



## تعیین کمی مکانیزم‌های خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار با روش‌های نشرآوایی و المان محدود

نعیم اکبری شاه خسروی<sup>1</sup>، علی قلی‌زاده<sup>1</sup>، رضا محمدی<sup>2</sup>، میلاد سعیدی‌فر<sup>2</sup>، مهدی احمدی نجف‌آبادی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 4413-1587، ahmadin@aut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 اردیبهشت 1395

پذیرش: 10 خرداد 1395

ارائه در سایت: 15 تیر 1395

کلید واژگان:

مکانیزم‌های خرابی

نشرآوایی

روش المان محدود

کامپوزیت‌های پلیمری

### چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، علی‌رغم داشتن خواص مکانیکی مطلوب همچون نسبت استحکام به وزن و سفتی بالا، مستعد ایجاد انواع خرابی‌ها هستند. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های نشرآوایی و المان محدود، مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های سوراخ‌دار شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری کششی بررسی می‌شوند. خرابی‌های مورد بررسی در این پژوهش عبارتند از: ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف. بدین منظور ابتدا نمونه‌های سوراخ‌دار استاندارد شیشه/اپوکسی با دو نوع لایه چینی [S5[0] و [S5[90] تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. سپس با استفاده از روش نشرآوایی و روش المان محدود مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌ها شناسایی شده و درصد هر مکانیزم خرابی به صورت کمی تعیین می‌شود. در روش نشرآوایی از تبدیل موجک برای تعیین درصد مکانیزم‌های خرابی استفاده شده است. سپس از روش المان محدود به منظور صحت‌سنجی نتایج تبدیل موجک استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی المان محدود از معیار خرابی هشین برای تعیین مقدار کمی مکانیزم‌های خرابی استفاده شد. با توجه به تطابق قابل قبول نتایج روش نشرآوایی و روش المان محدود، می‌توان از روش نشرآوایی به منظور تعیین خرابی‌ها در سازه‌های کامپوزیتی و تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌ها استفاده نمود.

## Quantification of damage mechanisms in holed composite laminates by acoustic emission and finite element methods

Naeim Akbari Shah Khosravi, Ali Gholizade, Reza Mohammadi, Milad Saeedifar, Mehdi Ahmadi Najafabadi\*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 4413-1587, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 06 May 2016  
Accepted 30 May 2016  
Available Online 05 July 2016

#### Keywords:

Damage mechanisms  
Acoustic emission  
Finite element method  
Polymer composites

### ABSTRACT

The laminated composites have many advantages such as high specific strength and specific stiffness. Despite these advantages, they are prone to different damage mechanisms. This paper focuses on quantification of damage mechanisms in standard Open-Hole Tensile (OHT) laminated composites using Acoustic Emission (AE) and Finite Element Method (FEM). These damages include three main mechanisms, matrix cracking, fiber/matrix debonding and fiber breakage. To this aim, OHT tests were carried out. The specimens were fabricated from two types of glass/epoxy composite materials with [0]5S lay-up and [90]5S lay-up. AE accompanied with wavelet-based approach was then used to detect and quantify damage mechanisms of the specimens. FE analysis based on Hashin criteria was then utilized to simulate the damage mechanisms in the specimens and to validate the AE-wavelet based results. Comparison of the applied methods shows that the results of the AE-wavelet based approach are in very good agreement with the FEM results. Finally, it was concluded that the AE method has a good applicability to determine the damage mechanisms in laminated composite structures and to predict the remaining life-time of the structure.

### 1- مقدمه

مختلف سازه، امکان تعویض اجزا و سهولت بررسی هر جز در سازه، سازه کامپوزیتی به جای این‌که به صورت یکپارچه ساخته شود، از بخش‌های مختلفی که با اتصالات شیمیایی و مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. یکی از روش‌های متداول اتصال مکانیکی، استفاده از پیچ و مهره و

چند لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف به دلیل خواص مکانیکی مطلوبی که دارند، امروزه به وفور در ساخت سازه‌های مهندسی به کار می‌روند. برخی اوقات به دلایلی همچون محدودیت در تولید، امکان دسترسی به قسمت‌های

پیش‌بینی مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌ها استفاده شد. پیش‌بینی روش امان محدود تطابق قابل قبولی با نتایج روش نشرآوایی داشته و بدین ترتیب صحت نتایج روش نشرآوایی تأیید شد.

## 2- روش تحقیق

### 2-1- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از نمونه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی، با دو چیدمان مختلف استفاده شد که مشخصات آن در جدول 1 نشان داده شده است. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش تزریق در خلاء<sup>6</sup> استفاده شد. نوع رزین استفاده شده اپوکسی EPL1012 و نوع سفت‌کننده EPH112<sup>7</sup> بوده و همچنین نوع الیاف شیشه به کار رفته نیز AT 390 UD 038 است. پس از اتمام فرآیند ساخت، نمونه‌ها به مدت یک هفته در هوای آزاد و در دمای 25 °C قرار گرفتند. از روش آلتراسونیک سی-اسکن<sup>8</sup> برای بررسی کیفیت لایه‌ها استفاده شد. پس از آماده شدن صفحات کامپوزیتی، نمونه‌های سوراخ‌دار با استفاده از دستگاه واترجت و براساس ابعاد استاندارد برش خوردند. نمونه دارای ابعاد 40×250 mm<sup>2</sup> و سوراخی مرکزی به قطر 5 mm هستند. درصد حجمی الیاف برای هر نمونه 60±3% است و ضخامت میانگین آن‌ها نیز 2.2 mm است. شکل 1 نمونه آزمایش را در حین بارگذاری نشان می‌دهد.

جدول 1 مشخصات و لایه‌چینی نمونه‌های آزمایش

Table 1 Characteristics of specimens with their stacking sequences.

نمونه	صفحه	نوع لایه‌چینی	ضخامت (mm)
A	0-0	[0] <sub>ss</sub>	2.2
B	90-90	[90] <sub>ss</sub>	2.2

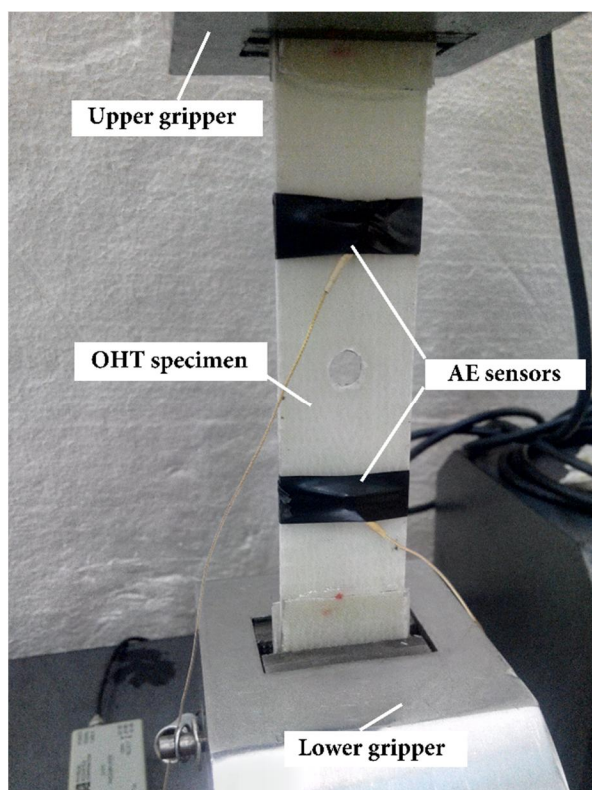


Fig. 1 The experimental setup of the OHT tests.

شکل 1 نمای کلی تجهیزات آزمایش نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار.

پرچ بوده که انتخاب مناسبی برای اتصال کامپوزیت‌های چند لایه است. این روش اتصال از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و امکان جدا شدن آسان آن نیز وجود دارد. علیرغم این مزایا در این اتصالات به دلیل وجود سوراخ، استحکام سازه در اثر تمرکز تنش و ایجاد خرابی‌ها، کاهش می‌یابد. همچنین بازدهی این روش در سازه‌های کامپوزیتی بسیار کمتر از سازه‌های فلزی است [3-1]. بنابراین، به منظور افزایش کارایی سازه، بررسی تأثیر اتصالات بر روی سازه مهم است. بدین منظور، تعیین مودهای مختلف خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار یکی از موضوعات مهم و پیچیده به شمار می‌آید. زمانی که چندلایه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرند، امکان وقوع انواع مکانیزم‌های خرابی همچون ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، شکست الیاف و جدایش بین لایه‌ها وجود دارد [4-7].

انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی گویند. اخیراً از روش نشرآوایی برای تشخیص مکانیزم‌های مختلف خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده شده است. در برخی پژوهش‌ها [8-12] از پارامترهای مختلف سیگنال‌های نشرآوایی از جمله فرکانس، دامنه و انرژی سیگنال‌ها به منظور تعیین مکانیزم‌های مختلف خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده شده است. در حالی که دسته‌ای دیگر از محققین [13-17] از روش‌های کمکی دیگری مانند شبکه عصبی، دسته‌بندی فازی<sup>1</sup>، تبدیل موجک<sup>2</sup> و آنالیز اجزا اصلی<sup>3</sup> به همراه روش نشرآوایی برای تعیین خرابی‌ها در چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده نموده‌اند.

در اکثر تحقیقات انجام شده [8, 13-19]، نتایج حاصل از روش نشرآوایی در تعیین مکانیزم‌های خرابی به تنهایی ارائه شده و از روش مناسب دیگری برای صحت‌گذاری داده‌های نشرآوایی استفاده نشده است. یا این که در برخی از پژوهش‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>4</sup> برای صحت‌گذاری نتایج نشرآوایی استفاده شده که به دلیل ماهیت نقطه‌ای و موضعی تصاویر میکروسکوپی، این نتایج امکان تعمیم‌دهی به کل قطعه را ندارند [14, 18, 20]. بدین منظور در این پژوهش از روش امان محدود برای پیش‌بینی مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌ها و صحت‌گذاری نتایج حاصل از نشرآوایی استفاده می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، تشخیص و تعیین کمی مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی سوراخ‌دار تحت بار کششی<sup>5</sup> به کمک روش نشرآوایی و تحلیل امان محدود است. به منظور دسته‌بندی مکانیزم‌های خرابی با روش نشرآوایی، ابتدا سیگنال‌های نشرآوایی حاصل از شکست یک دسته الیاف و همچنین شکست رزین خالص با استفاده از آزمون‌های جداگانه ثبت شد. سپس نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار تحت بار کششی قرار گرفته و سیگنال‌های نشرآوایی توسط دو سنسور پیزوالکتریک ثبت شد. در ادامه، با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های نشرآوایی ثبت شده در حین خرابی نمونه‌ها به اجزای مختلفی با محدوده فرکانسی خاص تجزیه شده و توزیع انرژی در هر بازه فرکانسی تعیین شد. با توجه به الگوهای نشرآوایی مبنا، هر بازه فرکانسی به یک مکانیزم خرابی اختصاص یافت و بدین ترتیب درصد هر مکانیزم خرابی در نمونه‌ها تعیین شد. به منظور صحت‌گذاری نتایج نشرآوایی از تحلیل امان محدود بر پایه مدل خرابی هشین برای

<sup>1</sup> Fuzzy C-mean

<sup>2</sup> Wavelet

<sup>3</sup> principal component analysis

<sup>4</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>5</sup> Open-Hole Tensile

<sup>6</sup> Vacuum Infusion Process

<sup>7</sup> Hardener

<sup>8</sup> C-scan

## 2-2- روش انجام آزمایش

بار کششی با نرخ جابجایی ثابت 1 mm/min در دمای 24°C اعمال شده است. مقدار نیرو و جابه‌جایی به طور پیوسته در حین آزمایش اندازه‌گیری شد. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر نمونه سه بار آزمایش شد.

## 3-2- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه تست کشش مدل هیوا، با ظرفیت 5 ton و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین 0.1-500 mm/min استفاده شد. همچنین برای ثبت داده‌های نشر آوایی از نرم‌افزار آئی وی<sup>1</sup> و سیستم پی‌سی‌آی-2<sup>2</sup>، با نرخ داده برداری 1 Ms/s استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال، با پهنای باند وسیع به نام پیکو<sup>3</sup>، محصول کمپانی پک<sup>4</sup>، مدل آر 50 دی<sup>5</sup> استفاده شد. دو سنسور به فاصله 40 mm از مرکز نمونه نصب شدند. فرکانس تشدید سنسور 513.28 kHz و محدوده بهینه کاری آن 100-750 kHz است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور به وسیله پیش تقویت کننده AST-2/4/6 با ضریب تقویت 40 dB تقویت شدند. آستانه پایین دریافت سیگنال‌ها 35 dB در نظر گرفته شد. برای بهبود عبوردهی سیگنال‌های نشر آوایی بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاء شده استفاده شد. برای کالیبره کردن سنسورهای نشر آوایی، مطابق استاندارد [21] ASTM E976-10 از روش شکست نوک مداد استفاده شد.

## 3- روش‌های تحلیل نتایج

### 1-3- تبدیل موجک

تبدیل موجک روشی جدید در پردازش سیگنال‌ها است. موجک، موجی با دوره تناوب محدود و مقدار میانگین صفر است [22,15]. تبدیل موجک گسسته<sup>6</sup> یکی از انواع تبدیل‌های موجک بوده که در این روش سیگنال اصلی به اجزایی به نام کلیات و جزئیات تجزیه می‌شود. سپس در سطوح بعدی تجزیه، بخش جزئیات سیگنال مجدداً به دو بخش تقسیم می‌شود و این کار تا تجزیه سیگنال تا سطوح مورد نظر ادامه می‌یابد. از دیدگاه ریاضی، تبدیل موجک گسسته بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = c \sum_i \sum_k DWT(i, k) 2^{\frac{i}{2}} \psi(2^i t - k) \quad (1)$$

تبدیل موجک گسسته معکوس نیز بصورت زیر بدست می‌آید:

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

که در روابط فوق،  $f(t)$  و  $DWT(i, k)$  به ترتیب بیان‌گر سیگنال مورد نظر، ضرایب تبدیل موجک که با یک ماتریس دو بعدی ارائه شده و سطح تجزیه است.  $k$  نشانگر حوزه زمانی بوده،  $\psi$  تبدیل موجک مادر نامیده شده و  $\psi^*$  مزدوج مختلط  $\psi$  است [23,22].

در تبدیل موجک گسسته به دلیل اینکه در سطوح بعدی فرآیند تجزیه، اجزای با فرکانس بالا تجزیه نمی‌شود، لذا بخشی از داده‌ها در تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود. در این پژوهش، به منظور استفاده از کلیه بخش‌های تشکیل دهنده سیگنال، از تبدیل موجک بسته‌ای<sup>7</sup> استفاده می‌شود. در این روش، در

سطوح بعدی تجزیه سیگنال، علاوه بر جزئیات، بخش کلیات نیز به دو بخش کلیات و جزئیات تقسیم می‌شود که هر جزء محدوده فرکانسی خاص خودش را دارد. از معیار انرژی به منظور تعیین توزیع انرژی در هر محدوده فرکانسی تجزیه شده استفاده می‌شود. برای محاسبه سطح انرژی هر جزء موجک، می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^i(\tau))^2 \quad (3)$$

که در این رابطه،  $f_1^i, \dots, f_j^i$  نشان دهنده هر یک از اجزاء موجک سطح  $i$ -ام سیگنال تجزیه‌شده است و  $E_1^i, \dots, E_j^i$  مقدار انرژی مربوط به هر کدام از این اجزاء را نشان می‌دهد.

به منظور محاسبه انرژی کل سیگنال می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$E_{Total}(t) = \sum_i \sum_j E_j^i(t) \quad (4)$$

در نهایت، برای بدست آوردن توزیع نسبی انرژی برای هر جزء  $(P_j^i)$ ، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_j^i(t) = \frac{E_j^i}{E_{Total}(t)} \quad ; \quad j = 1, \dots, 2^i \quad (5)$$

### 2-3- روش المان محدود

یکی از موضوعات مهم در تحلیل کامپوزیت‌های چندلایه، پیش‌بینی خرابی‌ها و نحوه توسعه آنها است. به منظور شبیه‌سازی خرابی‌ها در نمونه‌ها از معیار هشین استفاده شده است. این معیار به منظور پیش بینی شروع خرابی در کامپوزیت‌هایی با الیاف تک جهته استفاده می‌شود. معیار هشین شروع چهار مکانیزم خرابی در کامپوزیت‌ها را پیش‌بینی می‌نماید. این خرابی‌ها عبارتند از: 1- شکست الیاف تحت کشش 2- شکست الیاف تحت فشار 3- شکست ماتریس تحت کشش 4- شکست ماتریس تحت فشار. روابط ریاضی این معیارها به صورت زیر است:

$$F_{ft} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad (6) \text{ شکست الیاف تحت کشش}$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^c}\right)^2 = 1 \quad (7) \text{ شکست الیاف تحت فشار}$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad (8) \text{ شکست ماتریس تحت کشش}$$

$$F_{me} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^c} + \frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L} = 1 \quad (9) \text{ شکست ماتریس تحت فشار}$$

در معادلات بالا  $\sigma_{ij}$ -ها اجزای تانسور تنش‌های مؤثر هستند.  $X^T$  و  $X^c$  به ترتیب استحکام کششی و فشاری در جهت الیاف،  $Y^T$  و  $Y^c$  به ترتیب استحکام کششی و فشاری در جهت عمود بر الیاف و  $S^L$  و  $S^T$  نیز استحکام برشی در راستای طولی و عرضی الیاف هستند. ضریب  $\alpha$  بیانگر میزان توزیع تنش برشی در الیاف‌ها در حالت کشش است.

آسیب یا خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی موجب کاهش استحکام و مدول الاستیسیته چند لایه می‌شود. در این جا از مدل ارائه شده توسط ماتزین‌میلر<sup>8</sup> برای محاسبه ماتریس سختی ماده‌ای که دچار آسیب یا خرابی شده، استفاده می‌شود. در این مدل رابطه بین تنش مؤثر و تنش‌های نرمال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (10)$$

که در این رابطه  $\hat{\sigma}$  و  $\sigma$  به ترتیب تانسور تنش مؤثر و تنش نرمال را نشان می‌دهند همچنین  $M$  نیز اپراتور خرابی است که از رابطه زیر به دست

<sup>8</sup> matzinmiller

<sup>1</sup> AEWin

<sup>2</sup> PCI-2

<sup>3</sup> PICO

<sup>4</sup> PAC

<sup>5</sup> R50D

<sup>6</sup> Discrete Wavelet Transform (DWT)

<sup>7</sup> Wavelet Packet Transform (WPT)

می‌آید:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-d_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} \end{bmatrix} \quad (11)$$

در ماتریس فوق،  $d_f$ ،  $d_m$  و  $d_s$  به ترتیب متغیرهای آسیب برای مودهای خرابی الیاف، ماتریس و خرابی برشی هستند. همچنین این پارامترها برای دو حالت مختلف کششی و فشاری به ترتیب با علائم  $t$  و  $c$  نشان داده می‌شود. متغیر خرابی برشی را می‌توان به صورت تابعی از متغیر خرابی ماتریس و الیاف در نظر گرفت [24-27].

$$d_s = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m) \quad (12)$$

#### 4- بحث و نتایج

در این بخش، نتایج در دو بخش ارائه شده است. در بخش نخست مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی به روش نشرآوایی تعیین شده است. در بخش دوم نتایج حاصل از تحلیل امان محدود ارائه شده و با نتایج روش نشرآوایی مقایسه شده است.

##### 4-1- تعیین خرابی‌ها با استفاده از روش نشرآوایی

در این بخش مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های سوراخ‌دار کامپوزیتی تحت بار کششی با استفاده از روش نشرآوایی بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به هر مکانیزم خرابی به‌طور جداگانه تعیین شدند. سپس سیگنال‌های نشرآوایی نمونه‌های سوراخ‌دار با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای تحلیل شده و با برقراری ارتباط بین نتایج موجک و الگوهای مبنای نشرآوایی، درصد مکانیزم‌های خرابی تعیین می‌شود.

##### 4-1-1- تهیه الگوهای مبنای نشرآوایی هر مکانیزم خرابی

براساس تحقیقات پیشین، مکانیزم‌های خرابی رایج در چند لایه‌های کامپوزیتی عبارتند از شکست الیاف، ترک‌خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس [4-7]. به منظور تعیین و دسته‌بندی مکانیزم‌های خرابی، ابتدا مشخصات نشرآوایی مربوط به هر یک از مکانیزم‌های خرابی باید تعیین شود. بدین منظور، از آزمون کشش نمونه رزین خالص و دسته‌های الیاف استفاده شد. برای انجام آزمون کشش رزین خالص، از نمونه دمبلی شکل تهیه شده از رزین اپوکسی استفاده شد. به منظور ثبت امواج حاصل از شکست رزین، سنسورهای نشرآوایی بر روی سطح نمونه نصب شد (شکل 2.a). برای انجام آزمون کشش الیاف خالص، از یک دسته الیاف که شامل  $1000 \pm 100$  رشته است، استفاده شده است. دو انتهای این دسته الیاف بر روی نوار آلومینیومی چسبانده شده و سپس نمونه تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. برای ثبت سیگنال‌های نشرآوایی حاصل از شکست الیاف از دو سنسور نشرآوایی استفاده شد که بر روی نوارهای آلومینیومی چسبانده شده‌اند (شکل 2.b). دامنه فرکانسی سیگنال‌های مربوط به هر یک از این خرابی‌ها به کمک روش تبدیل فوریه سریع<sup>1</sup> تعیین شد. طیف فرکانسی حاصل از ترک‌خوردگی ماتریس و شکست الیاف در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 3 مشخص است، سیگنال‌های حاصل از ترک‌خوردگی ماتریس شامل محدوده فرکانسی 80-250 kHz بوده و سیگنال‌های حاصل از شکست الیاف دارای

محدوده فرکانسی 375-480 kHz هستند. بر اساس تحقیقات انجام شده [18]، سیگنال‌های حاصل از جدایش الیاف از ماتریس دارای محدوده فرکانسی مابین سیگنال‌های حاصل از شکست ماتریس و شکست الیاف (250-375kHz) هستند.

##### 4-1-2- استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای برای تجزیه سیگنال نشرآوایی نمونه‌ها

به منظور تعیین درصد مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار، ابتدا سیگنال نشرآوایی مربوط به هر نمونه ثبت شده و سپس به کمک روش تبدیل موجک بسته‌ای<sup>2</sup> تجزیه شده‌اند. برای تعیین سطح تجزیه مناسب، از معیار آنتروپی استفاده شد. بر این اساس، سیگنال‌های ثبت شده تا سه سطح و هشت جزء تجزیه شدند. شکل 4 نشان‌دهنده محدوده فرکانسی مربوط به هر جزء موجک است. با توجه به الگوهای فرکانسی مبنای حاصل از آزمون رزین و الیاف خالص، اجزایی که در محدوده فرکانسی 62.5-250 kHz قرار دارند (اجزای دوم، سوم و چهارم) مربوط به ترک‌خوردگی ماتریس بوده و اجزایی که در محدوده فرکانسی 250-375kHz و 375-500 kHz قرار دارند، به ترتیب نشان‌دهنده جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف هستند. در ادامه با استفاده از معیار انرژی، درصد انرژی مربوط به اجزاء سطح سوم محاسبه شد. شکل 5 توزیع انرژی مربوط به اجزای سطح سوم برای نمونه‌های A و B را نشان می‌دهد. در نهایت با تطابق داده‌های توزیع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی در محدوده‌های فرکانسی مختلف و الگوهای فرکانسی

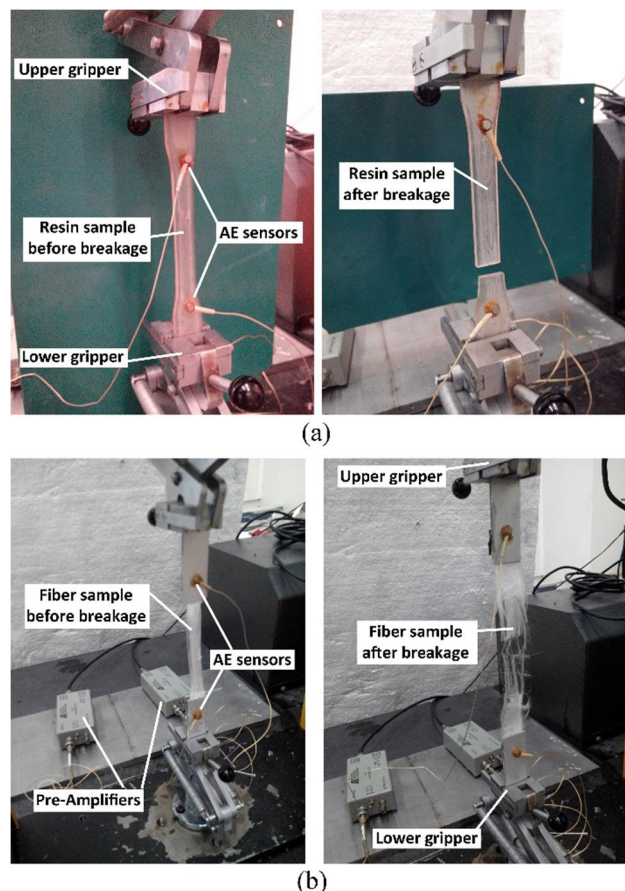


Fig. 2 The pure a) matrix, and b) fiber tensile tests.

شکل 2 آزمون کشش (a) رزین خالص و (b) الیاف خالص.

<sup>2</sup> Wavelet packing transform

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform



که میزان تنش‌های برشی و کششی ماکزیمم بوده، شکست ماتریس تحت کشش اتفاق می‌افتد. در نواحی کناری که تنش‌های فشاری و برشی در این نواحی ماکزیمم است، خرابی ماتریس در اثر فشار رخ می‌دهد. شکل‌های 6.c و 6.d به ترتیب مربوط به شکستگی الیاف در اثر کشش و فشار هستند. زمانی که راستای الیاف در راستای بارگذاری باشد، الیاف نقش

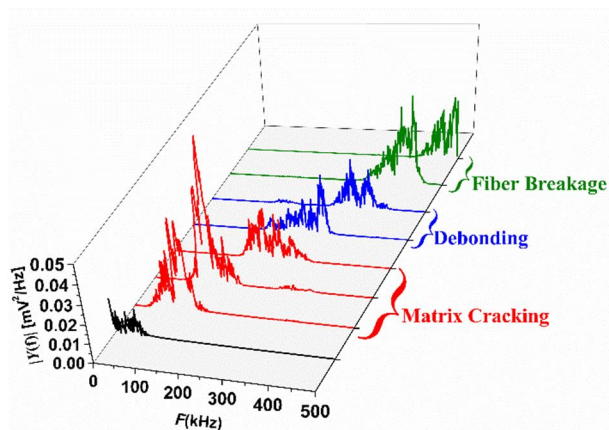


Fig. 4 FFT results for the 3<sup>rd</sup> level WPT components.

شکل 4 محدوده فرکانسی اجزای سطح سوم تبدیل موجک بسته‌ای.

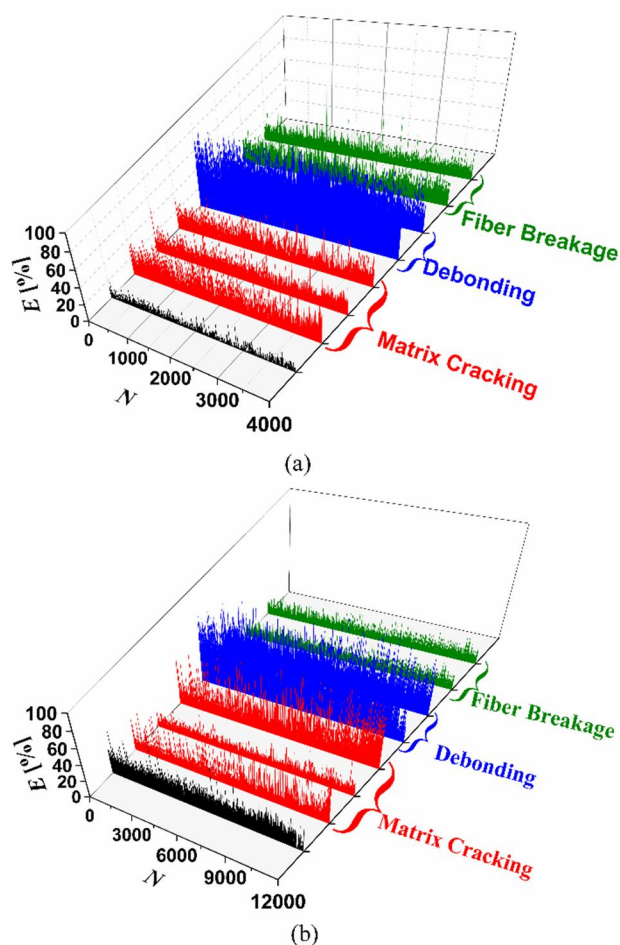


Fig. 5 Energy distribution results of the 3<sup>rd</sup> level WPT components for specimens a) A, and b) B.

شکل 5 توزیع انرژی مربوط به اجزای سطح سوم تبدیل موجک بسته‌ای نمونه‌های (a) A و (b) B.

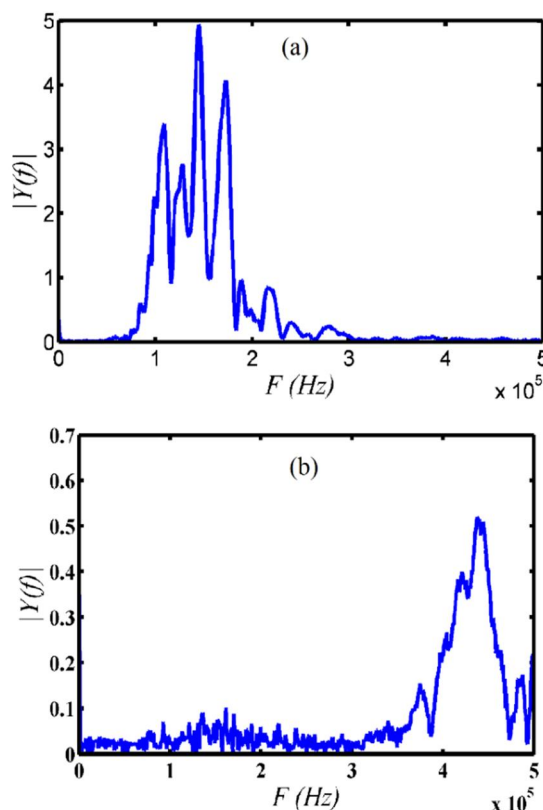


Fig. 3 The dominant frequency range of AE signals for pure a) matrix cracking, and b) fiber breakage.

شکل 3 محدوده فرکانسی سیگنال‌های نشرآوایی حاصل از (a) شکست رزین خالص، و (b) شکست الیاف خالص.

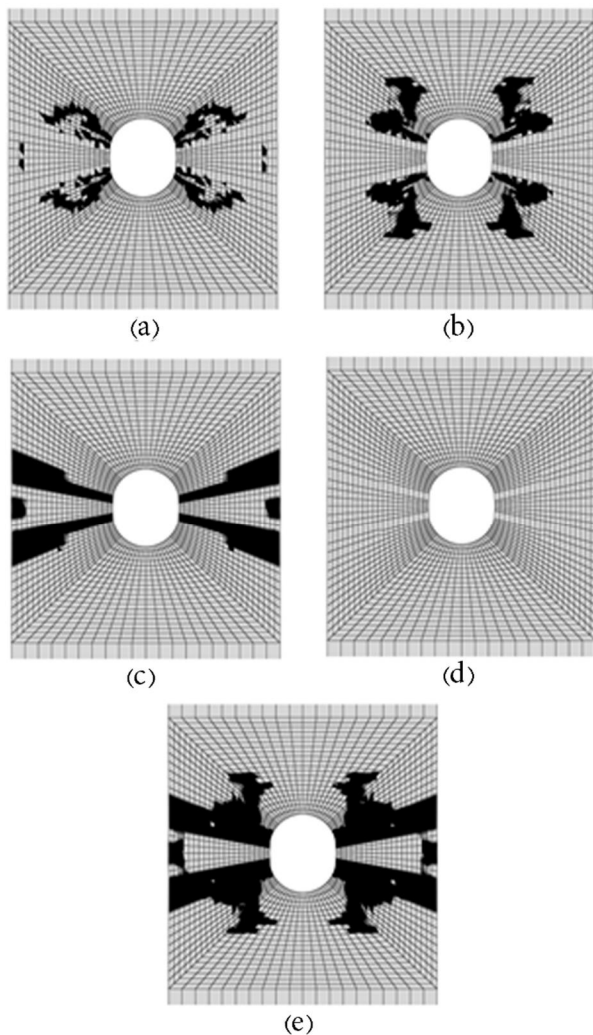
مینا، درصد هریک از مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های A و B تعیین می‌شود (جدول 2). همان‌طور که در شکل 5.a و جدول 2 نشان داده شده است، میزان شکست الیاف در نمونه A که در آن راستای الیاف در جهت بارگذاری بوده، بیشتر از نمونه B است. دلیل این امر این است که در نمونه B راستای الیاف عمود بر جهت بارگذاری بوده و در نتیجه الیاف نقش مهمی را در تحمل بار ایفا نمی‌کنند. در حالی که در نمونه B ماتریس و سطح تماس الیاف و ماتریس نقش مهمی را در تحمل نیرو ایفا می‌نمایند. به همین دلیل، مکانیزم‌های غالب خرابی در این نمونه، ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس است. با توجه به جدول 2، در نمونه B با وجود اینکه راستای الیاف عمود بر جهت بارگذاری است، 12 درصد شکستگی الیاف مشاهده می‌شود که دلیل این امر این است که در پارچه الیافی استفاده شده، به منظور حفظ پیوستگی دسته الیاف، 10% الیاف در جهت پود قرار دارند.

#### 4-2- تعیین خرابی‌ها با استفاده از روش المان محدود

شبیه‌سازی المان محدود بصورت دو بعدی و با المان‌های تنش صفحه‌ای از نوع (CPS4)<sup>1</sup> برای نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار انجام شد. خواص مواد و پارامترهای خرابی نمونه‌ها که توسط آزمون‌های استاندارد بدست آمده، در جدول 3 و 4 نشان داده شده است.

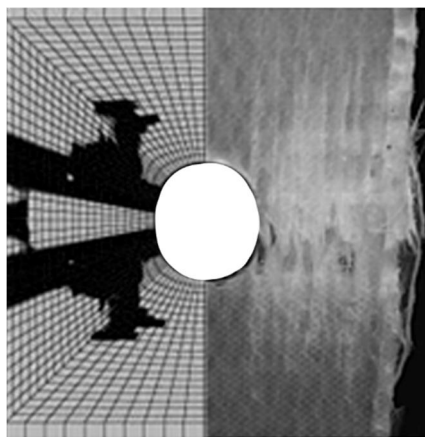
شکل 6 مکانیزم‌های مختلف خرابی را در نمونه A نشان می‌دهد. شکل‌های 6.a و 6.b به ترتیب خرابی ماتریس در اثر کشش و فشار را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قسمت‌های راست و چپ سوراخ

<sup>1</sup> 4-node plane stress element



**Fig. 6** FEM contour plots for a) matrix tensile, b) matrix compression, c) fiber tensile, d) fiber compression, and e) fiber/matrix debonding damages of specimen A.

شکل 6 مکانیزم‌های مختلف خرابی بدست آمده از روش المان محدود برای نمونه A، (a) خرابی کششی ماتریس (b) خرابی فشاری ماتریس (c) خرابی کششی الیاف (d) خرابی فشاری الیاف.



**Fig. 7** The real and FE simulated damage contour for specimen A.

شکل 7 نمایی از خرابی‌های پیش‌بینی شده توسط روش المان محدود در مقایسه با خرابی در نمونه واقعی برای نمونه A.

جدول 2 پیش‌بینی درصد مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار با روش تبدیل موجک بسته‌ای.

**Table 2** Percentage of different damage mechanisms obtained from WPT analysis.

درصد نتایج WPT		مکانیزم خرابی
B	A	
42	29	ترک خوردگی ماتریس
46	49	جدایش الیاف از ماتریس
12	22	شکست الیاف

جدول 3 خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار شیشه/اپوکسی.

**Table 3** The mechanical properties of glass/ epoxy OHT specimens.

$G_{23}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$E_2$ (MPa)	$E_1$ (MPa)
4500	5830	5830	0.28	7200	24000

جدول 4 پارامترهای آغاز خرابی نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار شیشه/اپوکسی.

**Table 4** Damage initiation properties of glass/ epoxy OHT specimens.

$S^L$ (MPa)	$S^T$ (MPa)	$Y^C$ (MPa)	$Y^T$ (MPa)	$X^C$ (MPa)	$X^T$ (MPa)
60	60	145	115	300	570

اصلی را در تحمل بار ایفا می‌نمایند، بنابراین در نمونه A شاهد شکسته شدن الیاف در سمت چپ و راست سوراخ هستیم (شکل 6.c). از آنجایی که الیافی عمود بر جهت بارگذاری وجود ندارد، شکستگی الیاف تحت فشار در نمونه رخ نمی‌دهد (شکل 6.d). شکل 6.e محدوده خرابی برشی را نشان می‌دهد. این خرابی در نواحی رخ می‌دهد که معیار خرابی مربوطه (معادله 12) ارضاء شود. در شکل 7 نمودار تجمع خرابی‌های نمونه A به همراه شکل واقعی خرابی‌ها در این نمونه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی بین رفتار خرابی‌ها در نمونه واقعی و نمونه شبیه‌سازی شده وجود دارد.

شکل 8 مکانیزم‌های مختلف خرابی نمونه B را نشان می‌دهد. خرابی‌های فشاری و کششی ماتریس به ترتیب در شکل‌های 8.a و 8.b نشان داده شده است. به دلیل اینکه راستای الیاف عمود بر جهت بارگذاری است، الیاف سهم عمده‌ای در تحمل نیرو نداشته و ماتریس نقش اصلی در تحمل بار وارده را بر عهده دارد. بنابراین شکستگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس، مکانیزم‌های غالب خرابی در نمونه B هستند (شکل 8.a و 8.b).

با توجه به شکل 8، چون در نمونه B راستای الیاف عمود بر جهت بارگذاری است، لذا شکستگی الیاف در اثر کشش و فشار در این نمونه مشاهده نمی‌شود (شکل‌های 8.c و 8.d). در این نمونه الیاف هیچ تاثیری در تحمل بارهای وارده ندارند. همچنین قابل ذکر است که تنش فشاری افقی وارد بر آنها کمتر از استحکام فشاری آنها است.

در شکل 9 نمودار تجمع خرابی‌ها در نمونه B به همراه شکل واقعی خرابی‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی بین رفتار خرابی‌ها در نمونه واقعی و نمونه شبیه‌سازی شده وجود دارد.

درصد هریک از مکانیزم‌های خرابی در مدل المان محدود بر اساس نسبت مساحت المان‌هایی که معادله مربوط به هر مکانیزم خرابی را ارضاء می‌کنند به کل مساحت خرابی‌ها، محاسبه می‌شود. جدول 5 نتایج المان محدود و تبدیل موجک را برای نمونه‌های A و B نشان می‌دهد. نتایج المان محدود و نشر آوایی مربوط به نمونه A تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در رابطه با نمونه B، روش موجک، 12% شکست الیاف را نشان می‌دهد، در حالی که

**جدول 5** پیش‌بینی درصد مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های سوراخ‌دار با روش تبدیل موجک بسته‌ای و المان محدود.

**Table 5** The damage quantification results of WPT and FE analysis for specimens.

نتایج WPT نمونه B	نتایج FEM نمونه B	نتایج WPT نمونه A	نتایج FEM نمونه A	مکانیزم خرابی
42	50	29	31	ترک‌خوردگی ماتریس
46	50	49	50	جدایش الیاف از ماتریس
12	0	22	19	شکست الیاف

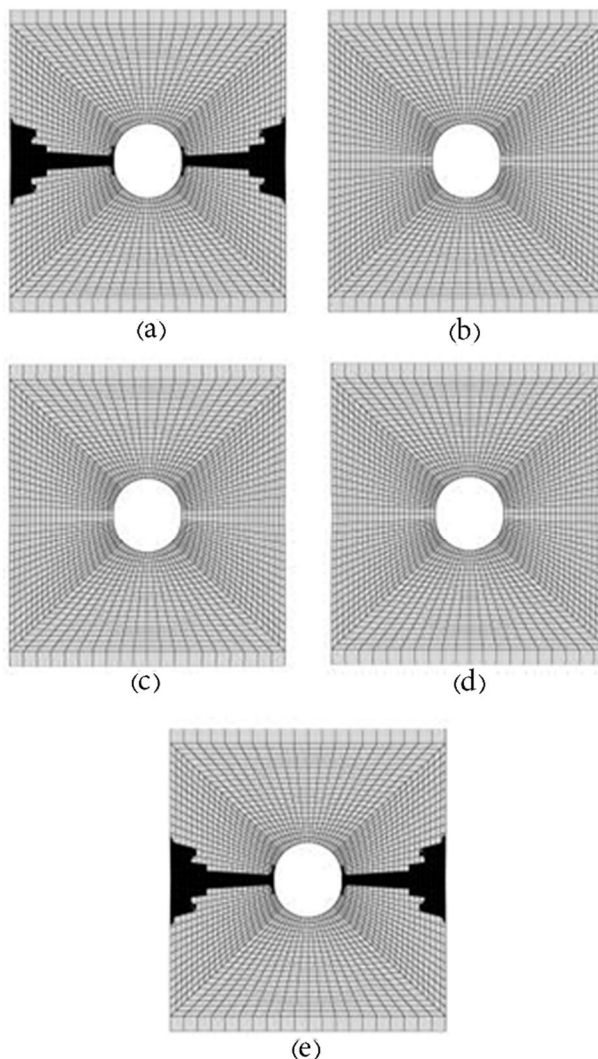
در روش المان محدود مقدار شکستگی الیاف صفر است. دلیل این امر این است که در پارچه الیافی استفاده شده به منظور حفظ پیوستگی دسته الیاف، 10% الیاف در جهت پود قرار دارند که این الیاف چون در امتداد بارگذاری قرار گرفته‌اند در نتیجه در اثر نیروی وارده دچار شکست می‌شوند.

### 5- نتیجه‌گیری

یکی از مشکلات تحقیقات انجام شده در خصوص شناسایی و دسته‌بندی مکانیزم‌های مختلف خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی با روش نشرآوایی، عدم صحه‌گذاری مناسب نتایج حاصل از روش نشرآوایی است. در این پژوهش، از روش المان محدود به منظور صحه‌گذاری نتایج روش نشرآوایی در تشخیص درصد مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار تحت بارگذاری کششی استفاده شد. در روش نشرآوایی ابتدا الگوهای مبنای نشرآوایی برای هر یک از خرابی‌ها به صورت جداگانه بدست آمد. سپس با ترکیب این نتایج با نتایج حاصل از تبدیل موجک بسته‌ای، نوع خرابی و درصد هر خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی بدست آمد. در ادامه از روش المان محدود بر پایه معیار هشین، به منظور پیش‌بینی درصد مکانیزم‌های خرابی در نمونه‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از روش المان محدود مطابقت قابل قبولی با نتایج نشرآوایی داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان از روش نشرآوایی به عنوان یک ابزار کارآمد به منظور تشخیص و تعیین درصد مکانیزم‌های مختلف خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده نمود.

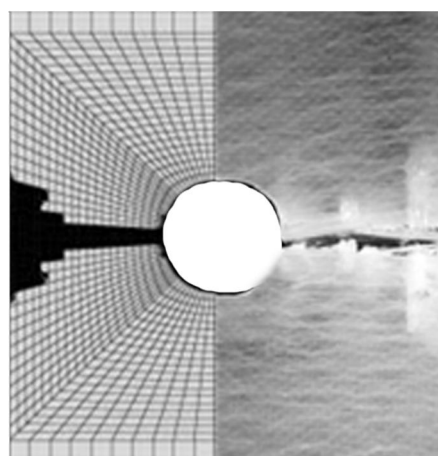
### 6- فهرست علائم

متغیر خرابی	$d$
ضریب تبدیل موجک	$DWT(i,k)$
درصد انرژی سیگنال‌های نشرآوایی	$E$
مدول یانگ در جهت طولی الیاف (MPa)	$E_1$
مدول یانگ در جهت عمود بر الیاف (MPa)	$E_2$
فرکانس سیگنال نشرآوایی	$F$
سیگنال نشرآوایی	$f(t)$
اپراتور خرابی	$M$
تعداد سیگنال‌ها	$N$
استحکام برشی در راستای طولی (MPa)	$S^L$
استحکام برشی در راستای عرضی (MPa)	$S^T$
استحکام فشاری کامپوزیت در راستای الیاف (MPa)	$X^C$
استحکام کششی کامپوزیت در راستای الیاف (MPa)	$X^T$
استحکام فشاری در راستای عمود بر الیاف (MPa)	$Y^C$
استحکام کششی در راستای عمود بر الیاف (MPa)	$Y^T$



**Fig. 8** FEM contour plots for a) matrix tensile, b) matrix compression, c) fiber tensile, d) fiber compression, and e) fiber/matrix debonding damages of specimen B.

**شکل 8** مکانیزم‌های مختلف خرابی بدست آمده از روش المان محدود برای نمونه B. (a) خرابی کششی ماتریس (b) خرابی فشاری ماتریس (c) خرابی کششی الیاف (d) خرابی فشاری الیاف.



**Fig. 9** The real and FE simulated damages contour for specimen B.

**شکل 9** نمایی از خرابی‌های پیش‌بینی شده توسط روش المان محدود در مقایسه با خرابی در نمونه واقعی برای نمونه B.

## علایم یونانی

$\sigma$	تانسور تنش نرمال
$\hat{\sigma}$	تانسور تنش موثر
$\psi$	موجک مادر
$\psi^*$	مزدوج مختلط موجک مادر
$v_{12}$	ضریب پواسون در صفحه 1 و 2

## 7- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از کارشناسان آزمایشگاه تست‌های غیر مخرب دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر برای در اختیار قرار دادن تجهیزات این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

## 8- مراجع

- [1] P. P. Camanho, *Application of numerical methods to the strength prediction of mechanically fastened joints in composite laminates*, PhD Thesis, Department of Aeronautics Centre for Composite Materials, Imperial College London, 1999.
- [2] L. J. Hart-Smith, *Design and Analysis of Bolted and Riveted Joints in Fibrous Composite Structures*, pp. 211-254, Netherlands: Springer, 2003.
- [3] M. M. Mousavi Nasab, M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of delamination in laminated composites under quasi-static and fatigue loading conditions by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 85-92, 2015. (in Persian فارسی)
- [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, No.12 pp. 882-889, 2013.
- [5] Z. C. Su, T. E. Tay, M. Ridha, B. Y. Chen, Progressive damage modeling of open-hole composite laminates under compression, *Composite Structure*, Vol. 122, pp. 507-517, 2015.
- [6] H. Suemasu, Y. Naito, K. Gozu, Y. Aoki, Damage initiation and growth in composite laminates during open hole compression tests, *Advance Composite Materials*, Vol. 21, No. 3, pp. 209-220, 2012.
- [7] O. J. Nixon-Pearson, S. R. Hallett, P. W. Harper, L. F. Kawashita, Damage development in open-hole composite specimens in fatigue Part2: Numerical modelling, *Composite Structure*, Vol. 106, pp. 890-898, 2013.
- [8] M. Nazmdar Shahri, J. Yousefi, M. Fotouhi, M. Ahmadi. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform, *Journal of Composite Materials*, DOI: 10.1177/0021998315597555, 2015
- [9] A. Calabro, C. Esposito, A. Lizza, M. Giordano, A. D'Amore, L. Nicolais, Analysis of the acoustic emission signals associated to failure modes in CFRP laminates, *ECCM-8 European Conference on Composite Materials*, Naples, Italy, June 3-6, 1998.
- [10] V. Arumugam, B. Kumar, C. Santulli, A. J. Stanley, Effect of fiber orientation in unidirectional glass epoxy laminate using acoustic emission monitoring, *Acta Metallurgica*, Vol. 24, No.5, pp.351-364, 2011.
- [11] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. hoseine toudeshki, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No.4, pp.1-11, 2014. (in Persian فارسی)
- [12] R. E. Guerjouma, J. C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, *Advance Engineering Materials*, Vol. 3, No.8, pp. 601-608, 2001.
- [13] 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.
- [14] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Acoustic emission-based damage classification of glass/polyester composites using harmony search k-means algorithm, *Journal of Reinforced Plastic Composite*, Vol. 31, No.10, pp.671-680, 2012.
- [15] Q. Q. Ni, M. Iwamoto, Wavelet transforms of acoustic emission signals in failure of model composites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp.717-728, 2002.
- [16] 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 فارسی)
- [17] N. Zarif Karimi, G. Minak, P. Kianfar, Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission, *Composite Structure*, Vol. 131, pp.107-114, 2015.
- [18] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage characterization of glass/epoxy composite under three-point bending test using acoustic emission technique, *Journal of Material Engineering Performance*, Vol. 21, No.7, pp.1380-1390, 2012.
- [19] N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, Integration of the Kohonen's self-organising map and K-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites, *NDT & E International*, Vol. 38, No.4, pp. 299-309, 2005.
- [20] V. Arumugam, S. V. Karthikeyan, B. T. N. Sirdhar, A. J. Stanley, Categorization of failure modes in composite laminates under flexural loading using time-frequency analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, No.6, pp.1471-1480, 2013.
- [21] ASTM E976-10 Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2010.
- [22] R. M. Rao, A. S. Bopardikar, *Wavelet transforms introduction to theory and applications*, pp. 25-30, Boston: Addison Wesley, 1998.
- [23] K. P. Soman, K. I. Ramachandran, *Insight into wavelets from theory to practice*, pp. 48-50, Prentice-Hall, India, 2004.
- [24] E. J. Barbero, F. A. Cosso, R. Roman, T. L. Weadon, Determination of material parameters for ABAQUS progressive damage analysis of E-glass epoxy laminates, *Composites Part B*, Vol. 46, pp. 211-220, 2013.
- [25] I. Lapczyk, J. A. Hurtado, Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A*, Vol. 38, No.11, pp. 2333-2341, 2007.
- [26] S. Avachat, M. Zhou, High-speed digital imaging and computational modeling of dynamic failure in composite structures subjected to underwater impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 77, pp. 147-165, 2015
- [27] S. Palanivelu, W. V. Paepegem, J. Degrieck, D. Kakogiannis, J. V. Ackeren, DV. Hemelrijck, J. Wastiels, J. Vantomme, Parametric study of crushing parameters and failure patterns of pultruded composite tubes using cohesive elements and seam, Part I: Central delamination and triggering modelling, *Polymer Test*, Vol. 29, No.6, pp. 729-741, 2010.