

بررسی تجربی و عددی مدول برشی کامپوزیت های تقویت شده با منسوج متعامد

سه بعدی

حمیدرضا آقایی^۱، مهدی ورسه ای^{۱*}، سعید آجلی^۲، مهدی کمالی دولت آبادی^۱، محمد اسمعیل یزدانشناس^۳^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی نساجی، تهران، ایران^۲ دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران^۳ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، گروه مهندسی نساجی، یزد، ایران

varsei.m@gmail.com

چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی مدول برشی کامپوزیت زمینه پلیمری است. به همین منظور برای تقویت کامپوزیت از منسوج متعامد سه بعدی استفاده شد. نخ ها در ساختار منسوج تولید شده به روش متعامد دارای تجعد کمتری در مقایسه با سایر روش های تولید پارچه سه بعدی هستند. نمونه های کامپوزیتی در دو نوع مختلف یکی با کسر حجمی بالای الیاف HVF و دیگری با کسر حجمی پایین الیاف LVF با دو نوع رزین اپوکسی و پلی استر با استفاده از روش پمپ خلا تولید و تحت آزمون پیچش قرار گرفتند. در گام بعدی مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس انجام شد. نتایج نشان داد مدول برشی و مقاومت پیچشی کامپوزیت LVF با ماتریس اپوکسی نسبت به پلی استر، به ترتیب به میزان ۷٪ و ۱۱٪ افزایش یافت. مقایسه نتایج شبیه سازی با روش تجربی نشان داد مدول برشی حاصل از مدل سازی دارای خطایی کمتر از ۱۰ درصد نسبت به مدول برشی کامپوزیت ساخته شده بود بنابراین می توان از روش شبیه سازی برای پیش بینی خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده نمود.

کلمات کلیدی: منسوج متعامد سه بعدی، رزین اپوکسی و رزین پلی استر، کامپوزیت، آزمون پیچش، مدل اجزا محدود

Experimental and numerical investigation of shear modulus of composites reinforced with 3D orthogonal fabric

Hamid RezaAghaei¹, Mehdi Varsei^{1*}, saeed Ajeli², Mehdi Kamali Dolatabadi¹, Mohammad smail Yazdanshenas³¹Department of Textile Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran²Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran³Department of Textile Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

varsei.m@gmail.com

Abstract

The purpose of the present research is to investigate the shear modulus of the polymer matrix composite. For this purpose, 3D orthogonal fabric was used to strengthen the composite. Threads in the woven structure produced by the orthogonal method have less wrinkling compared to other 3D fabric production methods. Composite samples in two different types, one with a high volume fraction of HVF fibers and the other with a low volume fraction of LVF fibers, were produced with two types of epoxy resin and polyester using the vacuum pump method and were subjected to torsion testing. In the next step, numerical modeling was done in Abaqus software. The results showed that the shear modulus and torsional strength of LVF composite with epoxy matrix increased by 7% and 11%, respectively. Comparison of the simulation results with the experimental method showed that the shear modulus obtained from the modeling had an error of less than 10% compared to the shear modulus of the composite, so the simulation method can be used to predict the mechanical properties of the composite.

Keywords: 3D orthogonal fabric, epoxy resin and polyester resin, composite, torsion test, finite element model

۱- مقدمه

امروزه استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات در صنایع مختلف نظیر اتومبیل‌سازی، عمرانی، هوافضا و ساختمان‌سازی رشد چشمگیری داشته است [۱-۳]. وزن کم در کنار خواص مکانیکی بالا سبب شده که کامپوزیت‌ها مورد استقبال بسیاری از پژوهشگران و صاحبان صنایع قرار گیرد [۴ و ۵]. منسوجات به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی با روش‌های تار و پودی، حلقوی، قیطان بافی و متعامد تولید می‌شوند. در ابتدا منسوجات مورد استفاده به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت از نوع دو بعدی بوده که به دلیل خواص مکانیکی پایین در راستای ضخامت، استفاده از منسوجات سه‌بعدی پیشنهاد شد. حضور الیاف و نخ در راستای بعد سوم در منسوجات سه‌بعدی سبب افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با این منسوجات نظیر مقاومت و سفتی نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات دو بعدی می‌گردد [۶]. در همین راستا، تحقیقات بسیاری در رابطه با بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات سه‌بعدی انجام شده است. در تحقیقی که توسط ون و^۲ و همکاران [۷] انجام شد، رفتار مکانیکی ساختار کامپوزیت ساندویچی تقویت شده با پارچه تار و پودی سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رفتار

مکانیکی سازه ساندویچی به هندسه منسوج بسیار وابسته است. ژانگ^۳ و همکاران [۸] نشان دادند که کامپوزیت تقویت شده با پارچه سه بعدی تار و پودی قابلیت جذب انرژی بیشتری در برابر بار ضربه‌ای نسبت به کامپوزیت تقویت شده با پارچه تار و پودی دو بعدی دارد. عمرانی و همکاران [۹] به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت سه‌بعدی تقویت شده با پارچه حلقوی پودی پرداختند. ساختار کامپوزیت تولیدی به صورت لوله‌ای بود و آزمایش مقاومت کششی و فشاری بر روی نمونه‌ها با ساختارهای مختلف صورت گرفت. آن‌ها همچنین از یک مدل اجزا محدود جهت پیش‌بینی رفتار الاستیک کامپوزیت استفاده کردند. تجدد نخ‌ها در منسوج یکی از عوامل تاثیرگذار در خواص مکانیکی کامپوزیت می‌باشد. تجدد زیاد نخ سبب می‌شود که نتوان از حداکثر خواص نخ در ساختار کامپوزیت استفاده کرد و خواص مکانیکی کامپوزیت کاهش یابد. برای مثال ساختارهای کامپوزیتی تقویت شده با منسوجات حلقوی در مقایسه با منسوجات تار و پودی دارای مقاومت و سفتی کمتری بوده که علت آن هندسه موج دار نخ در ساختار پارچه می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. از طرفی با اضافه کردن نخ‌های مستقیم به درون ساختار کامپوزیت می‌توان سفتی و مقاومت آن را افزایش داد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت ساختارهایی که کسر حجمی الیاف مستقیم آن‌ها بیشتر بوده دارای خواص مکانیکی بهتری می‌باشند [۱۰]. منسوج متعامد

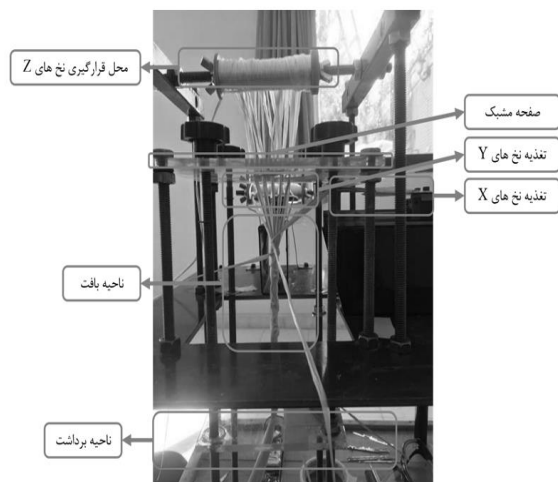
^۲Zhang^۱ orthogonal
^۲Vann Vuure

سه‌بعدی تولیدشده از جمله این ساختارها بوده که نخ‌ها در راستاهای مختلف به صورت تقریباً مستقیم قرار دارند و سبب تقویت کامپوزیت می‌شوند [۱۲]. وجود نخ‌های مستقیم سبب افزایش مقاومت در برابر بار خارجی می‌شود [۱۳]. از این رو تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر بر روی این نوع منسوج و کامپوزیت تقویت شده با آن‌ها صورت گرفته است. کراهان^۱ و همکاران [۱۴] به بررسی ساختار داخلی کامپوزیت تقویت شده با منسوج سه‌بعدی متعامد به روش پردازش تصویر پرداختند. در این تحقیق همچنین تفاوت بین هندسه این ساختارها با ساختارهای دوبعدی بررسی شد. آن‌ها در تحقیق دیگری [۱۵] رفتار خستگی کامپوزیت کربن/اپوکسی تقویت شده با منسوج سه‌بعدی متعامد را مورد آزمایش قرار دادند. اثر شوک حرارتی بر روی کامپوزیت تقویت شده با منسوج سه‌بعدی متعامد تاری و پودی توسط ویلکینسون^۲ و راگلس ورن^۳ بررسی گردید. آن‌ها دریافتند که با افزایش دما، مقاومت محوری کامپوزیت با شیب کمی کاهش می‌یابد [۱۶]. میناپور و همکاران [۱۲] ساختار جدیدی از منسوج سه‌بعدی متعامد تولید شده را با یک دستگاه جدید ارائه دادند و مقاومت کششی منسوج تولیدی را بوسیله‌ی آزمون تجربی و مدل-سازی اجزا محدود بررسی کردند. آقایی و همکاران [۱۷] با ساخت شفت‌های کامپوزیتی تقویت شده با منسوج بی‌بافت متعامد سه‌بعدی علاوه بر افزایش خواص مکانیکی پیچشی با

دو زمینه پلی‌استر و اپوکسی نتایج بدست آمده از تجربیات انطباق قابل قبولی را با روش عددی نشان داد. استفاده از مدل‌های عددی نظیر مدل‌های المان محدود جهت پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در سال‌های اخیر بسیار رایج شده است [۱۸-۲۰]. روش چند مقیاسی اجزا محدود از جمله این روش‌ها بوده که در آن یک سلول واحد از کامپوزیت در مقیاس مزو طراحی شده و خواص مکانیکی کامپوزیت از این سلول واحد با استفاده از شرایط مرزی مورد نظر استخراج می‌گردد. با توجه به در نظر گرفتن هندسه نخ و خواص الیاف در این روش، می‌توان دقت بالایی را برای نتایج بدست آمده متصور شد [۲۱-۲۳]. چنانچه تقویت کامپوزیت با منسوج متعامد سه‌بعدی انجام گردد باعث می‌شود از تمرکز تنش در نمونه جلوگیری و تنش یکنواخت بر روی نمونه توزیع گردد. لازم به ذکر است که تحقیقات کمی بر روی خواص پیچشی کامپوزیت تقویت شده با منسوج متعامد سه‌بعدی تولید شده و مدل‌سازی عددی آن‌ها انجام شده است. از این رو در پژوهش حاضر رفتار پیچشی کامپوزیت تقویت شده با منسوج متعامد سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. سفتی برشی کامپوزیت از جمله پارامترهای تاثیر گذار بر خواص پیچشی کامپوزیت بوده که در این تحقیق به آن پرداخته شده

^۱Ruggles-Wrenn^۲Meso^۳Karahan^۴Wilkinson

تغییر می کند. شکل ۱ اجزای مختلف از دستگاه بافندگی را نشان می دهد.



شکل ۱- قسمت های مختلف دستگاه بافندگی مورد استفاده در تحقیق خواص مکانیکی نخ شیشه بر اساس استاندارد ASTM D2256 به دست آمد. جدول ۱ خواص نخ شیشه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

جدول ۱- خواص نخ شیشه مورد استفاده در این تحقیق

| چگالی (g/cm^3) | نمره (Tex) | مدول الاستیک (GPa) | مقاومت کششی (MPa) | کرنش پارگی |
|--------------------|------------|--------------------|-------------------|------------|
| 2.54 | 1200 | 72 | 3448 | 0.048 |

گیری نخها را می توان تغییر داد که این پارامتر بر تراکم منسوج تولیدی اثر می گذارد. شکل ۲ دو نوع منسوج با کسر حجمی متفاوت را نشان می دهد.

است. همچنین از روش اجزا محدود در مقیاس مزو جهت پیش بینی خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده گردید.

۲- تجربیات

در تحقیق حاضر از نخ شیشه جهت تولید منسوج بی بافت متعامد سه بعدی استفاده شد. نمونه ها توسط دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده تولید شدند [۲۴]. در این دستگاه نخها در راستای طولی (نخهای Z) به صورت مستقیم از یک صفحه مشبک عبور می کنند. دو دسته از نخها در راستاهای تار و پود (نخهای X و Y) بر روی فرقره هایی پیچیده شده و توسط سوزن هایی به درون ساختار منسوج فرستاده می شوند. با حرکت سوزن ها در جهات مختلف عملیات بافت صورت می گیرد. جهت تغییر کسر حجمی الیاف، سرعت حرکت نخهای Z تغییر می کند که در نتیجه آن زاویه جهت گیری الیاف

نمونه های منسوج در دو کسر حجمی متفاوت تولید شدند که ویژگی های ساختاری در جدول ۲ نشان داده شده است. جهت تغییر تراکم منسوج تولیدی سرعت خروجی دستگاه تغییر داده می شود. با تغییر سرعت برداشت، زاویه ی جهت



(ب)



(الف)

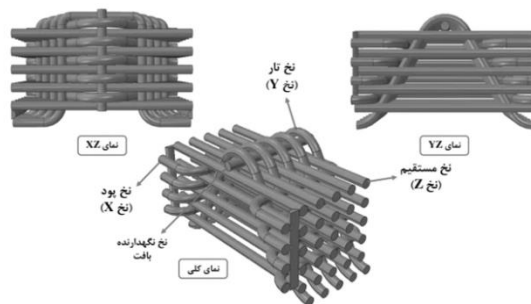
شکل ۲- منسوج تولیدی در این تحقیق، الف) منسوج با تراکم بالا نخ، ب) منسوج با تراکم پایین نخ

جدول ۲- ویژگی‌های ساختاری نمونه‌های تولیدی

| منسوج | زاویه جهت گیری نخ‌ها | کسر حجمی الیاف | کد نمونه |
|----------------|----------------------|----------------|----------|
| کسر حجمی بالا | 90 | 0.29 | HVF |
| کسر حجمی پایین | 30 | 0.197 | LVF |

در شکل ۳ شماتیکی از نخ‌ها و زاویه جهت‌گیری نشان داده شده است. جهت طراحی از نرم افزار کتیا استفاده شده است

شده است.



شکل ۳- شماتیک ساختار منسوج LVF

از دو نوع رزین اپوکسی و پلی استر جهت تولید کامپوزیت‌ها در جدول ۳ خواص فیزیکی و مکانیکی رزین های مورد استفاده شد.

استفاده شده است.

استفاده آورده شده است.

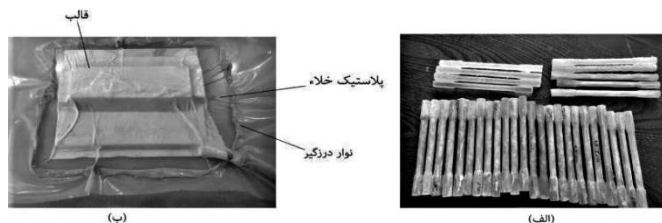
استفاده شد.

جدول ۳- خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی و پلی استر

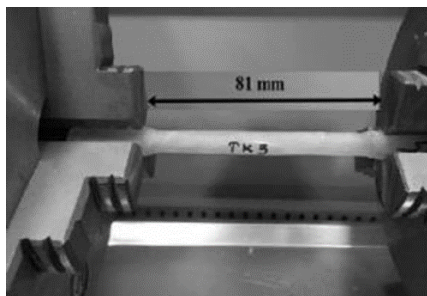
| نوع رزین | چگالی (kg/m^3) | مدول الاستیک (GPa) | مقاومت کششی (MPa) |
|----------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| اپوکسی | 1460 | 3.130 | 64.3 |
| پلی استر | 1250 | 1.320 | 21.4 |

تحت فشار خلأ قرار گرفتند. بعد از بیرون آوردن نمونه‌های کامپوزیتی از کیسه خلأ، به عنوان پخت ثانویه، به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در نهایت به مدت ۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

به منظور تولید نمونه‌های کامپوزیتی از روش تزریق پمپ خلا (VIP) استفاده شد. فرآیند تزریق رزین با استفاده از کیسه خلأ تحت فشار ۶۵ میلی‌متر جیوه و در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. سپس، نمونه‌های کامپوزیتی جهت پخت اولیه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق



شکل ۴- فرآیند تولید نمونه‌های کامپوزیتی، الف) نمونه‌ها، ب) روش VIP



شکل ۵- دستگاه آزمون پیچش

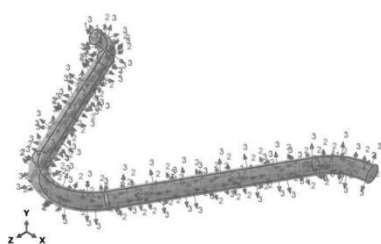
به منظور محاسبه مقاومت پیچشی و خواص برشی کامپوزیت، آزمون پیچش مطابق با استاندارد ASTM E143-78 بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. دستگاه دارای یک فک ثابت و یک متحرک همراه با یک زاویه سنج الکترونیکی ساخت ایران است. در این آزمون یک طرف نمونه لوله‌ای شکل کامل مقید شده و به طرف دیگر با سرعت 0.2 rev/min بار پیچشی اعمال می‌شود. طول نمونه مورد آزمایش ۸۱ میلی‌متر و قطر آن $8/5$ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۵ دستگاه آزمون پیچش را نشان می‌دهد. تعداد ۱۸ نمونه شفت کامپوزیت اپوکسی با تراکم بالا و پایین و تعداد ۱۸ نمونه با کامپوزیت پلی استر با تراکم بالا و پایین مورد آزمایش قرار گرفت.

۲-۱- مدل‌سازی اجزا محدود

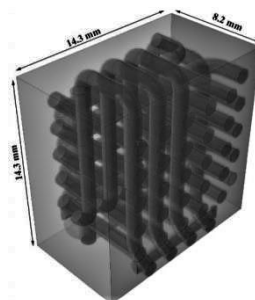
جهت مدل‌سازی به روش اجزا محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شد. در ابتدا لازم است که هندسه یک سلول واحد از ساختار کامپوزیت که شامل نخ‌ها و زمینه می‌شود طراحی گردد. سلول‌های واحد طراحی شده برای هر یک از مدل‌ها و جهت‌گیری خواص بر روی یک نخ تار در شکل ۶ نشان داده شده است.

به مدل نسبت داده می‌شود. در جدول ۴ خواص مکانیکی نخ آغشته شده به هر کدام از رزین‌های اپوکسی و پلی استر آورده شده است.

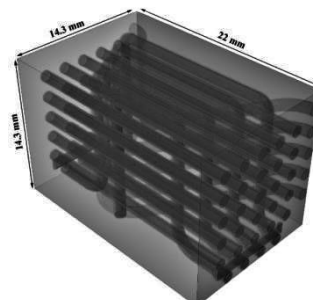
در هنگام فرآیند تولید کامپوزیت، رزین به دورن ساختار نخ نفوذ کرده و برای مدل‌سازی کامپوزیت باید خواص نخ آغشته شده به رزین لحاظ گردد [۲۱]. از این رو خواص نخ آغشته شده به رزین بر اساس روابط چامیس^۱ [۲۵] محاسبه شده و



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۶- سلول‌های واحد طراحی شده در نرم افزار آباکوس الف) مدل با کسر حجمی پایین الیاف ب) مدل با کسر حجمی بالا الیاف ج) جهت گیری مواد بر روی نخ

جدول ۴- خواص نخ آغشته شده به رزین‌های مختلف در این تحقیق

| G23 (MPa) | G13 (MPa) | G12 (MPa) | v_{23} | v_{13} | v_{12} | E33 (MPa) | E22 (MPa) | E11 (MPa) | زمینه |
|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|--------------|--------------|--------------|----------|
| 1478 | 1478 | 1478 | 0.34 | 0.29 | 0.29 | 3986 | 3986 | 33221 | اپوکسی |
| 627 | 627 | 627 | 0.34 | 0.29 | 0.29 | 1693 | 1693 | 32226 | پلی استر |

رو راستای طولی نخ به عنوان راستای یک و راستاهای عرضی نخ، به عنوان راستاهای دوم و سوم خواص مواد انتخاب گردید.

پس از محاسبه خواص مواد لازم است که مختصات جهت گیری راستاهای مختلف مواد بر روی نخ مشخص شود. از این

^۱Chamis

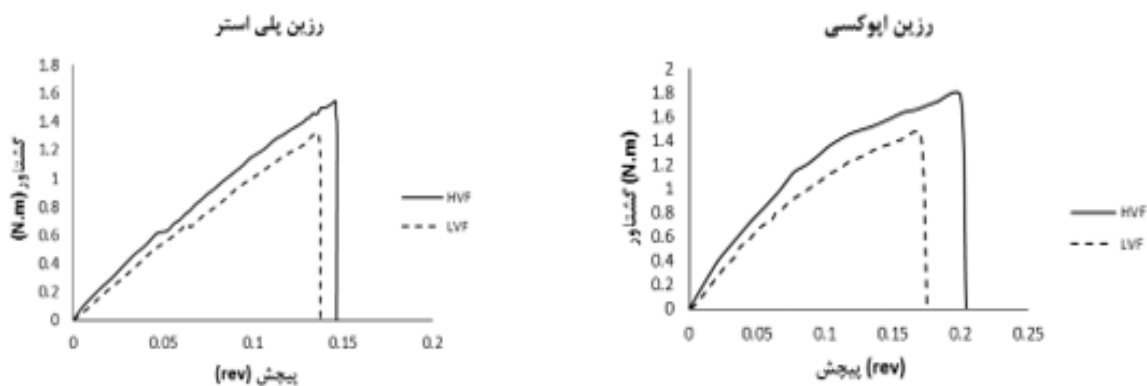
آوردن تنش و کرنش ایجاد شده بر روی سلول واحد می‌توان مدول‌های الاستیک ضریب پواسون را محاسبه کرد. جهت مش‌ریزی بر روی مدل‌های طراحی شده از المان‌های شش وجهی با ۸ گره و انتگرال کاهش یافته استفاده شد.

۳- نتایج و تحلیل

در این پژوهش از دو نوع رزین پلی استر و اپوکسی جهت تولید کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوج متعامد سه بعدی استفاده شد. کامپوزیت‌ها در دو نوع کسر حجمی کم الیاف و کسر حجمی بالای الیاف تولید شدند. جهت بررسی خواص برشی و پیچشی کامپوزیت‌ها، آزمون پیچش بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. شکل ۷ نمودار ممان بر حسب پیچش را برای نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده نشان می‌دهد.

حال لازم است شرایط مرزی متناوب بر اساس معادلات لازم اعمال شود. در واقع جهت بدست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت باید به گونه‌ای شرایط مرزی بر سلول واحد اعمال گردد که گویای مقید شدن توسط سلول‌های دیگر باشد و گره‌های در اثر اعمال بار یک جابه‌جایی ثابت داشته باشند. این مورد بوسیله‌ی یک کد پایتون به گره‌های متناظر در سطوح مختلف زمینه مطابق شکل ۸ اعمال شد.

به منظور اعمال برهمکنش بین نخ‌ها و زمینه در نرم افزار، از قید محبوس سازی استفاده شد. سپس بار محوری و برشی در جهات مختلف به سلول واحد وارد گردید تا خواص مکانیکی هر کامپوزیت استخراج گردد. در نهایت با بدست



شکل ۷- نمودار ممان بر حسب پیچش برای نمونه کامپوزیت‌های مختلف

افزایش کسر حجمی الیاف، مقاومت پیچشی کامپوزیت نیز بیشتر می‌شود. از طرفی استفاده از رزین اپوکسی سبب شده که مقاومت کامپوزیت نسبت به پلی استر افزایش یابد. از

همانطور که در شکل ۷ مشخص است با افزایش کسر حجمی الیاف، مقاومت پیچشی کامپوزیت افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان خواص مکانیکی بالاتر الیاف دانست که با

Embedded

عرضی می‌باشد. همچنین جدایش بین الیاف و زمینه نیز دیده می‌شود که خود عامل تضعیف خواص مکانیکی کامپوزیت و شکست آن است. حال می‌توان تنش برشی در کامپوزیت بر اثر بار پیچشی را از رابطه زیر محاسبه کرد:

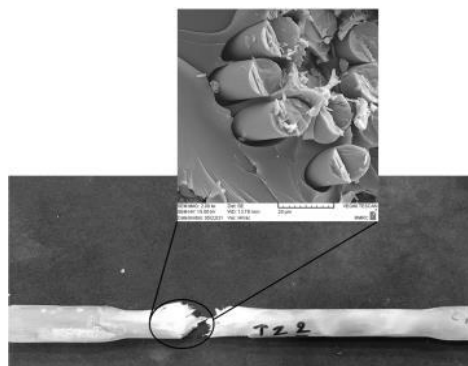
$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق T ممان وارد شده، c شعاع و J گشتاور قطبی اینرسی کامپوزیت است. مقدار T از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = \frac{GJ\theta}{L} \quad (2)$$

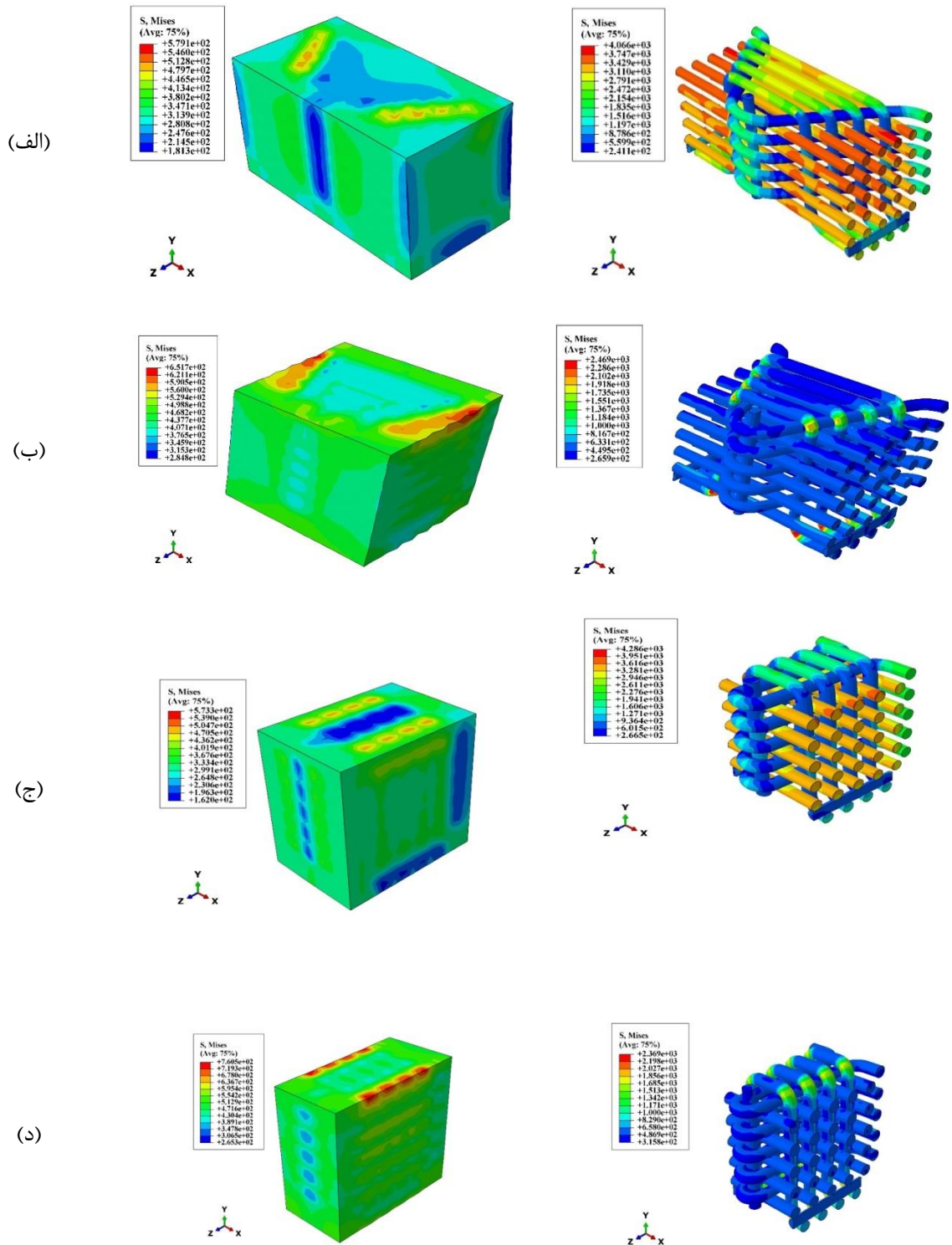
G مدول برشی کامپوزیت، θ زاویه پیچش و L طول کامپوزیت است. حال با استفاده از روابط فوق می‌توان مدول برشی کامپوزیت را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که حضور نخ‌های در جهات مختلف با افزایش کسر حجمی آن‌ها سبب افزایش مدول برشی و در نهایت بهبود مقاومت پیچشی کامپوزیت می‌شود. جهت پیش‌بینی مدول برشی کامپوزیت از روش اجزا محدود استفاده شد. شکل ۹ تنش کششی در راستای طولی کامپوزیت و تنش برشی برای دو نوع کامپوزیت با کسر حجمی بالا و پایین الیاف با زمینه اپوکسی را نشان می‌دهد.

نمودارهای شکل ۷ نیز می‌توان دریافت که با افزایش کسر حجمی الیاف، میزان پیچش لازم تا شکست کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد. هنگام اعمال بار پیچشی، کامپوزیت از خود مقاومت نشان داده و روند نمودار به صورت خطی و صعودی می‌باشد. با افزایش بار پیچشی ترک درون کامپوزیت ایجاد شده و این ترک درون کامپوزیت گسترش می‌یابد تا در نهایت شکست رخ می‌دهد. شکل ۸ نمونه‌ی شکسته شده در اثر بار پیچشی و عکس میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمونه‌ی شکسته شده با عکس میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع

با توجه به نمونه شکسته شده می‌توان دریافت که در هنگام شکست، الیاف کاملاً از هم جدا شده و جدایش بین زمینه و الیاف رخ می‌دهد. عکس میکروسکوپی نیز نشان می‌دهد الیاف شیشه در هنگام شکست علاوه بر پاره شدن، اندکی خرد نیز می‌شوند که علت آن خواص ترد الیاف شیشه در راستای



شکل ۹- کانتور تنش فون میسز بر روی مدل‌های کامپوزیت، الف) بار محوری بر روی نمونه LVF، ب) بار برشی بر روی نمونه LVF، ج) بار محوری بر روی نمونه HVF، د) بار برشی بر روی نمونه HVF

مستقیم دارند و در مدل طراحی شده هم راستای با جهت نیروی اعمالی هستند بیشترین تنش را از خود نشان می‌دهند. باتوجه به نتایج بدست آمده از خروجی مدل‌سازی می‌توان ضرایب الاستیک هر کامپوزیت را محاسبه کرد. ضرایب الاستیک محاسبه شده برای هر کامپوزیت در جدول ۵ آورده شده است.

باتوجه به شکل ۹ بیشترین تنش در اثر اعمال بار خارجی توسط جز تقویت کننده یعنی نخ‌ها تحمل می‌شود که نشان از نقش مهم الیاف در تقویت کردن کامپوزیت دارد. از طرفی در جز تقویت کننده، نخ‌هایی که بیشترین جهت‌گیری را با راستای اعمال نیرو دارند، تنش بیشتری را در مقایسه با نخ‌های دیگر تحمل می‌کنند. برای مثال در هنگام اعمال بار کششی در راستای محور کامپوزیت، نخ‌های Z که حالت

جدول ۵- ضرایب الاستیک کامپوزیت‌های مختلف محاسبه شده از مدل اجزا محدود

| نوع کامپوزیت | E11 (MPa) | E22 (MPa) | E33 (MPa) | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G12 (MPa) | G13 (MPa) | G23 (MPa) |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| اپوکسی-LVF | 7445 | 4502 | 4317 | 0.2 | 0.19 | 0.3 | 1399 | 1514 | 1375 |
| اپوکسی-HVF | 7978 | 5771 | 5754 | 0.22 | 0.2 | 0.32 | 1520 | 1507 | 1477 |
| پلی‌استر-LVF | 7222 | 4206 | 4030 | 0.2 | 0.24 | 0.28 | 1277 | 1400 | 1262 |
| پلی‌استر-HVF | 7618 | 5378 | 5386 | 0.23 | 0.25 | 0.33 | 1342 | 1340 | 1312 |

آمده از آزمایش پیچش در جدول ۶ مقایسه شدند.

جهت صحت سنجی نتایج بدست آمده، مدول برشی محاسبه شده از نتایج تجربی از مدل اجزا محدود با مدول برشی بدست

جدول ۶- مقایسه بین نتایج تجربی و مدل‌سازی برای مدول برشی

| نوع کامپوزیت | مدول برشی تجربی (GPa) | مدول برشی مدل‌سازی (GPa) |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
| اپوکسی-LVF | 1.30 | 1.39 |
| اپوکسی-HVF | 1.39 | 1.52 |
| پلی‌استر-LVF | 1.21 | 1.27 |
| پلی‌استر-HVF | 1.24 | 1.34 |

داد که با افزایش کسر حجمی الیاف، مقاومت کششی، زاویه پیچش تا شکست و همچنین مدول برشی کامپوزیت افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از رزین اپوکسی در مقایسه با رزین پلی استر سبب بهبود خواص پیچشی کامپوزیت و مدول برشی آن می‌شود. از طرفی نتایج مدل‌سازی نشان داد که نخ‌هایی که بیشترین جهت‌گیری را در راستای اعمال نیرو دارند، نقش بسزایی در تحمل تنش نسبت به دیگر نخ‌ها دارند. همچنین تنش تحمل شده توسط جز تقویت کننده نسبت به زمینه بسیار بیشتر بوده که نشان از نقش تاثیرگذار منسوج در تقویت کامپوزیت و بهبود خواص مکانیکی آن دارد. با مقایسه نتایج تجربی و تجربی می‌توان دریافت که انطباق قابل قبولی بین مدول برشی محاسبه شده از مدل اجزا محدود و نتایج تجربی وجود دارد که نشان از درستی مدل‌سازی عددی دارد. از این رو با استفاده از این مدل اجزا محدود می‌توان خواص کامپوزیت را پیش از تولید پیش‌بینی و با استفاده از تغییر پارامترهایی نظیر کسر حجمی الیاف یا جهت‌گیری نخ‌ها، خواص کامپوزیت را بهینه نمود.

۵- مراجع

[1].K. Bilisik, "Multiaxis 3D weaving: Comparison of developed two weaving methods (tube-*rapier* weaving versus tube-carrier weaving) and effects of bias yarn path to the preform properties," *Fibers and Polymers*, vol. 11, no. 1, pp. 104-114, 2010.

با توجه به جدول ۶ می‌توان دریافت که نتایج مدل‌سازی از انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی برخوردار می‌باشد. از این رو می‌توان خواص کامپوزیت را پیش از تولید پیش‌بینی کرد. از طرفی با توجه به کاربرد نهایی می‌توان جهت‌گیری و کسر حجمی الیاف را به گونه‌ای تنظیم کرد که علاوه بر کاهش هزینه، بیشترین مقاومت را به کامپوزیت ببخشد و در مقابل تنش برشی و کششی مقاوم باشد. از این مدل همچنین می‌توان برای دیگر ساختارهای کامپوزیتی نیز استفاده کرد تا به ساختاری بهینه برای تولید کامپوزیت رسید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدول برشی کامپوزیت تقویت شده با منسوج متعامد سه بعدی تولید شده با روش بی بافت یا *Noobing* در دو نوع کسر حجمی بالا و پایین الیاف و با دو زمینه اپوکسی و پلی‌استر مورد بررسی قرار گرفت. آزمون پیچش جهت محاسبه مدول برشی کامپوزیت و رفتار پیچشی آن انجام شد. همچنین از روش اجزا محدود جهت پیش‌بینی مدول برشی کامپوزیت در این تحقیق استفاده گردید. نتایج تجربی نشان

[2].W. Hufenbach, R. Böhm, L. Kroll, and A. Langkamp, "Theoretical and experimental investigation of anisotropic damage in textile-reinforced composite structures," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 40, no. 6, pp. 519-532, 2004.

[3].A. P. Mouritz, M. K. Bannister, P. Falzon, and K. Leong, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites," *Composites Part A: applied science and*

- manufacturing*, vol. 30, no. 12, pp. 1445-1461, 1999.
- [4].H. Hasani, S. Hassanzadeh, M. J. Abghary, and E. Omrani, "Biaxial weft-knitted fabrics as composite reinforcements: A review," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 46, no. 7, pp. 1439-1473, 2017.
- [5].R. Hessami, A. Alamdar Yazdi, and A. Mazidi, "The effect of loop density on the tensile behavior of biaxial weft knitted composites using both experimental tests and numerical method," *Journal of Industrial Textiles*, p. 1528083719868177, 2019.
- [6].M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, "Modeling strategies of 3D woven composites: A review," *Composite structures*, vol. 93, no. 8, pp. 1947-1963, 2011.
- [7].A. W. Van Vuure, J. Ivens, and I. Verpoest, "Mechanical properties of composite panels based on woven sandwich-fabric preforms," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 7, pp. 671, 2000.
- [8].D. Zhang, Y. Sun, L. Chen, and N. Pan, "A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates," *Materials & Design*, vol. 50, pp. 750-756, 2013.
- [9].E. Omrani, H. Hasani, and S. H. Dibajian, "Multi-scaled modeling the mechanical properties of tubular composites reinforced with innovated 3D weft knitted spacer fabrics," *Applied Composite Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 145-161, 2018.
- [10].F. Stig and S. Hallström, "Effects of crimp and textile architecture on the stiffness and strength of composites with 3D reinforcement," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, 2019.
- S. Gürgen and M. C. Kuşhan, "High performance fabrics in body protective systems," in *Materials Science Forum*, 2017, vol. 880 :Trans Tech Publ, pp. 132-135 .
- [11].S. Minapoor, S. Ajeli, and M. Salmani Tehrani, "Investigation into tensile strength of noncrimp three-dimensional orthogonal woven structure," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 49, no. 2, pp. 200-218, 2019.
- [12].S. Minapoor, S. Ajeli, and M. Salmani Tehrani, "Investigation into tensile strength of noncrimp P .Tan, L. Tong, G. Steven, and T. Ishikawa, "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 3, pp. 259-271, 2000.
- [13].M. Karahan, S. V. Lomov, A. E. Bogdanovich, D. Mungalov, and I. Verpoest, "Internal geometry evaluation of non-crimp 3D orthogonal woven carbon fabric composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 9, pp. 1301-1311, 2010.
- [14].M. Karahan, S. V. Lomov, A .E. Bogdanovich, and I. Verpoest, "Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal woven fabric," *Composites Science and Technology*, vol. 71, no. 16, pp. 1961-1972, 2011.
- [15].M. Wilkinson and M. Ruggles-Wrenn, "Fatigue of a 3D orthogonal non-crimp woven polymer matrix composite at elevated temperature," *Applied Composite Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 1405-1424, 2017.
- [16].H.R. Agaei, M. Varsei, S. Ajeli, M. Kamali Dolatabadi and M.S. Yazdanshenas, " Torsional behavior of non-crimp orthogonal woven composite using experimental and numerical methods," *Journal of Industrial Textiles*, First published 8 Feb 2022.
- [17].S. Gürgen, "Numerical modeling of fabrics treated with multi-phase shear thickening fluids under high velocity impacts," *Thin-Walled Structures*, vol. 148, p. 106573, 2020.

- [18]. Y. Zhong, L. Q. N. Tran, U. Kureemun, and H. P. Lee, "Prediction of the mechanical behavior of flax polypropylene composites based on multi-scale finite element analysis ", *Journal of materials science*, vol. 52, no. 9, pp. 4957-4967, 2017.
- [19]. N. Shekarchizadeh, R. Jafari Nedoushan, T. Dastan, and H. Hasani, "Experimental and numerical study on stiffness and damage of glass/epoxy biaxial weft-knitted reinforced composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 40, no. 1-2, pp. 70-83, 2021.
- [20]. M. Masoumi, S. B. Abdellahi, and S. M. Hejazi, "Investigation flexural behavior of hybrid-reinforced layered filament wound pipes using experimental tests and numerical model," *Journal of Industrial Textiles*, p. 15280837211034244, 2021.
- [21]. J. Zhai, T. Zeng, G.-d. Xu, Z.-h. Wang, S. Cheng, and D.-n. Fang, "A multi-scale finite element method for failure analysis of three-dimensional braided composite structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 476-486, 2017.
- [22]. Y. Zhao, L. Song, J. Li, and Y. Jiao, "Multi-scale finite element analyses of thermal conductivities of three dimensional woven composites," *Applied Composite Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 2017.
- [23]. S. Minapoor, S. Ajeli, and M. Sheikhzadeh, "Evaluation of flexural modulus of carbon 3D orthogonal woven fabric using atrilinear model," *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, vol. 43, no. 3, pp. 301-307, 2018.
- [24]. C. C. Chamis, "Mechanics of composite materials: past, present, and future," *Journal of Composites, Technology and Research*, vol. 11, no. 1, pp. 3-14, 1989.