



# شناسایی اثرات نانو فیبر نایلون بر روی خصوصیات کامپوزیت کربن - اپوکسی با استفاده از نشر فرا آوایی

رامین خامدی<sup>1\*</sup>، محمد نیک مهر<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان  
\* khamedi@znu.ac.ir، 45371-38791

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 دی 1393  
پذیرش: 11 بهمن 1393  
ارائه در سایت: 16 اسفند 1393  
کلیدواژگان:  
نشر فرا آوایی  
کامپوزیت کربن - اپوکسی  
نانو فیبر نایلون  
کی مینز، الگوریتم ژنتیک

## چکیده

هدف این مقاله شناسایی اثرات استفاده از نانو فیبر نایلون بر روی خصوصیات کامپوزیت کربن - اپوکسی به وسیله آزمون غیر مخرب نشر فرا آوایی تحت آزمایش جدایش بین لایه‌ای می‌باشد. نانو فیبرهای نایلون در بین لایه‌های کربن - اپوکسی به منظور افزایش استحکام کامپوزیت کربن - اپوکسی استفاده شده است. به منظور شناسایی بهتر اثرات استفاده از نانو فیبرهای نایلون و خوشه‌بندی دقیق‌تر پارامترهای نشر فرا آوایی از ترکیب الگوریتم ژنتیک و کی مینز برای خوشه‌بندی استفاده شده است. توصیف‌گرهای نشر فرا آوایی مانند دامنه، زمان استمرار، انرژی و زمان خیز به منظور بررسی اثرات استفاده از نانو فیبرهای نایلون استفاده شده است. نتایج حاصل شده از خوشه‌بندی سیگنال‌های نشر فرا آوایی بدست آمده از آزمون کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبرهای نایلون نشان داده که حضور نانو فیبرهای نایلون باعث افزایش استحکام و به تأخیر انداختن مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت کربن - اپوکسی می‌شود. الگوریتم خوشه‌بندی مورد استفاده ارتباط مناسبی بین پارامترهای نشر فرا آوایی و مکانیزم‌های خرابی و زمان وقوع آنها ایجاد می‌کند. فراوانی دامنه نشر فرا آوایی بدست آمده از مکانیزم‌های خرابی هر دو کامپوزیت در یک بازه قرار دارند و زمان استمرار نشر فرا آوایی کامپوزیت کربن - اپوکسی بیشتر از کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر نایلون است.

## Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon- epoxy composite properties by Acoustic Emission

Ramin Khamedi\*, Mohammad Nikmehr

Mechanical Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.  
\*P.O.B. 45371-38791 Zanjan, Iran. khamedi@znu.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 18 January 2015  
Accepted 31 January 2015  
Available Online 07 March 2015

**Keywords:**  
Acoustic Emission  
Carbon- Epoxy Composite  
Nylon Nanofiber, K-Means  
Genetic Algorithm

## ABSTRACT

The aim of this article is to investigate the effects of Nylon nanofiber in carbon-epoxy composites properties under double cantilever beam test by Non-destructive Acoustic Emission testing. In order to increase toughness of carbon- epoxy composite, Nylon nanofibers were placed into the midplane interface of carbon-epoxy laminates. For better identification of the effects of Nylon nanofibers and more accurate clustering of Acoustic emission parameters, a combination of k-means algorithm and Genetic algorithm for clustering were used. Acoustic emission descriptors like Amplitude, Duration, Count, Acoustic Energy and Rise time were used in order to survey identification of effects of nanofibers. The results of clustering of Acoustic emission signals obtained from carbon-epoxy composite and carbon-epoxy nanomodified composite show that the presence of Nylon nanofibers increased the toughness of carbon- epoxy composite and delayed damage mechanisms. This method of clustering is a good fit between acoustic signals and damage mechanisms, and time of events. Cumulative events of Acoustic emission Amplitude obtained from damage mechanisms of both composites are in the same range and Acoustic emission duration of carbon-epoxy is more than carbon-epoxy nanomodified composite.

## 1- مقدمه

[1]. یکی از اصلی‌ترین عیوب مواد کامپوزیتی تقویت شده با فیبر لایه لایه شدن است. لایه لایه شدن به مفهوم جدا شدن دو لایه مواد کامپوزیتی است. یکی از روش‌های بالا بردن خصوصیات بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها، استفاده از لایه‌های نانو فیبر نایلون است. در این نوع کامپوزیت‌ها انتقال نیرو بین لایه‌های تقویت شده خیلی بهتر اتفاق می‌افتد که این امر باعث افزایش استحکام ماتریس می‌شود [2]. به منظور شناسایی مکانیزم‌های خرابی

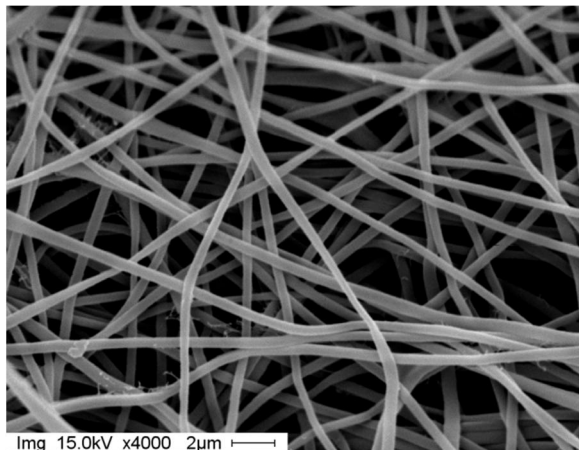
کامپوزیت‌ها کاربرد بسیار گسترده‌ای در بیشتر زمینه‌های صنعتی دارند. استحکام بالا نسبت به وزن، مقاوم در برابر خوردگی و جذب کنندگی انرژی بعضی از مزایای کامپوزیت‌ها می‌باشد که دلیلی برای استفاده وسیع این دسته از مواد است. مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر شامل شکست زمینه، جدا شدن فیبر از زمینه، لایه لایه شدن و شکست فیبر است

Please cite this article using:

R. Khamedi, M. Nikmehr, Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon- epoxy composite properties by Acoustic Emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 355-360, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Khamedi, M. Nikmehr, Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon- epoxy composite properties by Acoustic Emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 355-360, 2015 (In Persian)



شکل 1 مشاهدات میکروسکوپ الکترونی نانو فیبر نایلون

به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد نانو نایلون 6/6 (نقطه ذوب 262 °C) برای مطالعه مورد نظر مناسب است. 20 لایه با جهت فیبرهای موازی با لایه زمینه به صورت دستی قرار داده شده است. نانو فیبرهای نایلون بین لایه‌ها قرار داده شده اند. برای هر کامپوزیت 5 نمونه ساخته شده و به منظور شناسایی رفتار لایه‌های تقویت شده با نانو الیاف 6/6 آزمون جدایش بین لایه‌ای (مد یک شکست) بر اساس استاندارد<sup>7</sup> انجام شده است. ابعاد نمونه برای آزمایش (130mm×20mm×4mm) می‌باشد. لایه لایه شدن ابتدایی به وسیله یک ورق تفلون در طول 25 mm فراهم شده است. حرکت دستگاه آزمایش با سرعت 1/5 mm/min و با ظرفیت نیروی 5-250 kN است. نیرو و جابجایی در طول تست در هر ثانیه 10 بار ثبت می‌شود و رشد ترک با مشاهدات چشمی اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه نشر فرا آوایی<sup>8</sup> به منظور ثبت وقایع آکوستیکی استفاده شده است.

### 3- روش خوشه‌بندی

#### 3-1- آنالیز اجزای اصلی<sup>9</sup>

روش آنالیز اجزای اصلی بر اساس کاهش ابعادی در داده‌ها استوار است. به عبارت دیگر تصویر در یک زیر فضایی با ابعاد کمتر، برای مثال زیر فضای دو بعدی، که برای مشاهده کردن خیلی مفید است [12-14]. اگر  $n$  تا سیگنال آکوستیکی باشد و هر سیگنال  $m$  پارامتر زمانی داشته باشد، در این حالت یک ماتریس  $n \times m$  بدست می‌آید:

جدول 1 خواص لایه کربن- اپوکسی			
مقدار	خصوصیات مکانیکی	مقدار	خصوصیات
850MPa	مقاومت خمشی	$1/5 \text{ gr/m}^3$	چگالی
59GPa	مدول خمشی و برشی	$353 \text{ gr/m}^2$	وزن
650MPa	مقاومت برشی	%42	میزان رزین

#### جدول 2 خواص نایلون 6/6

مقدار	خصوصیات
84 MPa	تنش تسلیم
3000 MPa	مدول برشی
%4/4	کرنش تسلیم

7- ASTM D5528

8- PAC

9- principal component analysis

کامپوزیت‌ها و اثرات استفاده از لایه‌های نانو فیبر نایلون در خصوصیات کامپوزیت‌ها آزمون نشر فرا آوایی کارایی بهتر در مقایسه با آزمون‌های غیر مخرب دیگر دارد. منابع نشر فرا آوایی در کامپوزیت‌ها که شامل شکست زمینه، جدایش فیبر از زمینه و شکست فیبر است، توسط اونیو بررسی شده است [3]. ارتباط بین توصیف‌گرهای نشر فرا آوایی و مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌ها توسط یک سری از مطالعات انجام شده است [4-8]. نی و جین [9] برای تعیین رفتار شکست کامپوزیت‌های تک فیبر، از آزمون خمش سه نقطه ای استفاده کرده‌اند. در این تحقیق نشر فرا آوایی و روش نور پلاریزه شده برای تعیین شکست فیبرها بکار برده شده است. نتایج هر دو آزمون تطبیق خوبی در شناسایی شکست فیبرها دارند. جداسازی سیگنال‌های نشر فرا آوایی اصلی‌ترین مشکل شناسایی مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌ها به وسیله آزمون نشر فرا آوایی است. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، جداسازی داده‌ها به یک سری از خوشه‌ها و درک بهتر اطلاعات از روش خوشه‌بندی استفاده شده است. گودین [10] از دو روش برای دسته‌بندی داده‌های نشر فرا آوایی در تست کشش کامپوزیت شیشه/پلی استر استفاده کرد، یک روش بر مبنای دسته‌بندی نظارتی و دیگری بر مبنای دسته بندی غیر نظارتی<sup>1</sup> بود. سپس این دو روش را با یکدیگر ترکیب کرد و از پارامترهای نشر فرا آوایی بدست آمده از قطعات شیشه/پلی استر برای صحت‌گذاری کارش استفاده کرد. لوتاس و کوستوپولوس [11] کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی را که به سه روش مختلف تولید شده بودند (روش‌های مختلف تولید روی وجه مشترک فیبر- ماتریس تأثیر می‌گذارند) تحت تست کشش قرار داده و با نشر فرا آوایی مورد بررسی قرار دادند. برای دسته‌بندی داده‌های نشر فرا آوایی از الگوریتم‌های شناخت الگوی غیر نظارتی استفاده کردند. نتیجه کار ایشان استخراج اطلاعات مفید در مورد ارزیابی خرابی مواد مورد آزمایش بود.

هدف مقاله حاضر مطالعه الگوریتم هیبریدی کی‌مینز و الگوریتم ژنتیک به منظور شناسایی دقیق مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌های کربن- اپوکسی و کربن- اپوکسی تقویت شده با لایه نانو فیبر، زمان دقیق خرابی‌ها و اثرات استفاده از لایه نانو فیبر بر روی کامپوزیت کربن- اپوکسی می‌باشد. اطلاعات نشر فرا آوایی مربوط به آزمون جدایش بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها می‌باشد. نتایج حاکی از توانمندی این الگوریتم در تجزیه و تحلیل پارامترهای نشر فرا آوایی است.

### 2- مراحل آزمایش

لایه کربن- اپوکسی با خصوصیات (جدول 1) و نایلون 6/6 با خصوصیات (جدول 2) به ترتیب از شرکت‌های امپرجنتکس کامپوزیتی<sup>2</sup> و دیوپونت<sup>3</sup> (شرکت‌ها ایتالیایی هستند) خریداری شده است. مواد الکترونیسی بافته نشده به وسیله ماشین الکترواسپینینگ ساخته شده است. به منظور از بین بردن تنش‌های نانو فیبرها، مواد الکترونیسی در خلا دی فسفر پنتا اکسید<sup>4</sup> در دمای اتاق به مدت یک شبانه روز نگه داشته شده است. نمونه‌ها به وسیله طلا پوشش داده شده‌اند. متوسط قطر نانو فیبرهای نایلون (150±20nm) است که توسط اندازه‌گیری قطر 200 فیبر با استفاده از نرم‌افزار کشف تصویری<sup>5</sup> انجام شده است. ساختار فیبرهای نانو نایلون توسط مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>6</sup> در شکل 1 نشان داده شده است.

1- Unsupervised

2- Impregnatex Compositi

3- Dupont

4- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

5- Image Acquisition Software

6- Scanning Electron Microscope

خوشه‌ها استفاده شده است. در این بخش به تشریح اجزای الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود.

### 3-2-1- خوشه‌بندی

خوشه‌بندی توسط الگوریتم کی‌مینز انجام می‌شود. خوشه‌ها دارای تعدادی نقطه از داده‌ها می‌باشند. این نقاط دارای کمترین فاصله از مرکز خوشه مربوطه نسبت به مراکز دیگر را دارند. مراکز خوشه جدید با استفاده از رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$z_i^* = \frac{1}{n_i} \sum_{x_j \in C_j} X_j \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

$n_i$  تعداد نقاط هر خوشه  $C_j$  و  $z_i^*$  مرکز جدید هر خوشه است.

### 3-2-2- محاسبه ارزیابی<sup>3</sup>

به منظور حل هر مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابتدا باید یک تابع برازندگی برای آن مسأله ابداع شود. تابع ارزیابی به وسیله فرمول (10) محاسبه می‌شود.  $z_i$  مرکز خوشه و  $k$  تعداد خوشه می‌باشد. به منظور پیدا کردن بهترین خوشه‌بندی تابع ارزیابی<sup>4</sup> باید کمترین مقدار باشد.

$$\text{تابع ارزیابی} = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - z_i\| \quad (10)$$

### 3-2-3- مراحل الگوریتم ژنتیک<sup>5</sup>

الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تبعیت می‌کند [16]. الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مسأله به امید بدست آوردن جواب‌های بهتر، قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرایند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولید مثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی بدست می‌آید. این فرایند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسأله سازگارتر باشند. در الگوریتم ژنتیک، هر کروموزوم نشان دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسأله مورد نظر است. خود کروموزوم‌ها از تعداد ثابتی ژن<sup>6</sup> (متغیر) تشکیل می‌شوند.

### الف - گزینش<sup>7</sup>

این عملگر از بین کروموزوم‌های موجود در یک جمعیت، تعدادی کروموزوم را برای تولید مثل انتخاب می‌کند. کروموزوم‌های برانده‌تر شانس بیشتری دارند تا برای تولید مثل انتخاب شوند. در این مطالعه عملگر انتخاب به کمک چرخ رولت<sup>8</sup> به همراه انتخاب نخبه (مناسب‌ترین عضو هر اجتماع انتخاب می‌شود. با توجه به مقدار شایستگی که از تابع ارزیابی دریافت کرده است) می‌باشد. دو والدین از جمعیت تولید دو فرزند جدید می‌کند.

### ب - عملگر آمیزش<sup>9</sup>

در جریان عمل تلفیق به صورت اتفاقی بخشهایی از کروموزوم‌ها با یکدیگر تعویض می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که فرزندان ترکیبی از خصوصیات والدین خود را به همراه داشته باشند و دقیقاً مشابه یکی از والدین نباشند که این هدف تولید فرزند جدید می‌باشد به این امید که خصوصیات خوب دو

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) بیانگر بردارهای سیگنال‌ها بوده و  $t$  ترانهاده بردارها است. ابتدا داده‌ها استانداردسازی می‌شوند که در این حالت برای هر ستون انحراف استاندارد محاسبه شده و بعد از نرمال‌سازی کواریانس بین داده‌ها مطابق روابط (2) تا (4) بدست می‌آید:

$$s = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$x_{\text{نرمالیزه}} = \frac{2 \cdot (x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} - 1 \quad (3)$$

$$C_X = E[XX^t] \quad (4)$$

که مؤلفه‌های ماتریس  $C_X$  کواریانس بین متغیرهای  $x^i$ ،  $x^k$  را نشان می‌دهد:

$$x^k = \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_n^k \end{bmatrix}, \quad x^l = \begin{bmatrix} x_1^l \\ x_2^l \\ \vdots \\ x_n^l \end{bmatrix} \quad (5)$$

از آنجا که ماتریس کواریانس یک ماتریس متقارن است، یک پایه متعامد با پیدا کردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه قابل محاسبه است. که بردارهای ویژه  $e_k$  و مقادیر ویژه  $\lambda_k$  جواب‌های معادله (6) می‌باشند.

$$C_X e_k = \lambda_k e_k, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

فضای متعامد ایجاد شده برای یک سری از بردارهای ویژه دارای بیشترین واریانس در یک جهت خاص می‌باشند. لذا جهت‌هایی که در آنها مجموعه داده‌ها دارای انرژی عمده می‌باشند، می‌توانند پیدا شوند. بنابراین به جای استفاده از بردار ویژه ماتریس کواریانس، می‌توان داده‌ها را با چندین بردار از فضای متعامد نمایش داد. اگر  $A_{k(m,k)}$  ماتریس با  $K$  بردار ویژه اول باشد، با تبدیل بردار داده‌ها،  $X$  می‌توان رابطه (7) را نوشت:

$$y = XA_K \quad (7)$$

که این معادله محورهای جدیدی از  $n$  حادثه (سیگنال آکوستیکی) را در سیستم محورهای متعامد با بردارهای ویژه تعریف شده نشان می‌دهد.

### 3-2- الگوریتم خوشه‌بندی کی‌مینز به همراه ژنتیک الگوریتم<sup>15</sup>

یکی از مشکلات الگوریتم کی‌مینز انتخاب تعداد خوشه‌بندی بهینه است که در این مقاله به منظور تعیین تعداد خوشه بهینه از فرمول دیویس و بلدین<sup>2</sup> استفاده شده است. کمترین مقدار دیویس و بلدین به مفهوم تعداد خوشه‌بندی بهینه می‌باشد. مقدار فرمول دیویس و بلدین با رابطه (8) محاسبه می‌شود.  $S_c$  فاصله درون خوشه و  $d_{ce}$  فاصله بین خوشه‌ها است.

$$DB = \frac{1}{c} \sum_{k=1}^c \max_{t \neq k} \left[ \frac{S_c(Q_k) - S_c(Q_t)}{d_{ce}(Q_k, Q_t)} \right] \quad (8)$$

اصلی‌ترین مشکل الگوریتم کی‌مینز این است که در نقاط محلی بهینه گیر می‌افتد. جواب‌های بدست آمده از این الگوریتم به نقاط یا مراکز خوشه اولیه انتخاب شده وابسته است. یعنی اگر مراکز مناسبی برای خوشه‌های اولیه انتخاب شده باشد، خوشه‌بندی خوبی بدست می‌آید. در این روش پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک، به عنوان یک الگوی فراابتکاری برای پیدا کردن مراکز

1- K-means Genetic Algorithm clustering

2- Davies and Bouldin index

3- Fitness computation  
4- Fitness function  
5- Genetic Algorithm process  
6- Gene  
7- Selection  
8- Wheel Roulette  
9- Crossover

موجود در فرزندشان جمع شده و یک موجود بهتری را تولید کند.

### ج - عملگر جهش<sup>1</sup>

پس از اتمام عمل آمیزش، عملگر جهش بر روی کروموزومها اثر داده می‌شود. این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به طور تصادفی انتخاب نموده و سپس محتوای آن ژن را تغییر می‌دهد. پس از اتمام عمل جهش، کروموزومهای تولید شده به عنوان نسل جدید شناخته شده و برای دور بعد اجرای الگوریتم ارسال می‌شوند. منطق استفاده از عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک این است که الگوریتم در خلال فرایند جستجو در نقاط بهینه محلی به دام نیفتد و مناطق بیشتری از فضای جواب را به جستجو بپردازد.

### 3-2-4- شرط خاتمه الگوریتم

الگوریتمهای ژنتیک به دلیل این که بر پایه تولید و تست می‌باشند، جواب مسأله مشخص نیست و معلوم نیست که کدامیک از جوابهای تولید شده جواب بهینه است تا شرط خاتمه برای پیدا شدن جواب در جمعیت تعریف شود. در این مقاله پس از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که تمامی خوشه‌ها بررسی شوند و بهبودی در جواب حاصل نشود. تعداد تکرار ماکسیمم 100 دور چرخش حلقه اصلی برنامه است.

### 4- نتایج و بحث

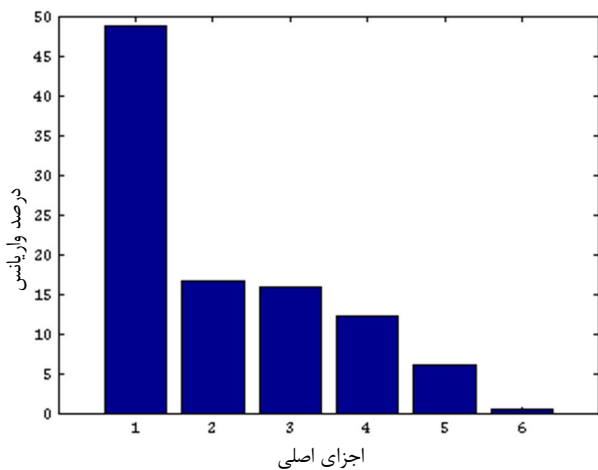
مکانیزمهایی که سبب ایجاد امواج نشر فرا آوایی می‌شوند و در حقیقت منبع انتشار نشر فرا آوایی هستند، در برگرفته مکانیزمهای متفاوتی از قبیل شکست و تغییر شکل هستند. منابع انتشار نشر فرا آوایی در مواد مرکب شامل شکست زمینه در سطح پایین کرنش، لایه لایه شدن در سطح کرنش متوسط و شکست الیاف در سطح کرنش بالا می‌باشد. در این مقاله به منظور شناسایی مکانیزمهای خرابی کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر 6 پارامتر نشر فرا آوایی به نامهای دامنه<sup>2</sup>، انرژی آکوستیکی، زمان خیز<sup>3</sup>، زمان استمرار<sup>4</sup>، کانت<sup>5</sup> و میانگین ریشه دوم<sup>6</sup> استفاده شده است. بی بعد کردن پارامترهای نشر فرا آوایی که دارای واحد یکسان نیستند، با استفاده از روش نرمالیز است. روش نرمالیز با استفاده از فرمول انحراف معیار انجام می‌شود. با استفاده از آنالیز اجزای اصلی دو بعد که دارای بیشترین درصد واریانس می‌باشند برای خوشه‌بندی مشخص می‌شود. شکل‌های 2 و 3 به ترتیب مربوط به آنالیز اجزای اصلی پارامترهای نشر فرا آوایی بدست آمده از آزمایش کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر می‌باشد. با توجه به شکل‌های 2 و 3 به ترتیب اجزای اصلی 1 و اجزای اصلی 2 دارای بیشترین درصد واریانس می‌باشند.

در مرحله بعدی به منظور پیدا کردن تعداد خوشه‌بندی بهینه از فرمول دیویس و بلدین استفاده شده است. خوشه‌بندی به روش الگوریتم کی‌مینز ژنتیک برای تعدادی از خوشه‌ها انجام شده و مقدار دیویس و بلدین برای هر خوشه‌بندی محاسبه شده است. کمترین مقدار دیویس و بلدین به مفهوم تعداد خوشه‌بندی بهینه است. باتوجه به شکل‌های 4 و 5 تعداد خوشه بهینه برای هر 2 کامپوزیت 3 می‌باشد. سیگنال‌های نشر فرا آوایی شکست زمینه

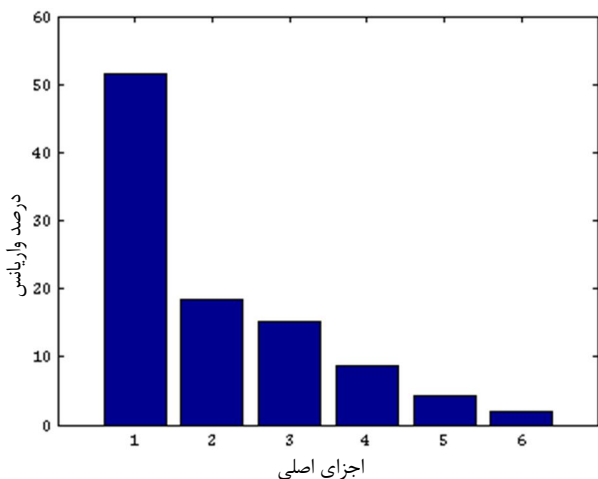
- 1- Mutation
- 2- Amplitude
- 3- Rise time
- 4- Duration
- 5- Count
- 6- RMS

دارای دامنه، زمان استمرار و انرژی آکوستیکی پایین، شکست فیبر دارای دامنه، زمان استمرار و انرژی آکوستیکی متوسط و لایه لایه شدن تولید انرژی آکوستیکی متوسط می‌کند [17، 18]. دامنه مکانیزمهای خرابی کامپوزیت کربن - اپوکسی مربوط به شکست زمینه، جدایش فیبر از زمینه و شکست فیبر به ترتیب در بازه‌های دامنه زیر 50 dB، 50 dB (80-50) و 100 dB- (80) قرار دارند [19-23]. پراکندگی زمان استمرار در کامپوزیت های تقویت شده با کربن بدین ترتیب است: شکست ماتریس اپوکسی در بازه 800-200)، جدا شدن فیبر و ماتریس در بازه زمان استمرار 1000-800) و شکست فیبر کربن در بازه 2000-1000) می‌باشد [24].

جدول‌های 3 و 4 به ترتیب خلاصه‌ای از قلمرو هر خوشه را برای کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر را نشان می‌دهند. با مقایسه قلمرو پارامترهای آکوستیکی ارائه شده در جدول‌های 3 و 4 و نتایج ارائه شده در مقالات گذشته [17-24]، شکست زمینه، جدایش فیبر از زمینه و شکست فیبر به ترتیب متعلق به خوشه‌های A، B و C می‌باشند. دامنه مکانیزمهای خرابی هر دو کامپوزیت تقریباً در یک بازه قرار دارند و با مقالات مربوط به مکانیزمهای خرابی کامپوزیت کربن - اپوکسی تطبیق خوبی دارند [19-23]. زمان استمرار کامپوزیت کربن - اپوکسی بیشتر از کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر است. پایین بودن زمان استمرار مکانیزمهای خرابی کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر به دلیل حضور لایه نانو در بین لایه‌های کربن - اپوکسی می‌باشد که باعث افزایش استحکام



شکل 2 آنالیز اجزای اصلی کامپوزیت کربن - اپوکسی



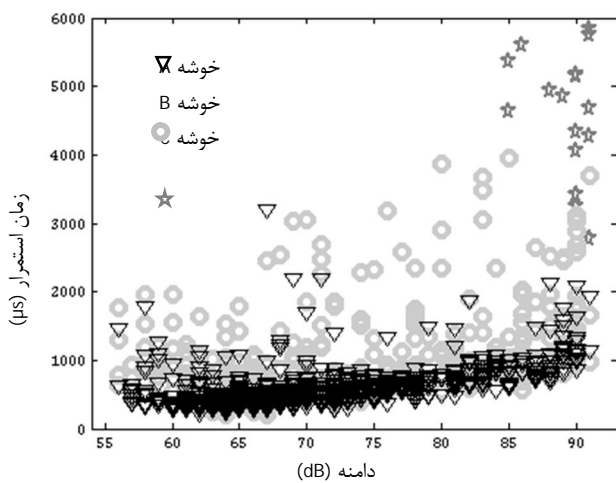
شکل 3 آنالیز اجزای اصلی کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو الیاف

جدول 3 قلمرو خوشه‌های کامپوزیت کربن - اپوکسی

انرژی (J)	زمان خیز ( $\mu$ s)	کانت	زمان استمرار ( $\mu$ s)	دامنه (dB)	خوشه
$(0-0/9) \times 10^{-7}$	0-40	30-60	300-400	60-70	A
$(0-0/1) \times 10^{-6}$	30-60	60-100	400-1500	70-85	B
$(0/1-0/5) \times 10^{-6}$	50-100	400-900	3000-6000	85-90	C

جدول 4 قلمرو خوشه‌های کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو الیاف

انرژی (J)	زمان خیز ( $\mu$ s)	کانت	زمان استمرار ( $\mu$ s)	دامنه (dB)	خوشه
$(0-0/8) \times 10^{-8}$	0-50	30-58	200-550	60-70	A
$(0-0/1) \times 10^{-7}$	50-60	58-75	550-800	70-80	B
$(0-0/5) \times 10^{-6}$	60-120	100-120	1000-1800	85-90	C

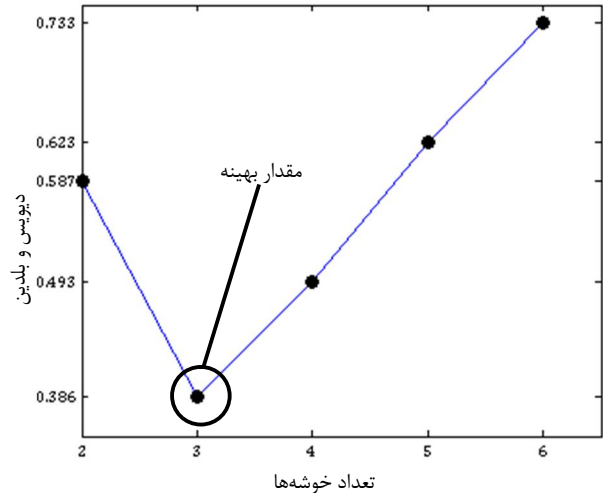


شکل 6 دامنه - زمان استمرار کامپوزیت کربن - اپوکسی

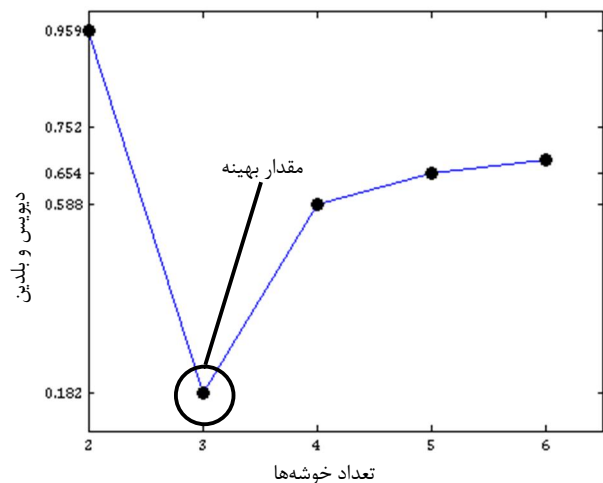
تقویت شده با نانو فیبر نایلون در شکل 8 نشان داده شده است. در این تصویرها مکانیزم‌های جدایش فیبرها از زمینه، شکست زمینه و شکست فیبرهای کربن و نانو فیبر نایلون که توسط الگوریتم خوشه‌بندی کی‌میزبه همراه ژنتیک الگوریتم پیش‌بینی شده بود به خوبی نمایش داده شده است.

### 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مروری بر مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر که شامل شکست زمینه، جدایش فیبر از زمینه، شکست فیبر می‌باشد، انجام شد. شناسایی مکانیزم‌های خرابی و اثرات استفاده از نانو فیبر نایلون بر روی خصوصیات کامپوزیت کربن - اپوکسی با استفاده از آزمون غیرمخرب نشر فرا آوایی و آزمایش جدایش بین لایه‌ای بررسی شد. به منظور تحلیل داده‌های نشر فرا آوایی از الگوریتم خوشه‌بندی کی‌میز به همراه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با استفاده از پراکندگی تجمعی چند توصیف‌گر نشر فرا آوایی مانند دامنه، زمان استمرار و انرژی آکوستیکی بدست آمده از کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر نایلون تاثیر استفاده از نانو فیبر نایلون بر روی خصوصیات کامپوزیت کربن - اپوکسی بررسی شد. دامنه مکانیزم‌های خرابی هر دو کامپوزیت تقریباً در یک بازه قرار دارند و با مقالات مربوط به بررسی مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت کربن - اپوکسی تطبیق خوبی دارند. زمان استمرار کامپوزیت کربن - اپوکسی بیشتر از کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر



شکل 4 مقدار فرمول دیویس و بلدین برای خوشه‌های کامپوزیت کربن - اپوکسی



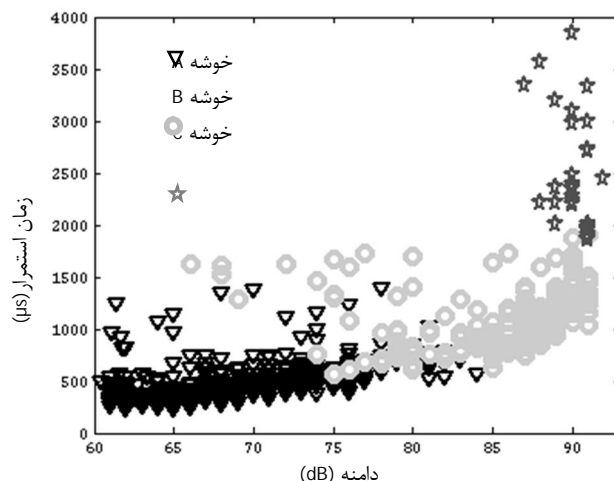
شکل 5 مقدار فرمول دیویس و بلدین برای خوشه‌های کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو الیاف

کامپوزیت شده است. مکانیزم‌های خرابی در این کامپوزیت‌ها به دلیل وجود لایه نانو به آرامی اتفاق می‌افتد. با توجه به جدول‌های 1 و 2 شکست زمینه، جدا شدن فیبر از زمینه و شکست فیبر به ترتیب تولید انرژی کم، متوسط و زیاد می‌کند. فراوانی وقایع نشر فرا آوایی در کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو به ترتیب 1381 و 607 عدد (تقریباً 2 برابر) می‌باشد. پایین بودن فراوانی آکوستیکی کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر نایلون به این دلیل است که انتقال نیرو بین لایه‌ها بهتر انجام می‌شود و این امر باعث افزایش استحکام زمینه شده است و همچنین باعث به تاخیر انداختن مکانیزم‌های خرابی می‌شود. شکل‌های 6 و 7 به ترتیب دامنه - زمان استمرار کامپوزیت کربن - اپوکسی و کامپوزیت کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های 6 و 7 مقدار وقایع آکوستیکی در ابتدای نمودار فوراً افزایش می‌یابد که این امر نشان دهنده شروع مکانیزم‌های خرابی در این ناحیه است. همچنین مقدار وقایع آکوستیکی برای نمونه کربن - اپوکسی در ابتدای و برای نمونه کربن - اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر نایلون در میانه و انتها بیشتر از نواحی دیگر می‌باشد که این نشان دهنده رشد مکانیزم‌های خرابی با انرژی و سرعت بیشتر در این نواحی می‌باشد.

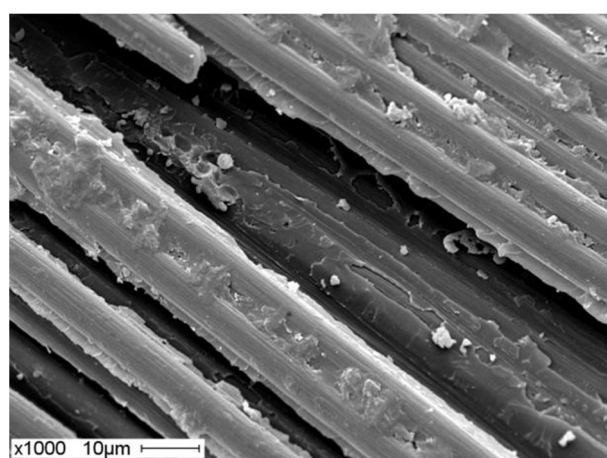
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی از مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت

## 6- مراجع

- [1] T. J. Fowler, Acoustic emission of fiber reinforced plastics, *Journal of the Technical Councils of ASCE*, Vol. 105, No. 2, pp. 281-289, 1979.
- [2] X. Kornmann, M. Rees, Y. Thomann, A. Necola, M. Barbezat, R. Thomann, Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 14, pp. 2259-2268, 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S. Barre, M. Benzeggagh, On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene, *Composites Science and Technology*, Vol. 52, No. 3, pp. 369-376, 1994.
- [6] 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, 2001.
- [7] 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.
- [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, No. 7, pp. 1451-1458, 2007.
- [9] Q.-Q. Ni, E. Jinen, Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 56, No. 6, pp. 779-796, 1997.
- [10] 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.
- [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. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Damage characterization of 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.
- [13] I. Jolliffe, *Principal component analysis*: Wiley Online Library, 2005.
- [14] E. Oja, Neural networks, principal components, and subspaces, *International journal of neural systems*, Vol. 1, No. 01, pp. 61-68, 1989.
- [15] S. Bandyopadhyay, U. Maulik, An evolutionary technique based on K-means algorithm for optimal clustering in RN, *Information Sciences*, Vol. 146, No. 1, pp. 221-237, 2002.
- [16] K. Krishna, M. N. Murty, Genetic K-means algorithm, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, Vol. 29, No. 3, pp. 433-439, 1999.
- [17] N. Atitavvas, 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.
- [18] O. Siron, H. Tsuda, Acoustic emission in carbon fibre-reinforced plastic materials, in *Proceeding of Elsevier*, Vol. 25, No. 7, pp. 533-537, 2000.
- [19] T. Brown, J. Mitchell, Acoustic emission evaluation of automotive hybrid composites and attachments, in *Proceeding of*, 1980.
- [20] J. Berthelot, J. Rhazi, Acoustic emission in carbon fibre composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 411-428, 1990.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] R. Gutkin, C. Green, S. Vangrattanachai, S. Pinho, P. Robinson, P. Curtis, On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 4, pp. 1393-1407, 2011.



شکل 7 دامنه- زمان استمرار کامپوزیت کربن- اپوکسی تقویت شده با نانو فیبر



شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از شکست فیبرهای اپوکسی و نانو فیبر نایلون

می‌باشد. پایین بودن زمان استمرار مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر به دلیل حضور لایه نانو در بین لایه‌های کربن - اپوکسی می‌باشد که باعث افزایش استحکام کامپوزیت شده است. فراوانی وقایع نشر فرا آوایی در کامپوزیت کربن - اپوکسی تقریباً دو برابر کامپوزیت تقویت شده با نانو فیبر است. پایین بودن فراوانی به این دلیل می‌باشد که رشد مکانیزم‌های خرابی آهسته انجام می‌شود و این امر باعث افزایش استحکام زمینه شده است. حضور فیبرهای نانو نایلون باعث شده بیشتر وقایع آکوستیکی در میانه و انتهای آزمون باشد در صورتی که در نمونه کربن - اپوکسی بیشترین وقایع آکوستیکی در ابتدا می‌باشد و این به مفهوم رشد مکانیزم‌های خرابی با سرعت و انرژی بیشتر در این نواحی است و همچنین حضور فیبر نانو نایلون باعث به تأخیر انداختن مکانیزم‌های خرابی و رشد آهسته این مکانیزم‌ها شده است. برای صحت‌گذاری نتایج حاصل شده پارامترهای نشر فرا آوایی از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی استفاده شد و تطابق خوبی بین نتایج کار انجام شده و مشاهدات میکروسکوپی دیده شد.