



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۱۱ تا ۴۲۲
Vol. 48, No. 4, Winter 2017, pp. 411-422



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

بررسی ایجاد جدایش بین لایه‌ای و پیش‌بینی منحنی رشد آن در چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با روش آکوستیک امیشن

میلاذ سعیدی فر^۱، مهدی احمدی نجف‌آبادی^{۲*}، حسین حسینی تودشکی^۳، رضا محمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۲۰)

چکیده

به دلیل نیاز به ساخت سازه‌هایی با قابلیت اطمینان بالا، تشخیص ایجاد خرابی و پایش رشد آسیب در سازه‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است. پژوهش حاضر، ایجاد و گسترش جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای شیشه/اپوکسی را با روش آکوستیک امیشن، مورد بررسی قرار می‌دهد. ابتدا، نمونه‌های استاندارد با لایه‌چینی‌های مختلف ساخته شده و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی حالت I قرار می‌گیرند. رفتار خرابی بین لایه‌ای در دو بخش بررسی می‌شود. در بخش نخست، تمرکز اصلی بر مرحله آغاز خرابی در نمونه‌ها بوده و با روش آکوستیک امیشن مراحل ایجاد خرابی در نمونه‌ها مشخص می‌شود. در بخش دوم، رشد و گسترش جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها با روش آکوستیک امیشن بررسی می‌شود. در این بخش، با تعیین سرعت امواج آکوستیک امیشن در نمونه‌ها و ارائه روشی برای فیلتر نمودن سیگنال‌ها ناخواسته، موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در حین رشد، پیش‌بینی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش آکوستیک امیشن در بررسی رفتار آغاز و گسترش خرابی بین لایه‌ای و پیش‌بینی منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی است.

کلمات کلیدی:

جدایش بین لایه‌ای، آکوستیک امیشن، بارگذاری حالت I

Please cite this article using:

Saeedifar, M., Ahmadi Najafabadi, M., Hosseini Toudeshky, H., and Mohammadi, R., 2017. "Investigation of Initiation and Evolution of Delamination in Glass/Epoxy Laminated Composites Using Acoustic Emission Method". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(4), pp. 411-422.

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: ahmadin@aut.ac.ir

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



۱- مقدمه

مشخص می‌شود. در این بخش، پس از تعیین الگوهای مرجع آکوستیک امیشن برای مکانیزم‌های مختلف خرابی، توالی وقوع خرابی‌های مختلف در نمونه‌های حالت I، با روش آکوستیک امیشن مشخص شده و نتایج حاصل با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها صحت‌سنجی شد. در بخش دوم، رفتار رشد و گسترش جدایش بین لایه‌ای با آکوستیک امیشن بررسی شد. در این بخش، با مکان‌یابی سیگنال‌های خرابی‌های ناشی از رشد ترک در نمونه‌ها، موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در حین رشد آن تعیین شد. در ادامه، به منظور بهبود نتایج پیش‌بینی آکوستیک امیشن، روندی جدید برای جدا کردن سیگنال‌های ناخواسته ارائه شد که منجر به بهبود نتایج پیش‌بینی آکوستیک امیشن شد. تطابق مطلوب نتایج به‌دست‌آمده از این روش با روش ارائه شده در استاندارد [۱۲]، بیانگر عملکرد مطلوب روش آکوستیک امیشن در پیش‌بینی ایجاد و رشد جدایش بین لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی است.

۲- روش تحقیق

۲ ۱ مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی است. نمونه‌ها با ۱۴ لایه و با روش لایه‌چینی دستی و مطابق استاندارد ASTM D5528 [۱۲] ساخته شدند. به منظور ایجاد جدایش بین‌لایه‌ای اولیه در نمونه‌ها، یک لایه تفلون با ضخامت تقریبی $20\mu\text{m}$ در بین دو لایه میانی کامپوزیت قرار گرفته‌است. ابعاد نمونه‌ها $180 \times 25 \times 5\text{mm}^3$ است. نمونه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده‌است. جدول ۱ انواع نمونه‌ها و نوع لایه‌چینی هر نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	نوع لایه‌چینی
U	تک‌جهته (۰.۵)
W	بافته‌شده (۰.۵-۹.۰۵)

۲ ۲ تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش کشش مدل HIWA با ظرفیت ۵ تن، استفاده شد. قطعات با سرعت 3mm/min تحت آزمایش قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های آکوستیکی نیز از نرم‌افزار AEWin و سیستم PCI-2 با نرخ داده‌برداری 1MHz استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک‌کریستال با پهنای باند وسیع به نام PICO، محصول کمپانی PAC، مدل R50D استفاده گردید. برای حذف نویزهای زمینه در حین نمونه‌برداری، حد آستانه 35dB در نظر گرفته شد.

۳ ۲ روش آزمایش

آزمایش‌ها براساس استاندارد ASTM D5528 [۱۲] انجام شدند.

جدایش بین‌لایه‌ای^۱ شایع‌ترین نوع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است که منجر به کاهش استحکام و مدول خمشی کامپوزیت می‌شود [۲۰]. چون این نوع خرابی در بین لایه‌های کامپوزیت اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیر قابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. برای تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی ارائه شده‌است [۳]. از جمله این روش‌ها، روش آکوستیک امیشن^۲ بوده که پایش بالادرنگ سیستم را امکان‌پذیر ساخته و بدین ترتیب قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را آکوستیک امیشن گویند [۲]. از مزایای استفاده از روش آکوستیک امیشن در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بالادرنگ کامپوزیت و قابلیت جدا نمودن انواع مختلف خرابی، همچون ترک خوردگی ماتریس^۳، شکست الیاف^۴، جدایش الیاف از ماتریس^۵ و جدایش بین‌لایه‌ای اشاره نمود [۴-۵].

بنزگاه و همکارش [۶]، به بررسی تجربی رشد جدایش بین‌لایه‌ای، در نمونه‌های شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری حالت I، II و حالت ترکیبی I و II پرداختند. رفاهی و همکارش [۷]، با روش آکوستیک امیشن، چقرمگی شکست بین لایه‌ای را در چندلایه‌های پلی‌استر/شیشه که تحت بارگذاری حالت I قرار داشتند، بررسی کردند. سیلورساید و همکاران [۸]، از روش آکوستیک امیشن برای تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی که تحت بارگذاری حالت I، II و حالت ترکیبی I و II قرار داشتند استفاده کردند. فتوحی و همکارانش [۹]، با روش آکوستیک امیشن و استفاده از دسته‌بندی فازی و تبدیل موجک، مکانیزم‌های مختلف خرابی را که در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت خمش سه نقطه اتفاق می‌افتند را دسته‌بندی نمودند. پشم فروش و همکاران [۱۰]، با ترکیب روش‌های الگوریتم ژنتیک^۶ و کا-مینز^۷، مکانیزم‌های خرابی را در حین گسترش جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی دسته‌بندی نمودند. رومانی و همکاران [۱۱]، منحنی رشد خستگی جدایش بین لایه‌ای را در نمونه‌های کربن/اپوکسی با روش آکوستیک امیشن پیش‌بینی نمودند.

در پژوهش حاضر، ایجاد و گسترش جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با روش آکوستیک امیشن بررسی می‌شود. رفتار خرابی بین لایه‌ای در دو بخش بررسی شد. در بخش نخست، تمرکز اصلی بر مرحله آغاز خرابی در نمونه‌ها بوده و با روش آکوستیک امیشن مراحل آغاز خرابی در نمونه‌ها

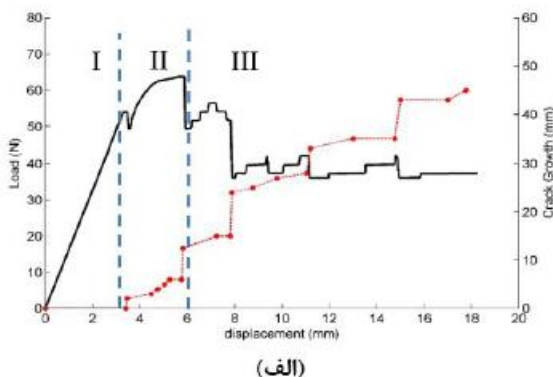
- 1 Delamination
- 2 Acoustic Emission
- 3 Matrix Cracking
- 4 Fiber Breakage
- 5 Fiber/Matrix Debonding
- 6 Genetic Algorithm
- 7 K-Means

مناسب آن مانع از کار افتادگی سازه شد [۱۳].

نتایج پژوهش در دو بخش ارائه می‌شود. نخست، با استفاده از داده‌های مکانیکی و آکوستیک امیشن، آغاز خرابی در ماده و رفتار ماده در این مرحله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، به بررسی رفتار گسترش و توسعه جدایش بین لایه‌ای پرداخته می‌شود.

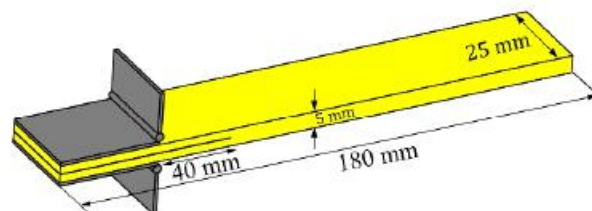
۱-۳ بررسی آغاز جدایش بین لایه‌ای با روش آکوستیک امیشن در این قسمت، به بررسی رفتار آغاز جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها پرداخته می‌شود. شکل ۳ نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد جدایش بین لایه‌ای-جابجایی نمونه‌های U و W را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود: I) ناحیه خطی منحنی نیرو-جابجایی، II) از نقطه غیر خطی شدن منحنی تا نیروی بیشینه و III) بعد از نیروی بیشینه. در نمودار نیرو-جابجایی نمونه U در ناحیه I، نیرو و جابجایی رابطه‌ای خطی داشته و رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای مشاهده نشده‌است. در ابتدای ناحیه II، یک افت کوچک در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود که این افت متناظر با لحظه آغاز ماکروسکوپیک رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه بوده که با دوربین ثبت شده‌است. پس از این رشد لحظه‌ای، به دلیل پدیده پل زنی الیاف در ناحیه‌ای کوچک در پشت نوک جدایش (شکل ۴)، نیرو مجدداً افزایش یافته و در جدایش بین لایه‌ای کند می‌نود. پدیده پل زنی الیاف که در ناحیه کوچکی در پشت نوک ترک اتفاق می‌افتد، عبارتست از اتصال دو طرف تعدادی از الیاف‌ها به لایه پایینی و بالایی ترک که این امر منجر به افزایش مقاومت نمونه در برابر رشد ترک می‌شود. با افزایش مجدد نیرو و رسیدن نیرو به حد تحمل نهایی الیاف‌ها، الیاف‌های پل زده شکسته شده، رشد جدایش بین لایه‌ای جهشی ناگهانی نموده و نیرو افت می‌کند.

با مقایسه نمودار رشد جدایش بین لایه‌ای دو نمونه U و W مشاهده می‌شود که رشد ترک در نمونه W حالتی پیوسته و یکنواخت داشته، در حالی که رشد ترک در نمونه U، حالت رشد ناگهانی-توقف دارد. دلیل این امر، پدیده پل زنی الیاف در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته‌است. در این نمونه‌ها با وقوع پدیده پل زنی الیاف در پشت ترک، رشد ترک کند شده، بار آهسته آهسته بالا رفته و زمانی که نیرو به حد شکست الیاف‌ها برسد، الیاف‌ها شکسته شده و نوک ترک به صورت ناگهانی رشد می‌کند.



(الف)

فرآیند آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده‌است. میزان جابجایی و بار به طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شد و طول ترک نیز با استفاده از دوربین فیلمبرداری مدل SONY HDR-XR150 با بزرگنمایی نوری ۲۵ X و بزرگنمایی دیجیتال ۳۰۰ X، در حین رشد جدایش بین لایه‌ای به طور پیوسته ثبت گردید.



شکل ۱: نمونه آزمایش



(الف)



(ب)

شکل ۲: نمونه در فرآیند آزمایش در حال بارگذاری

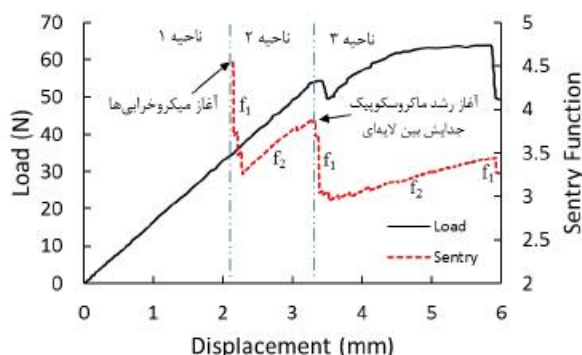
۳- بحث و نتایج

در بحث‌های مربوط به مکانیک شکست و مکانیک آسیب مواد و به ویژه مواد کامپوزیتی، دو رویکرد کلی وجود دارد. در رویکرد نخست، تمرکز اصلی بر لحظه پیدایش خرابی در ماده بوده و سعی می‌شود با پیش‌بینی صحیح لحظه ایجاد خرابی در ماده و انجام اقدامات پیشگیرانه، مانع از ایجاد خرابی شد [۱۳]. در رویکرد دوم، با فرض وجود خرابی اولیه در ماده، تمرکز اصلی بر روی چگونگی گسترش و توسعه آسیب در ماده بوده و سعی می‌شود رفتار توسعه آسیب را پیش‌بینی نموده و با کنترل

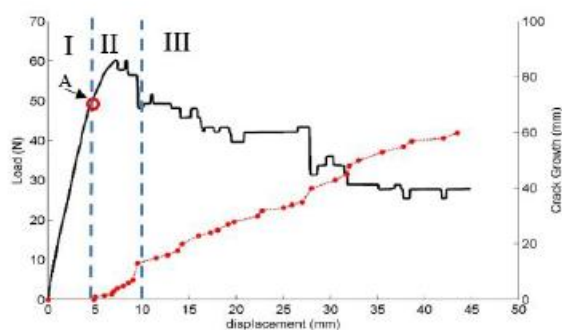
دلیل افزایش انرژی کرنشی، تابع سنتری سیر صعودی خواهد داشت (تابع $f_2(x)$) و یا این که ماده در برابر توسعه خرابی مقاومت زیادی نکرده و با توسعه خرابی و ایجاد سیگنال‌های آکوستیک امپشن جدید، تابع سنتری به طور پیوسته سیری نزولی خواهد داشت (تابع $f_3(x)$) [14].

رفتار تابع سنتری برای نمونه‌های I و II نمونه‌های U و W در شکل 5 نشان داده شده است. مطابق شکل 5-الف، نمونه U تا جابجایی 2 mm، خرابی خاصی در ماده اتفاق نیفتاده است. در جابجایی 2 mm با وقوع اولین میکروخرابی‌ها در ماده، تابع سنتری افتی ناگهانی دارد. به دنبال آن، با مقاومت نسبی ماده در برابر توسعه این میکروخرابی‌ها، تابع سنتری سیر صعودی دارد. اما، با کاهش تدریجی مقاومت ماده، به طور پیوسته از شیب تابع f_2 کاسته می‌شود، تا جایی که در جابجایی 3/3 mm که متناظر با رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای در ماده است، دومین افت تدریجی تابع سنتری اتفاق می‌افتد. پس از این افت تدریجی مجدداً ماده در برابر گسترش آسیب مقاومت نموده، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب تابع f_2 ثانویه نسبت به تابع f_2 اولیه کمتر بوده که این امر بیانگر کاهش مقاومت ماده در برابر آسیب است. روند صعودی تا زمانی که نیرو به بیشینه مقدار خود رسیده ادامه داشته و پس از آن با افت شدید همراه است.

در نمودار نمونه W با وقوع اولین میکروخرابی‌ها در جابجایی 2/7 mm، تابع سنتری افتی شدید دارد. اما در نمونه W برخلاف نمونه U، ماده در برابر توسعه آسیب از خود مقاومت نشان نداده و تابع سنتری سیر نزولی دارد. در جابجایی 4/3 mm با رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای، تابع سنتری افت بیشتری نموده و متعاقب آن تا رسیدن نیرو به بیشینه مقدارش، تابع سنتری سیر نزولی خود را دنبال می‌نماید. بنابراین، اولین افت شدید تابع سنتری، متناظر با ایجاد میکروخرابی در ماده بوده و دومین افت شدید متناظر با ایجاد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای در ماده است. در نمودار تابع سنتری شکل 5، در ناحیه 1، هیچ‌گونه خرابی در نمونه‌ها ایجاد نشده است. در ابتدای ناحیه 2 نخستین میکروخرابی‌ها اتفاق افتاده و با افزایش نیرو، میکروخرابی‌های جدید اتفاق افتاده و در ابتدای ناحیه 3، این میکروخرابی‌ها به هم متصل شده و رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل 3: منحنی نیرو و رشد ترک جابجایی نمونه الف (U و ب (W)



شکل 4: تصاویر میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک از پدیده پل زنی الیاف در ناحیه پشت نوک جدایش بین لایه‌ای در نمونه U

به منظور بررسی مراحل آغازین خرابی در ماده، بر نواحی I و II شکل 3 متمرکز شده‌ایم.

به منظور بررسی رفتار خرابی و ماده، تابعی با عنوان تابع سنتری [14] استفاده می‌شود. تابع سنتری، عبارت است از لگاریتم نسبت انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده به انرژی آکوستیک امپشن آزاد شده در اثر خرابی و آن تابع سنتری باربطه (1) بیان می‌شود [14]:

$$f(x) = \ln \left[\frac{E_{me}(x)}{E_{AE}(x)} \right] \quad (1)$$

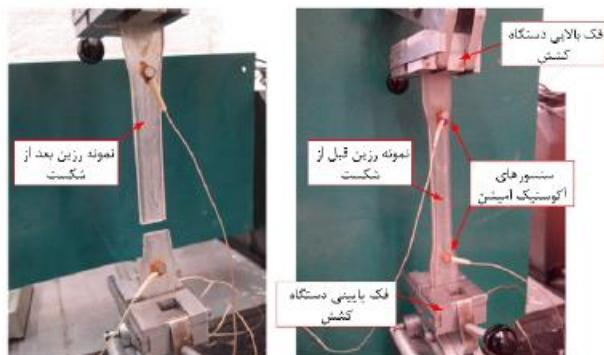
در معادله (1)، x متغیر آماری (معمولاً جابجایی است)، $E_{me}(x)$ انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده و $E_{AE}(x)$ انرژی سیگنال‌های آکوستیک امپشن ایجاد شده در ماده است. تابع سنتری، فقط در دامنه آکوستیک امپشن (Ω_{AB}) که در آن سیگنال‌های آکوستیک امپشن ثبت شده‌اند، تعریف می‌شود [14].

در یک سازه تحت بارگذاری، در مقادیر پایین نیرو که هنوز خرابی در سازه اتفاق نیفتاده، با افزایش مقدار نیرو، انرژی کرنشی در سازه ذخیره می‌شود. با ایجاد مکانیزم‌های مختلف خرابی در ماده، مقداری از انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده به صورت لحظه‌ای آزاد شده و باعث ایجاد سیگنال‌های آکوستیک امپشن می‌شود. با توجه به انرژی سیگنال‌های آکوستیک امپشن، افت ناگهانی در تابع سنتری مشاهده می‌شود که این رفتار تابع سنتری با تابع $f_1(x)$ نشان داده می‌شود. پس از این افت، ماده در اثر پدیده‌هایی هم چون کرنش سختی یا پل زنی الیاف، در برابر توسعه این خرابی‌ها از خود مقاومت نشان می‌دهد که در این حالت به

برای بررسی میکروخرابی‌های ایجاد شده در نمونه‌ها با روش آکوستیک امیشن، ابتدا باید مشخصات سیگنال‌های آکوستیک امیشن هر نوع خرابی را به طور جداگانه به دست آورد. بدین منظور، نمونه‌هایی از رزین خالص و الیاف، ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند و سیگنال‌های آکوستیک امیشن آن‌ها در حین بارگذاری ثبت شد. تصاویر مربوط به بارگذاری دسته الیاف‌ها و رزین خالص و ثبت سیگنال‌های آکوستیک امیشن آن‌ها، در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده‌است.



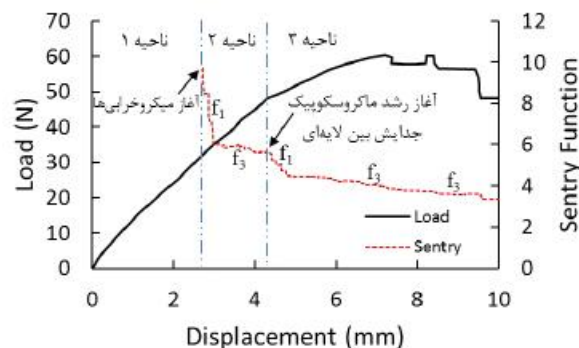
شکل 7: آزمایش گشش الیاف و ثبت سیگنال‌های آکوستیک امیشن آن



شکل 8: آزمایش گشش رزین خالص و ثبت سیگنال‌های آکوستیک امیشن آن

با تحلیل فرکانسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن حاصل از بارگذاری رزین خالص و الیاف با روش تبدیل فوریه، الگوهای آکوستیک امیشن مبنای، برای دسته‌بندی سیگنال‌های نمونه‌ها به دست آمد. شکل 9 محدوده فرکانسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن شکست ماتریس و شکست الیاف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، شکست ماتریس دارای بازه فرکانسی تقریبی [125kHz-250kHz] و شکست الیاف دارای بازه فرکانسی [350kHz-450kHz] است. چون حداکثر فرکانس سیگنال‌های ثبت شده در حین آزمایش نمونه‌ها برابر 500kHz بوده، با توجه به جدایش کامل محدوده‌های فرکانسی شکست الیاف و رزین، بازه باقیمانده (محدوده میانی این دو بازه)، به تنها مکانیزم باقیمانده، یعنی جدایش الیاف از ماتریس اختصاص می‌یابد.

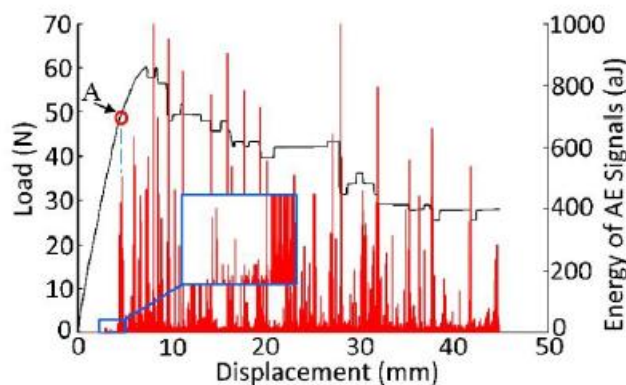
تحقیقات پیشین [18-19] نشان داده‌اند که فرکانس (f_i) و سرعت



(ب)

شکل 5: رفتار تابع سنتری نمونه الف) U و ب) W

شکل 6 نمودار انرژی آکوستیک امیشن نمونه W را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های 3 ب و 6، مشخص است که با آغاز رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای (نقطه A)، انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن به شدت افزایش می‌یابد. اما همان‌گونه که با بزرگنمایی انجام شده در شکل 6 مشخص است، قبل از نقطه A نیز فعالیت‌های آکوستیکی با انرژی پایین مشاهده می‌شود که این امر به مکانیزم رشد ترک در کامپوزیت‌ها بر می‌گردد. مکانیزم رشد ترک در مواد کامپوزیتی پلیمری با فلزات متفاوت است. در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، ابتدا در ناحیه نوک ترک، میکروخرابی‌هایی از قبیل ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس اتفاق افتاده و با گسترش و اتصال این میکروخرابی‌ها به یکدیگر، جدایش بین لایه‌ای به صورت ماکروسکوپیک رشد می‌کند [15]. بنابراین، فعالیت‌های آکوستیکی ضعیف مشاهده شده قبل از رشد ماکروسکوپیک جدایش بین لایه‌ای، می‌تواند ناشی از وقوع میکروخرابی‌ها در ماده باشد.

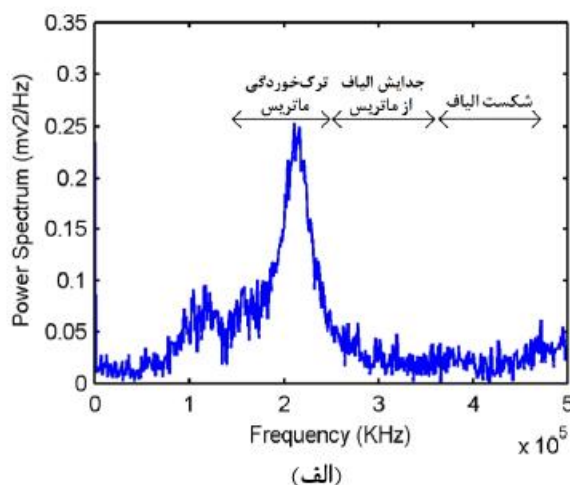


شکل 6: توزیع انرژی آکوستیک امیشن نمونه W

شناسایی و تشخیص مکانیزم‌های مختلف خرابی در سازه‌های کامپوزیتی با روش‌های پیش وضعیت، به کاربر این امکان را می‌دهد که از وضعیت خرابی ایجاد شده در سازه مطلع شده و فرآیند ترمیمی متناسب با آن خرابی را برای اصلاح سازه اتخاذ نماید [16]. میکرومکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف عبارتند از: ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف [4، 10، 17].

سیگنال آکوستیک امپشن ثبت شده در ابتدای ناحیه 2 نمودار شکل 5 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، در این سیگنال، محدوده فرکانسی معادل با محدوده فرکانسی ترک‌خوردگی ماتریس، بیشترین فراوانی را داشته و شدت بازه‌های فرکانسی جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف قابل صرف‌نظر هستند. بنابراین، اولین میکروخرابی ایجادشده در ماده، ترک‌خوردگی ماتریس بوده که این امر با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح خرابی نمونه در آغاز ناحیه 2 (شکل 10-ب) و نتایج ارائه‌شده توسط سایر محققین مطابقت دارد [21-22]. طیف فرکانسی سیگنال مربوط به اواسط ناحیه 2، در شکل 11-الف، نشان داده شده‌است. در طیف فرکانسی این سیگنال، علاوه بر محدوده فرکانسی ترک‌خوردگی ماتریس، محدوده فرکانسی مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف نیز مشاهده می‌شود؛ اما شدت فرکانس‌های شکست الیاف کم است و این امر نشان می‌دهد که مکانیزم غالب در این ناحیه ترک‌خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس است. شکل 11-ب، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خرابی‌ها در اواسط ناحیه 2 را نشان می‌دهد که این نتایج، با نتایج آکوستیک امپشن همخوانی دارد. در طیف فرکانسی سیگنال آکوستیک امپشن مربوط به انتهای ناحیه 2 و اوایل ناحیه 3 (شکل 12-الف) شدت بازه فرکانسی شکست الیاف افزایش یافته‌است. بنابراین، در لحظه آغاز رشد ماکروسکوپی جدایش بین لایه‌ای، همه مکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت فعال شده‌اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به خرابی‌های این ناحیه، در شکل 12-ب نشان داده شده‌است.

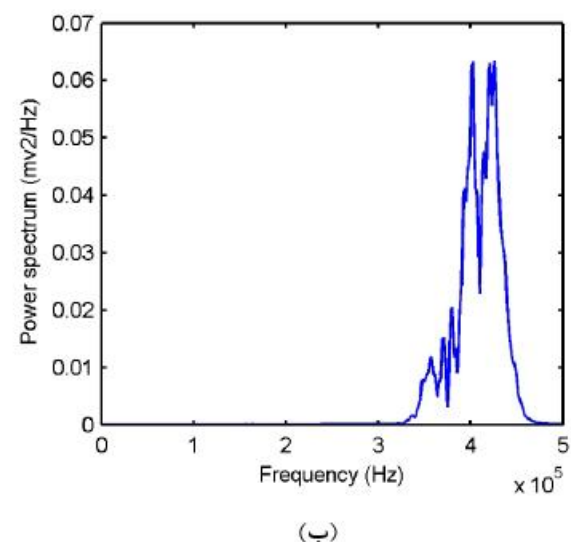
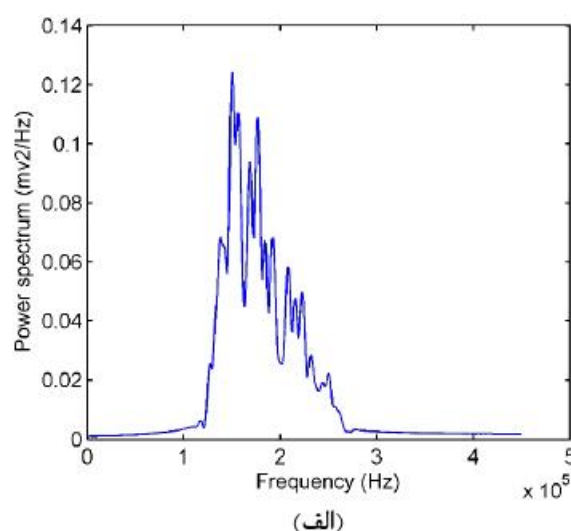
مکانیزم رشد ترک در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، بدین صورت است که ابتدا در ناحیه نوک ترک، ترک‌خوردگی ماتریس اتفاق می‌افتد. با افزایش این ترک‌خوردگی‌ها و پیوستن آن‌ها به یکدیگر در نواحی پیرامون الیاف‌ها، جدایش الیاف از ماتریس اتفاق می‌افتد. سپس، به دلیل جدا شدن الیاف از ماتریس و گسسته شدن ساختار ماده، بار اعمالی بر الیاف، از استحکام آن تجاوز نموده و منجر به شکست الیاف می‌شود [21-22]. نتایج حاصل از آکوستیک امپشن (شکل‌های 10-الف و 11-الف و 12-الف) با روند بیان شده مطابقت دارد.



موج الاستیک یک خرابی (c_i)، به‌زمان‌راندنش⁹ (τ_i)، مدول الاستیک (E_i) و چگالی (ρ_i) ماده وابسته بوده و بارابطه (2) نشان داده می‌شود:

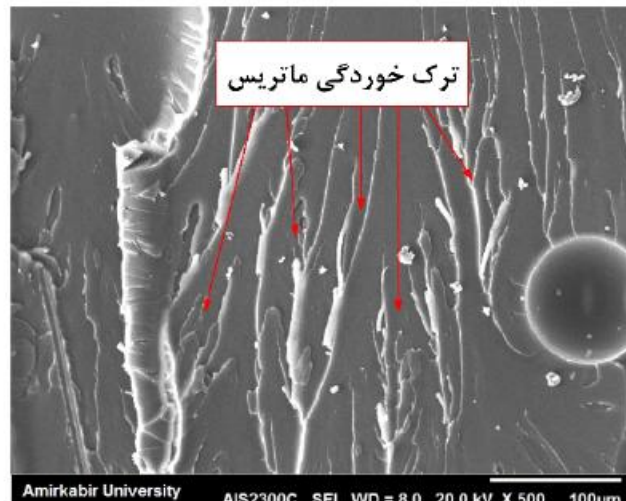
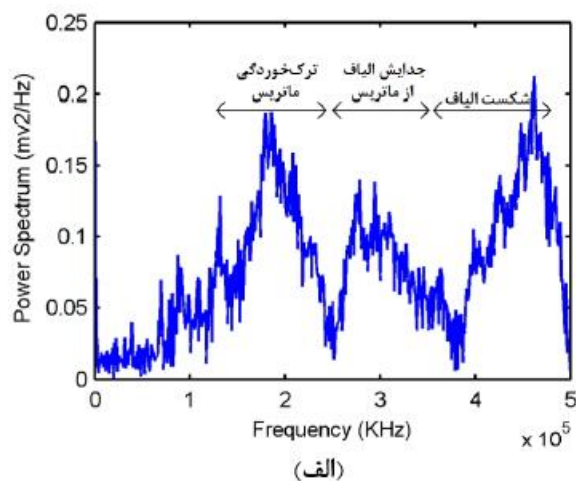
$$f_i \sim c_i \sim \frac{1}{\tau_i} \sim \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}} \quad (2)$$

بنابراین، با توجه به این‌که نسبت مدول الاستیک به چگالی برای الیاف بیشتر از ماتریس است، فرکانس شکست الیاف بیشتر از فرکانس ترک‌خوردگی ماتریس است [18] که این امر با نتایج نشان داده شده در شکل 9 و نتایج ارائه شده در تحقیقات پیشین [9-10، 20] همخوانی دارد.



شکل 9: محدوده فرکانسی (الف) شکست ماتریس و (ب) شکست الیاف

با به دست آمدن این الگوهای مینا، سیگنال‌های آکوستیک امپشن ثبت شده در حین آزمایش نمونه‌ها، تجزیه و تحلیل شدند. با استفاده از تبدیل فوریه، توزیع فرکانسی سیگنال‌های آکوستیک امپشن مربوط به مراحل مختلف بارگذاری بدست آمد. شکل 10-الف، توزیع فرکانسی



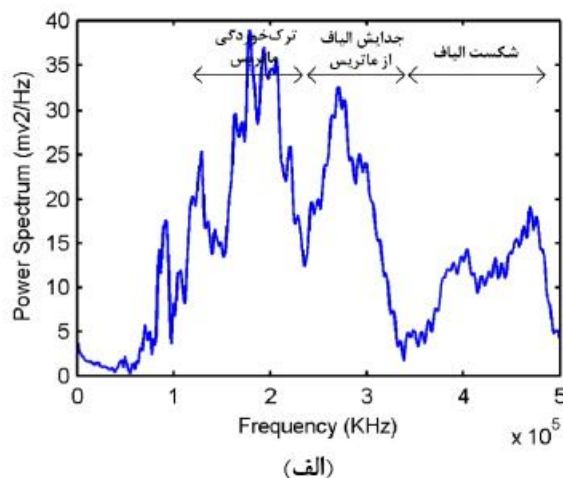
(ب)

شکل ۱۰: الف) طیف فرکانسی سیگنال و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی خرابی‌های مربوط به ابتدای ناحیه ۲

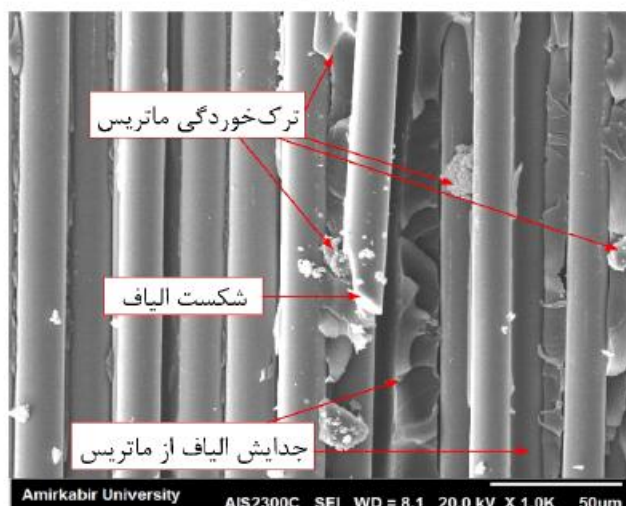


(ب)

شکل ۱۲: الف) طیف فرکانسی سیگنال و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی خرابی‌های مربوط به انتهای ناحیه ۲ و ابتدای ناحیه ۳



(الف)

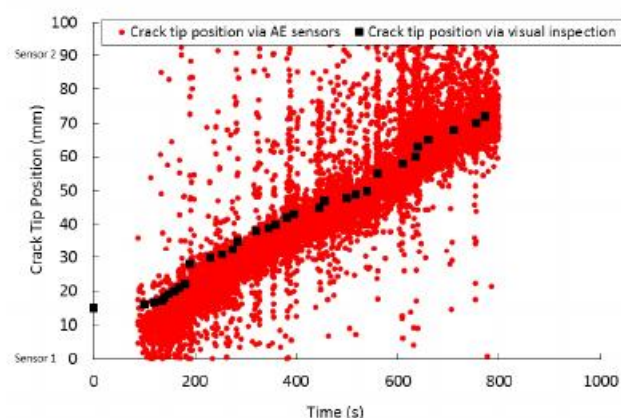


(ب)

شکل ۱۱: الف) طیف فرکانسی سیگنال و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی خرابی‌های مربوط به اواسط ناحیه ۲

۳ بررسی رشد جدایش بین لایه‌ای با آکوستیک امیشن

پس از بررسی آغاز جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها، در این قسمت، به بررسی رفتار رشد و گسترش جدایش بین لایه‌ای پرداخته می‌شود. پیش‌بینی رشد ترک در سازه‌ها، همواره امری مهم به شمار می‌آید. در این بخش، به منظور تعیین موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در حین رشد آن، از روش آکوستیک امیشن استفاده می‌شود. بدین منظور، ابتدا باید سرعت امواج آکوستیک امیشن در نمونه‌ها تعیین شود. سرعت امواج آکوستیک امیشن در نمونه‌ها، با استفاده از آزمون استاندارد شکستن نوک مداد تعیین می‌شود. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد. همچنین برای بررسی وابستگی سرعت صوت به رشد جدایش بین لایه‌ای و خمش ایجاد شده در بازوهای نمونه، سرعت موج آکوستیک امیشن در حین آزمایش و در سه مقدار مختلف بازشدگی دهانه نمونه و طول جدایش بین لایه‌ای مختلف، اندازه‌گیری شد. جدول ۲ مقادیر سرعت امواج آکوستیک امیشن را در نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: پیش‌بینی موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در نمونه W با روش آکوستیک امیشن

مربوط به هر کدام از این مکانیزم‌های خرابی، تا حدودی متمایز از سایر خرابی‌ها است [9، 10]. در حین بارگذاری نمونه، تمرکز تنش در ناحیه جلو نوک ترک، منجر به ترک خوردگی ماتریس می‌شود ولی چون راستای این تنش بیشینه در امتداد ضخامت نمونه و عمود بر صفحه قرارگیری الیاف‌ها است، بنابراین منجر به شکست الیاف در جلو نوک ترک نمی‌شود. همچنین، ترک خوردگی ماتریس می‌تواند در اثر خمش بازوها و در ناحیه پشت نوک ترک (ناحیه بازوهای نمونه) اتفاق بیفتد. در حالی که شکست الیاف‌ها، پدیده‌ای است که به علت شکسته شدن الیاف‌های پل زده شده بین لایه بالایی و پایینی ترک در ناحیه کوچکی در پشت نوک ترک اتفاق می‌افتد. بنابراین، به دلیل پراکندگی محل وقوع ترک خوردگی ماتریس با فیلتر نمودن داده‌ها براساس مشخصه‌های آکوستیکی ترک خوردگی ماتریس پهنای باند نتایج تغییر چندانی نمی‌کند، در حالی که با فیلتر نمودن سیگنال‌ها براساس مشخصات آکوستیکی شکست الیاف، فقط سیگنال‌های ناحیه کوچک پشت نوک ترک باقی می‌ماند و می‌تواند موقعیت نوک جدایش بین لایه‌ای را دقیق‌تر پیش‌بینی نمود.

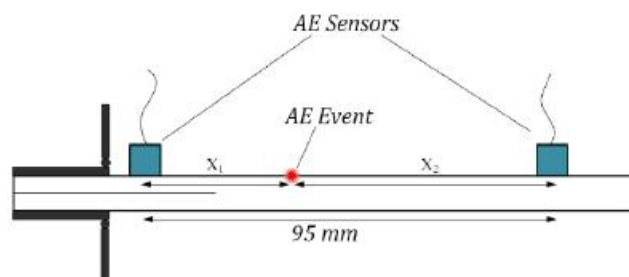
به منظور کاهش پراکندگی و پهنای باند نتایج آکوستیک امیشن در شکل ۱۴ و افزایش دقت پیش‌بینی موقعیت نوک ترک با روش آکوستیک امیشن، سیگنال‌هایی که مربوط به شکست الیاف نبوده و فرکانس آن‌ها خارج از بزرگ ۳۵۰ kHz تا ۴۵۰ kHz و دامنه آن‌ها خارج از بزرگ ۸۵ dB تا ۱۰۵ dB قرار دارد فیلتر می‌شوند. مطابق شکل ۱۵ الف با استفاده از این روش، پراکندگی و پهنای باند نتایج آکوستیک امیشن کاهش یافته و دقت پیش‌بینی موقعیت نوک ترک افزایش می‌یابد. به منظور بهبود مجدد نتایج، از سیگنال‌هایی که در یک زمان ثبت شده‌اند، میانگین گرفته شده (شکل ۱۵-ب) و در ادامه با حذف سیگنال‌هایی با پراکندگی بسیار زیاد نسبت به میانگین، منحنی پیش‌بینی رشد ترک مطابق شکل ۱۵-ج به دست می‌آید. همان‌طور که قبلاً بیان شد، به دلیل این‌که پدیده نکریت الیاف چه در اثر شکست الیاف‌های پل زده و چه در اثر شکست لایه واسط، در ناحیه پشت نوک جدایش بین لایه‌ای اتفاق می‌افتد، بنابراین حد بالای نتایج آکوستیک امیشن در شکل ۱۵-ج، بیانگر موقعیت لحظه‌ای نوک

جدول ۲: سرعت امواج آکوستیک امیشن در نمونه‌ها

نمونه	سرعت موج آکوستیک امیشن (m/s)		
	($\Delta a=40$ mm)	($\Delta a=20$ mm)	($\Delta a=0$ mm)
U	$4274 \pm 2\%$	$4373 \pm 2\%$	$4668 \pm 1\%$
W	$3089 \pm 0.18\%$	$3220 \pm 1\%$	$3380 \pm 0.15\%$

با بارگذاری نمونه‌ها و رشد جدایش بین لایه‌ای، سیگنال‌های آکوستیک امیشن در نمونه‌ها تولید می‌شوند. سیگنال‌های آکوستیک امیشن توسط دو سنسور ثبت می‌گردند. سنسور اول ۱۵ mm قبل از نوک جدایش بین لایه‌ای اولیه قرار داشته و سنسور دوم در فاصله ۸۰ mm بعد از نوک جدایش اولیه قرار گرفته است. با استفاده از این روش و فرآیندهای پردازش ثانویه سیگنال‌های آکوستیک امیشن، سیگنال‌های نویز که از ناحیه خارج از فضای بین دو سنسور، همچون محیط و اصطکاک بین اجزای دستگاه کشتش نشأت گرفته حذف می‌شوند. پس از انجام آزمایش‌ها، سیگنال‌هایی که زمان رشد آن‌ها از زمان استمرارشان بیشتر بوده و سیگنال‌هایی با انرژی صفر حذف می‌شوند. سپس، سیگنال‌هایی که توسط هر دو سنسور ثبت شده و در شرط معادله (۳) صدق کنند، مشخص می‌شوند. حال با معلوم بودن سرعت صوت لو نمونه (C) و اختلاف زمان رسیدن موج آکوستیک امیشن مربوط به هر خرابی به سنسورها (Δt)، موقعیت خرابی (x_2 و x_1) با استفاده از معادله (۳) مشخص می‌شود (شکل ۱۳).

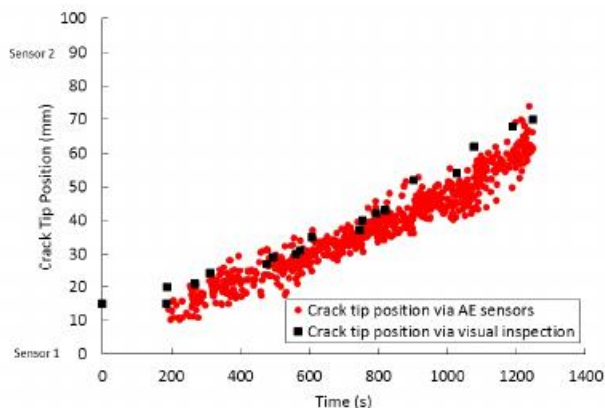
$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 95 \\ |x_2 - x_1| = C \cdot (t_2 - t_1) \end{cases} ; \Delta t < \frac{95}{C} \quad (3)$$



شکل ۱۳: شماتیکی از فرآیند مکان‌یابی آکوستیک امیشن

شکل ۱۴ موقعیت لحظه‌ای پیش‌بینی شده نوک جدایش بین لایه‌ای با روش مکان‌یابی آکوستیک امیشن و موقعیت نوک جدایش ثبت شده به روش چشمی را لو نمونه W نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، نتایج به دست آمده با روش آکوستیک امیشن، روند کلی رشد ترک را درست نشان داده، اما پراکندگی و پهنای باند نتایج آکوستیک امیشن زیاد است. به منظور کاهش پهنای باند نتایج آکوستیک امیشن و تخمین دقیق‌تر موقعیت نوک ترک، روشی به صورت زیر توسعه می‌یابد. همان‌گونه که بیان شد، براساس تحقیقات پیشین [1، 5، 21-22] در حین رشد جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها، انواع مکانیزم‌های خرابی از قبیل؛ شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس اتفاق می‌افتند. محدوده فرکانس، دامنه و انرژی سیگنال‌های

جدایش بین لایه‌ای است.



شکل ۱۶: منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای پیش‌بینی شده با روش آکوستیک امیشن برای نمونه تک‌جهته تحت نرخ بارگذاری ۱mm/min

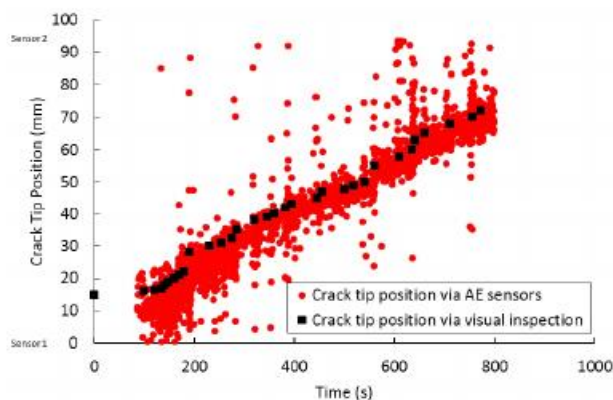
جدول ۳ مقادیر میانگین و بیشینه اختلاف پیش‌بینی موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش را برای روش آکوستیک امیشن و روش چشمی نشان می‌دهد.

جدول ۳: میانگین و بیشینه اختلاف موقعیت لحظه‌ای نوک ترک براساس نتایج آکوستیک امیشن و روش چشمی

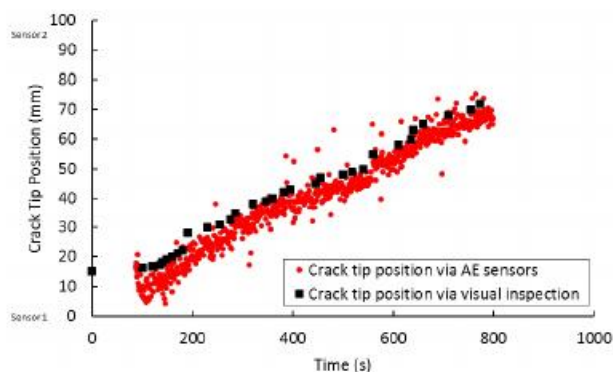
نمونه	میانگین اختلاف (%)	بیشینه اختلاف (%)
U	3/5%	8%
W	4/4%	10%

۴- نتیجه‌گیری

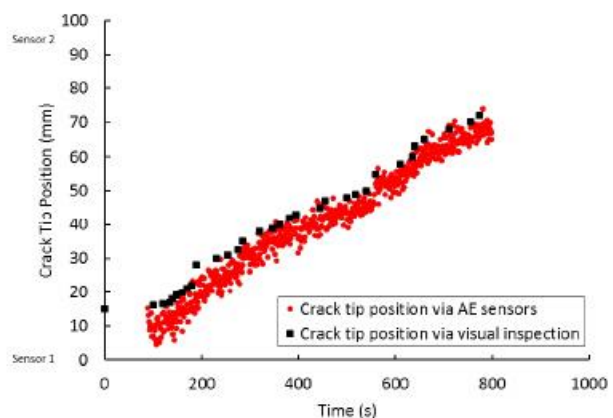
جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است. در پژوهش حاضر، ایجاد و گسترش جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای شیشه/اپوکسی با الیاف تک‌جهته و بافته شده، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی، با روش آکوستیک امیشن بررسی شد. رفتار خرابی بین لایه‌ای در دو بخش بررسی شد. در بخش نخست، تمرکز اصلی بر مرحله آغاز خرابی در نمونه‌ها بود و با روش آکوستیک امیشن مراحل ایجاد خرابی در نمونه‌ها مشخص شد. مشخص شد که اولین مکانیزم خرابی که فعال می‌شود ترک خوردگی ماتریس بوده، پس از آن جدایش الیاف از ماتریس اتفاق افتاده و در نهایت شکست الیاف رخ می‌دهد. به دلیل پدیده پل زنی الیاف در نمونه‌های تک‌جهته، مقاومت این نمونه‌ها در برابر رشد جدایش بین لایه‌ای، بیشتر از نمونه‌های با الیاف بافته شده بود که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و رفتار تابع ستبری نمونه‌ها نیز این امر را تأیید نمود. در بخش دوم، رشد و گسترش جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها بررسی شد. در این بخش، به منظور تعیین موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در حین رشد با روش آکوستیک امیشن، ابتدا سرعت امواج آکوستیک امیشن در نمونه‌ها تعیین شد. سپس با توجه به چیدمان سنسورها و با استفاده از روابط ریاضی موجود، موقعیت لحظه‌ای نوک جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها تعیین شد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵: منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای پیش‌بینی شده با روش آکوستیک امیشن برای نمونه W

به منظور بررسی درستی عملکرد روش پیشنهادی برای سایر حالات، نمونه‌ای با الیاف تک‌جهته، تحت بارگذاری با نرخ 1 mm/min قرار گرفت. شکل ۱۶ منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای پیش‌بینی شده با روش آکوستیک امیشن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، آکوستیک امیشن عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای داشته است.

Structural Integrity Program, Tehran, Iran (In Persian).

- [5] Nazmdar Shahri M., Yousefi J., Hajikhani M., Ahmadi Najafabadi M., 2010. "Determination of delamination in composite materials under mode I loading using acoustic emission", 11th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, Tabriz, Iran (In Persian).
- [6] 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, No. 4, pp. 439-449.
- [7] Refahi Oskouei A., Ahmadi M., 2010. "Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites". *Journal of Composite Materials*, 44, No. 7, pp. 793-807.
- [8] Silversides I., Maslouhi A., LaPlante G., 2013. "Interlaminar fracture characterization in composite materials by using acoustic emission". 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore.
- [9] Fotouhi M., Heidary H., Ahmadi M., Pashmforoush F., 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, No. 15, pp. 1795-1808.
- [10] 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, Issue 7, pp. 1380-1390.
- [11] Romhany G., Szebényi G., 2012. "Interlaminar fatigue crack growth behavior of MWCNT/carbon fiber reinforced hybrid composites monitored via newly developed acoustic emission method", *Express Polymer Letters*, 6, No. 7, pp. 572-580.
- [12] ASTM D5528-01, 2003. "Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [13] Sih G. C., 1991. "Mechanics of Fracture Initiation and Propagation", Springer.
- [14] Cesari F., Dal Re V., Minak G., Zucchelli A., 2007. "Damage and residual strength of laminated carbon-epoxy composite circular plates loaded at the centre", *Composites: Part A*, 38, pp. 1163-1173.
- [15] Anderson T.L., 2005. "Fracture Mechanics; fundamentals and applications", 4th Edition, Taylor & Francis, pp. 270-290.

به منظور بهبود نتایج پیش‌بینی شده، فرآیندی برای فیلتر نمودن داده‌های آکوستیک امیشن ارائه شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش آکوستیک امیشن در بررسی رفتار آغاز و گسترش خرابی بین لایه‌ای و پیش‌بینی منحنی رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی است.

۵- فهرست علائم و نشانه‌ها

C	سرعت صوت در نمونه
C_i	سرعت موج الاستیک
E_i	مدول الاستیک
$E_{me}(x)$	انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده، N.mm
$E_{AE}(x)$	انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن، aJ
$f(x)$	تابع سنتری
f_i	فرکانس
علائم یونانی	
Ω_{AE}	دامنه آکوستیک امیشن
Δa	مقدار رشد ترک
Δt	اختلاف زمان رسیدن موج آکوستیک امیشن مربوط به هر خرابی به سنسورها
τ_i	زمان رهانش
ρ_i	چگالی

۶- مراجع

- [1] Fotouhi M., Heidari H., Pashmforoush F., Ahmadi M., 2012. "Composite materials damage characterization under quasi-static 3-point bending test using fuzzy c-means clustering". *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, pp. 1221-1228.
- [2] Hajikhani M., Soltannia B., Refahi Oskouei A., Ahmadi Najafabadi M., 2009. "Monitoring of delamination in laminated composites using acoustic emission", 4th Conference of Condition Monitoring & Fault Detection, Tehran, Iran (In Persian).
- [3] Amenabar I., Mendikute A., López-Arraiza A., Lizaranzu M., Aurrekoetxea J., 2011. "Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades", *Composites Part B: Engineering*, 42, No. 5, pp. 1298-1305.
- [4] Yousefi J., Ahmadi Najafabadi M., Nazmdar M., Hajikhani M., 2011. "Investigation of damage mechanisms in glass/epoxy composites using acoustic emission method", 1st Conference of Iranian Aircraft

- composites", *Composites Science and Technology*, 55, pp. 405-412.
- [20] Arumugam V., Suresh Kumar C., Santulli C., Sarasini F., Stanley A. J., 2011. "A Global Method for the Identification of Failure Modes in Fiberglass Using Acoustic Emission" *Journal of Testing and Evaluation*, 39, Issue 5, pp. 1-13.
- [21] Talreja R., Singh C.V., 2012. "*Damage and Failure of Composite Materials*", Cambridge University Press, pp. 248-255.
- [22] Talreja R., 1990. "*Internal variable damage mechanics of composite materials*". In "*Yielding, Damage, and Failure of Anisotropic Solids*", editor: Boehler J.P., London: Mechanical Engineering Publications, pp. 509-533.
- [16] McCrory J. P., Al-Jumaili S. K., Crivelli D., Pearson M. R., Eaton M. J., Featherston C. A., Guagliano M., Holford K. M., Pullin R., 2015. "Damage Classification in Carbon Fibre Composites Using Acoustic Emission: A Comparison of Three Techniques", *Composites: Part B*, 68, pp. 424-430.
- [17] Ziehl P.H., 2000. "*Development of a damage based design criterion for fiber reinforced vessels*", Ph.D Thesis, The University of Texas at Austin.
- [18] Bohse J., 2000. "Acoustic Emission Characteristics of Micro-failure Processes in Polymer Blends and Composites", *Composites Science and Technology*, 60, Issue 8, pp. 1213-1226.
- [19] Groot P.J., Wijnen A. M., Janssen R. B. F., 1995. "Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy