مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 435-445

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر دامنه جابه‌جایی روی سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه سوراخ‌دار تحت بارگذاری خستگی کمچرخه با استفاده از انتشار صوت

محسن علی‌زاده[1]، محمد آزادی[2*]، امین فرخ‌آبادی[3]، سید محمد جعفری[4]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، سمنان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، پست الکترونیکی m_azadi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 شهریور 1396
پذیرش: 18 آبان 1396
ارائه در سایت: 24 آذر 1396

کلید واژگان:
کامپوزیت، انتشار صوت
خوشه‌بندی فازی
تبدیل موجک بسته‌ای
خستگی کمچرخه

چکیده

نسبت استحکام به وزن قابل توجه در کامپوزیت‌های کربن/ اپوکسی سبب شده در بیشتر سازه‌ها ویژه سازه‌های هوافضایی، استفاده از آن‌ها مورد توجه واقع شود. به علاوه برای افزایش قابلیت اطمینان در چنین سازه‌هایی، شناسایی خرابی‌های بالقوه و پایش مداوم آن‌ها لازم و مهم است. یکی از روش‌های جدید تشخیص عیوب در کامپوزیت‌ها پیش از شکست، روش انتشار صوت است. بر این اساس هدف از این مقاله بررسی و شناسایی انواع سازوکارهای خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه سوراخ‌دار با چیدمان $[0_3/90_2/0_2]_s$، تحت بارگذاری خستگی کمچرخه در دامنه‌های جابه‌جایی مختلف با استفاده از روش انتشار صوت است. روش تحقیق بدین شرح است که نخست یک قطعه کامپوزیتی سوراخ‌دار، تحت بارگذاری خستگی کمچرخه مطابق با استاندارد 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 نیز مقایسه گردیدند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان‌دهنده بازدهی مطلوب روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابی‌ها و مقدار درصد هریک از آن‌ها در کامپوزیت‌های چندلایه است.

Investigation of displacement amplitude effect on failure mechanisms in open-hole laminated composites under low-cycle fatigue loading using acoustic emission

Mohsen Alizadeh[1], Mohammad Azadi[2], Amin Farrokhabadi[3], Seyed Mohammad Jafari[4]

1- Faculty of Aerospace Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
3- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4- Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, A.C., Tehran, Iran
* P.O.B. 35131-19111 Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 September 2017
Accepted 09 November 2017
Available Online 15 December 2017

Keywords:
Composite, Acoustic emission
Fuzzy clustering
Pocket wavelet transform
Low-cycle fatigue

ABSTRACT

High ratio of strength to weight in carbon/epoxy composites causes to their applications in several structures, especially aerospace structures. In addition, to enhance the reliability in such structures, investigating damages in composites is essential. One way to detect defects in composites is to utilize the acoustic emission approach. Thus, the objective of the present research is to find failure mechanisms in open-hole laminate composite specimens with $[0_3/90_2/0_2]_s$ layup under cyclic loadings at different displacement amplitudes, using the acoustic emission. First, the standard specimen was examined and elastic waves due to failures in the specimen were detected by acoustic emission wide-band 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. 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.

1- مقدمه

برای صنایع مهندسی مطالبه موادی که کارآیی بالایی داشته باشند، امری مهم تلقی می‌شود. از جمله این موادها کامپوزیت‌هاست که امروزه به دلیل خواصی چون مقاومت در برابر خوردگی و سایش، ظاهری زیبا، عایق الکتریکی و حرارتی بالا، وزن کم، مقاومت بالا و سایر ویژگی‌ها به طور گسترده‌ای در خودروسازی، پل‌سازی، هوافضا و صنایع دیگر به کار می‌روند. کامپوزیت‌ها یا

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Alizadeh, M. Azadi, A. Farrokhabadi, S. M. Jafari, Investigation of displacement amplitude effect on failure mechanisms in open-hole laminated composites under low-cycle fatigue loading using acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 435-445, 2018 (in Persian)

مواد مرکب همان طوری که از نامشان پیداست ترکیبی از دو یا چند ماده مختلف هستند. این مواد معمولاً از دو قسمت تشکیل شده‌اند، یک قسمت تقویت‌کننده که آن را الیاف[1] می‌نامند و دیگری قسمت پایه که الیاف‌ها در آن قرار می‌گیرند و آن را ماتریس[2] می‌نامند. سازوکارهای کلی خرابی در کامپوزیت‌ها به چهار دسته ترک ماتریسی، شکست الیاف، جدایی الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای تقسیم می‌شود [1].

یکی از روش‌های تشخیص سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌ها روش انتشار صوت است که تاریخچه استفاده از آن به پیش از میلاد مسیح بازمی‌گردد. نخسین استفاده از انتشار صوت برای تعیین خرابی کامپوزیت‌ها توسط ساچ[3] و همکاران در سال 1987 انجام شد [2]. پس از آن استفاده از این روش به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

ویلیام و ریف اشنایدر[4] [3] در تحقیقی به بررسی نمونه‌های کامپوزیتی برون/ آلومینیوم و برون/ اپوکسی تحت بارگذاری خستگی کرنش و نیرو کنترل پرداختند. آن‌ها ارتباط خوبی بین درصد آسیب، پیشرفت آن و نتایج انتشار صوت مشاهده نمودند. آن‌ها بیان کردند که بسته به نوع مواد ممکن است جدایش الیاف از ماتریس سیگنال‌های بزرگی ایجاد کند و چون موج‌های آکوستیک سینوسی هستند، وقتی دامنه موج بزرگ‌تر باشد تعداد عبور از حد آستانه بیش از حالتی است که دامنه کوچک‌تر باشد، به همین دلیل شکست الیاف تا پیش از این‌که زیر حد آستانه برسد، تعداد بیشتری از آن عبور می‌کند.

نیکسون پیرسون و همکاران[5] [4] آزمایشی برای مشاهده و فهم مراحل گسترش آسیب در سراسر عمر یک لمینیت سوراخ‌دار کامپوزیتی شبه‌ایزوتروپ[6] کربن/ اپوکسی انجام دادند که تحت بارگذاری خستگی کشش- کشش قرار داشت. سپس با استفاده از اشعه ایکس[7] به بررسی آسیب به صورت سه بعدی در نمونه‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هرچه بیشینه تنش خستگی اضافه شود تعداد سیکل منجر به شکست نمونه‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد. ابتدا نمونه‌ها را برای به دست آوردن میانگین مقاومت تحت بار شبه‌استاتیکی قرار دادند. آن‌ها آزمون‌های خستگی را به منظور تعیین حوادث آسیب با قله دامنه در 60% از بار استاتیکی نهایی (60% شدت) با استفاده از اشعه ایکس انجام دادند. عکس‌های ترموگرافی رایانه‌ای نشان دادند که آسیب اولیه با ترک ماتریسی و لایه‌لایه‌شدگی در لبه سوراخ شروع به پیشرفت کرده است.

لیو[8] و همکاران [5] 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، همچنین آن‌ها خواص میکروسکوپی نمونه‌های متفاوت کامپوزیت پس از شکست را مشاهده و با میکروسکوپ الکترونی تحلیل کردند. در پژوهشی دیگر میشالکووا و کادلک[9] [6] رشد ترک روی نمونه‌های DCB[10] 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 را با جابه‌جایی ثابت در دمای 80 و 50- درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که منحنی‌های رشد ترک با انتشار صوت خطای میانگین 3.49% داشته‌اند.

سعیدی‌فر و همکاران [7] حالت نوک ترک را در حین افزایش در مود اول جدایش لایه‌ها در نمونه کامپوزیتی شیشه/ 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 چویی[11] [8] 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 فوریه سریع به دست آوردند و با مشاهدات میکروسکوپی دریافتند که در لایه‌چینی 90 درجه، ترک موازی با شکاف اولیه رشد می‌کند و مسیر ترک اصلی در نمونه‌های دیگر وابسته به جهت‌گیری الیاف است و این‌که مسیر رشد ترک وابستگی بیشتری به جهت‌گیری الیف به نسبت جهت ترک اولیه دارد، در آزمون آن‌ها با توجه به فرکانس‌های غالب شکست الیاف بیشترین سهم را داراست.

فتوحی و همکاران [9] سازوکارهای 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 kHz139.95 مربوط به شکست ماتریس، دسته با فرکانس میانگین kHz265.51 مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و دسته با فرکانس میانگین kHz412.20 مربوط به شکست الیاف است. پشم‌فروش و همکاران [10] سیگنال‌های انتشار صوت نمونه‌های شیشه/ اپوکسی با جدایش بین لایه‌ای اولیه تحت بارگذاری خمش سه نقطه را با ترکیب روش‌های کا- مینز و ژنتیک دسته‌بندی کرده و هر دسته را به یک سازوکار 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[12] و همکاران [11] 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 براساس 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 سازوکارهای خرابی، نمودار تعداد ضربه مربوط به انتشار صوت را با نمودار تنش-کرنش مقایسه کردند. بورچاک[13] و همکاران [12] 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 شروع ترک در 50% استحکام کششی نهایی، در لایه‌چینی‌های $[60^o/-30^o]$، $[60^o/-30^o]$ و $[0^o/90^o]$ در حدود یک سوم استحکام کششی نهایی است و یک رابطه غیرخطی بین زاویه فیبر، استحکام کششی و شروع ترک ماتریس وجود دارد.

[1] Fiber
[2] Matrix
[3] Sachse
[4] Williams and Refsnider
[5] Nixon-Pearson et al
[6] Quasi isotropic
[7] X-ray
[8] Liu
[9] Michalcova and Kadlec
[10] Double Cantilever Beam
[11] Woo and Choi
[12] Saidane
[13] Bourchak

لافان[1] و همکاران [13] اندازه‌گیری 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[2] و همکاران [14] ساز وکارهای شکست کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با پوشش‌دار کردن آن با اکسیدآلومینیوم 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. آن‌ها در نتایج با استفاده از سیگنال‌های انتشار صوت سه سازوکار شکست در نمونه‌های بدون پوشش و چهار سازوکار 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 بارگذاری خستگی کمچرخه، مقایسه روش‌های تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی که کمتر در این زمینه مطالعه شده، استفاده از الیاف کربن (نسبت به الیاف شیشه) و لایه‌چینی متفاوت نسبت به سایر مقالات اشاره کرد. در این مقاله به مطالعه سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای با انتشار صوت و مقایسه مقدار خرابی‌ها با دو روش یادشده و مشاهده نتایج میکروسکوپی آن‌ها پرداخته شده است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد

همه نمونه‌های استاندارد آزمون کشش از الیاف کربن تک‌جهته تولیدی شرکت سیکا[3] 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 که پس از ساخت نمونه‌ها و ترکیب با رزین ضخامت هر لایه برابر حدود 0.23 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 به صورت متقارن و با لایه‌چینی $[0_3/90_2/0_2]_s$ است. سوراخی به قطر 6 میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها ایجاد شده است. برای برش و سوراخ‌کاری نمونه‌ها از واترجت[4] استفاده شد. ابعاد و لایه‌چینی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D5766 در شکل 1 آمده است [15].

2-2- آزمون‌ها

برای بارگذاری خستگی کمچرخه نمونه‌ها از دستگاه کشش سنتام (با قابلیت انجام بارگذاری سیکلیک) مدل STM-150 با ظرفیت 15 تن با قابلیت تنظیم بارگذاری در محدوده 0.1-500 mm/min استفاده شده است. نمونه‌های

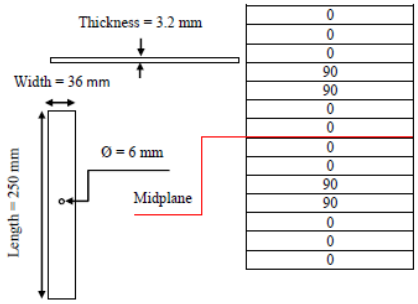

Fig. 1 Specimens dimensions in ASTM D5766 standard

شکل 1 ابعاد نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM D5766

الیاف خالص و رزین خالص با سرعت بارگذاری ثابت mm/min2 تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی کمچرخه کشش- کشش با فرکانس ثابت 200 میلی‌متر بر دقیقه و دامنه‌های جابه‌جایی متفاوت طبق جدول 1 قرار گرفتند. به منظور اطمینان از سازوکارهای خرابی مانند شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و ترک ماتریس از تصاویر گرفته شده با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی[5] مدل ایکس‌ال30 ساخت شرکت فیلیپس متعلق به دانشگاه سمنان استفاده شد. اساس کار این دستگاه برای تصویربرداری، رسانا بودن سطح مورد نظر برای تصویربرداری است. سطح آن‌ها برای رساناکردن سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی در مقیاس نانومتری با عنصر نقره پوشش‌دهی و سپس نمونه‌های آزمون در محفظه میکروسکوپ تحت خلاء قرار گرفته و تصویربرداری انجام شد. جدول 1 نشان‌دهنده شرایط بارگذاری هر نمونه است.

2-3- تجهیزات انتشار صوت

برای ثبت داده‌های انتشار صوت از دو حسگر نوار پهن[6] با محدوده فرکانس کاری 100-1000 kHz استفاده شد.

نرخ داده‌برداری 1 میلیون داده در ثانیه بود که توسط کارت آنالوگ به دیجیتال پی‌سی‌آی2[7] انجام شد. تمام تجهیزات و نرم‌افزار ثبت داده‌های انتشار صوت ساخت شرکت پک[8] است. سیگنال‌ها با ضریب dB40 توسط دو پیش‌تقویت‌کننده[9] تقویت شدند و حدآستانه[10] مناسب با روش سعی و خطا dB37 تعیین گردید. برای مطمئن شدن از نحوه کارکرد صحیح حسگرهای انتشار صوت از آزمون مداد پیش از هر آزمون استفاده شد [16]. شکل 2 نمای کلی آزمون شامل تجهیزات بارگذاری خستگی، تجهیزات انتشار صوت و کابل‌های رابط را نشان می‌دهد.

2-4- تبدیل موجک

موجک[11] موجی با مقدار میانگین صفر و با دوره تناوب محدود است. تابع ψ

جدول 1 شرایط بارگذاری خستگی نمونه‌های کامپوزیتی

Table 1 Fatigue loading conditions of composite specimens

شماره نمونه	فرکانس بارگذاری (mm/min)	دامنه جابه‌جایی (mm)
1	200	7
2	200	6.5
3	200	6
4	200	5.5

[1] Laffan
[2] Njuhovic
[3] Sika
[4] Water jet

[5] Scanning electron microscope
[6] Wide band (WSA)
[7] PCI-2
[8] Physical Acoustics Corporation
[9] Preamplifier
[10] Threshold
[11] Wavelet

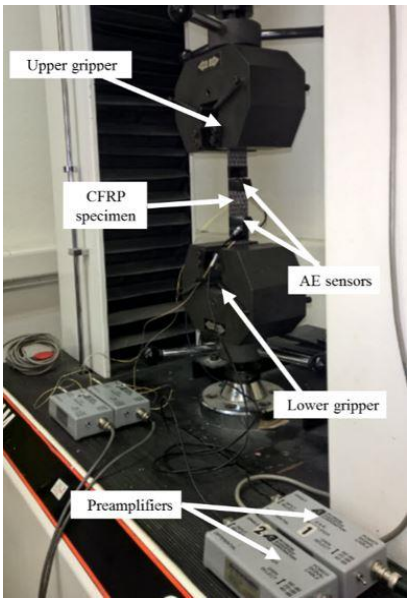

Fig. 2 Acoustic emission setups

شکل 2 تجهیزات انتشار صوت

با دو شرط تابع انرژی محدود داشته باشد و انتگرال تابع در بازه $(-\infty,\infty)$ مساوی صفر باشد، یک موجک یا موجک مادر به صورت روابط (2,1) نامیده می‌شود [17].

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

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

رابطه (3) تبدیل موجک گسسته[1] و رابطه (4) معکوس آن را نشان می‌دهد [20].

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

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

$f(t)$ سیگنال پردازش شده، $\mathrm{DWT}\,(i,k)$ ضرایب تبدیل موجک، i سطح تجزیه، k پرامتر انتقال و ψ موجک مادر است. در این پژوهش به این دلیل از تبدیل موجک بسته‌ای[2] استفاده می‌شود که تبدیل موجک فقط در سطح اول سیگنال را به دو جزء کلیات و جزییات تقسیم می‌کند و در سطوح بعدی فقط کلیات تجزیه می‌شوند، در حالی که در تبدیل موجک بسته‌ای همه اجزاء در همه سطوح به بخش‌های فرکانس پایین که مربوط به کلیات و فرکانس بالا که مربوط به جزییات است تجزیه می‌شوند این تفاوت در شکل 3 نشان داده شده که در پژوهش‌های پیشین نیز در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [18]. همان‌طور که گفته شد در تبدیل موجک بسته‌ای در هر سطح علاوه تجزیه کلیات، جزییات نیز به دو سطح کلیات و جزییات تجزیه می‌شود. حوزه فرکانسی کلیات و جزییات در هر سطح با روابط (6,5) محاسبه می‌شود [19].

$$\left[0,\frac{1}{2}\,f_s2^{-i}\right] \quad (5)$$

$$\left[\frac{1}{2}\,f_s2^{-i},\frac{1}{2}\,f_s2^{-(i-1)}\right] \quad (6)$$

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 رابطه (7) به صورت ریاضی بیان شده است [20].

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

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

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

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].

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

2-5- روش خوشه‌بندی فازی

روش خوشه‌بندی فازی به یک تکنیک خوشه‌بندی اطلاق می‌شود، زمانی که در آن هر داده متعلق به یک خوشه و با یک درجه است. این روش یکی از روش‌های خوشه‌بندی پیشرفته به حساب می‌آید که توسط بِزدک 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 (X یک فضای m بعدی است) قرار دارد. با توجه به این‌که همه مشخصه‌های m دارای واحدهای متفاوت است باید هر مشخصه را پیش از خوشه‌بندی با یک مقیاس واحد نرمال سازی کنیم [22].

روش تابع هدف برای خوشه‌بندی n داده به c خوشه مختلف به کار گرفته می‌شود. هدف اصلی این تابع رساندن فاصله بین داده‌ها در یک دسته

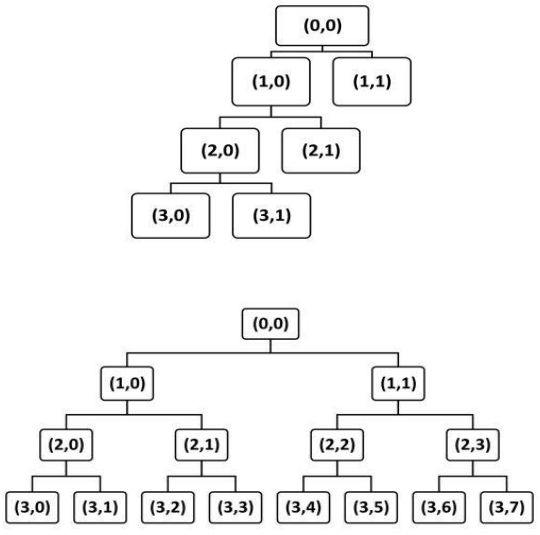

Fig. 3 Wavelet transform: a- discrete type and b- packet type

شکل 3 تبدیل موجک الف- گسسته و ب- بسته‌ای

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].

[1] Discrete Wavelet Transform (DWT)
[2] Wavelet Packet Transform (WPT)

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

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 به صورت روابط (12,11) باشد [23].

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

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

تابع هدف استفاده شده در خوشه‌بندی فازی به صورت روابط (14,13) 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، u_{ik} مقدار عضویت k-امین داده در خوشه i-ام است. m' مقدار وزنی که مقدار فازی بودن خوشه‌بندی را تعیین می‌کند. v_i در رابطه (15) مرکز خوشه i-ام است.

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

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 هرکدام از داده‌ها این مقادیر اختصاص می‌یابد. آن‌گاه مقادیر مرتبط با مراکز خوشه‌ها معین شده و دوباره این عملیات تا جایی ادامه می‌یابد که رابطه (16) برقرار باشد.

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

r تعداد گام‌های تکرار و ε مقدار خطاست که نسبت به گام پیشین حساب می‌شود و باید از مقدار معین شده کمتر باشد تا فرآیند خوشه‌بندی متوقف و کامل گردد [24].

3- نتایج

در این قسمت ابتدا به بررسی نتایج آزمون خستگی پرداخته شده است. سپس فرکانس غالب شکست فیبر و ترک ماتریسی از آزمون کشش نمونه‌های خالص به دست آورده شده است. در ادامه با روش‌های تبدیل بسته موجک و خوشه‌بندی فازی سازوکارهای خرابی در نمونه‌های سوراخ‌دار کامپوزیت کربن/اپوکسی محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه گردیده و در پایان تصاویر نمونه‌های آزمون پس از شکست و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

3-1- نتایج آزمون خستگی

در این قسمت نتایج مربوط به آزمون‌های خستگی کمچرخه آورده شده است. همان طور که در جدول 2 قابل مشاهده است با کاهش دامنه جابه‌جایی آزمون خستگی، عمر قطعه افزایش و بیشینه تنش کاهش می‌یابد.

در شکل 4 نمودار تنش بیشینه- عمر مربوط به نمونه‌های آزمون آورده

جدول 2 نتایج بارگذاری خستگی نمونه‌های کامپوزیتی

Table 2 Result of fatigue loading of composite specimens

شماره نمونه	فرکانس بارگذاری (mm/min)	دامنه جابه‌جایی (mm)	بیشترین تنش (MPa)	کمترین تنش (MPa)	عمر (Cycle)
1	200	7	722	2	3
2	200	6.5	656	1	19
3	200	6	550	1	39
4	200	5.5	451	1,5	57

شده است. همان طوری که از نتایج آزمون مشخص است تنش بیشینه با نزدیک شدن به عمر نهایی نمونه سیری نزولی دارد که به معنای رفتار نرم‌شوندگی[1] ماده تحت بارهای تکرارشونده است. در شکل 5 نیز نمودار عمر خستگی نمونه‌ها طبق دامنه جابه‌جایی آورده شده است. نمودار نشان‌دهنده این است که هر چه دامنه جابه‌جایی بیشتر شود عمر نهایی نمونه کمتر خواهد شد.

به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می توان گفت که با افزایش دامنه جابه‌جایی میزان تنش بیشینه افزایش پیدا می‌کند. طبق استاندارد ASTM D7615 در یک بارگذاری خستگی هر چه تنش بیشینه افزایش پیدا

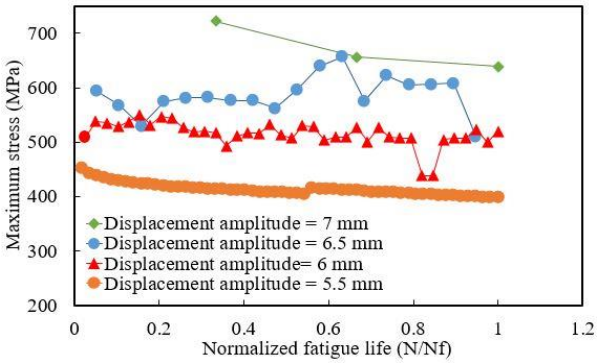

Fig. 4 Maximum stress- normalized fatigue lifetime of specimens under low-cycle fatigue loading

شکل 4 نمودار تنش بیشینه- عمر خستگی نمونه‌های آزمون تحت بارگذاری خستگی کمچرخه

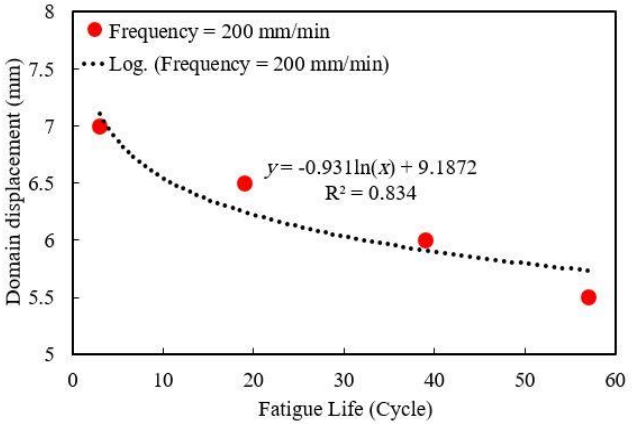

Fig. 5 Displacement amplitude- fatigue lifetime of specimens under low-cycle fatigue loading

شکل 5 نمودار دامنه جابه‌جایی- عمر خستگی نمونه‌های آزمون تحت بارگذاری خستگی کمچرخه

[1] Softening

کند عمر قطعه کاهش می‌یابد [25].

3-2- تعیین فرکانس خرابی‌های الیاف خالص و رزین خالص

زمانی که نمونه سوراخ‌دار تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، سازوکارهای خرابی به سه دسته ترک ماتریسی، شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس تقسیم می‌شوند [26]. برای به دست آوردن سیگنال‌های انتشار صوت مربوط به خرابی‌ها، ابتدا تست‌های کشش رزین خالص و الیاف خالص با سرعت ثابت mm/min2 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 بارگذاری کششی قرار گرفتند. برای تکرارپذیری هر آزمون سه مرتبه تکرار شده و نمونه‌های رزین و فیبر خالص تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. برای به دست آوردن محدوده فرکانسی مربوط به ترک ماتریسی و شکست الیاف از تبدیل فوریه سریع[1] استفاده شد. در شکل 6 محدوده فرکانسی شکست الیاف و ترک ماتریسی قابل مشاهده است. محدوده فرکانسی ترک ماتریسی kHz 100-250 و محدوده فرکانسی الیاف کربن kHz 420-500 مشخص شد و تنها بازه باقی‌مانده در محدوده فرکانسی یعنی kHz 250-420 به جدایش الیاف از ماتریس اختصاص می‌یابد که با تحقیقات پیشین مطابقت خوبی دارد [28,27].

شکل 7 آزمون کشش رزین خالص و الیاف خالص را نشان می‌دهد. در این آزمون سیگنال‌های انتشار صوت توسط دو حسگر نوار پهن که به نمونه‌ها چسبانده شده بود ثبت و ضبط شده و فرکانس هر خرابی به صورت جداگانه به دست آمد.

3-3- تحلیل سیگنال‌های انتشار صوت به روش تبدیل موجک بسته‌ای

برای به دست آوردن مقدار خرابی‌ها در نمونه سوراخ‌دار سیگنال‌های سیکل ابتدا، میانی و انتهایی انتشار صوت ثبت شده حین آزمون خستگی به روش تبدیل موجک بسته‌ای تجزیه و تحلیل شدند. برای این کار سیگنال‌های به دست آمده در سه سطح تجزیه (شکل 8) و دامنه فرکانسی هر هشت جزء به روش تبدیل فوریه سریع به دست آمد (شکل 9). اجزای با رنگ قرمز مربوط به شکست الیاف، اجزای با رنگ سبز مربوط به ترک ماتریسی و اجزای با رنگ آبی مربوط به جدایش الیاف از ماتریس است. سپس انرژی هر یک از اجزا محاسبه شده و توزیع انرژی آن‌ها همان طور که در شکل 10 مشخص است به دست آمد. نمودارها صرفاً برای سیکل ابتدایی آزمون نمونه شماره 2 آورده شده و برای مابقی سیکل‌های میانی و انتهایی نیز همین روال طی شده است. درصد توزیع انرژی برای جدایش الیاف از ماتریس نسبت به بقیه سازوکارهای خرابی بیشتر است.

در این قسمت به بررسی سازوکارهای خرابی با روش موجک برای بارگذاری خستگی با فرکانس ثابت و دامنه جابه‌جایی متغیر می‌پردازیم. نتایج به دست آمده در جدول 3 برای سیکل‌های ابتدایی، میانی و انتهایی آورده شده و سپس میانگین درصد هر نوع خرابی برای هر نمونه محاسبه شده است. در انتها از میانگین خرابی‌ها یک میانگین کلی گرفته شده که معرف درصد خرابی در مجموع سه سیکل برای چهار نمونه است.

همان طور که در نتایج جدول 3 قابل مشاهده است با افزایش دامنه جابه‌جایی، میانگین درصد شکست الیاف کاهش، ترک ماتریسی افزایش و جدایش الیاف از ماتریس افزایش می‌یابد.

در ادامه نتایج به دست آمده از تحلیل سیگنال‌های انتشار صوت به دست آمده از نمونه‌های سوراخ‌دار کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی کمچرخه با روش تبدیل موجک با نتایج حاصل از روش خوشه‌بندی فازی مقایسه شده است. برای تعیین درصد سازوکارهای خرابی کامپوزیت در تحلیل سیگنال‌ها به روش تبدیل موجک از میانگین کل برای مقایسه با نتایج خوشه‌بندی فازی استفاده شده است.

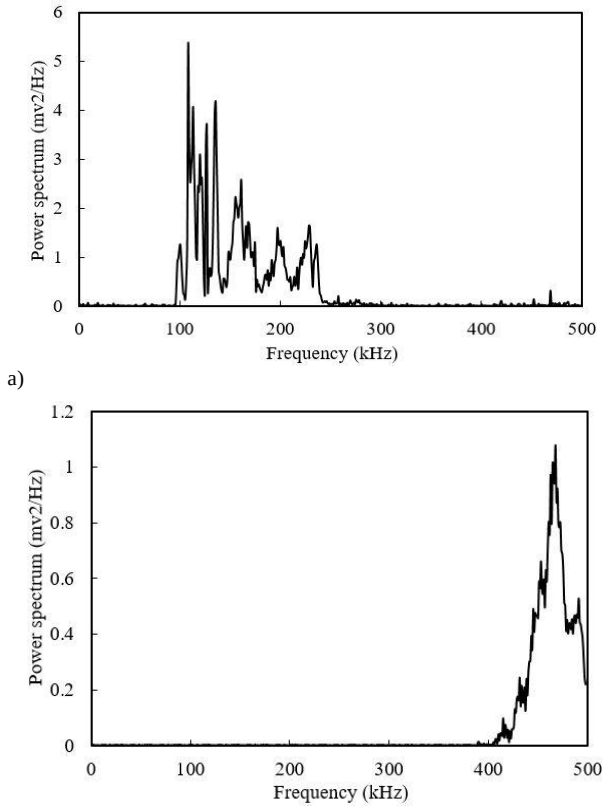

Fig. 6 Frequency range of AE signals for a) pure matrix and b) pure fiber

شکل 6 محدوده فرکانسی سیگنال انتشار صوت مربوط به الف- رزین خالص و ب- الیاف خالص

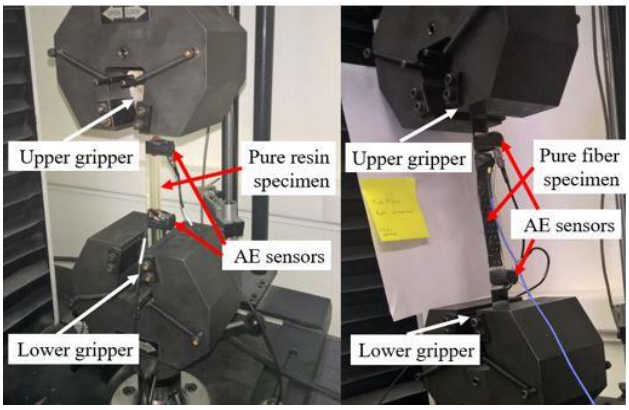

Fig. 7 Tensile test for pure resin and pure fiber

شکل 7 آزمون کشش رزین خالص و الیاف خالص

[1] Fast Fourier Transform (FFT)

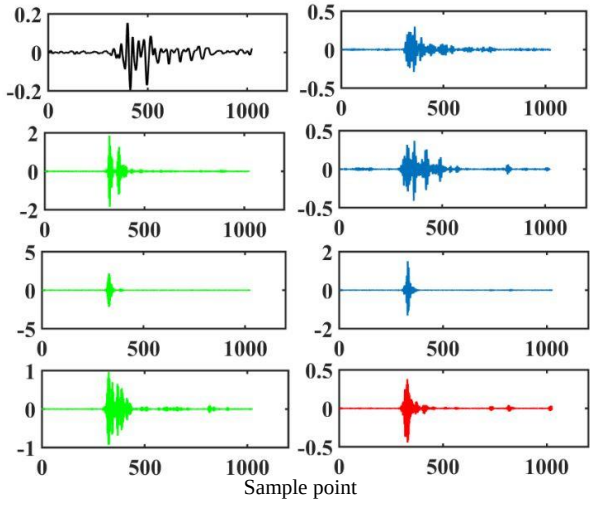

Fig. 8 Packet wavelet transform component of first-cycle of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 8 هر هشت جزء تجزیه شده به روش تبدیل موجک بسته‌ای سیکل ابتدایی نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5mm)

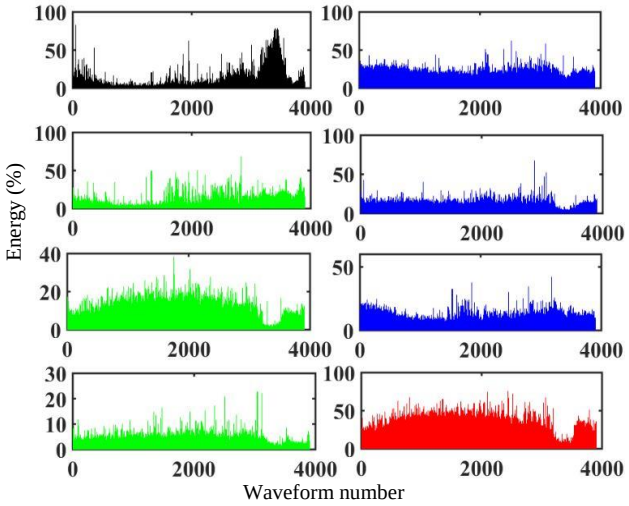

Fig. 10 Energy distribution of packet wavelet transform components of first-cycle of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 10 توزیع انرژی مربوط به هر یک از اجزای تبدیل موجک بسته‌ای سیکل ابتدایی نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

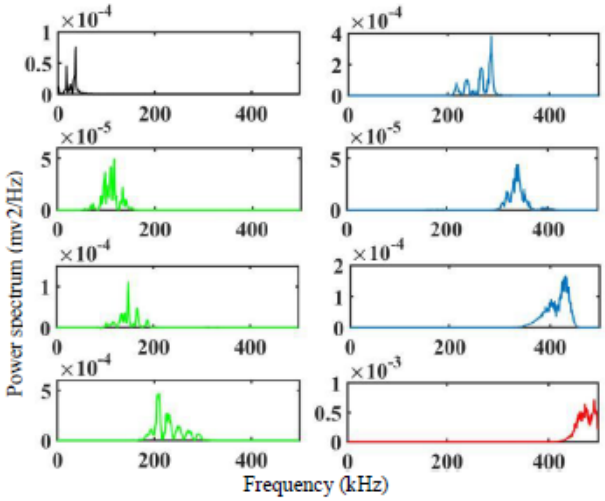

Fig. 9 Frequency distribution of packet wavelet transform components of first-cycle of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 9 توزیع فرکانسی مربوط به هر یک از اجزای تبدیل موجک بسته‌ای سیکل ابتدایی نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

جدول 3 نتایج تحلیل سیگنال‌های انتشار صوت با روش تبدیل موجک

Table 3 Result of acoustic emission signal processing using wavelet packet

ترک ماتریسی (٪)				جدایش الیاف از ماتریس (%)				شکست الیاف (%)			
دامنه جابه‌جایی	سیکل ابتدا	سیکل میانی	سیکل انتهایی	میانگین	سیکل ابتدا	سیکل میانی	سیکل انتهایی	میانگین	سیکل ابتدا	سیکل میانی	سیکل انتهایی	میانگین
7	38.2	26.4	25.4	30	44.1	54.9	53.7	50.9	17.7	18.7	20.9	19.1
6.5	27.1	30.8	32	29.9	41.9	39.8	47.2	43.1	31	29.4	20.8	27
6	27.2	30	30.6	29.4	47	40.4	39.7	42.3	25.8	29.6	29.7	28.3
5.5	32.1	26.9	27.9	29	45.2	40.8	38.4	41.4	22.7	32.3	33.7	29.6
میانگین کل	29.6			44.4				26				

دهند. شکل 11 نتایج حاصل از آنالیز اجزای اصلی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است دو بردار اول دارای بیشترین واریانس هستند و می‌توانند حجم اطلاعات را کاهش دهند.

پس از کاهش بعد توسط روش آنالیز اجزای اصلی، اطلاعات باید با روش فازی خوشه‌بندی شوند. در نمونه سوراخ‌دار سازوکارهای خرابی به سه دسته اصلی (شکست الیاف، ترک ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس) تقسیم‌بندی می‌شوند، پس تعداد خوشه‌ها برابر با 3 در نظر گرفته می‌شود. شکل 12 عمل خوشه‌بندی مورد نظر را نشان می‌دهد که داده‌ها در محورهای مربوط به بردارهای ویژه با بیشترین واریانس رسم شده‌اند. در روش فازی ابتدا بهترین مرکز هر کلاس براساس مینیمم کردن تابع هدف (فرمول 13) مشخص شده، سپس داده‌هایی که به هر یک از مراکز خوشه‌ها نزدیک باشد به عنوان داده آن خوشه تلقی می‌شود.

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 آن‌جایی که هر داده دارای یک مقدار فرکانسی مختص به خود است پس می‌توان نمودار توزیع فرکانسی هر خوشه را رسم کرد. مشخص شد که خوشه

3-4- نتایج تحلیل به روش خوشه‌بندی فازی

برای مشخص کردن خرابی‌ها در نمونه سوراخ‌دار به روش فازی از شش مشخصه مربوط به انتشار صوت زمان اوج، ضرب آهنگ، انرژی، دامنه، فرکانس متوسط و حداکثر فرکانس استفاده گردید. به منظور انتخاب مؤثرترین پارامترها و کاهش ابعاد از روش آنالیز اجزای اصلی استفاده شد در این روش ضمن کاهش بعد اطلاعات بهترین داده‌های انتشار صوت را نیز در اختیار می‌گذارد.

در این روش ابتدا هر سیگنال به دست آمده از روش انتشار صوت که دارای شش بعد است توسط روش آنالیز اجزای اصلی آنالیز می‌شود، سپس کواریانس بین داده‌ها محاسبه و بعد بردارهای ویژه آن پیدا می‌شود، سپس واریانس هر بردار محاسبه و دو برداری که بیشترین مقدار واریانس را داراست انتخاب می‌شوند تا اطلاعات را از فضای شش بعدی به فضای دو بعدی انتقال

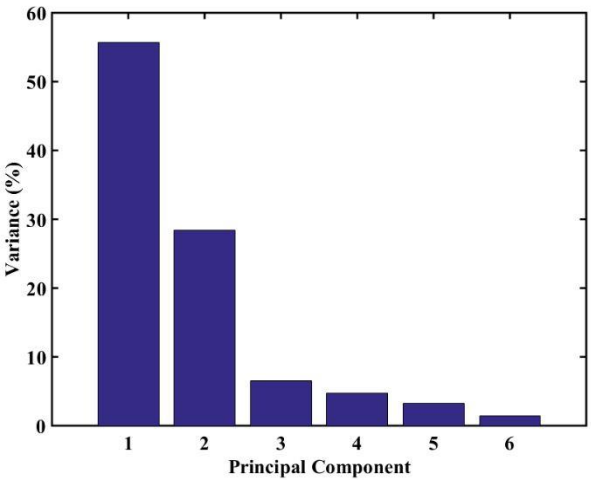

Fig. 11 Variance percentage of PCA Eigen vectors of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 11 درصد واریانس بردارهای ویژه حاصل از آنالیز اجزای اصلی نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

اول با رنگ سبز مربوط به ترک ماتریسی، خوشه دوم با رنگ قرمز مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و خوشه سوم با رنگ آبی مربوط به شکست الیاف است. این نمودارها در شکل 13 نمایش داده شده‌اند.

همان‌طور که از نتایج به دست آمده در جدول 4 مشخص است می‌توان گفت حدود 50% از سازوکارهای خرابی به جدایش الیاف از ماتریس تعلق می‌گیرد که نشان می‌دهد بیشترین نوع خرابی مربوط به این سازوکار است و ترک ماتریسی و شکست الیاف در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند که با تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد [26].

نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که در بارگذاری خستگی با فرکانس ثابت و دامنه جابه‌جایی متغیر با افزایش دامنه جابه‌جایی درصد شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس زیاد و درصد ترک ماتریسی کم می‌شود. برای تعیین درصد سازوکارهای خرابی کامپوزیت در تحلیل سیگنال‌ها به روش خوشه‌بندی فازی از میانگین داده‌های کل آزمون برای مقایسه با نتایج تبدیل موجک استفاده شده است.

3-5- مقایسه نتایج تبدیل موجک و خوشه‌بندی فازی

در این بخش به مقایسه نتایج سازوکارهای خرابی در کامپوزیت تحت بارگذاری خستگی کمچرخه با فرکانس ثابت و دامنه جابه‌جایی متغیر پرداخته شده است. نتایج مقایسه در جدول 5 قابل مشاهده است. در بارگذاری خستگی با فرکانس ثابت در روش تبدیل موجک هر چه دامنه جابه‌جایی بیشتر شود درصد شکست الیاف کاهش و درصد ترک ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس افزایش پیدا می‌کند، اما در روش خوشه‌بندی فازی درصد ترک ماتریسی کم و درصد شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین درصد جدایش الیاف از ماتریس تحت هر

جدول 4 درصد سازوکارهای خرابی به روش خوشه‌بندی فازی

Table 4 Damage percentage result of fuzzy clustering

دامنه جابه‌جایی (mm)	ترک ماتریسی (%)	جدایش الیاف از ماتریس (%)	شکست الیاف (%)
7	23.3	60.4	16.3
6.5	31.3	53.5	15.2
6	36.1	49.1	14.8
5.5	40.4	46.9	12.7
میانگین کل	32.8	52.5	14.7

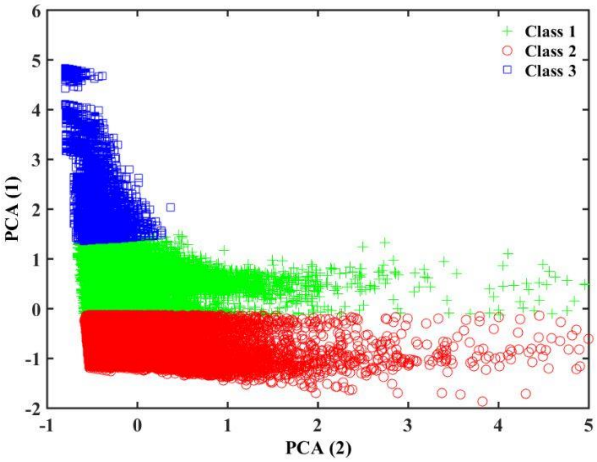

Fig. 12 Fuzzy C-means clustering of AE signals of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 12 خوشه‌بندی فازی برای داده‌های تحلیل شده توسط آنالیز اجزای اصلی نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

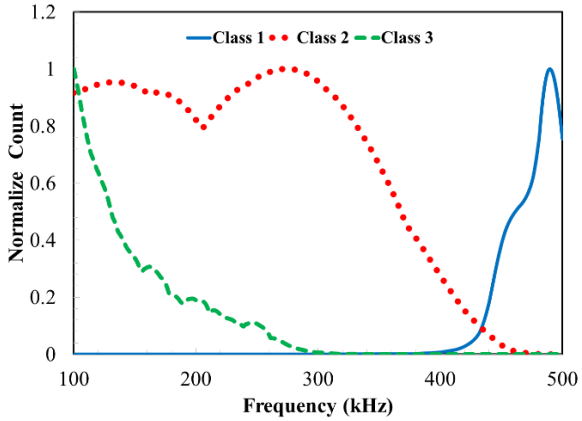

Fig. 13 Frequency distribution of clustered AE signals of specimen no.2 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 13 توزیع فرکانسی مربوط به هر یک از خوشه‌های نمونه شماره 2 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

دامنه‌ای و تحلیل با هر دو روش بسته موجک و خوشه‌بندی فازی همواره در حال افزایش است.

همان طور که در جدول 5 قابل مشاهده است کمترین اختلاف دو روش فازی و بسته موجک در تحلیل سیگنال‌های انتشار صوت در بارگذاری خستگی فرکانس ثابت و دامنه جابه‌جایی متغیر مربوط به ترک ماتریسی در نمونه شماره 2 (فرکانس 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5mm) و با

جدول 5 مقایسه درصد سازوکارهای خرابی با دو روش خوشه‌بندی فازی و تبدیل موجک

Table 5 Comparison of damage percentage result of fuzzy clustering and wavelet transform

دامنه جابه‌جایی (mm)	ترک ماتریسی (%)			جدایش الیاف از ماتریس (%)			شکست الیاف (%)		
	موجک	فازی	اختلاف	موجک	فازی	اختلاف	موجک	فازی	اختلاف
7	30	23.3	6.7	50.9	60.4	9.5	19.1	16.3	2.8
6.5	29.9	31.3	1.4	43.1	53.5	10.4	27	15.2	11.8
6	29.4	36.1	6.7	42.3	49.1	6.8	28.3	14.8	13.5
5.5	29	40.4	11.4	41.4	46.9	5.5	29.6	12.7	16.9

مقدار 1.4% است. بیشترین اختلاف نیز مربوط به شکست الیاف در نمونه شماره 4 (دامنه جابه‌جایی 5.5 میلی‌متر) و با مقدار 16.9% است.

3-6- نتایج تصاویر ناحیه شکست در اثر بارگذاری خستگی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل‌های 14-17 نشان‌دهنده ناحیه شکست اطراف سوراخ نمونه‌ها در اثر بارگذاری خستگی است. شکل‌ها به ترتیب مربوط به نمونه شماره 1 با دامنه جابه‌جایی 7 میلی‌متر، نمونه شماره 2 با دامنه جابه‌جایی 6.5 میلی‌متر، نمونه شماره 3 با دامنه جابه‌جایی 6 میلی‌متر و نمونه شماره 4 با دامنه جابه‌جایی 5.5 میلی‌متر است.

براساس تصاویر رشد آسیب در اطراف سوراخ و رو به لبه نمونه‌ها پیشرفت کرده است. سوراخ سبب بوجود آمدن تمرکز تنش در قطعه شده و

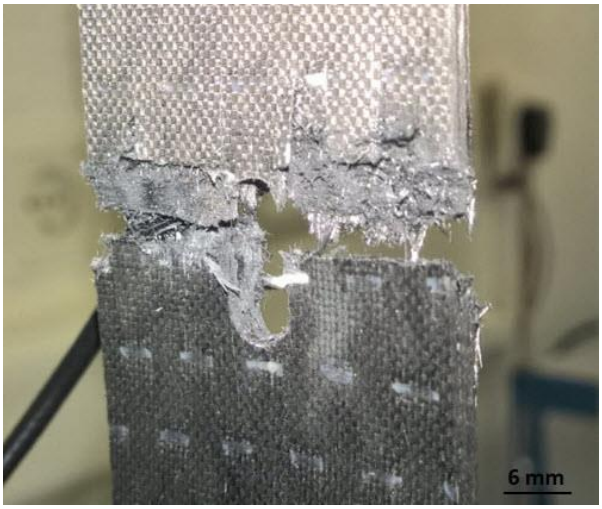

Fig. 14 Picture of fractured zone of specimen no.1 after fatigue loading and fracture (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 7 mm)

شکل 14 تصویر ناحیه شکست نمونه شماره 1 پس از بارگذاری خستگی و شکست (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 7mm)

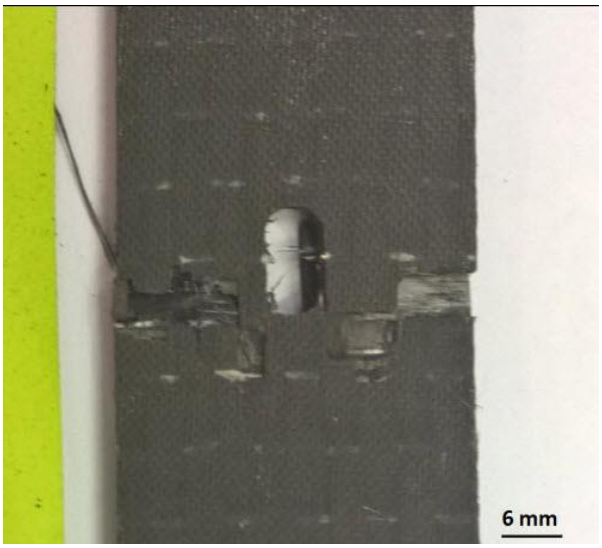

Fig. 15 Picture of fractured zone of specimen no.2 after fatigue loading and fracture (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 6.5 mm)

شکل 15 تصویر ناحیه شکست نمونه شماره 2 پس از بارگذاری خستگی و شکست (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 6.5 mm)

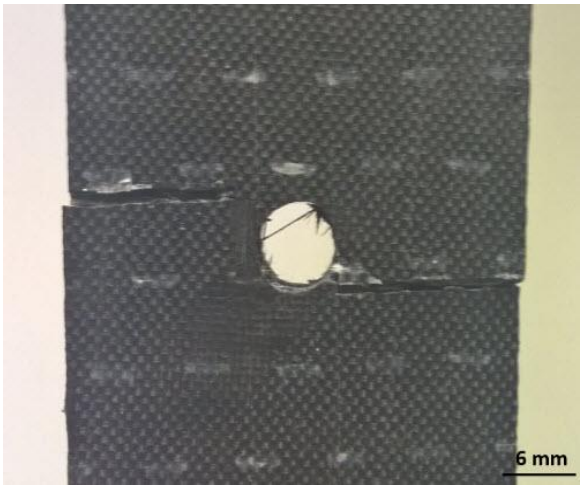

Fig. 16 Picture of fractured zone of specimen no.3 after fatigue loading and fracture (frequency of 200mm/min and displacement amplitude of 6mm)

شکل 16 تصویر ناحیه شکست نمونه شماره 3 پس از بارگذاری خستگی و شکست (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 6mm)

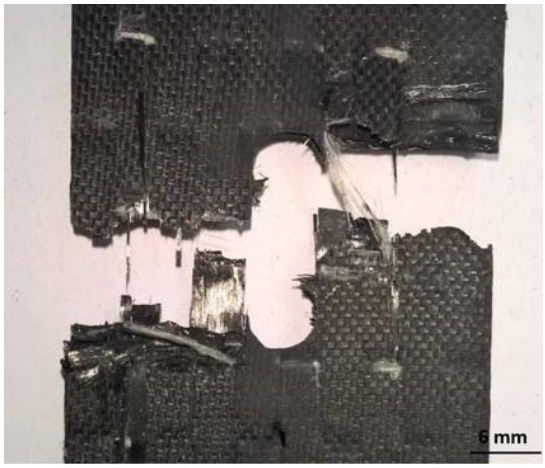

Fig. 17 Picture of fractured zone of specimen no.4 after fatigue loading and fracture (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 5.5 mm)

شکل 17 تصویر ناحیه شکست نمونه شماره 4 پس از بارگذاری خستگی و شکست (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 5.5 mm)

شکست در همه نمونه‌ها فقط در نقاط سوراخ و به صورت LGM[1] اتفاق افتاده است که کاملاً با استاندارد ASTM D5766 تطبیق‌پذیری دارد.

در شکل‌های 18-21 تا نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی که از سطوح شکست اطراف سوراخ گرفته شده نشان داده شده است. همان گونه که در تصاویر مشخص است در الیاف با زاویه 90 درجه بیشترین سازوکار خرابی شامل ترک ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس است، در حالی که در الیاف با زاویه 0 درجه سازوکار شکست الیاف هم به خوبی قابل مشاهده است. به دلیل این‌که بارگذاری در جهت زاویه 0 درجه انجام شده الیاف نیروی بیشتری از حالت 90 درجه تحمل کرده و درصد شکست آن‌ها بیشتر است. زمانی که نمونه کامپوزیتی تحت بارهای سیکلیک قرار گرفته، آسیب از لبه‌ها و اطراف سوراخ شروع به پیشرفت به سمت یکدیگر کرده است. در فصل مشترک بین لایه‌های 0 و 90 درجه، ترک ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس در اثر جدایش این دو لایه قابل تشخیص است. این تصاویر

[1] Lateral Guage Middle

نشان‌دهنده درستی نتایج حاصل از روش‌های مربوط به تحلیل سیگنال‌های انتشار صوت است. با توجه به مقایسه دو روش خوشه‌بندی فازی و تبدیل بسته موجک و نتایج دیگر پژوهشگران در این زمینه [26] و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان به این نتیجه رسید که روش تبدیل بسته موجک عملکرد بهتر و مطمئن‌تری نسبت به روش خوشه‌بندی فازی دارد.

در شکل 19 نحوه جدایش الیاف کربن از ماتریس مشاهده می‌شود. این جدایش سبب منتشر شدن یک سیگنال صوتی می‌شود که حسگرهای انتشار صوت نصب شده روی نمونه آزمون آن را دریافت می‌کند. طی اجرای آزمون همه مکانیزم‌های آسیب هم‌زمان با یکدیگر اتفاق افتاده و سیگنال خام به صورت یک‌جا دریافت می‌گردد که بعداً باید به وسیله روش‌های مورد نظر تحلیل شود.

در شکل 20 الیاف دو لایه با جهت الیاف مختلف نمایش داده شده است. لایه‌ای که شکست الیاف در آن بیشتر است لایه 0 درجه بوده و لایه‌ای که جدایش الیاف از ماتریس و ترک ماتریسی در آن مشاهده می‌شود لایه با الیاف 90 درجه است. همان طور که در تصویر مشخص است در فصل مشترک بین دو لایه ترک ماتریسی به وضوح قابل مشاهده است. به عبارت دیگر الیاف در حین بارگذاری در لایه‌های 0 درجه حالت بحرانی‌تری داشته و به همین دلیل شکست الیاف در این لایه‌ها بیشتر است، اما در لایه 90 درجه ماتریس بیشتر تحت تأثیر شرایط بارگذاری قرار گرفته و دچار ترک‌خوردگی شده است.

در شکل 21 هر سه مکانیزم خرابی ترک ماتریسی، شکست فیبر و جدایش فیبر از ماتریس قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می‌شود ابتدا ماتریس ترک برداشته و سپس الیاف به تنهایی قادر به تحمل بار نبوده و آن‌ها نیز دچار شکست شده‌اند.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به شناسایی سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه تحت بارگذاری خستگی کمچرخه و درصد هر یک از آن‌ها با روش انتشار صوت پرداخته شد. محدوده فرکانسی ترک ماتریسی 100-250 kHz و محدوده فرکانسی شکست الیاف کربن 420-500 kHz مشخص شد و تنها بازه باقی‌مانده در محدوده فرکانسی یعنی بازه 250-420 kHz به جدایش الیاف از انتهایی مشخص شدند که بیشترین نوع خرابی مربوط به جدایش الیاف از

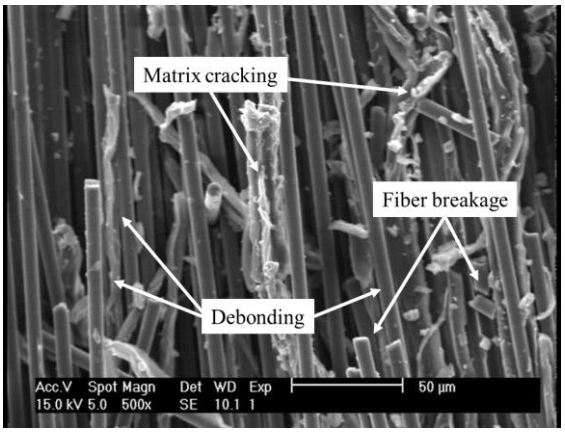

Fig. 18 SEM picture of specimen no.1 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 7 mm)

شکل 18 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ نمونه شماره 1 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 7 mm)

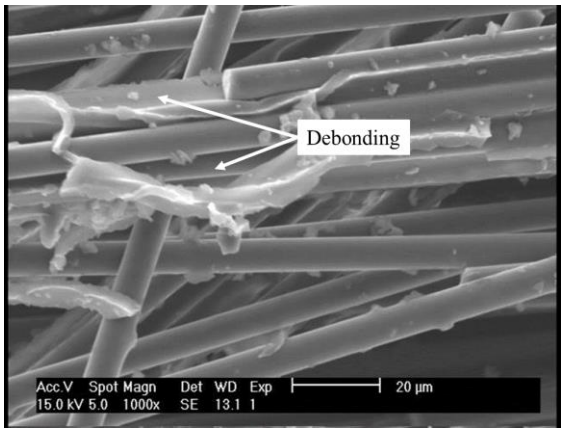

Fig. 19 SEM picture of specimen no.1 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 7 mm)

شکل 19 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ نمونه شماره 1 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 7 mm)

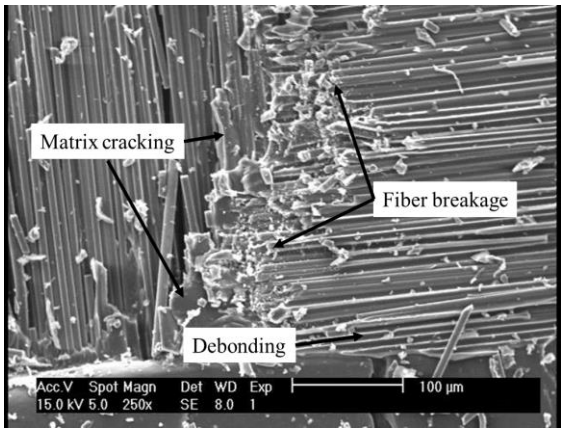

Fig. 20 SEM picture of specimen no.4 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 5.5 mm)

شکل 20 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ نمونه شماره 4 (فرکانس بارگذاری 200 mm/min و دامنه جابه‌جایی 5.5 mm)

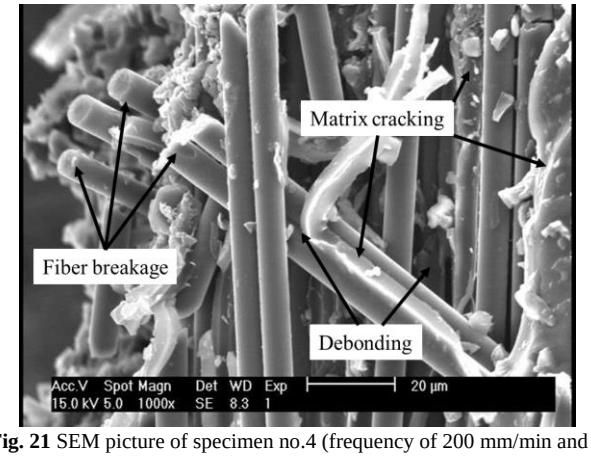

Fig. 21 SEM picture of specimen no.4 (frequency of 200 mm/min and displacement amplitude of 5.5 mm)

شکل 21 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه روی سوراخ نمونه شماره 4 (فرکانس بارگذاری 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 5.5mm)

ماتریس می‌شود. این دو روش با تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی ماتریس اختصاص یافت. سیگنال‌های حاصل از انتشار صوت حاصل از اعمال بارگذاری خستگی به دو روش تبدیل موجک بسته‌ای و خوشه‌بندی فازی

تحلیل شدند و درصد هر یک از این سازوکارها در سیکل‌های ابتدا، میانی و روبشی مقایسه گردیدند. نتایج نشان دادند که بیشترین اختلاف در استفاده از دو روش یادشده 16.9% و مربوط به شکست الیاف در نمونه شماره 4 (فرکانس 200mm/min و دامنه جابه‌جایی 5.5mm) است که بازدهی مناسب در دو روش تحلیل و تعیین سازوکارهای خرابی و درصد هر یک از آن‌ها در کامپوزیت‌های چندلایه تحت بارگذاری خستگی با انتشار صوت را نشان می‌دهد.

5- تقدیر و تشکر

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- منابع

[1] B. Mohammadi, S. Asl Kamkar, A. Farrokhabadi, Matrix cracking and induced delamination in symmetrically laminated composites subjected to static loading by using multi scale damage mechanics, *Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 9-24, 2017. (In Persian فارسی)

[2] C. U. Grosse, O. Masayasu, *Acoustic Emission Testing*, Springer, pp. 9, 2008.

[3] R. S. Williams, K. L. Reifsnider, Investigation of acoustic emission during fatigue loading of composite specimens, *Composite Materials*, Vol. 8, No. 4, pp. 340-355, 1974.

[4] O. J. Nixon-Pearson, S. R. Hallett, P. J. Withers, J. Rouse, Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental investigation, *Composite Structure*, Vol. 106, pp. 882-889, 2013.

[5] P. F. Liu, J. K. Chu, Y. L. Liu, J. Y. Zheng, A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission, *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 228-235, 2012

[6] L. Michalcova, K. Martin, Crack growth monitoring of CFRP composites loaded in different environmental conditions using acoustic emission method, *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 86-93, 2015.

[7] M. Saeedifar, M. Fotouhi, M. Ahmadi, H. Hosseini Toudeshky, Prediction of delamination growth in laminated composites using acoustic emission and cohesive zone modeling techniques, *Composite Structures*, Vol. 124, pp. 120-127, 2015.

[8] S. C. Woo, N. S. Choi, 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.

[9] M. Fotouhi, H. Heydari, M. Ahmadi, F. Pashmforoush, Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet and fuzzy c-means clustering, *Composite Materials*, Vol. 46, pp. 1795-1808, 2012.

[10] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage characterization of glass/epoxy composite under three-point bending test using acoustic emission technique, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 7, pp. 1380-1390, 2012.

[11] E. H. Saidane, D. Scida, M. Assarar, R. Ayad, Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fiber composites using acoustic emission, *Composite Structures*, Vol. 175, pp. 1-11, 2017.

[12] M. Bourchak, A. Khan, S. A. Badr, W. Harasani, Acoustic emission characterization of matrix damage initiation in woven CFRP composites, *Material Science and Applications*, Vol. 4, pp. 509-515, 2013.

[13] M. J. Laffan, S. T. Pinho, P. Robinson, L. Iannucci, A. J. Mc Millan, 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.

[14] E. Njuhovic, M. Brau, F. Wolff-Fabris, K. Starzynski, V. Altstadt, 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.

[15] ASTM D5766/D5766M-11, Standard Test Method for Open-Hole Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, 2011.

[16] ASTM E976-10, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM International, 2010.

[17] R. M. Rao, A. S. Bopardikar, *Wavelet Transforms: Introduction to Theory and Applications*, Addison Wesley Publishing Company, pp. 1-26, 1998.

[18] D. F. Walnat, *An Introduction to Wavelet Analysis*, Birkhauser Boston, pp. 350, 2002.

[19] M. Saeedifar, M. Fotuohi, R., Mohammadi, M. Ahmadi, M., Hajikhani, 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 فارسی)

[20] M. Fotuohi, S. Sadeghi, M. Jalalvand, M. Ahmadi, Analysis of the damage mechanisms in mixed-mode delamination of laminated composites using acoustic emission data clustering, *Thermoplastic Matrix Composite Materials*, Vol. 30, No. 3, pp. 318-340, 2017.

[21] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York and London, 1939.

[22] S. N. Omkar, S. Suresh, T. R. Raghavendra, V. Mani, Acoustic emission signal classification using fuzzy c-means clustering, *Proceedings of 9th International Conference on Neural Information Processing*, Vol. 4, Singapore, IEEE, pp. 1827-1831, 2002.

[23] A. R. Oskouei, H. Heydari, M. Ahmadi, M. Farajpur, 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] A. Marec, J. H. Thomas, R. E. Guerjouma, 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] ASTM D7615 / D7615M – 11, Standard Practice for Open-Hole Fatigue Response of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, 2011.

[26] R. Mohammadi, M. A. Najfabadi, M. Saeedifar, J. Yousefi, G. Minak, 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.

[27] M. Fotouhi, M. Ahmadi, Investigation of the mixed-mode delamination in polymer-matrix composites using acoustic emission technique, *Reinforce Plastic Composite*, Vol. 33, pp. 1767-1782, 2014.

[28] P. J. de Groot, P. A. M. Wijnen, R. B. F. Janssen, 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.