



ارزیابی پارامترهای آزمون نشر فرا آوایی با روش فازی در مواد مرکب هیبرید چند لایه

رامین خامدی^{1*}، محمد نیک مهر²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه زنجان، زنجان

* زنجان، صندوق پستی 38791 - 45371، khamedi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آذر 1393

پذیرش: 27 فروردین 1394

ارائه در سایت: 23 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

نشر فرا آوایی

کربن - بازالت / اپوکسی

فازی

چکیده

هدف از این مطالعه شناسایی اثرات استفاده از ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن بر روی خصوصیات ماده مرکب بازالت و کربن و همچنین تأثیر استفاده از ماده مرکب هیبریدی بر روی پارامترهای نشر فرا آوایی تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای باروش فازی است. یکی از اصلی‌ترین مشکلات شناسایی مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌ها به وسیله سیگنال‌های نشر فرا آوایی جداسازی مکانیزم‌های خرابی به علت اتفاق افتادن چندین نوع خرابی در طول بارگذاری مواد مرکب است. الگوریتم فازی ابزار مورد استفاده برای جداسازی رخداد‌های آکوستیکی در این مطالعه است. نتایج نشان داده که این روش خوشه‌بندی ارتباط مناسبی بین سیگنال‌های آکوستیکی و مکانیزم‌های خرابی و همچنین زمان تشخیص آنها ایجاد می‌کند. در این مقاله برای شناسایی اثرات استفاده از ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن از چندین توصیف‌گر سیگنال‌های آکوستیکی مانند دامنه، زمان استمرار، کانت، انرژی نشر فرا آوایی و زمان خیز استفاده گردیده است. ماده مرکب هیبریدی در ابتدا پرسیصداتر از قسمت‌های دیگر است که این نشان‌دهنده رشد مکانیزم‌های خرابی به صورت آهسته است. در نهایت به منظور صحت‌سنجی نتایج آکوستیکی از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.

Evaluation of Acoustic Emission parameters with fuzzy C-means in hybrid composite

Ramin Khamedi *, Mohammad Nikmehr

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

*P.O.B. 45371-38791 Zanjan, khamedi@znu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 January 2015
Accepted 16 April 2015
Available Online 13 May 2015

Keywords:
Acoustic Emission
Carbon - Basalt / epoxy
Fuzzy C- Means

ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the effects of hybrid basalt-carbon composite in composites properties reinforced by carbon and basalt fiber and also the effects of hybrid composite in Acoustic emission parameters under four point bending test by Non-destructive Acoustic Emission testing. One of the main problems of identification failure mechanisms by Acoustic emission signals is the discrimination of events due to different types of damage occurring during loading of composite material. Fuzzy C-means algorithm is the tool used in this paper to separate acoustic events. The results show that this method of clustering provides a better communication between the acoustic signals and damage mechanisms, as well as time of these damage mechanisms. Several acoustic signal descriptors such as amplitude, duration, count, acoustic energy and rise time were applied to identify the effects of hybrid carbon-basalt composite. Hybrid composite is initially noisier than the other parts, which means that progress of damage mechanisms is smoother. Finally, Scanning electron microscope observation was used in order to verify the feasibility of acoustic results.

1- مقدمه

ضربه‌ی بالاتر از ماده مرکب تقویت‌شده با رشته‌ای است که مدول الاستیسیته‌ی بالا را دارد. تحقیقاتی در مورد شناسایی خواص ماده مرکب هیبریدی و مقایسه آن در برابر ماده مرکب انجام شده است [1-6]. رشته کربن دارای خصوصیات از قبیل استحکام مکانیکی و مدول الاستیسیته بالا است و رشته بازالت دارای استحکام و مدول الاستیسیته مناسب است. باتوجه به خصوصیات مذکور رشته بازالت گزینه مناسبی برای ماده مرکب تقویت‌شده به وسیله رشته کربن است. ماده مرکب هیبریدی کربن-بازالت خصوصیات مانند وزن کم، رفتار ضربه و رفتار پیچشی مناسب و قیمتی کمتر نسبت به ماده‌ی مرکب تقویت‌شده با رشته کربن را دارد [7-9].

از ماده مرکب در کاربردهای مختلف مهندسی از قبیل ساخت بدنه اتومبیل و مخازن استفاده می‌شود. صنایع هوافضا، اتومبیل و کشتی‌سازی، در برخی از زمینه‌ها نیازمند موادی با خواص منحصر به فردی چون سفتی، استحکام بالا و جذب کننده خوب انرژی است. یکی از مواد مناسب برای این نوع کاربردها استفاده از ماده مرکب هیبریدی است. در این نوع ماده مرکب دو نوع رشته برای استحکام سازی استفاده می‌شود. یکی از رشته‌ها دارای مدول الاستیسیته‌ی بالا و رشته دیگر با مدول الاستیسیته‌ی پایین است. ماده مرکب هیبریدی دارای برخی خواص مانند تنش نهایی بیشتر و مقاومت به

Please cite this article using:

R. Khamedi, M. Nikmehr, Evaluation of Acoustic Emission parameters with fuzzy C-means in hybrid composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 402-408, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به وسیله رشته بازالت و کاربید سیلیسیم تقویت شده‌اند به وسیله آزمون نشر فرا آوایی توسط پارک و همکارانش مورد تحقیق قرار گرفت [31]. بررسی ترک‌های ماکرو در ماده مرکب کربن-کربن توسط نشر فرا آوایی به وسیله فیلیپی دیس و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه جداسازی مکانیزم‌های خرابی مختلف به وسیله شبکه‌ی هوشمند انجام گرفته است [32].

با توجه به بررسی‌های انجام شده، تحقیقات بسیاری در زمینه نشر فرا آوایی و خواص مکانیکی ماده مرکب انجام شده است. این مقاله به منظور مطالعه الگوریتم فازی⁶ و کاربرد آن بر روی پارامترهای نشر فرا آوایی به منظور شناسایی دقیق خرابی ماده مرکب هیبریدی و اثرات استفاده از ماده مرکب هیبریدی بر روی خصوصیات ماده مرکب و پارامترهای نشر فرا آوایی است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم فوق، اطلاعات آکوستیک امیشن مربوط به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن در زمینه اپوکسی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از توانمندی این الگوریتم در تحلیل اطلاعات نشر فرا آوایی است.

2- مراحل آزمایش

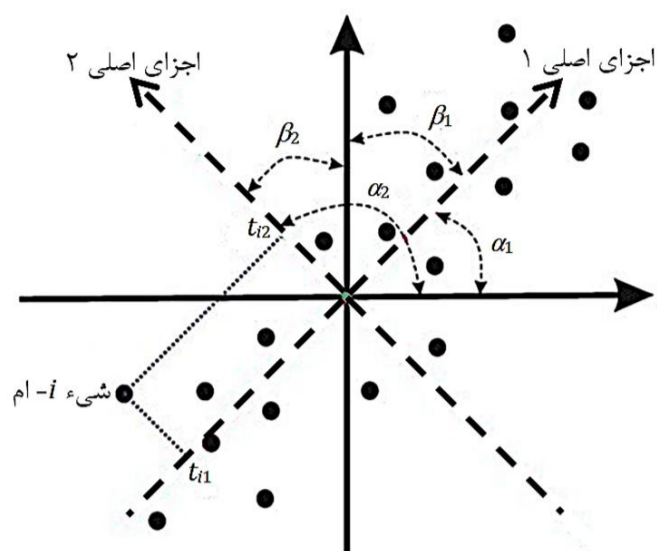
رشته‌های بازالت⁷ و کربن⁸ به طور متناوب در کنار یکدیگر قرار گرفته و به یکدیگر بافته شده‌اند که به ترتیب توسط شرکت‌های بازالت فلوکارت و ساتی کامپوزیت ساخته شده‌اند. چگالی رشته‌ها به ترتیب برای رشته بازالت و کربن 220 g/m^3 و 160 g/m^3 می‌باشند. کسر حجمی رشته‌های بازالت و کربن به ترتیب برابر $315 \pm 0/1$ و $325 \pm 0/1$ و همچنین ضخامت رشته‌ها به ترتیب برابر $3/4 \pm 0/05 \text{ mm}$ و $3/5 \pm 0/05 \text{ mm}$ است. رزین اپوکسی به وسیله شرکت الانتس کاماتینی ارائه شده که به عنوان پلیمر زمینه انتخاب شده است (شرکت‌های فوق ایتالیایی هستند). تمام ساختارها به وسیله 30 لایه با یک حجم و ضخامت یکسان ساخته شده‌اند. در این ساختار رشته ترکیبی در هر لایه، 7 رشته بازالت و 6 رشته کربن به طور متناوب روی هم چیده شده‌اند. رشته‌های بازالت در لایه بیرونی قرار گرفته‌اند. لایه‌های ساخته‌شده به منظور ریکآوری 12 ساعت در دمای اتاق و 4 ساعت در دمای 70 C^0 نگه داشته شده‌اند. نمونه‌های تحت آزمون با ابعاد $(180\text{mm} \times 60\text{mm} \times 3/4\text{mm})$ (ضخامت \times عرض \times طول) آماده شده‌اند. آزمایش خمش چهارنقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D 6272 انجام شده که در شکل 1 نشان داده شده است. در حین آزمون اطلاعات آکوستیکی توسط دستگاه نشر فرا آوایی ساخته شده توسط شرکت والن سیستم⁹ جمع‌آوری شده است. تنظیمات نشر فرا آوایی برای این آزمایش به ترتیب ذیل است.

آستانه¹⁰ دامنه 35dB، زمان تجدید¹¹ $0/4\text{ms}$ و مدت زمان استمرار¹² $0/2\text{ms}$ می‌باشند. دو سنسور نشر فرا آوایی با پهنای باند (100-1500kHz) برای دریافت داده‌های نشر فرا آوایی در دو انتهای سطح نمونه قرار داده شده و از روغن گریس به عنوان عامل اتصال دهنده استفاده شده است.

شناسایی خصوصیات و افزایش قابلیت اطمینان ماده مرکب هیبریدی به وسیله آزمون غیرمخرب انجام می‌شود. یکی از بهترین و حساس‌ترین انواع آزمون‌های غیر مخرب برای شناسایی مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب هیبریدی آزمون غیر مخرب نشر فرا آوایی¹ است. در مقایسه‌ی آزمون غیر مخرب نشر فرا آوایی با انواع دیگر آزمون‌های غیر مخرب، نشر فرا آوایی زمان واقعی مکانیزم‌های خرابی را دقیق‌تر شناسایی می‌کند و قابلیت بازرسی آنلاین و مستمر بر روی خرابی و ساختار را دارد [10-12]. اونیو [13] بر روی منابع نشر فرا آوایی در ماده مرکب که شامل شکست زمینه، شکست رشته‌ها و جدایش رشته‌ها از زمینه است مطالعه کرده است. یک مجموعه تحقیقات بر روی پارامترهای نشر فرا آوایی مانند دامنه²، کانت، انرژی و ارتباط بین این پارامترهای نشر فرا آوایی و مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب انجام شده است [14-22]. ژانگ و یان [23] مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب لایه‌ای را تحت کشش تک محوری به وسیله نشر فرا آوایی مطالعه کرده‌اند. نشر فرا آوایی آزمونی مناسب و موثر است که برای تشخیص انواع مختلف خرابی در ماده مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل اصلی تجزیه و تحلیل داده‌های نشر فرا آوایی جداسازی منابع مختلف خرابی است. هدف از تجزیه و تحلیل خوشه‌های جداسازی یک سری از داده‌ها به یک تعداد از خوشه‌ها است. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای یک ابزار مناسب برای کشف و درک اطلاعات است. نتایج حاصل‌شده از خوشه‌بندی پارامترهای نشر فرا آوایی ماده مرکب شیشه- پلی استر برای اعتبار بخشی به این روش توسط گودین و همکارانش مورد استفاده قرار گرفت [24]. لوتاس و کوستوپولوس [11] مطالعاتی بر روی ماده مرکب کربن-کربن تحت آزمایش کشش به وسیله آزمون غیر مخرب نشر فرا آوایی داشته‌اند. الگوریتم شناسایی بدون نظارت³ برای خوشه‌بندی پارامترهای نشر فرا آوایی در طول آزمایش استفاده شده که نتیجه خوشه‌بندی و آنالیز آن ارتباط مناسبی با مکانیزم‌های خرابی دارد. کوستوپولوس و همکارانش [25] مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب سرامیکی شیشه-کاربید سیلیسیم را به وسیله آزمون غیر مخرب نشر فرا آوایی و روش خوشه‌بندی بدون نظارت بررسی کرده‌اند. به منظور شناسایی دقیق‌تر مکانیزم‌های خرابی به وسیله پارامترهای نشر فرا آوایی الگوریتم کی‌مینز⁴ برای خوشه‌بندی این پارامترها توسط پاپاس و کوستوپولوس مطالعه گردیده است [26]. به منظور درک بهتر و دقیق‌تر مکانیزم‌های خرابی و کنترل عمر ماده مرکب کربن-کاربید سیلیسیم، روش‌های خوشه‌بندی با نظارت و بدون نظارت برای خوشه‌بندی پارامترهای نشر فرا آوایی تحت آزمایش خستگی دینامیکی در دمای بالا توسط مومون و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [27]. جانسون [28] پارامترهای نشر فرا آوایی گرفته‌شده از ماده مرکب شیشه-اپوکسی تحت تست کشش را به وسیله آنالیز اجزای اصلی⁵ مورد بررسی قرار داد. آنالیز اجزای اصلی یک روش خوشه‌بندی بدون نظارت پارامترهای نشر فرا آوایی است. اسکوهی و همکارانش [29] برای دسته‌بندی بهتر و جداسازی دقیق‌تر مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب شیشه-پلی استر از روش آنالیز فازی به همراه آنالیز اجزای اصلی استفاده کرده‌اند. مقایسه بین ماده مرکب با رشته شیشه، کربن و ماده مرکب هیبریدی شیشه-کربن و مکانیزم‌های خرابی این ماده مرکب‌ها توسط شورت و سام اسکیل مورد مطالعه قرار گرفت [30]. ویژگی‌های بین رشته و زمینه و استحکام برشی در ماده مرکب اپوکسی که

6- Fuzzy C- Means
7- BAS 220,1270,P
8- CC160
9- Vallen Systeme GmbH
10- Threshold
11- Rearm Time
12- Duration Discrimination Time

1- Acoustic Emission
2- Amplitude
3- Unsupervised
4- K-Means
5- principal component analysis



شکل 2 توضیح آنالیز اجزای اصلی

نقطه مرکزی آن دسته و ماکزیمم کردن فاصله بین نقاط مرکزی هر دسته نسبت به دسته دیگر است.

با توجه به اینکه هر داده با یک درجه‌ای از عضویت به کلاس خاص متعلق است، لذا برای نقطه‌ای مثل x_k مقادیر تابع عضویت در کلاس i -ام بصورت زیر خواهد بود:

$$\mu_{ik} = \mu_{Ai}(x_k) \in [0,1] \quad (2)$$

باید در نظر گرفت که مجموع تمامی مقادیر عضویت برای یک نقطه خاص در تمامی خوشه‌ها برابر با یک خواهد بود:

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

حال اگر تابع هدف به فرم زیر تعریف گردد:

$$J(u, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^{m'} (d_{ik})^2 \quad (4)$$

در آن d_{ik} فاصله‌ی بین نقطه x_k از مرکز v_i است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[\sum_{j=1}^m (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

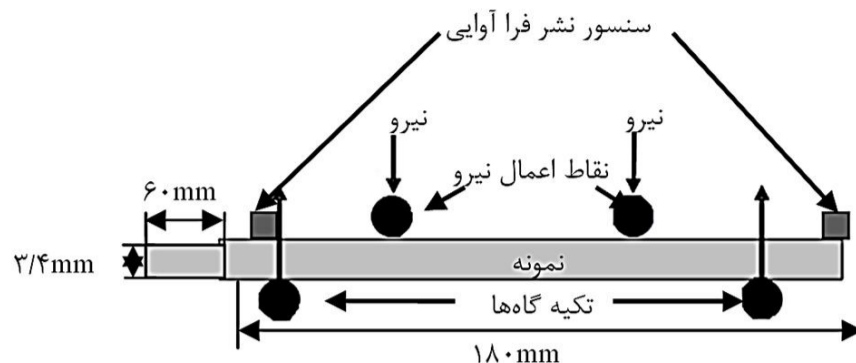
μ_{ik} ، مقدار عضویت k -امین داده در خوشه i -ام و m' ، پارامتر وزنی است که مقدار فازی بودن کلاس بندی را معین می‌کند و برای مقادیر m' برابر با یک، مقادیر تابع عضویت به یک و صفر تبدیل خواهند شد. همچنین v_i مرکز کلاس i -ام خواهد بود.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^{m'} \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^{m'}} \quad (6)$$

در فرایند کلاس بندی فازی بعد از تعیین تعداد خوشه‌ها برای داده‌ها، ماتریس تابع عضویت μ با مقادیری بین صفر تا یک به صورت تصادفی انتخاب و سپس برای هر کدام از نقاط این مقادیر اختصاص داده می‌شوند. در مرحله بعد مقادیر مربوط به مراکز خوشه‌ها تعیین شده و دوباره مقادیر ماتریس عضویت محاسبه می‌شوند و این عملیات تا جایی تکرار می‌شود که رابطه زیر برقرار گردد:

$$\|U^{r+1} - U^r\| \leq \varepsilon \quad (7)$$

r تعداد گام‌های تکرار و ε مقدار خطا است که نسبت به گام قبلی محاسبه می‌شود و باید از یک حد تعیین شده کمتر باشد تا اینکه عملیات دسته بندی متوقف شده و کامل گردد.



شکل 1 شکل شماتیک نمونه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

3- روش خوشه بندی

3-1- آنالیز اجزای اصلی

آنالیز اجزای اصلی به منظور استخراج اطلاعات اصلی در دسته‌ای از داده‌ها استفاده می‌شود. آنالیز اجزای اصلی یک روش ریاضی است که از انتقال قائم برای نمایش یک مجموعه از مشاهدات استفاده می‌شود [34,33]. آنالیز اجزای اصلی، داده‌ها را در جهت‌های متعامد با بیشترین دامنه‌ی تغییرات تصویر می‌کند و به علت وابسته بودن به داده‌ی ورودی، جای خود را در الگوریتم کاربردی و عملی به تبدیل گسسته‌ی کسینوسی¹ داده است. این روش با تقلیل ابعاد از n به p ($p \leq n$) برای کد کردن فشرده داده قابل استفاده است. با استفاده از آنالیز اجزای اصلی بدون از دست رفتن قسمت عمده اطلاعات، اجزای وابسته به تغییرات کم، از داده حذف می‌شوند. بعد از نرمالیزه کردن داده‌های ماتریس مورد نظر، اگر برای هر مشخصه n نقطه و برای هر نقطه k متغیر وجود داشته باشد، این نقاط می‌توانند به صورت ماتریس X در ابعاد $(n \times k)$ نوشته شوند. در این مقاله هر نقطه، یک اتفاق ثبت شده توسط دستگاه نشر فرا آوایی بوده که دارای k متغیر است. n نقطه می‌تواند در k بعد نمایش داده شود و با یکدیگر مقایسه گردند. به هر حال وقتی تعداد ابعاد زیاد است این فضای k بعدی قابل نمایش نیست. آنالیز اجزای اصلی با کاهش ابعاد می‌تواند ابعاد اصلی را نمایش دهد. در شکل 2 دو بعد از اجزای اصلی نشان داده شده است.

اجزای اصلی 1 و اجزای اصلی 2 به ترتیب دارای ماکسیمم واریانس بوده و این دو مؤلفه عمود بر یکدیگر می‌باشند. شاخص‌های متفاوتی برای انتخاب تعداد خوشه‌ی بهینه وجود دارد. در این مقاله از فرمول دیویس و بلدین² برای تعیین تعداد خوشه‌ی بهینه بهره گرفته شده است. مقدار دیویس و بلدین برای تعداد خوشه‌های مختلف محاسبه می‌شود که پایین ترین مقدار نشان دهنده مناسب ترین تعداد خوشه است. مقدار دیویس و بلدین به وسیله فرمول زیر محاسبه می‌شود. S_c فاصله‌ی درون خوشه و d_{ce} فاصله‌ی بین خوشه‌ها است

$$DB = \frac{1}{c} \sum_{k=1}^c \max_{t \neq k} \left[\frac{S_c(Q_k) - S_c(Q_t)}{d_{ce}(Q_k, Q_t)} \right] \quad (1)$$

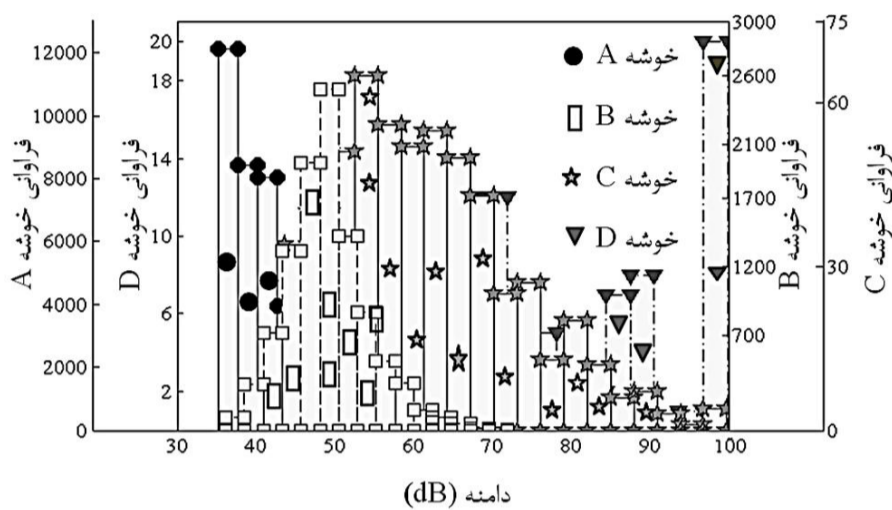
3-2- الگوریتم فازی

روش فازی یک تکنیک خوشه بندی است بطوریکه در آن هر داده متعلق به یک دسته بوده و دارای یک درجه‌ای است که به عنوان تابع عضویت قابل بیان است. این روش توسط بزدک معرفی شده و جزء روش‌های پیشرفته خوشه بندی به شمار می‌آید [36,35]. در این روش تابع هدف برای کلاس بندی n داده به c کلاس مختلف بکار گرفته می‌شود. هدف اصلی تابع هدف مینیمم کردن فاصله بین داده‌ها در یک دسته خاص از نقطه‌ای بنام

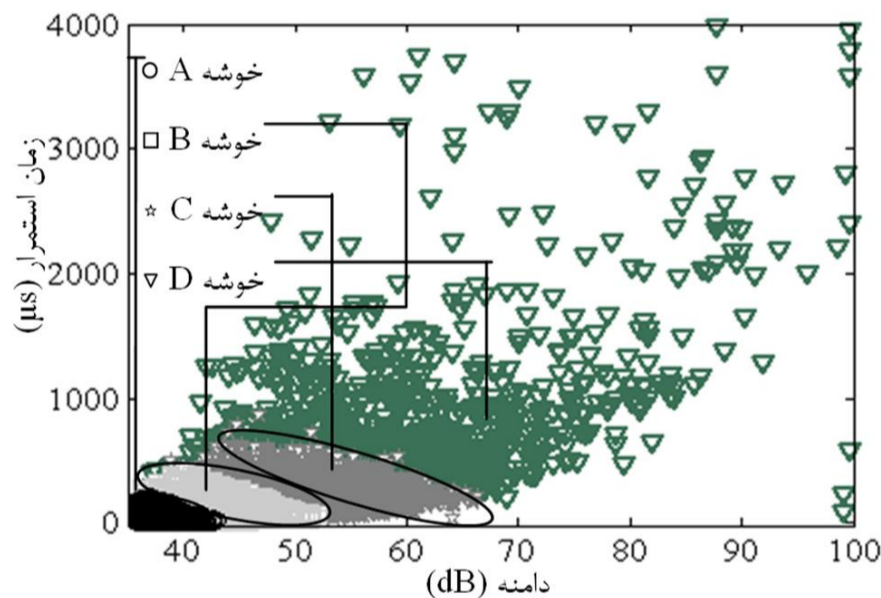
1- Discrete Cosine Transformation
2- Davies and Bouldin index

4- نتایج و بحث

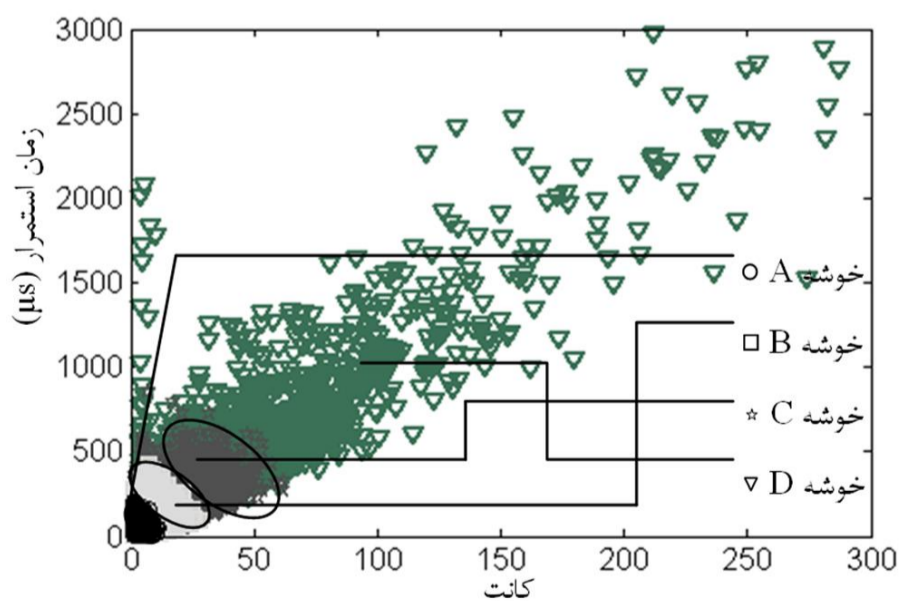
نشر فرا آوایی انواع مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب را شناسایی می‌کند. در این مطالعه به منظور شناسایی اثرات استفاده از ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن بر روی خصوصیات ماده مرکب بازالت و کربن و مشخص کردن مکانیزم-های خرابی ماده مرکب هیبریدی کربن-بازالت و همچنین تأثیر استفاده از ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن بر روی پارامترهای نشر فرا آوایی از 5 توصیف‌گر نشر فرا آوایی به نام‌های دامنه، انرژی، زمان خیز 1، زمان استمرار 2 و کانت استفاده شده است. توصیف‌گرها دارای واحد یکسان نمی‌باشند. بی بعد کردن این توصیف‌گرها به وسیله روش نرمال کردن انجام شده است. نرمال کردن با استفاده از انحراف معیار انجام می‌شود. به منظور کاهش ابعاد، روش آنالیز اجزای اصلی استفاده شده است. خوشه‌بندی بر روی دو بعد اجزای اصلی که بیشترین مقدار درصد واریانس را دارند، انجام شده است. شکل 3، درصد واریانس هر جزء اصلی را نشان می‌دهد. به وضوح قابل مشاهده است که اجزای اصلی 1 و اجزای اصلی 2 بیشترین مقدار درصد واریانس اجزای اصلی را دارند، که به معنی مهم‌ترین ابعاد اجزای اصلی برای خوشه‌بندی است. در گام بعدی تعداد خوشه‌های بهینه به وسیله فرمول دیویس و بلدین محاسبه شده است. کمترین مقدار دیویس و بلدین به مفهوم تعداد خوشه‌ی بهینه است. مقدار دیویس و بلدین برای هر خوشه‌بندی فازی محاسبه گردیده که در شکل 4 نمایش داده شده است. با توجه به شکل 4 کمترین مقدار دیویس و بلدین برای چهار خوشه است. براین اساس چهار مکانیزم خرابی شکست زمینه، جدایش رشته از زمینه، شکست رشته بازالت و رشته کربن در طول آزمایش قابل شناسایی است.



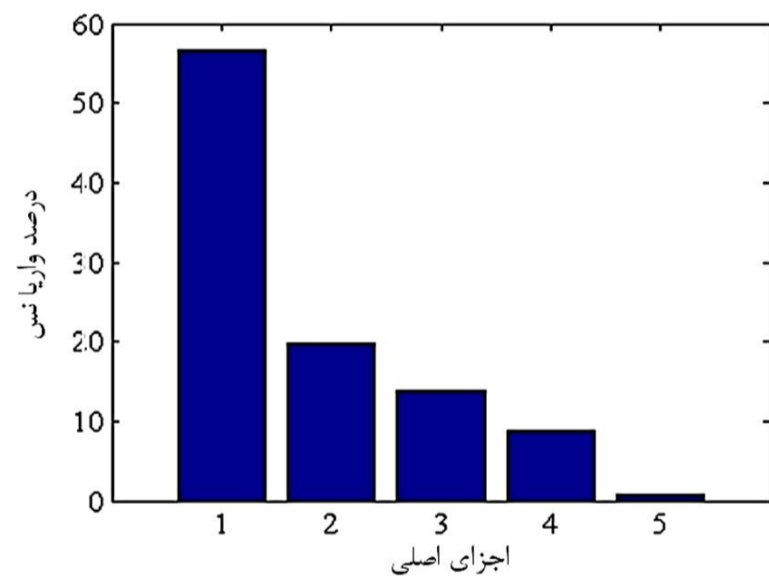
شکل 5 پراکندگی تجمعی دامنه برای هر خوشه



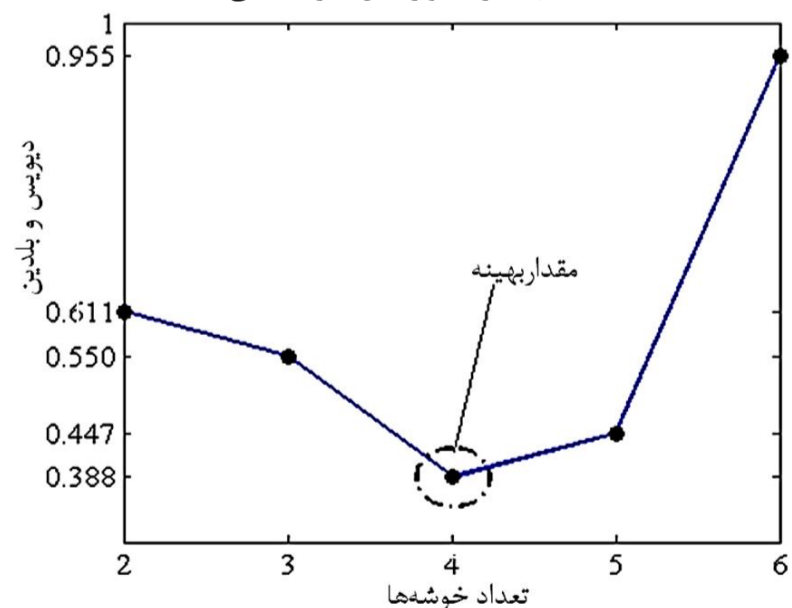
شکل 6 دامنه - زمان استمرار خوشه‌ها



شکل 7 کانت - زمان استمرار خوشه‌ها



شکل 3 درصد واریانس اجزای اصلی



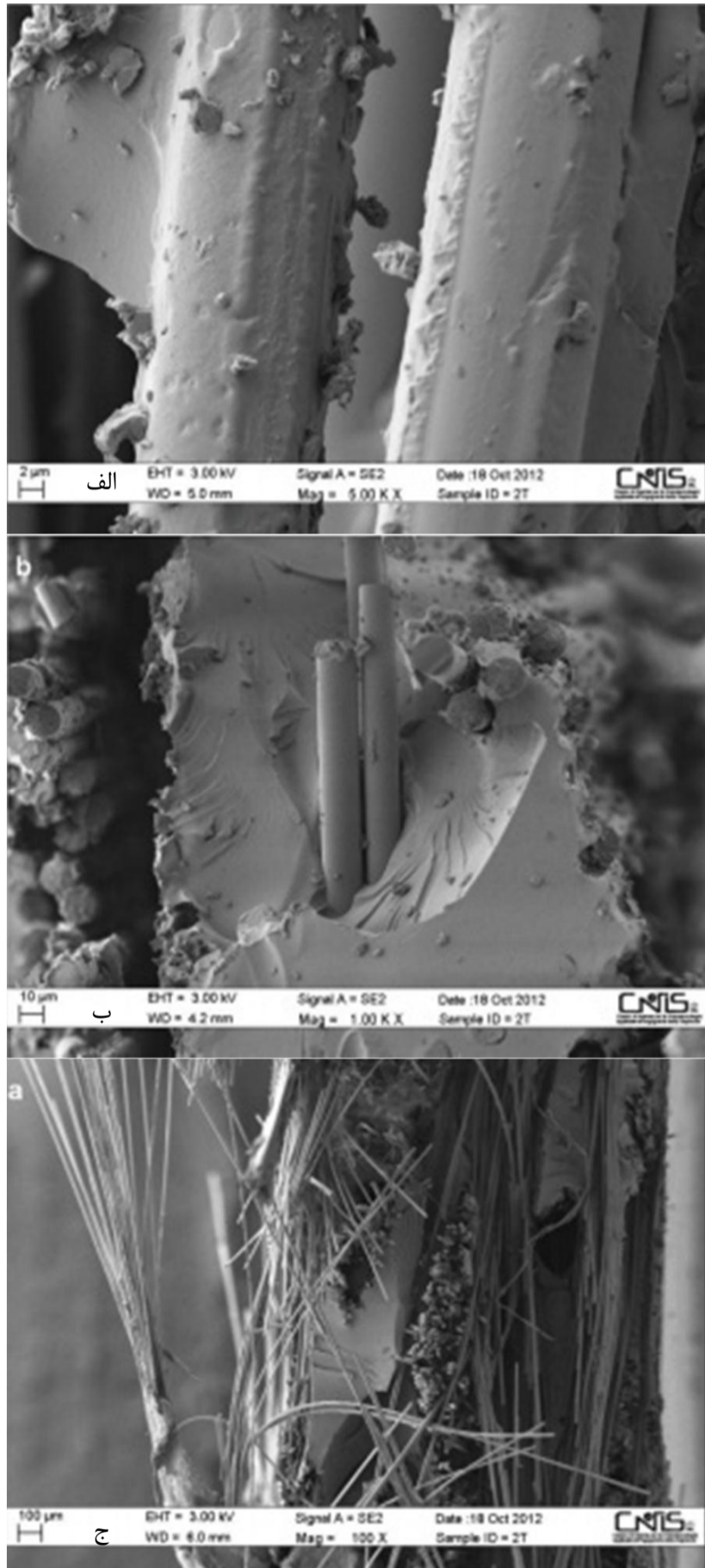
شکل 4 مقدار فرمول دیویس و بلدین برای کلاسترها

- 1- Rise time
- 2- Duration

مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی¹ از مکانیزم‌های خرابی در شکل 8 نشان داده شده است. در این تصویرها مکانیزم‌های شکست زمینه، تغییر شکل زمینه، جدایش رشته‌ها از زمینه، و شکست رشته‌ها که توسط روش فازی پیش‌بینی شده بود به خوبی نمایش داده شده است و خرابی را در لایه‌های مختلف نشان می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استفاده از ماده مرکب هیبریدی بر روی خصوصیات ماده مرکب و داده‌های آکوستیکی بررسی شده است و همچنین مکانیزم‌های



شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از شکست لایه‌های ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن. شکل الف: تغییر شکل زمینه، شکل ب: جدایش رشته از زمینه و شکل ج: شکست رشته را نشان می‌دهد

بر اساس مقالات مربوط به سیگنال‌های نشر فرا آوایی در ماده مرکب کربن، دامنه‌ی زیر 50 dB متعلق به شکست زمینه اپوکسی، دامنه بین 50-80 dB مربوط به جدایش رشته و زمینه و دامنه بین 80-100 dB مربوط به شکست رشته کربن است [37-45]. توزیع دامنه در ماده مرکب بازالت بدین شرح است. دامنه برای شکست زمینه اپوکسی زیر 40 dB بوده و دامنه بین 40-60 dB مربوط به جدا شدن رشته و زمینه و دامنه‌ی بالاتر از 60 dB مربوط به شکست رشته بازالت است [7, 31, 8]. جدول 1 خلاصه‌ای از قلمرو هر خوشه را نمایش می‌دهد.

در این مطالعه از هر دو روش مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی و روش نشر فرا آوایی برای شناسایی مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب هیبریدی کربن-بازالت بهره برده شده است. برای برقراری ارتباط بین 4 خوشه سیگنال‌های آکوستیکی به دست آمده و مکانیزم‌های خرابی از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است و نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازه آکوستیکی مکانیزم‌های خرابی برای شکست زمینه اپوکسی در بازه دامنه dB (38-42)، جدایش رشته از زمینه در بازه dB (45-55) و شکست رشته‌های بازالت و کربن به ترتیب در بازه‌های dB (58-75) و dB (80-100) دامنه است که به ترتیب مربوط به خوشه‌های A, B, C, D می‌باشند و با نتایج به دست آمده از مقالات مطالعه شده مطابقت دارد [14, 46, 47]. دامنه مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب با ماده مرکب هیبریدی شبیه یکدیگر می‌باشند [37]. مدول الاستیسیته بازالت کمتر از کربن است. براساس مدول الاستیسیته، شکست رشته بازالت در طول آزمایش زودتر از رشته کربن است و این نتیجه تطبیق خیلی خوبی با سیگنال‌های نشر فرا آوایی حاصل شده از شکست رشته بازالت و کربن را دارد. مقدار کانت در ماده مرکب هیبریدی بزرگ‌تر از ماده مرکب است [30]. پراکندگی کانت ماده مرکب هیبریدی بازالت-کربن که به ترتیب مربوط به شکست زمینه اپوکسی، جدایش رشته از زمینه، شکست رشته بازالت و شکست رشته کربن است برابر (7-1)، (32-10)، (180-50)، (300-500) می‌باشند. مقدار کانت به دست آمده بزرگ‌تر از ماده مرکب کربن و بازالت است.

پراکندگی زمان استمرار در ماده مرکب کربن بدین ترتیب است: شکست زمینه اپوکسی در بازه μs (200-800)، جدا شدن رشته و زمینه در بازه زمان استمرار μs (800-1000) و شکست رشته کربن در بازه μs (2000-1000) است [43, 45]. شکست زمینه اپوکسی و رشته بازالت در ماده مرکب بازالت به ترتیب در بازه μs (0-200) و μs (300-2200) شناسایی شده است. پراکندگی زمان استمرار در خوشه‌های A, B, C, D به ترتیب در بازه μs (0-500)، μs (500-900)، μs (900-1500)، μs (3000-5000) است. زمان استمرار حاصل شده از ماده مرکب هیبریدی بزرگ‌تر از ماده مرکب کربن و بازالت است.

جدول 1 خلاصه‌ای از قلمرو هر خوشه

ردیف	دامنه (dB)	زمان استمرار (μs)	کانت
خوشه A	38-42	0-500	1-7
خوشه B	45-55	500-900	10-32
خوشه C	58-75	900-1500	50-180
خوشه D	80-100	3000-5000	300-500

1- Scanning electron microscope (SEM)

- [17] D.-J. Yoon, W. J. Weiss, S. P. Shah, Assessing damage in corroded reinforced concrete using acoustic emission, *Journal of engineering mechanics*, Vol. 126, No. 3, pp. 273-283, 2000.
- [18] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, 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)
- [19] 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, No. 7, pp. 1451-1458, 2007.
- [20] C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T. Gan, P. Purnell, M. Pharaoh, Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 12, pp. 1819-1827, 2004.
- [21] G. N. Morscher, J. Martinez-Fernandez, M. J. Purdy, Determination of Interfacial Properties Using a Single-Fiber Microcomposite Test, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 79, No. 4, pp. 1083-1091, 1996.
- [22] N. Ativitavas, T. Pothisiri, T. J. Fowler, Identification of fiber-reinforced plastic failure mechanisms from acoustic emission data using neural networks, *Journal of composite materials*, Vol. 40, No. 3, pp. 193-226, 2006.
- [23] X. Zhuang, X. Yan, Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 3, pp. 444-449, 2006.
- [24] N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, L. Salmon, Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers, *Ndt & E International*, Vol. 37, No. 4, pp. 253-264, 2004.
- [25] V. Kostopoulos, T. Loutas, K. Dassios, Fracture behavior and damage mechanisms identification of SiC/glass ceramic composites using AE monitoring, *Composites science and technology*, Vol. 67, No. 7, pp. 1740-1746, 2007.
- [26] Y. Z. Pappas, V. Kostopoulos, Toughness characterization and acoustic emission monitoring of a 2-D carbon/carbon composite, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 68, No. 14, pp. 1557-1573, 2001.
- [27] S. Momon, N. Godin, P. Reynaud, M. R'Mili, G. Fantozzi, Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 2, pp. 254-260, 2012.
- [28] M. Johnson, Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis, *NDT & E International*, Vol. 35, No. 6, pp. 367-376, 2002.
- [29] A. Refahi Oskouei, H. Heidary, M. Ahmadi, M. Farajpur, Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites, *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 416-422, 2012.
- [30] D. Short, J. Summerscales, Amplitude distribution acoustic emission signatures of unidirectional fibre composite hybrid materials, *Composites*, Vol. 15, No. 3, pp. 200-206, 1984.
- [31] J.-M. Park, W.-G. Shin, D.-J. Yoon, A study of interfacial aspects of epoxy-based composites reinforced with dual basalt and SiC fibres by means of the fragmentation and acoustic emission techniques, *Composites science and technology*, Vol. 59, No. 3, pp. 355-370, 1999.
- [32] T. Philippidis, V. Nikolaidis, A. Anastassopoulos, Damage characterization of carbon/carbon laminates using neural network techniques on AE signals, *NDT & E International*, Vol. 31, No. 5, pp. 329-340, 1998.
- [33] I. Jolliffe, *Principal component analysis*: Wiley Online Library, 2005.
- [34] E. Oja, Neural networks, principal components, and subspaces, *International journal of neural systems*, Vol. 1, No. 01, pp. 61-68, 1989.
- [35] J. C. Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*: Kluwer Academic Publishers, 1981.
- [36] S. Omkar, S. Suresh, T. Raghavendra, V. Mani, Acoustic emission signal classification using fuzzy C-means clustering, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 1827-1831.
- [37] T. Brown, J. Mitchell, Acoustic emission evaluation of automotive hybrid composites and attachments, in *Proceeding of*.
- [38] J. Berthelot, J. Rhazi, Acoustic emission in carbon fibre composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 411-428, 1990.
- [39] M. Bourchak, I. Farrow, I. Bond, C. Rowland, F. Menan, Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 3, pp. 457-470, 2007.
- [40] P. Liu, J. Chu, Y. Liu, J. Zheng, A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission, *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 228-235, 2012.
- [41] H.-D. Yun, W.-C. Choi, S.-Y. Seo, Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets, *NDT & E International*, Vol. 43, No. 7, pp. 615-628, 2010.
- [42] J. Bohse, Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 8, pp. 1213-1226, 2000.
- [43] R. Gutkin, C. Green, S. Vangrattanachai, S. Pinho, P. Robinson, P. Curtis, On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern

خرابی ماده مرکب هیبریدی کربن-بازالت با روش غیر مخرب نشر فرا آوایی مورد مطالعه قرار گرفت. برای تحلیل داده‌های نشر فرا آوایی از الگوریتم خوشه‌بندی فازی استفاده شده است. استفاده از پراکنندگی تجمعی زمان استمرار، کانت و دامنه روش مناسبی برای به دست آوردن زمان مکانیزم‌های خرابی است. با مقایسه پارامترهای نشر فرا آوایی به دست آمده از ماده مرکب کربن، بازالت و ماده مرکب هیبریدی کربن-بازالت، ماده مرکب هیبریدی در ابتدا پر صدا تر از ماده مرکب است و زمان استمرار و کانت حاصل شده از ماده مرکب هیبریدی بزرگتر از ماده مرکب است. ماده مرکب هیبریدی در ابتدا پر صدا تر از قسمت‌های دیگر می‌باشند که به معنی رشد مکانیزم‌های خرابی ماده مرکب هیبریدی به صورت آهسته و آرام است. برای برقراری ارتباط بین مکانیزم‌های خرابی و سیگنال‌های آکوستیکی و همچنین به منظور صحت‌گذاری بر نتایج حاصل شده از پارامترهای نشر فرا آوایی مشاهدات میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده قرار گرفته است و تطابق خوبی بین نتایج کار انجام شده و مشاهدات میکروسکوپی دیده می‌شود.

6- مراجع

- [1] J. Hazen, Carbon/fiberglass wind blades planned, *High Perform Compos*, Vol. 11, pp. 13, 2003.
- [2] K. S. Pandya, C. Veerajju, N. Naik, Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 4094-4099, 2011.
- [3] A. Bunsell, B. Harris, Hybrid carbon and glass fibre composites, *Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 157-164, 1974.
- [4] K. Saka, J. Harding, A simple laminate theory approach to the prediction of the tensile impact strength of woven hybrid composites, *Composites*, Vol. 21, No. 5, pp. 439-447, 1990.
- [5] J. Summerscales, D. Short, Carbon fibre and glass fibre hybrid reinforced plastics, *Composites*, Vol. 9, No. 3, pp. 157-166, 1978.
- [6] P. Manders, M. Bader, The strength of hybrid glass/carbon fibre composites, *Journal of Materials Science*, Vol. 16, No. 8, pp. 2233-2245, 1981.
- [7] T. Czigany, Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: mechanical properties and acoustic emission study, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 16, pp. 3210-3220, 2006.
- [8] F. Sarasini, J. Tirillò, L. Ferrante, M. Valente, T. Valente, L. Lampani, P. Gaudenzi, S. Cioffi, S. Iannace, L. Sorrentino, Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 59, pp. 204-220, 2014.
- [9] I. Ary Subagia, Y. Kim, L. D. Tijing, C. S. Kim, H. K. Shon, Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [10] A. Bakhtiary Davijani, M. Hajikhani, M. Ahmadi, Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 3059-3065, 2011.
- [11] T. Loutas, V. Kostopoulos, Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites. Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution, *Composites science and technology*, Vol. 69, No. 2, pp. 265-272, 2009.
- [12] A. Refahi Oskouei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1444-1455, 2011.
- [13] T. Uenoya, Acoustic emission analysis on interfacial fracture of laminated fabric polymer matrix composites, *Journal of acoustic emission*, Vol. 13, No. 3-4, pp. S95-S102, 1995.
- [14] O. Siron, G. Chollon, H. Tsuda, H. Yamauchi, K. Maeda, K. Kosaka, Microstructural and mechanical properties of filler-added coal-tar pitch-based C/C composites: the damage and fracture process in correlation with AE waveform parameters, *Carbon*, Vol. 38, No. 9, pp. 1369-1389, 2000.
- [15] R. khamedi, E. porsaedi, M. jabbari, Research corrosion in stainless steel with acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.14, No. 2, pp. 195-200, 2014 (In Persian).
- [16] R. El Guerjouma, J.-C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fibre reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, *Advanced engineering materials*, Vol. 3, No. 8, pp. 193-226 2001.

- [46] P. Belalpour dastjerdi, M. Fotouhi, S. Fotouhi, M. Ahmadi, Acoustic emission based study to investigate the initiation and growth of delamination in composite materials, *Modares mechanical Engineering*, Vol.14, No. 3, pp. 78-84, 2014 (In Persian)
- [47] R. Khamed, M. Nikmehr, Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon- epoxy composite properties by Acoustic Emission, *Modares mechanical Engineering*, Vol.15 No. 4, pp. 335-360, 2015 (In Persian)
- recognition and peak frequency analyses, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 4, pp. 1393-1407, 2011.
- [44] G. Minak, A. Zucchelli, *Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques*: Nova Science Publishers, New York, pp. 165-207, 2008.
- [45] R. Palazzetti, A. Zucchelli, C. Gualandi, M. Focarete, L. Donati, G. Minak, S. Ramakrishna, Influence of electrospun Nylon 6, 6 nanofibrous mats on the interlaminar properties of Gr-epoxy composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 571-579, 2012.