بررسی تجربی تأثیر دانسیته سطحی الیاف حصیری بر خواص کششی و خمشی چند لایه‌های شیشه-اپوکسی

حمید رضائی[۱] ، صادق حمزه[۲]، یوسف امیریان[۳*]

[۱] دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hrezaei58@yahoo.com
[۲] دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sadegh_hamzeh@aut.ac.ir
[۳]دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، amirian@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲

کلمات کلیدی:
دانسیته سطحی
الیاف حصیری
خواص کششی و خمشی
روش آزمایشگاهی
چند لایه شیشه-اپوکسی

چکیده

مطالعه حاضر با هدف بهینه‌سازی چند لایه‌های شامل الیاف با بافت حصیری، به بررسی تاثیر دانسیته سطحی بر روی خواص کششی و خمشی آن‌ها پرداخته است. با توجه به پیچیدگی‌های معادلات حاکم بر الیاف حصیری از روش تجربی جهت مقایسه دقیق خواص چند لایه‌های شامل الیاف با دانسیته ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع استفاده شده است. چند لایه‌های بررسی شده در این تحقیق دارای ضخامت و دانسیته کلی برابر بوده و تفاوت آن‌ها در تعداد و دانسیته سطحی لایه‌های تشکیل دهنده می‌باشد. جهت کاهش تاثیر فرآیند ساخت و یکنواخت بودن کیفیت قطعات، از روش تزریق در خلاء استفاده شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد دانسیته سطحی تاثیر چشمگیری بر خواص چند لایه‌ها داشته و با افزایش آن در یک محدوده مشخص، خواص چند لایه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین افزایش دانسیته سطحی از یک مقدار مشخص بدلیل ایجاد حفره و کاهش تماس بین‌لایه‌ای، تاثیر منفی بر خواص چند لایه‌ها دارد. چند لایه‌های شامل الیاف حصیری با دانسیته ۴۰۰ گرم بر متر مربع دارای خواص بالاتری نسبت به دیگر چند لایه‌ها داشته و همچنین الیاف با دانسیته ۶۰۰ گرم بر متر مربع دارای خواص بالاتری نسبت به چند لایه‌های شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد.

Experimental investigation of the woven fiber areal density effect on the tensile and flexural behavior of glass-epoxy laminates

Hamid Rezaei[1], Sadegh Hamzeh[2*], Yousef Amirian[3*]

[1] PHD of marine engineering, Malek-e-Ashtar University of technology, hrezaei58 @yahoo.com
[2] PHD candidate of marine engineering, Amirkabir University of technology. Sadegh_hamzeh@aut.ac.ir
[2] PHD candidate of marine engineering, Amirkabir University of technology. amirian@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Jan. 2022
Accepted: 23 May. 2022

Keywords:
Areal density
Woven fabric fiber
Tensile and flexural properties
Experimental method
Glass-Epoxy laminate

ABSTRACT

In order to optimisation of laminates including woven fibers, Present study investigated the effect of Areal density on the tensile and flexural properties of this laminates. Due to the complexity of the equations governing woven fibers, the experimental method has been used to accurately compare the properties of laminates including fibers with densities of 200, 400 and 600 gsm. The laminates studied in this research have equal thickness and overall density and their difference is in the number and Areal density of the constituent layers. In order to reduce the impact of the manufacturing process and the uniformity of the quality of the parts, the vacuum injection method has been used. Research findings show that Areal density has a significant effect on the properties of laminates and by increasing it in a certain range, the properties of laminates improve. Also, increasing the surface density of a certain value due to the creation of cavities and reducing interlayer contact, has a negative effect on the properties of the laminates. laminates including woven fibers with a density of 400 gsm have higher properties than other laminates and also fibers with a density of 600 gsm have higher properties than laminates containing fibers containing 200 gsm.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی از دیرباز برای حل مسائل فنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ولی نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ میلادی توجه صنایع را با معرفی کامپوزیت‌های پایه پلیمری به سوی خود جلب نمودند. از آن زمان به بعد، مواد کامپوزیتی به مواد رایج مهندسی تبدیل شده و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رشد سریع استفاده از کامپوزیت‌ها مرهون قابلیت آنها در سبک‌سازی سازه‌ها با ارائه خواص مکانیکی مطلوب بوده است، به طوری که در بسیاری از موارد به سادگی جایگزین فلزاتی نظیر فولاد و آلومینیوم شدند [1]. مزیت مواد کامپوزیتی داشتن ویژگی‌های مطلوبی بوده که به تنهایی از طریق هیچکدام از اجزای آن قابل دستیابی نبوده و با به‌کارگیری بهترین خواص اجزای تشکیل دهنده آن به‌دست می‌آید [2].

درصد الیاف به رزین در کامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد که با دانسیته سطحی می‌تواند تغییر نماید. هر چند ماتریس معمولاً دارای چگالی، سختی و استحکام بسیار پایین‌تر از ماده تقویت کننده بوده ولی ترکیب ماده تقویت کننده و ماتریس می‌تواند دارای استحکام و سختی بسیار زیادی بوده و در عین حال چگالی کمی داشته باشد [3].

هنگام طراحی مواد کامپوزیتی باید فاکتورهای بسیاری نظیر نوع تقویت کننده و ماتریس، آرایش هندسی و کسر حجمی اجزای تشکیل دهنده، تنش‌های مکانیکی اعمال شده و محیط کاربری کامپوزیت در نظر گرفته شود. برای مثال با افزایش درصد حجمی ماده تقویت کننده تا یک میزان مشخص می‌توان استحکام و سختی کامپوزیت‌ها را افزایش داد [4].

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی دارای ماتریس پلیمری تقویت شده با الیاف به دلیل نسبت‌های استحکام به وزن و سختی به وزن بالا متداول‌تر و گسترده‌تر از سایر مواد کامپوزیتی بوده و در کاربردهای حساس به وزن نظیر وسایل نقلیه دریایی، هوایی و فضایی اهمیت بسیار زیادی یافته‌اند [5]. کامپوزیت‌های لیفی معمولاً به صورت لایه‌ای هستند بطوریکه از لایه‌های مجزایی از مواد تقویت شده با الیاف تشکیل می‌شوند. در این نوع کامپوزیت‌ها به منظور ایجاد سختی و استحکام مورد نظر در جهت‌های گوناگون، الیاف موجود در هر لایه در جهت‌های مختلف آرایش می یابند [6]. که نمونه‌ای از این نوع لایه‌ها الیاف حصیری می‌باشد.

در یک سازه کامپوزیتی چندلایه، با توجه به خواص مورد نیاز می‌توان از چند نوع تقویت کننده استفاده کرده و ساختار هیبریدی را بوجود آورد. اما معمولاً از یک نوع ماتریس استفاده می‌شود تا یک پیوند خوب بین تک لایه‌ها بوجود آید. کامپوزیت‌های هیبریدی دارای خواصی بوده که یک نوع لیف به تنهایی نمی‌تواند ارائه دهد و به همین دلیل از طریق ترکیب الیاف می‌توان ضمن حفظ مزایای اجزای آن، خواص مورد انتظار را به‌دست آورد و در صورت پایین بودن قیمت الیاف تقویت کننده کمکی، قیمت کامپوزیت نیز کاهش می‌یابد. کامپوزیت‌های هیبریدی با توجه به الگوی هندسی آرایش الیاف به کامپوزیت‌های (الف) بین لایه‌ای، (ب) درون لایه‌ای، (ج) تقویت شده انتخابی، (د) فوق هیبریدی و (ه) یکنواخت تقسیم‌بندی می‌شوند. در هیبریدهای بین لایه‌ای، جنس تقویت کننده لایه‌های مختلف در کامپوزیت چندلایه‌ای گوناگون می‌باشد. هیبریدهای درون لایه‌ای متشکل از ترکیبی از دو یا چند لیف در هر لایه است. در هیبریدهای یکنواخت، الیاف تقویت کننده به طور کاملاً تصادفی با هم مخلوط شده و در کامپوزیت قرار می‌گیرند. در هیبریدهای تقویت شده انتخابی، تقویت کننده‌های اضافی در جایی از کامپوزیت تقویت شده پایه قرار گرفته که استحکام بیشتر مدنظر می‌باشد. در کامپوزیت‌های فوق هیبریدی، فویل‌ها یا لایه‌های کامپوزیتی فلزی با چیدمان و آرایش مشخص در کامپوزیت قرار گرفته است [7].

جهت بررسی تاثیر دانسیته سطحی الیاف حصیری بر روی خواص لمینیت می‌بایست پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده و فقط تفاوت نمونه‌ها در دانسیته سطحی باشد، لذا می‌بایست از یک نوع الیاف و رزین استفاده شده و ساختار هیبریدی نباشد تا بتوان اثر دانسیته سطحی را بررسی نمود.

چهار عامل اصلی که در نهایت خواص مکانیکی را رقم می‌زنند عبارت‌اند از: ۱- خواص مکانیکی الیاف، ۲- کیفیت سطح تماس بین رزین و الیاف، ۳- نسبت حجمی الیاف در کامپوزیت، ۴- جهت قرارگیری الیاف درون فاز زمینه [8].

برخی خصوصیات نهایی کامپوزیت‌ها از قبیل رسانایی، مقاومت الکتریکی، مقاومت در برابر خوردگی و محافظت از الیاف در مقابل سایش بستگی به خواص ماتریس مورد استفاده دارد. عملکرد فاز زمینه در کامپوزیت‌ها را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

نگهداری الیاف در ساختار منسجم، توزیع و یا انتقال نیرو، حفاظت از الیاف درون ساختار، کنترل خواص الکتریکی و شیمیایی الیاف، تحمل نیروهای برشی بین صفحات [8].

ویژگی‌های مورد انتظار از فاز زمینه که عمدتاً به کاربرد آنها بستگی دارد عبارت‌اند از:

۱- از جذب رطوبت پایین برخوردار باشد، ۲- دارای ضریب انبساط حرارتی پایین باشد، ۳- به‌صورت خمیر درآید تا بتواند به الیاف متصل شده و در فاصله بین دسته الیاف نفوذ نماید، ۴- دارای استحکام، مدول و ازدیاد طول قابل قبول باشد، ۵- الاستیک باشد تا بتواند نیروهای اعمالی را به الیاف منتقل کند، ۶- در برابر دماهای بالا مقاومت کند، ۷- از مقاومت شیمیایی مناسبی برخوردار باشد، ۸- دارای ثبات ابعاد باشد [8]. ازجمله رزین‌های پرکاربرد در ساخت صفحات کامپوزیتی رزین پلی استر، رزین فنولیک و رزین اپوکسی می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

لمینیت‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف حصیری کاربرد گسترده‌ای در ساخت سازه شناورهای کامپوزیتی دارند. با توجه به تعداد رشته های موجود در هر تار این نوع از الیاف می‌توانند دانسیته‌های سطحی مختلفی داشته باشند. نوع بافت از نظر دانسیته سطحی می‌تواند بر روی خواص لمینیت و همچنین هزینه های تولید از جمله نفر روز مورد نیاز جهت ساخت شناور تاثیرگذار باشد.هدف از مطالعه حاضر بهینه سازی سازه‌های ساخته شده از چند لایه‌های شامل الیاف با بافت حصیری می‌باشد. با توجه به پیچیدگی های معادلات حاکم بر الیاف با بافت حصیری و دقت روش‌های آزمایشگاهی، جهت بررسی تاثیر دانسیته سطحی الیاف با بافت حصیری بر روی خواص مکانیکی چند لایه ها از روش آزمایشگاهی استفاده شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که دانسیته سطحی تاثیر چشمگیری بر خواص چند لایه‌ها داشته و با افزایش آن در یک محدوده مشخص خواص چند لایه‌ها بهبود می‌یابد، همچنین افزایش دانسیته سطحی از یک مقدار مشخص بدلیل ایجاد حفره و کاهش تماس بین‌لایه‌ای، تاثیر منفی بر خواص چند لایه‌ها خواهد داشت. چند لایه‌های بررسی شده در این تحقیق دارای ضخامت و دانسیته کلی برابری بوده و تفاوت آن‌ها در تعداد و دانسیته سطحی لایه‌های تشکیل دهنده می‌باشد.

کیاست و سنگتابی رفتار مکانیکی پارچه بافت جناقی (شیشه/اپوکسی) با چگالی سطحی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع را تحت بارگذاری به صورت تجربی بررسی نمودند. تمرکز روی تأثیر اندازه دسته الیاف (۳K و ۱۲K)[1] و تراکم بافت پارچه است. نتایج آزمایش‌ها وابستگی زیاد خواص مکانیکی چندلایه‌ها به چگالی سطحی را نشان می‌دهند. چندلایه‌ها با چگالی سطحی کم، رفتار خطی نمودار تنش-کرنش را تا نقطه‌ی شکست حفظ می‌کنند، درحالی که در نمودار تنش-کرنش چندلایه با چگالی سطحی بالا، قبل از شکست نهایی چندین جدایش در آن دیده می‌شود، که باعث غیر خطی شدن نمودار می‌شود[9].

انگ و ماریتی [10] تاثیر دانسیته سطحی الیاف بافته شده ۵۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم بر مترمربع و تعداد لایه‌ها را بر خواص حرارتی و خمشی سازه کامپوزیتی (شیشه/ اپوکسی) به صورت تجربی بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که افزایش چگالی سطحی باعث افزایش خواص خمشی و کاهش ضریب انبساط حرارتی می‌شود.

آسی [11] اثر دانسیته سطحی الیاف بافته شده با دانسیته‌های ۲۰۰، ۲۷۰ و ۳۰۰ گرم بر مترمربع را بر روی استحکام نهایی سازه کامپوزیتی (شیشه/اپوکسی) در محل اتصال پینی به صورت تجربی بررسی نموده است. بر روی هر قطعه یک حفره ایجاد نموده و قطعات را تحت آزمون کشش قرار دادند. تاثیر پارامترهای نسبت قطر پین به فاصله از لبه‌ی قطعه و عرض قطعه نسبت به قطر پین را بر روی استحکام سازه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داده است که استحکام نهایی سازه به چگالی سطحی الیاف، کسر حجمی الیاف، و شکل سازه وابسته است.

لی و همکاران [12] اثر چگالی سطحی بر خواص استاتیکی و دینامیکی الیاف طبیعی (رامی) را بررسی نمودند. مکانیسم‌های شکست با استفاده از تست آلتراسونیک و SEM[2] تحلیل شده‌است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استحکام کششی سازه کامپوزیتی ساخته شده از الیاف رامی با افزایش دانسیته سطحی افزایش می‌یابد. بیشترین استحکام کششی در دانسیته سطحی ۶۷,۳ رخ داده است. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که چگالی سطحی اثر قابل توجه‌ای بر مودهای شکست در آزمون ضربه ناشی از افتادن جسم سنگین دارد.

۲ - معادلات اساسی حاکم

ساده‌ترین تئوری جهت استخراج معادلات اساسی حاکم بر چندلایه‌ها تئوری کلاسیک چندلایه‌ها می‌باشد. در صورتی که جواب‌های بسیار دقیق مدنظر باشد می‌توان از تئوری‌های مرتبه بالا استفاده نمود. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش تست تجربی استفاده شده است در اینجا فقط معادلات استاندارد جهت استخراج نمودار تنش- کرنش آورده شده است. تست‌ها مطابق استاندارد ASTM انجام گرفته و جهت استخراج نمودارهای تنش – کرنش، از معادلات ارائه شده دراین استاندارد استفاده شده است.

طبق استاندارد تست خمش، تنش از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \qquad (۱)$$

که در این رابطه σ تنش در صفحه میانی بر حسب مگاپاسکال ، P نیروی وارد شده بر حسب نیوتن، L و b و h نیز به ترتیب طول تکیه‌گاه، پهنای تیر و ضخامت تیر بر حسب میلیمتر می‌باشند.

همچنین طبق استاندارد استفاده شده کرنش از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \qquad (۲)$$

۳ – مواد و روش ساخت

الیاف شیشه با ساختار بافت حصیری و چگالی‌های سطحی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع برای ساخت چندلایه‌ها استفاده شده است.

[1] k واحدی جهت بیان تعداد رشته‌ها در هر تار یا پودر الیاف می‌باشد که برابر ۱۰۰۰ رشته می‌باشد.

[2] scanning electron microscope

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

در جدول ۱ مشخصات الیاف‌های مورد استفاده آمده است. تعداد دسته الیاف در راستای تار و پورد در هر سه نوع پارچه الیاف شیشه برابر است. تعداد دسته الیاف در هر ۱۰ سانتی‌متر در محدوده ۲ تا ۴ عدد می‌باشد. ضخامت الیاف در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ میلیمتر محاسبه شده است.

جدول ۱ - مشخصات الیاف بافته شده حصیری مورد استفاده

مشخصه	کد الیاف		
	P2	P4	P6
الگوی بافت	حصیری	حصیری	حصیری
دانسیته بافت[picks/cm]	۴	۳/۲	۲
دانسیته سطحی بافت [g/m^2]	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
ضخامت بافت [mm]	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۵

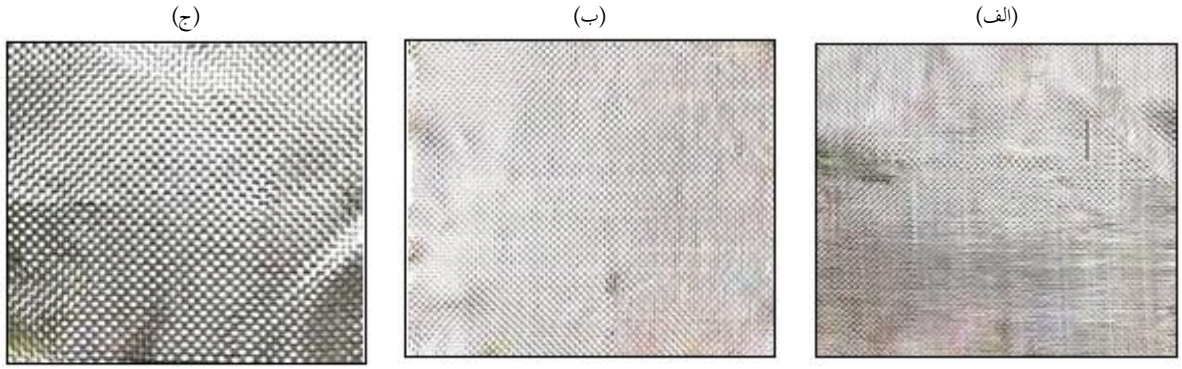
رزین اپوکسی EPL 1012 و سخت کننده EPH 112 برای ساخت چندلایه‌ها استفاده شده است. مشخصات رزین و سخت کننده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ - مشخصات رزین مورد استفاده در ساخت لمینیت‌ها

مشخصه	واحد	رزین	هاردنر
کد	-	EPL1012	EPH112
نسبت وزنی ترکیب	-	۱۰۰	۱۵
ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد	[mPa s]	۹۰۰-۱۱۰۰	۳۰
زمان ژل‌شدن	[Min]	۲۴-۶۰	-
مدت زمان عمل‌آوری	[Min]	۲۰-۵۰	-

نسبت ترکیب این نوع رزین با هادنر g ۱۰۰ گرم به ۱۵ گرم هادنر می‌باشد. حدود یک ساعت زمان برای استفاده از این رزین بعد از مخلوط شدن فرصت است تا عملیات ساخت انجام شود و بعد از این زمان ویسکوزیته ترکیب به شدت بالا می‌رود و قابل استفاده نخواهد بود.

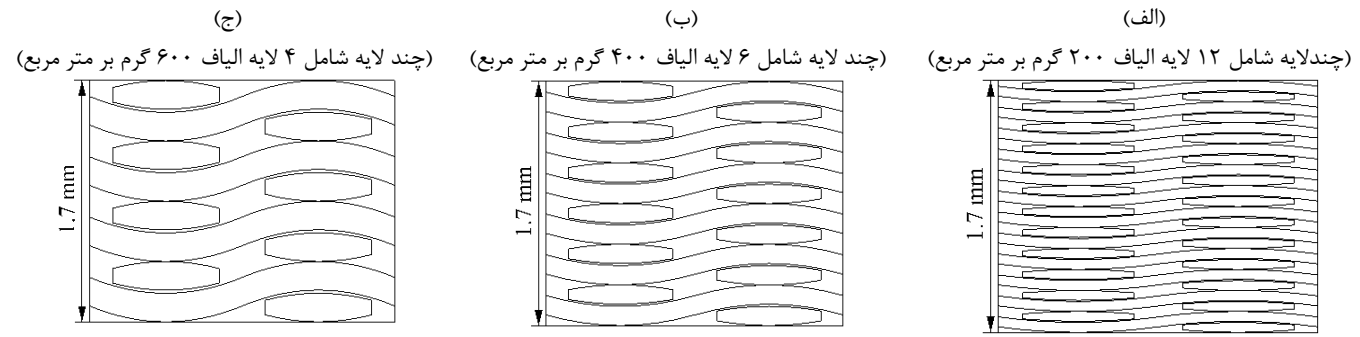
سه نوع چندلایه مورد بررسی با تعداد لایه‌های مختلف به نحوی ساخته شده‌اند که دانسیته و ضخامت کلی آن‌ها برابر بوده و تفاوت آن‌ها در دانسیته سطحی الیاف تشکیل دهنده و تعداد لایه‌ها می‌باشد. دانسیته کلی لمینیت‌ها ۲۴۰۰ گرم بر متر مربع بوده اما چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع از ۱۲ لایه تشکیل شده است. چند لایه شامل الیاف ۴۰۰ گرم بر متر مربع از ۶ لایه تشکیل شده است. همچنین چند لایه شامل الیاف با دانسیته ۶۰۰ گرم بر متر مربع از ۴ لایه تشکیل شده است. شکل ۲ تصویر الیاف‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ نمای برش خورده سه نوع چند لایه آورده شده است که دارای ضخامت و دانسیته کلی یکسانی هستند و تنها تفاوت آن‌ها در دانسیته لایه‌های تشکیل دهنده و تعداد آن می‌باشد. ضخامت چندلایه ساخته شده از الیاف دانسیته ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع در حدود ۱/۸ میلیمتر می‌باشد. با تقسیم ضخامت کلی چند لایه‌ها بر تعداد لایه‌های تشکیل دهنده ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده بدست خواهد آمد که در جدول ۱ ارائه شده است. تجعد یا جمع‌شدگی ناشی از شکل سینوسی بافت که در واقع منجر به کوتاه‌شدگی بافت می‌شود در محدوده ۰/۰۳۲ تا ۰/۰۴۱ می‌باشد.



شکل ۱ – الیاف مورد استفاده در پژوهش، با دانسیته‌های سطحی مختلف (الف): ۲۰۰ گرم بر متر مربع، (ب): ۴۰۰ گرم بر متر مربع، (ج): ۶۰۰ گرم بر متر مربع

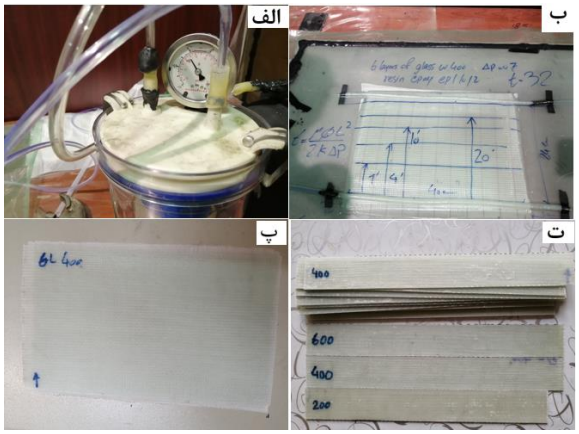
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]



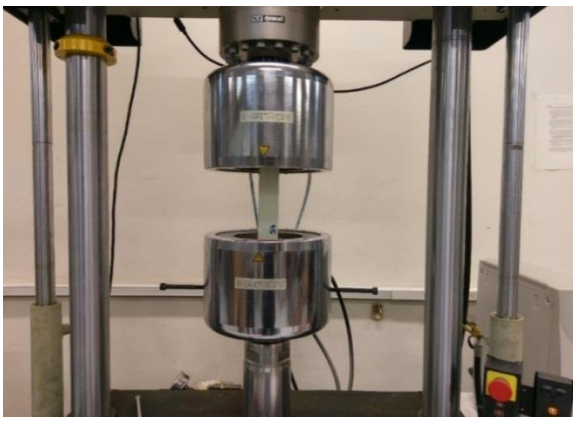
شکل ۲ – شماتیکی از سطح مقطع چندلایه‌های با دانسیته سطحی کلی برابر ۲۴۰۰ گرم بر متر مربع شامل الیاف‌های با دانسیته سطحی مختلف (الف): ۲۰۰ گرم بر متر مربع، (ب): ۴۰۰ گرم بر متر مربع، (ج): ۶۰۰ گرم بر متر مربع

جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر دانسیته سطحی و جلوگیری از تاثیر روش ساخت، بین روش دستی و تزریق رزین در خلاء، روش تزریق در خلاء انتخاب شده است. شکل ۳ فرآیند تولید لمینیت‌ها را نشان می‌دهد.



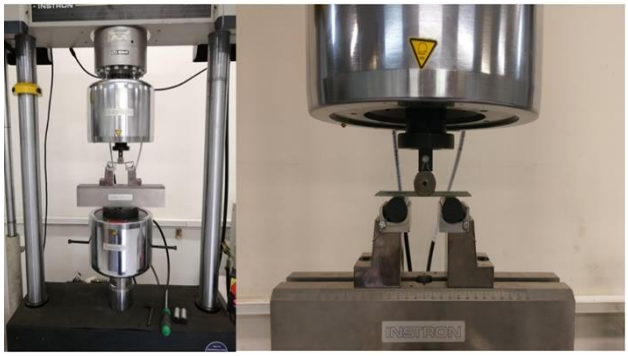
شکل ۳- تولید لمینیت به روش تزریق خلاء و ساخت نمونه‌های تست

تست‌های کشش و خمش در دستگاه تست کشش و خمش شرکت اینسترن[3] انجام گرفت. شکل ۴ فرآیند تست کشش لمینیت‌ها را در دستگاه مربوطه نشان می‌دهد.



شکل ۴- دستگاه تست کشش لمینیت‌ها

شکل ۵ فرآیند تست خمش لمینیت‌ها را در دستگاه مربوطه نشان می‌دهد.



شکل ۵- تست خمش سه نقطه‌ای در دستگاه تست لمینیت‌ها

۴- نتایج تست تجربی

در ادامه نتایج تست کشش و خمش در دو بخش مجزا ارائه شده است. تست کشش مطابق دستورالعمل تست کشش ASTM D3039 انجام شده است. همچنین تست خمش سه‌نقطه‌ای مطابق این استاندارد با کد D7264/D7264M-15 انجام شده است. فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ دیتا در ثانیه بوده که پس از استخراج نمودار بار جابجایی با استفاده از روابط موجود، نمودار تنش-کرنش استخراج گردید.

۴-۱- نتایج تست کشش

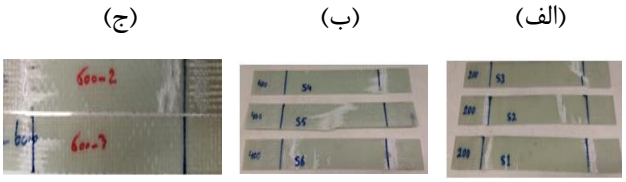
شکل ۶ شماتیکی از تعدادی از نمونه‌های آزمایش پس از انجام آزمون کشش را نشان می‌دهد. در فرآیند استخراج و مقایسه نتایج از نتایج لمینیت‌هایی که در قسمت میانی دچار شکست شده‌اند استفاده شده است. همچنین پس از استخراج نمودارهای مختلف برای هر یک از چند لایه‌ها، نمودار میانی انتخاب شده تا با نتایج

[3] INSTRON

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

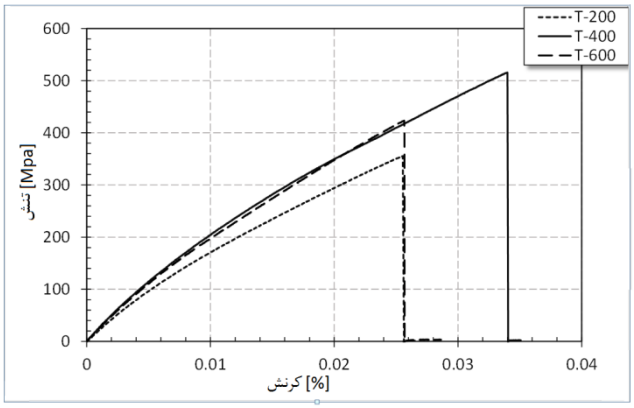
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

نمودارهای چند لایه‌های دیگر که از لایه‌های با دانسیته سطحی مختلف ساخته شده‌اند مورد مقایسه قرار گیرد.



شکل ۶- شکل هندسی قطعات پس از انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، قطعات ساخته شده از الیاف با دانسیته الف) ۲۰۰ گرم بر متر مربع، ب) ۴۰۰ گرم بر متر مربع، ج) ۶۰۰ گرم بر متر مربع

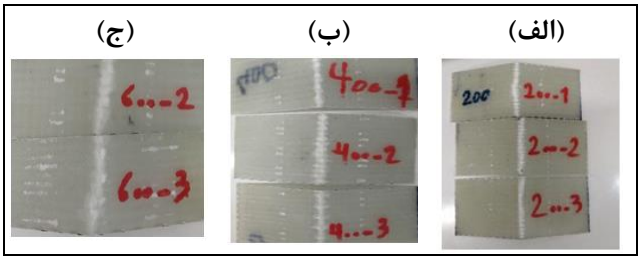
نمودار تنش کرنش لمینیت‌های ساخته شده از ۳ نوع الیاف با دانسیته‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع در شکل ۷ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود چندلایه ساخته شده از الیاف با دانسیته سطحی ۴۰۰ گرم بر متر مربع دارای بیشترین استحکام کششی می‌باشد و پس از آن چندلایه ساخته شده از الیاف حصیری ۶۰۰ گرم بر متر مربع دارای استحکام کششی بیشتری است. کمترین استحکام کششی نیز مربوط به چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع است.



شکل ۷- نمودار تنش کرنش لمینیت‌های با دانسیته سطحی مختلف

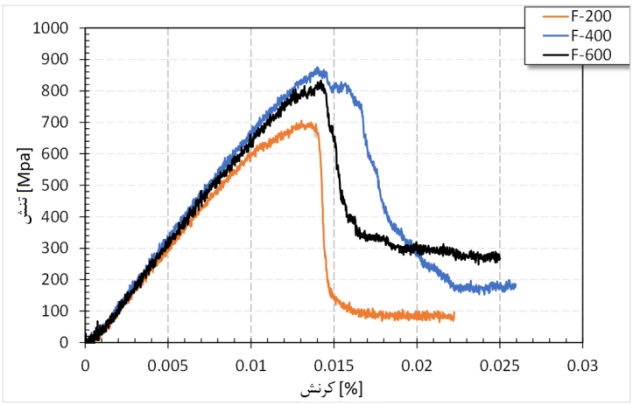
۴-۱- نتایج تست خمش

شکل ۸ شماتیکی از تعدادی از نمونه‌های آزمایش پس از آزمون خمش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- شکل هندسی قطعات پس از انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، قطعات ساخته شده از الیاف با دانسیته الف) ۲۰۰ گرم بر متر مربع، ب) ۴۰۰ گرم بر متر مربع، ج) ۶۰۰ گرم بر متر مربع

نمودار تنش کرنش لمینیت‌های ساخته شده از ۳ نوع الیاف با دانسیته‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع در شکل ۹ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود چندلایه ساخته شده از الیاف با دانسیته سطحی ۴۰۰ گرم بر متر مربع دارای بیشترین استحکام خمشی می‌باشد و پس از آن چندلایه ساخته شده از الیاف حصیری ۶۰۰ گرم بر متر مربع دارای استحکام خمشی بیشتری است. کمترین استحکام خمشی نیز مربوط به چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع است.



شکل ۹- نموار تنش-کرنش حاصل از تست خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌های شامل لایه‌های با دانسیته سطحی، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع

۵- بحث و تحلیل نتایج

۵-۱- تست کشش

نتایج تست کشش برای ۳ نمونه چندلایه استخراج گردید و نمودار تنش-کرنش نشان می‌دهد که چند لایه شامل الیاف ۴۰۰ گرم بر متر مربع دارای استحکام شکست بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها می‌باشد. پس از آن چند لایه شامل الیاف با دانسیته ۶۰۰ گرم بر متر مربع بیشترین استحکام کششی را دارد. در این بین چندلایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع دارای کمترین استحکام کششی می‌باشد. هر سه نمونه چند لایه در ابتدا دارای مدول الاستیسیته برابری بوده و با افزایش بار وارد شده، مدول کششی چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. همچنین مدول کششی چند لایه ۴۰۰ گرم با کمی اختلاف بیشتر از مدول کششی چند لایه شامل الیاف بافت ۶۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد. بررسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش بار وارده شیب نمودار تنش – کرنش نمونه‌ها کاهش یافته است اما نمونه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع دچار کاهش بیشتری شده است و شیب نمودار چندلایه شامل الیاف ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع به هم نزدیک‌تر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

می‌باشد. در ادامه چندلایه شامل الیاف ۴۰۰ گرم بر متر مربع استحکام کششی بیشتری از خود نشان داده و استحکام کششی آن در حدود ۲۲ درصد بیشتر از چند لایه شامل الیاف ۶۰۰ گرم بر متر مربع و ۴۳ درصد بیشتر از چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد.

۵-۲- تست خمش

نتایج تست‌های خمش سه نقطه‌ای روی چندلایه‌های با دانسیته سطحی مختلف استخراج گردید. داده‌ها به‌صورت منحنی‌های تنش کرنش ارائه شده است. زمان انجام هر تست خمش سه نقطه‌ای حدود ۲ دقیقه بوده که هر نمودار آزمایشی از حدود ۱۲۴۷ داده تشکیل شده است. برای هر چندلایه، دو یا سه تست در یک نمودار مقایسه شده است تا همبستگی نتایج بین نمونه‌های تست شده برای تمام چندلایه‌ها نشان داده شود. از بین نمونه‌های مشابه، نمونه‌ای که دارای نمودار میانی بوده است، انتخاب شده است. نمودار تنش کرنش در هر سه نمونه بعد از رسیدن به تنش ماکزیمم و شکستن یکباره قطعه به‌صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. از بین قطعات، چندلایه با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر متر مربع نسبت به چندلایه‌ها با چگالی‌های ۲۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع قبل از به وجود آمدن خرابی، تنش بیشتری را تحمل می‌کند و حالت بهینه می‌باشد. بین چندلایه‌ها با چگالی سطحی ۲۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع، چندلایه با چگالی سطحی ۶۰۰ گرم بر متر مربع استحکام خمشی از خود نشان داده است.

بیشترین تنش قبل از شکست برای قطعه با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر متر مربع در آزمون خمش سه نقطه‌ای برابر ۸۶۶ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به چگالی ۶۰۰، ۷ درصد و نسبت به قطعه با چگالی ۲۰۰، ۲۳/۷ درصد برتری دارد. نمونه های با چگالی سطحی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع دارای کرنش نهایی یکسان می‌باشند. بیشترین تنش قبل از شکست برای نمونه با چگالی سطحی ۶۰۰ برابر ۸۱۰ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به نمونه ساخته شده از الیاف با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع که مقدار بیشینه تنش آن قبل از شکست ۷۰۰ مگاپاسکال است، ۱۵/۷ درصد برتری دارد.

دو عامل مهم که بر استحکام قطعات کامپوزیتی با چگالی سطحی‌های مختلف اثر گذار هستند میزان چسبندگی بین‌لایه‌ای الیاف و درصد حجمی الیاف به رزین می‌باشند. با افزایش چگالی سطحی درصد حجمی افزایش می‌یابد و در مقابل به دلیل تجعد یا جمع‌شدگی الیاف باعث به وجود آمد حفره در الیاف می‌شود و همین عامل باعث کاهش استحکام می‌شود.

۶ – جمع‌بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر تاثیر دانسیته سطحی الیاف حصیری بر روی خواص کششی و خمشی چندلایه‌های شیشه-اپوکسی به روش تست تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. تست‌ها روی سه نمونه لمینیت با دانسیته سطحی کلی برابر انجام گرفت که تفاوت آن‌ها در تعداد و دانسیته سطحی لایه‌های تشکیل دهنده آن‌ها بود. لمینیت شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع از ۱۲ لایه، لمینیت شامل الیاف ۴۰۰ گرم بر متر مربع از ۶ لایه و لمینیت شامل الیاف ۶۰۰ گرم بر متر مربع از ۴ لایه تشکیل شده‌اند. در واقع هر یک از این سه لمینیت دارای دانسیته سطحی یکسان (۲۴۰۰ گرم بر متر مربع) و ضخامت برابری هستند. نتایج نشان داد که بین نمونه‌های مورد مطالعه، چند لایه‌های ساخته شده از الیاف حصیری با دانسیته سطحی ۴۰۰ گرم بر متر مربع دارای بیشترین استحکام کششی و خمشی می‌باشد و پس از آن چند لایه‌های ساخته شده از الیاف حصیری با دانسیته سطحی ۶۰۰ گرم بر متر مربع دارای استحکام کششی و خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده از الیاف با دانسیته سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد. با افزایش دانسیته سطحی تا حدودی خواص مکانیکی افزایش می‌یابد اما در نمونه‌های با دانسیته خیلی بالا بدلیل تغییر شکل شدید در ساختار بافت الیاف، حباب دار شدن چندلایه و همچنین قرار نگرفتن الیاف در راستای بارگذاری، خواص کاهش می‌یابد. در واقع در نمونه‌های با دانسیته خیلی بالا درصد رزین و حباب افزایش یافته و استحکام کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با دانسیته پایین، تار و پود الیاف زاویه کمتری نسبت به صفحه قرارگیری الیاف دارد و اتصال بین‌لایه‌ای کاهش می‌یابد. در نتیجه چند لایه زودتر دچار شکست و رشد خرابی خواهد شد. این موضوع در مطالعات محققیق دیگر نیز مشاهده شده است. لذا در طراحی ساختارهای لمینیتی می‌بایست علاوه بر اینکه دانسیته سطحی کل لمینیت مورد توجه قرار گیرد، بایستی از لایه‌هایی استفاده نمود که از دانسیته سطحی مناسبی برخوردار باشند تا علاوه بر اتصال بین-لایه‌ای مناسب، درصد حباب کمتری در چندلایه را به همراه داشته باشد. در واقع لایه‌ها به طور کلی خیلی ظریف یا زمخت نباشند.

چندلایه‌های مورد بررسی در تست کشش و خمش در یک فرآیند ساخته شده و از یک قطعه با مشخصات مشابه برش داده شده‌اند اما مشاهده می‌شود که در بارگذاری کششی چندلایه شامل دانسیته سطحی ۶۰۰ گرم بر متر مربع عملکرد بهتری نسبت به چند لایه شامل الیاف ۲۰۰ گرم بر متر مربع دارد و حال آنکه نتایج در تست خمش متفاوت بوده و در تست خمش چند لایه تشکیل شده از الیاف با دانسیته سطحی ۲۰۰ عملکرد بهتری نسبت به چند لایه شامل الیاف ۶۰۰ گرم بر متر مربع دارد که این رفتار چند لایه‌ها می‌تواند بدلیل مدهای متفاوت شکست در بارگذاری خمش و کشش باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]

۹ – مراجع

1- S. K. Mazumdar, "Composites manufacturing–materials, product and process engineering–CRC Press," Compos. Manuf., 2002.
2- J. N. Reddy, Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. CRC press, 2003.
3- R. F. Gibson, Principles of composite material mechanics. CRC press, 2016.
4- G. Staab, Laminar composites. Butterworth-Heinemann, 2015.
5- R. M. Jones, Mechanics of composite materials. CRC press, 1998.
6- M. H. Datoo, Mechanics of fibrous composites. Springer Science & Business Media, 2012.
7- F. Sarasini et al., "Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties," Mater. Des., vol. 49, pp. 290–302, 2013.
8- R. Jones, "Mechanics of Composite Materials, (Taylor & Francis Inc., Philadelphia, PA, USA, 1999)."
9- M. S. Kiasat and M. R. Sangtabi, "Effects of fiber bundle size and weave density on stiffness degradation and final failure of fabric laminates," Compos. Sci. Technol., vol. 111, pp. 23–31, 2015.
10- K. M. Eng, M. Mariatti, N. R. Wagiman, and K. S. Beh, "Effect of different woven linear densities on the properties of polymer composites," J. Reinf. Plast. Compos., vol. 25, no. 13, pp. 1375–1383, 2006.
11- O. Asi, "Effect of different woven linear densities on the bearing strength behaviour of glass fiber reinforced epoxy composites pinned joints," Compos. Struct., vol. 90, no. 1, pp. 43–52, 2009.
composites," Acta Phys. Pol. A, vol. 132, no. 3, pp. 879–882, 2017.
12- H. Ma, Y. Li, Y. Shen, L. Xie, and D. Wang, "Effect of linear density and yarn structure on the mechanical properties of ramie fiber yarn reinforced composites," Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 87, pp. 98–108, 2016.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.8.9]