

Examining In-Plane Shear Damage in Composite Cylinders Through the Use of Acoustic Emission Techniques

Mehdi Farajpour¹, Mehdi Ahmadi Najafabadi² 

¹ Department of Engineering, Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran. Email: mehdi.farajpour@aut.ac.ir

² Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: aahmadin@aut.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 30 April 2023

Revised 21 April 2025

Accepted 30 May 2025

Keywords:

Filament winding; In-plane Shear properties; Damage Mechanisms; Acoustic emission

ABSTRACT

The objective of this study was to examine the in-plane shear properties of filament-wound composite cylinders and assess the associated damage mechanisms using acoustic emission techniques. Two distinct composite materials, namely carbon/epoxy and glass epoxy, were manufactured for this purpose. The cylinders were subjected to torsion load conditions in accordance with ASTM D5448. Throughout the testing process, various parameters such as torque, angle of torsion, and strain were meticulously recorded. Additionally, the acoustic emission sensors were utilized to capture signals indicating the occurrence of damages. The findings of the study indicate that the in-plane shear strength and shear modulus of the carbon/epoxy specimens surpass those of the glass/epoxy counterparts. The results from acoustic emission testing indicated that in the CFRP specimens, there were no instances of fiber/matrix debonding. Instead, the main mode of damage observed was fiber breakage, accounting for approximately 71% of the total damage detected. On the other hand, in the GFRP specimens, the primary damage mechanism was found to be fiber/matrix debonding, making up approximately 50% of the overall damage recorded.

Cite this article: Farajpour, M. & Ahmadi Najafabadi, M. (2024). Examining In-Plane Shear Damage in Composite Cylinders Through the Use of Acoustic Emission Techniques. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (1), 85-96.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.433327.1139>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بررسی آسیب برشی داخل صفحه در سیلندرهای کامپوزیت از طریق استفاده از تکنیک

آکوستیک امیشن

مهدی فرج پور^۱ | مهدی احمدی نجف آبادی^۲ ✉

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران، ایران، رایانامه: mehdi.farajpour@aut.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، رایانامه: aahmadin@aut.ac.ir

چکیده:

هدف از این مطالعه بررسی خواص برشی درون صفحه استوانه‌های کامپوزیت رشته پیچی و ارزیابی مکانیزم‌های آسیب مرتبط با استفاده از تکنیک آکوستیک امیشن بود. دو ماده کامپوزیتی مجزا، یعنی کربن/اپوکسی و اپوکسی شیشه، برای این منظور ساخته شد. قطعات تحت شرایط بار پیچشی مطابق با ASTM D5448 قرار گرفتند. در این پژوهش، پارامترهای مختلفی مانند گشتاور، زاویه پیچش و کرنش به دقت ثبت شدند. علاوه بر این موارد، از حسگرهای نشر آوایی برای ثبت سیگنال‌هایی استفاده شد که وقوع شکست را نشان می‌دهند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که استحکام برشی درون صفحه‌ای و مدول برشی نمونه‌های کربن/اپوکسی از نمونه‌های شیشه/اپوکسی بیشتر است. نتایج حاصل از آزمایش نشر آوایی در نمونه‌های کربن/اپوکسی نشان داد که در این نمونه‌ها هیچ موردی از جداشدگی الیاف/ماتریس وجود ندارد. براساس تحلیل انرژی، مد اصلی شکست در این نمونه‌ها به صورت شکست الیاف شناسایی شد بطوریکه ۷۱ درصد از کل شکست‌های مشاهده شده را در بر می‌گیرد. همچنین مکانیزم شکست اولیه در نمونه‌های شیشه/اپوکسی به صورت جداشدگی الیاف/ماتریس است که تقریباً ۵۰٪ از کل شکست‌های ثبت شده را شامل می‌شود.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۰/۲۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۰۹

کلیدواژگان:

رشته پیچی،
برش درون صفحه،
مکانیزم‌های خرابی،
نشر آوایی،

استناد: فرج پور، مهدی و احمدی نجف آبادی، مهدی (۱۴۰۳). بررسی آسیب برشی داخل صفحه در سیلندرهای کامپوزیت از طریق استفاده از تکنیک آکوستیک امیشن. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۱)، ۸۵-۹۶.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.433327.1139>



۱- مقدمه

این پژوهش به منظور ارزیابی خواص برشی درون صفحه‌ای استوانه‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده^۱ (FWC) و ارزیابی مکانیزم‌های شکست‌های مربوط به آن، با استفاده از روش انتشار امواج صوتی^۲ (AE) انجام شده است. فرایند رشته‌پیچی با دو رشته متمایز روش بسیار دقیقی است که سبب بوجود آمدن خواص ایزوتروپیک / همسانگردی بی‌نظیری در تمام جهت‌های کامپوزیت می‌شود. به همین دلیل، از این فرآیند به صورت روشی مقرون به صرفه برای تولید پیوسته بسیاری از اجزای شناخته‌شده در صنعت استفاده شده است [۱]. کامپوزیت‌های ساخته شده با این روش دارای نسبت استحکام به وزن بالا، توانایی پایداری در برابر نیروهای مختلف، توانایی بکارگیری در محیط‌های خورنده را دارند، به همین دلیل در بسیاری از صنایع و به طور ویژه در برج‌های خنک‌کننده و خطوط لوله انتقال نفت و گاز صنعت پتروشیمی، به صورت درایو شفت‌های کامپوزیتی برای اجزای چرخان کاربرد دارند. رفتار شکست شفت‌های فلزی با رفتار شکست درایو شفت‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و کربن متفاوت می‌باشد. به طور خاصی، بروز هر گونه شکستی در شفت‌های فلزی به هنگام کار می‌تواند سبب وارد شدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری به افراد و به تجهیزات پیرامون آن منجر شود. با توجه به ماهیت شکست‌های بوجود آمده در شفت‌های کامپوزیتی، پیدایش مکانیزم‌های مختلف شکست در این نوع سازه‌ها قابل پیش‌بینی می‌باشد، از این رو می‌توان از بروز اختلال در عملکرد این سیستم نیز جلوگیری کرد. پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد روش‌های مختلف بارگذاری مانند: فشار ترکیبگی [۲]، ضربه [۳-۵] خستگی [۶، ۷] بر روی سازه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن انجام شده است. در ادامه به بررسی این پژوهش‌ها پرداخته می‌شود. در مطالعه تجربی و عددی چانگ^۳ و همکاران [۸]، ویژگی‌های پیچش‌پسماند شفت‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی، اپوکسی/کربن تحت بارگذاری ضربه‌ای بررسی شده است. در این پژوهش با قرار دادن شفت‌های

کامپوزیتی در معرض ضربه‌های ناشی از سطوح مختلف انرژی، نمودارهای نیرو-زمان و انرژی-زمان بدست‌آمده از آزمایش‌های ضربه ثبت شده است. برای شبیه‌سازی آزمایش‌های پیچشی نیز از نرم‌افزار تحلیل المان محدود^۴ (FEA) با مدل ارتوتروپیک‌الاستیکی استفاده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، بین مقادیر عددی و تجربی بدست آمده از آزمایش ضربه همبستگی مناسبی وجود دارد.

در پژوهش منصور و همکاران [۹] نیز تاثیر بارگذاری ضربه‌ای بر استحکام مکانیکی سازه بررسی شده است. هدف از این پژوهش تمرکز بر رفتار پیچشی لوله‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه بود که طی فرایند رشته‌پیچی $\pm 45^\circ$ و با رویکرد ترکیبی تجربی- عددی تهیه شده بودند. برای این منظور، ابتدا رفتار پیچشی لوله‌های کامپوزیتی با کمک نرم افزار تحلیل المان محدود (FEA) شبیه‌سازی شد و در ادامه مقادیر خطی تنش‌های نرمال و برشی بدست‌آمده با نتایج تجربی مقایسه گردید.

ژون^۵ و همکاران [۱۰] عملکرد شفت‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن/اپوکسی را در محیط‌های حرارتی و خورنده مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد در حضور محیط خورنده، دما تاثیرات بیشتری بر کاهش مدول پیچشی کشسانی و استحکام مکانیکی شفت‌های کامپوزیتی دارد. همچنین، ترک خوردگی رزین و شکست الیاف مهم‌ترین عوامل شکست در لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری پیچشی در دمای 110° شناخته شدند.

با کاهش جرم در حال دوران در درایو شفت‌ها می‌توان افت‌های توان ناشی از بارگذاری پیچشی را کاهش داد. همچنین با توجه به تحمل زوایای پیچشی بزرگی که شفت‌های کامپوزیتی دارند، کاربردهای این شفت‌ها تحت بارگذاری پیچشی مناسب به نظر می‌رسد. در دهه گذشته بارگذاری‌های پیچشی بر روی شفت‌ها موضوع اصلی پژوهش‌های فراوانی بوده است. اثرات زوایای پیچش و ترتیب چیدن رشته‌ها را بر مقاومت پیچشی و عمر خستگی سازه‌های کامپوزیتی مورد ارزیابی محققان فراوانی قرار گرفتند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این پژوهش، نقش

¹ Filament Winding Composite

² Acoustic Emission

³ Chang

⁴ Finite Element Analysis

⁵ Xun

پژوهشگران با کمک روش AE به بررسی مکانیزم‌های شکست در سازه‌های استفاده‌شده در صنعت پرداخته‌اند. روندی^۳ و همکاران [۱۳] از طریق روش AE به بررسی رشد ترک در صفحات لایه‌ای کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارهای استاتیکی و بارگذاری خستگی پرداخته‌اند. پژوهشگران با انجام این آزمایش‌ها و آنالیز کردن سیگنال‌های AE توانسته‌اند مکانیزم‌های شکست مختلفی را شناسایی کنند و در ادامه این مکانیزم‌ها را با روش k-means و آنالیز مولفه اصلی^۴ (PCA) دسته‌بندی کنند. لی سک^۵ و همکاران [۱۴] برای آزمایش طاق (چقرمگی) شکست کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی از روش نشر آوایی استفاده کرده‌اند. سعیدی‌فر و همکاران [۱۵] با استفاده از روش نشر آوایی به بررسی شکست لایه‌لایه‌ای شدن در صفحات لایه‌ای کامپوزیت شیشه/اپوکسی پرداخته‌اند. در این پژوهش با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج صوتی و انرژی جمع‌شده سیگنال‌های نشر آوایی، رابطه‌ای برای رشد ترک بین لایه‌ای تعیین شد. محمدی و همکاران [۱۶] در بررسی مکانیزم‌های شکست در نمونه‌های کامپوزیتی دارای سوراخ باز توانسته‌اند این مکانیزم‌ها را با استفاده از الگوهای مرجع دسته‌بندی کنند. رفاهی و همکاران [۱۷، ۱۸] تابع سنتری/نگهبان را معرفی کرده‌اند. این تابع به نسبت انرژی کرنشی به انرژی سیگنال‌های AE بوجودآمده در حین بارگذاری بستگی دارد. این نوع بارگذاری برای تعیین طاق شکست و بررسی رفتار لایه لایه شدن بر روی نمونه‌ها اعمال شده است. گوتکین^۶ و همکاران [۱۹] از روش AE برای دسته‌بندی مکانیزم شکست در ۵ نمونه مختلف با نام‌های کششی، کششی فشرده، فشاری فشرده، تیر یکسرگردار جفتی و نمونه خمشی^۴ نقطه استفاده کرده‌اند. فتوحی و همکاران [۲۰] با استفاده از روش خوشه‌بندی میانگین‌های C فازی به دسته‌بندی سیگنال‌های AE پرداخته است تا بتواند مکانیزم‌های شکست پدیدآمده تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی دارای لایه‌ای شدن اولیه در مرکز نمونه‌ها

الیاف کربنی نسبت به الیاف شیشه در افزایش سفتی پیچشی لوله‌های کامپوزیتی مؤثرتر بوده است و پیچش الیاف با زاویه 45° بیشترین اثر را در سفتی پیچشی داشته است. موتاشر^۱ و همکاران [۱۱] در بررسی تأثیر زاویه پیچش رشته‌ها، تعداد لایه‌ها و چیدمان لایه‌ها بر بیشترین استحکام پیچشی سازه‌های مرکب آلومینیوم/کامپوزیت به این نتیجه دست یافته‌اند که با افزایش ضخامت شفت کامپوزیتی ظرفیت پیچشی آن نیز افزایش می‌یابد. میناک^۲ و همکاران [۱۲] استحکام شفت‌های کامپوزیتی ساخته‌شده از الیاف کربن پیش‌آغشته با اپوکسی را پس از اجرای آزمون ضربه پاندولی، تحت بارگذاری‌های پیچشی ارزیابی کردند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این پژوهش، مکانیزم لایه‌ای شدن سهم بزرگی در شکست شفت‌های کامپوزیتی داشته‌است. موتاشر [۱۱] اثرات تعداد لایه‌ها، زاویه پیچش رشته‌ها و حساسیت مش لوله‌های کامپوزیتی را تحت بارگذاری‌های پیچشی بررسی کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد افزایش ضخامت شفت و نزدیک شدن زاویه پیچش رشته‌ها به 45° ، سبب افزایش استحکام ایستایی لوله کامپوزیتی می‌شود. نتایج مشابهی در مرجع [۸] بدست آمده است. با کمک روش‌های متداولی مانند تصویربرداری SEM و پردازش تصویر دیجیتال به ندرت می‌توان نوع مکانیزم شکست‌های مختلفی را شناسایی کرد که در هنگام اعمال بارگذاری‌های پیچشی بر روی سازه‌های کامپوزیتی بوجود می‌آیند. همچنین روش‌ها بیان شده نمی‌توانند اطلاعاتی در مورد خواص فیزیکی شکست بوجودآمده ارائه نمایند. در مقابل در روش AE از خصوصیات سیگنالی برای شناسایی مدهای شکست استفاده می‌شود. این روش توانایی شناسایی مکانیزم‌های مختلف شکست را از طریق انرژی‌های کرنشی بوجودآمده از آن‌ها دارد. هر منبعی امواج صوتی را با دامنه، فرکانس و انرژی مشخصی تولید می‌کند. در مکانیزم شکست نیز انرژی و دامنه امواج صوتی به بزرگی شکست و رویدادهای آن بستگی دارد. به عبارت دیگر، سیگنال‌های انتشار صوت رویدادی سریع و قوی در مقایسه با آنچه در رویدادی کند و ضعیف تولید می‌شود قوی‌تر است.

⁴ Principal Component Analysis

⁵ Lissek

⁶ Gutkin

¹ Mutasher

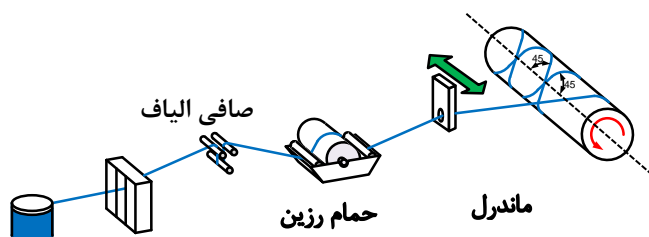
² Minak

³ Roundi

۲- بررسی تجربی

۲-۱ ساخت و مواد

در این پژوهش، برای ساخت نمونه لوله های کامپوزیتی $\pm 45^\circ$ توسط دستگاه رشته پیچی X-Winder استفاده شد. از الیاف کربن T700 و شیشه E-glass به همراه رزین اپوکسی آرالدیت LY 5052 و هاردنر Aradur®5052 به عنوان مواد ماتریس استفاده شد. رزین اپوکسی در یک حمام رزین غوطه ور شد و سپس بر روی سنبه آلومینیومی با قطر ۱۰۰ میلی متر و طول ۱۰۰۰ نمونه ها ساخته شد. برای اطمینان از یک ساختار همگن در طول تولید، حرکت چرخشی به مدت ۳۰ دقیقه اعمال شد. پس از اتمام فرآیند ساخت، لوله ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا تحت فرآیندهای خشک کردن و پخت قرار گیرند. در مرحله بعد، نمونه ها با استفاده از جک هیدرولیک از سنبه جدا شده و به مدت چهار ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد پخت شدند. در نهایت از ابزارهای برش برای برش لوله های کامپوزیت استفاده شد که منجر به تولید نمونه هایی به طول ۱۴۰ میلی متر شد. برای بررسی کیفیت نمونه تولید شده، کسر حجمی الیاف از طریق احتراق نمونه کامپوزیت بر اساس ASTM-D2584 تعیین شد که ۵۹ درصد به دست آمد. شکل ۱ روش سیم پیچی رشته را به صورت شماتیک نشان می دهد



شکل ۱) شماتیک فرآیند رشته پیچی

۲-۲ روش آزمایش

به مانند تصویر نمادینی که در شکل ۲ نشان داده شده است، مجموعه آزمایش هایی بر اساس دستورالعمل های بیان شده در استاندارد ASTM D5448 و با هدف اجرای آزمون های پیچشی بر روی لوله های کامپوزیتی انجام شد.

دسته بندی کند. لیو^۱ و همکاران [۲۱] نیز به کمک روش AE مکانیزم های شکست را در نمونه های آزمایش کششی ساخته شده از کامپوزیت T700/8911 دسته بندی کرده اند. در این پژوهش دسته بندی مکانیزم های شکست بر اساس انرژی و دامنه امواج صوتی انجام شده است.

در آزمایش های کششی رامیرز-خیمنز^۲ و همکاران [۲۲] بر روی انواع نمونه های کامپوزیت شیشه/ پلی اتیلنی با زاویه الیاف ۰ تا ۹۰° نسبت به جهت کششی، مکانیزم های شکست پدید آمده به صورت جداسدگی الیاف-ماتریس، بیرون کشیدگی الیاف و شکست الیاف دسته بندی شده اند. وو^۳ و همکاران [۲۳] از نتایج آزمایش AE برای دسته بندی شکست های ناشی از ضربه سرعت بالا در کامپوزیت های کربن-کولار/اپوکسی استفاده کرده اند. ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف-ماتریس، شکست الیاف کولار و کربن کمترین تا بیشترین دامنه و فرکانس AE را نشان داده اند.

با توجه به اینکه بررسی رفتار پیچشی لوله های کامپوزیتی ساخته شده با روش رشته پیچی در پژوهش های قبلی کمتر به آن پرداخته شده است، هدف از انجام این پژوهش، بکارگیری روش AE در بررسی شکست های ناشی از آزمایش پیچشی لوله های کامپوزیتی مورد استفاده در درایو شفت ها می باشد. از آن جایی که پایداری پیچشی لوله های کامپوزیتی جدار نازک به بارهای بحرانی محدود می گردد، اهمیت بررسی خواص مکانیکی پیچشی لوله های کامپوزیتی FWC چند برابر می شود. همچنین ارتقای قابلیت های انتقال گشتاور درایو شفت ها نیز می تواند به نتایج این پژوهش متکی می باشد. در نتیجه سیلندرهایی/استوانه هایی از جنس کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی با روش رشته پیچی ساخته شدند و نمونه های از آنها تهیه شد. در ادامه این نمونه ها در معرض آزمایش های استاندارد قرار داده شدند. طوری که مکانیزم های شکست پدید آمده از بارگذاری پیچشی با کمک روش AE شناسایی شدند. نتایج نشان داد که ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف و جداسدگی الیاف/ماتریس مکانیزم های شکست اصلی مشاهده شده بودند. همچنین، سهم هر یک از این مکانیزم های شکست از طریق روش خوشه بندی سلسله مراتبی کمی سازی شده است.

³ Woo

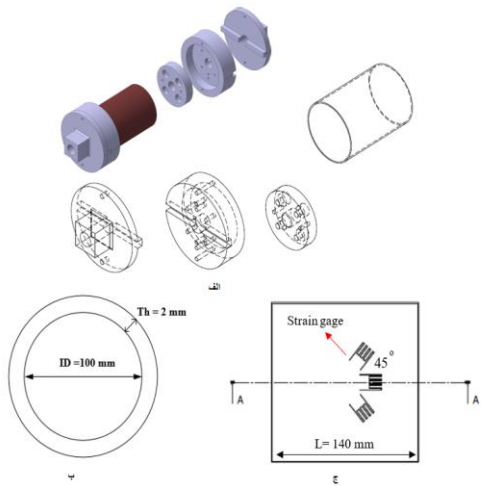
¹ Liu

² Ramirez-Jimenez

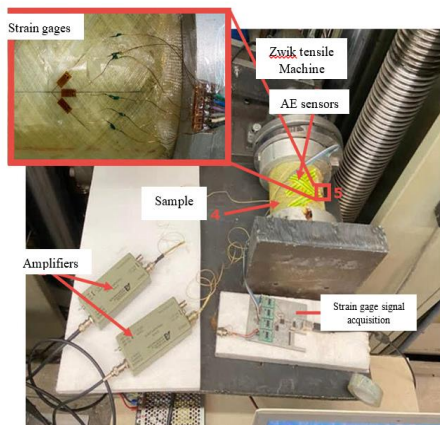
از اهداف اصلی انجام آزمایش پیچشی بر روی سیلندره‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده، تعیین خواص برشی درون صفحه‌ای است که پارامترهایی مانند استحکام برشی بیشینه، کرنش برشی بیشینه و مدول برشی درون صفحه‌ای را نیز شامل می‌شود. استحکام برشی بیشینه (τ_{12}) به مقدار استحکام برشی نشان داده شده در نقطه شکست اشاره دارد و می‌توان آن را از معادله (۱) محاسبه کرد.

$$\tau_{12}'' = \frac{T_{\max} r_{\max}}{J} = \frac{32T_{\max} OD}{\pi(OD^4 - ID^4)} \quad (1)$$

در این معادله، T_{\max} لنگر بیشینه اعمال شده در نقطه شکست، r_{\max} شعاع بیشینه سیلندر، J ممان اینرسی قطبی، ID و OD به ترتیب قطرهای خارجی و داخلی نمونه می‌باشند.



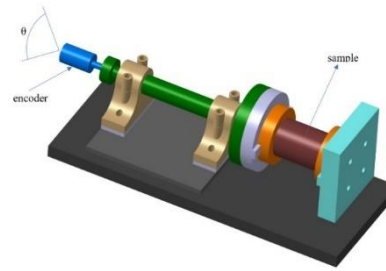
شکل ۲ (الف) فیکسچر، (ب): ابعاد، (ج): آرایش کرنش سنج



(الف)

برای اطمینان جاگیری دقیق لوله‌های کامپوزیتی، بخش نگهدارنده ماشین آزمایش (فیکسچر) از دو بخش (شکل ۲-ب) الف) سیستم سنجش زاویه/کرنش و دیگر بخش‌های کمکی جانبی تشکیل شده بود. با پیروی از این راهنمای استاندارد، قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰۴ میلی‌متر انتخاب شدند (شکل ۲-ب). همچنین برای اندازه‌گیری دقیق مقادیر کرنش در زاویه‌های مختلف از ۳ کرنش سنج استفاده شد. طوری که کرنش سنج‌ها در زاویه‌های خاص $\pm 45^\circ$ و 0° بر روی لوله‌های کامپوزیتی نصب شدند و تراز موازی با محور اصلی نمونه نیز با زاویه 0° نشان داده شد (شکل ۲-ج). در گام بعدی نیز آزمایش پیچشی با نرخ پیچش ۲ درجه بر دقیقه بر روی نمونه‌ها انجام شد. هنگام این از آزمایش سیستم کامپیوتری دو کاناله‌ای برای ثبت لحظه‌ای داده‌های آزمایش استفاده شد. جمع‌آوری داده‌ها با کمک نرم‌افزار AEWIn و سیستم PCL-2 با نرخ نمونه‌برداری 1 Ms/s انجام شد. برای اندازه‌گیری سیگنال‌های AE از دو حسگر کریستالی پیزوالکتریک به نام E50D PICO ساخت شرکت PAC Co استفاده شد. فرکانس تشدید این حسگرها kHz 38/513 و در دامنه عملیاتی بهینه 75-750 kHz بودند. در این پژوهش با استفاده از آمپلی‌فایر/تقویت‌گر اولیه با ضریب بهره 40 dB سیگنال دریافت شده از حسگرها تقویت شد. برای نصب مطمئن حسگر بر روی سطح نمونه از گریس سیلیکونی مخصوص خلاء استفاده شد. ضمن اطمینان از انتقال دقیق و کامل سیگنال بین نمونه و حسگر، این نوع گریس کیفیت سیگنال‌های بدست‌آمده را بهبود می‌بخشد. به هنگام فرایند تعیین نویز آستانه دستگاه شبه‌استاتیکی آزمون فشار با دقت و بدون اعمال بار حرکت داده شد. این کار به منظور به حداقل رساندن تاثیرات نویزهای مکانیکی و مغناطیسی و مداخله احتمالی آن‌ها با سیگنال‌های حسگرهای AE انجام شد. برای شناسایی و تشخیص نویزهای خارجی به هنگام آزمایش‌ها، نویز آستانه 37 dB در نمونه‌ها ایجاد شد. از نویز آستانه برای شناسایی و جدایش سیگنال‌های خارجی استفاده شد که ممکن بود توسط منابع خارجی ایجاد شده باشند. شکل ۳ شماتیکی از دستگاه پیچش لوله کامپوزیتی. نمودار حسگرهای AE، سیستم اندازه‌گیری‌ها، نصب گیج کرنش، دستگاه کشش Zwick و سایر اجزای مربوطه را نشان می‌دهد.

پیچشی ۷ و نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی به زاویه پیچشی ۵ می‌رسند. از این گذشته کامپوزیت‌های الیاف کربنی نسبت به کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای، شیب منحنی‌های گشتاور پیچشی-زاویه پیچش تندتری دارند. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی نسبت به نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای سخت/سفت‌تر می‌باشند. برای نمونه، در جدول ۱ بیشترین مقدار گشتاور پیچشی و زاویه پیچش محاسبه شد و به صورت T_{max} و E_{eff} نشان داده شده است. در تجزیه و تحلیل‌های بعدی با استفاده از معادلات ارائه شده در بخش ۳، مقادیر تنش برشی و کرنش برشی برای تمام نمونه‌ها در هر نقطه محاسبه شد. در شکل ۵ نیز منحنی‌های تنش برشی-کرنش برشی برای همه نمونه‌ها نشان داده شده است. از شیب ناحیه خطی منحنی تنش برشی-کرنش برشی، مدول برشی (G_{12}) بدست می‌آید. همچنین نتایج اصلی این آزمایش به صورت مقادیر تنش برشی بیشینه (T_{max}) و کرنش برشی بیشینه (γ_{max}) در نقطه شکست به همراه مدول برشی (G_{12}) تعیین شدند و در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. بر اساس داده‌های بدست آمده در جدول ۱، مقادیر میانگین تنش برشی بیشینه (T_{max}) برای کامپوزیت‌های الیاف کربنی ۲۳۰ مگاپاسکال و برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای ۱۷۸ مگاپاسکال بدست آمده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که ظرفیت تحمل بار پیچشی کامپوزیت‌های الیاف کربنی در مقایسه با نمونه‌های شیشه‌ای ۱/۳ برابر است. همچنین مقادیر میانگین مدول‌های برشی (G_{12}) بدست آمده برای نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی و الیاف شیشه‌ای به ترتیب ۳۵۱۷۱ و ۱۵۷۷۴ مگاپاسکال بود که برتری ۲/۲ برابری مدول برشی نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی را نسبت به نمونه‌های الیاف شیشه‌ای نشان می‌دهد. مدول برشی در کاربردهای خاصی مانند درایو شفت‌های کامپوزیتی مورد استفاده در برج‌های خنک‌کننده صنعت نفت اهمیت می‌یابد. از آنجایی که درایو شفت‌ها در شرایط تعداد دور در دقیقه (rpm) بالایی قرار می‌گیرند، افزایش مدول برشی شفت‌ها سبب بوجود آمدن فرکانس طبیعی بالایی در شفت‌ها شده و در نتیجه آن از شکست‌های فاجعه‌بار ناشی از مشکلات ارتعاشی جلوگیری می‌شود. بنابراین نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی می‌توانند انتخاب



(ب)

شکل ۳ (الف): تنظیمات آزمایش، (ب): اندازه‌گیری‌های تجربی.

برای اندازه‌گیری ϵ_1 ، ϵ_2 و ϵ_3 ، ضریب پواسون $\nu_0=0.285$ و $K_{t1}, K_{t2}, K_{t3}, K_t=0.007$ گزارش شده است. مقادیر کرنش تصحیح‌شده ϵ_1 ، ϵ_2 و ϵ_3 با معادلات زیر بدست آمدند:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_1 (1 - \nu_0 k_{t1}) - k_{t1} \epsilon_3 (1 - \nu_0 k_{t3})}{1 - k_{t1} k_{t3}} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_2 (1 - \nu_0 k_{t2})}{1 - k_{t2}} - \frac{k_{t2} \epsilon_1 (1 - \nu_0 k_{t1}) (1 - \nu_0 k_{t3}) (1 - k_{t3})}{(1 - k_{t1} k_{t3}) (1 - k_{t2})} \quad (3)$$

$$\epsilon_3 = \frac{k_{t2} \epsilon_3 (1 - \nu_0 k_{t3}) (1 - k_{t1})}{(1 - k_{t1} k_{t3}) (1 - k_{t2})} + \frac{\epsilon_3 (1 - \nu_0 k_{t3}) - k_{t3} \epsilon_1 (1 - \nu_0 k_{t1})}{1 - k_{t1} k_{t3}} \quad (4)$$

$$\gamma_{12} = \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

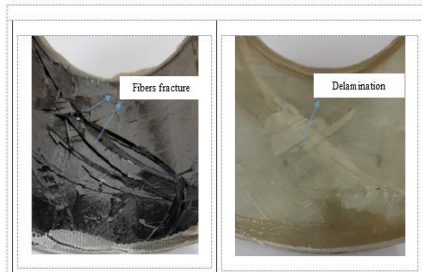
۳-۱ ویژگی‌های برشی در صفحه

در شکل ۴ منحنی‌های گشتاور پیچشی-زاویه پیچش بدست آمده از نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی^۱ (CFRP) و الیاف شیشه‌ای^۲ (GFRP) تحت بارگذاری پیچشی نشان داده شده است. در این شکل، نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی با نمادهای C_1 ، C_2 و C_3 و نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای با نمادهای G_1 ، G_2 و G_3 نشان داده شده‌اند. به راحتی از شکل ۴ می‌توان دریافت که نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی نسبت به نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای از ظرفیت گشتاور بیشینه بسیار بیشتری برخوردارند. این در حالی است که نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای به زاویه

² Glass Fiber Reinforced Polymer

¹ Carbon Fiber-Reinforced Polymer

کامل الیاف مشاهده نشده است. در عوض در نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای شکست به صورت لایه‌ای شدن الیاف تحت مکانیزمی روی داده است که در آن الیاف شیشه از ماتریس ماده چسبی جدا شده‌اند.

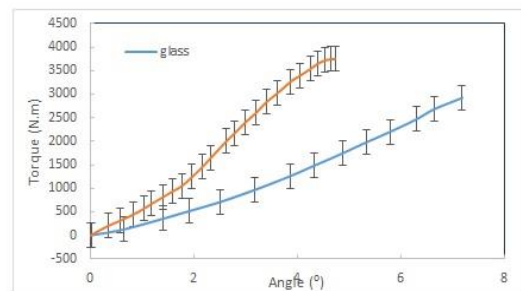


شکل ۶) سطوح شکست برای (الف): CFRP و (ب): GFRP.

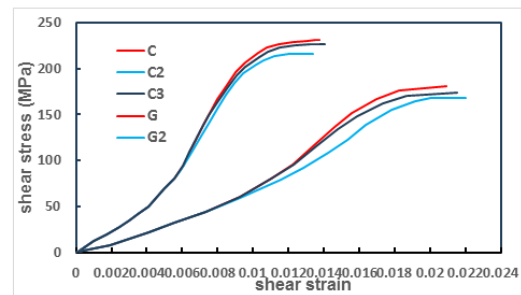
۴- آنالیز انتشار امواج صوتی / نشر آکوستیکی

در این بخش مشخص می‌شود که نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی نسبت به نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای خصوصیات برش درون صفحه‌ای بسیار مناسب‌تری را از خود نشان می‌دهند. این بخش با بهره‌گیری از روش AE به ارزیابی مکانیزم‌های شکست بوجودآمده در حین آزمایش پیچشی بر روی هر دو نمونه‌های کامپوزیت GFRP و CFRP متمرکز شده است. در ابتدا، نتایج AE در نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی بررسی می‌شود. در شکل (الف-۷) توزیع وقایع AE در ارتباط با بار گشتاور در حال افزایش مشاهده می‌شود. نتایج شکل ۷ گویای این واقعیت است که هر گونه افزایش در بارهای وارد بر نمونه سبب بوجود آمدن رویداد شکستی متناظر با آن می‌شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که با افزایش بارهای پیچشی، سیگنال‌های فرکانس بالاتری تولید می‌شود. در اصل با نزدیک شدن نمونه آزمایشی به نقطه شکست، وقوع سیگنال‌های AE در آن تشدید می‌شود. همچنین در شکل (ب-۷) انرژی تجمعی سیگنال‌های AE برای نمونه‌های آزمایشی CFRP نشان داده شده است. این نمودار افزایش بسیار زیاد و ناگهانی منحنی انرژی تجمعی را در حدود ۳۵۰ ثانیه نشان می‌دهد. پس از این مدت زمان، با تداوم و افزایش بارهای پیچشی، مقادیر انرژی تجمعی تا رسیدن به نقطه شکست ثابت می‌ماند. پس از آن و در نقطه شکست، به دلیل بروز شکست ناگهانی جهش قابل توجهی در منحنی مشاهده می‌شود. جالب است که مقدار انرژی تجمعی برای CFRP به میزان 33300 AJ ثبت شده است.

مناسبی برای دستیابی به این هدف با شند. بر اساس نتایج جدول ۱، مقادیر میانگین کرنش برشی بیشینه (γ_{max}) برای کامپوزیت‌های الیاف کربنی و نمونه‌های الیاف شیشه‌ای به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۲۱ بود. از این نتایج می‌توان دریافت که انعطاف‌پذیری پیچشی کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای نسبت به نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی ۱/۶ برابر است.



شکل ۴) منحنی‌های گشتاور پیچشی-زاویه پیچش برای نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی و الیاف شیشه‌ای.



شکل ۵) منحنی‌های تنش برشی-کرنش برشی برای نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی و الیاف شیشه‌ای در آزمایش پیچش (جدول ۱) پارامترها و خواص برشی درون صفحه‌ای.

	D_0 (mm)	D_{90} (mm)	J (mm ⁴)	T_{max} N-m	τ_{max} MPa	G_{12} MPa	γ_{max}	E_{offset}
C1	100.1	104.1	835821	3744	233	36174	0.0137	91777
C2	100.2	104.2	838279	3930	244	34129	0.0140	917800
C3	100	104.1	855476	3500	213	35212	0.0133	91600
G1	100.1	104.3	880227	2924	173	16110	0.0209	28949
G2	99.9	104	852964	3070	187	15438	0.0215	29102
G3	100	104.1	855476	2800	175	11356	0.0219	28800

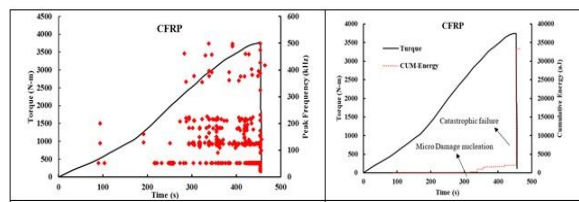
در شکل ۶ نیز تصاویر سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت الیاف کربنی و الیاف شیشه‌ای نشان می‌دهد که در اثر بارگذاری پیچشی، شکست‌ها در زاویه $\pm 45^\circ$ نسبت به محور اصلی سیلندر بوجود می‌آیند. این نوع جهت‌گیری شکست در نتیجه فرایند رشته‌پیچی است که در آن بافت اصلی ماده در زاویه $\pm 45^\circ$ تنظیم شده است و سبب جهت‌گیری الیاف در یک جهت می‌شود. از تصاویر شکست می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شکست کاملی در الیاف کربنی استفاده شده در کامپوزیت‌های الیاف کربنی پدید آمده است در حالیکه برای نمونه‌های کامپوزیت الیاف شیشه‌ای شکست

۵- خوشه‌بندی سلسله مراتبی

در مباحث آمار و داده کاوی از رویکرد خوشه‌بندی سلسله مراتبی به صورت روشی برای دسته‌بندی مشاهدات و داده‌ها بر اساس مراتبی بهم پیوسته و منظم تعریف شده است. وجود سلسله مراتب از بالا به پایین (یا از پایین به بالا) ویژگی متمایزکننده رویکرد خوشه‌بندی سلسله مراتبی در مقایسه با سایر روش‌های خوشه‌بندی است. همچنین آنالیز خوشه‌بندی نیز به صورت یکی از روش‌های متداول برای یادگیری ماشینی بدون نظارت شناخته شده است. برخلاف رویکرد خوشه‌بندی میانگین‌های k-means، در روش آنالیز خوشه‌بندی هر مشاهده ممکن است به بیش از یک خوشه تعلق داشته باشد. زیرا در این روش تشکیل خوشه‌ها بر اساس سطوح مختلف فاصله انجام می‌شود. بنابراین ممکن است هر خوشه زیرمجموعه‌ای از خوشه دیگر در سطحی از فاصله باشد. در کل، خوشه‌بندی روشی است که مشاهدات را بر اساس ویژگی‌ها یا مشخصه‌های آن‌ها در گروه‌های مشابه دسته‌بندی می‌کند. بدین منظور انتخاب ویژگی‌های مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی نیز برای پیشگیری از انحراف تابع فاصله از معیار اندازه‌گیری ویژگی‌ها یا مشخصات، باید به مساله استاندارد سازی داده‌ها نیز توجه داشت. با توجه به حجم زیاد محاسباتی که الگوهای خوشه‌بندی دارند، استفاده یا ایجاد روش‌هایی است که بتوانند راه‌حل‌های خوشه‌بندی مناسبی را در زمان کمتری تولید کنند در قالب موضوع اصلی تحقیق در زمینه یادگیری ماشینی و به ویژه در زمینه داده‌های بزرگ مطرح می‌باشد.

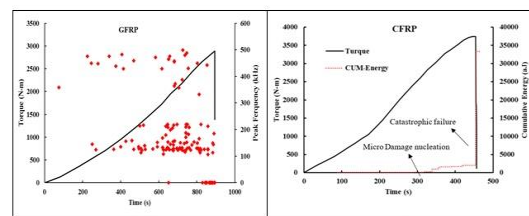
خوشه‌بندی تجمعی سلسله مراتبی: اگر به نموداری با چشم‌انداز پایین به بالا نگاه شود، خوشه‌هایی که زیرمجموعه‌های خوشه‌های بالاتر هستند، نسبت به ارتفاع نمودار در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرند. از این رو بنظر می‌رسد که برای ایجاد خوشه‌های سطح بالاتر باید خوشه‌های سطح پایین‌تر را با یکدیگر ادغام نمود. این نوع خوشه‌بندی سلسله مراتبی به خوشه‌بندی تجمعی سلسله مراتبی^۱ (HAC) شناخته می‌شود.

در خوشه‌بندی تقسیمی سلسله مراتبی، برخلاف رویکرد قبلی HAC، اگر به نموداری با چشم‌انداز بالا به پایین نگاه شود، خوشه‌های بالاتر به طور متوالی به خوشه‌های سطح



شکل ۷) تجزیه و تحلیل AE در نمونه‌های CFRP. (الف): وقایع AE، (ب): انرژی تجمعی AE.

در شکل ۸ یافته‌های بدست آمده از آزمایش AE بر روی نمونه‌های GFRP نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۸-ا) نشان داده شده است، فعال‌سازی انتشار امواج صوتی در نمونه خاصی از این کامپوزیت پس از 200s همزمان با سیگنال‌های بالا و فرکانس پایین آغاز می‌شود. علاوه بر این در شکل (۸-ب) افزایش تدریجی انرژی تجمعی سیگنال‌های AE برای نمونه‌های آزمایشی کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای (GFRP) از نقطه علامت 200s تا نقطه شکست نشان داده شده است. بر اساس نتایج این نمودار، در نقطه شکست، موج ناگهانی از انرژی تجمعی دیده می‌شود که به شکست ناگهانی نسبت داده می‌شود. جالب است که مقدار انرژی تجمعی برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای به میزان 10000 AJ است که بسیار کمتر از انرژی تجمعی برای کامپوزیت‌های الیاف کربنی به میزان 33300 AJ است. در واقع در لحظه شکست نمونه‌های GFRP نسبت به نمونه‌های CFRP انرژی کمتری از خود نشان می‌دهند. در نتیجه از نمودار داده‌های مربوط به انرژی تجمعی AE می‌توان دریافت که شکست در CFRP به طور ناگهانی و همراه با آزاد شدن مقادیر قابل توجهی انرژی روی داده است، این در حالی است که شکست GFRP به طور تدریجی و با آزاد شدن تدریجی انرژی همراه شده است.



شکل ۷) تجزیه و تحلیل AE در نمونه‌های GFRP. (الف): وقایع AE، (ب): انرژی تجمعی AE.

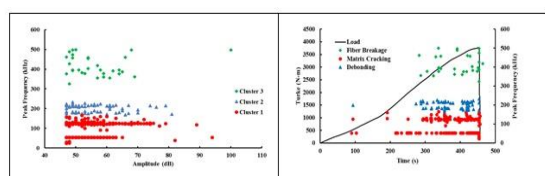
¹ Hierarchical Agglomerative Clustering

خوشه مجزا دسته‌بندی شدند که مکانیزم‌های شکست شایع در نمونه‌های کامپوزیتی تحت آزمایش را نشان می‌دهند. این خوشه‌ها عبارتند از شکست از نوع ترک خوردگی ماتریس، جداشدگی الیاف از ماتریس و شکست الیاف. خوشه‌های شکست‌های غالب بدست آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی بر روی نتایج آزمایش AE در نمونه‌های CFRP و GFRP به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل‌های ۹-الف و ۱۰-الف نشان داده شده است، محدوده فرکانس مرتبط با این خوشه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب کمتر از ۱۵۰، بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ و بیشتر از ۳۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. دامنه‌های فرکانس بدست آمده در این جا با موارد گزارش شده برای کامپوزیت‌های CFRP و GFRP همخوانی دارد. بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۲، شکست از نوع ترک خوردگی ماتریس کمترین مقدار فرکانس را نشان می‌دهد. همچنین شکست الیاف دارای بالاترین مقدار فرکانس است. مقدار فرکانس مربوط به جدایش الیاف از ماتریس بین دو مقدار قبلی قرار می‌گیرد.

جدول ۲) محدوده فرکانسی (kHz) برای مکانیزم‌های شکست مختلف که برای CFRP و GFRP اتفاق افتاده است.

Ref	Material	Test	Matrix cracking	Fiber/matrix debonding	Fiber breakage
[14]	CFRP	Tensile	100-200	230-320	>300
[22]	CFRP	Tensile, compression, DCB	<50	200-300	400-500
[16]	CFRP	Quasi-static Indentation	<150	150-300	300-500
[17]	CFRP	Tensile	<200	250-330	>350
[19]	CFRP	Tensile	<100	200-300	300-450
[23]	GFRP	OHT	80-250	250-375	375-480
[21]	GFRP	DCB	140-250	250-350	350-450



ب

الف

شکل ۹) نتایج مدل HAC برای نمونه‌های CFRP (الف): خوشه‌بندی داده‌ها؛ (ب): تخصیص مکانیزم شکست هر خوشه.

پایین تجزیه می‌شوند، این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که در هر خوشه تنها یک عضو باقی بماند. بدین ترتیب، بزرگترین خوشه که شامل همه مشاهدات بود به کوچکترین خوشه تقسیم می‌شود. در هر یک از این خوشه‌ها تنها یک مشاهده واحد وجود دارد. به این روش خوشه‌بندی تقسیم سلسله‌مراتبی گفته می‌شود. به دلیل محدودیت‌های این روش، کمتر در خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی استفاده می‌شود.

در پژوهش‌های قبلی پیرامون روش‌های بدون نظارت بر خوشه‌بندی داده‌های AE، از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به عنوان روشی یاد شده است که به طور پیوسته نتایج قابل اعتماد و تکرارپذیری را نشان می‌دهد [۱۶]. از این رو، در این پژوهش از رویکرد خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی برای خوشه‌بندی داده‌های آزمایش AE استفاده شده است. این روش خوشه‌بندی شامل چهار مرحله متوالی زیر است:

۱) مقداردهی اولیه: اگر n نقطه وجود داشته باشد، در ابتدا هر نقطه به عنوان خوشه مجزا در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، هر خوشه از یک عضو تشکیل شده است که نشانگر مرکز آن نیز می‌باشد.

۲) محاسبه عدم تشابه: در این مرحله با بکارگیری پیوند مرکز خوشه‌ها (d) به صورت یکای عدم تشابه، عدم تشابه بین خوشه‌ها ارزیابی می‌شود. پیوند مرکز خوشه فاصله اقلیدسی بین مرکز دو خوشه را محاسبه می‌کند. شایان ذکر است که پس از اولین تکرار، مرکز هر خوشه به عنوان میانگین اعضای آن به روزرسانی می‌شود.

در این معادله $d(r,s)$ بیانگر یکای عدم تشابه، x_r بیانگر مرکز خوشه r می‌باشند. همچنین n_r و x_{ri} به ترتیب تعداد داده‌ها و ارزش نقاط داده‌های خوشه r را نشان می‌دهند.

$$d(r,s) = \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|_2 \quad (6)$$

$$\bar{x}_r = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} x_{ri} \quad (7)$$

۳) ادغام خوشه‌هایی با کمترین عدم تشابه: در این مرحله دو خوشه با کمترین مقدار پیوند مرکز خوشه‌ها (d) با هم ترکیب شده و در نتیجه از تعداد خوشه‌ها یکی کم می‌شود.

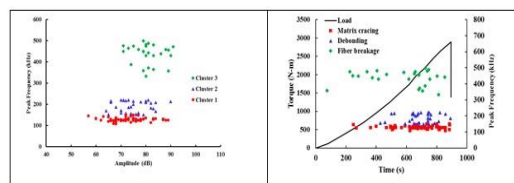
۴) معیار تکرار و توقف: مراحل ۲ و ۳ تا زمانی تکرار می‌شوند که معیار توقف، به طور معمول با تعداد کلاس‌های از پیش تعیین شده برآورده شود. با بکارگیری روش HAC برای سیگنال‌های بدست آمده از آزمایش AE در نمونه‌ها، سه

جدول ۳) درصد مکانیزم‌های مختلف شکست بر اساس HAC.

Specimen type	Cumulative AE energy (eu)			Total cumulative AE energy (eu)
	Matrix cracking	Fiber/matrix debonding	Fiber breakage	
Carbon	9178 (27.5%)	397 (0.02%)	23779 (71.2%)	33354
Glass	5237 (52.1%)	2629 (50.02%)	2186 (30.2%)	23062

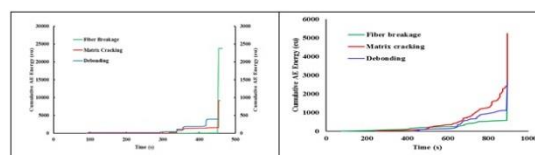
۶- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات برش درون صفحه‌ای سیلندرهای ساخته شده از کامپوزیت‌های رشته پیچ‌شده و ارزیابی مکانیزم‌های شکست مربوط به آن‌ها با بکارگیری روش AE بود. برای این منظور سیلندرهای دو ماده کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی و الیاف شیشه/اپوکسی ساخته شدند. بارگذاری پیچشی بر روی سیلندرهای بر اساس استاندارد ASTM D5448 انجام شد. طی آزمایش، پارامترهایی مانند گشتاور، زاویه پیچش و کرنش به طور دقیق اندازه‌گیری و ثبت شدند. همچنین برای تشخیص سیگنال‌های مربوط به وقوع شکست از حسگرهای AE استفاده شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که نمونه‌های CFRP در مقایسه با نمونه‌های GFRP از استحکام برشی و مدول برشی بالاتری برخوردارند. همچنین بر اساس مکانیزم‌های شکست شناسایی شده در مواد کامپوزیتی، این شکست‌ها عبارتند از ترک خوردگی ماتریس، جداشدگی الیاف از ماتریس و شکست الیاف. سیگنال‌های بدست‌آمده از AE با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در سه خوشه متمایز قرار گرفتند: فرکانس‌های بدست‌آمده برای شکست از نوع ترک خوردگی کمتر از 150 kHz، برای جداشدگی الیاف از ماتریس بین 150 kHz تا 300 kHz و برای شکست بوجود آمده در الیاف بیشتر از 300 kHz بودند. دامنه‌های فرکانس بدست‌آمده در این جا با موارد گزارش شده برای نمونه‌های CFRP و GFRP همخوانی دارد. بر اساس نتایج بدست‌آمده از آزمایش AE بر روی نمونه‌های آزمایش، برای نمونه‌های CFRP هیچ موردی از شکست جداشدگی الیاف از ماتریس مشاهده نشد. همچنین مکانیزم غالب شکست در این نمونه‌ها به صورت مد اولیه شکست در الیاف ظاهر شد و ۷۱ درصد از این شکست‌ها را تشکیل داد. از طرفی برای نمونه‌های GFRP جداشدگی الیاف از ماتریس مد غالب شکست بود و ۵۰ درصد از کل شکست‌ها را شامل شد.



شکل ۱۰) نتایج مدل HAC برای نمونه‌های GFRP (الف): خوشه‌بندی داده‌ها؛ (ب): تخصیص مکانیزم شکست هر خوشه.

علاوه بر این، در شکل‌های ۹-ب و ۱۰-ب تصاویری از لنگرهای خاص در هر زمان آزمایش و سطوح گشتاور مربوط به آن را نشان می‌دهند که در این زمان‌ها مکانیزم‌های شکست برای نمونه‌های CFRP و GFRP اتفاق افتاده است. پس از آن انجام خوشه‌بندی سیگنال‌های بدست‌آمده از آزمایش AE و مرتبط کردن هر خوشه با مکانیزم‌های شکست مربوط به آن نمونه، انرژی تجمعی انواع مختلف شکست‌های موجود آمده در نمونه‌های CFRP و GFRP محاسبه شد. این شکست‌ها در هر خوشه نشان داده شده بودند. نتایج بدست‌آمده برای انرژی تجمعی انواع مختلف شکست بوجود آمده برای نمونه‌های CFRP و GFRP به ترتیب در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در شکل ۱۱ نه تنها زمان فعال شدن مکانیزم هر شکست، بلکه مکانیزم گسترش و پیشروی آن را در طول زمان نشان می‌دهد. در این شکل‌ها مقادیر انرژی تجمعی مربوط به مکانیزم هر شکست نیز نشان داده شده است. در جدول ۳ نیز خلاصه‌ای از مقادیر انرژی تجمعی کل و درصد مکانیزم‌های شکست مختلف ارائه شده است. در کل برای نمونه‌های CFRP هیچ موردی از شکست جداشدگی الیاف از ماتریس مشاهده نشد ولی مکانیزم غالب شکست در این نمونه‌ها مد اولیه شکست الیاف بود، طوری که ۷۱ درصد از شکست‌ها را شامل می‌شد. از طرفی برای نمونه‌های GFRP جداشدگی الیاف از ماتریس مد غالب شکست بود و ۵۰٪ از شکست‌ها را در برداشت.



شکل ۱۱) انرژی تجمعی انواع مختلف شکست: (الف) برای نمونه‌های CFRP؛ (ب) برای نمونه‌های GFRP.

۷- مراجع

- of damage progression in glass/epoxy composites during static and fatigue tensile tests. *Applied Acoustics*, 2018. 132: p. 124-134.
- [14] Lissek, F., et al., Acoustic emission for interlaminar toughness testing of CFRP: Evaluation of the crack growth due to burst analysis. *Composites Part B: Engineering*, 2018. 136: p. 55-62.
- [15] Saeedifar, M., et al., Delamination analysis in composite laminates by means of acoustic emission and bi-linear/tri-linear cohesive zone modeling. *Composite Structures*, 2017. 161: p. 505-512.
- [16] Mohammadi, R., et al., Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, 2017. 108: p. 427-435.
- [17] Oskouei, A.R., et al., An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate. *Materials & Design*, 2011. 32(3): p. 1444-1455.
- [18] Oskouei, A.R. and M. Ahmadi, Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites. *Journal of composite materials*, 2010. 44(7): p. 793-807.
- [19] Gutkin, R., et al., On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mechanical systems and signal processing*, 2011. 25(4): p. 1393-1407.
- [20] Fotouhi, M., et al., Monitoring the initiation and growth of delamination in composite materials using acoustic emission under quasi-static three-point bending test. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2011. 30(17): p. 1481-1493.
- [21] Liu, P., et al., A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission. *Materials & Design*, 2012. 37: p. 228-235.
- [22] Ramirez-Jimenez, C., et al., Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. *Composites Science and Technology*, 2004. 64(12): p. 1819-1827.
- [23] Woo, S.-C. and T.-W. Kim, High strain-rate failure in carbon/Kevlar hybrid woven composites via a novel SHPB-AE coupled test. *Composites Part B: Engineering*, 2016. 97: p. 317-328.
- [1] Quanjin, M., et al., Design of portable 3-axis filament winding machine with inexpensive control system. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2018. 12(1): p. 3479-3493.
- [2] Kangal, S., et al., Investigation of interlayer hybridization effect on burst pressure performance of composite overwrapped pressure vessels with load-sharing metallic liner. *Journal of Composite Materials*, 2020. 54(7): p. 961-980.
- [3] Ajide, O., Synergistic Influence of Banana Pseudo Stem Fibre and Synthetic Fibre on Mechanical, Thermal Stability and Tribological Properties of Epoxy-Based Composites. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2023. 42(18): p. 25-41.
- [4] Ghanem, H., et al., Experimental and Numerical Investigation of the Flexural Behavior of Mortar Beams Strengthened with Recycled Plastic Mesh. *Sustainability*, 2023. 15(7): p. 5640.
- [5] Ghandourah, E., et al., Enhanced ANN Predictive Model for Composite Pipes Subjected to Low-Velocity Impact Loads. *Buildings*, 2023. 13(4): p. 973.
- [6] Liao, D., et al., Failure analysis of glass fiber reinforced composite pipe for high pressure sewage transport. *Engineering Failure Analysis*, 2023. 144: p. 106938.
- [7] Wang, Y., et al., Numerical and experimental investigation on tensile fatigue performance of reinforced thermoplastic pipes. *Ocean Engineering*, 2023. 287: p. 115814.
- [8] Chang, Y., et al., Micro-mechanical damage simulation of filament-wound composite with various winding angle under multi-axial loading. *Composite Structures*, 2023. 313: p. 116925.
- [9] Mansour, G., et al., Experimental and Numerical Investigation on the Torsional Behaviour of Filament Winding-Manufactured Composite Tubes. *Applied Mechanics and Materials*, 2016. 834: p. 173-178.
- [10] Xun, L., et al., Degradation of torsional behaviors of 3-D braided thin-walled tubes after atmospheric thermal ageing. *Thin-Walled Structures*, 2022. 170: p. 108555.
- [11] Mutasher, S., Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft. *Materials & design*, 2009. 30(2): p. 215-220.
- [12] Minak, G., et al., Low-velocity impact on carbon/epoxy tubes subjected to torque—experimental results, analytical models and FEM analysis. *Composite structures*, 2010. 92(3): p. 623-632.
- [13] Roundi, W., et al., Acoustic emission monitoring