مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 91-100

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آسیب بر پایه روش نشر آوایی در چند لایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته تحت آزمایش ضربه سرعت-پایین

محمد قیومی محمدی[1]، علی مهدیان آهی[1]، جلال یوسفی[2]، مهدی احمدی نجف آبادی[3*]

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: 10 اسفند 1395
پذیرش: 15 خرداد 1396
ارائه در سایت: 22 تیر 1396

کلید واژگان:
سازوکار خرابی
نشرآوایی
ضربه سرعت-پایین
تبدیل موجک
سی-اسکن فراصوتی

چکیده

حساسیت سازه‌های کامپوزیتی نسبت به بارگذاری ضربه سرعت-پایین یکی از ملاحظات اساسی در طراحی آن‌هاست. چرا که آسیب‌های ناشی از این ضربه‌ها از یک سو با بازرسی چشمی قابل تشخیص نیست و از سوی دیگر باعث افت شدید در استحکام سازه می‌شود. در این پژوهش، برای ارزیابی آسیب‌های ناشی از ضربه سرعت-پایین، روشی نو بر مبنای آزمون غیر مخرب نشرآوایی ارائه شده است که می‌تواند فرایند بازرسی سازه را برای بررسی این‌گونه آسیب‌ها تسریع بخشد. برای بدست آوردن داده‌های نشرآوایی مبنا در نمونه‌های کامپوزتی، ابتدا آزمایش شبه استاتیک با شرایط کاملاً مشابه با آزمون ضربه صورت گرفت. سپس آزمون‌های ضربه بر روی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی انجام گرفتند و سیگنال‌های نشرآوایی تولید شده در حین فرایند ضربه ذخیره شدند. پس از ذخیره‌سازی سیگنال‌ها، داده‌ها با استفاده از تبدیل موجک تحلیل شدند تا انرژی آزاد شده مربوط به هر سازوکار خرابی از جمله شکست زمینه، جدایش الیاف/زمینه و شکست الیاف تعیین شود. در ادامه، روشی نو برای تخمین آستانه انرژی ضربه قابل تحمل در ورق‌های کامپوزیتی با استفاده از آزمون شبه استاتیک، ارائه شد و نتایج آن با داده‌های نشرآوایی حین فرایند ضربه و تصاویر سی-اسکن فراصوتی مقایسه گردید. در آخر، روشی بر پایه سیگنال‌های نشرآوایی با استفاده از تحلیل موجک برای پیش‌بینی تصویر مساحت خرابی، تحت انرژی ضربه کم پیشنهاد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش نشرآوایی می‌تواند کارایی مطلوبی در ارزیابی آسیب‌های ناشی از ضربه در کامپوزیت‌های چندلایه داشته باشد.

AE- based damage investigation in unidirectional composite laminates under low-velocity impact tests

Mohammad Ghayoomi Mohammadi, Ali Mahdian Ahi, Jalal Yousefi, 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 28 February 2017
Accepted 05 June 2017
Available Online 13 July 2017

Keywords:
Damage mechanism
Acoustic emission
Low velocity impact
Wavelet transform
Ultrasonic C-scan

ABSTRACT

One of the main issues associated with application of laminated composites in industrial applications is their brittle-type behavior under impact loading. The low velocity impact may lead to crucial internal damages that are not detectable by visual inspection and can significantly reduce the strength of laminated composites. The main purpose of this research is to characterize the damage mechanisms in laminated composites under low velocity impact tests. For this purpose, a quasi-static test was first utilized out to achieve initial information about impact tests. Low velocity impact tests were then employed for unidirectional glass/epoxy composite specimens, and Acoustic Emission (AE) signals were acquired during impact events. Next, AE signals were examined using wavelet approach to discriminate released energy related to each distinct damage mechanism. Besides, a method was obtained to estimate threshold impact energy from the quasi-static test, beyond which damage meaningfully extends. The AE based approach using wavelet transform methodology was suggested to forecast the total damage area. It was determined that this AE method can be a reliable approach in damage evaluation under impact loads in composite structures.

1- مقدمه

در کاربردهای صنعتی یکی از مشکلات اساسی در استفاده از کامپوزیت‌ها، رفتار شکننده آنها تحت بارگذاری ضربه است[1] که ممکن است باعث شکست غیر منتظره در این سازه‌ها شود. برای مثال در بدنه هواپیما، این بارگذاری ممکن است در حین ساخت، در تعمیر و نگه‌داری مانند افتادن ابزار و در حین پرواز مانند برخورد پرنده با بدنه و یا برخورد تگرگ در ارتفاع‌های زیاد اتفاق بیفتد[3,2]. در ضربه‌های سرعت-پایین، زمان برخورد قطعه با ضربه زننده به اندازه‌ای است که کل سازه در پاسخ تأثیر دارد[4] و محدوده سرعت آن می‌تواند تا 10 متر بر ثانیه باشد[6,5]. ضربه سرعت-پایین بر روی ورق‌های کامپوزیتی ممکن است باعث ایجاد آسیب‌های داخلی شود که با

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Ghayoomi Mohammadi, A. Mahdian Ahi, J. Yousefi, M. Ahmadi Najafabadi, AE- based damage investigation in unidirectional composite laminates under low-velocity impact tests, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 91-100, 2017 (in Persian)

چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست و می‌تواند بطور قابل توجهی مقاومت آن را تحت تأثیر قرار دهد[7-11]. علاوه بر این، برای دستیابی به کامپوزیت-هایی با قابلیت اطمینان بالاتر، ضروری است که گستردگی آسیب‌های وارد شده تحت ضربه سرعت-پایین مشخص شود. بسیاری از محققان [12-16] از مدل‌های عددی که بر پایه مکانیک آسیب پیوسته است، استفاده کرده‌اند تا بتوانند شروع و گسترش آسیب‌های سازه‌های کامپوزیتی را تحت بار ضربه‌ای مورد بررسی قرار دهند. با این وجود، در مواردی مانند پایش سازه‌های کامپوزیتی در شرایط حقیقی، روش‌های غیر مخرب (NDT) بهترین گزینه برای بررسی حین فرایند آسیب‌های وارده هستند.

تحت ضربه سرعت-پایین، سازوکارهای شکست مختلفی از جمله شکست زمینه، شکست الیاف و جدایش زمینه/الیاف در یک کامپوزیت ایجاد می‌شود. نشرآوایی (AE)، به عنوان یک روش غیرمخرب، توانایی شناسایی سازوکارهای مختلف شکست را برای بررسی‌های حین فرایند دارد[17-20].

برخی از محققین [21-23]، از مشخصه‌های سیگنال‌های AE، مانند فرکانس، دامنه و انرژی سیگنال استفاده کردند تا سازوکارهای مختلف شکست را در ورق‌های کامپوزیتی تفکیک کنند. در مطالعات دیگری [24-26]، برای تشخیص سازوکارهای آسیب در ورق‌های کامپوزیتی، از روش‌هایی مانند شبکه عصبی، الگورتیم فازی، تبدیل موجک و توابع سنتری برای تحلیل سیگنال‌های AE استفاده شده است. با توجه به مطالعات پیشین و دانش نویسندگان، در بسیاری از موارد، داده‌های AE بدون پردازش ثانویه برای مشخص کردن سازوکار آسیب استفاده شدند که این امر یکی از منابع اصلی خطا محسوب می‌شود، بخصوص در مواردی که بارگذاری به صورت دینامیک باشد. در این شرایط، ارائه روشی برای بدست آوردن ویژگی‌های پردازش شده سیگنال AE از سیگنال‌های اولیه می‌تواند ابزاری مفید برای دستیابی به نتایجی دقیق‌تر باشد. بنابراین، مطالعات تکمیلی در زمینه کامپوزیت‌های تحت بارگذاری ضربه با استفاده از داده‌های پردازش شده AE، قدمی مؤثر برای درک بهتر رفتار شکست آن‌ها محسوب می‌شود. علاوه بر این، دست-یافتن به روشی کوتاه و سریع برای ارزیابی گستردگی آسیب تحت بارگذاری ضربه یکی از اهداف نهایی صنعت است. در انتها نتایج مطالعات مذکور می‌تواند منجر به دانش کافی برای افزایش قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی با صرفه‌جویی در هزینه و زمان گردد.

هدف اصلی مطالعه پیش‌رو، بررسی گستردگی آسیب ورق‌های کامپوزیتی تحت اثر بارهای ضربه‌ای سرعت-پایین با استفاده از داده‌های پردازش شده AE است. برای دستیابی به این هدف، ورق‌های کامپوزیتی تک‌جهته شیشه/اپوکسی تحت بارهای شبه استاتیک و ضربه‌ای قرار گرفتند. ابتدا، الگوهای مبنا برای نشرآوایی سازوکارهای خرابی مشخص شدند. برای این منظور، داده‌های نشرآوایی آزمون‌های کشش نمونه‌های زمینه و الیاف خالص و آزمون شبه استاتیک، با استفاده از الگوریتم فازی سی-میانگین تحلیل شدند و الگوهای هر سازوکار به صورت مجزا استخراج شدند. سپس با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای، انرژی سیگنال‌های آزمون‌های ضربه بر اساس الگوهای مبنا تفکیک شدند. به‌علاوه، تصاویر سی-اسکن فراصوتی از تمامی ناحیه آسیب دیده تحت ضربه‌های با انرژی مختلف تهیه گردید. در ادامه یک رابطه خطی بین انرژی AE مربوط به سازوکار شکست زمینه و انرژی ضربه برقرار شد که امکان پیش‌بینی مساحت آسیب را در ورق کامپوزیتی با انرژی ضربه معلوم فراهم می‌آورد. در نهایت، مشاهده شد که روش پیشنهادی ابزار توانایی برای ارزیابی ناحیه آسیب دیده تحت ضربه و تعیین گستردگی آن می‌باشد.

2- فرایند آزمایشگاهی

2-1- شرح مواد

آزمایش‌ها بر روی ورق‌های مربعی کامپوزیت شیشه/اپوکسی انجام گرفته‌اند. خصوصیات ورق‌های تک‌جهته در جدول 1 آمده است.

برای تولید نمونه‌ها از روش انتقال رزین بکمک خلأ (VIP) (شکل 1) استفاده شد. برای ساخت نمونه‌ها از مخلوط رزین اپوکسی EPL1012 با EPH112 به عنوان یک سخت‌کننده استفاده شد. همچنین از نسبت وزنی سخت‌کننده به رزین معادل 10% استفاده گردید. وزن الیاف‌های مورد استفاده، 400 گرم بر متر مربع بود. نمونه‌ها پس از تزریق رزین برای 7 روز در هوای آزاد در دمای 25 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس، با استفاده از روش سی-اسکن فراصوت کیفیت نمونه‌ها تایید شد. پس از آن، برای بریدن ورق‌ها از دستگاه برش آب استفاده شد تا ابعاد آن‌ها به 230×230 میلی‌متر مربع برسد. درصد حجم الیاف در هر نمونه 3±60٪ و متوسط اسمی ضخامت هر نمونه 2.9 میلی‌متر بود.

2-2- روش های آزمایش و ماشین ها

شرح آزمون‌های شبه استاتیک و ضربه سرعت-پایین، در شکل (b,a-2) به ترتیب نمایش داده شده است.

برای آزمایش‌های شبه استاتیک، از یک ماشین کشش اونیورسال دقیق با سرعت جابجایی ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه در دمای 24 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. ظرفیت آن 1000 نیوتن با دقت 0.1 نیوتن است. بار و جابجایی دائماً هنگام آزمایش اندازه‌گیری شده‌اند.

در آزمایش‌های ضربه سرعت-پایین، یک وزنه با یک ضربه زننده نیم کروی استاندارد برای اعمال ضربه به نمونه استفاده شد. شتاب ضربه زننده در طول آزمایش در هر 13 میکرو ثانیه ثبت شد. انرژی‌های ضربه در محدوده 0.84 تا 61 ژول با تنظیم جرم ضربه زننده در ارتفاع ثابت تأمین شدند. نمونه-ها همان‌طور که در شکل (b-2) نشان داده شده است مقید شدند. قطر سوراخ پنجره‌ی صفحه قید هم 150 میلی‌متر و شعاع سنبه 16 میلی‌متر بود.

جدول 1 مشخصات نمونه ها با ترتیب لایه چینی

Table 1 The characteristics of the specimens with their stacking sequences

نمونه	صفحه میانی	لایه چینی	میانگین ضخامت(mm)	انحراف معیار ضخامت(mm)
S	0-0	$[0]_8$	2.9	0.1

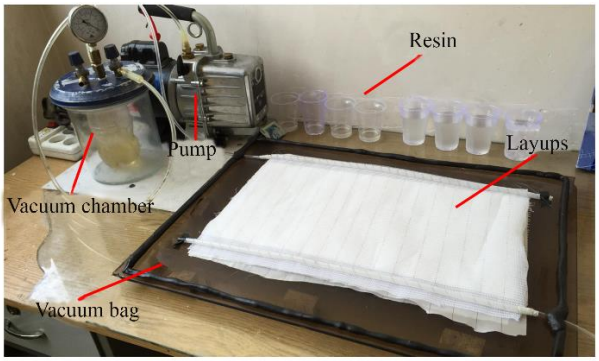


Fig. 1 Vacuum infusion process equipment

شکل 1 تجهیزات روش انتقال رزین به‌کمک خلأ

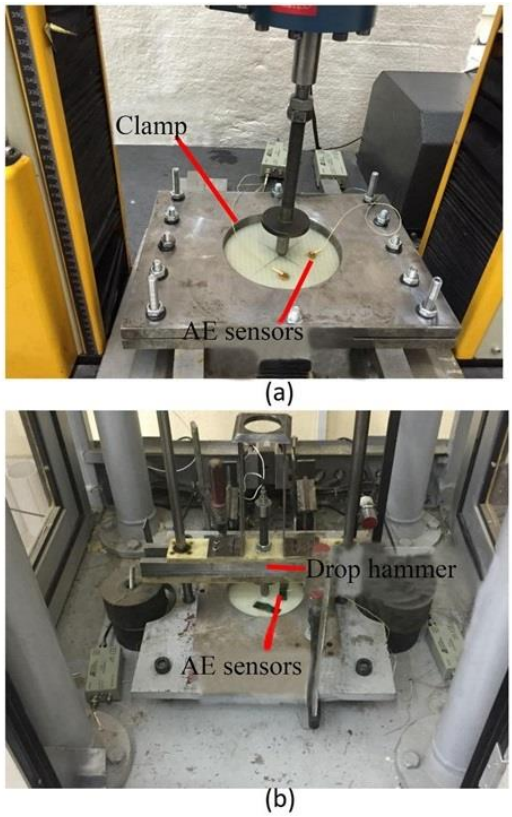


Fig. 2 Experimental setups for (a) quasi-static and (b) low-velocity impact tests.

شکل 2 تجهیزات آزمون شبه استاتیک و ضربه سرعت-پایین

2-3- سنسور های AE

سیگنال‌های AE اولیه با استفاده از سنسورهای AE با پهنای باند وسیع (PICO از شرکت فیزیکال آکوستیکا[1] آمریکا) دریافت شدند، که بطور هم‌ردیف و عمود بر الیاف‌ها با فاصله 40 میلی‌متر از ضربه زننده قرار گرفته بودند (شکل 2). آستانه سیگنال‌های AE در حین آزمایش بر روی 30 دسی‌بل تنظیم شد. فرکانس رزونانسی سنسورهای AE پیزوالکتریک تک کریستال 513.28 کیلوهرتز بود. محدوده بهینه عملکرد این سنسورها 100 تا 750 کیلوهرتز بود. تقویت کننده اولیه AST-6/4/2 روی 40 دسی‌بل تنظیم شد. نرخ نمونه‌برداری داده‌های AE، 40 MS/s بود. فرکانس داده‌برداری بر اساس معیار نایکویست انتخاب گردید. طبق این معیار فرکانس داده‌برداری باید حداقل دو برابر ماکزیمم محتوای فرکانسی باشد. مطابق با استاندارد ASTM E976-10 [27]، برای اطمینان از صحت عملکرد سنسورها، آزمون شکست نوک مداد (PLB) قبل از هر آزمایش انجام شد.

3- روش های استفاده شده

3-1- تبدیل بسته‌ای موجک

تبدیل موجک یکی از روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال و یک ابزار مناسب برای بررسی سیگنال‌هایی AE با محتوای فرکانسی غیریکنواخت در زمان می‌باشد. نظریه و کاربرد این روش در مراجع آورده شده است [28-29]. در این پژوهش، از تبدیل موجک گسسته DWT استفاده شده که در سال‌های اخیر به عنوان ابزاری مفید در برخی از تحقیقات استفاده شده است [30-31]. تبدیل DWT سیگنال اولیه را به دو بخش تفکیک می‌کند(بخش‌های جزئیات با محتوای فرکانسی بالا و تقریبی با محتوای فرکانسی پایین). در مرحله بعد، این بخش‌ها با استفاده از پردازش‌های شناخت الگو مانند الگوریتم فازی به سازوکارهای شکست ربط داده می‌شوند.

از نظر ریاضی، DWT به شکل معادله (1) توصیف می‌شود:

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

سپس معکوس DWT مانند معادله (2) تعریف می‌گردد:

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

که $f(t)$ سیگنال مورد نظر، DWT(i,k) ضرایب تبدیل موجک و i و k به ترتیب، مرتبه تجزیه و حوزه زمان در موجک مادر ψ را مشخص می‌کنند.

روش DWT برای جداسازی بخش‌های تقریبی در هر مرحله استفاده می‌شود. در این مورد، بخش‌های فرکانس بالا در نظر گرفته نمی‌شوند و این امر باعث جداسازی ناقص بخش‌ها می‌گردد. در این مقاله برای حل این مشکل، از تبدیل موجک بسته‌ای WPT استفاده شده است. در این روش، بخش‌های جزئی علاوه بر بخش‌های تقریبی خود به بخش‌های جزئی و تقریبی تجزیه می‌شوند. فرکانس پهنای باند بخش‌های تقریبی و جزئی در هر مرحله را می‌توان به صورت روابط (4,3) نشان داد:

$$\left[\frac{1}{2} f_s 2^{-i} . \frac{1}{2} f_s 2^{-(i-1)}\right] \qquad (3)$$

$$\left[0 . \frac{1}{2} f_s 2^{-i}\right] \qquad (4)$$

در اینجا، f_s نرخ نمونه برداری و تعداد هر بخش نیز 2^i به ازای هر مرحله (i) است. برای تعیین توزیع انرژی در هر بخش، از معیار انرژی رابطه (5) استفاده شده است:

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^{t} (f_i^j\,(\tau))^2 \qquad (5)$$

که $f(t)$ یک سیگنال نشرآوایی است و $f_i^1,\ldots,f_i^j$ اجزای تفکیک شده سیگنال در مرحله i ام هستند. همچنین $E_i^1,\ldots,E_i^j$ انرژی هر بخش در مرحله i را مشخص می‌کند. انرژی کل از رابطه (6) بدست خواهد آمد:

$$E_{\text{TOTAL}}(t) = \sum_i E_i^j\,(t) \qquad (6)$$

و در نهایت، توزیع انرژی نسبی هر مرحله، بر اساس رابطه (7) تعریف خواهد شد:

$$P_i^j(t) = \frac{E_i^j(t)}{E_{\text{TOTAL}}(t)} \qquad j = 1 \ldots 2^i \qquad (7)$$

4- بحث و نتایج

4-1- الگو AE برای سازوکارهای آسیب خالص

بر اساس مقاله‌های پیشین، اکثراً سازوکارهای شکست در مواد کامپوزیتی مربوط می‌شود به شکست الیاف، شکست زمینه، جدایش الیاف/زمینه و جدایش بین لایه‌ای[32-36]. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که جدایش بین لایه‌ای فقط در جایی اتفاق می‌افتد که جهت الیاف در دو لایه مجاور تغییر می‌کند [6] بنابراین در نمونه‌های تک‌جهته، سازوکار جدایش بین لایه‌ای در اثر بارگذاری ضربه اتفاق نمی‌افتد. بر این اساس، سه سازوکار برای نمونه‌های تک‌جهته در نظر گرفته می‌شود[17-18]. برای تعیین مشخصه‌های نشرآوایی هر سازوکار و دسته‌بندی آن‌ها از روشی مشابه در پژوهش‌های قبلی استفاده شد. محتوای فرکانسی برای هر بخش AE با استفاده از روش تبدیل هیلبرت بدست آمد. نتایج نشان داد که محتوای فرکانسی شکست زمینه

[1] Physical Acoustic

حدود (160 – 270 کیلوهرتز) و محتوای فرکانسی شکست الیاف حدود (390 – 460 کیلوهرتز) می‌باشد.

برای مشخص کردن مشخصه‌های AE در سازوکار جدایش زمینه/الیاف، یک آزمایش شبه استاتیک انجام شد که هر سه سازوکار آسیب در آن فعال است. با حذف AE مربوط به سازوکارهای شکست زمینه و الیاف، داده‌های مربوط به سازوکار جدایش الیاف/زمینه بدست می‌آید. علاوه بر این، با استفاده از آزمایش شبه استاتیکی پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها تحت ضربه دینامیکی سرعت-پایین محقق شد. همچنین مقدار انرژی ضربه لازم برای فعال‌سازی سازوکارهای آسیب مختلف نیز تعیین شد. برای بررسی میکرو سازوکارهای آسیب پیش‌آمده هنگام آزمایش شبه استاتیک، یک تحلیل چند پارامتری بر اساس الگوریتم فازی سی-میانگین مورد استفاده قرار گرفت.

شکل 3 نمایشی از فلوچارت بررسی سیگنال AE برای دسته‌بندی آسیب‌ها طی آزمایش شبه استاتیک می‌باشد. در هر سیگنال نشرآوایی، 5 ویژگی شامل دامنه، مدت زمان استمرار، زمان اوج، شمارش و متوسط فرکانس برای هر مد با روش هیلبرت استخراج شد. سپس این ویژگی‌ها با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی PCA بررسی شدند، تا از بعد داده‌های ورودی کم شود. از آن‌جایی‌که متغیرهای ورودی در واحدهای یکسان نیستند، ابتدا با استفاده از انحراف معیار استاندارد، بی بعد شدند.جدول 2 واریانس مربوط به هر مؤلفه را نمایش می‌دهد. جمع جبری واریانس‌های سه مؤلفه اول نزدیک 95.6% کل واریانس بود. بنابراین، 3 مؤلفه اول برای دسته بندی سازوکارها مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل 4 دسته بندی فازی سیگنال‌های نشرآوایی بر اساس مؤلفه‌های PCA نمایش داده شده است. از آن‌جایی‌که هر یک از داده‌ها از قبل برچسب

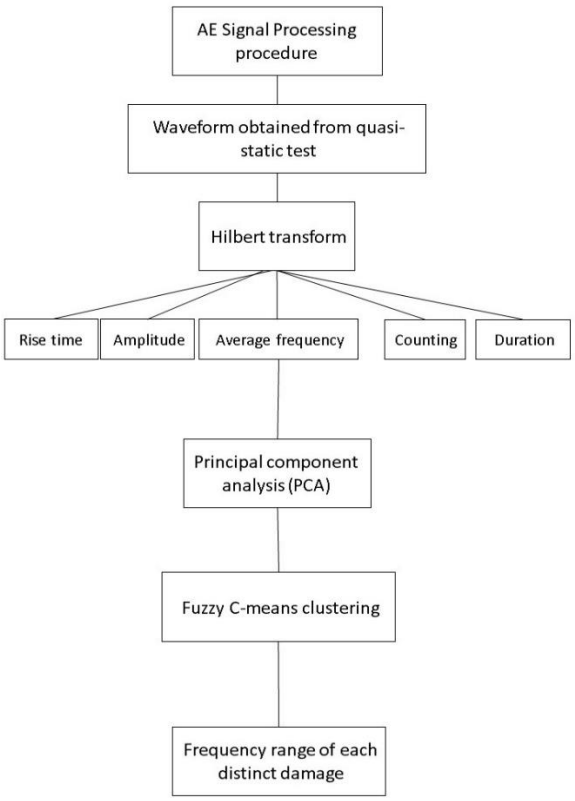


Fig. 3 The flow chart of AE signal analysis for damage categorization.

شکل 3 فلوچارت بررسی سیگنال AE برای دسته بندی آسیب

جدول 2 انحراف معیار مؤلفه‌های اصلی در روش PCA

Table 1 The variance correlated to each principal components.

پارامتر	PCA1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5
واریانس٪	48.1	28.7	19.7	1.7	1.8

گذاری شده بودند، میانگین متغیرها برای هر دسته قابل محاسبه است. در میان متغیرهای هدف، فرکانس بالاترین واریانس را نسبت به دیگر مشخصه‌های نشرآوایی دارد. بنابراین، از محتوای فرکانسی به عنوان یک مشخصه مطلوب برای تفکیک سازوکارهای آسیب استفاده شد.

محتوای فرکانسی سیگنال‌های AE متعلق به دسته‌های مختلف در شکل 5 نمایش داده شده است، که نتایج سه محدوده فرکانسی را مشخص می‌کند. محدوده فرکانس‌های غالب در دسته‌ها در جدول 3 نمایش داده شده است. با توجه به بخش قبل، می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال‌های AE دسته اول و سوم به ترتیب نشان دهنده‌ی شکست‌های زمینه و الیاف هستند. بنابراین دسته باقی مانده مربوط به جدایش الیاف/زمینه می‌باشد.

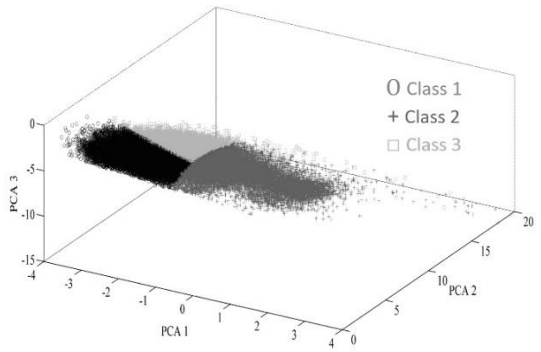


Fig. 4 PCA visualizations of Fuzzy clustering of AE signals in quasi-static test

شکل 4 دسته‌بندی فازی سیگنال‌های نشرآوایی بر اساس مؤلفه‌های PCA در آزمون شبه استاتیک.

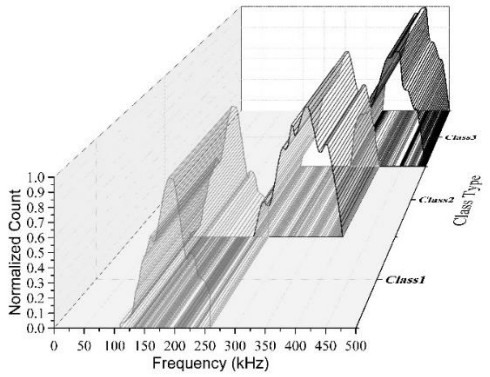


Fig. 5 The frequency contents of AE signals belonging to different clusters

شکل 5 محتوای فرکانس سیگنال های AE متعلق به مؤلفه اصلی

جدول 3 محدوده فرکانسی سازوکارهای آسیب مختلف با استفاده از دسته‌بندی فازی

Table 3 Frequency ranges of different damage mechanisms using FCM clustering.

سازوکار خرابی	جدایش الیاف/زمینه	شکست زمینه	شکست الیاف
فرکانس (KHz)	230-400	110-260	340-500

جدول 4 سطح انرژی برای آزمایش ضربه با سرعت پایین

Table 4 Energy levels for low velocity impact tests

شماره آزمایش	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
مرحله مرتبط	Stage I		Stage II		Stage III		Stage IV		Stage V	
انرژی ضربه (j)	0.84	1.3	4.3	5.9	11.6	14.5	19.1	21.2	39.8	61

شکل 6 انرژی تجمعی AE برای هر سازوکار را در نمودار نیرو- جابجایی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ترتیب فعال‌سازی هر سازوکار آسیب در آزمون شبه استاتیک مشخص است. با درنظر گرفتن شروع هر سازوکار به عنوان مرز ناحیه جدید، منحنی نیرو-جابجایی به 5 مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول، هیچ سیگنال AE دیده نشد، و در این ناحیه، آسیبی به ورق وارد نشده است. رفتار نمونه تحت بار شبه استاتیک در این ناحیه کاملا الاستیک است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زودترین نوع آسیب که در مرحله دوم آغاز می‌شود شکست زمینهی است. این ترک‌ها از زیر سنبه در داخل زمینه شروع به رشد می‌کنند و به سمت لبه‌های صفحه پیشرفت می‌کنند. آغاز جدایش زمینه/ الیاف در مرحله سوم اتفاق می‌افتد، جایی که ترک زمینه به فصل مشترک الیاف و زمینه می‌رسد. مرحله چهارم با شروع شکست الیاف همراه است. و در نهایت، ناحیه افت منحنی بعد از بار حداکثری در مرحله پنجم اتفاق می‌افتد. در این مرحله، مقدار آسیب تشدید می‌شود. بنابراین استحکام باقیمانده نمونه به دلیل شکست الیاف به شدت کاهش می‌یابد. این مرحله می‌تواند همراه ایجاد سوراخ جزئی در نمونه باشد. بعلاوه، نیروی شبه استاتیک برروی مراحل ذکر شده انتگرال گرفته شد تا مقدار انرژی ضربه در هر مرحله تخمین زده شود. سپس دو محدوده انرژی ضربه در هر ناحیه انتخاب شد، که در جدول 4 گزارش شده است. شیب انرژی تجمعی با حاصل‌ضرب نرخ وقوع هرپدیده و انرژی شکست آن متناسب است. با توجه به کارهای انجام شده در این زمینه انرژی شکست الیاف بسیار بیشتر از انرژی جدایش الیاف/زمینه است و شکست زمینه کمترین مقدار را دارا می‌باشد. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، متوسط شیب انرژی تجمعی مربوط به شکست الیاف تقریبا برابر با جدایش الیاف/ زمینه است. در حالی که نسبت انرژی آزاد شده الیاف به جدایش بسیار بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ وقوع شکست الیاف باید کمتر از جدایش الیاف/ زمینه باشد.

4-2- آنالیز WPT داده‌های آزمایش ضربه

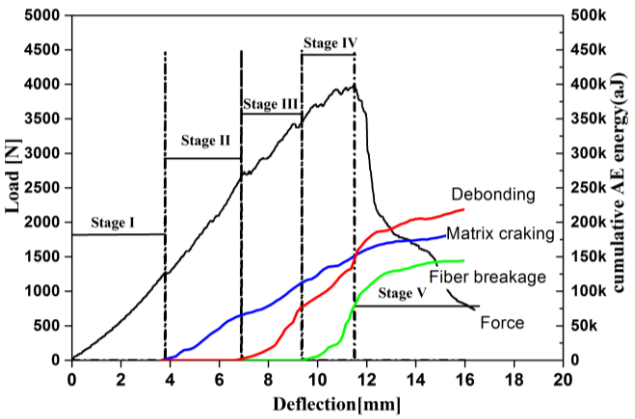
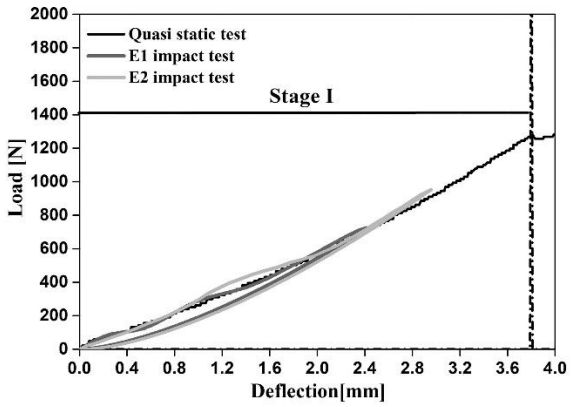


Fig. 6 The cumulative AE energy for each cluster assigned to the deflection-load curve

شکل 6 انرژی AE تجمعی برای هر دسته مربوط به نمودار نیرو- جابجایی

آزمون‌های ضربه سرعت-پایین با استفاده از سطوح انرژی بدست آمده در بخش قبل انجام گرفتند. شکل 7 منحنی نیرو-جابجایی مربوط به هر ضربه را در 5 مرحله تعیین شده نمایش می‌دهد. با مقایسه منحنی‌های ضربه با منحنی نیرو-جابجایی شبه استاتیک می‌توان اعتبار فرض شبه استاتیک را در مراحل و سطوح مختلف انرژی ضربه بررسی کرد. هر مرحله دارای 2 سطح انرژی ضربه مختلف می‌باشد. در مرحله 1 (شکل 7-a)، منحنی‌ها به کلی در ناحیه الاستیک منحنی استاتیکی قرار گرفته‌اند (مرحله 1)، هیچ آسیب محسوسی برای این نمونه‌ها مشاهده نشد. در این ناحیه، رفتار بارگذاری و باربرداری تقریباً یکسان است، و انرژی جذب شده بسیار کم است. ضربه‌های E3 و E4 (شکل 7-b) به مرحله دوم منحنی استاتیکی رسیده است. در این ضربه‌ها، اولین افت نیرو، که نشان دهنده‌ی انرژی کرنشی آزاد شده است، نسبت به معادل منحنی شبه استاتیک آن کمتر است. برای سطوح انرژی ضربه، که در مرحله سوم آزمون شبه استاتیک قرار دارند (شکل 7-c)، نمودار آزمون شبه استاتیک همچنان می‌تواند به خوبی روند تأثیر این محدوده از انرژی‌های متوسط را پیش‌بینی کند. ضربه‌های 9.1 و 21.2 ژول به ناحیه چهارم منحنی شبه استاتیک می‌رسد (شکل7-d). رفتار افت نیرو در این منحنی‌ها واضح نیست. با این وجود، این نیروی تماسی در این ضربه‌ها به مرحله‌ای می‌رسد که میزان نواسان در محدوده ماکزیمم نیرو تشدید می‌شود، که می‌تواند نشانگر ناحیه تسلیم جزئی الیاف در نظر گرفته شود. ضربه‌های ناحیه 5ام آزمون شبه استاتیک، افزایش مقاومت به سازوکار شکست الیاف را نشان می‌دهد که به علت اثر غشایی می‌باشد، که باعث بار حداکثری بیشتر برای شکست الیاف می‌شود. این ناحیه می‌تواند به عنوان ناحیه اصلی تسلیم به حساب آید، که شامل یک افت بار عمده خواهد بود. این تغییر ناگهانی در نیرو باعث فعال شدن فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود (شکل 7-e).

این مراحل همچنین نشان می‌دهد که ظرفیت کل انرژی جذب شده در مقایسه با شرایط شبه استاتیک کمتر است. از طرفی، برای ضربه‌های با سطح انرژی پایین و متوسط، منحنی‌های شبه استاتیک و ضربه تقریباً از روند یکسانی پیروی می‌کنند. بنابراین رخدادهای ضربه با سرعت پایین و سطح انرژی متوسط وابسته به نرخ کرنش نیستند. اما برای ناحیه تسلیم اصلی الیاف



(a)

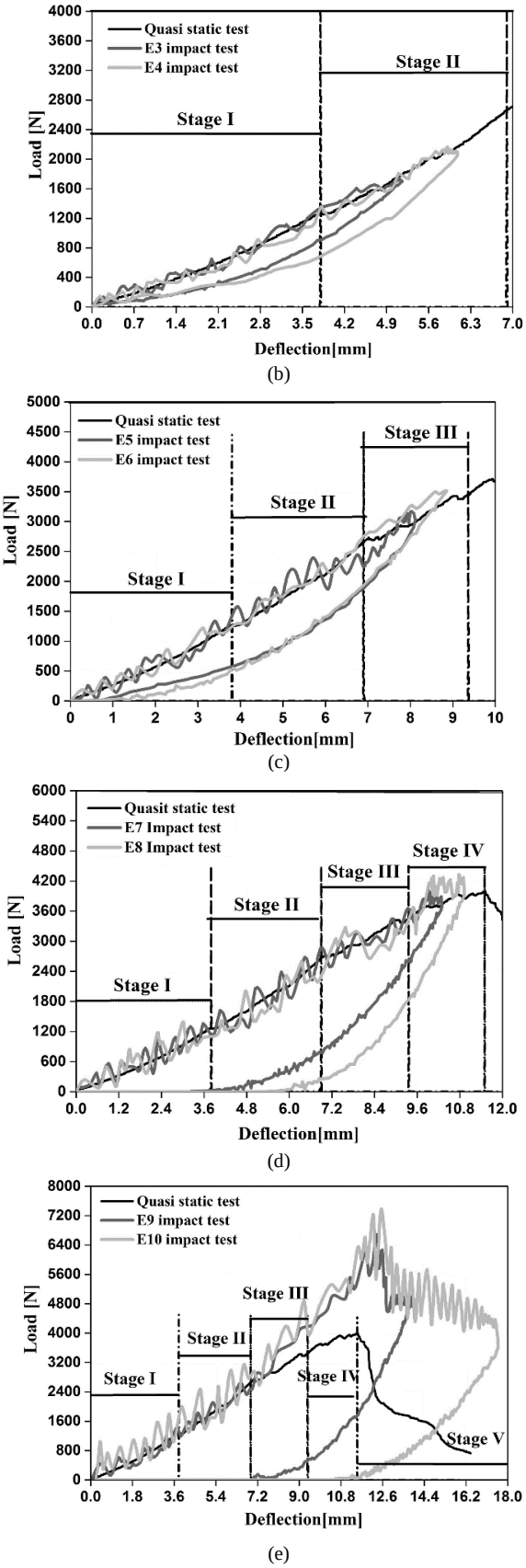


Fig. 7 The force-displacement curve of impact events in comparison with quasi-static test in different stages

شکل 7 منحنی نیرو - جابجایی ضربه در مقایسه با آزمایش شبه استاتیک در مراحل مختلف

تفاوت بزرگی بین روند شبه استاتیک و ضربه وجود دارد، که وابستگی سازوکار این آسیب به نرخ کرنش را اثبات می‌کند.

برای اینکه شروع و رشد سازوکارهای آسیب‌ها به صورت دقیق‌تر تحلیل شود، سیگنال‌های AE در طول آزمون ضربه به صورت حین فرایند بررسی شدند. پس از آن، از WPT برای محاسبه انرژی تجمعی برای هر یک از فواصل فرکانسی سیگنال‌های پردازش شده استفاده شد. برای کاهش حجم محاسباتی، نمونه‌برداری مجدد از سیگنال‌ها با نرخ داده‌برداری دو برابر ماکزیمم فرکانس موجود در سیگنال براساس معیار نایکویست[1] انجام شد. فرایند نمونه‌برداری دوباره بر روی 1 مگاهرتز تنظیم شد. با استفاده از تحلیل WPT، سیگنال‌ها در هر مرحله به جزئیات و تقریب‌ها تجزیه شدند. در این مورد، محدوده فرکانس سیگنال به دو بخش در هر مرحله تقسیم می‌شود. محدوده‌های فرکانسی بالاتر و پایین‌تر به ترتیب نشان دهنده جزییات و تقریب‌های اجزا هستند. در این مقاله، از WP دو مرحله‌ای برای تجزیه سیگنال استفاده شد، زیرا این اجزاء بیشترین سازگاری را با محدوده فرکانسی مشخص شده در جدول 3 دارند. برای تبدیل موجک از خانواده موجک مادر دابچی[2] دلیل داشتن بیشترین تطابق با سیگنال‌های AE دریافتی استفاده شد. فرایند تفکیک سیگنال‌های دریافتی از آزمون ضربه، که در دو مرحله ادامه یافت، در شکل 8 نمایش داده شده است. هر بخش نمایش دهنده یک محدوده فرکانسی مشخص می‌باشد. در مرحله دوم 4 جزء وجود دارندکه بازه‌های فرکانسی آن‌ها از معادله‌های (3) و (4) بدست آمده‌است.

تحلیل فرکانسی اجزای AE در مرحله دوم، با استفاده از روش تبدیل سریع فوریه[3] انجام گرفت (شکل 9). بخش‌های تقریب و جزئیات به ترتیب با A و D نشان‌گذاری شدند. اجزای سیگنال از محدوده فرکانس‌های کم تا زیاد AA، AD، DA و DD مشخص شدند.

برای تعیین تمرکز انرژی تجمعی، تمامی اجزا مرحله دوم استفاده شدند. انرژی AE کل را می‌توان بر اساس معادله‌های (5) و (6) محاسبه نمود. همچنین از معادله (7) برای تعیین درصد تمرکز انرژی سیگنال در هر محدوده فرکانسی استفاده شد. توزیع انرژی تجمعی نسبی برای هر جزء WP مربوط به ضربه‌های مختلف در شکل b-10 نمایش داده شده است. برای میسر کردن مقایسه با نتایج شبه استاتیک، از منحنی تغییر شکل استاتیکی شکل 6 انتگرال‌گیری شد و منحنی انرژی-جابجایی در شکل a-10 بدست آمد.

در انرژی‌های ضربه پایین‌تر (E1 و E2) که هیچ آسیبی به نمونه کامپوزیتی وارد نشده است (این امر با استفاده از سی-اسکن فراصوتی بررسی شده است)، تمامی انرژی سیگنال‌های دریافت شده در پایین‌ترین محدود فرکانسی (بخش AA شکلb-10) متمرکز شده‌اند. در نتیجه، جزء AA هر سیگنال، موج‌های تنشی‌ای درنظر گرفته شد که می‌تواند ناشی از خود فرایند ضربه و اصطکاک بین نیم‌کره و صفحه هدف باشد. بنابراین این جزء از انرژی سیگنال مرتبط با هیچ سازوکاری از آسیب ناشی از ضربه نیست و نباید در تحلیل آسیب در نظر گرفته شود. بعلاوه، نتایج شبه استاتیکی نیز پیش‌بینی کرد که این محدوده از انرژی‌های ضربه که در مرحله 1 قرار دارند باید غیرمخرب باشند، زیرا که هیچ گونه فعالیت نشرآوایی در این مرحله مشاهده نشد. همان‌طور که در شکل 9 پیداست، محدوده غالب فرکانس بخش AD تقریبا با بازه فرکانسی مربوط به سازوکار شکست زمینه (جدول 3) منطبق است. در نتیجه، انرژی تجمعی بخش AD در حین ضربه، ناشی از سازوکار

[1] Nyquist
[2] Debauchee
[3] Fast Fourier transform

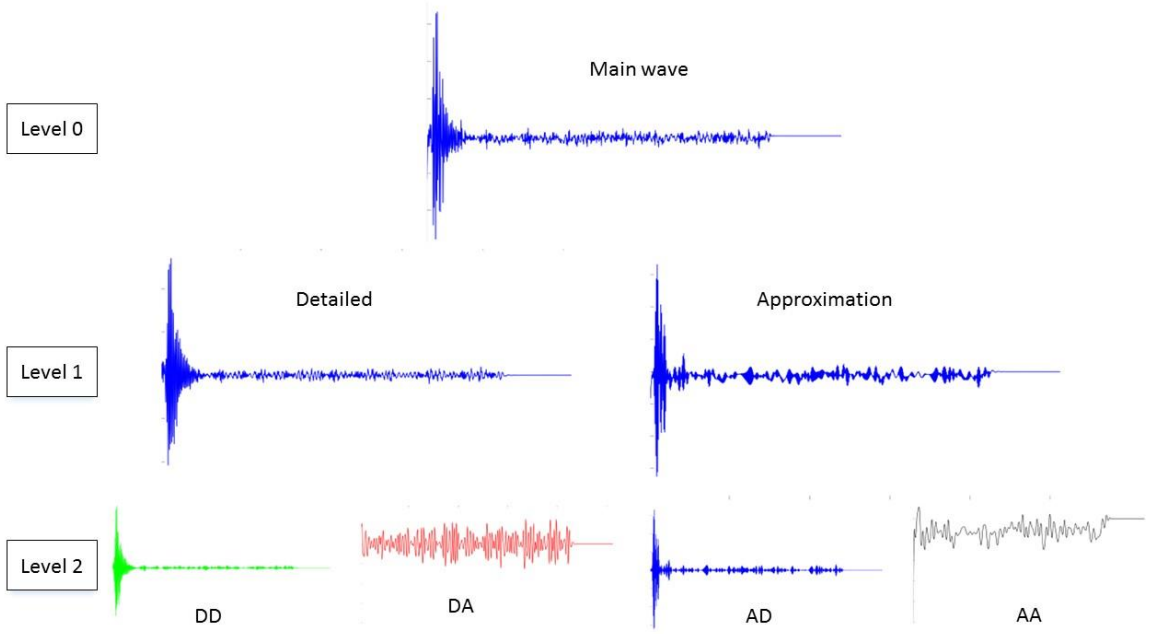


Fig. 8 The decomposition procedure of a sample signal of the low velocity impact test.

شکل 8 نمونه فرایند تجزیه سیگنال‌های دریافتی از آزمون ضربه

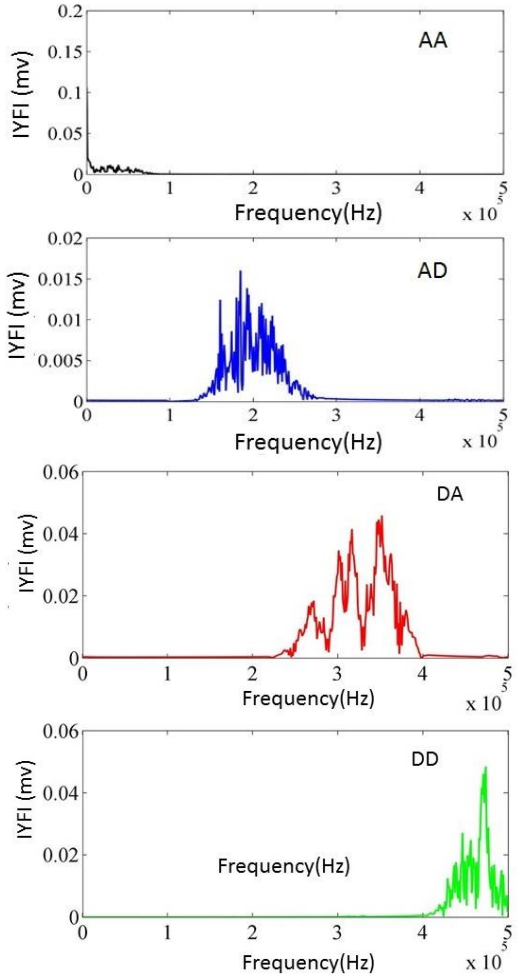


Fig. 9 The frequency content of each component of WPT analysis.

شکل 9 محتوای فرکانسی هر جز در آنالیز WPT

شکست زمینه در نظر گرفته شد(جزء AD). به صورت مشابه، براساس بازه‌های فرکانسی تحریک هر آسیب، که در بخش قبل بدست آمد، اجزا WP (DA وDD) مربوط به جدایش زمینه/الیاف و شکست الیاف هستند.

همان‌طور که گفته شد، شکست زمینه و جدایش زمینه/الیاف به ترتیب در مراحل 2 و 3 حالت شبه استاتیکی آغاز می‌شوند. مشابه به این، جزء AD انرژی در E3 و E4 قابل توجه هستند، که نشان می‌دهد شکست زمینه سازوکار غالب است درحالی‌که هیچ جدایشی در فصل مشترک زمینه/الیاف رخ نداده است. نتایج شبه استاتیک همچنین پیش‌بینی می‌کند که جدایش زمینه/الیاف در E5 و E6 اتفاق افتاده که با نتایج تحلیل WP سیگنال‌های نشرآوایی در آزمون ضربه مطابقت دارد. انحراف رفتار، زمانی تشدید می‌شود که انرژی ضربه به مرحله 4 می‌رسد. اگر چه وجود سازوکار شکست الیاف در تحلیل نشرآوایی فرایند ضربه در این ناحیه قابل مشاهده است، اما فعالیت آن در مقایسه با حالت شبه استاتیک به علت پدیده اثر دینامیکی کم است. بنابراین، این ناحیه در این مورد یک ناحیه تسلیم الیاف جزئی در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جایی‌که ظرفیت انرژی جذب شده کل در آزمون‌های شبه استاتیک کمتر می‌باشد، بنابراین نتایج ضربه‌های E9 و E10 را نمی‌توان با معادل شبه استاتیکی آن مقایسه کرد.

برخی از محققان انرژی جذب شده را به عنوان یک مشخصه قابل اطمینان برای ارزیابی آسیب در نظر می‌گیرند[37]. در شکل 11، درصد انرژی جذب شده به عنوان تابعی از انرژی ضربه رسم شده است. همانگونه که بیان شد، ضربه‌های در ناحیه الاستیک (ضربه‌های E1 و E2 شکل 11)، به‌دلیل نداشتن هیچ آسیبی، بخش قابل توجه انرژی به ضربه زننده باز گردانده می‌شود. ناحیه دوم این نمودار به عنوان شکست زمینه و جدایش زمینه/الیاف در نظر گرفته می‌شود. در این ناحیه، انرژی جذب شده در محدوده متوسط می‌باشد. سومین و چهارمین نواحی، نواحی تسلیم جزئی و کلی الیاف می‌باشند. در این مورد، بیشتر از 60 درصد انرژی به نمونه منتقل می‌شود. واضح است که، یک آستانه انرژی ضربه موجود است، که کمتر از آن

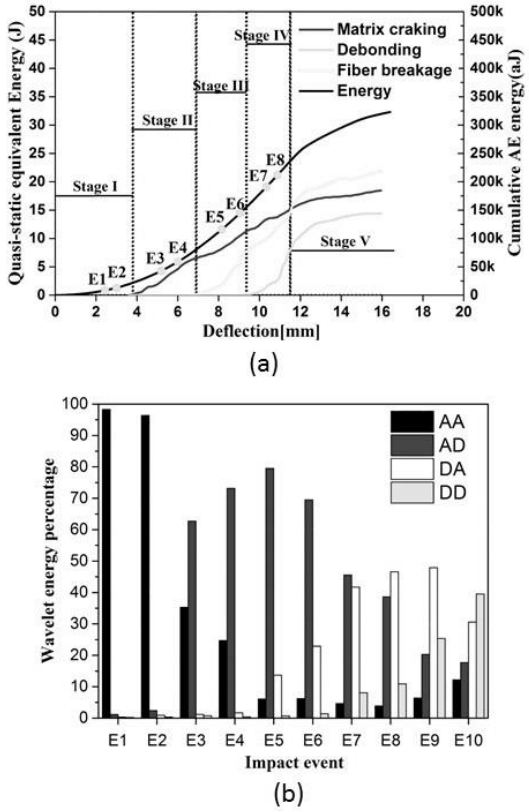


Fig. 10 The a) acoustic energy assigned to quasi-static equivalent energy and b) energy percentage distribution of the wavelet decomposition for each impact event.

شکل 10 الف) انرژی اکوستیک اختصاص داده شده به انرژی معادل شبه استاتیک. ب) توزیع درصد انرژی از تجزیه موج برای هر ضربه

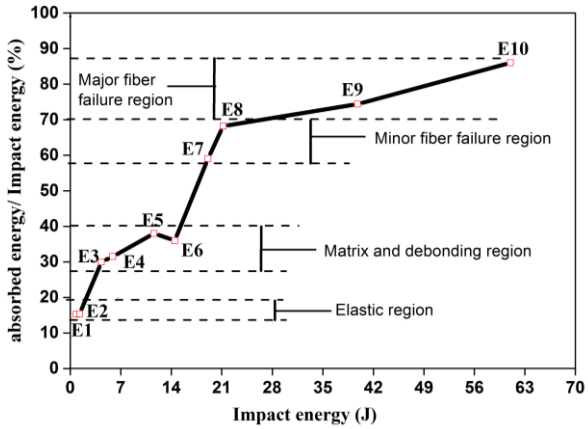


Fig. 11 The decomposition procedure of a sample signal of the low velocity impact test.

شکل 11 فرایند جداسازی سیگنال گرفته شده از آزمون ضربه

انرژی جذب شده بسیار کم است و بالاتر از آن انرژی جذب شده به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این آستانه می‌تواند به عنوان مقاومت کامپوزیت‌های شیشه/ اپوکسی در مقابل ضربه در نظر گرفته شود. بر اساس بحث صورت گرفته، این آستانه را می‌توان از آزمون شبه استاتیک پیش‌بینی کرد. برای این منظور کافیست از منحنی نیرو-جابجایی در سه ناحیه اول که هنوز شکست الیاف رخ نداده انتگرال گرفت. با انتگرال‌گیری از این منحنی (شکل 6)، مقدار انرژی 15 ژول بدست می‌آید که به خوبی با نمودار انرژی جذب شده مطابقت دارد.

3-4- بررسی آسیب تحت ضربه با سرعت پایین

در شکل 12 تصاویر سی-اسکن فراصوتی از سطح بالایی نمونه‌های تحت ضربه نمایش داده شده است. این تصاویر با استفاده از روش غوطه‌وری با دو سنسور گیرنده و فرستنده فراصوتی که در دو طرف نمونه قرار می‌گیرند، تهیه شده است. برای این منظور، نسبت دامنه‌ی سیگنال گیرنده به فرستنده با یک مقیاس مشخص به تصاویر شکل 12 نگاشته شده است. این تصاویر می‌توانند

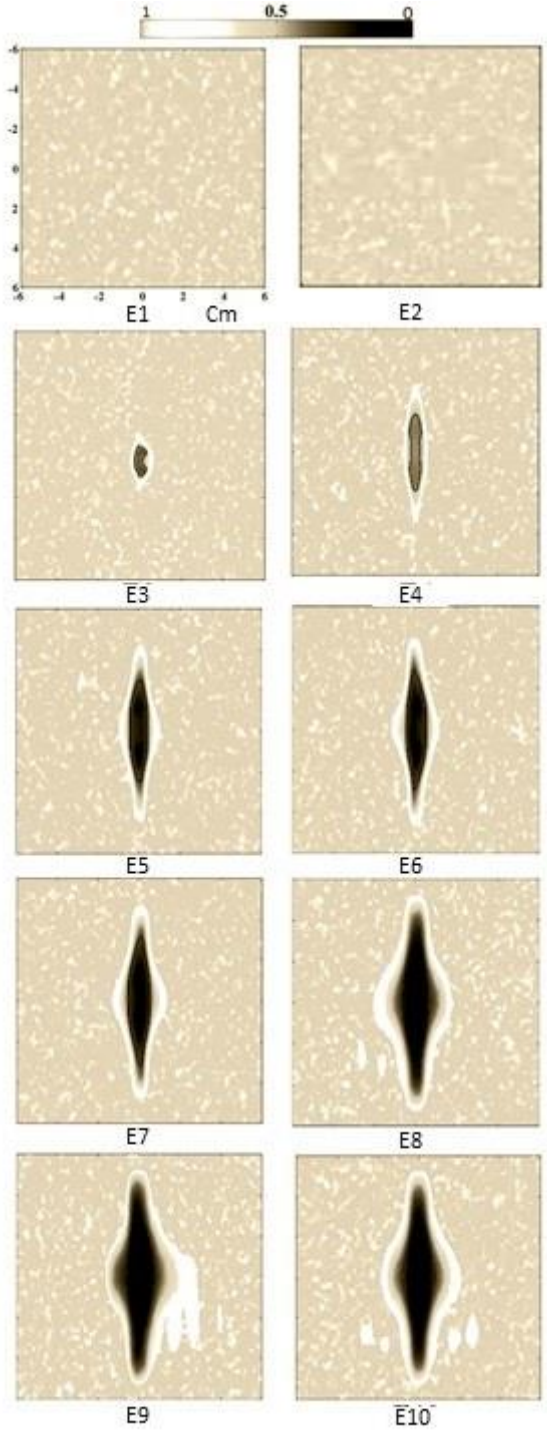


Fig. 12 The ultrasonic C-scan images of different impacted-specimens (dimensions are in cm).

شکل 12 تصاویر گرفته شده از قطعات ضربه‌دیده با استفاده از سی-اسکن فراصوتی

نمایشگر تصویر کل ناحیه آسیب باشند، ولی این روش قابلیت تشخیص مکان آسیب را ندارد. با توجه به شکل، طول آسیب برای نمونه‌های تحت ضربه در امتداد جهت الیاف بلندتر بود. همان‌طور که از شکل 12 مشخص است، تصویر سطح آسیب دیده به طور مشخصی وابسته به مقدار انرژی ضربه می‌باشد. این رابطه بین تصویر مساحت آسیب و انرژی ضربه در سطوح مختلف در شکل 13 نمایش داده شده است. برخی محققان مقدار آسیب وارده هنگام ضربه را محاسبه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که ناحیه کلی آسیب تقریباً بطور خطی با سطوح انرژی افزایش می‌یابد. این رفتار خطی تا سطح E8 ضربه (شکل 13) ادامه می یابد. به هر حال، پراکندگی داده‌ای در نواحی E9 و E10 وجود دارد که ناحیه وقوع آسیب کلی الیاف می‌باشد.

یکی از مسائلی که در این پژوهش به آن پرداخته شد، برقراری ارتباط بین گستردگی آسیب ناشی از ضربه با وقایع نشرآوایی بود. در این راستا، انرژی تجمعی AE برحسب انرژی ضربه در شکل 14 رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش انرژی ضربه، انرژی AE به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و مقدار R^2 مطلوب نیست. این امر به این خاطر است که سطح انرژی نشرآوایی آزاد شده در سازوکارهای مختلف متفاوت است. به عبارت دیگر، سازوکار شکست الیاف که مقدار انرژی کرنشی بالایی آزاد می‌کند، باعث انحراف از رفتار خطی می‌گردد. بنابراین، انرژی تجمعی اجزاء WP به صورت مجزا برای تحلیل گستردگی آسیب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که رفتار خطی بیشتری در جزء انرژی AD و انرژی ضربه وجود دارد (R^2=98%). با در نظر گرفتن یک رابطه خطی بین انرژی ضربه و ناحیه آسیب دیده، یک رابطه خطی بین جزء AD و ناحیه آسیب در نواحی با انرژی پایین تا متوسط انتظار می‌رود؛ که این امر بخاطر وجود سازوکار شکست زمینه در تمام سطح آسیب است، که با افزایش انرژی ضربه به صورت خطی افزایش می‌یابد. این روش جدید این امکان را فراهم می‌کند که با صرف زمان و هزینه بسیار کم، بتوان تنها بر اساس داده‌های نشرآوایی حین فرایند ضربه، در مورد سطح خرابی قطعه کامپوزیتی بدون نیاز به آزمون‌های پر هزینه و زمان‌بر فراصوتی غوطه‌وری، نظر داد.

5- جمع بندی

در این مطالعه، سازوکارهای آسیب ناشی از ضربه بر روی ورق‌های کامپوزیتی با روشی نوین بر اساس AE مورد بررسی قرار گرفتند. برای استخراج

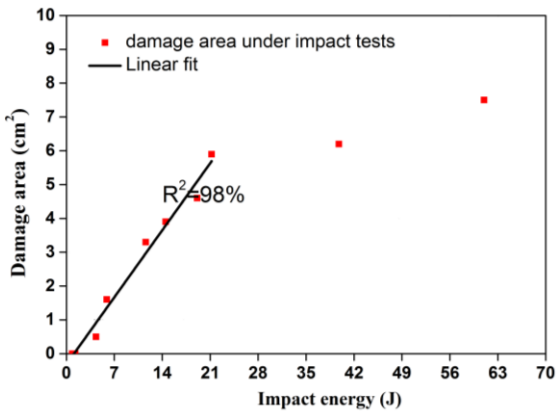


Fig. 13 The relationship between projected damage area and impact energy of different levels up to the minor fiber failure zone.

شکل 13 رابطه بین مساحت آسیب دیده و انرژی ضربه در انرژی ضربه‌های مختلف تا منطقه جزئی الیاف شکست

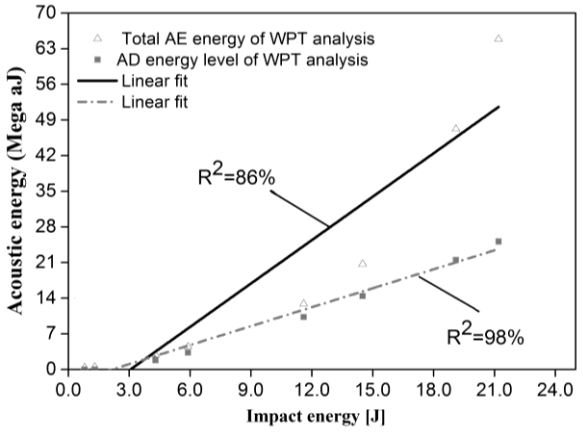


Fig. 14 Total energy and AD energy level of WPT versus impact energy with their linear dependency.

شکل 14 رفتار خطی جمع کل انرژی و جز انرژی AD موجک بر حسب انرژی ضربه

مشخصه‌های نشرآوایی از تحلیل تبدیل هیلبرت[1] استفاده شد، که محدوده دقیق‌تری از فرکانس هر سازوکار آسیب را بدست می‌دهد. یکی از مشکلات بحث برانگیز که در این مقاله به آن پرداخته شد آن بود که محدوده اعتبار فرض شبه استاتیکی در ضربه‌های سرعت-پایین تا چه مقدار انرژی ضربه صادق است. همچنین نشان داده شد که منحنی‌های نیرو–جابجایی در شرایط شبه استاتیک و ضربه رفتار یکسانی تا ناحیه تسلیم جزئی الیاف دارند. بعلاوه روشی تهیه گردید تا تخمینی از آستانه انرژی مقاومت به ضربه ورق کامپوزیتی از آزمون شبه استاتیک استخراج شود. همچنین مشخص گردید که انرژی آزاد شده مربوط به شکست زمینه، که رابطه خطی با مساحت تصویر آسیب دارد، می‌تواند به خوبی ناحیه کلی آسیب را تا بخش تسلیم جزئی الیاف پیش‌بینی کند. در نهایت، روش AE پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند به عنوان یک ابزار کارامد برای ارزیابی آسیب در ضربه‌های سرعت-پایین استفاده شود.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

7- مراجع

[1] J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*: Springer, pp.274-309, 2001 .
[2] N. Yang, H. Nayeb-Hashemi, The effect of solid particle erosion on the mechanical properties and fatigue life of fiber-reinforced composites, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*(ASME), pp. 293-299, 2006.
[3] G. Jilbert, J. Field, Synergistic effects of rain and sand erosion, *Wear*, Vol. 243, No. 1, pp. 6-17, 2000.
[4] K. Shivakumar, W. Elber, W. Illg, Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 442-449, 1985.
[5] W. Cantwell, J. Morton, The impact resistance of composite materials—a review, *Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 347-362, 1991.
[6] S. Abrate, *Contact laws, Impact on Composite Structures*, pp. 6-25, Southern Illinois University, Cambridge University Press, 1998.
[7] P. O. Sjoblom, J. T. Hartness, T. M. Cordell, On low-velocity impact testing of composite materials, *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, No. 1, pp. 30-52, 1988.

[1] Hilbert transform

2017 .
[23] R. Mohammadi, M. A. Najafabadi, M. Saeedifar, J. Yousefi, G. Minak, Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 108, No. 4, pp. 427-435, 2016.
[24] J. Yousefi, R. Mohamadi, M. Saeedifar, M. Ahmadi, H. Hosseini-Toudeshky, Delamination characterization in composite laminates using acoustic emission features, micro visualization and finite element modeling, *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No. 22, pp. 3133-3145, 2016.
[25] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Acoustic emission-based damage classification of glass/polyester composites using harmony search k-means algorithm, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 31, No. 10, pp. 671-680, 2012.
[26] K. M. Bak, K. KalaiChelvan, G. Vijayaraghavan, B. Sridhar, Acoustic emission wavelet transform on adhesively bonded single-lap joints of composite laminate during tensile test, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 2, pp. 87-95, 2013.
[27] ASTM E976 – 10, Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2010.
[28] Q. Q. Ni, M. Iwamoto, Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, No. 6, pp. 717-728, 2002.
[29] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian, Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 412, No. 1, pp. 141-145, 2005.
[30] K. Soman, K. Ramachandran, *Insight into Wavelets from Theory to Practice*, 2nd edn, CIT0011, pp. 15-22, 2004.
[31] A. Shinde, Z. Hou, A wavelet packet based sifting process and its application for structural health monitoring, *Structural Health Monitoring*, Vol. 4, No. 2, pp. 153-170, 2005.
[32] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage characterization of glass/epoxy composite under three-point bending test using acoustic emission technique, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 7, pp. 1380-1390, 2012.
[33] M. Saeedifar, M. Fotouhi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Prediction of delamination growth in laminated composites using acoustic emission and cohesive zone modeling techniques, *Composite Structures*, Vol. 124, No. 11, pp. 120-127, 2015.
[34] R. Talreja, C. V. Singh, *Damage and Failure of Composite Materials*: Cambridge University Press, pp. 36-51, 2012.
[35] M. M. M. Nasab, M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, H. H. 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.
[36] L. Sutherland, C. G. Soares, The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance of marine GRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 3, pp. 1459-1467, 2012.
[37] E. J. Herup, A. N. Palazotto, Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/nomex honeycomb-sandwich plates, *Composites Science and Technology*, Vol. 57, No. 12, pp. 1581-1598, 1998 .
[8] A. P. Christoforou, A. S. Yigit, Scaling of low-velocity impact response in composite structures, *Composite Structures*, Vol. 91, No. 3, pp. 358-365, 2009.
[9] S. Zhu, G. B. Chai, Low-velocity impact response of fibre–metal laminates–Experimental and finite element analysis, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 15, pp. 2012,1802-1793.
[10] C. Lopes, O. Seresta, Y. Coquet, Z. Gürdal, P. Camanho, B. Thuis, Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates, Part I: Experiments, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 7, pp. 926-936, 2009.
[11] C. Lopes, P. Camanho, Z. Gürdal, P. Maimí, E. González, Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. *Part II: Numerical simulations*, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 7, pp. 937-947, 2009.
[12] L. Iannucci, J. Ankersen, An energy based damage model for thin laminated composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 7, pp. 934-951, 2006.
[13] M. Donadon, L. Iannucci, B. G. Falzon, J. Hodgkinson, S. F. de Almeida, A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage, *Computers & Structures*, Vol. 86, No. 11, pp. 1232-1252, 2008.
[14] L. Raimondo, L. Iannucci, P. Robinson, P. Curtis, A progressive failure model for mesh-size-independent FE analysis of composite laminates subject to low-velocity impact damage, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 5, pp. 624-632, 2012.
[15] Y. Shi, T. Swait, C. Soutis, Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 9, pp. 2902-2913, 2012.
[16] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, 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.
[17] M. Nikbakht, J. Yousefi, H. Hosseini, G. Minak, Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 113, No. 4, pp. 185-196, 2017.
[18] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, A. R. Oskouei, F. J. Moghadas, Damage categorization of glass/epoxy composite material under mode II delamination using acoustic emission data: a clustering approach to elucidate wavelet transformation analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, No. 2, pp. 1325-1335, 2014.
[19] M. Nazmdar Shahri, J. Yousefi, M. Fotouhi, M. Ahmadi Najfabadi, Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform, *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No. 14, pp. 1897-1907, 2016.
[20] R. Mohammadi, M. Saeedifar, M. Fotouhi, Determination of fracture toughness of heat treated AISI D2 steel using Finite Element and Acoustic Emission methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 1-8, 2015.
[21] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, M. Hajikhani, Investigation of damage mechanisms in Glass/Epoxy composites by use of acoustic emission, *1st National Congress Aging Aircraft*, Tehran, Iran5, 2011.
[22] M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, J. Yousefi, R. Mohammadi, H. H. Toudeshky, Delamination analysis in composite laminates by means of Acoustic Emission and bi-linear/tri-linear Cohesive Zone Modeling, *Composite Structures*, Vol. 161, No. 10, pp. 505-512,