPa)	نوع الیاف
۱۵۰۰	۰/۳	۲۷/۷	۲۷/۷	۷۲	۷۲	الیاف شیشه نوع E

جدول ۳- مشخصات کامپوزیت‌های ساخته‌شده.

کد نمونه	نمره نخ (tex)		طول خاب (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)	تراکم (cm ⁻¹)		وزن واحد سطح (kg/m ²)	
	خاب	تار و پود			پود	تار	پارچه	کامپوزیت
H1D1	۶۰۳	۶۰۳	۲۰	۱۶	۳	۳/۲	۱/۲۳	۲/۷۵
H1D2	۶۰۳	۶۰۳	۲۰	۱۶	۴	۳/۲	۱/۴۵	۳/۲۳
H1D3	۶۰۳	۶۰۳	۲۰	۱۶	۵	۳/۲	۱/۷۱	۳/۷۸
H2D1	۶۰۳	۶۰۳	۳۰	۲۶	۳	۳/۲	۱/۴۸	۳/۲۹
H2D2	۶۰۳	۶۰۳	۳۰	۲۶	۴	۳/۲	۱/۶۳	۳/۶۳
H2D3	۶۰۳	۶۰۳	۳۰	۲۶	۵	۳/۲	۱/۸۹	۴/۱۸

نمونه‌ها در دو راستای تار و پود به تفکیک در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودارها مشخص است، روند منحنی‌های نیرو-خیز نمونه‌ها، ابتدا به‌طور کشسان و خطی آغاز و پس از رسیدن به نقطه بیشینه، وارد ناحیه غیرخطی می‌شود و نیرو کاهش می‌یابد. برخلاف نمودارهای مربوط به آزمون نمونه‌ها در راستای تار، در نمودارهای مربوط به راستای پود، کاهش نیرو پس از رسیدن به نیروی بیشینه، شدت کمتری دارد و منحنی وارد ناحیه نسبتاً صافی می‌شود که مقدار نیرو تقریباً ثابت است و سپس دچار کاهش می‌شود.

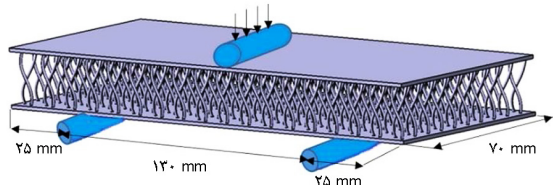
همان‌گونه که از نمودارها مشخص است، شیب نمودارهای نیرو-جابجایی در راستای تار در تمام نمونه‌ها نسبت به راستای پود

در شکل ۵-ب رسم شده است. به دلیل رفتار متفاوت کامپوزیت در دو راستای تار و پود، آزمون در هر دو راستا روی نمونه‌ها به تعداد ۵ بار انجام شد. دستگاه به‌کاررفته برای آزمون خمش و نمایی از قرارگیری نمونه‌های آزمون در شکل ۵-پ تا ث نشان داده شده است.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ آزمون خمش

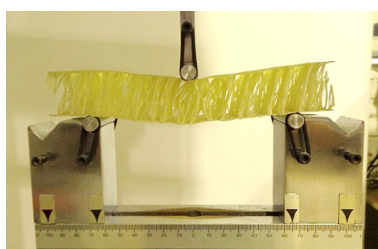
نمودارهای نیرو-خیز به‌دست‌آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای



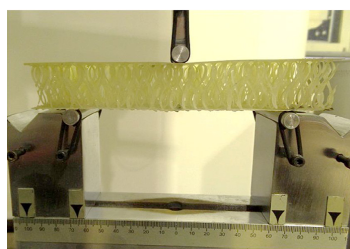
(ب)



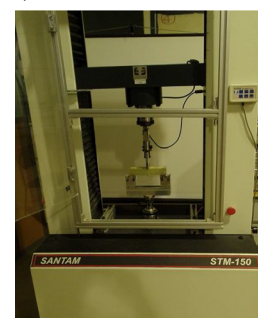
(الف)



(ث)

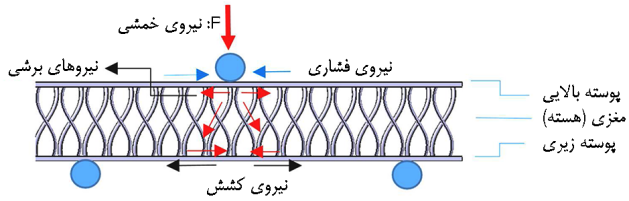


(ت)



(پ)

شکل ۵- (الف) برش نمونه‌ها با دستگاه جت آب، (ب) هندسه بارگذاری در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، (پ) دستگاه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، (ت) نحوه قرارگیری نمونه‌ها در راستای تار و (ث) نحوه قرارگیری نمونه‌ها در راستای پود.



شکل ۷- نمایی از نیروهای وارد شده به سازه IWSC در آزمون خمش سه نقطه‌ای.

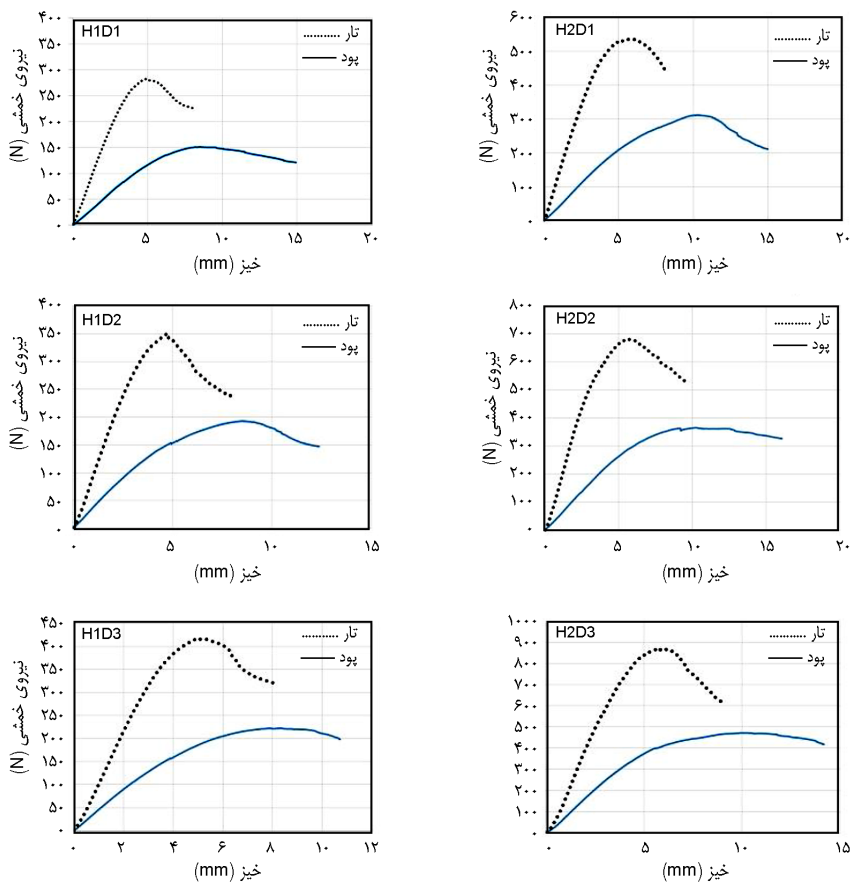
نیرو در هر مرحله از بارگذاری در آزمون خمش، به دلیل خاصیت کشسانی خاب‌ها و رفتار کشسانی-پلاستیک آن‌ها، سازه تمایل دارد تا به شکل اولیه آن بازگردد.

۲-۳ رفتار سازه در راستای تار و پود

با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۸ می‌توان دریافت، رفتار کلی منحنی نیرو-خیز کلیه نمونه‌ها در راستای تار تقریباً مشابه است. این روند درباره نمودارها در راستای پود نیز صادق است. نمودارها نشان می‌دهند، مقدار نیرو در راستای تار در همه نمونه‌ها نسبت به راستای پود زیادتر است. در کامپوزیت‌های مختلف،

بیشتر است. همچنین، کاهش نیرو پس از رسیدن به نقطه بیشینه در راستای تار به مراتب سریع‌تر از راستای پود اتفاق می‌افتد. رفتار سازه ساندویچی IWSC تحت بار خمشی مطابق شکل ۷ به استحکام فشاری و کششی صفحه‌های بالا و پایین و استحکام برشی و فشاری هسته بستگی دارد [۱۰].

در ناحیه کشسانی، نیرو به‌طور خطی افزایش می‌یابد و هیچ‌گونه تخریبی در سازه اتفاق نمی‌افتد. در این حالت، خاب‌ها شکل کلی را حفظ می‌کنند و تغییر شکلی در آن‌ها ایجاد نمی‌شود. در ناحیه دوم، کاهش بار ناشی از تغییر شکل خاب در اثر نیروی برشی اعمال شده بر بخش هسته و نیروی فشاری وارد شده به آن است. این ناحیه، نشانگر آغاز و توسعه تخریب در نمونه بوده و سهم این ناحیه در نمودارهای حاصل از آزمون در راستای تار و پود متفاوت است. در ناحیه سوم نمودار، خاب‌ها وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک شده و به شکل کاملاً خمیده ظاهر می‌شوند. از این رو، آسیب بیشتری به خاب‌ها وارد می‌شود. در این حالت، خاب‌ها دیگر صفحه بالایی را پشتیبانی نمی‌کنند و با تضعیف سطح اتکا، صفحه فوقانی دچار آسیب می‌شود و نیرو کاهش می‌یابد. با حذف



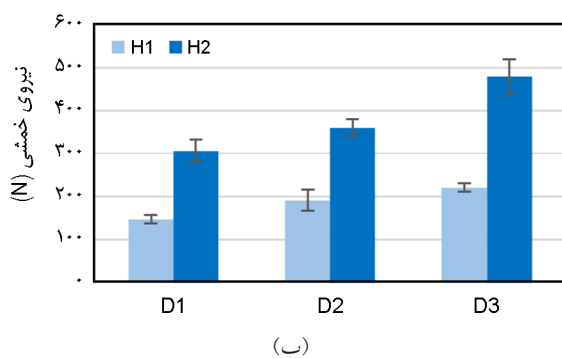
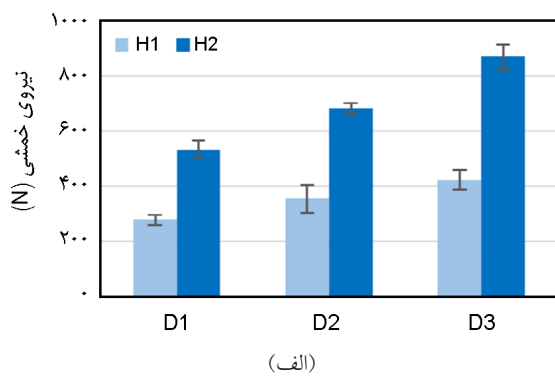
شکل ۶- مقایسه نمودار نیرو-خیز نمونه‌ها در آزمون خمش سه نقطه‌ای در دو راستای تار و پود.

مثال، Karahan و همکاران [۱۰] در نمونه‌های بدون اسفنج و با تزریق اسفنج به اختلاف بین ۶۴٪ تا ۱۲۸٪ دست یافتند. Li و همکاران [۱۸] اختلاف ۵۰٪ تا ۱۴۵٪ و حسینی و صدیقی [۱۹] نیز اختلاف ۷۰٪ را گزارش کردند.

اصولاً این ویژگی و تفاوت در اندازه نیروی خمشی در دو راستای مختلف یک سازه سبب می‌شود تا در زمان استفاده از کامپوزیت در صنایع مختلف، توجه به راستای قرارگیری آن با در نظر گرفتن بارهای اعمالی، یکی از دغدغه‌ها باشد. به عبارتی دیگر، راستای سازه با استحکام بیشتر باید در معرض بارهای بزرگ‌تر قرار گیرد و برعکس.

۳-۳ اثر ضخامت کامپوزیت بر رفتار خمشی

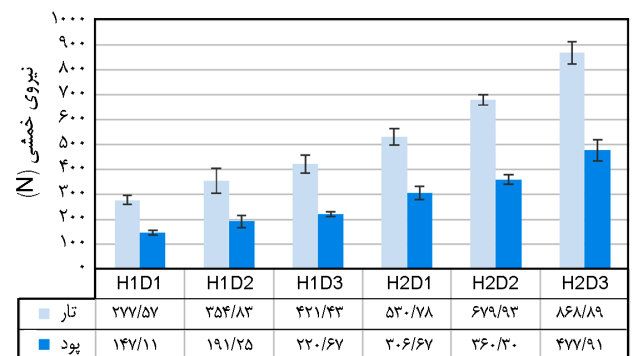
همان‌گونه که بیان شد، به منظور بررسی اثر ضخامت کامپوزیت بر خواص خمشی، کامپوزیت‌های IWSC در دو ضخامت مختلف تولید شدند. شکل ۹ مقایسه نیروی خمشی در کامپوزیت‌های تولیدشده با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با ازدیاد ضخامت، نیروی بیشینه و در نتیجه استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد که با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد [۱۰، ۲۱].



شکل ۹- مقایسه اثر ضخامت سازه (H2 و H1) بر نیروی خمشی کامپوزیت‌ها به تفکیک راستای: (الف) تار و (ب) پود.

این اختلاف رفتار ۷۵٪ تا ۹۰٪ است که ناشی از آرایش متفاوت قرارگیری خاب‌ها در هسته کامپوزیت در این دو راستاست. زمانی که از مقطع کامپوزیت به آن نگاه شود، در راستای تار به صورت "8" و در راستای پود به شکل "()" دیده می‌شود. علت قرارگیری خاب به فرم خمیده در هر دو راستا را می‌توان با توجه به فرایند تولید این سازه توضیح داد. پس از آنکه پارچه بافته‌شده به رزین آغشته می‌شود، رزین در خاب‌ها با خاصیت موینگی نفوذ می‌کند. پس از نفوذ رزین، صفحه بالایی آغاز به جدایش از صفحه پایینی می‌کند و خاب‌ها متناسب با طول از پیش معین به سازه ضخامت می‌دهند. در این حالت، وزن پارچه در لایه بالایی کامپوزیت که به رزین نیز آغشته شده است، بر خاب‌ها فشار وارد می‌آورد، آن‌ها را از حالت مستقیم که در مرحله بافت آرایش یافته بودند، خارج می‌کند و به فرم خمیده درمی‌آورد. این نوع آرایش سبب بروز خواص مکانیکی متفاوت این سازه در دو راستای تار و پود می‌شود. پژوهشگران در سایر مقالات نیز به این رفتار خاص سازه اشاره کرده‌اند. لازم به ذکر است، در روش کنونی بافت، تغییر این آرایش به دلیل محدودیت‌های مختلف امکان‌پذیر نیست [۱۸، ۱۹].

دلیل بیشتر بودن نیروی خمشی در راستای تار نسبت به راستای پود ناشی از دو عامل است. مهم‌ترین دلیل آن، فاصله کمتر بین نخ‌های خاب در راستای تار نسبت به راستای پود و در نتیجه بیشتر بودن تراکم در این راستاست. از سوی دیگر، زمانی که سازه تحت خمش قرار می‌گیرد و نیروی برشی به خاب وارد می‌شود، این نیرو در راستای تار در حالی وارد می‌شود که ریشه خاب در صفحه‌های بالا و پایین درگیر است. از این رو، به دلیل قرارگیری آن در راستای نیروی برشی، به مشارکت در تحمل نیرو و در نتیجه استحکام بیشتر سازه کمک می‌کند. خواص متفاوت در دو راستای مختلف سازه، از نقاط ضعف کامپوزیت‌های یادشده بوده که در تحقیقات سایر پژوهشگران به این موضوع اشاره شده است. به عنوان



شکل ۸- مقایسه استحکام خمشی نمونه‌ها در دو راستای تار و پود.

استحکام و مدول زیاد برای رویه‌ها استفاده می‌شود. هسته ساندویچ‌های مزبور از مواد با چگالی کم و در نتیجه مدول و استحکام کم تشکیل شده است. بدین منظور، اغلب نمودارهای مختلفی برای انتخاب جنس، خواص مکانیکی و قیمت تمام‌شده اجزای یک سازه ساندویچی ارائه شده است.

شکل ۱۰ مقایسه ارتباط نیروی خمشی سازه‌های IWSC با تراکم خاب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با ازدیاد تراکم خاب، استحکام خمشی افزایش می‌یابد. در این زمینه نتایج مشابهی توسط Li و همکاران [۱۸] ارائه شده است.

از مقایسه نتایج این بخش با بخش قبلی می‌توان نتیجه گرفت، حداکثر بار خمشی از کامپوزیت‌هایی با بیشترین ضخامت و تراکم خاب به دست می‌آید. بنابراین در نمونه‌های استفاده‌شده در آزمون خمش، نمونه H2D3، دارای بیشترین مقدار استحکام در میان سایر نمونه‌هاست. بدین ترتیب، کمترین مقدار استحکام نیز در نمونه HID1 مشاهده شد که دارای کمترین ضخامت و تراکم است. تحلیل‌های آماری مؤید نتایج بیان‌شده در این بخش است.

۳-۵ آسیب واردشده به سازه‌های ساندویچی در آزمون خمش

نوع و شکل تخریب ایجادشده در نمونه‌های مختلف در آزمون خمش، مشابه با تصویر نشان‌داده‌شده در شکل ۱۱ است. از آنجا که مدول فشاری هسته در مقایسه با مدول و استحکام کششی صفحه بالایی کمتر است [۱۹، ۲۱]، آسیب واردشده به کامپوزیت، باعث تغییر شکل و شکست خاب‌ها در زیر نقطه اعمال بار می‌شود و صفحه بالایی کامپوزیت آسیب کمتری می‌بیند. آسیب به رویه بالایی زمانی ایجاد می‌شود که خاب‌ها کاملاً دچار تغییر شکل شوند و در نتیجه سطح اتکای رویه تضعیف می‌شود. در این حالت، ناحیه آسیب محدود به فضای ایجادشده میان نقاط اتصال خاب به صفحه بالایی است. با توجه به شکل می‌توان دریافت، ناحیه آسیب ایجادشده در صفحه بالایی در راستای پود بزرگ‌تر از راستای تار است. این مسئله ناشی از فاصله زیادتر خاب‌ها در راستای پود و در نتیجه تراکم کمتر نسبت به راستای تار است.

۴ نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به استفاده از پارچه‌های سه‌بعدی برای تقویت کامپوزیت‌ها شده است. در این پژوهش، کامپوزیت‌های ساندویچی تولیدی با پارچه سه‌بعدی (فاصله‌گذار) بافته‌شده با

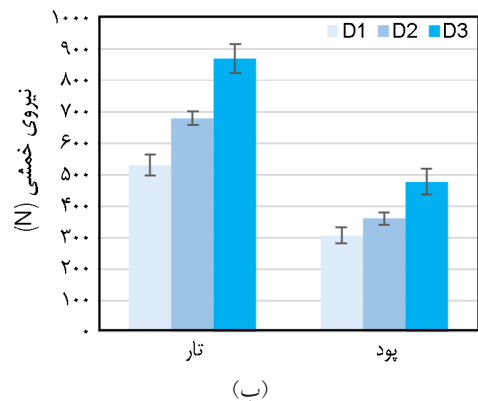
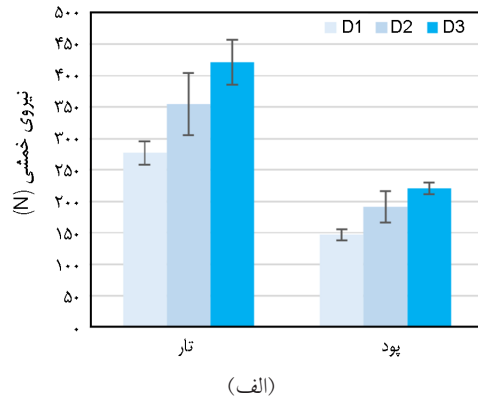
دلیل افزایش نیرو و شیب نمودار در ناحیه کشسانی، ازدیاد ممان اینرسی سازه با افزایش ضخامت است. در سازه‌های ساندویچی متداول، سفتی خمشی کل سازه متناسب با ممان اینرسی هسته بوده و طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} \quad (1)$$

که در آن، b عرض و h_c ضخامت مغزی (هسته) است. همان‌گونه که از این معادله مشخص است، ممان مقطع با توان سوم ضخامت در سازه‌های ساندویچی افزایش می‌یابد. در کامپوزیت IWSC نیز با ازدیاد ضخامت، ممان مقطع و در نتیجه نیروی خمشی کامپوزیت افزایش یافته است. متوسط مقدار افزایش نیروی خمشی با ازدیاد ضخامت برای نمونه‌های مختلف شیشه، معادل ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ است.

۳-۴ اثر تراکم خاب بر رفتار خمشی

یکی از نکات مورد توجه در سازه‌های ساندویچی متداول، انتخاب جنس مواد در هسته و رویه‌هاست. در این سازه‌ها برای سبکی و وزن کمتر، اغلب از مواد با چگالی زیاد و در نتیجه



شکل ۱۰- بررسی اثر تراکم خاب بر استحکام خمشی در دو راستای تار و پود کامپوزیت‌ها در ضخامت‌های: (الف) H1 و (ب) H2.



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۱- نمایی از آسیب ایجادشده در نمونه در آزمون خمش به: (الف) رویه بالایی در راستای تار، (ب) رویه بالایی در راستای پود، (پ) خابها در راستای تار و (ت) خابها در راستای پود.

- با افزایش تراکم خاب، استحکام خمشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، حداکثر بار خمشی در کامپوزیت‌هایی با بیشترین ضخامت و تراکم خاب به دست می‌آید.

- کامپوزیت‌های IWSC، رفتار متفاوتی در دو راستای تار و پود نشان می‌دهند. مقادیر استحکام خمشی در راستای تار نسبت به راستای پود به دلیل تراکم بیشتر خابها و استحکام برشی افزون‌تر سازه در این راستا، بیشتر است. در کامپوزیت‌های مختلف این اختلاف رفتار ۷۵٪ تا ۹۰٪ است.

- خواص شکست کامپوزیت در اثر بار خمشی نشان می‌دهد، به دلیل استحکام و مدول زیاد صفحه‌های جانبی نسبت به خابها، تغییر شکل و آسیب بیشتری به خابها وارد می‌شود و به صفحه‌های جانبی آسیب چندانی وارد نمی‌شود. آسیب واردشده به صفحه بالایی در نمونه‌های آزمون‌شده در راستای پود زیادتر است.

استفاده از الیاف روینگ شیشه ۶۰۰ tex در دستگاه فرش ماشینی مطالعه شد. این کامپوزیت‌ها از پارچه بافته شده در صفحه‌های بالا و پایین و هسته توخالی و ناپیوسته متشکل از خابها تشکیل شده‌اند که نقش اتصال صفحه‌های جانبی را بر عهده دارند. به منظور بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها، آزمون خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. همچنین، به منظور مطالعه اثر ضخامت کامپوزیت و تراکم خاب بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مزبور، نمونه‌ها در دو ضخامت مختلف و سه تراکم خاب متفاوت تولید شدند. نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داد:

- با ازدیاد ضخامت کامپوزیت و در نتیجه افزایش ممان اینرسی سازه، استحکام خمشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. متوسط مقدار افزایش نیروی خمشی با ازدیاد ضخامت برای نمونه‌های مختلف، معادل ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ است.

مراجع

- [1] L. Tong, *3D Fiber Reinforced Polymer Composites*, Elsevier, 2002.
- [2] X. Chen, L. Taylor, and L. Tsai, "An overview on fabrication of three dimensional woven textile performs for composites", *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 9, pp. 932-944, 2011.
- [3] X. Chen and A.E. Tayyar, "Engineering, manufacture and measurement of 3D domed woven fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 73, pp. 375-380, 2003.
- [4] S. Deemey, "The new generation of carpet weaving machines combines flexibility and productivity", *Technical Notes*, Van de Wiele Incorporations, 2002.

- [5] X. Chen and J. Hearle, "Developments in design, manufacture, and use of 3D woven fabrics", In *Proceedings of TEXCOMP (9th International Conference on Textile Composites)*, University of Delaware, 2008.
- [6] A. Mirvete, *3D Textile Reinforcements in Composite Materials*, Woodhead, 1999.
- [7] S. Wang, M. Li, Z. Zhang, and B. Wu, "Mechanical reinforcement of three-dimensional spacer fabric composites", *Mater. Sci. Forum*, vol. 65, pp. 2604-2607, 2010.
- [8] D.S. Li, C.Q. Zhao, N. Jiang, and L. Jiang, "Experimental study on the charpy impact failure of 3D integrated woven spacer composite at room and liquid nitrogen temperature", *Fiber Polym.*, vol. 16, no. 4, pp. 875-882, 2015.
- [9] D.S. Li, N. Jiang, L. Jiang, and C.Q. Zhao, "Static and dynamic mechanical behavior of 3D integrated woven spacer composites with thickened face sheets", *Fiber Polym.*, vol. 17, no. 3, pp. 460-468, 2016.
- [10] M. Karahan, H. Gul, N. Karahan, and J. Ivens, "Static behavior of three-dimensional integrated core sandwich composites subjected to three-point bending", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, pp. 664-678, 2013.
- [11] I. Verpoest and M. Wevers, "3D-fabrics for compression and impact resistant composite sandwich structure", In *Proceedings of 35th International SAMPE Symposium*, 1990, pp. 296-307.
- [12] K. Drechsler, J. Brandt, and F.J. Arendts, "Integrally woven sandwich structures", In *Developments in the Science and Technology of Composite Materials (Proceedings of ECCM-3)*, A.R. Bunsell, P. Lamicq, and A. Massiah (Eds.), Springer, Dordrecht, 1989, pp. 365-371.
- [13] H.L. Fan, L. Zhao, H.L. Chen, J. Zheng, and Y.J. Jiang, "Dynamic compression failure mechanisms and dynamic effects of integrated woven sandwich composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 4, pp. 427-437, 2014.
- [14] R.M. Jones, *Mechanics of Composites Materials*, 2nd ed., Taylor and Francis, 1999.
- [15] H. Judawisastra, J. Ivens, and I. Verpoest, "The fatigue behavior and damage development of 3D woven sandwich composites", *Compos. Struct.*, vol. 43, pp. 35-45, 1998.
- [16] M.K. Bannister, R. Braemar, and P.J. Crothers, "The mechanical performance of 3D woven sandwich composites", *Compos. Struct.*, vol. 47, pp. 687-690, 1999.
- [17] A. Corigliano, E. Rizzi, and E. Papa, "Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass fiber composite sandwich", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, pp. 2169-2180, 2000.
- [18] M. Li, S. Wang, and W. Zhang, "Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites", *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, pp. 1-14, 2009.
- [19] M. Sadighi and S.A. Hosseini, "Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3d woven glass fiber composite sandwich panels", *Compos. Part B: Eng.*, vol. 55, pp. 158-166, 2013.
- [20] H. Fan, L. Zhao, H. Chen, J. Zheng, and Y. Jiang, "Dynamic compression failure mechanisms and dynamic effects of integrated woven sandwich composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 4, pp. 427-437, 2014.
- [21] D. Li, C. Zhao, L. Jiang, and N. Jiang, "Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature", *Compos. Struct.*, vol. 111, pp. 56-65, 2014.
- [22] A. Kus, I. Durgun, and R. Ertan, "Experimental study on the flexural properties of 3D integrated woven spacer composites at room and subzero temperatures", *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 1-4, 2016.
- [23] H.L. Chen, Q. Zheng, P. Wang, H. Fan, J. Zheng, L. Zhao, and F. Jin, "Dynamic anti-crushing behaviors of woven textile sandwich composites: multilayer and gradient effects", *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 25, pp. 3169-3179, 2015.
- [24] A. Mirdehghan, H. Nosratty, M.M. Shokrieh, and M. Akhbari, "Manufacturing and drop-weight impact properties of three-dimensional integrated woven sandwich composite panels with hybrid core", *J. Ind. Text.*, 2020. doi:10.1177/1528083719896764
- [25] A. Mirdehghan, H. Nosratty, M.M. Shokrieh, R. Ghasemi, and M. Akhbari, "Micro-mechanical modelling of the compression strength of three-dimensional integrated woven sandwich composites", *J. Ind. Text.*, vol. 48, no. 9, pp. 1399-1419, 2019.
- [26] <http://www.vandewiele.com>
- [27] ASTM, Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, Annual Book of ASTM (ASTM C 393-00), vol. 15.03, New York, 2000.
- [28] L.A. Carlsson and G.A. Kardomateas, *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, Springer, 2011.