

Investigation of Mode-I Crack Propagation in Filament-Wound Composite Curved Beams Using Acoustic Emission Technique

Mehdi Farajpour 

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

Article Information:

Research Article

Received 20 June 2025

Revised 14 Feb. 2026

Accepted 19 Feb. 2026

Keywords:

Acoustic emission; double cantilever curve beam specimens; critical energy release rate; filament wound carbon/epoxy specimens

ABSTRACT

One of the prevalent industrial methods for manufacturing composite structures is fiber winding, a technique extensively employed for producing axis-symmetric parts. This method has gained considerable popularity due to its capability to create lightweight yet durable structures, making it particularly valuable in industries such as aerospace and automotive. The lightweight nature of these composites allows for enhanced fuel efficiency and performance, which are critical factors in these sectors. However, one of the most common damage mechanisms encountered in these composite structures is delamination, which can occur under various loading conditions, such as tension, compression, and shear. This phenomenon can lead to a significant reduction in both the performance and lifespan of the structures, posing challenges in their application. In this study, we investigated the mechanical behavior and propagation of the initial mode I crack in carbon/epoxy curved beams fabricated using the fiber winding (FW) method, employing the acoustic emission (AE) technique for analysis. To achieve this, a composite tube was first manufactured with an artificial interlaminar separation, from which beam samples were cut along its longitudinal direction. In the initial phase of the research, the initiation of failures was identified using the AE method, which allows for real-time monitoring of crack propagation. Subsequently, the growth and propagation of interlaminar delamination were evaluated through the energy of AE signals and the centroid function. By determining the velocity of AE waves and implementing a filtering method to remove unwanted signals, we were able to predict the instantaneous position of the delamination tip during its growth. The results indicated that the fiber bridging phenomenon was a result of the interpenetration of two adjacent regions at the delamination interface. Notably, the length of the fiber bridging zone had a significant impact on the mode I fracture toughness of the delamination. Furthermore, as the fiber bridging area increased, the fracture toughness also exhibited an increase. A strong correlation was observed between the fracture toughness values obtained from the AE method and those derived from the ASTM D5528 standard, highlighting the reliability of the AE technique in assessing composite material performance.

Cite this article: Farajpour, M. (2025). Investigation of Mode-I Crack Propagation in Filament-Wound Composite Curved Beams Using Acoustic Emission Technique. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 89-102.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.542672.1167>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بررسی گسترش ترک مود اول در تیرهای خمیده کامپوزیتی ساخته‌شده به روش پیچش رشته‌ای با استفاده از تکنیک گسیل آکوستیکی

مهدی فرج پور^۱ ✉

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

چکیده:

یکی از روش‌های متداول صنعتی برای ساخت سازه‌های کامپوزیتی، پیچش الیاف است که به‌طور گسترده برای تولید قطعات محور-مقارن به کار می‌رود. این فرآیند به دلیل توانایی آن در ایجاد ساختارهای سبک و مقاوم، به ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی، بسیار محبوب است. یکی از رایج‌ترین مکانیزم‌های آسیب در این سازه‌های کامپوزیتی، لایه‌لایه‌شدگی است که تحت انواع مختلف بارگذاری رخ می‌دهد. این پدیده می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در عملکرد و عمر مفید سازه شود. در این پژوهش، رفتار مکانیکی و گسترش ترک اولیه مد اول در تیرهای منحنی کامپوزیت کربن/اپوکسی ساخته‌شده به روش پیچش الیاف (FW) با استفاده از روش انتشار آکوستیکی (AE) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، در ابتدا یک لوله کامپوزیتی با در نظر گرفتن جدایش بین‌لایه‌ای مصنوعی ساخته شد و نمونه‌های تیر از امتداد طولی آن برش داده شدند. در گام نخست، آغاز شکست‌ها با استفاده از روش AE تعیین شد. سپس، رشد و گسترش لایه‌لایه‌شدگی بین‌لایه‌ای از طریق انرژی سیگنال‌های AE و تابع سنتری مورد ارزیابی قرار گرفت. با تعیین سرعت امواج AE و ارائه روشی برای فیلتر کردن سیگنال‌های ناخواسته، موقعیت لحظه‌ای نوک لایه‌لایه‌شدگی بین‌لایه‌ای در حین رشد پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد که پدیده پل‌زنی الیاف ناشی از نفوذ دو ناحیه مجاور در سطح جدایش بوده و طول ناحیه پل‌زنی الیاف تأثیر قابل توجهی بر چقرمگی شکست مد اول لایه‌لایه‌شدگی دارد. همچنین، با افزایش ناحیه پل‌زنی الیاف، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. در نهایت، تطابق خوبی بین مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از روش AE و مقادیر حاصل از استاندارد ASTM D5528 مشاهده شد. این نتایج می‌تواند به طراحی بهتر سازه‌های کامپوزیتی و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در شرایط بارگذاری واقعی کمک کند.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:

گسیل آکوستیک؛ تیر خمیده دو سر آزاد؛ نرخ بحرانی آزادسازی انرژی؛ کربن/اپوکسی؛ پیچش رشته‌ای

استناد: فرج پور، مهدی (۱۴۰۴). بررسی گسترش ترک مود اول در تیرهای خمیده کامپوزیتی ساخته‌شده به روش پیچش رشته‌ای با استفاده از

تکنیک گسیل آکوستیکی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۸۹-۱۰۲.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.542672.1167>



۱- مقدمه

لایه‌لایه‌شدگی^۱ رایج‌ترین نوع شکست در سازه‌های کامپوزیتی است و باعث کاهش استحکام و مدول خمشی این مواد می‌شود [۱-۴]. رشد ترک بین‌لایه‌ای ممکن است به دلیل بازشدگی ترک، برش، پارگی خارج از صفحه و یا ترکیبی از این مودها رخ دهد و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از ضریب شدت تنش یا نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در مودهای I، II و III به دست می‌آید [۵-۸]. در این راستا، برای مقایسه و ارزیابی سازه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده از مواد مختلف از نظر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای، انجام آزمون‌های ساده و قابل اعتماد ضروری است. روش‌های آزمون متعددی برای شکست مود I و شکست ترکیبی مودهای I-II معرفی شده‌اند. متداول‌ترین انواع نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون‌ها شامل نمونه دارای شیار سطحی (SN)، تیر دو سر طره‌ای (DCB)، و صفحات دارای سوراخ مرکزی هستند. نمونه DCB که رایج‌ترین نمونه مورد استفاده است، توسط ویتنی و همکاران بررسی شده است [۹].

بنزگاک و همکاران [۱۰] به صورت تجربی لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی را تحت بارگذاری مودهای I و II و همچنین بارگذاری ترکیبی مودهای I-II مطالعه کردند. از آنجا که این نوع شکست در فصل مشترک لایه‌های کامپوزیت رخ می‌دهد، معمولاً شناسایی آن با روش بازرسی بصری (VIS) دشوار یا غیرممکن است. تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی برای آشکارسازی لایه‌لایه‌شدگی پیشنهاد شده است [۱۱-۱۳]. یکی از این روش‌ها، انتشار آکوستیکی (AE) است که امکان پایش بلادرنگ سیستم را فراهم کرده و به این ترتیب قابلیت اطمینان آن را افزایش می‌دهد [۱۴]. مزایای استفاده از این روش در بازرسی شکست کامپوزیت شامل قابلیت پایش نمونه‌های کامپوزیتی به صورت بلادرنگ و توانایی تفکیک بین انواع مختلف شکست، مانند ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف، جداشدگی الیاف-ماتریس، و لایه‌لایه‌شدگی است [۱۵-۱۸]. رفاهی و همکاران [۱۹-۲۰]، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را در لمینیت‌های پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری

مود I با استفاده از روش AE بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین انرژی AE و انرژی مکانیکی همبستگی خطی وجود دارد. سیلورساید و همکاران [۲۱] از روش AE برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی تحت بارگذاری مودهای I و II و همچنین بارگذاری ترکیبی مودهای I-II استفاده کردند. فتوحی و همکاران [۲۲]، از تکنیک AE به همراه دسته‌بندی فازی و تبدیل موجک برای طبقه‌بندی مکانیزم‌های شکست مختلف که طی رشد لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت خمش سه‌نقطه‌ای رخ می‌دهند، بهره بردند.

پشم‌فروش و همکاران [۲۳]، الگوریتم‌های ژنتیک و K- میانگین را برای طبقه‌بندی مکانیزم‌های شکست طی رشد لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های کامپوزیتی ترکیب کردند. رومهنی و همکاران [۲۴]، با استفاده از تکنیک AE، منحنی رشد خستگی لایه‌لایه‌شدگی را در نمونه‌های کربن/اپوکسی پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) موجب تقویت لایه رزین بین‌لایه‌ای شده‌اند.

تحلیل لایه‌لایه‌شدگی در لوله‌های کامپوزیتی نسبت به صفحات پیچیده‌تر بوده و مطالعات کمی به بررسی چقرمگی شکست نمونه‌های منحنی برش‌خورده از لوله‌های کامپوزیتی ساخته‌شده به روش پیچش الیاف پرداخته‌اند [۲۵-۲۸].

در پژوهش حاضر، از روش انتشار آکوستیکی (AE) برای بررسی آغاز و گسترش لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های منحنی کربن/اپوکسی ساخته‌شده به روش پیچش الیاف، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مود I استفاده شده است. شکست بین‌لایه‌ای در دو بخش مورد مطالعه قرار گرفت:

در بخش نخست، تمرکز اصلی بر استفاده از سیگنال‌های AE برای تعیین آغاز شکست در نمونه‌های کامپوزیتی پیچش الیاف بود. ابتدا، توالی شکست‌های مختلف در نمونه‌های مود I پس از شناسایی الگوهای مرجع AE برای مکانیزم‌های شکست مختلف، توسط AE تعیین شد. سپس، نتایج با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطوح شکست نمونه‌ها تأیید گردید [۲۹].

در بخش دوم، رفتار گسترش لایه‌لایه‌شدگی با استفاده از سیگنال‌های AE بررسی شد. در این بخش، موقعیت لحظه‌ای نوک ترک در حین رشد لایه‌لایه‌شدگی از طریق

¹ Delamination

۲-۲ نمونه‌های تیر دو سر طره‌ای^۱

نمونه‌های آزمایش برای تیرهای منحنی تفاوت چندانی با نمونه‌های مشابه تیرهای مستقیم ندارند و تنها تفاوت آن‌ها در شکل ظاهری است. برای تیرهای منحنی، استاندارد مشخصی توسط نهادهایی مانند ASTM ارائه نشده است. با این حال، برخی مطالعات پیشین توصیه‌هایی برای بهبود آزمون‌ها بر روی نمونه‌های منحنی ارائه داده‌اند. این توصیه‌ها عمدتاً بر روش آماده‌سازی نمونه‌ها، نحوه ایجاد جدایش اولیه لایه‌ها، روش اعمال نیرو، تنظیمات دستگاه آزمون کشش، و فیکسچرهای آزمون متمرکز بوده‌اند.

در این مطالعه، ابعاد هندسی نمونه‌های آزمون جدایش بین‌لایه‌ای بر اساس توصیه‌های استاندارد ASTM D5528 و تحقیقات پیشین انتخاب شد [۳۱]. طبق این استاندارد، طول، عرض و ضخامت بهینه نمونه باید حداقل به ترتیب ۱۲۵ میلی‌متر، ۲۰-۲۵ میلی‌متر، و ۳-۵ میلی‌متر باشد. بنابراین، پس از آماده‌سازی لوله‌های کامپوزیتی، لوله‌ها مطابق ASTM D5528 در امتداد محور برش داده شدند و نمونه‌های آزمون مود I استخراج گردیدند. طول، عرض و ضخامت نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۲۲۰ میلی‌متر، ۲۱ میلی‌متر، و ۳ میلی‌متر انتخاب شد (شکل ۱(د)). همچنین، طول ترک اولیه ۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در نهایت، چهار نمونه تحت آزمون تجربی قرار گرفتند و در طی آزمایش، مقادیر بار و گسترش ترک به‌طور پیوسته توسط دستگاه آزمون کشش ثبت گردید.

۲-۳ تنظیمات آزمون

برای اعمال بار به نمونه، از دستگاه آزمون HIWA با ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. نرم‌افزار AEwin و سیستم PCI-2 با نرخ نمونه‌برداری ۱ مگاهرتز جهت ثبت داده‌های آکوستیکی به کار گرفته شدند. همچنین، دو حسگر پیزوالکتریک تک‌بلور باندپهن با نام تجاری PICO مدل R50D از شرکت PAC استفاده گردید.

حسگرهای AE با فاصله ۸۰ میلی‌متر از یکدیگر نصب شدند. طبق شکل ۲، حسگر اول ۱۵ میلی‌متر جلوتر از نوک اولیه جدایش بین‌لایه‌ای و حسگر دوم ۶۵ میلی‌متر عقب‌تر

مکان‌یابی سیگنال‌های شکست ناشی از رشد ترک در نمونه‌ها تعیین گردید. همچنین، برای بهبود نتایج AE، سیگنال‌های ناخواسته فیلتر شدند.

۲- شرح آزمایش

برای ساخت لوله‌های کامپوزیتی، از روش پیچش الیاف تر استفاده شد. برای تقویت نمونه‌های کامپوزیتی، از نخ کربنی T700 همراه با رزین اپوکسی LY5052 استفاده گردید. خواص مکانیکی اجزای سازنده، طبق اطلاعات ارائه شده توسط تولیدکننده، در جدول ۱ آمده است. برای ایجاد جدایش اولیه بین لایه‌ها در نمونه‌ها، یک لایه تفلون به ضخامت تقریبی ۲۰ میکرومتر در لایه میانی لوله کامپوزیتی قرار داده شد.

جدول ۱. ویژگی‌های الیاف کربن و رزین اپوکسی [۳۰].

پارامتر	فیبر کربن	رزین اپوکسی
چگالی ρ (گرم/سانتی‌متر)	۱.۷۸ ± ۰.۰۱	۱.۱۷
مدول الاستیسیته E11 (گیگاپاسکال)	۲۳۰	۳.۱
ضخامت (میلی‌متر)	۰.۳	-
درصد کربن (وزنی)	۹۴.۵	-
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۳۸۰۰-۴۰۰۰	۸۵

۲-۱ ساخت لوله‌های کامپوزیتی پیچش الیاف

در این پژوهش، مطابق شکل ۱(الف)، روش پیچش الیاف با زاویه‌گذاری $FW[\pm 45^\circ]$ برای تولید لوله‌های کامپوزیتی استفاده شد. به‌منظور جداسازی آسان‌تر لوله‌های کامپوزیتی از ماندل، یک ماندل فلزی ساخته شد و سطح آن برای کاهش اصطکاک سطحی پرداخت گردید. پس از فرآیند پیچش، لوله‌های کامپوزیتی FW ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط پخت اولیه شدند و سپس به مدت ۴ ساعت در فر با گردش هوا در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت نهایی گردیدند. در نهایت، لوله‌های کامپوزیتی با قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۳ میلی‌متر از طول اصلی جدا شدند (شکل‌های ۱(ب) و ۱(ج)).

¹ Double Cantilever Beam

شناسایی شدند. با تعیین سرعت موج AE (V) و اختلاف زمان رسیدن موج‌های AE (Δt)، موقعیت شکست (x_2 و x_1) بر حسب میلی‌متر محاسبه گردید. چیدمان معمول آزمایش در شکل ۲(ب) و تجهیزات مورد استفاده برای آزمون بارگذاری مود ۱ در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 95 \\ |x_2 - x_1| = V \cdot (t_2 - t_1) \end{cases}; \Delta t < \frac{95}{V} \quad (1)$$

تمام نمونه‌ها تحت بارگذاری مود ۱ با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. جابه‌جایی و نیروی وارد بر نمونه به صورت پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت گردید. همچنین، طول ترک در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای به‌طور پیوسته با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال Dino Lite ثبت شد. شمارش پیکسل‌ها به‌صورت دستی و با دقت ۰.۰۱ میلی‌متر انجام گرفت.

۳- پیش‌زمینه تئوری

۳-۱ تبدیل بسته موجک

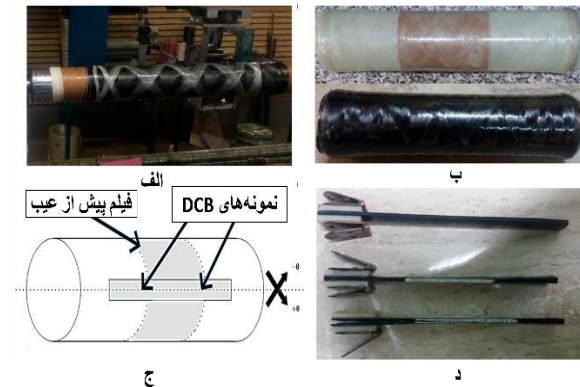
به‌منظور تحلیل مکانیزم‌های آسیب و تعیین درصد هر نوع آسیب، از تبدیل بسته موجک (WPT) استفاده شد. تحلیل این مؤلفه‌ها با به‌کارگیری تحلیل طیف توان^۱ از طریق تبدیل فوریه سریع (FFT) انجام گرفت. همچنین، برای تعیین سطح مناسب تجزیه، از معیار آنالوژی استفاده شد.

در گام نهایی تجزیه، سیگنال‌های AE در سه سطح شکسته شده و سپس به هشت مؤلفه تقسیم شدند [۳۲]. سپس، با در نظر گرفتن معیار انرژی و بر اساس رابطه (۲)، درصد انرژی هشت مؤلفه تجزیه‌شده در سطح سوم محاسبه گردید [۳۳].

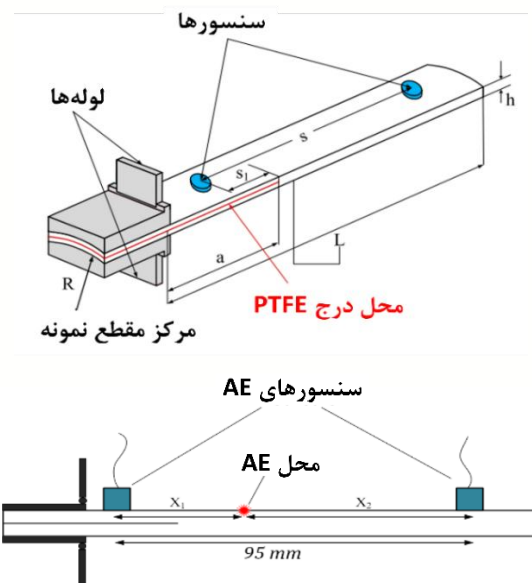
$$p_j^i(t) = c \sum_i \sum_j \frac{E_j^i(t)}{E_{\text{total}}(t)} \quad (2)$$

در این روابط، $E_j^i(t)$ و $E_{\text{total}}(t)$ به ترتیب انرژی هر مؤلفه موجک و انرژی کل سیگنال هستند که از طریق روابط زیر به دست می‌آیند.

از آن قرار گرفت. با استفاده از این روش و پردازش ثانویه سیگنال‌های AE، سیگنال‌های نویز ناشی از نواحی خارج از فضای بین دو حسگر (مانند نویز محیطی و اصطکاک) حذف شدند.



شکل ۱. الف) فرآیند ساخت لوله‌های کامپوزیتی به روش بیچش الیاف، ب) لوله‌های کامپوزیتی با جدایش اولیه، ج) شماتیکی از ایجاد جدایش در لوله‌های کامپوزیتی، د) نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده به روش بیچش الیاف برای آزمون مود شکست ۱.



شکل ۲. الف) شماتیک نمونه‌ی DCB، ب) تعیین موقعیت خرابی با روش آکوستیک امیشن، با استفاده از مکانیابی منبع ایجاد سیگنال

پس از انجام آزمون‌ها، سیگنال‌هایی که زمان صعود آن‌ها بیشتر از مدت‌زمان کل بوده یا انرژی آن‌ها صفر بود، حذف شدند. سپس، سیگنال‌هایی که توسط هر دو حسگر ثبت شده و شرایط معادله (۱) را برآورده می‌کردند،

¹ Power Spectrum Analysis

محدود نمونه‌ها ($\delta/a < 0.4$) براساس استاندارد ASTM D5528 [۳۱] می‌توان نوشت:

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right) = -\frac{\delta}{2B} \left(\frac{dP}{da} \right) \quad (5)$$

که در آن G نرخ آزادسازی انرژی کرنشی، B عرض نمونه، U انرژی الاستیک کل در نمونه آزمایش، a طول لایه‌لایه‌شدگی، δ جابه‌جایی نقطه بارگذاری و P نیروی اعمالی است.

با در نظر گرفتن نمونه DCB به عنوان یک تیر طره‌ای متقارن و استفاده از تئوری الاستیسیته، انعطاف‌پذیری الاستیک نمونه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (6)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و I ممان اینرسی مقطع است. با جایگذاری C از رابطه (۶)، به معادله‌ی زیر می‌رسیم.

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{BEI} = \frac{12P^2 a^2}{B^2 h^3 E} \quad (7)$$

رابطه‌ی (۷) را می‌توان آن را به صورت رابطه (۸) بازنویسی کرد.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (8)$$

در عمل، به دلیل امکان چرخش نمونه DCB در نوک لایه‌لایه‌شدگی و این که تیر به‌طور کامل طره‌ای نیست، رابطه (۸) یک برآورد محافظه‌کارانه از نرخ آزادسازی انرژی کرنشی ارائه می‌دهد. یکی از روش‌های بهبود این تئوری، در نظر گرفتن طول لایه‌لایه‌شدگی کمی بیشتر به صورت $a + |\Delta|$ است. پارامتر تصحیح طول ترک (Δ) به‌طور تجربی با رسم نمودار ریشه سوم تبعیث ($\sqrt[3]{C}$) بر حسب طول لایه‌لایه‌شدگی (a) و برازش خط به روش کمترین مربعات به دست می‌آید.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (9)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱ چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای

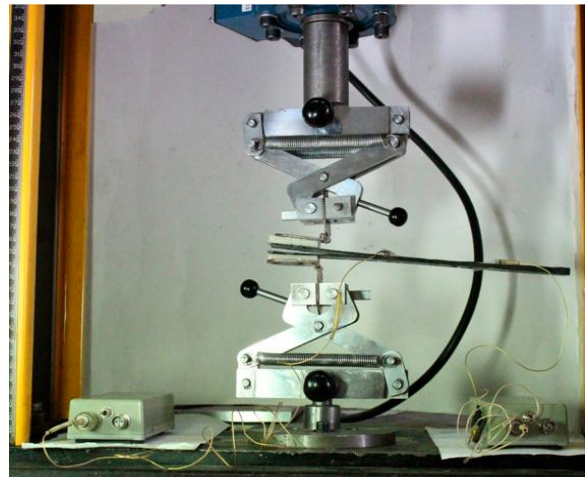
استحکام لایه‌لایه‌شدگی بر اساس نرخ بحرانی آزادسازی انرژی (G_{IC}) در رشد ترک ارزیابی می‌شود. نرخ بحرانی آزادسازی انرژی را می‌توان به‌صورت تجربی با استفاده از

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^i(\tau))^2 \quad (3)$$

$$E_{total}(t) = c \sum_i \sum_j E_j^i(t) \quad (4)$$

G_{IC}

در این جا، f_1^i, \dots, f_j^i بیانگر هر یک از مؤلفه‌های موجک در سطح آم سیگنال تجزیه‌شده و E_1^i, \dots, E_j^i نشان‌دهنده مقدار انرژی متناظر با هر مؤلفه هستند.



شکل ۳. آرایش آزمایشگاهی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش پیچش الیاف (FW).

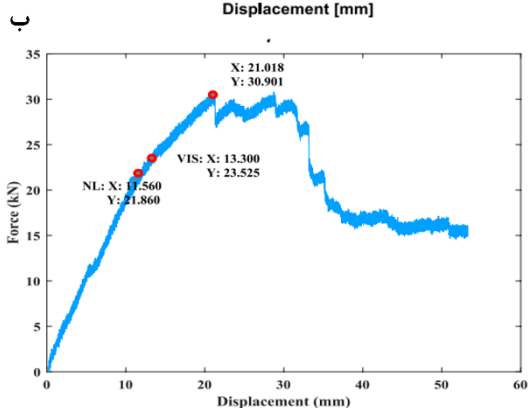
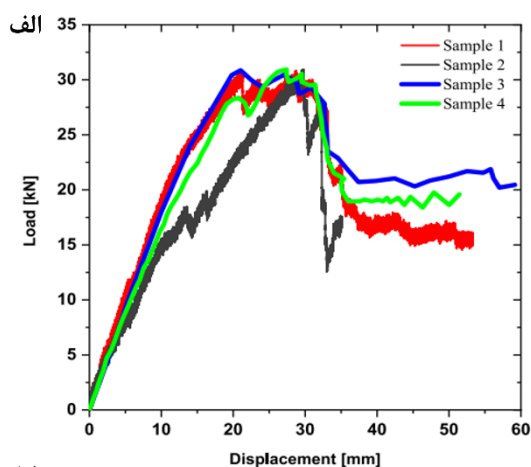
۳-۲ چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای (G_{IC})

در روش تحلیل تیر، نمونه کامپوزیتی شامل دو تیر طره‌ای یکسان است که طول هر یک برابر با طول ترک است. معمولاً در این تحلیل فرض می‌شود که انرژی کرنشی ناشی از بازشدگی ترک تنها در بخش‌های بازشده نمونه ذخیره می‌شود. اما در واقعیت، بخشی از انرژی کرنشی در قسمت بدون ترک نیز ذخیره می‌شود، زیرا نمی‌توان این بخش را کاملاً صلب فرض کرد. انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه تأثیر قابل توجهی بر محاسبه انرژی کرنشی دارد، حتی در بخش‌های ترک‌دار نمونه.

تنش‌های برشی ممکن است در این تحلیل نادیده گرفته شوند، ولی در مواردی که ناهمگنی ماده زیاد باشد، سهم تنش‌های برشی می‌تواند قابل توجه باشد. برای بررسی رشد لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مود I، نمونه‌های استاندارد DCB تحت شرایط کنترل جابه‌جایی بارگذاری شدند.

با فرض رفتار الاستیک خطی برای کامپوزیت و خمش

گهگاهی ترک همراه با گیر-لغزش به مقاومت در برابر شکست مربوط به رشد ترک در نواحی اطراف دسته‌های عرضی الیاف در نمونه‌های کامپوزیتی نسبت داده می‌شود.



شکل ۴. الف) منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌ی مود شکست ا،
ب) روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست.



شکل ۵. پدیده‌ی پل زنی الیاف در نمونه‌ی مود DCB.

این پدیده احتمالاً به ترک‌خوردگی عرضی دوره‌ای و پرش ترک بین دو سطح مشترک نمونه مربوط است. شکرپه و همکاران [۳۵]، و همچنین اوزدیل و کارلسون [۳۶] نیز در تحقیقات خود به این پدیده اشاره کرده‌اند.

روش تئوری تیر اصلاح‌شده (MBT)، روش کالیبراسیون تبعیت و روش کالیبراسیون تبعیت اصلاح‌شده به‌دست آورد [۳۴]. برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها، در روابط چقرمگی شکست، مقدار P با بار بحرانی (P_{cr}) جایگزین می‌شود؛ این بار بحرانی متناظر با لحظه آغاز رشد جدایش بین‌لایه‌ای است. در این مطالعه، مقدار بار بحرانی با استفاده از روش مکانیکی، روش AE، و ترکیبی از هر دو روش مکانیکی و آکوستیکی تعیین شده است.

در روش مکانیکی، سه معیار برای تعیین بار بحرانی پیشنهاد شده است: حالت غیرخطی (NL) در نمودار بار-جابجایی، افزایش ۰.۵٪ در تبعیت نمونه و مشاهده رشد جدایش بین‌لایه‌ای با بازرسی بصری (VIS).

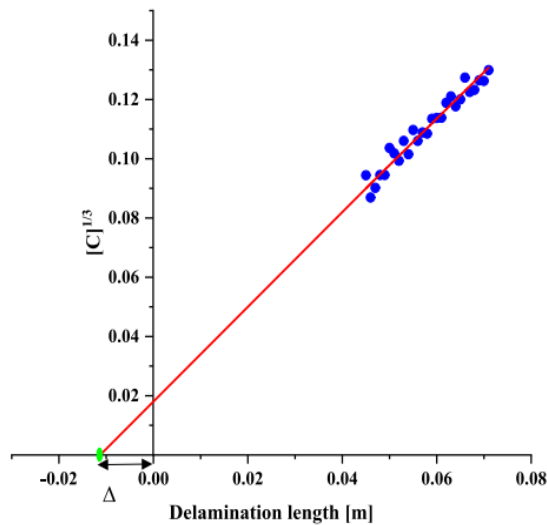
در این بخش، داده‌های مکانیکی ثبت‌شده در حین رشد لایه‌لایه‌شدگی بین‌لایه‌ای نمونه‌ها، برای بررسی رفتار آن‌ها استفاده شده است. نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی، مطابق موارد ذکرشده در بخش ۲-۲ آزمایش شدند. شکل‌های ۴(الف) و ۴(ب) نمودار نیرو-جابجایی رشد جدایش بین‌لایه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل ۴(ب) دیده می‌شود، منحنی نیرو-جابجایی در ابتدا رفتاری خطی دارد و جدایش بین‌لایه‌ای رشد نمی‌کند. سپس، تغییر در تقعر منحنی مشاهده می‌شود که این تغییر در چقرمگی متناظر با لحظه آغاز جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه است. پس از این رشد آنی، رشد جدایش متوقف شده و نیرو دوباره افزایش می‌یابد.

با ادامه افزایش نیرو و رسیدن به آستانه نهایی تحمل الیاف، الیاف دچار شکست شده، رشد جدایش بین‌لایه‌ای ادامه پیدا می‌کند، سختی نمونه تغییر کرده و نیرو افت می‌کند. سپس، به دلیل وقوع پدیده پل‌زنی الیاف (شکل ۵) در نوک ترک، نیرو مجدداً افزایش یافته و در بازه‌ای مشخص نوسان می‌کند. در ادامه، مسیر رشد ترک با الیاف بافته‌شده برخورد کرده و این الیاف مانع رشد ترک می‌شوند و در نتیجه نیرو افزایش می‌یابد. در نهایت، با افزایش نیرو، ترک مسیر خود را تغییر داده و وارد لایه‌های دیگر می‌شود که این امر باعث افت قابل توجه نیرو می‌گردد.

در تمامی نمونه‌ها، پس از رشد جدایش بین‌لایه‌ای، پدیده ناپایداری خفیف گیر-لغزش^۱ مشاهده شد. رشد

¹ Stick-Slip



شکل ۷. ریشه مکعب تطابق برحسب طول ترک نمونه DCB.

۵- نتایج انتشار آکوستیکی

در این بخش، چقرمگی شکست لایه‌لایه‌شدگی نمونه‌های کامپوزیتی پیچش الیاف (FW) با استفاده از روش انتشار آکوستیکی (AE) بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا انرژی سیگنال‌های دریافتی تحلیل شده و سپس نتایج حاصل از ترکیب داده‌های مکانیکی و آکوستیکی ارائه گردیده است.

به محض شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای، به دلیل فعال شدن مکانیزم‌های شکست مختلف در نمونه، تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیکی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. برای تعیین لحظه آغاز و گسترش مکانیزم‌های شکست، از انرژی تجمعی AE استفاده شده است. لحظه‌ای که تغییر ناگهانی در شیب منحنی انرژی مشاهده می‌شود، به‌عنوان لحظه آغاز انتشار آسیب در نظر گرفته می‌شود و بار متناظر با آن، بار بحرانی خواهد بود.

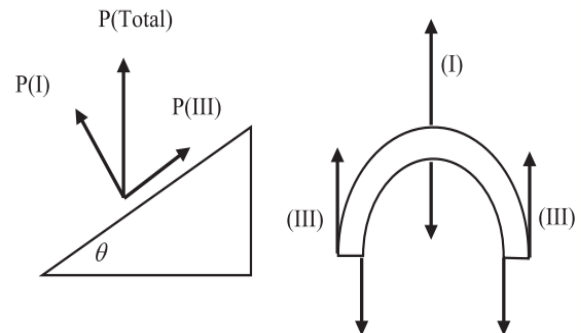
جدول ۲. مقدار میانگین سختی شکست بین‌لایه‌ای نمونه‌ها.

GIC (kJ/m ²)			نمونه‌ها
5%/max	VIS	NL	
۱.۰۳۰±۰.۲۵	۰.۴۹۶±۰.۳	۰.۴۰۱±۰.۱۵	± ۴۵

برای تعیین دقیق نرخ بحرانی آزادسازی انرژی کرنشی، ترکیب دو روش مکانیکی و AE به‌صورت تابع دیده‌بانی^۱

^۱ Sentry Function

باید توجه داشت که در نمونه‌های منحنی، لبه‌های بیرونی نمونه تحت برش خارج از صفحه (مود III) قرار می‌گیرند. با این حال، مطابق شکل ۶ و روابط (۱۰) و (۱۱)، به‌دلیل کوچک بودن زاویه θ ، حتی در لبه‌های نمونه بیش از ۹۹٪ بارگذاری از نوع مود I است.



شکل ۶. مودهای ایجادشده در اثر بارگذاری نمونه‌ی خمیده.

طبق رابطه (۹)، برای محاسبه چقرمگی شکست باید ضریب اصلاح (Δ) تعیین شود. برای این منظور، همان‌طور که در شکل ۷ آمده، نمودار ریشه مکعب تطابق بر حسب رشد ترک ترسیم شد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقدار ضریب تصحیح برابر با ۰.۰۱۱۷ متر به دست آمد. سپس، با جایگذاری مقادیر به‌دست‌آمده (از شکل‌های ۴ و ۷) در رابطه (۹)، مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها مطابق جدول ۲ محاسبه شدند.

همان‌طور که از جدول مشخص است، روش NL حد پایین مقادیر چقرمگی شکست را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، اختلاف بین مقادیر حاصل از سه روش تا حدی قابل توجه است و نتایج نیز پراکندگی محسوسی دارند. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی مکانیزم شکست و روش بازرسی چشمی نشان می‌دهد که بخش عمده مکانیزم شکست مربوط به رشد جدایش بین‌لایه‌ای و ترک‌خوردگی ماتریس ناشی از تغییر جهت الیاف است. همچنین، مکانیزم شکست الیاف به ندرت در نمونه رخ داده و عمدتاً به دلیل پارگی الیاف ناشی از پدیده پل‌زنی ایجاد شده است.

$$G_I = G_{Total} (\cos^2 \theta) \quad (10)$$

$$G_{III} = G_{Total} (\sin^2 \theta) \quad (11)$$

این‌که دومین افت شدید تابع دیده‌بانی در جابه‌جایی ۱۲٫۴۶ میلی‌متر رخ می‌دهد که متناظر با رشد ماکروسکوپی جدایش بین‌لایه‌ای در ماده است. همچنین، به دلیل کاهش نیرو، نرخ افزایش انرژی مکانیکی کاهش یافته و بنابراین افزایش انرژی AE بر افزایش انرژی مکانیکی غلبه می‌کند و تابع دیده‌بانی روند نزولی پیدا می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های ۸(الف) و ۸(ب) دیده می‌شود، با آغاز رشد ماکروسکوپی جدایش بین‌لایه‌ای، انرژی سیگنال‌های AE به شدت افزایش می‌یابد. با بزرگ‌نمایی شکل، مشخص می‌شود که قبل از نقطه A نیز فعالیت‌های آکوستیکی کم‌انرژی مشاهده می‌شود. در کامپوزیت‌های الیاف پلیمری، ابتدا در ناحیه نوک ترک، ریزآسیب‌هایی مانند ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس ایجاد می‌شود. سپس، با گسترش و اتصال این ریزآسیب‌ها، جدایش بین‌لایه‌ای به صورت ماکروسکوپی رشد می‌کند. بنابراین، فعالیت‌های آکوستیکی ضعیف پیش از رشد ماکروسکوپی می‌تواند ناشی از ایجاد میکروعیوب در نمونه باشد.

شکل ۹ موقعیت پیش‌بینی‌شده نوک جدایش بین‌لایه‌ای با روش مکان‌یابی AE و موقعیت ثبت‌شده نوک جدایش توسط روش بصری را نشان می‌دهد. در حین بارگذاری، تمرکز تنش در ناحیه جلوی نوک ترک منجر به ترک خوردگی ماتریس می‌شود، اما به شکست الیاف در نوک ترک منجر نمی‌گردد، زیرا جهت بیشینه تنش در راستای ضخامت نمونه و عمود بر صفحه الیاف است. ترک خوردگی ماتریس همچنین ممکن است به دلیل خم شدن بازوها در ناحیه پشت نوک ترک رخ دهد.

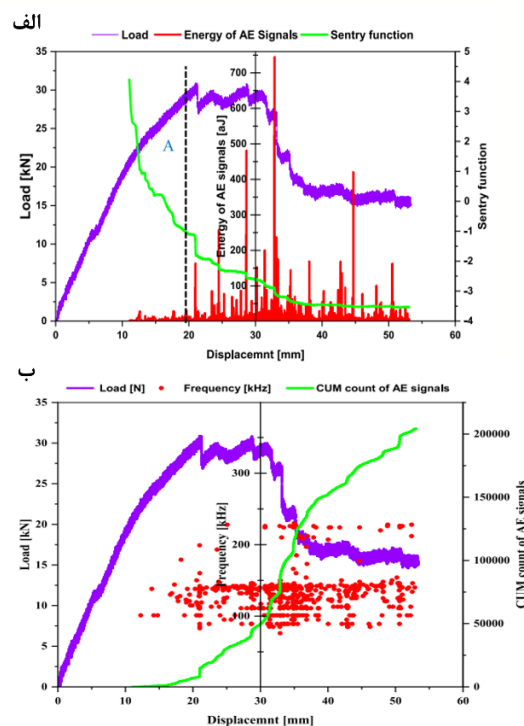
از سوی دیگر، شکست الیاف پدیده‌ای است که به دلیل پارگی الیاف پل‌زده بین لایه‌های بالایی و پایینی ترک در یک ناحیه کوچک پشت نوک ترک رخ می‌دهد. به دلیل پراکندگی محل ترک خوردگی ماتریس، با فیلتر کردن داده‌ها بر اساس ویژگی‌های آکوستیکی ترک خوردگی ماتریس، پهنای باند نتایج تغییر زیادی نمی‌کند، اما با فیلتر کردن سیگنال‌ها بر اساس ویژگی‌های شکست الیاف، تنها سیگنال‌های ناحیه کوچک پشت نوک ترک باقی می‌مانند و موقعیت نوک جدایش بین‌لایه‌ای دقیق‌تر پیش‌بینی می‌شود. بنابراین، برای کاهش پراکندگی و پهنای باند نتایج AE

استفاده می‌شود. تابع دیده‌بانی لگاریتم نسبت انرژی مکانیکی به انرژی AE است و براساس [۱۹] به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \ln \left(\frac{E_{me}(x)}{E_{AE}(x)} \right) \quad (12)$$

که در آن، E_{me} انرژی مکانیکی (مساحت زیر منحنی بار-جابه‌جایی) و E_{AE} انرژی تجمعی AE است و x میدان جابه‌جایی را نشان می‌دهد.

با توجه به وجود نواحی مختلف در منحنی نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های FW، تابع دیده‌بانی در هر ناحیه رفتار متفاوتی دارد (شکل ۸). در جابه‌جایی ۱۱٫۰۵۴ میلی‌متر، با ایجاد اولین ریزآسیب‌ها در ماده، تابع دیده‌بانی افت ناگهانی نشان می‌دهد. در واقع، در لحظه اولیه رشد جدایش بین‌لایه‌ای، هنگامی که تعداد سیگنال‌های AE ناگهان افزایش می‌یابد، تابع دیده‌بانی به صورت لحظه‌ای افت کرده و مقدار آن کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۸. تعیین مقدار بار بحرانی به وسیله (الف) انرژی و سیگنال‌های AE و تابع سنتری، و (ب) انرژی تجمعی AE.

با ادامه رشد جدایش بین‌لایه‌ای و فعال شدن مکانیزم‌های شکست مختلف، تعداد سیگنال‌های AE افزایش می‌یابد؛ در نتیجه نرخ افزایش انرژی AE بیشتر شده تا

جدول ۳. مقدار میانگین سختی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از روش‌های گسیل آکوستیکی (AE).

GIC (kJ/m ²)	C = δ/P (μm/m)	جابجایی (mm)	بار (kN)
۰.۳۶۹	۰.۵۲۵	۱۱.۰۵۴	۲۱.۰۵۴

جدول ۴. مقایسه نتایج گسیل آکوستیکی (AE) با روش‌های NL، VUS و %/حداکثر.

روش	NL	VIS	5%/max
اختلاف (%)	۸	۲۵.۵	۶۴.۵

۵-۱ مکانیزم‌های خرابی و تحلیل SEM

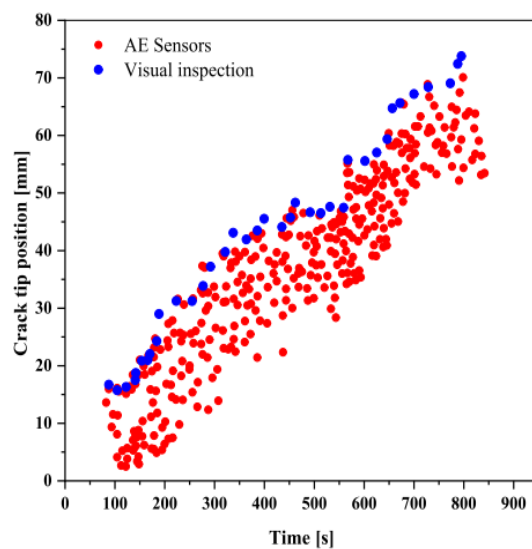
تشخیص و شناسایی مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از تکنیک نظارت بر سلامت سازه (SHM)، به کاربر امکان می‌دهد تا از وضعیت آسیب‌دیدگی ساختار آگاه شده و فرآیند تعمیر مناسبی برای اصلاح آن انتخاب کند [۳۴، ۳۷].

با تحلیل فرکانسی سیگنال‌های انتشار آکوستیکی (AE) با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT)، الگوهای پایه AE استخراج شده و برای طبقه‌بندی سیگنال‌ها استفاده می‌شوند. شکل ۱۰ محدوده فرکانسی سیگنال‌های AE را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترک‌خوردگی ماتریس در محدوده فرکانسی تقریبی ۴۵ کیلوهرتز تا ۲۰۰ کیلوهرتز قرار دارد، و شکست الیاف در بازه ۲۹۰ کیلوهرتز تا ۵۰۰ کیلوهرتز است.

جدول ۵ دامنه فرکانسی انواع مختلف خرابی‌ها را در برخی مطالعات نشان می‌دهد. کم‌ترین فرکانس به ترک‌خوردگی ماتریس تعلق دارد، بیشترین فرکانس مربوط به شکست الیاف است و فرکانس‌های میانی مربوط به جدایش الیاف از ماتریس هستند. نتایج این مطالعه نیز با ادبیات موجود همخوانی خوبی دارد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ (الف) دیده می‌شود، اولین ریزآسیب ایجاد شده در ماده، ترک‌خوردگی ماتریس است که با تصاویر SEM از سطح شکست نمونه در ابتدای منحنی نیرو-جابجایی مطابقت دارد. این حالت خرابی مربوط به اولین ناحیه (مطابق شکل ۸) در منحنی نیرو-جابجایی

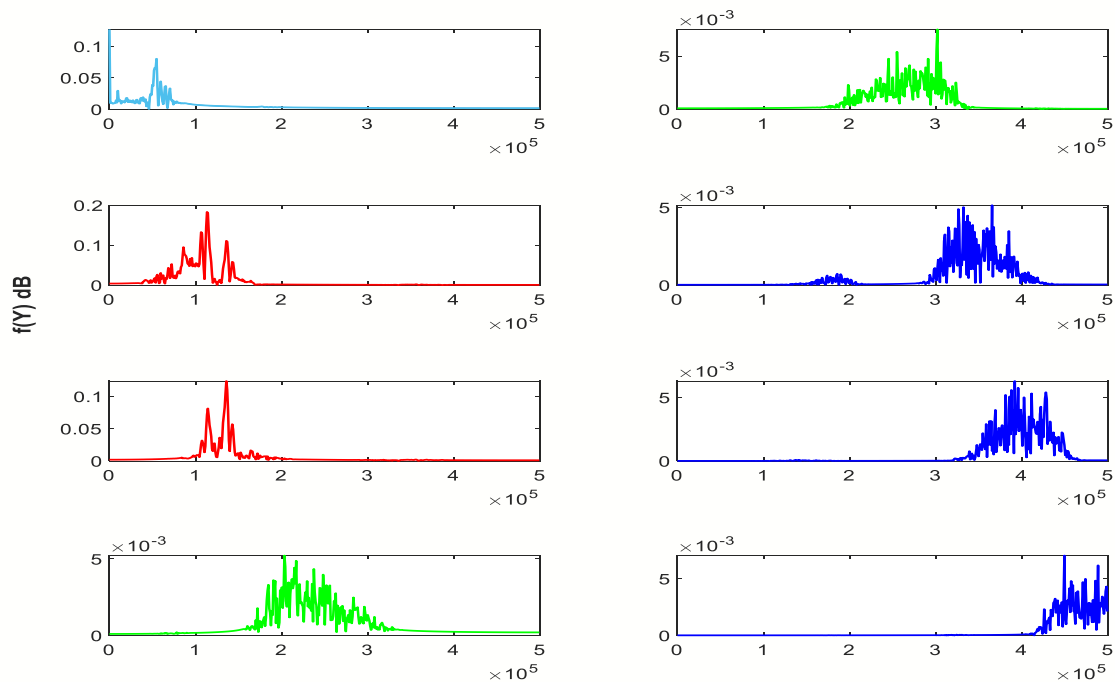
افزایش دقت پیش‌بینی موقعیت نوک ترک، سیگنال‌های نامرتبط با شکست الیاف حذف می‌شوند. برای بهبود بیشتر نتایج، میانگین سیگنال‌های ثبت شده در یک زمان محاسبه شده و سپس سیگنال‌هایی که پراکندگی بسیار زیادی نسبت به میانگین دارند، حذف می‌گردند تا منحنی پیش‌بینی رشد ترک به دست آید. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، از آن‌جا که شکست الیاف یا به دلیل پارگی الیاف پل‌زده یا به دلیل شکست لایه رابط در ناحیه پشت نوک ترک رخ می‌دهد، حد بالای نتایج AE در شکل ۹، موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین‌لایه‌ای را نشان می‌دهد.



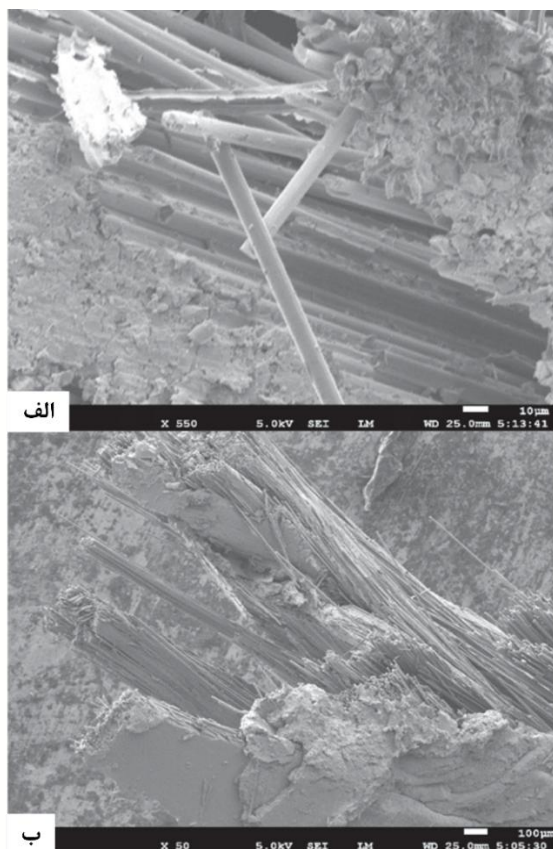
شکل ۹. پیش‌بینی رشد جدایش بین‌لایه‌ای با استفاده از روش گسیل آکوستیکی.

جدول ۳ مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای به کمک روش آکوستیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص است، حداقل مقدار بار بحرانی توسط روش AE گزارش شده، در حالی که حداکثر مقدار توسط روش حداکثر بار به دست آمده است. همچنین، مشاهده می‌شود که روش AE نزدیک‌ترین مقدار را به بار بحرانی به دست آمده از روش نقطه غیرخطی (NL) نمودار نیرو-جابجایی دارد، که این روش توسط استاندارد توصیه شده است.

طبق جدول ۴، اختلاف میان نتایج روش AE و روش NL برابر با ۸٪ است که نشان از تطابق خوب این دو روش دارد.



شکل ۱۰. محدوده فرکانسی مکانیزم‌های گوناگون آسیب



شکل ۱۱. نتایج SEM از مکانیزم‌های شکست.

نمونه‌ها است، که در آن سنسورها سیگنال‌های ضعیفی از فعالیت‌های AE دریافت کردند.

طیف فرکانسی سیگنال مربوط به میانه این ناحیه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این طیف فرکانسی علاوه بر محدوده ترک‌خوردگی ماتریس، محدوده فرکانسی مربوط به جداسازی الیاف از ماتریس نیز مشاهده می‌شود، اما شدت فرکانس‌های شکست الیاف پایین است که نشان می‌دهد مکانیزم غالب در این ناحیه ترک‌خوردگی ماتریس و جداسازی الیاف از ماتریس است. این مکانیزم‌های خرابی مربوط به دومین ناحیه آزمایش حالت ۱ هستند.

علاوه بر این، مطابق شکل ۱۱ (ب)، در نزدیکی محل همپوشانی دسته‌های الیاف، شکست‌های نوع گسیختگی جارویی^۱ (شبه پرز پرنده) مشاهده شده است. تصاویر SEM سطح شکست نشان می‌دهد که مکانیزم گسیختگی جارویی به دلیل مقاومت بالای الیاف کربنی نسبت به مقاومت تماس بین الیاف و رزین، نقش قابل توجهی در شکست دارد.

^۱ Brooming

می‌باشد. تطابق نتایج به دست آمده از این روش با نتایج استاندارد، نشان دهنده عملکرد خوب روش انتشار آکوستیکی در پیش‌بینی شروع و انتشار جدایش بین لایه‌های در چند لایه‌های کامپوزیتی ساخته شده با روش سیم‌پیچ رشته‌ای است.

۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸- منابع

- [1] Mohamad, F., Hossein, H., Farzad, P., et al. (2012). COMPOSITE MATERIALS DAMAGE CHARACTERIZATION UNDER QUASI-STATIC 3-POINT BENDING TEST USING FUZZY C-MEANS CLUSTERING. *Applied Mechanics and Materials*, 110–116, 1221–1228.
- [2] Shokrieh, M., Salamat-Talab, M., & Heidari-Rarani, M. (2017). DEPENDENCY OF BRIDGING TRACTION OF DCB COMPOSITE SPECIMEN ON INTERFACE FIBER ANGLE. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, 22–32.
- [3] Barbero, E., Reddy, J., & Structures, I. J. S. (1991). MODELING OF DELAMINATION IN COMPOSITE LAMINATES USING A LAYER-WISE PLATE THEORY. *International Journal of Solids and Structures*, 28, 373–388.
- [4] Supian, A., Sapuan, S., Jawaid, M., et al. (2021). CRASHWORTHINESS RESPONSE OF FILAMENT WOUND KENAF/GLASS FIBRE-REINFORCED EPOXY COMPOSITE TUBES WITH INFLUENCE OF STACKING SEQUENCE UNDER INTERMEDIATE-VELOCITY IMPACT LOAD. *Fibers and Polymers*, 22, 1–12.
- [5] Bascom, W., Bitner, M. J., Moulton, R., et al. (1980). THE INTERLAMINAR FRACTURE OF ORGANIC-MATRIX, WOVEN REINFORCEMENT COMPOSITES. *Composites*, 11, 9–18.
- [6] Wilkins, D., Eisenmann, J., Camin, R., et al. (1982). CHARACTERIZING DELAMINATION GROWTH IN GRAPHITE-EPOXY. In *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775 (pp. 168–183).
- [7] Devitt, D., Schapery, R. A., & Bradley, W. L. (1980). A METHOD FOR DETERMINING THE MODE I DELAMINATION FRACTURE TOUGHNESS OF ELASTIC AND VISCOELASTIC COMPOSITE MATERIALS. *Journal of Composite Materials*, 14, 270–285.
- [8] Mahmood, A. H., Gong, R., & Porat, I. (2013). IMPROVEMENT IN THE FRACTURE TOUGHNESS

جدول ۵. بازه فرکانسی مکانیزم‌های مختلف آسیب در کامپوزیت‌های CFRP.

مرجع	ترک خوردگی ماتریس	جداشدگی الیاف از ماتریس	گسیختگی (شکست) الیاف
۳۷	۹۰-۱۸۰	۲۴۰-۳۱۰	>۳۰۰
۳۸	<۵۰	۲۰۰-۳۰۰	۴۰۰-۵۰۰
۳۹	<۳۰۰	-	>۵۰۰
۴۰	<۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	>۴۰۰
۴۱	-	۲۵۰-۳۳۰	>۴۵۰
۴۲	<۱۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۴۰۰-۴۵۰

۶- نتیجه گیری

هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی تأثیر جدایش بین لایه‌های بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی است. نمونه‌های آزمایشی به صورت طولی از لوله‌های کامپوزیتی برش داده شدند. سپس نمونه‌های DCB تحت آزمایش جدایش بین لایه‌های بر اساس استانداردهای ASTM قرار گرفتند. پس از آن، نرخ آزادسازی انرژی بر اساس داده‌های انتشار آکوستیک (AE) و استاندارد D5528 (روش‌های NL، VIS، و 5%/max) تعیین شد. برای محاسبه مقاومت شکست بین لایه‌های در نمونه‌های کامپوزیتی، بار بحرانی نمونه‌ها با استفاده از روش‌های مکانیکی و آکوستیکی تعیین گردید. سپس مقادیر به دست آمده برای محاسبه مقاومت شکست بین لایه‌های هر نمونه به کار گرفته شد. بر اساس نتایج این مطالعه، مقادیر به دست آمده از روش آکوستیکی با مقادیر حاصل از روش غیرخطی (NL) سازگاری داشتند. مقادیر مقاومت شکست مربوط به آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای که توسط هر دو روش غیرخطی و آکوستیکی محاسبه شده‌اند، تقریباً یکسان بوده و حداکثر خطای آن‌ها ۸٪ است. تفاوت جزئی ناشی از انتخاب نقاط بارگذاری-جابجایی است. روش آکوستیکی قابلیت شناسایی شروع رشد جدایش و تعیین مقاومت شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف و در ساختارهای پیچیده‌ای که امکان تشخیص مستقیم رشد جدایش وجود ندارد و رشد جدایش ناپایدار است را دارا

- TUBES UNDER LATERAL LOADING BY ACOUSTIC EMISSION METHOD AND FINITE ELEMENT SIMULATION. *Modares Mechanical Engineering*, 22, 647–655.
- [18] Jung, D., Mizutani, Y., Todoroki, A., et al. (2021). EFFECT OF ULTRAVIOLET IRRADIATION ON THE MATERIAL PROPERTIES AND ACOUSTIC EMISSION OF A FIBER-REINFORCED COMPOSITE. *Fibers and Polymers*, 22, 1940–1949.
- [19] Oskouei, A. R., & Ahmadi, M. (2010). ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS OF MODE I DELAMINATION IN GLASS/POLYESTER COMPOSITES. *Journal of Composite Materials*, 44, 793–807.
- [20] Oskouei, A. R., Khamedi, R., Heidary, H., et al. (2007). ACOUSTIC EMISSION DATA CLUSTERING FOR ANALYZING DAMAGE MECHANISMS IN GLASS/POLYESTER COMPOSITES UNDER MODE I DELAMINATION. In *Proceedings of the American Institute of Physics Conference*.
- [21] Silversides, I., Maslouhi, A., & Laplante, G. (2013). INTERLAMINAR FRACTURE CHARACTERIZATION IN COMPOSITE MATERIALS BY USING ACOUSTIC EMISSION. In *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace*.
- [22] Fotouhi, M., Heidary, H., Ahmadi, M., et al. (2012). CHARACTERIZATION OF COMPOSITE MATERIALS DAMAGE UNDER QUASI-STATIC THREE-POINT BENDING TEST USING WAVELET AND FUZZY C-MEANS CLUSTERING. *Journal of Composite Materials*, 46, 1795–1808.
- [23] Pashmforoush, F., Fotouhi, M., & Ahmadi, M. (2012). DAMAGE CHARACTERIZATION OF GLASS/EPOXY COMPOSITE UNDER THREE-POINT BENDING TEST USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1380–1390.
- [24] Romhány, G., & Szebényi, G. (2023). INTERLAMINAR FATIGUE CRACK GROWTH BEHAVIOR OF MWCNT/CARBON FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITES. *Journal of Composite Materials*, 57(25), 3988–4002.
- [25] Ozdil, F., Carlsson, L., & Li, X. (2000). CHARACTERIZATION OF MODE II DELAMINATION GROWTH IN GLASS/EPOXY COMPOSITE CYLINDERS. *Journal of Composite Materials*, 34, 274–298.
- [26] Ozdil, F., Carlsson, L., & Davies, P. (1999). CHARACTERIZATION OF DELAMINATION TOUGHNESS OF ANGLE-PLY GLASS/EPOXY CYLINDERS. In *Proceedings of the International Conference on Composite Materials (ICCM 1999)*.
- [27] Perillo, G., & Echtermeyer, A. (2012). (MODE I) OF LAMINATED GLASS FABRIC COMPOSITES THROUGH AIR-JET TEXTURING. *Fibers and Polymers*, 14, 591–596.
- [9] Whitney, J., Browning, C., & Hoogsteden, W. (1982). A DOUBLE CANTILEVER BEAM TEST FOR CHARACTERIZING MODE I DELAMINATION OF COMPOSITE MATERIALS. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1, 297–313.
- [10] Benzeggagh, M. L., & Kenane, M. (1996). MEASUREMENT OF MIXED-MODE DELAMINATION FRACTURE TOUGHNESS OF UNIDIRECTIONAL GLASS/EPOXY COMPOSITES WITH MIXED-MODE BENDING APPARATUS. *Composites Science and Technology*, 56, 439–449.
- [11] Amenabar, I., Mendikute, A., López-Arraiza, A., et al. (2011). COMPARISON AND ANALYSIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES SUITABLE FOR DELAMINATION INSPECTION IN WIND TURBINE BLADES. *Composites Part B: Engineering*, 42, 1298–1305.
- [12] Alimirzaei, S., Najafabadi, M. A., Nikbakht, A., et al. (2022). DAMAGE MECHANISM CHARACTERIZATION OF $\pm 35^\circ$ AND $\pm 55^\circ$ FILAMENT-WOUND COMPOSITE TUBES USING ACOUSTIC EMISSION METHOD. *International Journal of Damage Mechanics*, 31.
- [13] Zhou, W., Wei, Z. Y., Wang, G. F., et al. (2021). TRANSVERSE TENSILE DEFORMATION AND FAILURE OF THREE-DIMENSIONAL FIVE-DIRECTIONAL BRAIDED CARBON FIBER COMPOSITES. *Fibers and Polymers*, 22, 1099–1110.
- [14] Alimirzaei, S., Ahmadi Najafabadi, M., Nikbakht, A., et al. (2023). INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF 3D FILAMENT WOUND COMPOSITE TUBES: EXPERIMENTAL EVALUATION, NUMERICAL SIMULATION, AND ACOUSTIC EMISSION MONITORING. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–16.
- [15] Saeedifar, M., & Zarouchas, D. (2020). DAMAGE CHARACTERIZATION OF LAMINATED COMPOSITES USING ACOUSTIC EMISSION: A REVIEW. *Composites Part B: Engineering*, 195, 108039.
- [16] Alimirzaei, S., Najafabadi, M. A., & Khodaei, A. (2022). CHARACTERIZATION OF THE DAMAGE MECHANISM OF GLASS/EPOXY COMPOSITE TUBES UNDER QUASI-STATIC AXIAL LOADING USING ACOUSTIC EMISSION MONITORING. *Applied Composite Materials*, 29, 1911–1936.
- [17] Bani Mohammad Ali, A., Alimirzaei, S., & Ahmadi Najafabadi, M. (2022). EVALUATION OF DAMAGE OF FILAMENT WOUND COMPOSITE

ACOUSTIC EMISSION METHOD. *AUTOMOTIVE AND MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL*, 54.

EVALUATION OF MODE I INTERLAMINAR FRACTURE TOUGHNESS OF FILAMENT-WOUND GFRE COMPOSITE PIPE. In *Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials* (pp. 24–28).

- [28] Buarque, E., & d'Almeida, J. (2007). THE EFFECT OF CYLINDRICAL DEFECTS ON THE TENSILE STRENGTH OF GLASS FIBER/VINYL-ESTER MATRIX REINFORCED COMPOSITE PIPES. *Composite Structures*, 79, 270–279.
- [29] Shaterzadeh, A., Abolghasemi, S., & Rezaei, R. (2014). FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THERMAL BUCKLING OF RECTANGULAR LAMINATED COMPOSITE PLATES WITH CIRCULAR CUT-OUT. *Journal of Thermal Stresses*, 37, 604–623.
- [30] Qiu, S., Fuentes, C. A., Zhang, D., Van Vuure, A. W., & Seveno, D. (2016). WETTABILITY OF A SINGLE CARBON FIBER. *Langmuir*, 32(38), 9697–9705.
- [31] ASTM International. (2007). STANDARD TEST METHOD FOR MODE I INTERLAMINAR FRACTURE TOUGHNESS OF UNIDIRECTIONAL FIBER-REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES.
- [32] Benzeggagh, M. L., & Kenane, M. (1996). MEASUREMENT OF MIXED-MODE DELAMINATION FRACTURE TOUGHNESS OF UNIDIRECTIONAL GLASS/EPOXY COMPOSITES WITH MIXED-MODE BENDING APPARATUS. *Composites Science and Technology*, 56, 439–449.
- [33] Fotouhi, M., Saeedifar, M., Sadeghi, S., et al. (2015). INVESTIGATION OF THE DAMAGE MECHANISMS FOR MODE I DELAMINATION GROWTH IN FOAM CORE SANDWICH COMPOSITES USING ACOUSTIC EMISSION. *Structural Health Monitoring*, 14, 265–280.
- [34] McCrory, J. P., Al-Jumaili, S. K., Crivelli, D., et al. (2015). DAMAGE CLASSIFICATION IN CARBON FIBRE COMPOSITES USING ACOUSTIC EMISSION: A COMPARISON OF THREE TECHNIQUES. *Composites Part B: Engineering*, 68, 424–430.
- [35] Shokrieh, M., Heidari-Rarani, M., & Ayatollahi, M. (2012). DELAMINATION R-CURVE AS A MATERIAL PROPERTY OF UNIDIRECTIONAL GLASS/EPOXY COMPOSITES. *Materials and Design*, 34, 211–218.
- [36] Ozdil, F., & Carlsson, L. (1999). BEAM ANALYSIS OF ANGLE-PLY LAMINATE DCB SPECIMENS. *Composites Science and Technology*, 59, 305–315.
- [37] Alimirzaei, S., Najafabadi, M. A., & Bani Mohammad Ali, A. (2022). INVESTIGATION OF FAILURE MECHANISM OF THE COMPOSITE TUBES MADE BY FILAMENT WINDING PROCESS BY