



## ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه سوراخ‌دار تحت بارگذاری کششی با استفاده از انتشار صوت

احمد قاسمی قلعه بهمن<sup>1\*</sup>، حسن سیار<sup>2</sup>، محمد آزادی<sup>3</sup>، سید محمد جعفری<sup>4</sup>

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان  
 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان  
 3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان  
 4- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
 \* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، ghasemi@semnan.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/5/23

پذیرش: 96/8/7

### کلیدواژگان:

کامپوزیت

انتشار صوت

خوشه‌بندی فازی

تبدیل موجک بسته‌ای

میکروسکوپ الکترونی روبشی

استفاده از کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی در اکثر سازه‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن قابل توجه، روشی متداول است. در این رابطه بررسی و دسته بندی انواع خرابی‌ها در سازه‌های کامپوزیتی برای جلوگیری از هرگونه اتفاقات احتمالی و افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها، امری ضروری است. در یک دسته بندی کلی، خرابی‌های سازه‌های کامپوزیتی را می‌توان به چهار نوع تقسیم نمود: ترک ماتریسی، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش لایه‌ای. یکی از روش‌های جدید تشخیص عیوب در کامپوزیت‌ها، استفاده از روش انتشار صوت است. بر این اساس، هدف از این مقاله بررسی و دسته بندی انواع مختلف ساز و کارهای خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه سوراخ‌دار، تحت بار کششی با استفاده از روش انتشار صوت است. نخست یک قطعه کامپوزیتی سوراخ‌دار بر اساس استاندارد ASME تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. موج‌های الاستیک انتشار یافته حاصل از شکست قطعه توسط دو حسگر انتشار صوت از نوع نوار پهن ثبت شدند. برای تشخیص مقدار درصد خرابی از دو روش تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی استفاده شد. نتایج این دو روش با تحلیل تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که حدود 50% خرابی‌ها مربوط به جدایش الیاف از ماتریس بوده، حدود 30% از ترک ماتریسی ناشی شده و حدود 20% در ارتباط با شکست الیاف می‌باشد. همچنین بیشترین اختلاف در این دو روش در تشخیص خرابی‌ها 7% می‌باشد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دهنده بازدهی مطلوب روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابی‌ها و مقدار درصد هر یک از آن‌ها در کامپوزیت‌های چندلایه است.

(DOI): 10.22068/jstc.2018.30114

## Failure mechanisms in open-hole laminated composites under tensile loading using acoustic emission

Ahmad Ghasemi-Ghalebahman<sup>1\*</sup>, Hassan Sayyar<sup>1</sup>, Mohammad Azadi<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Jafari<sup>2</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, A.C., Tehran, Iran.

\* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

### Keywords

Composite  
 Acoustic emission  
 Fuzzy clustering  
 Pocket wavelet transform  
 Scanning electron microscopy

### Abstract

Carbon/epoxy composites have been used frequently in several structures due to their incredible ratio of strengths to weights. In this regard, investigation and classification of damages in composite structures are essential to prevent any probable happenings and to enhance the reliability. Such failures can be generally categorized into 4 groups, including matrix cracking, fiber breakage, debonding of fibers from the matrix, and the delamination. One of the new methods for detection of defects in composites is to utilize the acoustic emission approach. Accordingly, the aim of this article is to investigate and classify the different types of failure mechanisms in open-hole laminate composite specimens under tensile loading using acoustic emission. First, an open-hole specimen was examined under tensile loading based on ASME standards. Then, elastic waves due to failures in the specimen were recorded by wide-band acoustic emission sensors. Two methods have been utilized to detect the failure percent, including Pocket wavelet transform and Fuzzy clustering approaches. Results from these methods were compared to micro-structure images by the scanning electron microscopy. Results showed that about 50% of damages corresponds to debonding, about 30% comes from matrix cracking, and 20% is relevant to fiber breakage. In addition, the difference between two considered methods was 7%. Obtained results in this research indicated the appropriate efficiency of the acoustic emission approach to detect the type of failures and their percent in laminate composites.

الکتریکی و حرارتی بالا، وزن کم، مقاومت بالا و سایر ویژگی‌ها بطور گسترده‌ای در خودروسازی، پل‌سازی، هوافضا و صنایع دیگر به کار می‌روند. کامپوزیت‌ها یا مواد مرکب همانطوری که از نامشان پیداست ترکیبی از دو یا چند ماده مختلف هستند. این مواد معمولاً از دو قسمت تشکیل شده‌اند یک

### 1- مقدمه

برای صنایع مهندسی، مطالبه موادی که کارایی بالایی داشته باشند، امری مهم تلقی می‌شود. از جمله این مواد، کامپوزیت‌ها هستند که امروزه به دلیل خواصی چون مقاومت در برابر خوردگی و سایش، ظاهری زیبا، عایق

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Ghasemi-Ghalebahman, A. Sayyar, H. Azadi, M. and Jafari, S. M., "Failure mechanisms in open-hole laminated composites under tensile loading using acoustic emission", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 143-152, 2018.

شیشه/اپوکسی با جدایش بین لایه‌های اولیه تحت بارگذاری خمش سه نقطه را با ترکیب روش‌های کا-مینز و ژنتیک دسته‌بندی نموده و هر دسته را به یک ساز و کار خرابی اختصاص دادند. پس از آن سیگنال‌های انتشار صوت را با روش تبدیل موجک نیز تحلیل کردند و دو روش یاد شده را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها مشخص کردند که شکست الیاف دارای بیشترین فرکانس و شکست ماتریس دارای کمترین فرکانس است. حد وسط این دو فرکانس را نیز به جدایش الیاف از ماتریس اختصاص دادند.

سایدان<sup>۷</sup> و همکاران [9]، تست کشش را روی نمونه‌های هیبریدی الیاف شیشه و الیاف کتان به همراه انتشار صوت انجام دادند. آن‌ها در ابتدا تعداد کلاس بهینه برای کلاس‌بندی را بر اساس کمترین نرخ روی هم افتادن به دست آوردند. سپس دامنه هر یک از خرابی‌ها را برای هرکلاس مشخص کردند. برای تعیین درصد هر یک از ساز و کارهای خرابی، نمودار تعداد ضربه مربوط به انتشار صوت را با نمودار تنش-کرنش مقایسه کردند. بورچاک<sup>۸</sup> و همکاران [10]، تغییر زاویه الیاف‌ها در کامپوزیت‌های با الیاف کربن را در مشخص شدن شروع ترک و تعیین استحکام کششی نهایی مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه کار آن‌ها به این صورت بود که در لایه‌چینی  $45 \pm$  شروع ترک در  $50\%$  استحکام کششی نهایی است و در لایه‌چینی‌های  $30^\circ / -60^\circ$ ،  $60^\circ / -30^\circ$  و  $90^\circ / 0^\circ$  در حدود یک سوم استحکام کششی نهایی است و یک رابطه غیرخطی بین زاویه فیبر، استحکام کششی و شروع ترک ماتریس وجود دارد.

لافان<sup>۹</sup> و همکاران [11]، اندازه گیری چقرمگی شکست را در یک نمونه دارای ترک لبه‌ای 45 درجه تحت خمش چهار نقطه قرار دادند و به کمک دید میکروسکوپی مسیر رشد ترک را مورد بررسی کردند. آن‌ها هم با دید میکروسکوپی و هم با روابط مربوطه مشخص کردند که ترک در 45 درجه رشد می‌کند و اینکه در ابتدای کار فیبرها ترک برمی‌دارند و مقدار چقرمگی شکست را با دید میکروسکوپی و با روش انتشار صوت با انحراف معیار 0.8 در 12 نمونه مشخص کردند. یوهوویچ<sup>۱۰</sup> و همکاران [12]، ساز و کارهای شکست کامپوزیت گلس/اپوکسی با پوشش‌دار کردن آن با اکسید آلومینوم در دو زمان 2 و 6 ثانیه را تحت بارگذاری کششی و انتشار صوت مورد بررسی قرار دادند و نمونه‌های بدون پوشش را با نمونه‌های پوشش‌دار مقایسه کردند. در نتایج، آن‌ها با استفاده از سیگنال‌های انتشار صوت سه مکانیزم شکست در نمونه‌های بدون پوشش و چهار مکانیزم شکست در نمونه‌های پوشش‌دار تشخیص دادند که شامل ترک ماتریسی، شکست الیاف، جداشدگی الیاف از ماتریس و شکست در بستر پوشش بود. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش مدت زمان پوشش‌دار کردن نمونه از 2 به 6 ثانیه باعث کوتاه شدن طول ترک در بستر پوشش می‌شود.

با بررسی تحقیقات پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که مقالات ارائه شده در استفاده از روش انتشار صوت در زمینه خرابی‌های کامپوزیت‌ها، همچنان جای بحث و تحقیق دارد. همچنین، به عنوان نوآوری‌های این مقاله، می‌توان به مقایسه روش‌های تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی که به ندرت در این زمینه مطالعه شده، استفاده از الیاف کربن (نسبت به الیاف شیشه) و لایه‌چینی متفاوت نسبت به سایر مقالات اشاره کرد. لذا در این مقاله به مطالعه ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای با انتشار صوت

قسمت تقویت کننده که آن را الیاف<sup>۱</sup> می‌نامند و دیگری قسمت پایه که الیاف‌ها در آن قرار می‌گیرند و آن را ماتریس<sup>۲</sup> می‌نامند. ساز و کارهای کلی خرابی در کامپوزیت‌ها به چهار دسته ترک ماتریسی، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای تقسیم می‌شود [1].

یکی از روش‌های تشخیص ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌ها روش انتشار صوت است که تاریخچه استفاده از آن به قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. نخستین استفاده از انتشار صوت برای تعیین خرابی کامپوزیت‌ها توسط ساچ<sup>۳</sup> و همکارانش در سال 1987 انجام شد [2]. بعد از آن استفاده از این روش به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

لیو<sup>۴</sup> و همکاران [3]، تأثیرات لایه چینی متفاوت و اندازه سوراخ روی نتیجه انتشار صوت را برای ارتباط بین خصوصیات شکست و سیگنال‌های انتشار صوت مثل انرژی، شمارش و دامنه مطالعه کردند. آن‌ها همچنین خواص میکروسکوپی نمونه‌های متفاوت کامپوزیت بعد از شکست را مشاهده و با میکروسکوپ الکترونی تحلیل کردند در پژوهشی دیگر میشالکووا و کادلک<sup>۵</sup> [4]، رشد ترک روی نمونه های DCB با استفاده از روش‌های چشمی و انتشار صوت در یک محفظه دمایی را شرح داده و رابطه بین انرژی تجمعی انتشار صوت و رشد ترک در یک پارچه ساده بافت کربن تحت نرخ بارگذاری با جابجایی ثابت در دمای 80 و 50- درجه سانتیگراد را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که منحنی‌های رشد ترک با انتشار صوت خطای میانگین 3.49% داشته‌اند.

سعیدفر و همکاران [5]، حالت نوک ترک را در حین افزایش در مود اول جدایش لایه‌ها در نمونه کامپوزیتی گلس/اپوکسی بررسی کردند. آن‌ها برای بررسی محل ترک از روش‌های: دید چشمی، انتشار صوت و مدل ناحیه چسبان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش انتشار صوت و روش اصلاح شده مدل ناحیه چسبان عملکرد خوبی برای شناسایی مرحله شروع و همچنین طول ترک در سازه‌های کامپوزیتی دارند. وو و چوی<sup>۶</sup> [6]، به شکست در نوع ترک لبه‌ای در لایه چینی‌های مختلف در دو جنس مختلف کامپوزیت پرداختند. آن‌ها نمونه‌ها را از دو طرف تحت کشش قرار دادند و فرکانس غالب سیگنال‌های حاصله از روش انتشار صوت در لایه‌چینی‌های مختلف کامپوزیت را به روش تبدیل فوری به‌دست آوردند و با مشاهدات میکروسکوپی دریافتند که در لایه‌چینی 90 درجه، ترک موازی با شکاف اولیه رشد می‌کند و مسیر ترک اصلی در نمونه های دیگر وابسته به جهت‌گیری الیاف است و اینکه مسیر رشد ترک وابستگی بیشتری به جهت‌گیری الیاف به نسبت جهت ترک اولیه دارد و اینکه در آزمون آن‌ها با توجه به فرکانس‌های غالب شکست الیاف بیشترین سهم را دارا است.

فتوحی و همکاران [7]، ساز و کارهای خرابی را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خمش سه نقطه دسته‌بندی نمودند. اساس دسته‌بندی آن‌ها استفاده از روش فازی سی-مینز بود نتایج آن‌ها به این صورت بود که دسته با فرکانس میانگین 139.95 kHz مربوط به شکست ماتریس، دسته با فرکانس میانگین 265.51 kHz مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و دسته با فرکانس میانگین 412.20 kHz مربوط به شکست الیاف است. پشم‌فروش و همکاران [8]، سیگنال‌های انتشار صوت نمونه‌های

<sup>1</sup> Fiber

<sup>2</sup> Matrix

<sup>3</sup> Sachse

<sup>4</sup> Liu

<sup>5</sup> Michalčová and Kadlec

<sup>6</sup> Woo and Choi

<sup>7</sup> Saidane

<sup>8</sup> Bourchak

<sup>9</sup> Laffan

<sup>10</sup> Njuhovic

## 2-2- مواد

همه نمونه‌های استاندارد آزمون کشش از الیاف کربن تک‌جهته تولیدی شرکت سیکا با نام Sika Wrap-230 C با وزن مخصوص 230 گرم بر سانتیمتر مربع و رزین اپوکسی تولیدی شرکت سیکا با نام CR-80 ساخته شده است. ضخامت هر لایه از پارچه‌های تک‌جهته برابر 0.13 میلیمتر می‌باشد که پس از ساخت نمونه‌ها و ترکیب با رزین ضخامت هر لایه برابر حدوداً 0.22 میلیمتر است. صفحات کامپوزیتی تولید شده پس از 24 ساعت از قالب خارج شده و به مدت یک هفته در هوای آزاد قرار گرفت. چیدمان لایه‌ها بصورت متقارن و با لایه‌چینی  $[0_2/90_3/0_2]_s$  می‌باشد. سوراخی به قطر 6 میلیمتر در مرکز نمونه‌ها ایجاد شده است. ابعاد نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D5766 در شکل 2 آمده است [15].

## 2-3- آزمون‌ها

برای بارگذاری کششی نمونه‌ها از دستگاه کشش مدل STM-150 با ظرفیت 15 ton با قابلیت تنظیم بارگذاری در محدوده 0.1-500 mm/min استفاده شد. قطعات اعم از قطعات اصلی، نمونه‌های الیاف خالص و رزین خالص با سرعت بارگذاری ثابت 2 mm/min مطابق با استاندارد ASTM D5766 تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند. به منظور اطمینان از ساز و کارهای خرابی در قطعات، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>8</sup> متعلق به دانشگاه سمنان استفاده شد. با توجه به این که اساس کار این دستگاه پرتاب الکترون به سطح رسانا است لذا قطعات کامپوزیتی که از جنس پلیمر می‌باشند پوشش‌دهی شده و پس از قرار دادن در محفظه میکروسکوپ فشار خلاً به آن‌ها اعمال شده و تصویر برداری صورت گرفته است.

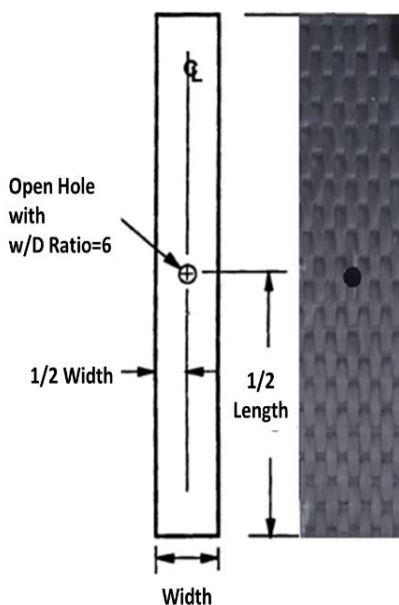


Fig. 2 The specimens dimensions with ASTM D5766 standard [15].  
شکل 2 ابعاد نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM D5766 [15].

## 2-4- تجهیزات انتشار صوت

برای ثبت داده‌های انتشار صوت، از دو حسگر نوار پهن<sup>9</sup> با محدوده فرکانس کاری 100-1000 kHz استفاده شد. نرخ داده‌برداری 1 میلیون داده در ثانیه

و مقایسه مقدار خرابی‌ها با دو روش ذکر شده و مشاهده میکروسکوپی آن‌ها پرداخته شده است.

## 2- روش تحقیق

### 1-2- انتشار صوت

انتشار صوت<sup>1</sup> پدیده‌ای است که به تولید امواج الاستیکی گذرا در طی مدت زمان آزاد شدن انرژی از یک منبع موجود در محدوده فرصوتی (20 MHz - 1 kHz) در ماده اشاره می‌کند [13]. متغیرهای متداول سیگنال‌های انتشار صوت که در شکل 1 نشان داده شده است عبارتند از:

1- ضرب آهنگ<sup>2</sup>: هر گاه سیگنال از حد آستانه تعریف شده فراتر رود، یک ضربه ثبت می‌شود.

2- شمارش<sup>3</sup>: تعداد دفعاتی که در طول یک مدت زمان، سیگنال از حد آستانه بیشتر می‌شود. یادآور می‌شود شاخص شمارش کاملاً به حد آستانه مشخص شده و فرکانس کاری<sup>4</sup> بستگی دارد.

3- دامنه<sup>5</sup>: بیشترین مقدار ولتاژ سیگنال، دامنه نامیده می‌شود. در اندازه‌گیری‌های انتشار صوت، دامنه‌ها بر حسب دسی‌بل بیان می‌شوند. دامنه، وابستگی دقیقی به شدت دامنه منبع اتفاق دارد.

4- مدت زمان<sup>6</sup>: فاصله زمانی بین نخستین و آخرین ضربه سیگنال انتشار صوت است. مدت زمان به منبع و محدوده‌های فیلتر کردن نویزها بستگی دارد.

5- زمان صعود<sup>7</sup>: فاصله زمانی بین زمان نخستین ضربه و زمان بزرگترین مقدار سیگنال را مشخص می‌کند. زمان صعود ارتباط دقیقی با تابع زمانی منبع و نوع شکست یا روش حذف نویزها دارد.

6- انرژی: در سامانه‌های انتشار صوت تعریف انرژی بر اساس مساحت زیر نمودار تعریف می‌شود. این پارامتر به دامنه و زمان استمرار سیگنال بستگی دارد [14].

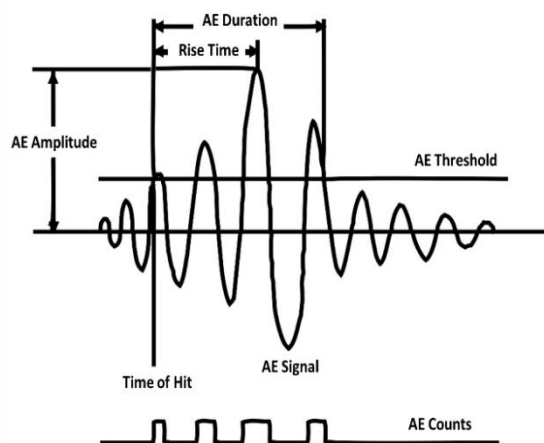


Fig. 1 The acoustic emission signal and parameters [14].

شکل 1 سیگنال انتشار صوت و مشخصه‌های مربوط به آن [14].

<sup>1</sup> Acoustic emission

<sup>2</sup> Count

<sup>3</sup> Hit

<sup>4</sup> Operating frequency

<sup>5</sup> Amplitude

<sup>6</sup> Duration

<sup>7</sup> Rise time

<sup>8</sup> Scanning electron microscopy (SEM)

<sup>9</sup> Wide band (WSA)

رابطه (3) تبدیل موجک گسسته<sup>5</sup> و رابطه (4) معکوس آن را نشان می‌دهد [17].

$$f(t) = c \sum_i \sum_k DWT(i, k) 2^{-i} \psi(2^{-i}t - k) \quad (3)$$

$$DWT(i, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^i \psi^*(2^i t - k) dt \quad (4)$$

که  $f(t)$  سیگنال پردازش شده،  $DWT(i, k)$  ضرایب تبدیل موجک،  $i$  سطح تجزیه،  $k$  پرامتر انتقال و  $\psi$  موجک مادر است.

در این پژوهش به این دلیل از تبدیل موجک بسته‌ای<sup>6</sup> استفاده می‌شود که تبدیل موجک گسسته فقط در سطح اول سیگنال را به دو جزء کلیات و جزئیات تقسیم می‌کند و در سطوح بعدی فقط کلیات تجزیه می‌شوند در حالی که در تبدیل موجک بسته‌ای همه اجزا در همه سطوح به بخش‌های فرکانس پایین که مربوط به کلیات و فرکانس بالا که مربوط به جزئیات است تجزیه می‌شوند این تفاوت در شکل 4 که در پژوهش‌های پیشین نیز در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است نشان داده شده است [18].

همانطور که گفته شد در تبدیل موجک بسته‌ای در هر سطح علاوه تجزیه کلیات، جزئیات نیز به دو سطح کلیات و جزئیات تجزیه می‌شود. حوزه فرکانسی کلیات و جزئیات در هر سطح با روابط (5,6) محاسبه می‌شود [19]:

$$\left[0, \frac{1}{2} f_s 2^{-i}\right] \quad (5)$$

$$\left[\frac{1}{2} f_s 2^{-i}, \frac{1}{2} f_s 2^{-(i-1)}\right] \quad (6)$$

که  $f_s$  نرخ داده‌برداری و  $2^i$  تعداد مؤلفه‌ها در سطح  $i$  - ام است. اجزاء بسته موجک مورد نظر در سطح  $i$  - ام به صورت  $f_i^1, \dots, f_i^j$  تجزیه می‌گردند. انرژی اجزاء نیز به صورت  $E_i^1, \dots, E_i^j$  در سطح  $i$  - ام تعریف می‌گردند، که در معادله (7) به صورت ریاضی بیان شده است [20]:

$$E_i^j(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_i^j(\tau))^2 \quad j = 1, \dots, 2^i \quad (7)$$

و انرژی کل سیگنال از رابطه (8) قابل محاسبه است [20]:

$$E_{Total}(t) = \sum_i E_i^j(t) \quad j = 1, \dots, 2^i \quad (8)$$

نسبت انرژی‌های هر جزء به انرژی کل سیگنال، توزیع انرژی را در هر کدام از اجزاء تجزیه شده تعیین می‌کند. توزیع انرژی که با  $P_j^i(t)$  مشخص می‌شود، در رابطه (9) نشان داده شده است [20]:

$$P_j^i(t) = \frac{E_i^j(t)}{E_{Total}(t)} \quad j = 1, \dots, 2^i \quad (9)$$

بود که توسط کارت آنالوگ به دیجیتال PCI-2 انجام شد. کلیه تجهیزات و نرم افزار ثبت داده‌های انتشار صوت، ساخت شرکت PAC<sup>1</sup> است.

سیگنال‌ها با ضریب 40 dB توسط دو پیش تقویت کننده<sup>2</sup>، تقویت شدند و حدآستانه<sup>3</sup> مناسب با روش سعی و خطا، 37 dB تعیین گردید. برای مطمئن شدن از نحوه کارکرد صحیح حسگرهای انتشار صوت از آزمون مداد قبل از هر آزمون استفاده شد [16].

شکل 3، نمای کلی آزمون شامل تجهیزات بارگذاری کششی، تجهیزات انتشار صوت و کابل‌های رابط را نشان می‌دهد.

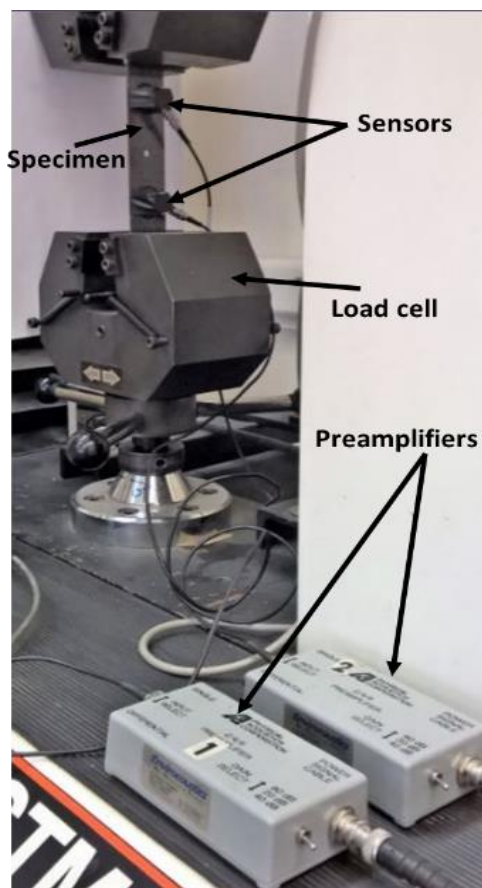


Fig. 3 The acoustic emission setup

شکل 3 نمای کلی تجهیزات انتشار صوت

## 2-5- تبدیل موجک

موجک<sup>4</sup>، موجی با مقدار میانگین صفر و با دوره تناوب محدود می‌باشد. تابع  $\psi$  با دو شرط: تابع انرژی محدود داشته باشد و انتگرال تابع در بازه  $(-\infty, \infty)$  مساوی صفر باشد، یک موجک یا موجک مادر نامیده می‌شود [17]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Physical Acoustic Cooperation (PAC)

<sup>2</sup> Preamplifier

<sup>3</sup> Threshold

<sup>4</sup> Wavelet

<sup>5</sup> Discrete Wavelet Transform (DWT)

<sup>6</sup> Wavelet Packet Transform (WPT)

تابع هدف استفاده شده در خوشه‌بندی فازی به صورت روابط (13,14) خواهد بود [23]:

$$J(u, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^{m'} (d_{ik})^2 \quad (13)$$

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[ \sum_{j=1}^m (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

که  $d_{ik}$  فاصله بین  $x_k$  از مرکز  $v_i$  است و  $u_{ik}$  مقدار عضویت  $k$ -امین داده در خوشه  $i$ -ام می‌باشد.  $m'$  مقدار وزنی است که مقدار فازی بودن خوشه‌بندی را تعیین می‌کند.  $v_i$  در رابطه (15) مرکز خوشه  $i$ -ام است.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^{m'} \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^{m'}} \quad (15)$$

هنگام خوشه‌بندی فازی، ابتدا برای داده‌ها تعداد خوشه‌ها تعیین می‌شود و سپس ماتریس تابع عضویت  $u$  با مقادیری بین صفر تا یک به صورت تصادفی انتخاب و برای هر کدام از داده‌ها این مقادیر اختصاص میابد. آنگاه مقادیر مرتبط با مراکز خوشه‌ها معین شده و دوباره این عملیات تا جایی که رابطه (16) برقرار باشد، ادامه میابد:

$$\|u^{r+1} - u^r\| \leq \varepsilon \quad (16)$$

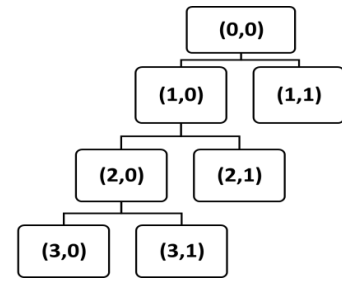
که  $r$  تعداد گام‌های تکرار و  $\varepsilon$  مقدار خطا است که نسبت به گام قبلی حساب می‌شود و باید از مقدار معین شده کمتر باشد تا فرآیند خوشه‌بندی متوقف و کامل گردد [24].

### 3- نتایج

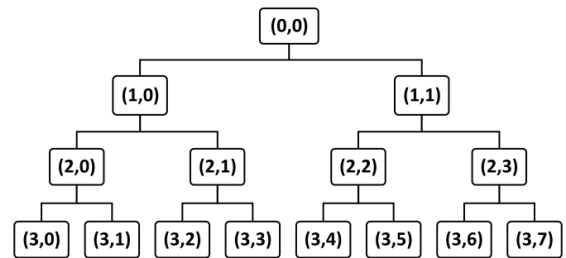
#### 3-1- تعیین فرکانس خرابی‌های الیاف خالص و رزین خالص

زمانی که نمونه سوراخ‌دار تحت نیروی کششی قرار میگیرد، ساز و کارهای خرابی به سه دسته: ترک ماتریسی، شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس تقسیم می‌شوند [25]. برای به دست آوردن سیگنال‌های انتشار صوت مربوط به خرابی‌ها ابتدا تست‌های کشش رزین خالص و الیاف خالص با سرعت ثابت 2 mm/min انجام شد. برای نمونه رزین خالص نمونه‌ای از رزین ساخته شده و دو حسگر برای ثبت سیگنال‌های انتشار صوت به آن متصل شد. برای نمونه الیاف خالص نیز تب‌های آلومینیومی به سطحی از یک لایه الیاف کربن چسبانده شده و حسگرها به آن‌ها متصل شدند و هر دوی نمونه‌ها تحت کشش ثابت قرار گرفتند (شکل 5).

برای تکرار پذیری هر نمونه سه مرتبه تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. با استفاده از تبدیل فوری سریع<sup>2</sup> محدوده فرکانسی مربوط به رزین خالص و الیاف خالص که در شکل 6 قابل مشاهده است به دست آمد. محدوده فرکانسی رزین 100-250 kHz و محدوده فرکانسی الیاف کربن 420-500 kHz مشخص شد و تنها بازه باقیمانده در محدوده فرکانسی به جدایش الیاف از ماتریس یعنی 250-420 kHz اختصاص میابد که با تحقیقات پیشین مطابقت خوبی دارد [26,27].



(الف)



(ب)

Fig. 4 The a) discrete wavelet transform and b) wavelet packet transform

شکل 4 تبدیل موجک: (الف) گسسته و (ب) بسته‌ای

#### 2-6- روش خوشه‌بندی فازی

روش فازی به یک تکنیک خوشه‌بندی<sup>1</sup>، زمانیکه در آن هر داده متعلق به یک خوشه و با یک درجه است، اطلاق می‌شود. این روش یکی از روش‌های خوشه‌بندی پیشرفته به حساب می‌آید که توسط بزدک معرفی شده است [21]. مجموعه‌ای از داده‌ها شامل  $n$  داده به  $c$  خوشه مختلف می‌خواهند خوشه‌بندی شوند،  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  و هر داده  $x_i$  توسط  $m$  مشخصه تعریف شود یعنی:  $X_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$  که  $X_i$  در مجموعه  $X$  یک فضای  $m$  بعدی است) قرار دارد. با توجه به اینکه همه مشخصه‌های  $m$  دارای واحدهای متفاوت می‌باشند، باید هر مشخصه را قبل از خوشه‌بندی با یک مقیاس واحد نرمال سازی کنیم [22].

روش تابع هدف برای خوشه‌بندی  $n$  داده به  $c$  خوشه مختلف بکار گرفته می‌شود. هدف اصلی این تابع، رساندن فاصله بین داده‌ها در یک دسته خاص و نقطه‌ای به نام نقطه مرکزی آن دسته به کمترین مقدار و ایجاد بیشترین فاصله بین نقاط مرکزی هر دسته نسبت به دسته دیگر است. برای نقطه‌ای مثل  $x_k$  تابع مقدار عضویت در داده  $k$ -ام و خوشه  $i$ -ام به صورت رابطه (10) خواهد بود [23]:

$$u_{ik} = u_{Ai}(X_k) \in [0,1] \quad (10)$$

باید در نظر گرفت برای یک نقطه خاص در تمامی خوشه‌ها مجموع تمامی مقادیر عضویت برابر با یک خواهد بود و خوشه‌ای نمی‌تواند خالی از هر گونه داده و یا شامل همه داده‌ها باشد [23]:

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$0 < \sum_{k=1}^n u_{ik} < 1 \quad (12)$$

<sup>2</sup> Fast Fourier Transform (FFT)

<sup>1</sup> Fuzzy Clustering

**2-3- تحلیل سیگنالہای انتشار صوت بہ روش تبدیل موجک بستہای**

برای بہ دست آوردن مقدار خرابیہا در نمونہ سوراخدار سیگنالہای انتشار صوت ثبت شدہ حین آزمون کشش بہ روش تبدیل موجک بستہای تجزیہ و تحلیل شدند. برای این کار سیگنالہای بہ دست آمدہ در سہ سطح تجزیہ (شکل 7) و دامنہ فرکانسی ہر ہشت جزء بہ روش تبدیل فوربہ سریع بہ دست آمد (شکل 8). اجزای با رنگ قرمز مربوط بہ شکست الیاف، اجزای با رنگ سبز بہ ترک ماتریسی و اجزای با رنگ آبی بہ جدایش الیاف از ماتریس اختصاص یافتند سپس انرژی ہریک از اجزا محاسبہ شدہ و توزیع انرژی آنہا همانطور کہ در شکل 9 مشخص است بہ دست آمد.

**3-3- نتایج تحلیل بہ روش خوشہبندی فازی**

برای مشخص کردن خرابیہا در نمونہ سوراخدار بہ روش فازی از شش مشخصہ مربوط بہ انتشار صوت: زمان اوج، ضرب آہنگ، انرژی، دامنہ، فرکانس متوسط و حداکثر فرکانس استفادہ گردید. بہ منظور انتخاب مؤثرترین پارامترہا و کاهش ابعاد از روش آنالیز اجزای اصلی استفادہ شد در این روش ضمن کاهش بعد اطلاعات، بہترین دادہہای انتشار صوت را نیز در اختیار می گذارد.

در این روش ابتدا ہر سیگنال بدست آمدہ از روش انتشار صوت کہ دارای شش بعد است توسط روش آنالیز اجزای اصلی، آنالیز می شود. سپس کواریانس بین دادہہا محاسبہ و بعد بردارہای ویژه آن پیدا می شود، سبس واریانس ہر بردار محاسبہ و دو برداری کہ بیشترین مقدار واریانس را دارا باشند انتخاب می شوند تا اطلاعات را از فضای شش بعدی بہ فضای دو بعدی انتقال دہند. شکل 10 نتایج حاصل از آنالیز اجزای اصلی را نشان می دہد. همانگونہ کہ مشخص است دو بردار اول دارای بیشترین واریانس ہستند و می توانند حجم اطلاعات را کاهش دہند.

بعد از کاهش بعد توسط روش آنالیز اجزای اصلی، اطلاعات باید با روش فازی خوشہبندی شوند. در نمونہ سوراخدار ساز و کارہای خرابی بہ سہ دستہ اصلی (شکست الیاف، شکست ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس) تقسیم بندی می شوند، پس تعداد خوشہہا برابر با 3 در نظر گرفتہ می شود. شکل 11 عمل خوشہبندی مورد نظر را نشان می دہد کہ دادہہا در محورہای مربوط بہ بردارہای ویژه با بیشترین واریانس رسم شدہ اند. در روش فازی ابتدا بہترین مرکز ہر کلاس بر اساس مینیمم کردن تابع ہدف (فرمول (13)) مشخص شدہ، سپس دادہہایی کہ بہ ہر یک از مراکز خوشہہا نزدیک باشد بہ عنوان دادہ آن خوشہ تلقی می شود.

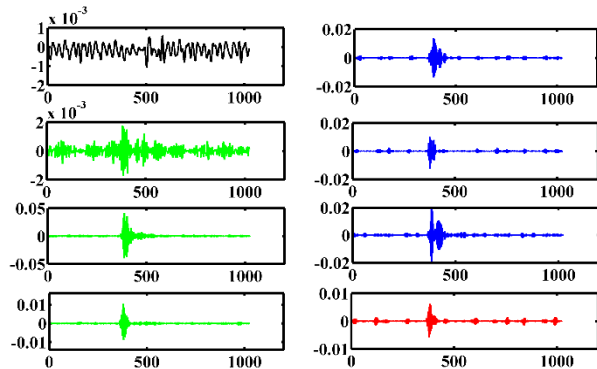


Fig. 7 The packet wavelet transform components [amplitude (mV) vs. sample point].

شکل 7 ہر ہشت جزء تجزیہ شدہ بہ روش تبدیل موجک بستہای [دامنہ (mV) در مقابل نقطہ دادہ].

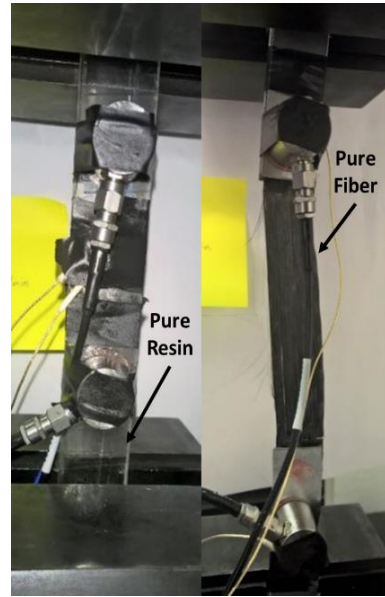
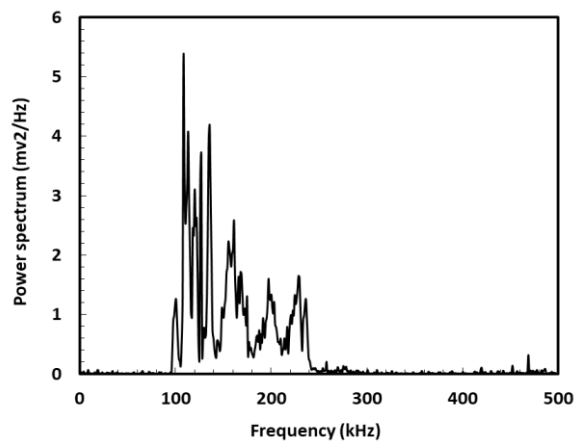
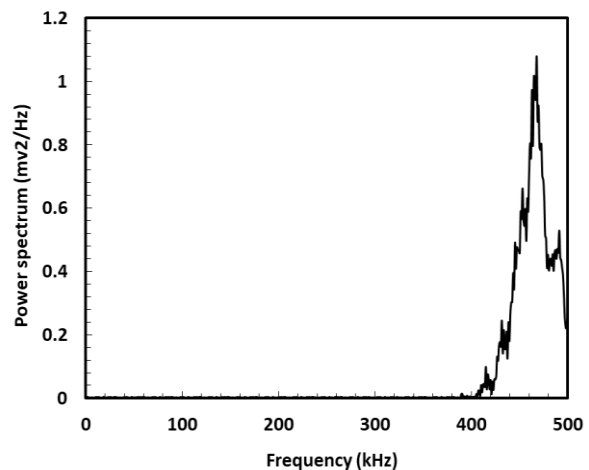


Fig. 5 The pure resin and pure fiber tensile test

شکل 5 آزمون کشش رزین خالص و الیاف خالص



(الف)



(ب)

Fig. 6 The dominant frequency range of AE signals for pure: a)matrix cracking and b)fiber breakage

شکل 6 محدودہ فرکانسی سیگنال انتشار صوت مربوط بہ: (الف) رزین خالص و (ب) الیاف خالص

هر یک از سه خوشه مشخص شده و دارای خصوصیات منحصر به خود می‌باشند، یکی از این خصوصیات توزیع فرکانسی مربوط به هر خوشه است. از آنجاییکه هر داده دارای یک مقدار فرکانسی مختص به خود است پس می‌توان نمودار توزیع فرکانسی هر خوشه را رسم کرد. مشخص شد که خوشه اول با رنگ سبز مربوط به شکست الیاف، خوشه دوم با رنگ قرمز مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و خوشه سوم با رنگ آبی مربوط به شکست ماتریس است. این نمودارها در شکل 12 نمایش داده شده‌اند.

درصد هر یک از ساز و کارهای خرابی مربوط به هر یک از روش‌ها در (جدول 1) آمده است. همانطور که مشخص است می‌توان گفت حدود 50% از ساز و کارهای خرابی به جدایش الیاف از ماتریس تعلق می‌گیرد که نشان می‌دهد، بیشترین نوع خرابی مربوط به این ساز و کار است و ترک ماتریسی و شکست الیاف در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند و همچنین می‌توان به اختلاف 3% مربوط تشخیص ترک ماتریسی در دو روش، اختلاف 4% مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و اختلاف 7% مربوط به شکست فیبر اشاره کرد که با تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد [25].

### 3-4- نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل 13 نتایج تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ را نشان می‌دهد. که می‌توان از این تصاویر فهمید، الیاف‌های در جهت 90 درجه شکسته و در جهت صفر درجه از ماتریس جدا شده‌اند و همچنین تطابق خوبی با تعیین ساز و کارهای خرابی به روش انتشار صوت دارد و نشان دهنده تشخیص خوب روش انتشار صوت در تشخیص ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه است.

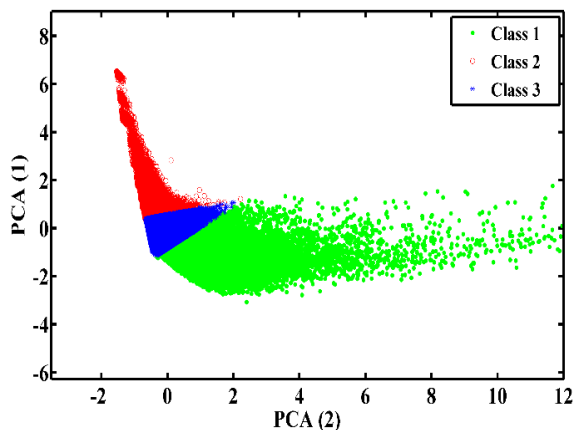


Fig. 11 The fuzzy C-Means clustering of AE signals

شکل 11 خوشه‌بندی فازی برای داده‌های تحلیل شده توسط آنالیز اجزای اصلی

جدول 1 درصد ساز و کارهای خرابی به دو روش تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی.

نوع روش تحلیل داده‌های تجربی		ساز و کار خرابی
خوشه‌بندی فازی	تبدیل موجک بسته‌ای	
28.17	31.05	ترک ماتریسی
49.35	53.76	جدایش الیاف از ماتریس
22.48	15.19	شکست الیاف

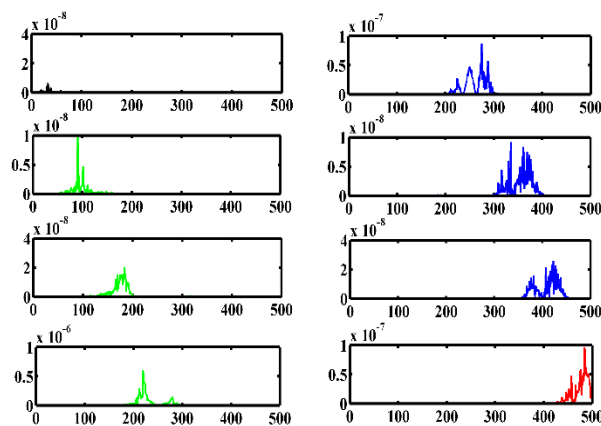


Fig. 8 Frequency distribution of the packet wavelet transform components [power spectrum (mv2/Hz) vs. frequency (kHz)].

شکل 8 توزیع فرکانسی مربوط به هر یک از اجزای تبدیل موجک بسته‌ای [آدمانه (mv2/Hz) در مقابل فرکانس (kHz)].

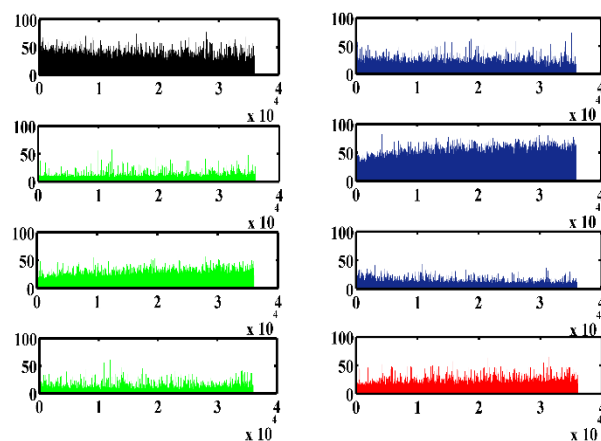


Fig. 9 Energy distribution of the packet wavelet transform components [energy (%) vs. waveform number].

شکل 9 توزیع انرژی مربوط به هر یک از اجزای تبدیل موجک بسته‌ای انرژی (% در مقابل تعداد سیگنال).

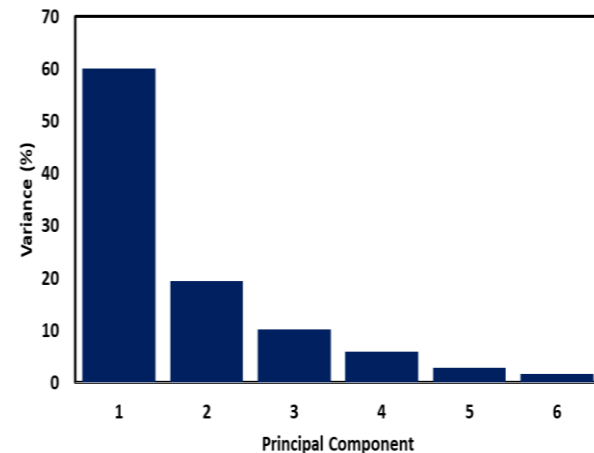


Fig. 10 The variance percentage of PCA eigen vectors

شکل 10 درصد واریانس بردارهای ویژه حاصل از آنالیز اجزای اصلی

نویسندگان این مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، برای حمایت مالی ایشان در زمینه اجرای آزمون‌ها و استفاده از تجهیزات انتشار صوت، قدردانی می‌نمایند.

#### 6- مراجع

- [1] Mohammadi, B. Asl Kamkar, S. and Farrokhhabadi, A., "Matrix Cracking and Induced Delamination in Symmetrically laminated Composites Subjected to Static Loading by Using Multi Scale Damage Mechanics" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp.9-24, 2017. (In Persian)
- [2] Grosse, C. U. and Masayasu. O., "Acoustic Emission Testing" Springer, pp. 9, 2008.
- [3] Liu, P. F. Chu, J. K. Liu, Y. L. and Zheng, J. Y., "A Study on the Failure Mechanisms of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Using Acoustic Emission" Materials & Design, Vol. 37, pp. 228-235, 2012
- [4] Michalcova, L. and Martin, K., "Crack Growth Monitoring of CFRP Composites Loaded in Different Environmental Conditions Using Acoustic Emission Method" Procedia Engineering, Vol. 114, pp. 86-93, 2015.
- [5] Saeedifar, M. Fotouhi, M. Ahmadi, M. and Hosseini Toudeshky, H., "Prediction of Delamination Growth in Laminated Composites Using Acoustic Emission and Cohesive Zone Modeling Techniques" Composite Structures, Vol. 124, pp. 120-127, 2015.
- [6] Woo, S. C. Choi, N. S., "Analysis of Fracture Process in Single-Edge-Notched Laminated Composites Based on the High Amplitude Acoustic Emission Events" Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 1451-1458, 2007.
- [7] Fotouhi, M. Heydari, H. Ahmadi, M. and 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, Vol. 46, pp. 1795-1808, 2012.
- [8] Pashmforoush, F. Fotouhi, M. and Ahmadi, M., "Damage Characterization of Glass/Epoxy Composite Under Three-Point Bending Test Using Acoustic Emission Technique" Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, No. 7, pp. 1380-1390, 2012.
- [9] Saidane, E. H. Scida, D. Assarar, M. and Ayad, R., "Damage Mechanisms Assessment of Hybrid Flax-Glass Fiber Composites Using Acoustic Emission" Composite Structures, Vol. 175, pp. 1-11, 2017.
- [10] Bouchak, M. Khan, A. Badr, S. A. Harasani, W., "Acoustic Emission Characterization of Matrix Damage Initiation in Woven CFRP Composites" Material Science and Applications, Vol. 4, pp. 509-515, 2013.
- [11] Laffan, M. J. Pinho, S. T. Robinson, P. Iannucci, L. McMillan, A. J., "Measurement of The Fracture Toughness Associated with the Longitudinal Fiber Compressive Failure Mode of Laminated Composites" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 43, pp. 1930-1938, 2012.
- [12] Njuhovic, E. Brau, M. Wolff-Fabris, F. Starzynski, K. Altstadt, V. "Identification of Failure Mechanisms of Metallized Glass Fiber Reinforced Composites Under Tensile Loading Using Acoustic Emission Analysis" Composites Part B: Applied Science and Manufacturing, Vol. 81, pp. 1-13, 2015.
- [13] Beattie, A. G., "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation" Journal of Acoustic Emission, Vol. 2, pp.95-128, 1983.
- [14] ISO 12716, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection - Vocabulary, 1998.
- [15] ASTM D5766/D5766M-11. Standard Test Method for Open-Hole Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [16] ASTM E976-10. Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [17] Rao, R. M. and Bopardikar, A. S., "Wavelet Transforms: Introduction to Theory and Applications" Addison Wesley Publishing Company, pp. 1-26, 1998
- [18] Walnut D. F., "An Introduction to Wavelet Analysis" Birkhauser Boston, pp. 350, 2002.

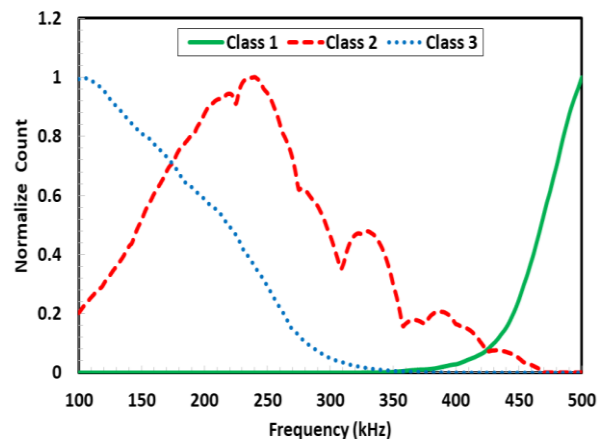


Fig. 12 The frequency distribution of the clustered AE signals.

شکل 12 توزیع فرکانسی مربوط به هر یک از خوشه‌ها

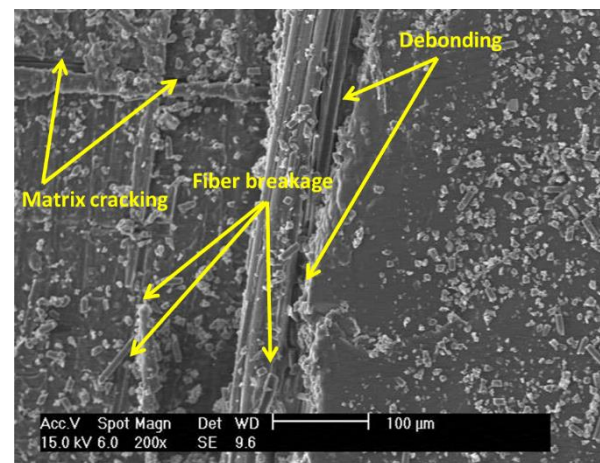


Fig. 13 The SEM picture

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به شناسایی ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه و درصد هر یک از آن‌ها با انتشار صوت پرداخته شد. محدوده فرکانسی رزین شد و تنها بازه باقیمانده در محدوده فرکانسی به جدایش الیاف از ماتریس یعنی 250-420 kHz اختصاص یافت. سیگنال‌های حاصل از انتشار صوت به دو روش تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی تحلیل شدند و درصد هر یک از این ساز و کارها مشخص شدند که بیشترین نوع خرابی مربوط به جدایش الیاف از ماتریس می‌شود. این دو روش با تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مقایسه گردیدند. نتایج نشان دادند که بیشترین اختلاف در استفاده از دو روش ذکر شده 7% است که بازدهی مناسب در دو روش تحلیل و تعیین ساز و کارهای خرابی و درصد هر یک از آن‌ها در کامپوزیت‌های چندلایه با انتشار صوت را نشان می‌دهد.

#### 5- تقدیر و تشکر



- [19] Saeedifar, M. Fotuohi, M. Mohammadi, R. Ahmadi, M. and Hajikhani, M., "Classification of Damage Mechanisms during Delamination Growth in Sandwich Composites by Acoustic Emission" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 144-152, 2014. (In Persian)
- [20] Fotuohi, M. Sadeghi, S. Jalalvand, M. and Ahmadi, M., "Analysis of the Damage Mechanisms in Mixed-Mode Delamination of Laminated Composites Using Acoustic Emission Data Clustering" *Journal of Thermoplastic Matrix Composite Materials*, Vol. 30, No. 3, pp. 318-340, 2017.
- [21] Bezdek, J. C., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms" Plenum Press, New York and London, 1939.
- [22] Omkar, S. N. Suresh, S. Raghavendra, T. R. Mani, V., "Acoustic Emission Signal Classification Using Fuzzy C-means Clustering" *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on neural Information Processing (ICONIP02)*, vol. 4, Singapore, IEEE, pp. 1827-31, 2002.
- [23] Oskouei, A. R. Heydari, H. Ahmadi, M. and Farajpur, M., "Unsupervised Acoustic Emission Data Clustering for the Analysis of Damage Mechanisms in Glass/Polyester Composites" *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 416-422, 2012.
- [24] Marec, A. Thomas, J. H. Guerjouma, R. E., "Damage Characterization Polymer-based Composite Materials: Multivariable Analysis and Wavelet Transform for Clustering Acoustic Emission Data" *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, No. 6, pp.1441-1464, 2008.
- [25] Mohammadi, R. Najfabadi, M. A. Saeedifar, M. Yousefi, J. Minak, G., "Correlation of Acoustic Emission with Finite Element Predicted Damages in Open-Hole Tensile Laminated Composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 108, pp. 144-152, 2017.
- [26] Fotouhi, M. Ahmadi, M., "Investigation of the Mixed-Mode Delamination in Polymer-Matrix Composites Using Acoustic Emission Technique" *Journal of Reinforce Plastic Composite*, Vol. 33, pp. 1767-82, 2014.
- [27] de Groot, P. J. Wijnen, P. A. M. Janssen, R. B. F., "Real-Time Frequency Determination of Acoustic Emission for Different Fracture Mechanisms in Carbon/Epoxy Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 55, pp. 405-412, 1995.

