

## رفتار سنجی خمشی کامپوزیت الیاف کربن / اپوکسی توسط روش نشر آوایی

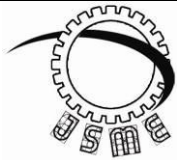
نیما بهشتی زاده<sup>۱\*</sup>، امیر مصطفی پور<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: [N.Behshitzadeh92@ms.tabrizu.ac.ir](mailto:N.Behshitzadeh92@ms.tabrizu.ac.ir)

واژه‌های کلیدی	چکیده
کامپوزیت الیاف کربن / اپوکسی نشر آوایی پایش بارگذاری تست غیر مخرب	کامپوزیت الیاف کربن / اپوکسی یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می- باشد که به دلیل خواص ویژه‌ای از قبیل استحکام بالا نسبت به وزن، سفتی ویژه بالا، مقاومت خوردگی بالا و مقاومت در برابر تابش اتمی، مصرف بالایی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا دارد. به همین جهت پایش بارگذاری این نوع کامپوزیت امری مهم است. به منظور شناسایی مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌ها، روش نشر آوایی کارایی بهتری در مقایسه با آزمون‌های غیر مخرب دیگر دارد. در این پژوهش از روش نشر آوایی برای پایش بارگذاری خمشی کامپوزیت الیاف کربن در زمینه اپوکسی استفاده گردید. بدین منظور رفتار خمشی کامپوزیت و ارتباط آن با سیگنال‌های ساطع شده از نمونه تحت بارگذاری بررسی شد. بکارگیری هر دو روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک در این پژوهش، نتیجه یکسان آن‌ها را در پی داشت. با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس بیشینه در این بارگذاری در حدود ۱۴۰ کیلوهرتز تعیین شد که روش تبدیل موجک نیز همین محدوده را تایید کرد. محدوده زمانی رویدادهای رخ داده در نمونه تحت بارگذاری توسط نمودارهای برخط به دست آمده از سیستم آکوستیکی مانیتور گردید و در نهایت مکانیزم‌های شکست کامپوزیت با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. محدوده‌های زمانی و روند صعودی نمودارها، صحت سنجی خوبی با نمودار خمشی بر جای گذاشت.
تاریخ ارسال: ۹۴/۱۰/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۱/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۰	

۱. کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

# Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



## Flexural monitoring of carbon fiber/epoxy composite by acoustic emission

Nima Beheshtizaeh\*<sup>1</sup>, Amir Mostafapour<sup>2</sup>

\* Corresponding Author: N.Beheshtizadeh92@ms.tbrizu.ac.ir

### Abstract:

Carbon / epoxy composite is one of the most useful polymer matrix composites that has special properties such as high strength-to-weight ratio, high hardness, high corrosion resistance. Resistance to nuclear radiation has high consumption in different industries such as aerospace industry and therefor monitoring of loading of this type of composite is important. In order to determine failure mechanisms, acoustic emission method has more performance than other non-destructive methods. In this research acoustic emission method was used to evaluate and monitoring of the carbon epoxy composite three point bending load. For this purpose bending behavior of composite and relationship between acoustic signals was studied. Using both fast Fourier transform and wavelet transform method in this research, which led to the same result. Using FFT maximum frequency 140 KHZ was determined, that wavelet transform was confirmed this result too. Time limits that events was occurred on the under load specimen, was monitored by online diagrams that obtained from acoustic system. Finally failure mechanisms of composite were confirmed by SEM pictures. Time limits and ascending progress of diagrams validates bending diagram.

### Key words:

Composite  
Carbon fiber/epoxy  
Acoustic emission  
Load monitoring  
Non-destructive test

1. MSc, Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

## ۱- مقدمه

و تفکیک ساز و کارهای مختلف خرابی در این سازه‌ها اشاره نمود [۶].

ویلیامز و لی<sup>۲</sup> [۷] روش نشرآوایی را برای پایش شکست کامپوزیت‌ها معرفی کردند. گروت<sup>۳</sup> و همکاران [۸] و یو<sup>۴</sup> و همکاران [۹] روش تشخیص خرابی کامپوزیت‌ها را با استفاده از فرکانس آکوستیکی آنلاین پیشنهاد کردند. وو و چوی<sup>۵</sup> [۱۰] پروسه خرابی را در کامپوزیت‌های لایه‌ای ناچ-دار توسط رخدادهای آکوستیکی دامنه بالا مطالعه کردند. گیوردانو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱] تحلیلی از کمیت خرابی‌ها در کامپوزیت پایه پلیمری با استفاده از نشرآوایی ارائه دادند. لوتوس<sup>۷</sup> و کوستوپولوس<sup>۸</sup> [۱۲]، ساسیکومار<sup>۹</sup> و همکاران [۱۳] و اولیورا<sup>۱۰</sup> و مارکوس<sup>۱۱</sup> [۱۴] در تحقیقاتی، پایش وضعیت کامپوزیت‌ها را با استفاده از نشرآوایی و شبکه‌های عصبی بررسی نمودند. سیجانی<sup>۱۲</sup> [۱۵] ارتباط بین ویژگی‌های آکوستیکی مانند شمارش سیگنال‌ها، دامنه و انرژی را به خواص فیزیکی کامپوزیت مورد بررسی؛ مانند جهت قرار گرفتن الیاف هماهنگ دانست. پاگت<sup>۱۳</sup> [۱۶] از پارامترهای نرخ تولید و دامنه سیگنال‌های آکوستیکی برای مکان‌یابی و تشخیص آسیب‌های به وجود آمده از صفحه کامپوزیتی کربن اپوکسی تحت بارگذاری نوسانی فشاری استفاده نمود. بورچاک<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۷] از نشرآوایی برای تشخیص مراحل مختلف رشد آسیب در نمونه‌های کربن اپوکسی تحت بارگذاری نوسانی کششی استفاده کردند. آن‌ها با بررسی منحنی‌های نرخ تولید و انرژی سیگنال‌های آکوستیکی چهار مرحله مختلف رشد آسیب در قطعات را

کامپوزیت‌ها موادی چند جزئی هستند که خواص آن‌ها در مجموع از هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. کامپوزیت الیاف کربن/اپوکسی یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌باشد که به دلیل خواص ویژه‌ای از قبیل استحکام بالا نسبت به وزن، سفتی ویژه بالا و مقاومت خوردگی بالا مصرف بالایی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا دارد.

علیرغم مزیت‌های مذکور، در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. خرابی‌های رایج در چندلایه‌های کامپوزیتی عبارت‌اند از شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای [۲]. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین نوع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است که منجر به کاهش استحکام و مدول خمشی کامپوزیت می‌گردد [۳]. این امر به دلیل چقرمگی شکست بین لایه‌ای پایین در چندلایه‌های کامپوزیتی است. چون این نوع خرابی در بین لایه‌های کامپوزیت اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیر قابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی ارائه شده است. اغلب روش‌های تشخیص جدایش بین لایه‌ای، جزء روش‌های غیرفعال می‌باشند، در حالی که اگر برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای، از روش‌های فعالی همچون نشرآوایی استفاده شود، پایش<sup>۱</sup> بلادرنگ سیستم امکان‌پذیر بوده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد [۵]. به منظور شناسایی مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌ها، روش نشرآوایی کارایی بهتری در مقایسه با آزمون‌های غیر مخرب دیگر دارد. از مزایای استفاده از روش نشرآوایی در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت

2. Williams and Lee

3. Groot

4. Yu

5. Woo and Choi

6. Giordano

7. Loutas

8. Kostopoulos

9. Sasikumar

10. Oliveira

11. Marques

12. Czigany

13. paget

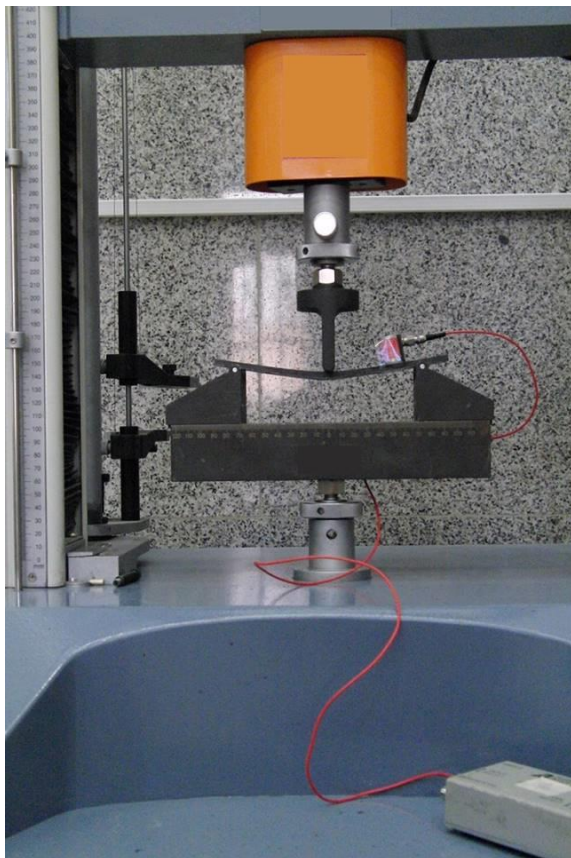
14. Burchak



شکل (۱) نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی در ابعاد استاندارد.

## ۲-۲- روش انجام آزمایش

پس از ساخت نمونه‌ها، مطابق شکل ۲، یک عدد سنسور نشرآوایی بر روی سطح نمونه قرار داده شد. سپس نمونه بر روی دو فک پایینی دستگاه تست خمش قرار گرفت. بارگذاری به صورت متمرکز در وسط تیر بوده و تکیه‌گاه‌های انتهایی تیر به صورت غلتکی سر آزاد می‌باشند. سیگنال‌های نشرآوایی، در حین بارگذاری ذخیره شد.



شکل (۲) نمونه تحت بارگذاری و سیگنال برداری آکوستیکی.

تشخیص دادند و این چهار مرحله را به صورت ایجاد ترک اولیه در نمونه، رشد آهسته خرابی در نمونه، رشد سریع خرابی و رشد پایدار آسیب گزارش نمودند.

هدف از این پژوهش، پایش بارگذاری خمشی کامپوزیت الیاف کربن در زمینه اپوکسی توسط روش نشرآوایی می‌باشد. در واقع این پژوهش به بررسی رفتار خمشی و ارتباط آن با سیگنال‌های ساطع شده از نمونه تحت بارگذاری می‌پردازد. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی در ابعاد استاندارد تست خمش تحت بارگذاری قرار گرفته و سیگنال‌های آکوستیکی ساطع شده توسط روش‌های تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۱</sup> و تبدیل موجک<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از مشاهدات تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم‌های خرابی تایید شد.

## ۲-۲ روش تحقیق

### ۲-۱- مواد و آماده سازی نمونه ها

مواد استفاده شده برای ساخت کامپوزیت، شامل الیاف کربن ۲۰۰ گرم بر متر مربع نوع T300 و ماتریس اپوکسی R510 به همراه سخت کننده ۲۰ درصد H520 می‌باشد. با استفاده از روش لایه چینی دستی<sup>۳</sup> نمونه‌های کامپوزیتی به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط قالب گیری شد. نمونه‌ها شامل ۱۰ لایه الیاف [0,90] با ضخامت ۴/۱ میلی‌متر و با درصد حجمی الیاف ۴۱٪ می‌باشد. به منظور جداسازی راحت نمونه‌ها پس از لایه چینی از سطح قالب، از یک پوشش ژله‌ای در سطح قالب استفاده شد. در انتها، نمونه‌ها علامت گذاری شده و برای انجام آزمایش خمش، مطابق شکل ۱، با استفاده از اهر مخصوص به ابعاد ۶۰×۱۸۵ میلی‌متر مطابق استاندارد<sup>۴</sup> بریده شد. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش، ۳ نمونه ساخته و آزمایش گردید.

1. Short time Fourier transform
2. Wavelet Transform
3. Hand Lay up
4. ASTM-D790

## ۳-۲- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها از یک دستگاه آزمایش کشش اونیورسال کالیبره شده با ظرفیت ۲ تن که میزان سرعت بارگذاری آن از ۰.۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه قابل تنظیم بود استفاده شد. قطعات کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های آکوستیکی از نرم افزار ای وی ۱ و سیستم پی سی آی -۲، با نرخ داده برداری 2Ms/s استفاده شد. از یک سنسور پیزو الکتریک تک کریستال مدل آر ۱۵ ای<sup>۳</sup> استفاده شد. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش تقویت کننده با ضریب ۴۰ دسی بل تقویت شد. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور از گریس سیلیکون خلا استفاده شد. برای حذف نویز زمینه، در حین نمونه برداری حد آستانه ۳۵ دسی بل در نظر گرفته شد.

## ۴-۲- روش‌های تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی

نشرآوایی پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراصوتی یک کیلوهرتز تا بیست مگا هرتز رخ می‌دهد. امواج نشرآوایی، امواج تنشی یا الاستیکی هستند که در نتیجه آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی در اثر خرابی اتفاق افتاده در سازه‌ها، بوجود می‌آیند. این خرابی‌ها حاصل تنش‌های داخلی یا خارجی اعمال شده در سازه‌ها هستند. اندازه‌گیری و شناسایی امواج الاستیک می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد منابع ساطع کننده امواج حاصل از خرابی‌ها در اختیار کاربر قرار دهد [۱۸]. امواج آکوستیکی که از نمونه منتشر می‌شوند، خاصیت غیر پایداری<sup>۴</sup> و هم‌پوشانی گذرا<sup>۵</sup> دارند [۱۹]. بدین‌سان برای تحلیل سیگنال نشرآوایی نیاز به بهره‌گیری از روش‌های مناسب پردازش سیگنال می‌باشد. هدف از پردازش سیگنال،

استخراج ویژگی‌هایی از سیگنال است که شرایط و ویژگی‌های سیگنال را پایش نماید. بسته به نوع سیگنال، روش‌های متعددی پیشنهاد می‌گردد. آنالیزهای آماری حوزه زمان و آنالیزهای طیفی حوزه فرکانس مناسب برای سیگنال‌های پایدار می‌باشد. اما برای سیگنال‌های نشرآوایی گذرا، دو آنالیز اشاره شده کافی نمی‌باشد و همچنین این دو روش مشکلاتی در استخراج داده‌ها دارند. به عنوان مثال انتقال داده‌ها از یک حوزه به حوزه دیگر، می‌تواند باعث از دست رفتن بخشی از داده‌ها شود. اگرچه تبدیل فوریه زمان کوتاه برای حل این مشکل ارائه شده است، اما موفقیت اندکی از آن به دست آمد [۱۹]. در حالی که این مشکل با گسترش روش‌های زمان-فرکانس بطور کلی مرتفع شد. تحلیل موجک<sup>۶</sup> بهترین گزینه برای اتصال دو حوزه زمان و فرکانس می‌باشد. آنالیز موجک ابزار مناسبی برای آنالیز موضعی تغییرات توان طیفی سیگنال با زمان می‌باشد. با تبدیل حوزه زمان به زمان-فرکانس اولاً می‌توان تغییرات مودهای غالب را تعیین نمود و ثانیاً نشان داد این مودها چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند [۲۰].

جنبه‌های جدیدی از پردازش تصویر و سیگنال، در طول چند سال گذشته توسط تبدیل موجک معرفی شده است. بعضی از تحقیقات در طول دهه گذشته، تبدیل موجک را روش مناسبی جهت آنالیز سیگنال نشرآوایی نشان داده اند [۲۱]. آنالیز موجک به عنوان تجزیه یک سیگنال به بخش‌هایی بر حسب یک سیگنال مادر تعریف می‌شود.

تبدیل موجک  $F(t)$  (هر تابع قابل انتگرال گیری) نسبت به موجک  $\psi$  توسط معادله (۱) بیان می‌شود [۲۲]:

$$CWT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{f}} F(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{f} \right) dt \quad (1)$$

که  $f$  نشان دهنده فرکانس،  $\tau$  شیفت زمانی و  $\psi^*$  مزدوج مختلط موجک می‌باشد [۸]. تبدیل موجک معکوس توسط

معادله (۲) تعریف میشود [۲۲]:

1. AE-Win
2. PCI-2
3. R15a
4. Non-Stationary
5. Overlapping Transient

همانطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، بیشترین مقدار فرکانس در محدوده ۱۴۰ کیلوهرتز رخ می‌دهد. این در حالی است که تبدیل موجک نیز همین محدوده فرکانسی را در شکل ۶ نشان داده است. همچنین ارتباط بین سیگنال آکوستیکی نشان داده شده در شکل ۴ که اولین دامنه ماکزیمم آن در ۱۰۰ میکروثانیه به وقوع پیوسته است، با فرکانس و ضرایب تبدیل موجک در شکل ۷ نشان داده شده است. نقطه ماکزیمم قرمز، بیانگر زمان ۱۰۰ میکروثانیه و فرکانسی حدود ۱۴۰ کیلوهرتز است. همانطوری که قبلاً نیز اشاره شد، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد سه نوع خرابی غالب در کامپوزیت‌های پایه پلیمری عبارتند از شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف [۵، ۲۳]. شکست ماتریس سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی پایین و شکست الیاف سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی بالا ایجاد می‌کند. همچنین در لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای به علت فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه، تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیکی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. با دقت در نمودارهای حاصل از سیگنال برداری آکوستیکی حین بارگذاری خمشی؛ شکل‌های ۸ تا ۱۰، نتیجه می‌شود که تا ۱۱۰ ثانیه اول بارگذاری که دامنه در حد چند دسی بل است، اتفاق خاصی در نمونه نیافتاده است. این بازه که مربوط به شروع بارگذاری روی نمونه است، نشان می‌دهد که ۱۱۰ ثانیه اول بارگذاری با تنش‌های بسیار پایینی همراه بوده و در نتیجه، سیگنال‌های ساطع شده در نمونه تحت بار، دامنه، شمارش و زمان استمرار پایینی دارد.

در بازه ثانیه ۱۱۰ تا ۱۷۰ نمودار دامنه بر حسب زمان به حالت صعودی می‌رسد. در این بازه، با افزایش بار وارده بر نمونه، تنش وارده افزایش یافته و دامنه و شمارش و زمان استمرار سیگنال‌های ساطع نیز افزایش می‌یابد. بنابر مطالعات انجام گرفته [۲، ۵، ۲۳]، این اتفاقات نشان دهنده وقوع شکست ماتریس است.

از ثانیه ۱۷۰ تا ۲۲۰، بار وارده بر نمونه افزایش یافته و ترک ایجاد شده در ماتریس با افزایش بار وارده به عمق نمونه

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|f|^2} CWT(f, \tau) \psi(t) df d\tau \quad (2)$$

$C_{\psi}$  ثابتی می‌باشد که فقط به  $\psi$  بستگی دارد و مقدار آن توسط معادله (۳) به دست می‌آید [۸]:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} \quad (3)$$

### ۳- بحث و نتایج

نتایج تست خمشی در جدول ۱ آمده است. همچنین شکل ۳، نمودار خمشی حاصل از بارگذاری را نشان می‌دهد.

جدول (۱) نتایج تست خمشی.

مدول	بیشترین فشار	بیشترین بار قابل تحمل (Kgf)
الاستیک (GPa)	قابل تحمل (MPa)	
۱۲/۰۹۷	۴/۵۵۳	۳۰/۶۹۱

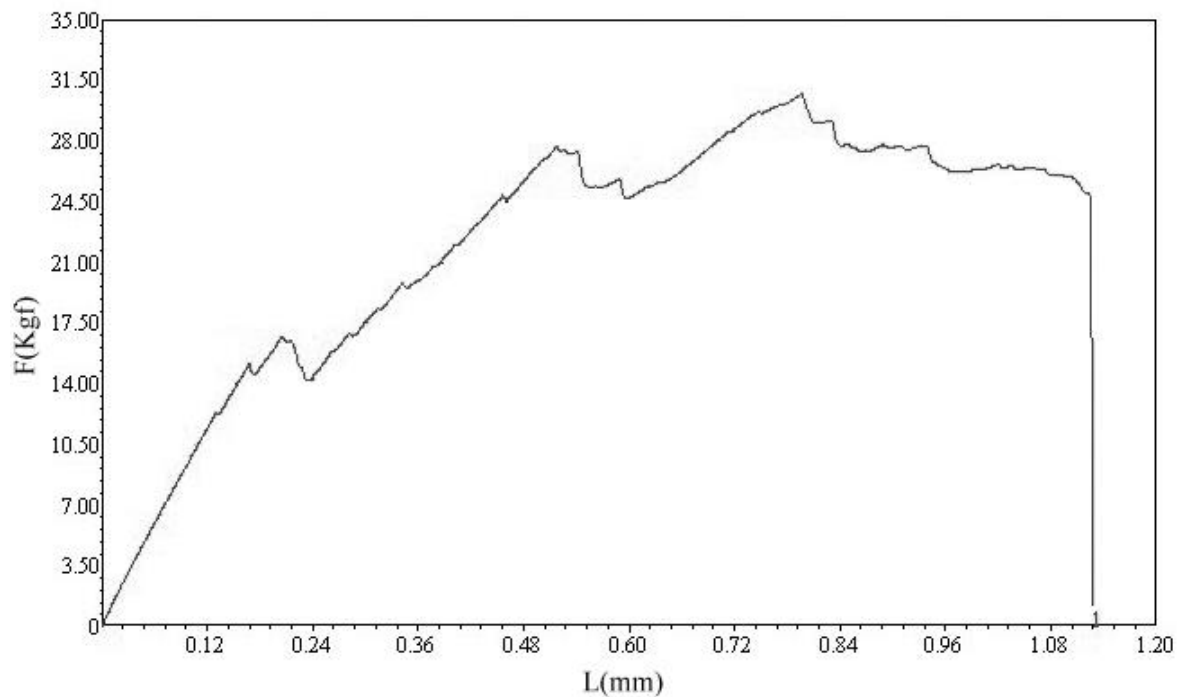
سه پیک عمده بارگذاری که در نمودار خمشی نیز آمده است، مکانیزم‌های شکست کامپوزیت‌های پایه پلیمری را نشان می‌دهد که در این نوع از کامپوزیت شامل شکست ماتریس<sup>۱</sup>، جدایش<sup>۲</sup> بین الیاف و ماتریس و شکست الیاف می‌باشد. به نظر می‌رسد از آنجایی که شکست ماتریس اولین اتفاق در بارگذاری کامپوزیت‌ها می‌باشد، اولین پیک<sup>۳</sup> با ضعیف‌ترین نیروی وارده مربوط به همین رویداد است. دومین پیک مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و سومین پیک نیز مربوط به شکست الیاف است. با توجه به نمودار خمشی به وضوح دریافت می‌شود که پس از شکست الیاف، توانایی تحمل بار کامپوزیت کاهش یافته و پس از گسیخته شدن همه الیاف تنیده شده به هم، به یکباره تحمل بار به صفر می‌رسد. این سه اتفاق عمده در حوزه فرکانسی معینی رخ می‌دهند. برای تعیین این حوزه فرکانسی، از سیگنال حاصل از تست نشر آوایی، تبدیل فوریه زمان کوتاه گرفته شد. شکل ۴، سیگنال خام دریافتی را نشان می‌دهد. در شکل ۵ نیز تبدیل فوریه زمان کوتاه نشان داده شده است.

1. Matrix
2. Debonding
3. Peak

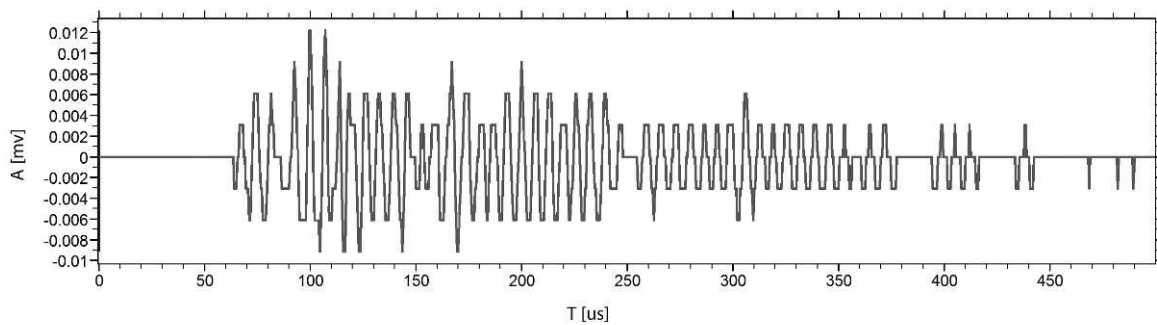
وضوح قابل مشاهده است. اگر بخواهیم این سیر صعودی نمودارهای برخط را با نمودار خمشی مقایسه کنیم، نتیجه می‌گیریم که فرض اولیه درست بوده و با افزایش شدت بارگذاری، شدت خرابی‌های صورت گرفته در نمونه نیز افزایش می‌یابد. یعنی ابتدا شکست ماتریس، سپس جدایش الیاف از ماتریس و در نهایت شکست الیاف به وقوع می‌پیوندد. این نتیجه گیری، با دیگر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه همخوانی خوبی دارد [۱، ۳، ۸ و ۱۲]. وجود تفاوت‌های جزئی در دسته بندی مکانیزم‌های مختلف خرابی، ناشی از تفاوت در روش ساخت کامپوزیت، شرایط اعمال بار، شرایط محیطی آزمایش و دیگر عوامل می‌باشد که کاملاً طبیعی و معقول است.

نفوذ می‌کند. افزایش دامنه و سایر پارامترهای سیگنال‌های ساطع شده در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشهود است. مطالعات نشان می‌دهد [۵ و ۶] این موضوع در کنار وقوع دومین پیک شکل ۳، حاکی از جدایش الیاف از ماتریس می‌باشد که در نهایت با افزایش دامنه سیگنال در ثانیه ۲۲۵ به حد ماکزیمم و شکست الیاف، بارگذاری به اتمام می‌رسد. این مطلب در نمودارهای دامنه، شمارش و زمان استمرار بر حسب زمان قابل مشاهده بوده و توسط تصاویر SEM نیز اثبات می‌شود. این تصاویر نشان می‌دهند که مکانیزم‌های خرابی رخ داده در نمونه تحت بارگذاری، به سه مکانیزم مذکور محدود می‌شود و مکانیزم شکست دیگری در نمونه اتفاق نیافتاده است.

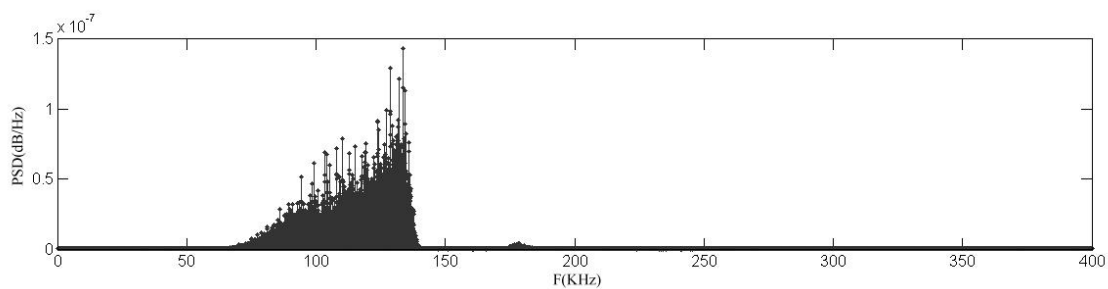
در نمودارهای دامنه، شمارش و زمان استمرار بر حسب زمان؛ شکل‌های ۸ تا ۱۰؛ افزایش ساز و کارهای صورت گرفته در نمونه تحت بارگذاری و سیر صعودی نمودارها به



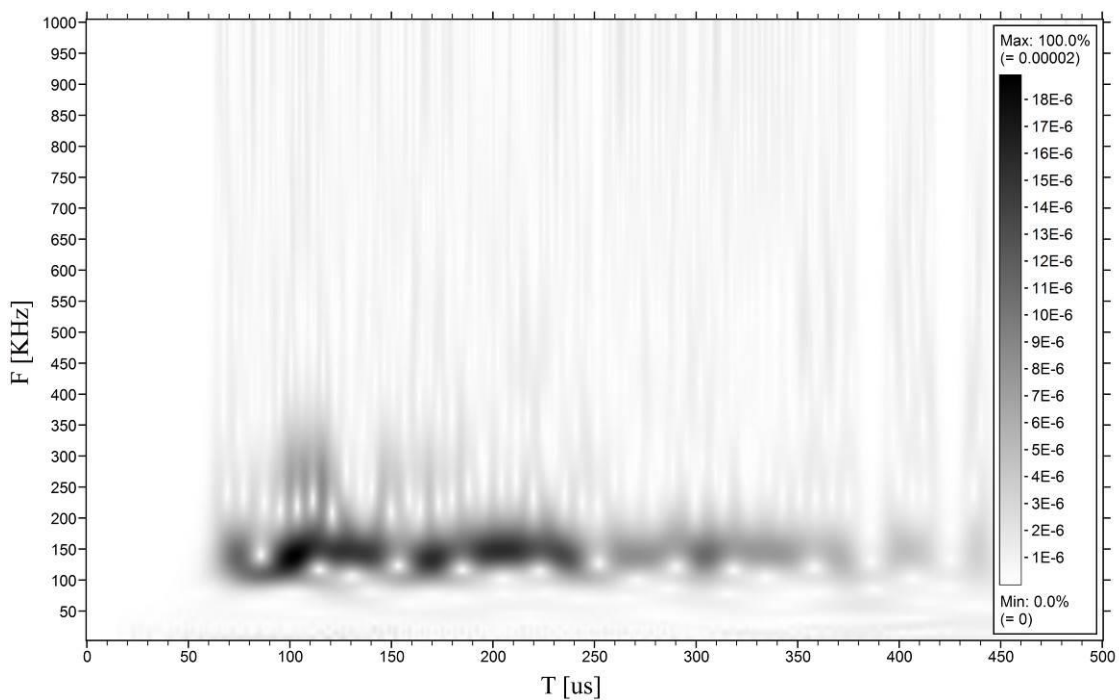
شکل (۳) نمودار خمشی حاصل از بارگذاری بر حسب نیرو - جابجایی.



شکل (۴) سیگنال آکوستیکی حاصل از بارگذاری.

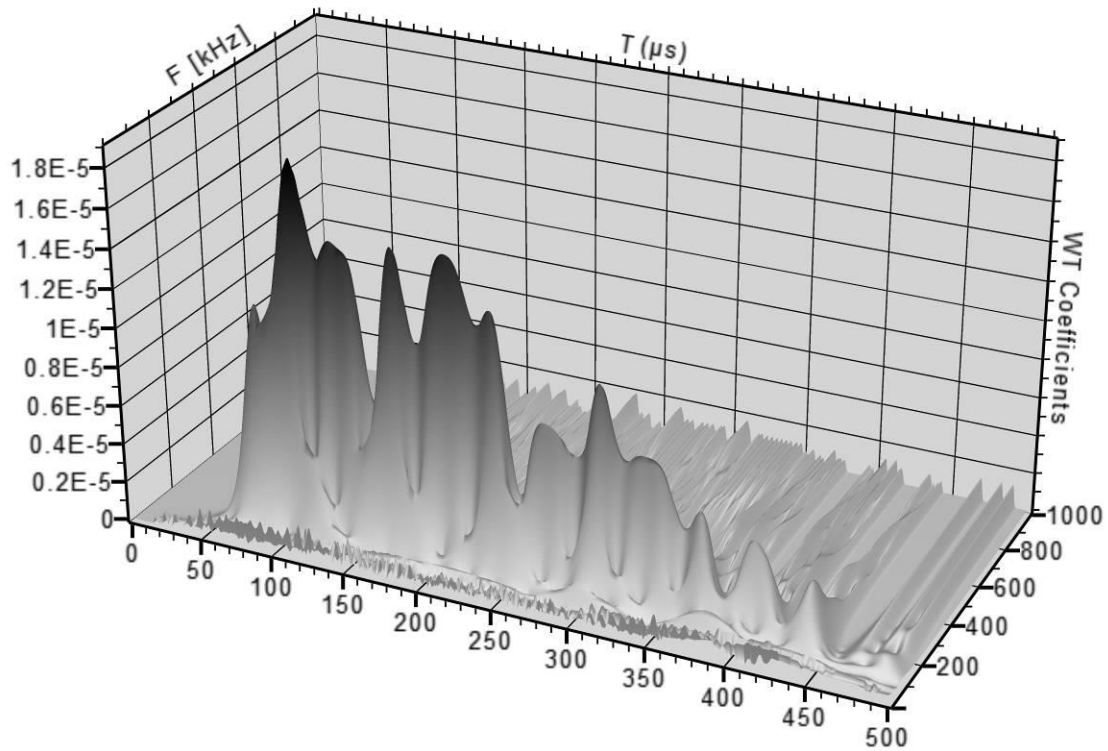


شکل (۵) تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال آکوستیکی.



شکل (۶) توزیع تبدیل موجک بر اساس زمان و فرکانس.

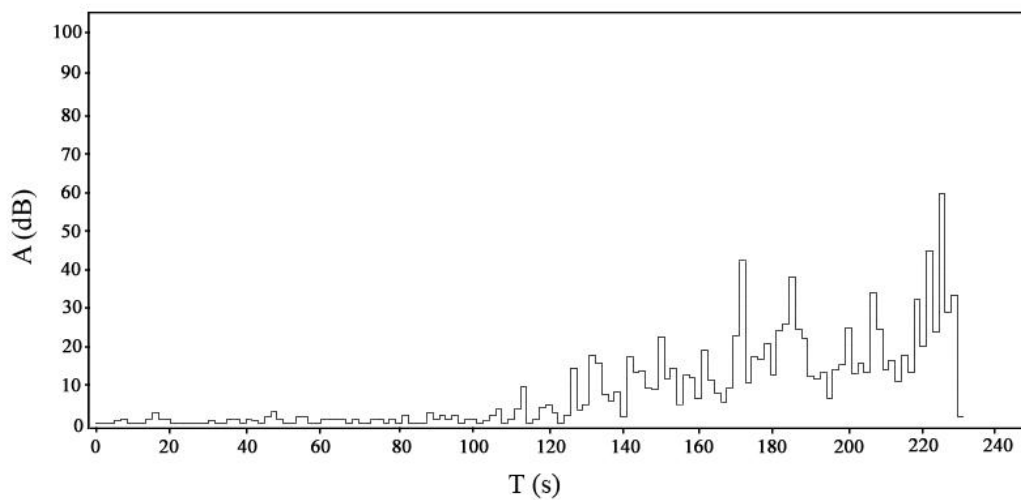




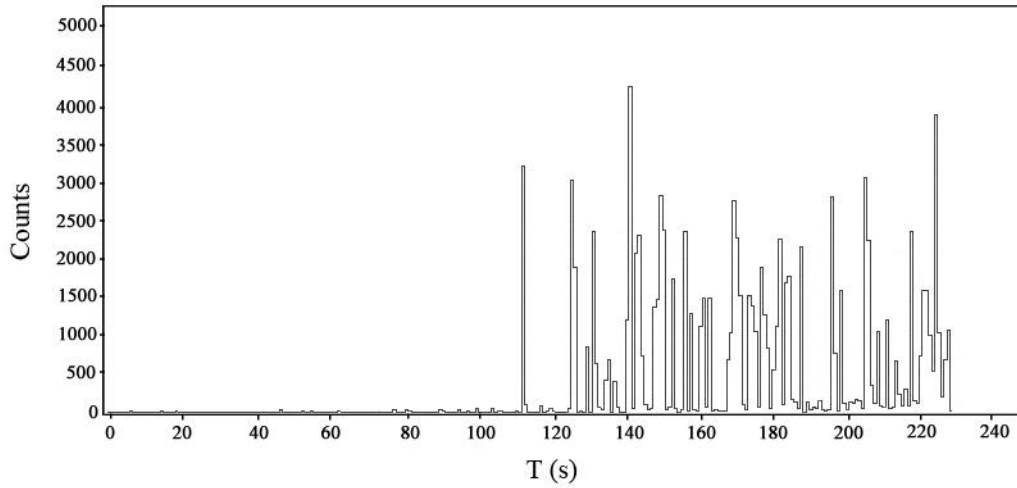
شکل (۷) ارتباط ضرایب تبدیل موجک با زمان و فرکانس.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ این تصاویر را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها شکست ماتریس، جدا شدن الیاف از ماتریس و شکست الیاف به خوبی قابل مشاهده است.

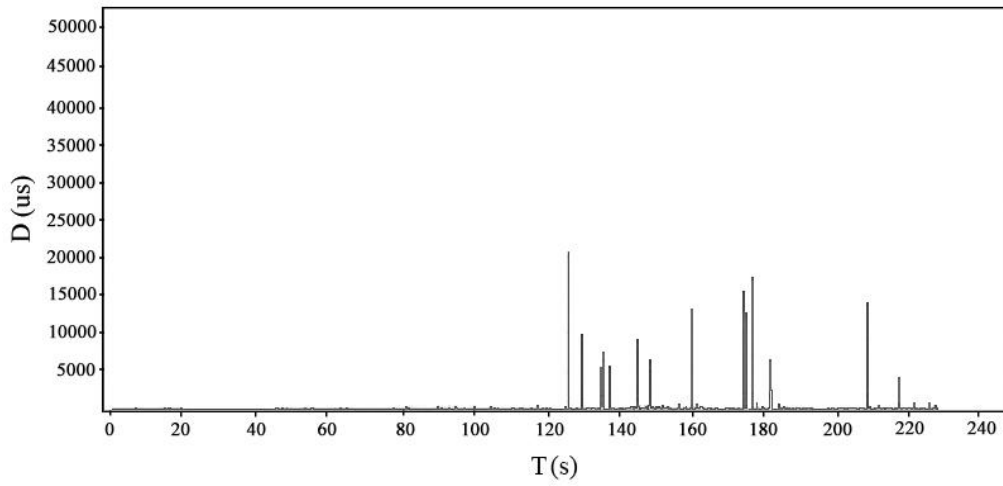
به منظور مشاهده مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت مورد مطالعه، از سطوح شکست نمونه، تصاویر میکروسکوپی توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردید.



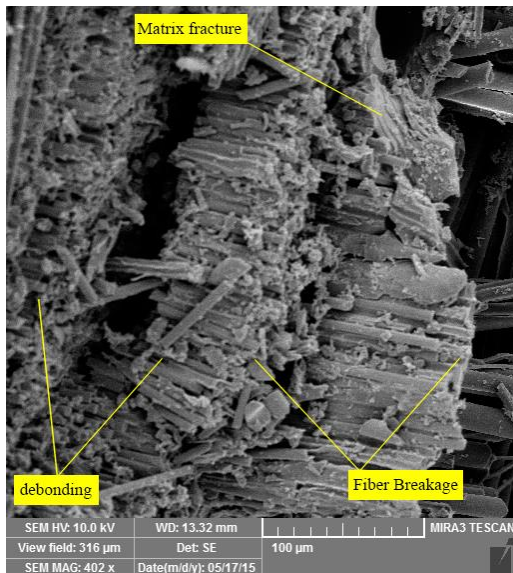
شکل (۸) نمودار دامنه - زمان.



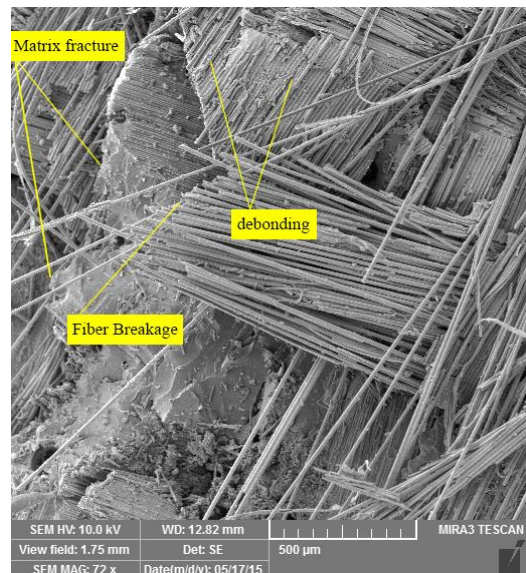
شکل (۹) نمودار شمارش - زمان.



شکل (۱۰) نمودار زمان استمرار - زمان.



شکل (۱۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح شکست نمونه.



شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح شکست نمونه.

- [6] Shahri M.N., Yousefi J., Hajikhani M., Ahmadi M., Investigation of delamination in composite materials using acoustic emission, *19rd National Conference on Manufacturing Engineering*, 2010, Tabriz, Iran.
- [7] Williams JH., Lee SS., Acoustic emission monitoring of fiber composite materials and structures, *Journal of Composite Materials*, Vol 12, 1978; No.4, pp.348-370.
- [8] de Groot P.J., Wijnen P.A.M., Janssen R.B.F., Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites, *Composite Science and Technology*, Vol 55, 1995; No.4, pp.405-412.
- [9] Yu Y.H., Choi J.H., Kweon J.H., Kim D.H., A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission. *Composite Structure*, Vol 75, 2006, No. 4, pp. 163-169.
- [10] Woo S.C., Choi N.S., Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events. *Composite Science and Technology*, Vol. 67, 2007, No. 8, pp. 1451-1458.
- [11] Giordano M., Calabro A., Esposito C., Damorec A., Nicolais L., An acoustic emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials. *Composite Science and Technology*, Vol 58, 1998, No. 12, , pp. 1923-1928.
- [12] Loutas T.H., Kostopoulos V., 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. *Composite Science and Technology*, Vol. 69, 2009, No. 2, pp. 265-272.
- [13] Sasikumar T., Rajendraboopathy S., Usha K.M., Vasudev E.S., Failure strength prediction of unidirectional tensile coupons using acoustic emission peak amplitude and energy parameter with artificial neural networks. *Composite Science and Technology*, Vol. 69, 2009, No. 7, pp. 1151-1155.
- [14] Oliveira R., Marques A.T., Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks. *Computer Structural*, Vol. 86, 2008, No.3, pp. 367-373.
- [15] Czigany T., Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic emission study, *Composite Science and Technology*, Vol. 66, 2006, No. 16, pp. 3210-3220.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از روش نشرآوایی برای پایش بارگذاری خمشی الیاف کربن در زمینه اپوکسی و تعیین فرکانس بیشینه بارگذاری استفاده شد. سه رخداد عمده خرابی در این گونه از کامپوزیت‌ها از روی نمودار خمشی تخمین زده شد. با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس بیشینه در این بارگذاری در حدود ۱۴۰ کیلوهرتز تعیین شد که روش تبدیل موجک نیز همین محدوده را تایید کرد. محدوده زمانی رویدادهای رخ داده در نمونه تحت بارگذاری توسط نمودارهای برخط به دست آمده از سیستم آکوستیکی مانیتور گردید و در نهایت مکانیزم‌های شکست کامپوزیت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. محدوده‌های زمانی و روند صعودی نمودارها، صحت سنجی خوبی با نمودار خمشی بر جای گذاشت.

#### مراجع

- [1] Khamedi R., Nikmehr M., Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon-epoxy composite properties by Acoustic Emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, 2015, No. 4, pp. 355-360.
- [2] Fotouhi M., Pashmforoush F., Shokri V., Ahmadi M., Investigation of damage mechanisms during delamination in composites by use of Wavelet Transform, *3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, 2011, Tehran, Iran.
- [3] Hajikhani M., Soltannia B., Oskouei A.R., Ahmadi M., Monitoring of delamination in composites by use of Acoustic Emission, *3rd Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference*, 2009, Tehran, Iran.
- [4] Amenabar I., Mendikute A., López-Arraiza A., Lizaranzu M., Aurrekoetxea J., Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, 2011, No. 5, pp. 1298-1305.
- [5] Saeedifar M., Fotouhi M., Mohammadi R., Ahmadi Najafabadi M., Hosseini Toudeshky H., Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, 2014, No. 4, pp. 1-11.

- [16] Paget C. A., Delamination Location and Size by Modified Acoustic Emission on Cross-ply CFRP Laminates during Compression-Compression Fatigue Loading, *ICCM 17 proceedings*, 009, UK.
- [17] Burchak M., Farrow I. R., Bond I. P., Rowland C. W., Acoustic Emission study of damage accumulation in CFRP composites under block loading, *11th European Conference on Composite Materials*, 2004, Greece.
- [18] Guo Y.B., Ammula S.C., Real time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining, *International journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 2005, No.5, pp. 1622-1627.
- [19] Zarif Karimi N., Heidary H., Ahmadi M., Rahimi A., Farajpur M., Monitoring of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, 2014, No. 15, pp. 169-183.
- [20] Marec A., Thomas J.H., Guerjouma R.EI., Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, 2008, No. 2, pp. 1441-1464.
- [21] Ni Q.Q., Iwamoto M., Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, 2002, No.1, pp. 717-728.
- [22] Soman K.P., Ramachandran K. I., *Insight into Wavelets From Theory To Practice 2Nd Ed*, Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2005.
- [24] Oskouei A.R., Ahmadi M., Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in Glass/Polyester Composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, 2010, No. 7, pp. 793-807.