



ارزیابی خرابی مود II کامپوزیت‌های لایه‌ای با استفاده از نوع جدیدی از موج نشر آوایی و روش المان محدود

مهدی حبیبی¹، جلال یوسفی²، مهدی احمدی نجف‌آبادی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* صندوق پستی، 1587-4413، ahmadin@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 دی 1396

پذیرش: 26 بهمن 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

موج لمب

نشر آوایی

مکانیزم خرابی

کامپوزیت لایه‌ای

جدایش بین لایه‌ای

جدایش بین لایه‌ای یکی از مهمترین عیوب در مواد کامپوزیتی لایه لایه می‌باشد که وجود این عیب در یک سازه باعث کاهش استحکام آن سازه می‌گردد. در این مقاله، روشی با قابلیت اطمینان بالا برای ارزیابی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های لایه‌ای با استفاده از روش نشر آوایی پیشنهاد شده است. ابتدا یک روش جدید برای تجزیه بنیادی حالت‌های موجی در نمونه‌های کوچک توسعه داده شد. مکانیزم‌های خرابی در مود II شکست برای نمونه‌های بافته و تک جهته با استفاده از روش دسته‌بندی فازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از آن، پدیده توقف ترک در هر نمونه مورد بررسی گردید. در ادامه، تست‌های تجربی و مدل‌سازی لایه چسبنده برای مشخص کردن جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های مود دو به کار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش اثر پراکندگی صوت نظیر اتلاف سیگنال‌های نشرآوایی با استفاده از روش پیشنهادی جدید با موفقیت امکان‌پذیر است. به عنوان نکته نهایی، نتایج این مطالعه می‌تواند انواع خرابی را در کامپوزیت‌های لایه‌ای به طور مؤثر با استفاده از تکنیک موجی انتشار آوایی متمایز سازد.

Damage assessment of mode II of polymer composite material using a new acoustic emission and finite element methods

Mahdi Habibi¹, Jalal Yousefi², Mehdi Ahmadi Najafabadi^{3*}

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1587-4413 Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 January 2018

Accepted 15 February 2018

Available Online 17 March 2018

Keywords:

Lamb Wave

Acoustic Emission

Damage Mechanisms

Composite Laminates

Delamination

ABSTRACT

Delamination is one of the major failure modes of the laminated composite material, which is responsible for the stiffness degradation of these materials. Hence, it is necessary to investigate this damage mechanism in these types of materials in order to distinguish their behaviors and their effects on the residual strength of the composite laminates. In this paper, a very capable procedure is proposed to assess delamination using Acoustic Emission (AE) method in composite laminates. Firstly, a novel procedure was established to decompose the fundamental Lamb wave modes in small size specimens. The damage mechanisms in End Notched Flexure (ENF) in woven and unidirectional specimens were then distinguished using Fuzzy Clustering Method (FCM). Subsequently, the crack-arrest phenomenon was inspected in each specimen. Next, experimental and Cohesive Zone Modeling (CZM) methods were done to characterize the delamination using ENF specimens. The results displayed how, it is possible to effectively reduce the effect of propagating media such as attenuation of AE signals using the new proposed procedure. In conclusion, the results of this research could lead to proficiently distinguishing different damages in laminated composite using AE Lamb-based technique.

1- مقدمه

شکست از قبیل ترک‌های ماتریسی¹، جدایش لایه‌ای²، جدایش بین ماتریس و الیاف³، شکست الیاف⁴ ناشی می‌شوند. این مودهای خرابی دارای خصوصیات صوتی متفاوتی‌اند که ناشی از مجموعه‌ای از عیوب میکروسکوپی در داخل

روش نشر آوایی (به عنوان یک تست غیر مخرب) را می‌توان امواج تنش ناشی از انتشار محلی انرژی کرنشی آزاد شده در اثر فرآیندهای خرابی نظیر رشد ترک در ساختار نمونه تعریف کرد[1]. که این امواج را می‌توان شناساگر رشد خرابی مد نظر گرفت. سیگنال‌های نشر آوایی در مواد کامپوزیتی از مودهای

¹ Matrix cracking

² Delamination

³ Deboning

⁴ Fibre breakage

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Habibi, J. Yousefi, M. Ahmadi Najafabadi, Damage assessment of mode II of polymer composite material using a new acoustic emission and finite element methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 126-134, 2018 (in Persian)

است. پس از آن، جدایش بین لایه ای تحت آزمون خمش سه نقطه بررسی می‌شود. جزئیات آزمایش‌ها و نتایج حاصل در بخش‌های زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- شرح مواد مورد استفاده

تست‌های آزمایشی روی ورق‌های مستطیلی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی انجام گرفته است. جزئیات دو مدل متفاوت لایه چینی در جدول 1 ارائه شده است. از پیش آغشته‌های شیشه تک جهت⁶ و بافته⁷ عرضه شده توسط شرکت آنگلونی⁸ برای ساخت صفحات کامپوزیتی با استفاده از رزین اپوکسی⁹ بهره گرفته شده است. در نهایت نمونه‌ها به منظور پخت رزین با استفاده از کیسه خلاء در اتوکلاو با دمای 125 درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت قرار داده شده‌اند. ترک اولیه با قراردادن فیلم تفلون به ضخامت 20 میکرون در لایه میانی کامپوزیت به عنوان جدایش اولیه ایجاد و روش سی-اسکن اولتراسونیک¹⁰ برای بررسی کیفیت قطعات به کار گرفته شده است. صفحات با دستگاه جت آب¹¹ به نوارهایی با ابعاد 170 × 20 mm برش داده شده‌اند (استاندارد ASTM D7905).

2-2- روش آزمایش

تنظیمات تست مود II¹² برای نمونه کامپوزیتی تک جهت مستطیلی با ضخامت یک‌نواخت که در یک انتهای آن ترک به عنوان شروع کننده جدایش بین لایه‌ای (استاندارد ASTM D7905) وجود دارد (شکل 1). نمونه‌ها با ترک اولیه 60 mm آماده شدند. خمش سه نقطه با استفاده از دستگاه عمومی کشش دار تک¹³ و بارگذاری به حالت کنترل جابه‌جایی با نرخ ثابت 2 mm/min در دمای 25°C در طول میانی تیر کامپوزیتی اعمال شده است. ظرفیت سلول بارگذاری 1000 نیوتون با دقت ±0.1N است. سه نمونه به عنوان تکرار پذیری برای صحت سنجی داده‌های استخراج شده، مورد آزمایش قرار گرفته است.

2-3- سنسورهای نشر آوایی

دو سنسور نشر آوایی برای ثبت سیگنال‌های نشر آوایی تولید شده در طی آزمون خمش سه نقطه استفاده شده است. فرکانس رزونانس سنسور پیزوالکتریک تک-کریستال نشر آوایی با دامنه عملکردی 100 – 750 kHz، 513.28 kHz است. پیش تقویت کننده AST – 2/4/6 برای تقویت سیگنال‌های نشر آوایی با درجه 40 dB به کار گرفته شده است. نرخ نمونه برداری برد جمع آوری داده‌های نشر آوایی در یک مگاسمپل بر ثانیه تنظیم شده است. آستانه دریافت سیگنال‌های نشر آوایی، 35 dB تنظیم گردید. قبل

ساختار نمونه است. این عیوب میکروسکوپی ممکن است سبب خرابی ناگهانی پیش از تغییر سختی یا منحنی هیستریزس شود. از این رو، نشر آوایی می‌تواند ابزاری مؤثر برای تشخیص خرابی در مواد کامپوزیتی باشد. ضروریست که اطلاعات مطلوبی در مورد ویژگی‌های منبع انتشار موج نشر آوایی در اختیار باشد. خرابی‌های ایجاد شده باعث تولید مدهای مختلفی از موج‌های لمب در سازه‌های ورقه‌ای می‌شود [2]. موج‌های لمب صفحه‌ای به دلیل توانایشان در حفظ حساسیت خود به خرابی در طول فواصل طولانی انتشار، نقش مهمی در ارزیابی غیر مخرب¹ دارند [3]. تحقیقات [4,5] نشان داد که محدوده‌های فرکانسی مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی، بین 100 تا 500 کیلوهرتز است. در این طیف فرکانسی، عمدتاً موج‌های لمب شامل مدهای اصلی متقارن S₀ و نامتقارن A₀ است [6,7]. بنابراین سیگنال‌های نشر آوایی تولید شده در نمونه‌های کامپوزیتی ترکیبی از مدهای اصلی امواج لمب هستند. برخی از محققان تاکنون مکانیزم خرابی را با استفاده از روش‌های مختلف به ویژه نشر آوایی به عنوان یک روش غیر مخرب برای مواد کامپوزیتی مورد بررسی قرار داده‌اند [4,5,8-16]. لوتاس و کوستاپولس² [4] نشان دادند که نشر آوایی را می‌توان به عنوان ابزاری مؤثر برای نظارت بر مکانیزم‌های مختلف خرابی در کامپوزیت بافته در طی بارگذاری سیکلی کششی به کار برد. آنها از یک طرح تشخیص الگوی قوی برای بدست آوردن شروع و افزایش خرابی نمونه‌ها استفاده کردند. گیوردانو³ و همکاران [8] از نشر آوایی برای توصیف مدهای متفاوت شکست در نمونه‌های کامپوزیتی پلیمری در آزمون‌های کششی استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که نشر آوایی اثری منحصر به فرد از نظر فرکانس برای هر نوع خرابی دارد. رفاهی و همکاران [11] در زمینه ارزیابی خرابی در مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری جدایش بین لایه‌ای مود I مطالعاتی انجام داده‌اند. آنها از تحلیل نشر آوایی در محدوده فرکانسی برای پی بردن به شدت خرابی در نمونه‌های تست شده استفاده کردند. رامیرز⁴ و همکارانش [15] از فرکانس اولیه رسم شده در دیگرام طیف مغناطیسی برای متمایز کردن انواع خرابی در کامپوزیت شیشه/پلی پروپیلن استفاده کرده‌اند. آنها ارتباطی میان وقایع میکرومکانیکی و فرکانس‌های خاص در حین تست کششی تعریف کردند. قسمت عمده‌ای از انتقادات مربوط به کار نشر آوایی، در مقالات فوق ارائه شده است. باوجود ارائه اطلاعات دقیق و نتایج آنها، در نظریه‌های باند‌های فرکانسی برای انواع مکانیزم‌های شکست، کار اشتباهی است که در مقالات بارها انجام شده است. زیرا اثر اتلاف فرکانس هر یک از مکانیزم‌های شکست در نظر گرفته نمی‌شود. دلیل ساده این است که اطلاعات فرکانسی سیگنال‌های نشر آوایی نه تنها توسط منبع، بلکه با توجه به واسطه زیاد مقدار انتشارش تنظیم می‌شود. این موضوع برای دهه‌ها شناخته شده بود ولی در بسیاری از تحقیقات مورد بی‌توجهی قرار می‌گرفت. بنابراین، کمبود پژوهش در زمینه تشخیص خرابی در مواد کامپوزیتی با استفاده از داده‌های نشر آوایی به عنوان روش تست غیر مخرب حس می‌شود.

هدف اصلی این مقاله بررسی رفتار سیگنال‌های نشر آوایی در روند رشد مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای است. ابتدا یک روش جدید برای مجزا سازی بخش S₀ امواج لمب در نمونه‌های بافته و تک جهت ایجاد شده است. تحلیل سی‌مینز فازی⁵ برای شناسایی کامل انواع خرابی به کار گرفته شده و پدیده توقف ترک نیز مورد بررسی قرار گرفته

جدول 1 تعداد نمونه‌ها با لایه چینی‌هایشان

نمونه‌ها	لایه میانی	لایه چینی	ضخامت (mm)
S _{II}	0	[0] ₃₂	5
S _W	بافته	[0 – 90] ₈	5

⁶ Unidirectional glass GF12/200 DLN

⁷ Woven glass VV 770

⁸ G. Angeloni Srl

⁹ Epoxy IMP 503

¹⁰ Ultrasonic C-scan

¹¹ Water jet machine

¹² End Notch Flexure

¹³ Dartec 9600

¹ Non-Destructive Evaluation

² Loutas and Kostopoulos

³ Giordano

⁴ Ramirez-Jimenez

⁵ Fuzzy C-Means Method

که Ψ_A و Ψ_S به ترتیب بخش‌های متقارن و نامتقارن سیگنال است. سیگنال مؤثر نیز در رابطه (2) بیان شده است.

$$\Psi_e = \Psi_u + \Psi_d \quad (2)$$

بخش حقیقی تبدیل هیلبرت برای نرمال کردن سیگنال‌ها استفاده شده که مطابق رابطه (3) است.

$$|H(\Psi(t))| = \left| \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi(\eta)}{t - \eta} d\eta \right| \quad (3)$$

برای حذف اثر اتلاف بخش نامتقارن سیگنال‌ها، سیگنال‌های اصلی با استفاده از تبدیل هیلبرت نرمال شده اند. از این رو، بخش‌های نامتقارن به دلیل فاز معکوسشان حذف می‌شوند. سیگنال مؤثر مطابق فرمول (4)، نوشته می‌شود.

$$\Psi_e = \frac{\Psi_{us}}{|H(\Psi_u)|} + \frac{\Psi_{ds}}{|H(\Psi_d)|} \quad (4)$$

Ψ_{us} تنها حاوی بخش متقارن موج لمب است. با قرار دادن $\Psi_{ds} = \zeta_s \Psi_{us}$ می‌توان رابطه (5) را نوشت:

$$\Psi_{us} = \frac{1}{\frac{\zeta_s}{|H(\Psi_u)|} + \frac{1}{|H(\Psi_d)|}} \Psi_e = K \Psi_e \quad (5)$$

در این معادله، K تابع تبدیل و ζ_s بردار مرتبط به اتلاف انرژی در مود S_0 است. با استفاده از رابطه (1) و ζ_s بهینه شده، بخش‌های متقارن و نامتقارن سیگنال به صورت مؤثر قابل تفکیک است.

2-3- مدل ناحیه چسبنده²

در میان روش‌های مختلف شبیه‌سازی عددی از جدایش بین لایه‌ای، مدل ناحیه چسبنده که در زمینه مکانیک خرابی دسته‌بندی می‌شوند، به دلیل پیش‌بینی بسیار دقیق از شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای، به روش‌های مکانیک شکست ترجیح داده می‌شوند [18].

در مدل المان چسبنده، رابطه برهم‌کنش³ و جابه‌جایی با استفاده از منحنی‌های مختلفی از قبیل دوخطی، سه‌خطی، تابع نمایی، دوزنق‌ای و غیره بیان می‌شود. در قانون سازگاری دوخطی، ابتدا پاسخ سیستم به صورت الاستیک خطی بسیار سخت است که با شروع ترک وارد بخش خطی نرم شوندگی می‌گردد که میزان خرابی در بین لایه‌ها بعد از شروع خرابی را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، زمانی که نیروی المان چسبنده به حد مقاومت بین لایه‌ای برسد (معادله 6)، ترک شروع می‌شود و از آنجا که سطح زیر نمودار مثلثی برابر چقرمگی شکست بین لایه‌ای است (معادله 7)، سختی المان چسبنده به صفر می‌رسد و ترک به اندازه یک المان رشد می‌نماید [19].

$$\tau = \tau_{\max} \quad (6)$$

$$G = G_c \quad (7)$$

معادله تعادل و پارامترهای خرابی المان چسبنده دوخطی به در فرمول‌های (8) و (9) آورده شده است.

$$\sigma = \begin{cases} K\delta & ; \delta \leq \delta_0 \\ \frac{(\delta_1 - \delta)}{(\delta_1 - \delta_0)} \tau_{\max} & ; \delta_0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ 0 & ; \delta_1 \leq \delta \end{cases} \quad (8)$$

$$d = \begin{cases} 0 & ; \delta \leq \delta_0 \\ \frac{\delta_1(\delta - \delta_0)}{\delta(\delta_1 - \delta_0)} & ; \delta_0 \leq \delta \leq \delta_1 \end{cases} \quad (9)$$

معادله سازگاری سه خطی در شکل 3 نشان داده شده است. مدل از دو بخش مجزای انرژی آزاد شده شکست تشکیل شده است. بخش اول به چقرمگی

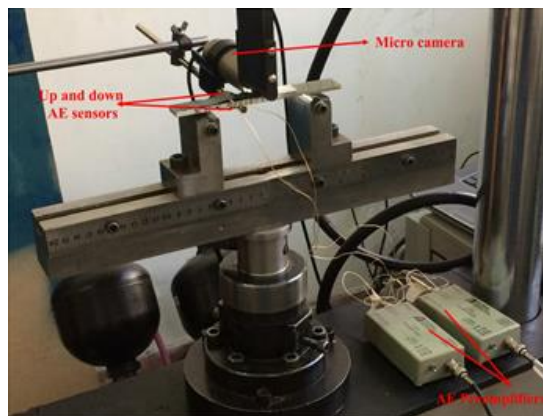


Fig. 1 Experimental setups for end notched flexure test

شکل 1 تنظیمات تست تجربی برای تست مود II

از انجام هر تست، برای کالیبره کردن سنسورهای نشرآوایی بر اساس استاندارد ASTM E976-10 روش شکست نوک مداد اعمال شد. سطح تماس سنسورها برای اتصال صوتی مناسب، با روغن گریس پوشانده شد.

3- پیش زمینه تئوری

1-3- تجزیه موج لمب

استفاده از امواج لمب در ورق‌ها به دلیل حساسیت آنها به خرابی در طول انتشارهای بلند، به عنوان تست‌های غیر مخرب ضروریست [17,3]. برای تولید موج لمب، صفحات کامپوزیتی متفاوتی با پالس موج‌های پنجره‌ای هانینگ¹ در رنج فرکانس 100 – 500 kHz تحریک شده‌اند. این محدوده فرکانسی پایین منجر به انتشار موج لمب در مودهای S_0 (متقارن) و A_0 (نامتقارن) می‌شود. با در نظرگیری ضخامت نمونه‌ها، مودهای موج لمب با مقدار فرکانس بالاتر در این تست‌ها، قطع می‌شود. در نتیجه، مودهای بالاتر موج لمب با استفاده از مقدار فرکانس ذکر شده، فعال نمی‌شوند.

دو سنسور نشرآوایی در یک موقعیت اما در دو وجه مقابل ورقه تک جهته به ابعاد $200 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$ قرار داده شد، و پیزوالکتریک محرک به فرکانس 100 kHz در فاصله 85 mm از سنسورهای نشرآوایی واقع شد. همان گونه که بیان شد، مود S_0 به دلیل سرعت موج بالاتر، سریعتر از مود A_0 شناسایی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اثر اتلاف در مود A_0 بالاتر از مود S_0 در طی انتشار در ورقه کامپوزیتی است.

برای تشخیص خرابی در ورقه‌های کامپوزیتی، ضروریست که ویژگی‌های منحصر به فرد هر نوع خرابی متمایز گردد. در این مورد، فرکانس کاندیدای قابل اطمینانی است اما هنوز اختلاف نظرهایی در تحلیل فرکانسی از مکانیزم‌های خرابی وجود دارد. در ورقه‌های کامپوزیتی مود A_0 نسبت به مود S_0 اتلاف بیشتری دارد. به علاوه، نشان داده شده است که سیگنال‌های A_0 به دست آمده از دو طرف قطعه متفاوت اند. از این رو، نیاز است که الگوریتمی تعریف شود تا مود A_0 را از سیگنال نشر آوایی به دست آمده حذف کند تا خطای تشخیص خرابی با استفاده از فرکانس سیگنال‌ها کاهش یابد. بدین منظور، Ψ_u و Ψ_d به ترتیب به عنوان دو سیگنال به دست آمده از صفحه بالایی و پایینی از سنسورهای نشر آوایی قرار گرفته در یک موقعیت اما در وجه‌های مختلف ورقه، به صورت رابطه (1) تعریف می‌گردند.

$$\begin{aligned} \Psi_u &= \Psi_{us} + \Psi_{ua} \\ \Psi_d &= \Psi_{ds} + \Psi_{da} \end{aligned} \quad (1)$$

² Cohesive zone model

³ Traction

¹ Hanning-Windowed wave pulse

دست آوردن اطلاعات درست و مفید از منشا واقعه را ممکن سازد. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده، یک جفت سیگنال نمونه در محدوده فرکانسی پایین توسط دو سنسور بالایی و پایینی دریافت شده است. زمانی که سنسورهای بالایی و پایینی در یک فاز باشند، مود متقارن غالب می‌شود. حال آن که با غالب شدن سهم مود نامتقارن (در شکل فاصله زمانی $[110 - 115 \mu s]$ دیده می‌شود)، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود.

برای مجزا سازی کارآمد یک سیگنال نشر آوایی، ابتدا با به کار گیری تکنیک تبدیل هیلبرت بهینه، پوشی از سیگنال نشر آوایی به دست می‌آید. سپس کدی برای مجزا سازی سیگنال به مودهای پایه‌ای استفاده شده در معادلات (5-1) ایجاد شده است. نتایج تجزیه مودها در شکل 3 نشان داده شده است.

برای بررسی دقیق مکانیزم خرابی‌های بسیار کوچک که در طی تست مود II اتفاق می‌افتد، تحلیل آماری چند پارامتری بر اساس طبقه بندی روش سی‌مینز فازی با استفاده از مودهای مجزا شده انجام شده است. به منظور تحلیل سیگنال نشر آوایی برای دسته بندی خرابی‌ها در تست مود II از سه ویژگی دامنه، مدت زمان و فرکانس میانگین متناسب با هریک از مودها که با استفاده از تحلیل تبدیل هیلبرت محاسبه می‌شود، استفاده می‌گردد.

شکل‌های 4 و 5 به ترتیب نتایج طبقه بندی خرابی را برای نمونه‌های تک جهته و بافته نشان می‌دهد. از سیگنال‌های نشر آوایی برای دسته بندی انواع خرابی با استفاده از مودهای اساسی موج لمب استفاده شده است. نتایج حاصل، سه دسته خرابی ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف و ماتریس از یکدیگر و شکست الیاف را مشخص می‌نماید. در هر دو نمونه، مکانیزم غالب شکست، ترک خوردگی ماتریسی است در حالی که جدایش بین الیاف و ماتریس و همچنین شکست الیاف بر شمار رویدادهای تجمعی کلی² تاثیر کمتری دارد. شمار رویدادهای تجمعی کلی در نمونه یک جهته در مقایسه با نمونه بافته بسیار بالاتر است. زیرا اتلاف انرژی در صفحات بافته به دلیل وجود الیاف در هر دو جهت 0 و 90 درجه بالاتر است. علاوه بر این، مود A_0 نسبت به مود S_0 در دو کامپوزیت لایه‌ای بافته و تک جهته (که به گستردگی هندسه و پراکندگی وابسته به فرکانس) به مقدار قابل ملاحظه‌ای تضعیف می‌شود. با توجه باین مسئله، می‌توان دریافت که روش قابل اطمینانی در بدست آوردن نتایج مناسب برای تحلیل خرابی کامپوزیت‌های لایه‌ای، مجزا سازی سیگنال نشر آوایی به مودهای اساسی آن و استفاده از مود S_0 به عنوان توصیفگر خرابی به دلیل میرایی کمتر مقادیر در هر دو نمونه بافته و تک

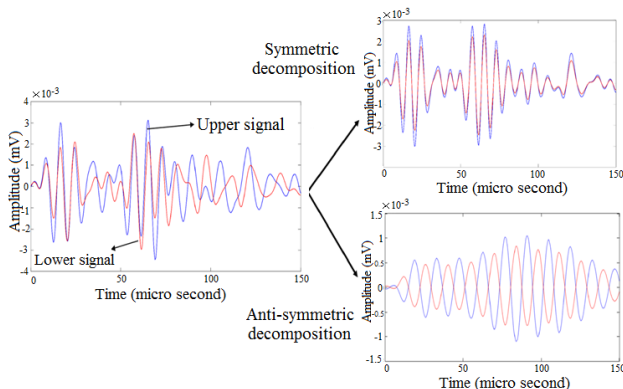


Fig. 3 Symmetric and anti-symmetric decomposition of upper and lower AE Signals

شکل 3 مجزا سازی بالایی و پایینی سیگنالهای نشر آوایی متقارن و نامتقارن

شکست اولیه (G_{ini}) و بخش دوم به پدیده توقف ترک (G_{arr}) مربوط است. نمودار سازگاری شامل سه منطقه است. منطقه اول ($0 - \delta_0$) مربوط به تغییر شکل الاستیک در المان چسبیده است. منطقه دوم ($\delta_0 - \delta_b$) معرف مرحله رشد جدایش بین لایه‌ای و منطقه نهایی ($\delta_b - \delta_f$) به پدیده توقف رشد ترک ارتباط دارد. معادله سازگاری المان چسبیده سه خطی به صورت رابطه (10) تعریف می‌گردد.

$$\sigma = \begin{cases} K\delta & ; \delta \leq \delta_0 \\ \sigma_{max} + \frac{(\sigma_b - \sigma_{max})}{(\delta_b - \delta_0)} & ; \delta_0 \leq \delta \leq \delta_b \\ \sigma_b + \frac{\sigma_b}{(\delta_f - \delta_b)} & ; \delta_b \leq \delta \leq \delta_f \\ 0 & ; \delta_1 \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

4- نتایج و تحلیل‌ها

4-1- تحلیل خرابی با استفاده از روش سی-مینز فازی

با بررسی مقالات، مکانیزم اصلی خرابی مواد کامپوزیتی شکست فیبرها، ترک خوردگی ماتریس و جدایش شناخته می‌شود [20-23]. طبق کارهای گذشته [12,9]، مشخصات نشر آوایی هر نوع مکانیزم خرابی، با اعمال روند مشابه به منظور دسته بندی این مکانیزم‌ها، استخراج شده است. بدین منظور، محتوای فرکانسی هر یک از رویدادهای نشر آوایی با استفاده از روش تبدیل هیلبرت¹ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رنج غالب فرکانس ترک خوردگی ماتریسی بین $[110 - 260 \text{ kHz}]$ و این اعداد برای جدایش و شکست فیبرها بترتیب برابر با $[270 - 380 \text{ kHz}]$ و $[380 - 500 \text{ kHz}]$ است.

به عنوان روش غیرمخرب، نشر آوایی توانایی‌اش را در تشخیص انواع مختلف مکانیزم‌های خرابی با استفاده از انتشار امواج لمب در طول نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده است. تکنیک موج لمب نشر آوایی به دلیل حداقل وجود دو مود و وجود ترکیبی از آنها در سیگنال به دست آمده، روشی پیچیده در تشخیص خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای به شمار می‌آید. برای غلبه بر این مشکل، جداسازی مودهای لمب پایه‌ای یک شکل موج نشر آوایی می‌تواند به

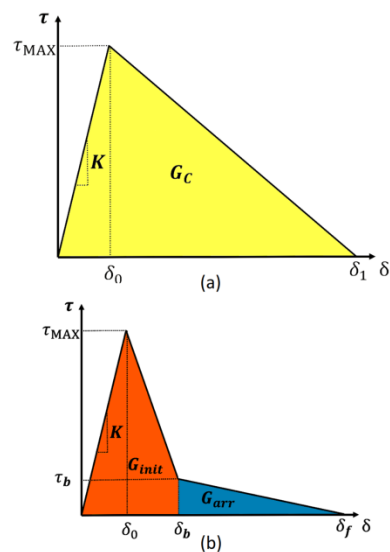


Fig. 2 (a) Bi-linear and (b) Tri-linear constitutive laws of cohesive element

شکل 2 قانون بقای المان چسبیده (a) دو خطی و (b) سه خطی

² Overall cumulative event counts

¹ Hilbert transform technique

است که تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. زمانی که ترک‌های ماتریسی به حد فاصل فیبر و ماتریس می‌رسد، جدایش بین فیبر و ماتریس آغاز می‌شود (مرحله سوم). در مرحله بعدی (مرحله چهارم) شکست جزئی الیاف اتفاق می‌افتد و این منطقه مملو از الیاف شکسته آزاد است، عمدتاً در این مناطق جدایش بین لایه‌ای به‌طور قابل توجهی در میانه سطح شکست، رشد می‌کند. تا این مرحله، برش در شکست غلبه کرده و ترک ماتریسی در سطح تماس دو لایه میانی مود غالب شکست است. مرحله پنجم همراه با شروع شکست عمده الیاف است که اکثریت شکست در دسته فیبرها رخ می‌دهد. در این مرحله شیب انرژی نشرآوایی تجمعی برای شکست الیاف ناگهان افزایش یافته و این ناشی از افزایش نرخ رویدادهای آکوستیک مربوط به شکست عمده الیاف است که در محدوده زمانی مربوطه اتفاق افتاده است. همچنین سطح خرابی فیبر تشدید شده و ترک به لایه‌های مجاور نیز ریشه می‌دواند. در نهایت، به دلیل شکست بیش از اندازه فیبرها، نمونه قادر به تحمل بار اضافی نبوده و قطعه می‌شکند. این مرحله به پدیده توقف ترک مربوط می‌شود. با اینکه شباهتهایی میان رفتار کلی انرژی نشرآوایی تجمعی در نمونه‌های تک جهته و بافته وجود دارد، با این حال تفاوت‌های جزئی با یکدیگر دارند. در نمونه تک جهته، جدایش بین لایه‌ای تا زمانی که ترک به مرکز قطعه (محل اعمال نیرو) برسد، ادامه می‌یابد و سپس جدایش بین لایه‌ای متوقف می‌شود. در نمونه بافته، ترک از میان نمونه عبور کرده و در خاتمه این روند و در زمان کوتاه‌تری نسبت به نمونه تک جهته، پدیده توقف رشد ترک اتفاق می‌افتد. شکل 7 رفتار رشد ترک را در نمونه‌های تک جهته و بافته نشان می‌دهد.

5- پارامترهای خرابی

5-1- روش نشر آوایی مبنی بر لمب

جدایش بین لایه‌ای غالب ترین مود خرابی در مواد کامپوزیتی است [24,25]. در حالی که مود I جدایش بین لایه‌ای به صورت گسترده‌ای مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است، اما جدایش بین لایه‌ای در مود II به خوبی مشخص نشده است [26-28]. اهمیت مود II در این است که جدایش به صورت عمده در شرایط واقعی (مانند ورقه‌های کامپوزیتی تحت ضربه با سرعت کم) در این مود اتفاق می‌افتد [29].

از این رو ایجاد رویکرد جدید قابل اطمینان و مقرون به صرفه برای تشخیص وجود جدایش بین لایه‌ای و شروع و رشد آن در مواد کامپوزیتی ضروریست. به این منظور، روش نشرآوایی مبنی بر لمب می‌تواند ابزار کارایی برای تشخیص موقعیت جدایش باشد. با اینکه برخی از محققان [30] از این شیوه برای تشخیص جدایش استفاده کرده‌اند، اما به دلیل ضعف محاسباتی نشر آوایی [31]، قادر به بررسی موارد پیچیده از قبیل سیگنال‌های نشر آوایی چند مودی در نمونه‌های کوچک نبوده‌اند. از این رو، روش ارائه شده ابزاری کارآمد برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای (به دلیل قدرت آن در تجزیه هر یک از مدهای اصلی موج لمب) است.

مشخصه‌های شکل موج‌های سیگنال نشرآوایی از لحاظ مدهای موجی منحصر به فرد برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای استفاده شده است. برای این منظور، بخش متقارن تجزیه شده از شکل موج‌های نشرآوایی به عنوان رویکرد جدیدی استفاده شده است تا شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای در چند لایه‌های کامپوزیتی در تست خمش سه نقطه بررسی شود (شکل 7). با استفاده از اندازه گیری سرعت در مود S_0 در نمونه‌های بافته و تک جهته،

جهته است. همان گونه که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، استفاده از مود A_0 برای تعیین خرابی، به خطای بحرانی در تحلیل خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌انجامد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، به دلیل اتلاف بیشتر مود A_0 در کامپوزیت نسبت به مود S_0 ، از محدوده عظیم خرابی فیبر که در جزئیات پدیده توقف ترک دارای اهمیت زیادیست، چشم‌پوشی شده است.

در شکل 6 انرژی نشرآوایی تجمعی برای هر دسته با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی به منظور تعریف توالی مکانیزم‌های خرابی در تست مود II برای نمونه‌های بافته و تک جهته تعیین شده است. توالی مکانیزم‌های خرابی، به پنج مرحله تقسیم می‌شوند. در مرحله اول، محدوده عاری از خرابی، در طی تست هیچ سیگنال نشرآوایی قابل توجهی ضبط نشده‌است و رفتار نمونه تحت خمشی سه نقطه در این محدوده کاملاً الاستیک بوده است. اولین مود خرابی، ترک خوردگی ماتریسی است که در مرحله دوم شروع می‌شود و در صفحه میانی ایجاد می‌شوند. این نقطه در ارتباط با شروع جدایش بین لایه‌ای

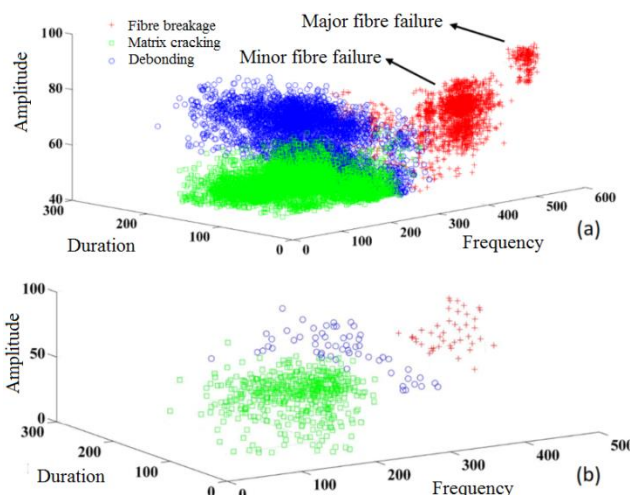


Fig. 4 Fuzzy clustering of AE signals for (a) S_0 and (b) A_0 modes in unidirectional specimen

شکل 4 دسته بندی فازی سیگنال‌های نشرآوایی در مدهای A_0 و S_0 برای نمونه تک جهته

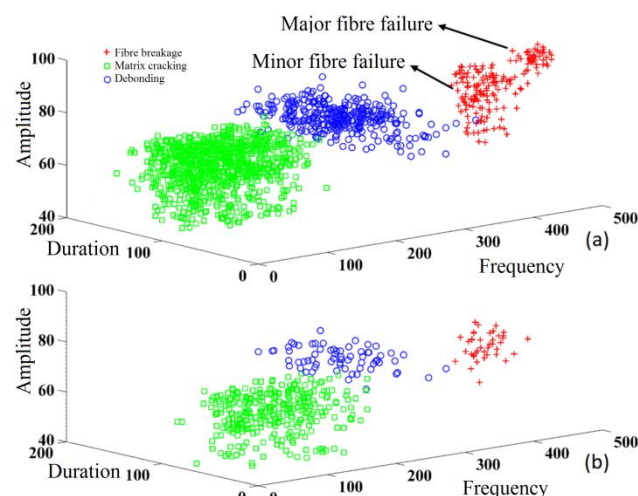


Fig. 5 Fuzzy clustering of AE signals for (a) S_0 and (b) A_0 modes in woven specimen

شکل 5 دسته بندی فازی سیگنال‌های نشرآوایی برای مدهای A_0 و S_0 در نمونه بافته

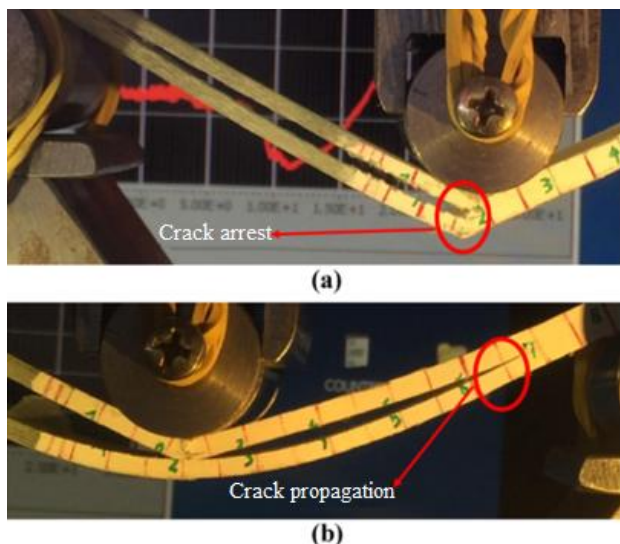


Fig. 7 Crack growth path in the a) unidirectional and b) woven specimens

شکل 7 مسیر رشد ترک در نمونه‌های (a) تک جهته و (b) بافته

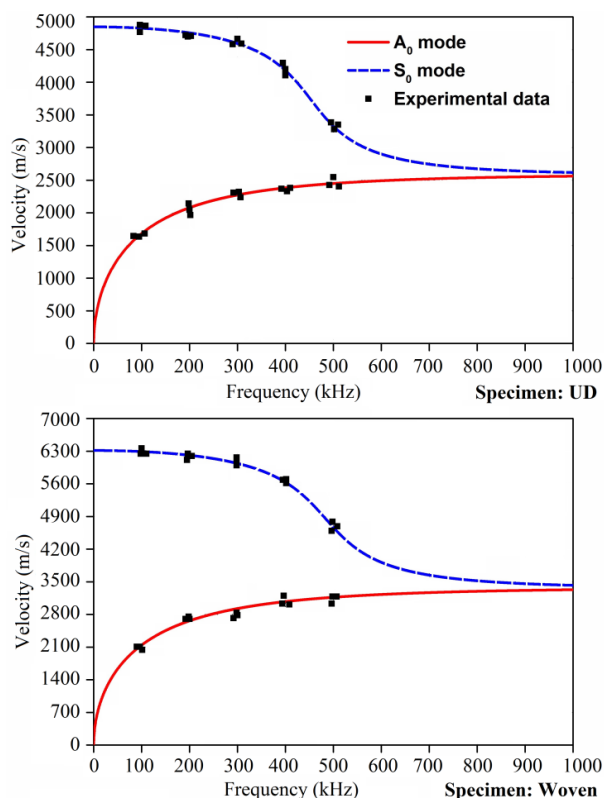


Fig. 8 Dispersion curve of Lamb wave propagating in the unidirectional and woven specimens

شکل 8 منحنی پراکندگی انتشار موج لم در نمونه‌های بافته و تک جهته

تک جهته نیست که این به دلیل پدیده توقف ترک در این نمونه است. زمانی که جدایش به مرکز نمونه تک جهته می‌رسد، به دلیل شکست الیاف در راستای ضخامت، تنش کاهش می‌یابد. سپس رشد ترک متوقف شده و در نیروهای بالاتری به وسیله مکانیزم‌هایی غیر از جدایش بین لایه‌ای می‌شکند. شکل 10 مقادیر چقرمگی بین لایه‌ای را در مقایسه با طول جدایش بین لایه‌ای برای نمونه‌های تک جهته نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، توقف

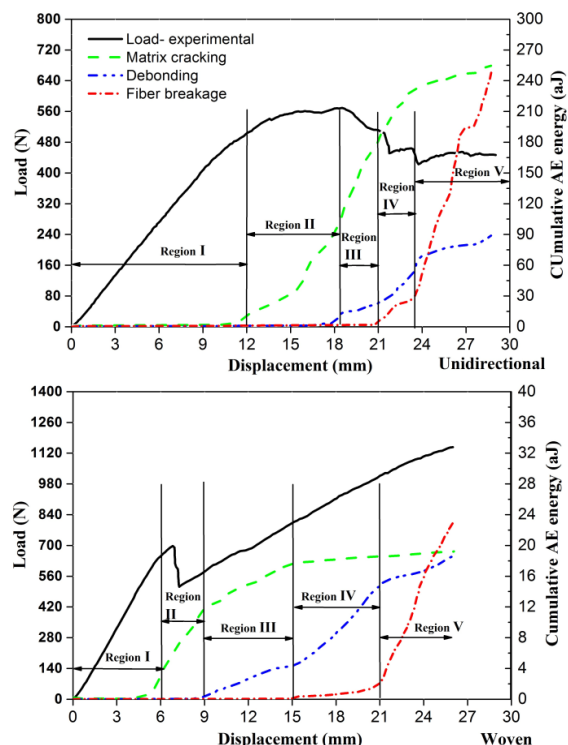


Fig. 6 The cumulative AE energy for each cluster assigned to the deflection-load curve

شکل 6 انرژی نشر آوایی تجمعی برای دسته بندی اختصاص داده شده به منحنی نیرو-خم شدگی

جدایش بین لایه‌ای مشخص گردید. سرعت هر یک از اجزای موج لمب در نمونه‌ها با استفاده از سنسور پیزو به دست آمد. در شکل 8، نتایج پراکندگی بر حسب سرعت فازی به عنوان تابعی از فرکانس برای کامپوزیت‌های لایه‌ای بافته و تک جهته، به دست می‌آید. همچنین، برای صحت‌سنجی نتایج عددی منحنی پراکندگی، سرعت‌های فازی مودهای اصلی موج‌ها لمب، به صورت تجربی در رژیم فرکانسی مشخصی اندازه‌گیری شده و مشاهده شد که همخوانی خوبی دارند. با دانستن زمان ورود موج پخش شده به سنسورهای نشر آوایی و تطبیق آن با سرعت موج در نمونه، موقعیت جدایش بین لایه‌ای قابل تشخیص است. این روش جدید می‌تواند منجر به نتایج قابل اطمینان‌تری نسبت به تحقیقات دیگر که تنها سرعت مؤثر نشر آوایی را برای تمامی رنج‌های فرکانسی در نظر می‌گیرد، شود [33,32].

5-2- روش المان چسبیده

در تحلیل‌های المان محدود از مدل سه بعدی آجری خطی 8 گره‌ای، انتگرال کاهش یافته و کنترل ضریب ساعت شنی¹ برای بخش کامپوزیتی و المان چسبیده سه بعدی 8 گره‌ای² به عنوان رابط میان صفحه‌ای، به کار گرفته شده است. خواص مادی کامپوزیت و پارامترهای المان چسبیده به ترتیب در جدول‌های 2 و 3 آورده شده است.

شکل 9 نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد ترک-جابجایی استخراج شده از نرم‌افزار المان محدود را در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. همان‌گونه که توسط شکل ثابت می‌شود، المان محدود به طور مؤثری می‌تواند شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای را در نمونه بافته پیش‌بینی نماید. با این وجود، المان محدود به خوبی قادر به پیش‌بینی دقیق جدایش در نمونه‌های

¹ Hourglass control element (C3D8R)

² CZM element (COH3D8)

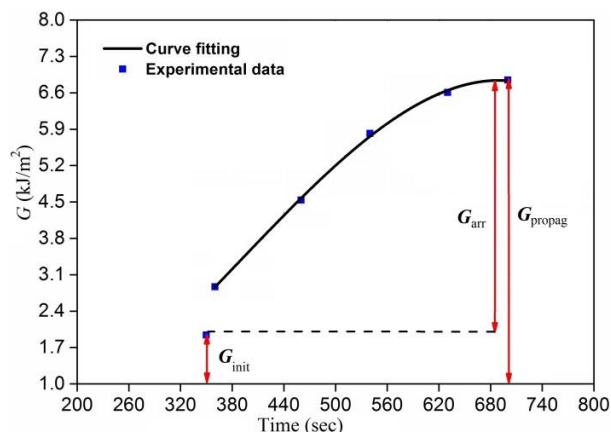


Fig. 10 The R-curve of interlaminar fracture toughness of unidirectional specimen

شکل 10 نمودار منحنی R- برای چقرمگی شکست نمونه تک جهت

آمده از تحلیل المان محدود و تست‌های تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، المان چسبنده سه خطی با اطمینان می‌تواند شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای را در نمونه تک جهت پیش‌بینی نماید.

شکل 12 تخمین رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های مود II با استفاده از سه روش مختلف را نشان می‌دهد. دو روش اول از سرعت سیگنال‌های نشر آوایی در رشد جدایش بین لایه‌ای نمونه‌ها استفاده می‌کنند. ابتدا، تمامی شکل موج‌های نشر آوایی، هر دو بخش متقارن و نامتقارن سیگنال‌ها، در اندازه‌گیری رشد جدایش بین لایه‌ای نمونه‌ها استفاده شده است. سپس، تمامی بخش‌های مجزای سیگنال نشر آوایی S_0 برای تعریف رشد جدایش بین لایه‌ای انتخاب شده‌اند. این دو دیدگاه به دلیل وقوع مکانیزم‌های خرابی نظیر ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف و جدایش بین لایه‌ای که معمولاً در نزدیکی جبهه ترک به هنگام رشد جدایش بین لایه‌ای اتفاق می‌افتد، قابل قبول هستند. در نهایت، نتایج المان چسبنده دو-خطی و سه-خطی با روش مبنی بر نشر آوایی مقایسه شده است. جدول 5 میانگین

جدول 4 پارامترهای المان چسبنده برای المان چسبنده سه خطی

Table 4 The cohesive element parameters for tri-linear CZM

طول المان چسبنده (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	σ_b (MPa)	K (N/mm ³)	G_{ini} (kJ/M ²)	G_{arr} (kJ/M ²)
0.125	60	1	105	1.94	4.9

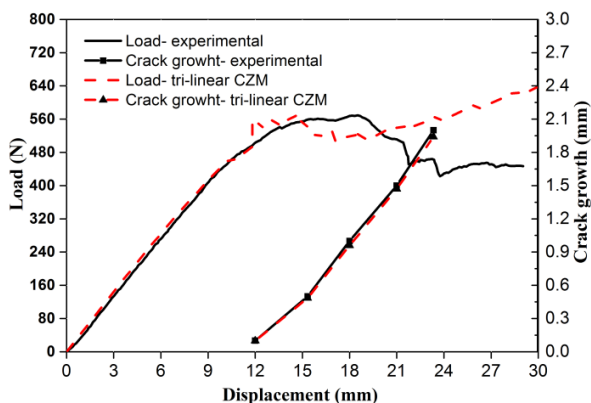


Fig. 11 Load-displacement and crack growth-displacement curves obtained from tri-linear CZM and experimental results.

شکل 11 نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد ترک-جابجایی با بهره‌گیری از المان چسبنده سه-خطی و نتایج تجربی.

جدول 2 خواص مادی کامپوزیت

Table 2 The material properties of the composite

نمونه‌ها	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	E_{33} (MPa)
S_U	33,000	10,500	10,500
S_W	7,000	7,000	10,500
	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
S_U	5,2550	5,250	3,460
S_W	5,250	5,250	3,460
	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
S_U	0.3	0.33	0.35
S_W	0.3	0.33	0.35

جدول 3 پارامترهای المان چسبنده دو خطی

Table 3 The cohesive element parameters for bi-linear CZM

طول المان چسبنده (mm)	$\tau_{\max}$ (MPa)	K (N/mm ³)	G_{IIC} (kJ/M ²)
0.125	60	1.94	2.16

ترک منجر به افزایش چقرمگی بین لایه‌ای در حین رشد جدایش بین لایه‌ای می‌شود. با رشد جدایش بین لایه‌ای و رسیدن آن به مرکز قطعه، نرخ وقوع شکست فیبرها افزایش می‌یابد و به همین دلیل، چقرمگی شکست بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. با رسیدن نرخ وقوع شکست الیاف به حالت پایدار، چقرمگی شکست بین لایه‌ای به مقدار ثابتی میل می‌کند.

از آنجا که المان چسبنده دو خطی در پیش‌بینی همزمان شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای در حضور پدیده توقف ترک ضعیف عمل می‌کند، از المان چسبنده سه خطی برای شبیه‌سازی جدایش بین لایه‌ای در نمونه تک جهت استفاده شده است. پارامترهای المان چسبنده سه خطی در جدول 4 ارائه شده است.

شکل 11 نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد ترک-جابجایی به دست

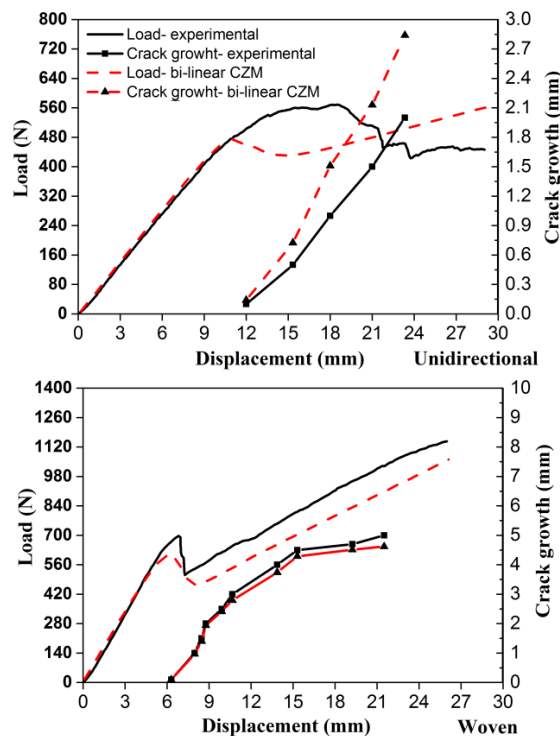


Fig. 9 Load-displacement and crack growth-displacement curves obtained from bi-linear CZM and experimental results

شکل 9 نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد ترک-جابجایی به دست آمده از المان چسبنده دو خطی و نتایج تجربی.

همچنین نشان داده شد که نتایج دقیق‌تری با استفاده از سرعت انحصاری مود S_0 در هریک از رنج‌های فرکانسی به جای استفاده از سرعت مؤثر نشر آوایی در تمامی رنج‌های فرکانسی، به دست می‌آید. به عنوان نکته پایانی، مشخص شد که روش ارائه شده مبنی بر نشر آوایی لمب پتانسیل خوبی در تخمین قابل قبول خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی دارد.

7- فهرست علائم

A_0	مود نامتقارن موج لمب
G	چقرمگی شکست
S_0	مود متقارن موج لمب

علائم یونانی

ζ	بردار اتلاف
τ	تنش برشی (MPa)
Ψ	سیگنال نشر آوایی

زیرنویس‌ها

C	بحرانی
e	مؤثر
ini	آغاز رشد ترک
arr	توقف رشد ترک

8- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولان آزمایشگاه‌های تست‌های غیر مخرب دانشکده مکانیک و تست خستگی دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر، برای در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

9- مراجع

- [1] J. Bohse, A. J. Brunner, Acoustic emission in delamination investigation. In: Sridharan S, *Delamination Behaviour of Composites*, pp. 217-277, CRC Press, New York, 2008.
- [2] D. Aljets, A. Chong, S. Wilcox, K. Holford, Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array, *Acoustic Emission*, Vol. 28, pp. 85-98, 2010.
- [3] R. P. Dalton, P. Cawley, M. J. S Lowe: The potential of guided waves for monitoring large areas of metallic aircraft fuselage structure, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 20, No. 1, pp. 29-46, 2001.
- [4] T. H. Loutas, V. Kostopoulos, Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites, Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution, *Composite Science Technology*, Vol. 69, No. 2, pp. 265-272, 2009.
- [5] R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, M. Saeedifar, J. Yousefi, G. Minak, Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites, *Composite Part B Engineering*, Vol. 108, pp. 425-437, 2017.
- [6] J. L. Rose, *Ultrasonic guided waves in solid media*, pp. 36-52, New York: Cambridge University Press, 2014.
- [7] J. J. Scholey, P. D. Wilcox, M. R. Wisnom, M. I. Friswell, Quantitative experimental measurements of matrix cracking and delamination using acoustic emission, *Composite Part A Application of Science*, Vol. 41, No. 5, pp. 612-623, 2010.
- [8] M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D. Amore, L. Nicolais, An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials, *Composite Science Technology*, Vol. 58, pp. 1923-1928, 1998.
- [9] M. Nazmdar Shahri, J. Yousefi, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform, *Composite Material*, Vol. 50, No. 14, pp. 1897-1907, 2015.
- [10] G. Minak, A. Zucchelli, Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques, *Durand, L.P. (ed.) Composite Materials Research Progress*, pp. 165-207, Nova Science Publishers Inc, New York, 2008.
- [11] A. R. Oskouei, M. Ahmadi, Acoustic emission characteristics of mode I delamination in / polyester composites, *Composite Material*, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, 2010.

6- نتیجه‌گیری

این مقاله به معرفی روشی جدید در به کار گیری موج‌های لمب برای تشخیص خرابی به صورت لحظه‌ای در کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌پردازد. ابتدا روندی جدید برای تجزیه مودهای بنیادین موج‌های لمب در سیگنال‌های نشر آوایی ارائه گردید. توالی مکانیزم خرابی در تست مود II برای نمونه‌های بافته و تک جهت به دست آمد و شکست دسته فیبرها به عنوان شاخص پدیده توقف ترک در نظر گرفته شد. علاوه بر این، جدایش بین لایه‌ای در اثر تست خمش سه نقطه با استفاده از روش‌های المان چسبیده سه خطی و نشر آوایی مبنی بر لمب پیشنهاد شده، مورد بررسی قرار گرفت.

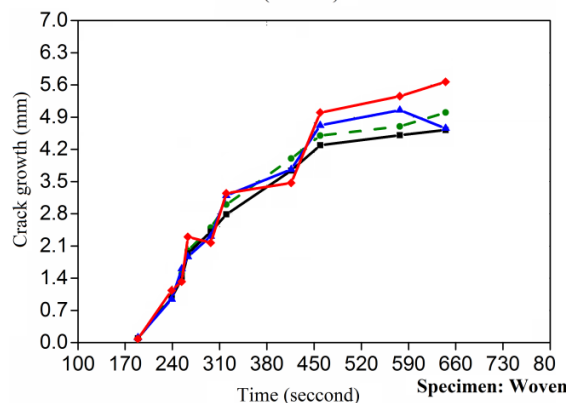
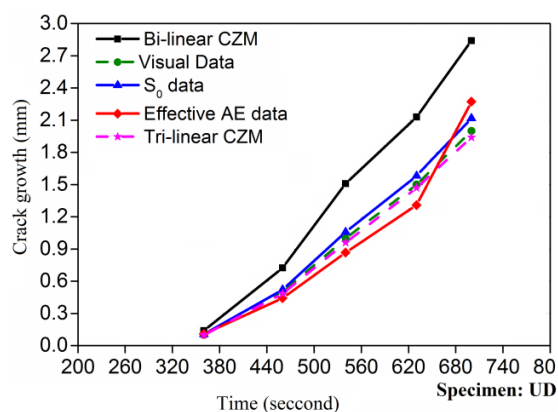


Fig. 12 Predicted crack growth using different approach versus visual crack growth for unidirectional and woven specimens

شکل 12 پیش‌بینی میزان رشد ترک در مقایسه با مشاهدات تجربی برای نمونه‌های تک جهت و بافته

جدول 5 خطای مطلق میانگین برای بررسی جدایش بین لایه‌ای با روش‌های مختلف.

نمونه‌ها	میانگین خطای مطلق (%)		
	روش المان چسبیده	سرعت سیگنال‌های نشر آوایی	سرعت S_0 تمامی سیگنال‌های نشر آوایی
تک جهت	4.1	7.4	14.6
بافته	7.2	8.1	17.1

- [23] M. Nikbakht, J. Yousefi, H. Toudeshky, G. Minak, Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization, *Composites Part B Eng.*, Vol. 113, pp. 185-196, 2017.
- [24] T. Vandellos, C. Huchette, N. Carrère, Proposition of a framework for the development of a cohesive zone model adapted to carbon-fiber reinforced plastic laminated composites, *Composite Structure*, Vol. 105, pp. 199-206, 2013.
- [25] A. Refahi Oskouei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate, *Mater. Des.*, Vol. 32, No. 3, pp. 1444-1455, 2011.
- [26] M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, J. Yousefi, R. Mohammadi, H.H. Toudeshky, G. Minak, Delamination analysis in composite laminates by means of acoustic emission and bi-linear/tri-linear cohesive zone modeling, *Composite Structure*, Vol. 161, pp. 505-512, 2017.
- [27] M. Saeedifar, M. Fotouhi, M. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Prediction of delamination growth in laminated composites using acoustic emission and cohesive zone modeling techniques, *Composite Structure*, Vol. 124, pp. 120-127, 2015.
- [28] L. Zhao, Y. Wang, J. Zhang, Y. Gong, N. Hu, N. Li, XFEM-based model for simulating zigzag delamination growth in laminated composites under mode I loading, *Composite Structures*, Vol. 160, pp. 1155-1162, 2017.
- [29] H. Y. Choi, F. K. Chang, A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact, *Composite Material*, Vol. 26, No. 14, pp. 2134-2169, 1992.
- [30] K. Asamene, L. Hudson, M. Sundaresan, Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels, *Ultrasonics*, Vol. 59, pp. 86-93, 2015.
- [31] J. Jingpin, W. Bin, H. Cunfu, Acoustic emission source location methods using mode and frequency analysis, *J. Structural Cont. Health Monitoring*, Vol. 15, pp. 642-651, 2008.
- [32] R. Mohammadi, M. Saeedifar, H. H. Toudeshky, M. A. Najafabadi, M. Fotouhi, Prediction of delamination growth in carbon/epoxy composites using a novel acoustic emission-based approach, *Reinforced Plastic Composites*, Vol. 34, No. 11, pp. 868-878, 2015.
- [33] M. Saeedifar, M. Fotouhi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, G. Minak, Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission, *Composites Part B*, Vol. 85, pp. 113-122, 2016.
- [12] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. Nazmdar, A. Refahi, F. Moghadas, Damage categorization of glass/epoxy composite material under mode II delamination using acoustic emission data, a clustering approach to elucidate wavelet transformation analysis, *Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 39, pp. 1325-1335, 2014.
- [13] S. Wang, D. D. L. Chung, Effects of composite lay-up configuration and thickness on the damage selfsensing behavior of carbon fiber polymer-matrix composite, *Material Science*, Vol. 40, pp. 561-568, 2005.
- [14] M. Ali, S. C. Joshi, Damage evolution in glass/epoxy composites engineered using core-shell micro particles under impact loading, *Material Science*, Vol. 48, pp. 8354-8367, 2013.
- [15] C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission events, *Composite Science Technology*, Vol. 64, pp. 1819-1827, 2004.
- [16] P. Kumar, A. Garg, Failure modes and fractographic study of glass-epoxy composite under dynamic compression, *Material Science*, Vol. 23, No. 7, pp. 2305-2309, 1998.
- [17] J. L. Rose, Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation, *IEEE Trans. Ultrasonic Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 575-583, 2000.
- [18] G. Romhany, G. Szebényi, Interlaminar fatigue crack growth behavior of MWCNT/carbon fiber reinforced hybrid composites monitored via newly developed acoustic emission method, *Express Polym. Lett*, Vol. 6, No.7, pp. 572-580, 2012.
- [19] J. Yousefi, R. Mohamadi, M. Saeedifar, M. Ahmadi, H. Toudeshky, Delamination characterization in composite laminates using acoustic emission features, micro visualization and finite element modeling, *Composite Material*, Vol. 50, No. 22, pp. 3133-3145, 2016.
- [20] M. Fotouhi, F. Pashmforoush, M. Ahmadi, A. Refahi Oskouei, Monitoring the initiation and growth of delamination in composite materials using acoustic emission under quasi-static three-point bending test, *Reinforced Plastic Composite*, Vol. 30, No. 17, pp. 1481-1493, 2011.
- [21] A. Mahdian, J. Yousefi, M. Nazmdar, N. Zarif, M. Ahmadi, G. Minak, Damage evaluation of laminated composites under low-velocity impact tests using acoustic emission method, *Composite Material*, Vol. 51, No. 4, pp. 433-450, 2017.
- [22] M. Fotouhi, M. Ahmadi, Investigation of the mixed-mode delamination in polymer-matrix composites using acoustic emission technique, *Reinforced Plastic Composite*, Vol. 33, No. 19, pp. 1767-1782, 2014.