



تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در چند لایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی با روش نشرآوایی

رضا محمدی^{۱*}، میلاد سعیدی^۲، مهدی احمدی نجف آبادی^۱، حسین حسینی تودشکی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ مرداد ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۱ شهریور ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۳ آبان ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۹ آبان ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

جدایش بین لایه‌ای
نشرآوایی
چقرمگی شکست بین لایه‌ای
کربن/اپوکسی

چکیده: کامپوزیت‌ها شاخه مهمی از مواد پیشرفته مهندسی هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد به طور گسترده در صنعت از آنها استفاده می‌شود. در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. جدایش بین لایه‌ای یکی از شایع‌ترین انواع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده که در انواع بارگذاری‌های حالت I، II یا ترکیبی از این حالت‌ها اتفاق می‌افتد. در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چند لایه کربن/اپوکسی پرداخته شده و با استفاده از روش نشرآوایی، چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت تعیین می‌شود. نمونه‌های استاندارد، تحت شرایط مختلف بارگذاری حالت I، II و حالت ترکیبی I و II قرار گرفتند. ابتدا، مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای، با استفاده از روش‌های ارائه شده در استانداردهای ASTM D5528 و ASTM D6671 محاسبه شده‌است. در ادامه، با استفاده از روش نشرآوایی، چقرمگی شکست بین لایه‌ای در نمونه‌ها تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تطابق مطلوب مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از روش نشرآوایی با مقادیر حاصل از استاندارد است.

۱- مقدمه

چند لایه‌های کامپوزیتی به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی چون، مقاومت بالا، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاوم بودن در برابر خوردگی و سایش و نیز عایق بودن در برابر الکتریسیته، حرارت و صوت به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند [۱]. این مواد در دهه‌های گذشته، در صنایعی چون پل‌سازی، خودروسازی، هواپیماسازی و صنایع کشتی‌سازی و دریایی جایگاه ویژه و کاربردهای فراوانی یافته‌اند. برخلاف این مزیت، در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها، از جمله ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، شکست الیاف و جدایش بین لایه‌ای^۱ وجود دارد [۱، ۲]. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است که منجر به کاهش استحکام و مدول خمشی کامپوزیت می‌شود [۲، ۳]. جدایش بین لایه‌ای ترکی است که بین دو لایه مجاور کامپوزیت اتفاق می‌افتد. لایه‌های طرفین جدایش بین لایه‌ای می‌توانند دارای جهات الیافی متفاوت باشند. بنابراین جدایش بین لایه‌ای را می‌توان به صورت یک ترک سطحی، بین دو ماده غیر ایزوتروپ در نظر گرفت. مهم‌ترین عامل ایجاد جدایش بین لایه‌ای، وجود ناپوستگی در سازه و تنش‌های بین لایه‌ای در آن است. ایجاد جدایش بین لایه‌ای می‌تواند ناشی از محدوده وسیعی از عوامل

از قبیل فرآیند ساخت، اثرات محیطی، فرآیندهای ماشینکاری و هندسه سازه بوده که هر کدام از این موارد می‌توانند به تنهایی عامل ایجاد جدایش بین لایه‌ای در سازه کامپوزیتی باشد. به عنوان نمونه، یکی از دلایل جدایش بین لایه‌ای، وجود تنش‌های موجود در لبه آزاد قطعه است. این تنش‌ها در اثر عدم تطابق ضرایب پواسون لایه‌های مجاور به وجود می‌آیند. مقدار این تنش‌ها به اختلاف ضرایب پواسون لایه‌های مجاور، مدول الاستیک و برشی، چیدمان لایه‌ها، شرایط محیطی و بارگذاری بستگی دارد. زمانی که برخی از مولفه‌های تنش به مقدار بحرانی برسند، جدایش بین لایه‌ای اتفاق می‌افتد [۴].

به دلیل این‌که جدایش بین لایه‌ای در بین لایه‌های کامپوزیت اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیر قابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. یکی از روش‌های تشخیص این خرابی، روش نشرآوایی^۲ است. انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی گویند [۵]. از مزایای استفاده از روش نشرآوایی در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت و قابلیت تفکیک انواع مختلف خرابی اشاره نمود [۶].

چقرمگی شکست بین لایه‌ای (G_c) که به آن نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی نیز گفته می‌شود، به عنوان یکی از خواص کامپوزیت‌های چندلایه در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر بیان‌گر میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک

1 Delamination

با روش‌های ارائه شده در استاندارد [۱۳، ۱۴]، بیانگر عملکرد مطلوب این روش در تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌های چندلایه‌های کامپوزیتی است.

۲- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش، از ۱۴ لایه کامپوزیت کربن / اپوکسی بافته شده پیش‌آغشته^۳ [۹۰°-۰°] و با روش کیسه خلاء^۴ و با فشار خلاء ۶/۵ اتمسفر ساخته شده‌اند. به منظور ایجاد جدایش بین‌لایه‌های اولیه، یک لایه تفلون با ضخامت تقریبی ۲۰m، در حین ساخت نمونه‌ها در بین دو لایه میانی کامپوزیت قرار داده شده‌است. ابعاد نمونه‌ها ۱۵۰×۲۵×۴ mm^۳، با طول جدایش اولیه ۶۰ mm است. شکل ۱ طرحواره‌ای از نمونه‌های ساخته شده و موقعیت جدایش بین لایه‌های اولیه را نشان می‌دهد.

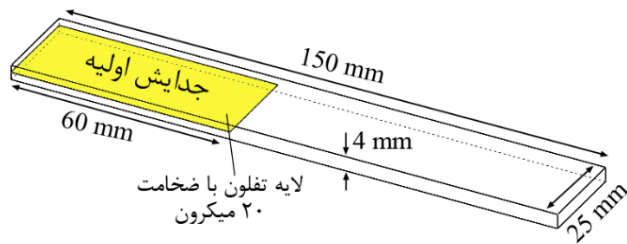


Fig. 1. A schematic of the fabric specimens and initial delamination position

شکل ۱: طرحواره‌ای از نمونه‌های ساخته شده و موقعیت جدایش اولیه

۳- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه کشش مدل HIWA، با ظرفیت ۵ تن استفاده شده‌است. قطعات با سرعت ۱ mm/min تحت آزمایش قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های نشرآوایی نیز از نرم‌افزار AEWin و سیستم PCI-2 با نرخ داده‌برداری IMS/s استفاده شده‌است. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام PICO، محصول کمپانی PAC، مدل R50D استفاده شده‌است. سنسورها به فاصله ۹۰ میلیمتری از یکدیگر قرار گرفته‌اند، به طوری که نوک ترک مابین دو سنسور واقع شده‌است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسورها به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب ۴۰ dB تقویت شدند. برای اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه از گریس سیلیکون خلاء استفاده شده‌است. برای حذف نویزهای زمینه در حین آزمایش، حد آستانه ۳۷ dB در نظر گرفته شده‌است.

۴- روش آزمایش

آزمایش‌ها براساس استانداردهای ASTM D5528 [۱۳] و ASTM D6671 [۱۴] انجام شدند. نمونه‌های آزمایش، شامل نمونه‌های تحت بارگذاری حالت I (DCB)، حالت II (ENF) و حالت ترکیبی I و II (MMB) هستند. آزمایش‌ها در دمای ۲۴°C و با سرعت پیشروی ثابت

بین‌لایه‌ای است. چون پدیده جدایش بین‌لایه‌ای امری حساس و تاثیرگذار بر خواص کامپوزیت است، به منظور تعیین قابلیت اطمینان سازه، تعیین دقیق چقرمگی شکست بین‌لایه‌های امری ضروری به نظر می‌رسد.

بنزگاه و کنان [۷]، به بررسی تجربی رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری حالت I، II و حالت ترکیبی I و II پرداختند. آن‌ها رابطه‌ای نیمه تجربی برای محاسبه چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای^۱ در نمونه‌ها ارائه دادند. رفاهی و همکاران [۸]، با استفاده از تابع سنتری که بیان‌گر نسبت انرژی مکانیکی به انرژی نشرآوایی است، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را در کامپوزیت پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری حالت I محاسبه نمودند. آروموگام و همکاران [۹]، با استفاده از تبدیل موجک، سازوکارهای مختلف خرابی را در یک نمونه شیشه/اپوکسی که تحت آزمون کشش قرار داشت، دسته‌بندی نمودند. فتوحی و همکاران [۱۰]، با روش نشرآوایی، رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بررسی نمودند. یوسفی و همکاران [۱۱]، رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری حالت II بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های نشرآوایی را تحلیل نموده و با استفاده از الگوریتم‌های کا-مینز و فازی سی-مینز موفق به تفکیک و دسته‌بندی انواع خرابی‌ها در نمونه‌ها شدند.

تاکنون بیشتر محققین به بررسی جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری حالت I پرداخته‌اند و چندان به بارگذاری حالت II و حالت ترکیبی I و II پرداخته نشده‌است. اما همان‌طور که مشخص است، در سازه‌های کامپوزیتی، فقط بارگذاری حالت I اتفاق نیفتاده و امکان بروز انواع مختلف حالت‌های بارگذاری همچون حالت II و حالت ترکیبی I و II وجود دارد.

یکی از مشکلات تعیین چقرمگی شکست در بارگذاری حالت II و حالت ترکیبی نزدیک به حالت II، رشد ناپایدار جدایش بین‌لایه‌ای است [۱۲]. بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر، در بررسی رفتار جدایش بین‌لایه‌ای در حالت‌های مختلف بارگذاری (حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I و II) و استفاده از روش نشرآوایی در تشخیص لحظه رشد جدایش بین‌لایه‌ای (به خصوص در رشد ناپایدار جدایش بین‌لایه‌ای در بارگذاری‌های حالت II و حالت‌های ترکیبی نزدیک به حالت II) است. در پژوهش حاضر، ابتدا به بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی شروع و رشد جدایش بین‌لایه‌ای، در کامپوزیت چند لایه کربن / اپوکسی، تحت حالت‌های بارگذاری I، II و حالت ترکیبی I و II پرداخته شده‌است. در ادامه، با استفاده از دو روش انرژی سیگنال‌ها و تعداد ضرب‌آهنگ‌های نشرآوایی^۲، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در این کامپوزیت‌ها تعیین می‌شود. این روش به ویژه در بارگذاری حالت II و حالت‌های ترکیبی نزدیک به حالت II که تشخیص دقیق موقعیت نوک ترک امکان‌پذیر نیست، مفید است. تطابق مطلوب نتایج به دست آمده از این روش

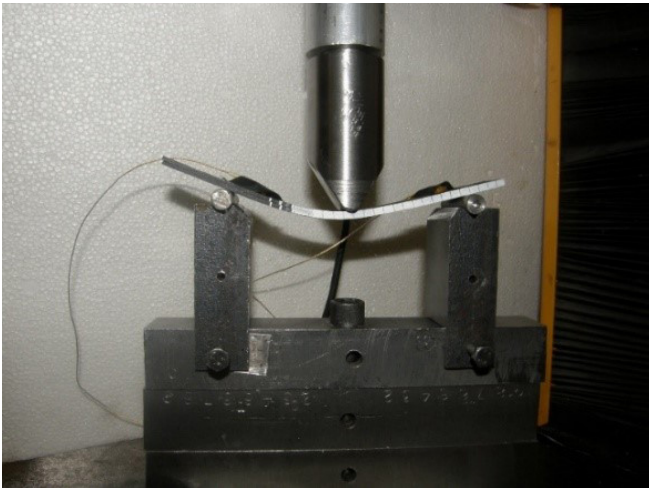
3 Prepreg
4 Vacuum bag

1 Interlaminar fracture toughness
2 Counts

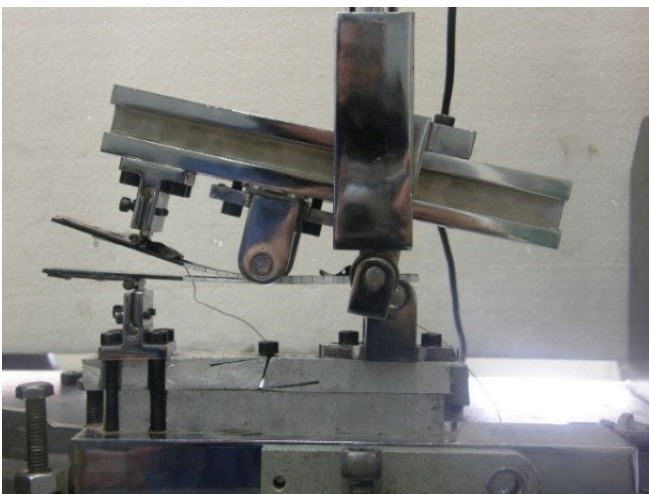
بین لایه‌های (P_{II})، قرار داده می‌شود. برای تعیین مقدار بار بحرانی روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله از دو روش مکانیکی و نشرآوایی برای تعیین بار بحرانی و به تبع آن تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 2. Loading condition : (a) Mode I, (b) Mode II, (c) Mix mode I & II
شکل ۲: بارگذاری (الف) حالت I، (ب) حالت II و (ج) حالت ترکیبی I و II

انجام شدند. میزان جابجایی و بار به طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شد و طول ترک نیز با بازرسی چشمی (دوربین فیلمبرداری مدل SONY HDR-XR150 با بزرگنمایی اپتیکال ۲۵ X و بزرگنمایی دیجیتال ۳۰۰ X) در حین رشد جدایش بین لایه‌ای ثبت شد. شکل‌های ۲ و ۳ نمای از بارگذاری نمونه‌ها در حالت‌های مختلف را حین آزمون و پارامترهای ابعادی مورد استفاده در بارگذاری‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳ در بارگذاری حالت ترکیبی با تغییر فاصله C، می‌توان نسبت حالت ترکیبی را تغییر داد.

۵- نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی

با استفاده از تئوری تیر، مقادیر نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در هر یک از نمونه‌های بارگذاری حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I و II، با معادله‌های (۱) تا (۳) به دست می‌آید [۱۴،۱۳].

حالت I :

$$G_I = \frac{12P_I^2 a^2}{Eb^2 h^3} \quad (1)$$

حالت II :

$$G_{II} = \frac{9P_{II}^2 a^2}{16Eb^2 h^3} \quad (2)$$

حالت ترکیبی I و II :

$$G_{\text{mixed-mode}} = G_I + G_{II} \quad (3)$$

که در این حالت:

$$P_I = \left(\frac{3C-L}{4L} \right) \cdot P ; P_{II} = \left(\frac{C+L}{L} \right) \cdot P$$

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left(\frac{3C-L}{C+L} \right)^2, C \geq \frac{L}{3}$$

است.

در بارگذاری حالت ترکیبی، نسبت حالت از معادله (۴) به دست می‌آید.

$$\frac{G_{II}}{G_I} = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \quad (4)$$

۶- بحث و نتایج

به منظور تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت، در روابط (۱) تا (۳)، به جای P_I ، P_{II} و P ، مقدار بار بحرانی متناظر با شروع رشد جدایش

می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، روش NL، حد پایین مقادیر بار بحرانی را ارائه می‌دهد.

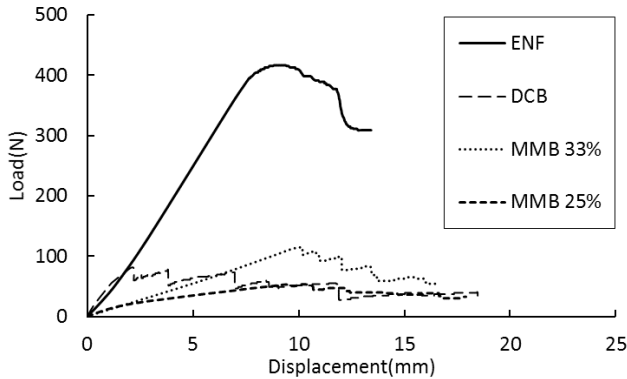


Fig. 4. Load - displacement curves of specimens

شکل ۴: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها

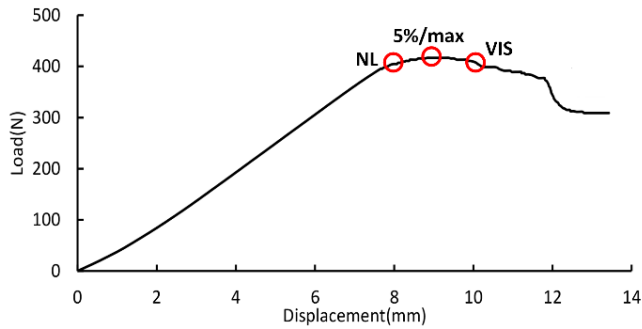


Fig. 5. Determination of critical load of ENF specimen according to the ASTM standard methods

شکل ۵: تعیین بار بحرانی با سه روش استاندارد برای نمونه ENF

۶-۲- تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با روش نشرآوایی
نشرآوایی به عنوان ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراصوتی (۲۰ MHz - ۱ kHz) در ماده تعریف می‌شود. این امواج از آزاد شدن ناگهانی انرژی الاستیک از منبعی در ماده، همچون مکانیزم‌های مختلف تغییر شکل و شکست ناشی می‌شوند. تحقیقات پیشین محققان نشان داده‌است که در حین گسترش خرابی بین‌لایه‌ای، مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه از قبیل ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف فعال می‌شوند [۲، ۴، ۶]. با توجه به این امر، به نظر می‌رسد که در آغاز رشد جدایش بین‌لایه‌ای شاهد افزایش قابل توجه فعالیت‌های نشرآوایی در نمونه‌ها باشیم. یکی از پارامترهایی که در مطالعه رفتار نشرآوایی مواد استفاده می‌شود، پارامتر تعداد ضرب‌آهنگ‌های نشرآوایی است. تعداد ضرب‌آهنگ‌های سیگنال نشرآوایی، بیانگر تعداد پالس‌هایی است که از آستانه معینی^۳ عبور می‌کنند. در چندلایه‌های کامپوزیتی، با افزایش بار اعمالی به کامپوزیت،

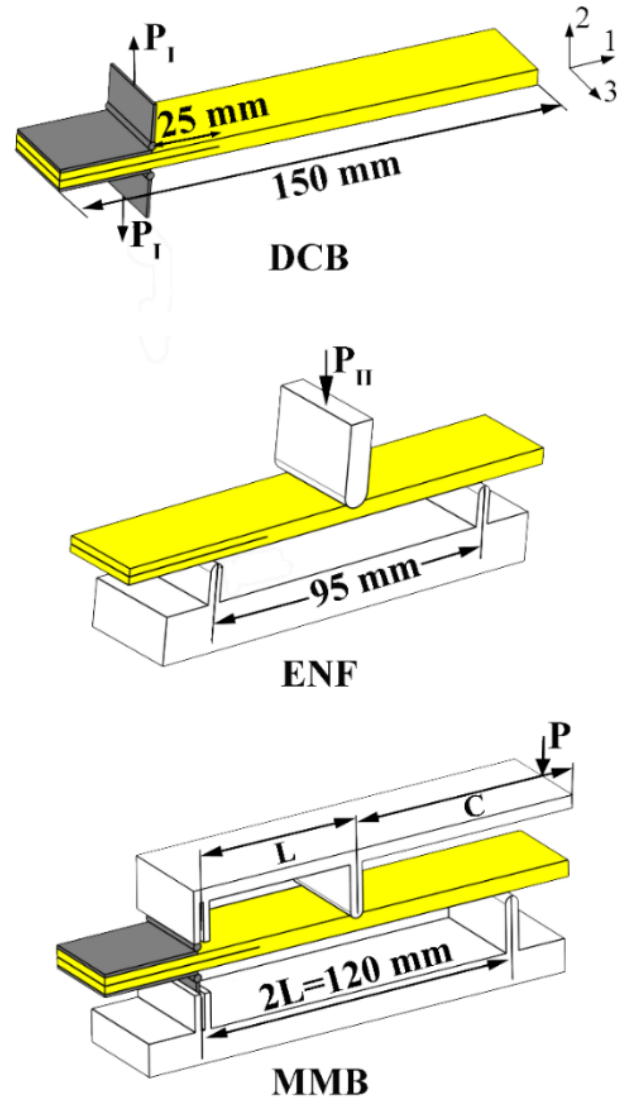


Fig. 3. A schematic of dimension of Loaded specimens

شکل ۳: طرح‌واره‌ای از ابعاد نمونه‌های بارگذاری

۶-۱- تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی (روش مکانیکی)

در استانداردهای ASTM D5528 [۱۳] و ASTM D6671 [۱۴] که برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در حالت I و حالت ترکیبی I و II به کار می‌روند، برای تعیین بار بحرانی، سه روش پیشنهاد شده‌است: بار متناظر با نقطه‌ای که در آن نقطه، منحنی بار - جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود (NL^1).

بار متناظر با افزایش ۵٪ نرمی نمونه یا بار بیشینه (5%/max)

بار متناظر با تشخیص چشمی رشد جدایش بین‌لایه‌ای (VIS^2)

نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های بارگذاری حالت I، II و حالت‌های ترکیبی I و II در شکل ۴ نشان داده شده‌است. شکل ۵ مقادیر بار بحرانی به‌دست‌آمده با سه روش ارائه‌شده در استاندارد را برای نمونه ENF نشان

- 1 Non-linearity
- 2 Visual Inspection

3 Threshold

متناظر با شروع جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها، اولین لحظه‌ای که شیب نمودار ضرب‌آهنگ‌های تجمعی از صفر به مقداری مثبت افزایش می‌یابد، متناظر با آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. به دلیل ماهیت پیوسته این نمودار، به نظر می‌رسد که امکان خطای اپراتور در انتخاب لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای، کمتر از نمودار گسسته ضرب‌آهنگ‌های لحظه‌ای نشرآوایی باشد.

پارامتر دیگری که در مطالعه رفتار خرابی در نمونه‌ها استفاده می‌شود، پارامتر انرژی سیگنال‌های نشرآوایی است. پارامتر انرژی نشرآوایی، به عنوان مساحت سطح زیر نمودار سیگنال نشرآوایی ثبت شده تعریف می‌شود و بیانگر شدت سیگنال نشرآوایی است. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مکانیزم‌های مختلف خرابی در مواد، سیگنال‌های نشرآوایی با سطوح انرژی‌های مختلف ایجاد می‌کنند [۲، ۱۰]. بنابراین، با آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای و فعال شدن مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌ها، افزایش ناگهانی انرژی سیگنال‌های نشرآوایی را شاهد خواهیم بود. بنابراین، بار متناظر با اولین افزایش ناگهانی انرژی نشرآوایی لحظه‌ای یا لحظه تغییر شیب نمودار انرژی تجمعی نشرآوایی از صفر به مقداری مثبت، به عنوان بحرانی و لحظه آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۸ تا ۱۲ بار بحرانی به دست آمده با روش انرژی لحظه‌ای و انرژی تجمعی سیگنال‌های نشرآوایی را برای نمونه‌های MMB ۲۵٪ (حالت ترکیبی با درصد حالت ۲۵٪)، MMB ۳۳٪ (حالت ترکیبی با درصد حالت ۳۳٪) و ENF نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، شکل ۱۳ نمایی از محدوده تقریبی تشخیص رشد جدایش بین لایه‌ای را برای روش‌های ارائه شده در استاندارد و روش نشرآوایی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است روش چشمی، دیرتر از سایر روش‌ها، رشد جدایش بین لایه‌ای را تشخیص داده، بنابراین، برای پایش رشد خرابی در سازه‌ها، روش مناسبی به نظر نمی‌رسد. نتایج نشرآوایی در محدوده بین مقادیر نقطه غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی و افزایش ۵٪ نرمی نمونه قرار داشته و مطابقت مطلوبی با نتایج استاندارد دارد.

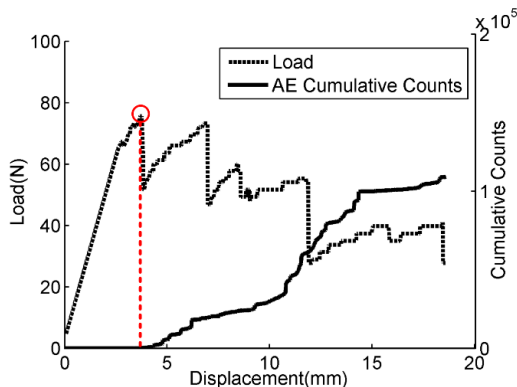


Fig. 7. Determination of critical load of DCB specimen using AE cumulative counts method

شکل ۷: تعیین بار بحرانی با روش مقدار تجمعی ضرب‌آهنگ‌های سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه DCB

میکروخرابی‌هایی از قبیل ترک خوردگی ماتریس، جدایش یالیف از ماتریس و شکست یالیف در ناحیه جلو نوک ترک اتفاق می‌افتد. برخلاف وجود این میکروخرابی‌ها، کامپوزیت همچنان می‌تواند بار بیشتری را تحمل نماید. با افزایش مجدد بار، میکروخرابی‌های بیشتری ایجاد شده و با اتصال آن‌ها به یکدیگر، شاهد ایجاد و رشد خرابی بین لایه‌ای ماکروسکوپی در کامپوزیت هستیم. با ایجاد خرابی ماکروسکوپی، بار از بیشینه مقدارش افت نموده و استحکام سازه تضعیف می‌شود. بنابراین، اولین افزایش قابل توجه (حداقل ۵ درصد افزایش) انرژی یا ضرب‌آهنگ سیگنال‌های نشرآوایی در ناحیه آغاز بارگذاری تا بار بیشینه، مربوط به ایجاد اولین خرابی‌ها در کامپوزیت است. شکل ۶ نمودار ضرب‌آهنگ‌های لحظه‌ای نشرآوایی را برای نمونه DCB نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، تا قبل از جابجایی ۴ mm نیرو و جابجایی رابطه‌ای به نسبت خطی داشته و به دلیل این‌که هنوز هیچ خرابی‌ای در نمونه اتفاق نیفتاده، تعداد ضرب‌آهنگ‌های نشرآوایی نزدیک به صفر است. در لحظه‌ای که ترک شروع به رشد می‌کند (دایره قرمز رنگ در شکل ۶)، به دلیل فعال شدن مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه، تعداد ضرب‌آهنگ سیگنال‌های نشرآوایی به طور ناگهانی بالا می‌رود. بنابراین، نقطه‌ای که برای نخستین بار، افزایش ناگهانی ضرب‌آهنگ‌های نشرآوایی در نمونه مشاهده شد، به عنوان لحظه آغاز جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. این نتیجه با نتایج حاصل از استاندارد مطابقت مطلوبی دارد.

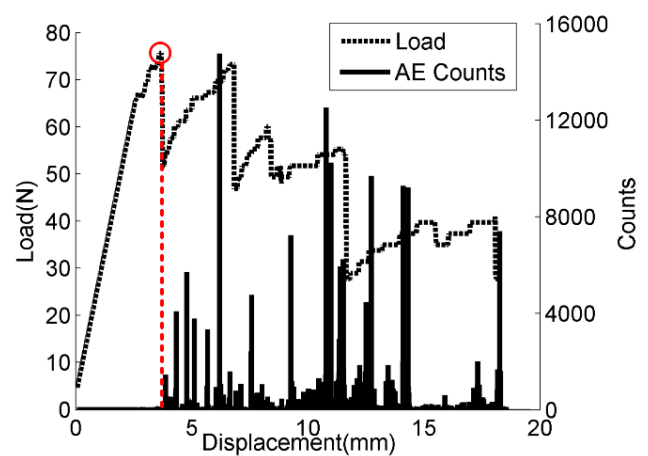


Fig. 6. Determination of critical load of DCB specimen using AE quantity of counts method

شکل ۶: تعیین بار بحرانی با روش تعداد ضرب‌آهنگ‌های سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه DCB

شکل ۷ نمودار ضرب‌آهنگ‌های تجمعی نشرآوایی را برای نمونه DCB نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، نمودار ضرب‌آهنگ‌های تجمعی بر خلاف نمودار ضرب‌آهنگ‌های لحظه‌ای نشرآوایی که گسسته بوده، پیوسته است. در این نمودار، قبل از وقوع خرابی در نمونه‌ها، شیب نمودار صفر بوده و با آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای، ضرب‌آهنگ‌های تجمعی با شیب مشخصی افزایش می‌یابد. در ادامه، بسته به نرخ رشد جدایش بین لایه‌ای و توسعه آسیب در نمونه‌ها، شیب این نمودار تغییر می‌کند. به منظور تعیین بار بحرانی

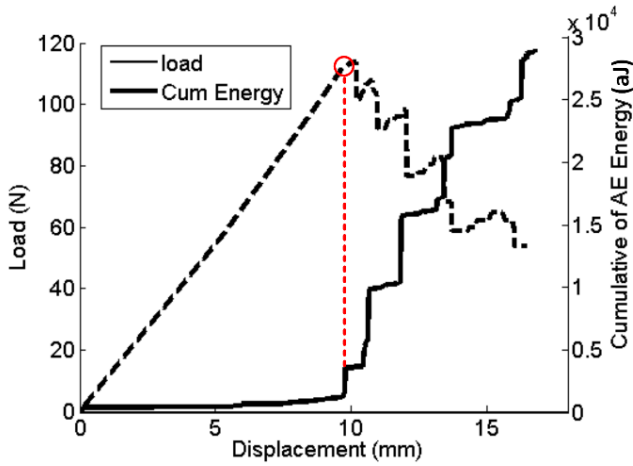


Fig. 11. Determination of critical load of MMB 33% specimen using AE cumulative energy method

شکل ۱۱: تعیین بار بحرانی با روش مقدار تجمعی انرژی سیگنال‌های نشر آوایی برای نمونه ۳۳٪ MMB

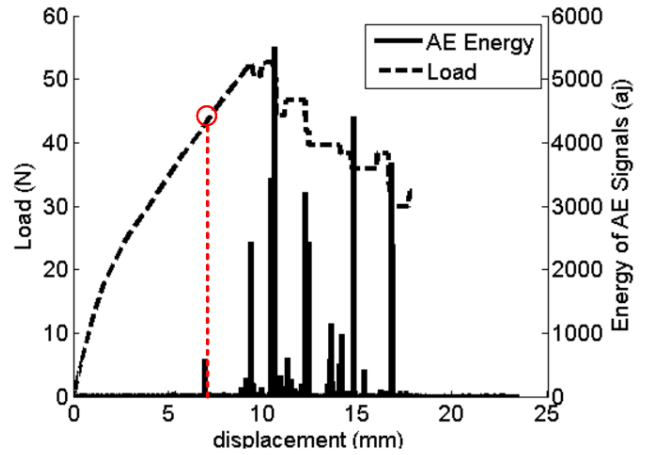


Fig. 8. Determination of critical load of MMB 25% specimen using AE energy method

شکل ۸: تعیین بار بحرانی با روش انرژی سیگنال‌های نشر آوایی برای نمونه ۲۵٪ MMB

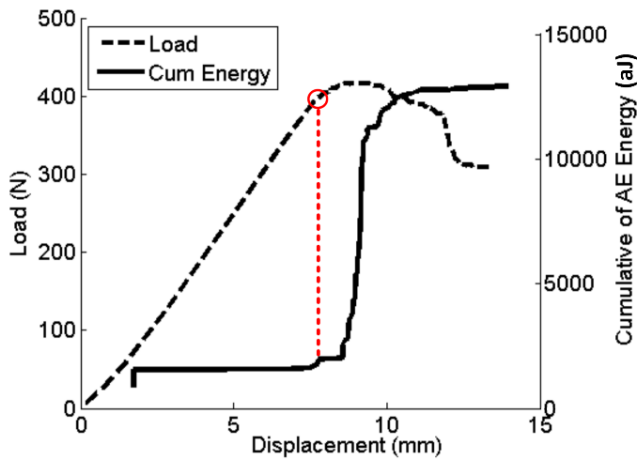


Fig. 12. Determination of critical load of ENF specimen using AE cumulative energy method

شکل ۱۲: تعیین بار بحرانی با روش مقدار تجمعی انرژی سیگنال‌های نشر آوایی برای نمونه ENF

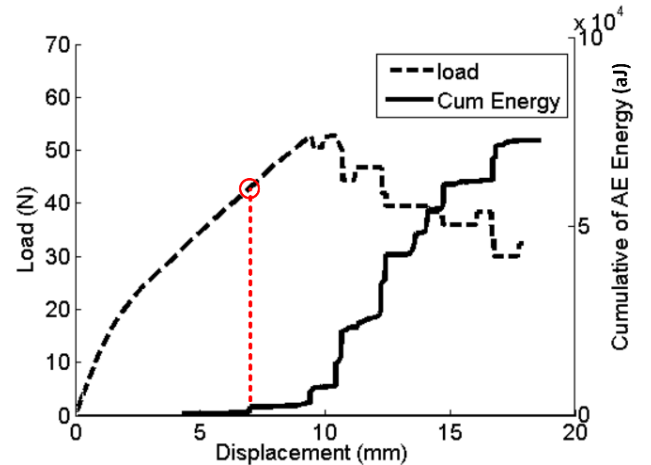


Fig. 9. Determination of critical load of MMB 25% specimen using AE cumulative energy method

شکل ۹: تعیین بار بحرانی با روش مقدار تجمعی انرژی سیگنال‌های نشر آوایی برای نمونه ۲۵٪ MMB

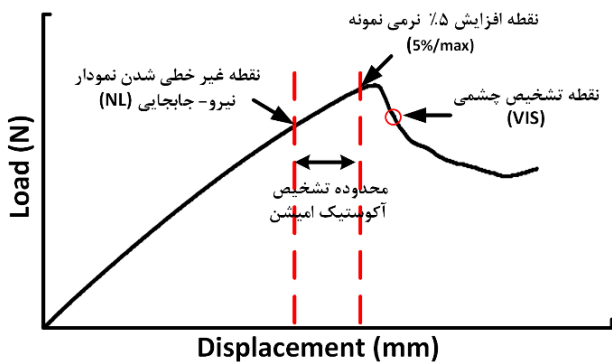


Fig. 13. A diagnostic range of critical load using different methods

شکل ۱۳: شماتیکی از محدوده تشخیص بار بحرانی روش‌های مختلف

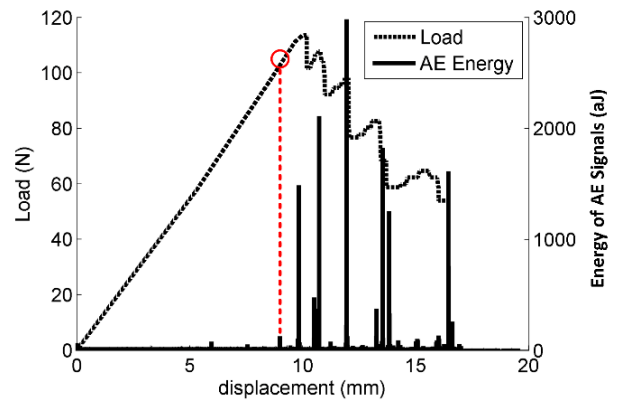


Fig. 10. Determination of critical load of MMB 33% specimen using AE energy method

شکل ۱۰: تعیین بار بحرانی با روش انرژی سیگنال‌های نشر آوایی برای نمونه ۳۳٪ MMB

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

فهرست علائم

طول جدایش بین لایه‌ای	a
روش انرژی سیگنال‌های نشرآوایی	AE_{Energy}
روش تعداد ضرب‌آهنگ‌های نشرآوایی	AE_{Count}
عرض نمونه	b
فاصله نقطه اعمال بار تا وسط نمونه، در بارگذاری حالت ترکیبی	c
مدول الاستیک نمونه در جهت الیاف	E
نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری حالت I	G_I
نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری حالت II	G_{II}
نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری حالت ترکیبی I و II	$G_{mixed-mode}$
نصف ضخامت نمونه	h
نصف فاصله دو تکیه‌گاه در بارگذاری حالت II و حالت ترکیبی I و II	L
بار اعمال شده بر نمونه	p
روش نقطه غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی	NL
روش تشخیص چشمی رشد جدایش بین لایه‌ای	VIS
روش افزایش ۵٪ نرمی نمونه یا بار بیشینه	$5\%/max$

جدول ۱ مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های ارائه‌شده در استاندارد و روش‌های مبتنی بر نشرآوایی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ روش افزایش ۵٪ نرمی نمونه ($5\%/max$)، حد بالای مقادیر چقرمگی شکست را برای نمونه‌ها نتیجه داده و روش نقطه غیرخطی شدن نمودار نیرو-جابجایی حد پایین مقادیر چقرمگی شکست را به دست می‌دهد. مطابق شکل ۱۳، اگرچه روش چشمی دیرتر از همه روش‌ها، رشد جدایش بین لایه‌ای را تشخیص می‌دهد، اما چون نیروی بحرانی به‌دست‌آمده با این روش کمتر از نیروی به‌دست‌آمده با روش $5\%/max$ است، بنابراین، مقادیر چقرمگی شکست چشمی، کمتر از مقادیر افزایش ۵٪ نرمی نمونه خواهد بود. با توجه به مطابقت مطلوب نتایج حاصل از نشرآوایی با نتایج استاندارد، می‌توان از روش نشرآوایی، در تعیین لحظه رشد جدایش بین لایه‌ای در سازه‌های پیچیده و در حالتی که جدایش بین لایه‌ای در داخل ماده اتفاق افتاده و قابل مشاهده و دسترسی نیست استفاده نمود.

جدول ۱: مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای محاسبه‌شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌های مختلف (kJ/m^2)

Table 1. Calculated quantity of inter laminar fracture toughness of specimens using different methods [kJ/m^2]

روش	نمونه			
	ENF	MMB 33%	MMB 25%	DCB
NL	۰/۴۱۳	۰/۳۴۱	۰/۰۳۰	۰/۱۱۴
5%/max	۰/۴۵۴	۰/۳۴۸	۰/۲۸۹	۰/۲۳۸
VIS	۰/۴۲۶	۰/۳۱۲	۰/۲۶۳	۰/۱۴۰
AE Energy	۰/۴۱۰	۰/۳۳۰	۰/۱۸۳	۰/۱۹۰
AE Cum Energy	۰/۴۲۵	۰/۳۴۲	۰/۱۹۰	۰/۲۰۰
AE Count	۰/۴۵۰	۰/۳۴۳	۰/۲۸۲	۰/۲۳۰
AE Cum Count	۰/۴۵۰	۰/۳۴۵	۰/۲۸۸	۰/۲۳۰

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی، مقدار بار بحرانی در نمونه‌ها با دو روش مکانیکی و نشرآوایی تعیین شد. سپس با استفاده از این مقادیر، مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای هر نمونه محاسبه شد. مقادیر به‌دست‌آمده از روش نشرآوایی تطابق بسیار خوبی با مقادیر به‌دست‌آمده از استانداردهای ASTM D5528 و ASTM D6671 دارد. به دلیل این تطابق مطلوب، می‌توان از روش نشرآوایی به منظور تشخیص شروع رشد جدایش و تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای، در نمونه‌های تحت حالت‌های مختلف بارگذاری و در سازه‌هایی با شکل‌های پیچیده که در آن‌ها تشخیص رشد جدایش به طور مستقیم امکان‌پذیر نبوده و رشد جدایش حالت ناپایدار دارد استفاده شود.

منابع

- [1] Yousefi, J., Ahmadi M., Nazmdar M., Hajikhani M., "Investigation of damage mechanisms of Glass/Epoxy composite laminates using nondestructive acoustic emission method", in: *prediction of aviation and industrial Worn out structures life conference*, Tehran, 2011.
- [2] Sause M.G., Müller T., Horoschenkoff A., Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis, *Composites Science and Technology*, 72(2) (2012): 167-174.
- [3] Fotouhi M., Heidary H., Ahmadi M., Pashmforoush F., "Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet

- [10] Fotouhi M., Heidary H., Ahmadi M., Pashmforoush F., "Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet and fuzzy C-means clustering". *Journal of Composite Materials*, 46 (15) (2012): 1795-1808.
- [11] Yousefi J., Ahmadi M., Shahri M. N., Oskouei A. R., Moghadas F. J., 2014. "Damage Categorization of Glass/Epoxy Composite Material Under Mode II Delamination Using Acoustic Emission Data: A Clustering Approach to Elucidate Wavelet Transformation Analysis", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(2)(2014): 1325-1335.
- [12] Saeedifar M., Fotouhi M., Ahmadi Najafabadi M., Hosseini Toudeshky H., "Interlaminar fracture toughness evaluation in glass/epoxy composites using acoustic emission and finite element methods", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1) (2015) 373-384.
- [13] ASTM D5528-01, "Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites", in: *ASTM International Standard*, West Conshohocken, PA, 2007.
- [14] ASTM D6671/D6671M – 03, "Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites". *ASTM International Standard*, West Conshohocken, PA, 2003.
- and fuzzy C-means clustering", *Journal of Composite Materials*, 46(15) (2012): 1795-1808.
- [4] S. Sridharan, "Delamination behavior of composites", 1 ed, Woodhead Publishing Limited, 2008.
- [5] R.K. Miller, "Nondestructive testing handbook: acoustic emission testing", 5 ed, *American Society for Nondestructive Testing*, 1987.
- [6] Pashmforoush F., Fotouhi M., Ahmadi M., "Damage characterization of glass/epoxy composite under three-point bending test using acoustic Emission technique". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(7) (2012): 1380-1390.
- [7] Benzeggagh M.L., Kenane M., "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixedmode bending apparatus". *Composites Science and Technology*, 56(4) (1996): 439-449.
- [8] Refahi Oskouei A., Zucchelli A., Ahmadi M., Minak G., "An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate". *Materials & Design*, 32(3) (2011): 1444-1455.
- [9] Arumugam V., Kumar C. S., Santulli C., Sarasini F., Stanley A., "Identification of Failure Modes in Composites from Clustered Acoustic Emission Data Using Pattern Recognition and Wavelet Transformation", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(5) (2012): 1087-1102.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Mohammadi, M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, "Acoustic Emission Based Methodology to Evaluate the Fracture Toughness in Carbon/Epoxy Composites" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 379-386.
DOI: 10.22060/mej.2016.668

