

ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) با جهت‌گیری دوجبهته 90° و 0°

سید علیرضا مقدس موسوی زاده^۱، احد ضابط^۲، سمانه صاحبیان سقی^۳

Alirezamsv74@gmail.com

چکیده

هدف این پژوهش بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت GFRP با زمینه اپوکسی و الیاف تقویت کننده E glass با جهت‌گیری $[0,90]$ و همچنین به دست آوردن دمای انتقال شیشه‌ای شدن کامپوزیت و اثبات عدم تأثیر آن بر رفتار مکانیکی در دمای کارکرد می‌باشد. بدین منظور بعد از ساخت ورقه کامپوزیتی GFRP به روش VIP، آزمون تعیین درصد حجمی انجام و مقدار درصد حفره برابر با حدود $0/1$ درصد به دست آمد که نمایان‌گر کیفیت بالای ورقه و عدم پراکندگی قابل توجه در نتایج استحکام بود. آزمون DMTA با هدف به دست آوردن دمای انتقال شیشه‌ای شدن انجام و دمای تحول برابر با $87/2^\circ\text{C}$ به دست آمد. با توجه به اینکه در شرایط ارزیابی خواص مکانیکی در این پژوهش، نمونه‌ها به چنین دمای نمی‌رسند، تغییر خواص ویسکوالاستیک نمی‌تواند اثر قابل توجهی بر افت خواص مکانیکی بگذارد. سطح شکست نمونه‌های کشش نشان داد که عمده نمونه‌ها در وصله به دلیل تمرکز بالای تنش در این قسمت شکسته شدند. ارزیابی میکروسکوپی برای دو نمونه بعد از آنالیز مکانیکی، مکانیزم لایه لایه شدن را نشان داد که یکی از مکانیزم‌های شکست مکانیکی کامپوزیت‌ها است و در اثر آن لایه‌ها قادر به انتقال بار نیستند و از هم جدا می‌شوند.

کلمات کلیدی: کامپوزیت GFRP، خواص مکانیکی، آزمون DMA

- ۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۲ دانشیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۳ استادیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

۱ - مقدمه

کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با پارچه در بسیاری از صنایع از جمله هوا فضا، خودرو، دریا، زیرساخت ها و اخیراً نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته اند. وجود مزایایی همچون حق انتخاب مواد و ساخت آسان، کامپوزیت ها را برای کاربردهای مهندسی ایده آل نموده است. به طور کلی برای کامپوزیت ها وجود دو ویژگی چگالی کم و داشتن تناسب به توالی چیدمان که استحکام و سفتی بالا را در جهت بارگذاری فراهم می آورد، موجب جذابیت آن ها در مقایسه با سیستم های فلزی رایج می گردد [۱].

پلیمرهای تقویت شده با الیاف از سال ۱۹۴۰ در حال استفاده هستند و اخیراً هم مورد توجه مهندسين برای استفاده در ساخت سازه های عمرانی قرار گرفته است [۲]. رنج وسیعی از خواص به دست آمده از پلاستیک های تقویت شده با الیاف شیشه مختلف آن ها را قادر ساخته تا در بسیاری از کاربردهای مختلف مثل تخته مدار چاپی و کشتی های بزرگ به طول بیش از ۵۰ متر، به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گیرند [۳]. در بازار مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف، سیستم های کامپوزیت GFRP نقش مهمی را دارند و این موضوع حتی با ظهور الیاف آرامید و کربن تغییری نکرده است [۳]. کامپوزیت های GFRP موجود در بازار عمدتاً دارای الیاف E Glass به عنوان تقویت کننده هستند اما گستره وسیعی از حالت های مختلف شکل الیاف همچون مت، پارچه، رشته های تک جهت ۴ و انواع رزین، پرکننده ها/ افزودنی ها و همچنین گستره ای از روش های تولید می توانند مورد استفاده قرار گیرند. این انتخاب ها موجب تولید موادی با رفتار و خواص متنوع شده است. استفاده از رزین های ترموست و ترموپلاست با الیاف شیشه در سال های اخیر روند روبه رشدی را داشته است.

از جمله مهم ترین مشخصات و ویژگی های کامپوزیت های GFRP می توان به مقاومت به خوردگی خوب، وزن کم (یک چهارم وزن فولاد)، چقرمگی عموماً خوب و استحکام ویژه بالا اشاره کرد. ویژگی های مذکور باعث شده تا کامپوزیت های GFRP در کاربردهای متنوعی از جمله صنایع دریایی، مخازن تحت فشار شیمیایی، ساخت قایق های نجات و... استفاده شود [۳]. یکی از ویژگی های مهم کامپوزیت های GFRP، تنوع بالا در روش تولید به منظور برآورده سازی نیازهای مختلف از جمله ابعاد و حجم تولید می باشد. از میان رایج ترین روش های تولید کامپوزیت های GFRP می توان لایه چینی دستی^۱، تزریق به کمک خلأ^۲ یا VIP، قالب گیری

۴ Unidirectional rowing

۵ Hand lay-up

۶ Vacuum infusion process

انتقال رزین^۷ و رشته پیچی^۸ نام برد که روش VIP به دلیل امکان تولید قطعات بزرگ مثل اجزای بدنه کشتی مورد توجه ویژه‌ای قرار دارد [۳، ۴، ۵].

تحقیقات پرشماری در خصوص بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری صورت پذیرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیق یوفان او و ژائو [۶] اشاره نمود که به بررسی رفتار کششی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه در نرخ‌های کرنش و دماهای متفاوت پرداختند. آن‌ها نمونه‌های کامپوزیت GFRP را در نرخ‌های کرنش متفاوت از شبه استاتیکی تا S^{-1} ۱۶۰ و دماها از ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش کرده تا تغییرات احتمالی بر خواص مکانیکی و الگوهای شکست را بررسی کنند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استحکام کششی، حداکثر کرنش و چقرمگی با افزایش نرخ کرنش در دمای اتاق، افزایش می‌یابد و مدول یانگ، استحکام کششی و چقرمگی با افزایش دما در نرخ کرنش S^{-1} ۴۰، کاهش پیدا می‌کند.

فریرا و همکاران [۷] مطالعات قابل توجهی را بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های GFRP انجام دادند. آن‌ها در یکی از تحقیقات خود تأثیر جهت‌گیری الیاف و نرخ کرنش را در بارگذاری شبه استاتیکی بررسی کردند. ماده مورد استفاده آن‌ها کامپوزیت GFRP شامل زمینه پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه بود. آن‌ها ۳ نوع لایه چینی متفاوت 0° ، $45^\circ/0^\circ/45^\circ$ و $30^\circ/0^\circ/30^\circ$ را برای ورقه‌های کامپوزیتی در نظر گرفتند.

مطالعات انجام شده برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه نشان داد که استحکام نهایی با نرخ کرنش افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمون کشش در این تحقیق، نشان داد که این تأثیر برای لایه‌چینی‌های $45^\circ/0^\circ/45^\circ$ و $30^\circ/0^\circ/30^\circ$ ناچیز و برای لایه چینی 0° بسیار مشهود بوده است، به طوری که با رسیدن نرخ کرنش از $0.000333 S^{-1}$ به $0.333 S^{-1}$ ، استحکام نهایی حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. مقدار استحکام نهایی برای لایه‌چینی $45^\circ/0^\circ/45^\circ$ و $30^\circ/0^\circ/30^\circ$ حدود ۵۰ درصد لایه‌چینی 0° است. این موضوع به دلیل شیب دار بودن الیاف در لمینت‌های مذکور و عدم قرار داشتن آن‌ها در جهت بارگذاری است.

هدف این تحقیق بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت GFRP با زمینه اپوکسی و الیاف تقویت‌کننده E glass، به دست آوردن دمای T_g از طریق آزمون DMA^۹ و ارزیابی میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌ها در طی بارگذاری کششی می‌باشد.

^۷ Resin transfer molding

^۸ Filament winding

^۹ Dynamic mechanical analyzes

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی و ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت GFRF، ورقه‌ای با ابعاد ۱۲۵×۶۵ cm ساخته شد. این تحقیق در پژوهشکده هوا خورشید واقع در دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. زمینه مورد استفاده در تولید این کامپوزیت اپوکسی ۲۰۴۰ ساخت شرکت اکسون فرانسه بود که با هاردنر ۲۰۴۷ به نسبت ۱۰۰ به ۳۲ ترکیب گردید. الیاف تقویت شونده نیز از الیاف E glass با جهت‌گیری دوجتهه^{۱۰} و ۹۰ ساخت شرکت STA ترکیه بود.

به منظور تولید ورقه کامپوزیت GFRP ابتدا لازم است تا الیاف E glass از رول پارچه اصلی برش داده شوند. در جدول ۱ مشخصات برش پارچه آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات پارچه برش خورده برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP

ابعاد پارچه برش خورده (cm)	تعداد لایه‌ها	جهت‌گیری
۱۲۵×۶۵	۷	دو جهت‌هه ^{۱۰} و ۹۰

بعد از برش لایه‌های پارچه الیاف E glass، الیاف در جهت ۰° در جهت حرکت رزین قرار گرفته تا در این حالت حرکت رزین راحت‌تر باشد. در ادامه به منظور جلوگیری از قرارگیری آلودگی‌های محیطی بر روی الیاف، تمام لایه‌ها با استفاده از پارچه محافظ^{۱۱} با نام تجاری داکرون پوشانده شد. برای ساخت کامپوزیت GFRP در این تحقیق از روش تزریق از طریق خلأ یا VIP استفاده شده که از جمله متداول‌ترین روش‌ها برای تولید کامپوزیت‌ها برشمرده می‌شود. بدین منظور ابتدا بر روی میز شیشه‌ای کار، واکس مخصوص با هدف جلوگیری از چسبیدن رزین به الیاف زده می‌شود. در ادامه لایه‌های پارچه الیاف E glass بر روی میز قرار گرفته و سپس یک لایه مش بر روی آن‌ها مستقر می‌گردد. هدف از انجام این کار، بهبود توزیع رزین در زمان تزریق است. در ادامه لایه‌ی اول بگ بر روی مجموعه قرار گرفته و با استفاده از خمیر سیلان به طور کامل آب بندی می‌شود. در ادامه با اعمال فشار خلأ ۰/۸۵- بار، کل هوای مجموعه تخلیه می‌گردد. به منظور حصول اطمینان از عدم وجود نشتی در مجموعه، از دستگاه اولتراسونیک تشخیص دهنده نشتی استفاده می‌شود. سپس برای اطمینان بیشتر یک لایه بگ دیگر هم به طور مشابه بر مجموعه قرار گرفت و هوا نیز با فشار خلأ مشابه تخلیه شد. لوله‌های اسپیرال که در تزریق نقش اساسی دارند بعد از خالی شدن هوای مجموعه در محل‌های مطلوب قرار گرفته و با استفاده از خمیر سیلان محکم می‌شوند. رزین مورد استفاده در این تحقیق یعنی اپوکسی ۲۰۴۰ بعد از ترکیب با

۱۰ Biaxial

۱۱ Peel ply

هاردنر یا سخت کننده ۲۰۴۷ به نسبت ۱۰۰ به ۳۲، در دستگاه مکش قرار گرفته تا حباب‌های هوای آن به طور کامل از بین بروند. این کار با اعمال فشار ۰/۹- بار به مدت زمان حدود ۲۵ دقیقه انجام شد. در نهایت تزریق رزین به مجموعه صورت پذیرفت. در این حالت باید نهایت دقت به منظور جلوگیری از باقی ماندن حباب‌های هوا در مجموعه صورت بگیرد. زمان ژل شدن رزین ۲۰۴۰، حدود ۵ ساعت است. بعد از اتمام تزریق، ورقه به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط قرار گرفته و در نهایت برای پخت کامل به ۸۰ °C دمای انتقال داده شد.

بعد از اتمام ساخت ورقه، برای برش و نمونه‌سازی از فرایند واتر جت استفاده گردید. در مرحله اول واتر جت نمونه‌های آزمون تعیین درصد حجمی و آزمون آنالیز حرارتی مکانیکی (DMTA) به دست می‌آیند. در این مرحله قسمت‌های مربوط به نمونه‌های آزمون کشش و وصله‌های آن‌ها نیز از ورقه اصلی برش می‌خورند. سپس وصله‌ها با استفاده از چسب دو جزئی کاماتینی به قسمتی از ورقه که مربوط به نمونه‌های کشش است چسبانده می‌شوند. در نهایت در مرحله دوم واتر جت نمونه‌های آزمون کشش نیز حاصل می‌شود.

۱-۲- آزمون تعیین درصد حجمی (Burn off)

این آزمون با هدف به دست آوردن درصد حجمی حفره ورقه کامپوزیتی و بررسی کیفیت آن با استفاده از استاندارد ASTM D2734 [۸] انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها که ابعاد ۴×۴ سانتی‌متری تهیه گردید. اندازه‌گیری چگالی نمونه‌ها طبق قانون ارشمیدس و با استفاده از ترازو Percisa صورت گرفت. در استاندارد D2734 یکی از روش‌های پیشنهادی برای اندازه‌گیری درصد حجمی کامپوزیت، آزمون اشتعال طبق استاندارد ASTM D2584 [۹] است. یکی از مهم‌ترین نکات این استاندارد، قرارگیری نمونه‌ها در بوتله‌های کاملاً خشک می‌باشد که برای تحقق آن لازم است که بوتله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ °C قرار بگیرند. سپس روند حرارت دهی نمونه‌ها در کوره شامل ۳۰ دقیقه تا دمای ۲۲۰ °C، ۳۰ دقیقه تا رسیدن به دمای ۴۲۰ °C و ۲ ساعت تا دمای ۵۶۵ °C است. لازم به ذکر است که وزن نمونه‌ها قبل و بعد از سوختن با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت، استاندارد ASTM D3171 [۱۰] مدنظر می‌باشد. برای به دست آوردن درصد حجمی رزین و الیاف می‌توان نوشت:

(۱)

$$\text{درصد وزنی رزین} = \left(\frac{\text{چگالی نمونه}}{\text{چگالی رزین}} \right) \times \text{درصد حجمی رزین}$$

(۲)

$$\text{چگالی نمونه} \\ \left(\frac{\text{چگالی الیاف}}{\text{درصد وزنی الیاف}} \right) = \text{درصد حجمی الیاف}$$

لازم به ذکر است که حجم هر نمونه علاوه بر حجم رزین و الیاف حجم حفره را نیز در بر دارد و لذا درصد حجمی حفره با استفاده از رابطه ۳ حاصل می‌گردد:

(۳)

$$\text{درصد حجمی رزین} + \text{درصد حجمی الیاف} - ۱ = \text{درصد حجمی حفره}$$

۲-۲- آزمون DMA

آزمون طبق استاندارد ASTM D7028 [۱۱] انجام شد و طی آن نمونه با ابعاد ۱ mm (ضخامت) ۳۵ mm (طول) و ۱۰ mm ضخامت آماده‌سازی گردید. این آزمون در مد خمشی، فرکانس ۱ هرتز و نرخ حرارت‌دهی ۵ °C/min صورت پذیرفت.

۲-۳- آزمون کشش

آزمون در نرخ بارگذاری ۲ min/mm طبق استاندارد ASTM D03039 [۱۲] برای ۶ نمونه انجام و ابعاد نمونه‌ها شامل ۲۵۰ mm (طول) ۲۵ mm (عرض) و ۲/۵ mm ضخامت است. به هر دو طرف نمونه‌ها، وصله با طول ۵۶ mm چسبانده می‌شود. دستگاه مورد استفاده برای آزمون کشش، دستگاه ۲۵۰ Universal zwick است.

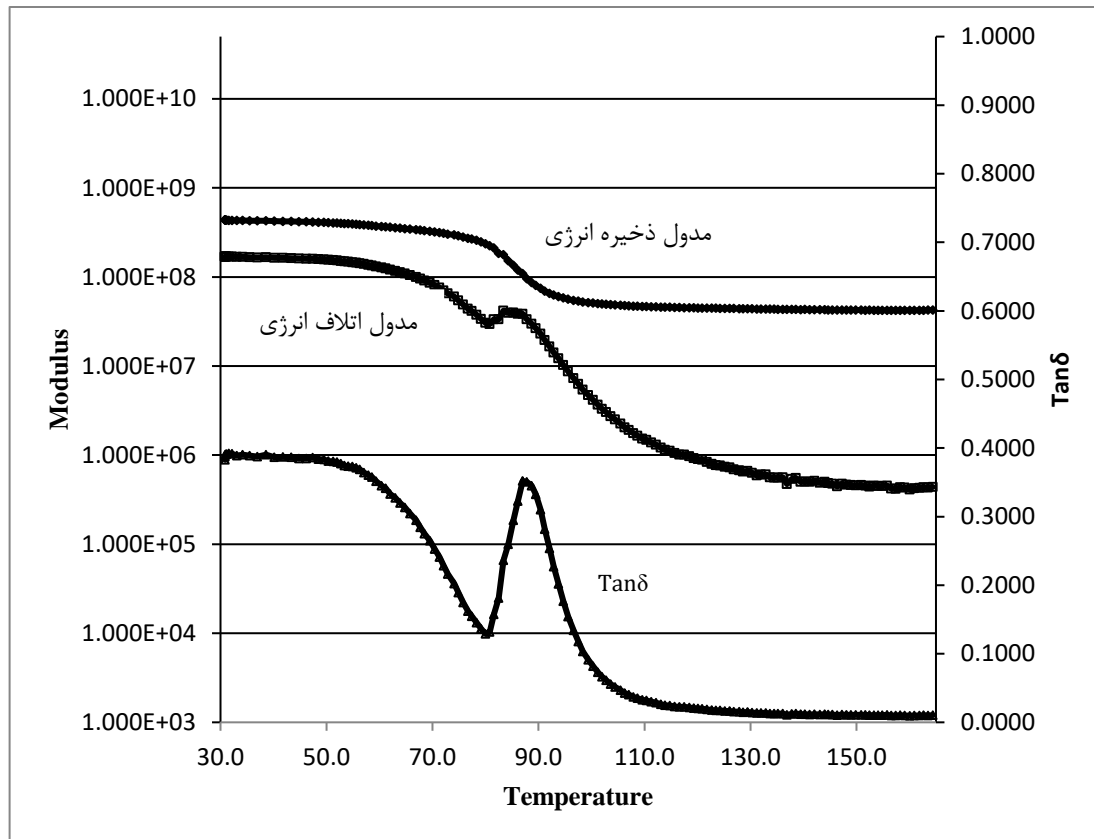
۳- نتایج و بحث

در جدول ۲، نتایج حاصل از آزمون تعیین درصد حجمی به نمایش درآمده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون تعیین درصد حجمی

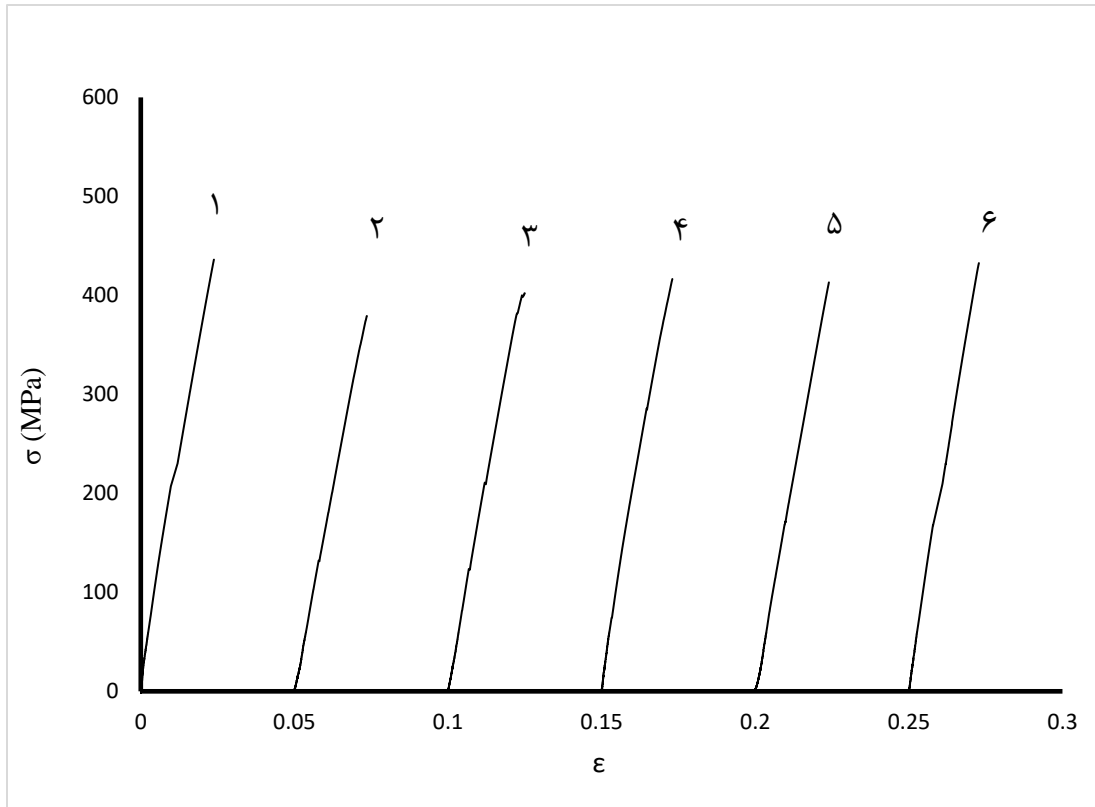
میانگین	مشخصه
۵۷/۶	درصد حجمی رزین
۴۲/۳	درصد حجمی الیاف
۰/۱	درصد حجمی حفره

طبق جدول ۲، مقدار درصد حجمی حفره برابر با ۰/۱ است که نمایانگر کیفیت مطلوب ورقه ساخته شده می‌باشد زیرا براساس استاندارد ASTM D2734 اگر درصد حفره کمتر از ۱ باشد، کیفیت ورقه کامپوزیتی قابل قبول است در غیر این صورت خواص مکانیکی آن دچار افت خواهد شد و پراکندگی زیادی در استحکام به وجود خواهد آمد. شکل ۱ نمودار تغییرات مدول اتلاف انرژی، مدول ذخیره انرژی و $Tan\delta$ را با دما نشان می‌دهد. طبق شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد که مقدار دمای انتقال شیشه‌ای شدن یا T_g برابر با $87/2^\circ C$ است (مقدار پیک منحنی $Tan\delta$ طبق استاندارد D7028). در شرایط ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت GFRP در این تحقیق، آزمون کشش نمونه‌ها در دمای محیط انجام شده و در نتیجه تغییری در خواص ویسکوالاستیک رخ نمی‌دهد. در حقیقت این موضوع اثر بر افت خواص مکانیکی نمی‌گذارد.



شکل ۱- تغییرات مدول اتلاف انرژی، مدول ذخیره انرژی و با دما

در شکل ۲، منحنی تنش کرنش نمونه‌های آزمون کشش به نمایش درآمده است. مطابق شکل ۲، مشاهده می‌شود که در منحنی‌ها پله‌های کوچکی وجود دارند که این پله می‌توانند ناشی از شکست تک لیف باشند. استحکام نهایی تمام نمونه‌ها به جز نمونه شماره ۲ تقریباً در یک گستره قرار دارند. پراکندگی استحکام نمونه شماره ۲ می‌تواند در اثر آماده سازی نامطلوب نمونه، سر خوردن نمونه در فک‌های آزمون کشش، عدم تراز بودن فک‌ها، عیب ذاتی و... باشد. در جدول ۳ مقدار استحکام میانگین، مدول یانگ و ازدیاد طول برای نمونه‌ها آورده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که برای محاسبه مدول یانگ طبق روش وتری بیان شده در استاندارد D3039 عمل شده که طی آن پیشنهاد می‌شود که مدول یانگ در قسمتی از منحنی که فاقد ناحیه انتقال است، محاسبه گردد. منظور از ناحیه انتقال، قسمتی از منحنی است که در آن شیب به طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

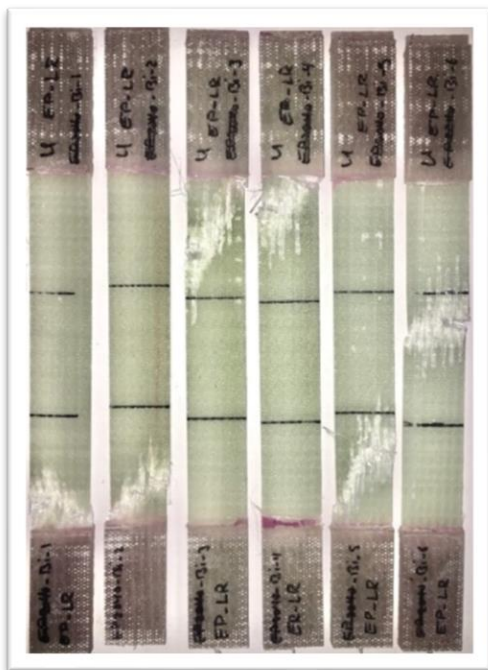


شکل ۲- منحنی تنش کرنش نمونه‌های آزمون کشش کامپوزیت GFRP

جدول ۳- مشخصات مکانیکی آزمون کشش

مشخصات	میانگین
استحکام نهایی (MPa)	۴۱۵/۵۵
مدول یانگ (GPa)	۱۹/۱
درصد ازدیاد طول	۲/۴۱

در حین اعمال بار کششی به نمونه‌ها در آزمون کشش با تشکیل ترک اولیه، سایر ترک‌ها با سرعت بالا و به صورت موازی به وجود آمده و قسمت گیج یا سنجه را احاطه نموده و سبب شکست ماده می‌گردد [۱۳]. در شکل ۳، تصویر سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش به نمایش در آمده است.



شکل ۳- تصویر سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش

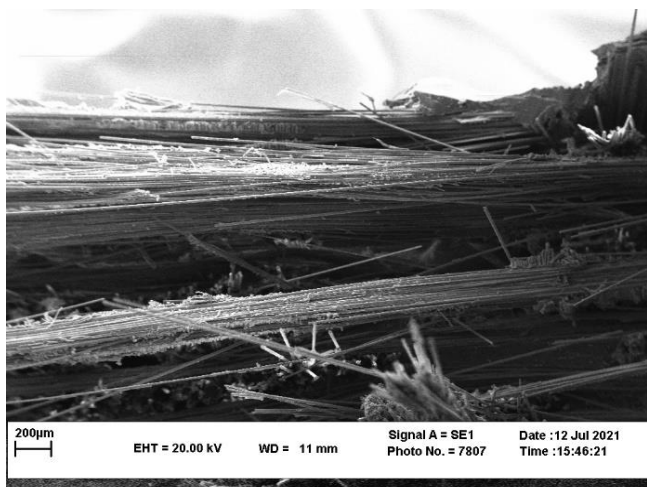
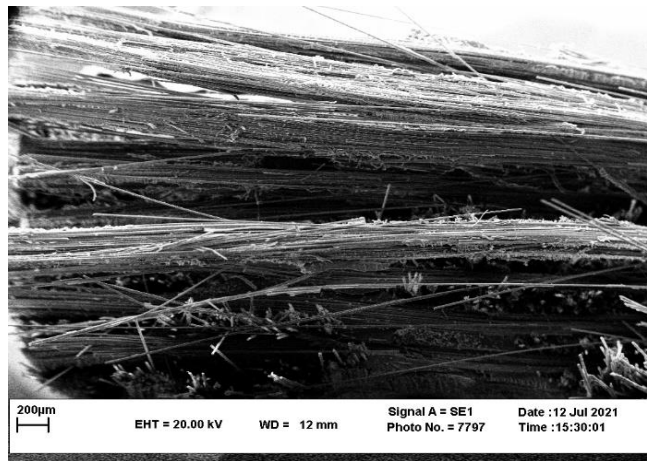
براساس استاندارد D3039 می‌توان طبق محل شکست هر نمونه، کد مشخصی را به آن اختصاص داد که محل، موقعیت و مدل شکست را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای نمونه شماره ۱ شکست از نوع جانبی و در وصله، فک و پایین رخ داده است. در جدول ۴ مشخصات شکست نمونه‌های آزمون کشش آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات شکست نمونه‌های آزمون کشش

نام نمونه	مشخصات شکست
۱	جانبی / فک، وصله، پایین
۲	زاویه‌دار / فک، وصله، پایین
۳	زاویه‌دار / فک، وصله، بالا
۴	جانبی / فک، وصله، بالا
۵	زاویه‌دار / فک، وصله، پایین
۶	جانبی / سنجه، وسط

مطابق جدول ۴ و شکل ۳ می‌توان مشاهده که اکثر نمونه‌ها در وصله دچار شکست شده‌اند. دلیل این موضوع آسیب‌های موضعی است که منجر به تمرکز بیش از حد تنش به واسطه‌ی نیروی زیاد کلمپینگ^{۱۲} (نگهداشتن با گیره) می‌شود [۱۴ و ۱۵]. همچنین مشاهده می‌شود که در برخی از نمونه‌ها شکست به صورت زاویه‌دار رخ داده است. این موضوع به خاصیت ناهمسانگردی کامپوزیت‌ها بر می‌گردد. در حقیقت جهت‌گیری الیاف اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی دارند [۱۶ و ۱۷].

در شکل ۴، تصویر SEM از سطح شکست دو نمونه پس از آنالیز مکانیکی در بزرگنمایی ۵۰۰ به نمایش درآمده است.



شکل ۴- تصویر SEM از سطح شکست دو نمونه بعد از آنالیز مکانیکی در بزرگنمایی ۵۰۰

با توجه به شکل ۴، مکانیزم شکست قابل مشاهده، مکانیزم لایه‌لایه شدن یا تورق است که در اثر آن لایه‌ها از یکدیگر جدا می‌گردند [۱۸]. در اثر لایه‌لایه شدن امکان انتقال بار از یک لایه به لایه دیگر از بین می‌رود و تمامی بار توسط لایه‌های باقیمانده تحمل می‌شود [۲۰، ۱۹]. لایه لایه شدن می‌تواند به دو صورت پایدار یا ناپایدار گسترش یابد و در نهایت منشأ خرابی ساختار لقب بگیرد [۲۱].

ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت GFRP در این تحقیق نشان داد که پراکندگی اندکی در نتایج حاصل از استحکام نمونه‌های کامپوزیت GFRP وجود. با توجه به نتیجه مناسب آزمون تعیین درصد حجمی و مقدار مطلوب درصد حفره، این اتفاق دور از دسترس نیست. در نقطه مقابل هر عاملی که در زمان ساخت موجب افزایش حفرات در ساختار ورقه کامپوزیتی شود، تأثیر منفی بر خواص مکانیکی می‌گذارد.

۴- نتیجه گیری

۱. برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP در این پژوهش از روش VIP استفاده شد. مقدار درصد حفره ورقهای کامپوزیتی برابر با ۰/۱ درصد به دست آمد.
۲. آزمون آنالیز حرارتی مکانیکی یا DMTA نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای شدن برای نمونه کامپوزیتی برابر با $^{\circ}\text{C}$ ۸۷/۲ است و لذا به دلیل عدم دستیابی به این دما در شرایط آزمون کشش، تغییر قابل توجهی در خواص ویسکوالاستیک رخ نمی‌دهد.
۳. نتایج حاصل از آزمون کشش و منحنی‌های تنش کرنش نشان داد که تکرارپذیری مطلوبی در نتایج خواص مکانیکی وجود دارد که به دلیل درصد حفره کم ورقه کامپوزیتی بود که طبق استاندارد D2734 منجر به کاهش پراکندگی در نتایج استحکام می‌گردد.
۴. در تصاویر SEM بعد از آنالیز مکانیکی، مکانیزم شکست لایه‌لایه شدن مشاهده گردید که یکی از مکانیزم‌های مهم شکست در آزمایش‌های مکانیکی لست و در نتیجه آن قابلیت انتقال بار میان لایه‌ها از بین می‌رود.

۵- مراجع

- [۱]: K. Ajay Kumar, M.A. Mateen, N. Srinivasa Rajneesh, A Study on Effect of Filler on Mechanical Properties of GFRP Composites, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Malla Reddy Engineering College, Secunderabad, TS, India, Vol. 4, Issue 11, November 2015.
- [۲]: C. Bakis, L.C. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, et al., Fiber reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review, Journal of Composites for Construction Volume 6 Issue 2 - May 2002.
- [۳]: G. D. SIMS and W. R. BROUGHTON, Glass Fiber Reinforced Plastics- Properties, National Physical Laboratory, Teddington, UK.
- [۴]: Sharma, S. and Wetzel, K.K., 2010. Process development issues of glass-carbon hybrid-reinforced polymer composite wind turbine blades. Journal of composite materials, First Published October 6, 2009.
- [۵]: Kim, Y.H., Eum, S.H., Choi, B.K., Kim, J.C., Kwon, S.C. and Dutta, P.K., 2004. A study on the dimensional stability of interior composite panel made by vacuum bagging and had lay-up fabrication method. Key Engineering Materials, April 2004, 261-263, pp.1493-1498.
- [۶]: Yunfu Ou, Deju Zhu, Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures, Construction and Building Materials, Volume 96, 15 October 2015, Pages 648-656.

- [۷]: J.A.M. Ferreira ,J.D.M. Costa, P.N.B. Reis, Static and fatigue behavior of glass fiber-reinforced polypropylene composites, a Department of Mechanical Engineering, FCT/UC, University of Coimbra, Pinhal de Marrocos, 3030 Coimbra, Portugal, Theoretical and Applied Fracture Mechanics Volume 31, Issue 1, February–March 1999, Pages 67-74.
- [۸]: ASTM D2734 Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics.
- [۹]: ASTM D2584, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins.
- [۱۰]: ASTM D3171 Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.
- [۱۱]: ASTM D7028 Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA T_g) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA).
- [۱۲]: ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [۱۳]: R. E. Lavengood, The Mechanical Performance of Cross-Plied Composites, 0. ISHAI Washington University St. Louis, Missouri, Polymer Engineering and science, may, 1971, Vol. I 1, No. 3
- [۱۴]: Ritesh Bhat, Nanjangud Mohan, Sathyashankara Sharma, Ashu Pratap, Agastya Prasad Keni, Dev Sodani, Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites, Mechanical Engineering, Manipal Institute of Technology, Manipal Academy of Higher Education, Manipal 576104, Karnataka, India, Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue number 4, Published - 01-07-2019.
- [۱۵]: Plummer CJG. 1.03 – Testing of polymeric materials. In: Hashmi S, et al., editors. Comprehensive materials processing. Elsevier; 2014. p. 35–70.
- [۱۶]: Shin KC, Kim WS, Lee JJ. Application of stress intensity to design of anisotropic/isotropic bi-materials with a wedge. IntJ Solids Struct 2007;44(24):7748–66.
- [۱۷]: Tucker CL, Modeling: Scaling analysis. In: Encyclopedia of materials: science and technology. Pergamon; 2001. p.5726–33.

The 10th
**International Conference on
Materials and Metallurgical Engineering**
November 15-16, 2021 / Online Tehran



دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران
پانزدهمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن ريخته‌گری ایران
بيست و پنجمين كنفره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران
۲۵ و ۲۶ آبان ماه ۱۴۰۰ / تهران / آنلاین



[۱۸]: Nijland TG, Larbi JA. Microscopic examination of deteriorated concrete. In: Maierhofer C, Reinhardt HW, Dobmann G, editors. Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, vol. 1. Woodhead Publishing; 2010. p. 137–79.

[۱۹]: Paris P, Gomez M, Anderson W. A rational analytical theory of fatigue. *Trend Eng* 1961;13:9–14.

[۲۰]: Paris P, Erdogan F. Critical analysis of propagation laws. *J Basic Eng* 1963;85:528–34.

[۲۱]: Olivier Allix, Alberto Corigliano, Geometrical and interfacial nonlinearities in the analysis of delamination in composites, *International Journal of Solids and Structures*, May 1999.

The 10th
**International Conference on
Materials and Metallurgical Engineering**
November 15-16, 2021 / Online Tehran



دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران
پانزدهمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن ريخته گري ايران
بيست و پنجمين كنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ايران
۲۵ و ۲۶ آبان ماه ۱۴۰۰ / تهران / آنلاین

