



دسته‌بندی سازوکارهای خرابی در حین رشد جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های ساندویچی، با روش نشر آوایی

میلاذ سعیدی فر^۱، محمد فتوحی^۲، رضا محمدی^۳، مهدی احمدی نجف‌آبادی^۴، میلاذ حاجی‌خانی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

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

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- صندوق پستی ۱۵۸۷-۴۴۱۳، ahmadin@aut.ac.ir

چکیده

کامپوزیت‌های ساندویچی به علت سفتی خمشی بالایی که دارند، به وفور در سازه‌های مختلفیه کار می‌روند. جدایش بین لایه‌ای پوسته و هسته یکی از معمول‌ترین سازوکارهای خرابی در این سازه‌ها است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از روش نشر آوایی، رشد جدایش بین لایه‌ای در چند لایه‌های ساندویچی تحت بارگذاری مود I، بررسی شده است. ابتدا با توجه به شدت سیگنال‌های نشر آوایی ایجاد شده در حین بارگذاری نمونه‌ها، منحنی‌های نیرو-جابجایی به سه ناحیه تقسیم شدند. تفاوت انرژی سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه‌ها، حاکی از وجود سازوکارهای مختلف خرابی در کامپوزیت است. بدین منظور مشخصات سیگنال‌های نشر آوایی مربوط به هر سازوکار خرابی، به طور جداگانه مشخص شد. در ادامه، سیگنال‌های نشر آوایی سازوکارهای مختلف خرابی بر اساس محدوده فرکانسی آن‌ها، دسته‌بندی شدند و محدوده فرکانسی هر سازوکار خرابی تعیین شد. سپس، با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های نشر آوایی مربوط به هر نمونه، تحلیل شده و با استفاده از آن درصد سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه‌ها مشخص شد. در انتها، با استفاده از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روشی از سطوح شکست نمونه‌ها، نتایج بدست آمده از روش نشر آوایی، صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج پژوهش، عملکرد قابل قبول روش نشر آوایی در تشخیص و دسته‌بندی سازوکارهای خرابی در سازه‌های ساندویچی را نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۶ آذر ۱۳۹۲

پذیرش: ۳۰ دی ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

کامپوزیت‌های ساندویچی

نشر آوایی

جدایش بین لایه‌ای

تبدیل موجک

Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission

Milad Saedifar, Mohammad Fotouhi, Reza Mohammadi, Mehdi Ahmadinajafabadi, Milad Hajikhani

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 07 December 2013
Accepted 20 January 2014
Available Online 13 July 2014

Keywords:

Sandwich Composites
Acoustic Emission
Delamination
wavelet Transform

ABSTRACT

Sandwich composites are widely used in structural applications because of their appropriate mechanical properties and low strength/weight ratio. Delamination is common failure mode in these structures that lead to a reduction in strength and stiffness of composite. In this paper, using acoustic emission, initiation and propagation of delamination in sandwich composite specimens was investigated. The specimens were loaded under mode I loading. Then the characteristics of the signals related to different damage mechanisms were specified. The acoustic emission signals were classified based on their frequency ranges. Then the acoustic emission signals were recorded during the test specimens were processed using wavelet transform. Thus the percentage of energy in each components of the acoustic emission signal was specified. Each of these components has a certain frequency range corresponding to a damage mechanism. Thus the percentages of different damage mechanisms in each specimen were specified. The Scanning Electron Microscopy (SEM) was also employed to verify the results which were obtained from acoustic emission and wavelet transform method. The results showed acoustic emission is efficient tool for identification and separation of different damage mechanisms in sandwich structures.

۱- مقدمه

وزن و استحکام ناچیز (فوم)، چسبانده شده‌اند. این چیدمان خاص لایه‌ها، موجب افزایش نسبت استحکام به وزن و نسبت سفتی به وزن سازه شده و استحکام خمشی و سفتی ساختار را بالا می‌برد. کامپوزیت‌های ساندویچی در موارد زیادی از جمله: قطعات فضاپیماها، بدنه هواپیما، زیردریایی‌ها، قطار و مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند. صفحات ساندویچی که لایه بیرونی آنها از

کامپوزیت‌های ساندویچی^۱ نوع خاصی از کامپوزیت‌ها هستند، که از سه لایه مجزا، تشکیل شده‌اند. این کامپوزیت‌ها، دارای دو پوسته با استحکام بالا (کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف) بوده، که از دو طرف به هسته‌ای ضحیم با

1- Sandwich Composites

Please cite this article using:

M. Saedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadinajafabadi, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

انرژی marse ۲۵-۰، جدایش بین‌لایه‌ای دارای محدوده دامنه ۶۰-۷۹ dB و انرژی marse ۲۱۹-۳، ترک‌خوردگی ماتریس دارای محدوده دامنه ۸۰-۸۹ dB و انرژی marse ۳۷۴-۸۸ و شکست الیاف دارای دامنه بیش از ۹۰ dB و محدوده انرژی marse ۱۳۵۶۸-۳۴۷ می‌باشد [۲].

هدف از این پژوهش، دسته‌بندی سازوکارهای خرابی به وجود آمده در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های ساندویچی، با روش نشرآوایی می‌باشد. نمونه‌های استاندارد بارگذاری مود I، با پوسته‌ای از جنس شیشه/اپوکسی با لایه‌چینی‌های مختلف و هسته فومی از جنس پلی‌اتیلن، تحت بارگذاری مود I قرار گرفتند. به منظور دسته‌بندی سازوکارهای خرابی، پارامترهای دامنه، انرژی و فرکانس سیگنال‌های نشرآوایی، مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل تداخل محدوده انرژی و دامنه سیگنال‌های مربوط به سازوکارهای مختلف، از فرکانس به عنوان پارامتر دسته‌بندی استفاده شد. سپس با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به هر نمونه، تحلیل شده و درصد انواع سازوکارهای خرابی، در نمونه‌ها تعیین شد. تصاویر گرفته شده از سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، حاکی از صحت عملکرد روش نشرآوایی در دسته‌بندی سازوکارهای خرابی و تعیین درصد هر نوع خرابی در نمونه‌هاست.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های بارگذاری مود I، طبق استاندارد [ASTM D5528، ۱]، با پوسته‌ای از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی و هسته‌ای از جنس فوم پلی‌اتیلنی^۵ ساخته شدند. در ساخت پوسته‌ها، از رزین اپوکسی^۶ اس ار ۱۵۰ با چگالی ۱/۴۶ g/cm³ و الیاف شیشه نوع ای^۸ با چگالی ۵۰۰ gr/m² (حالت تک‌جهته) و ۳۱۰ gr/m² (حالت بافته‌شده) استفاده شده‌است. پوسته از روی هم قرارگیری ۸ لایه کامپوزیت شیشه/اپوکسی تشکیل شده‌است. چگالی فوم پلی‌اتیلنی هسته ۷۰ kg/m³ می‌باشد. برای ساخت نمونه‌ها، صفحات مستطیلی کامپوزیتی با سه نوع لایه چینی مختلف ساخته شدند: (۱) شیشه-اپوکسی بافته‌شده^۹ [۴۵/۴۵]، فوم، (۲) شیشه-اپوکسی [۹۰]، فوم، (۳) شیشه-اپوکسی بافته‌شده [۹۰/۹۰]، فوم. به منظور تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در بارگذاری مود I، مطابق با استاندارد [۱۲]، بایستی یک جدایش بین‌لایه‌ای اولیه در نمونه‌ها ایجاد نمود. این کار در حین ساخت نمونه‌ها، با قرار دادن یک لایه تفلون به ضخامت ۲۰ μm بین پوسته و هسته، صورت پذیرفت. نمونه‌ها با روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده، سپس به مدت ۲۴ ساعت در کیسه خلاء نگه‌داری شدند. در ادامه نمونه‌ها در محیط با دمای ۲۰°C قرار گرفتند. در انتها، نمونه‌ها علامت‌گذاری شده و با یک اره بریده شدند. بدین ترتیب، نمونه‌های استاندارد بارگذاری مود [۱۲]، آماده شد. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های آزمایش	
شماره نمونه	نوع لایه‌چینی
A1	شیشه-اپوکسی بافته‌شده [۴۵/۴۵]، فوم
A2	شیشه-اپوکسی [۹۰]، فوم
A3	شیشه-اپوکسی بافته‌شده [۹۰/۹۰]، فوم

جنس یک کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف می‌باشد، به دلیل پایداری بهتر، وزن کمتر، ساخت و تعمیر آسان‌تر سازه، نسبت به سایر صفحات ساندویچی کاربردهای بیشتری دارند [۱].

با وجود مزیت‌های فوق، در این سازه‌ها امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. خرابی‌های غالب در کامپوزیت‌های ساندویچی عبارتند از: خرابی هسته، خرابی پوسته و جدایش بین لایه‌های هسته و پوسته [۲-۴]. جدایش بین لایه‌ای، اغلب در سازه‌هایی که تحت بارهای خارج از صفحه قرار دارند، اتفاق می‌افتد. این خرابی یکی از مهم‌ترین سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های ساندویچی است که منجر به کاهش استحکام و سفتی ماده می‌شود [۵].

انتشار موج تنش الاستیک در ماده، در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی گویند [۶] از مزایای استفاده از روش نشرآوایی در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت و تفکیک سازوکارهای مختلف خرابی در این سازه‌ها، اشاره نمود [۷]. در کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌ای از جنس یک کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف، عوامل ایجاد سیگنال‌های نشرآوایی عبارتند از: الف) خرابی هسته کامپوزیت (ب) خرابی-های پوسته کامپوزیت (ترک‌خوردگی ماتریس، شکست الیاف، بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس) ج) جدایش بین‌لایه‌ای [۸، ۲].

تاکنون محققان مختلفی با استفاده از روش نشرآوایی، به دسته‌بندی سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای پلیمری تقویت‌شده با الیاف، پرداخته‌اند. پشم‌فروش و همکاران، با استفاده از الگوریتم ترکیبی کامینز و ژنتیک^۱، سیگنال‌های نشرآوایی متناظر با سازوکارهای مختلف خرابی در چندلایه-های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی را دسته‌بندی نمودند. سازوکارهای خرابی در نمونه‌های آن‌ها عبارت بودند از: ترک‌خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف. نتایج نشان داد که محدوده انرژی و دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی، با یکدیگر مقداری تداخل داشته اما هر دسته دارای محدوده فرکانسی مشخص به خود است. با بررسی محدوده فرکانسی سازوکارهای مختلف خرابی، پارامتر فرکانس بهترین پارامتر برای دسته‌بندی سیگنال‌ها شناخته شد [۹]. فتوحی و همکاران، با استفاده از تبدیل موجک^۲ و روش دسته‌بندی فازی^۳، سازوکارهای خرابی را در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خمش سه نقطه، دسته‌بندی نمودند. با بدست آمدن محدوده فرکانسی هر سازوکار خرابی، مشخص شد که شکست ماتریس کمترین فرکانس را داشته و شکست الیاف بیشترین فرکانس را دارد [۱۰]. آروم‌گام و همکاران، با استفاده از تبدیل موجک، سازوکارهای مختلف خرابی را در یک نمونه شیشه/اپوکسی که تحت تست کشش قرار داشت، دسته‌بندی نمودند. نتایج آن‌ها نیز نشان داد که شکست الیاف بیشترین محدوده فرکانسی را دارد [۸]. تاکنون در زمینه استفاده از روش نشرآوایی، در دسته‌بندی سازوکارهای خرابی در سازه‌های ساندویچی، تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. کویزپیتوپا و همکاران، با استفاده از پارامترهای دامنه و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، سازوکارهای مختلف خرابی در کامپوزیت‌های ساندویچی را دسته‌بندی نمودند. نتایج نشان داد، سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به خرابی هسته، دارای کمترین دامنه و انرژی بوده و سیگنال‌های مربوط به شکست الیاف، بیشترین دامنه و انرژی را دارند [۱۱]. شفیق و همکاران، از پارامترهای دامنه و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، برای دسته‌بندی سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه‌های ساندویچی استفاده نمودند. نمونه‌ها دارای پوسته‌ای از جنس کربن/اپوکسی و هسته فومی بوده و تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که، خرابی هسته دارای محدوده دامنه ۴۵-۵۹ dB و

1- K-means genetic algorithm
2- Wavelet transform
3- Phasy Clustering

4- DCB Specimen
5- Polyethylene
6- Epoxy
7- SR150
8- E-Glass
9- Woven

5 ton و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین 500-0.1 mm/min استفاده شد. نمونه‌ها با سرعت 2 mm/min تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های آکوستیکی از نرم‌افزار آئی‌ای وین^۳ و سیستم پی‌سی‌آی-۲^۴، با نرخ نرخ داده‌برداری 1 Ms/s استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال، با پهنای باند وسیع به نام پیکو^۵، محصول کمپانی پک^۶، مدل آر ۵۰دی^۷ استفاده شد. فرکانس تشدید سنسور ۵۱۳/۲۸ kHz و محدوده بهینه کاری آن ۷۵۰-۱۰۰ kHz می‌باشد. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب ۴۰dB تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال‌های نشر آوایی بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاء شده استفاده شد.

۲-۴- تبدیل موجک

تبدیل موجک به عنوان روشی جدید، در چند دهه اخیر برای پردازش سیگنال‌ها و تصاویر استفاده شده است. بطور کلی از دیدگاه ریاضی، موجک، موجی با دوره تناوب محدود و مقدار میانگین صفر است. اگر $f(t)$ تابعی پیوسته باشد، تبدیل موجک پیوسته آن نسبت به Ψ با رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۳]:

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

که در آن ψ^* مزدوج موجک است.

تبدیل موجک بسته‌ای^۸، حالت خاصی از تبدیل موجک بوده، که در آن سیگنال اصلی به اجزائی به نام کلیات^۹ و جزئیات^{۱۰} شکسته می‌شود. کلیات دارای بخش‌های فرکانس پایین^{۱۱} و جزئیات دارای بخش‌های فرکانس بالای^{۱۲} سیگنال اصلی می‌باشند. در ادامه کلیات و جزئیات سیگنال، دوباره به اجزای دیگری تجزیه می‌شوند (شکل ۲). در این حالت تعداد اجزا در سطح z برابر با 2^z خواهد بود.

تبدیل موجک بسته‌ای به صورت تابع $\psi_{j,k}^i$ نشان داده می‌شود، که پارامتر مدولاسیون^{۱۳}، پارامتر مقیاس^{۱۴} و k پارامتر انتقال^{۱۵} می‌باشد [۱۴]:

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k) \quad (2)$$

در معادله (۲) $i = 1, 2, \dots, z$ بوده و n بیانگر سطح تجزیه موجک در ساختار درختی است. در این حالت، ψ^i از طریق معادلات (۳) و (۴) بدست می‌آید [۱۴]:

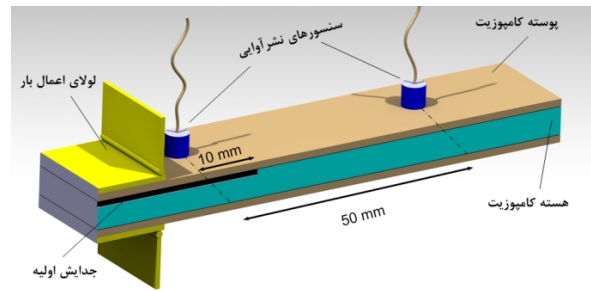
$$\psi^{2i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i \left(\frac{t}{2} - k \right) \quad (3)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i \left(\frac{t}{2} - k \right) \quad (4)$$

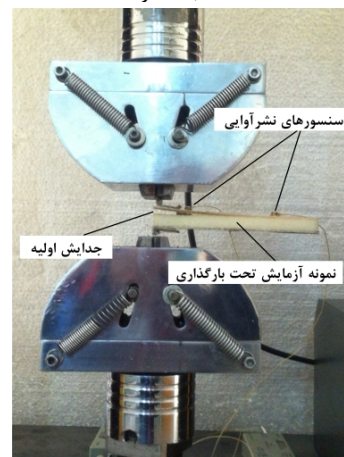
که در معادلات (۳) و (۴)، ψ^i موجک مادر نامیده شده و $h(k)$ و $g(k)$ فیلترهای گسسته هستند که به پارامتر مقیاس و تابع موجک بستگی دارند.

اجزاء موجک بسته‌ای سیگنال در یک سطح خاص، از معادله (۵) بدست می‌آید [۱۴]:

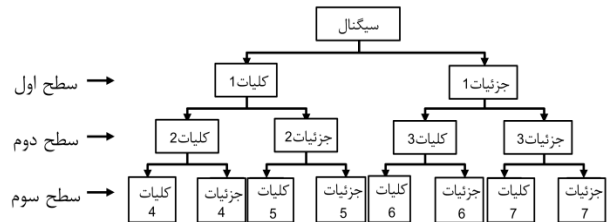
$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \Delta t \quad (5)$$



الف) ابعاد نمونه



ب) نمونه تحت بارگذاری
شکل ۱ نمونه‌های آزمایش



شکل ۲ تبدیل موجک بسته‌ای

ابعاد نمونه‌ها ۳mm قطر و ۲۲۰×۲۰×۵/۵mm^۳ می‌باشد. ضخامت هسته فومی ۳mm و قطر سنسورهای نشر آوایی ۵mm می‌باشد. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر نمونه سه بار آزمایش شد. شکل ۱ نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش انجام آزمایش

پس از ساخت نمونه‌ها، مطابق شکل ۱، دو عدد سنسور نشر آوایی بر روی سطح نمونه قرار داده شد. یکی از سنسورها به فاصله ۱۰mm قبل از نوک جدایش اولیه و دیگری به فاصله ۵۰mm بعد از سنسور اولی قرار گرفت. به سر نمونه‌ها لولا متصل شده و نیروی بازشوندگی از طریق لولا به نمونه‌ها وارد شد. نمونه‌ها در حالت کنترل جابجایی^۱، تحت بارگذاری قرار گرفتند.

توسط دستگاه کشش مقدار بار اعمالی و جابجایی نقطه اعمال بار، به طور همزمان در حین آزمایش ذخیره شدند. موقعیت لحظه‌ای نوک ترک در فواصل مشخصی بر اساس استاندارد [ASTM D5528، ۱۲]، به صورت چشمی مشاهده و ثبت شد.

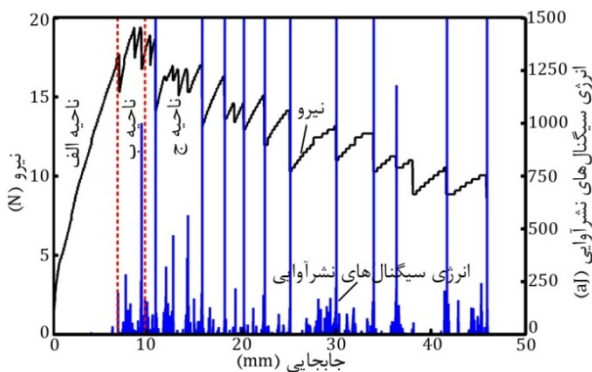
۲-۳- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا^۲، با ظرفیت

- 1- Displacement Control
- 2- HIWA

3-AEWin
4- PCI-2
5- PICO
6- PAC
7- R50D
8- Wavelet Packet Transform
9- Approximations
10- Details
11- Low Frequency (L)
12- High Frequency (H)
13- Modulation Parameter
14- Dilation Parameter
15- Translation Parameter

شدن انرژی کرنشی در نمونه کمتر از چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت می‌باشد، جدایش بین‌لایه‌ای رشد نکرده و فقط دهانه جدایش اولیه‌ای که در حین ساخت نمونه‌ها ایجاد شده بود، اندکی بازتر شده‌است. با افزایش مقدار نیروی وارده، انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه افزایش یافته، تا زمانی که مقدار این انرژی به چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت برسد. زمانی که نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در نمونه برابر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای شد، جدایش بین‌لایه‌ای اندکی رشد کرده، اما به علت کرنش سختی در ماده، به سرعت متوقف می‌شود. با رشد اولیه جدایش، سفتی نمونه (شیب نمودار نیرو-جابجایی) کاهش یافته و نمودار نیرو-جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود (اول ناحیه ب). در ناحیه ب، با افزایش نیرو، میکروتَرَک‌هایی^۱ در ناحیه جلو نوک جدایش بین‌لایه‌ای ایجاد می‌شوند. در لحظه‌ای که نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد، این میکروتَرَک‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. با اتصال میکروتَرَک‌ها به یکدیگر، جدایش بین‌لایه‌ای به صورت ناگهانی رشد کرده و منجر به افت لحظه‌ای نیرو می‌شود. در ناحیه ج با ادامه رشد جدایش بین‌لایه‌ای سازوکارهای مختلف خرابی از جمله: شکست الیاف، ترک‌خوردگی ماتریس و شکست هسته فعال شده و نیرو کاهش می‌یابد. در این ناحیه، رشد جدایش بین‌لایه‌ای حالت ناپایدار داشته و به صورت رشد - توقف می‌باشد. این عمل تا زمانی که نمونه به طور کامل بشکند، ادامه می‌یابد. همان‌طور که رفتار مکانیکی نمونه‌ها در این سه ناحیه متفاوت است، رفتار نشرآوایی نمونه‌ها نیز در این نواحی متفاوت می‌باشد. در ناحیه الف، فعالیت نشرآوایی خاصی مشاهده نشده و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی خیلی کم است. سیگنال‌های ضعیف اولیه می‌توانند ناشی از اصطکاک بین پوسته و هسته و یا تغییر فرم پلاستیک موضعی نوک جدایش باشند. در ناحیه ب، ترک‌های میکروسکوپی ایجاد شده در ماتریس، باعث ایجاد سیگنال‌هایی با انرژی پایین در نمونه می‌شود. در لحظه‌ای که نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد، با اتصال میکروتَرَک‌های ایجاد شده در ماتریس به همدیگر و رشد جدایش بین‌لایه‌ای، سیگنال‌هایی با انرژی بالا در نمونه تولید می‌شود. در ناحیه ج، رشد ترک حالت ناپایدار داشته و به صورت رشد - توقف می‌باشد. در این ناحیه با فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی همچون شکست الیاف، خرابی هسته و ترک‌خوردگی ماتریس، تعداد سیگنال‌های نشرآوایی افزایش می‌یابد. در این ناحیه زمانی که رشد ترک متوقف شده و بار افزایش می‌یابد، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی کم می‌باشد. با افزایش مجدد بار، انرژی کرنشی نمونه تا حدی بالا رفته که جدایش بین‌لایه‌ای مجدداً شروع به رشد کرده و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی افزایش می‌یابد. بنابراین روش نشرآوایی توانسته رشد و توقف جدایش بین‌لایه‌ای را به خوبی نشان دهد.



شکل ۳ نمودار نیرو-جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A1

ضرایب موجک بسته‌ای $C_{j,k}^i$ مربوط به سیگنال $f(t)$ ، از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۱۴]:

$$C_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) W_{j,k}^i(t) dt \quad (6)$$

مطابق معادله (۷)، بعد از تجزیه سیگنال تا سطح z -ام، سیگنال اصلی به عنوان جمع تمامی اجزاء موجک بسته‌ای در سطح z -ام نشان داده می‌شود [۱۴]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (7)$$

براساس رابطه فرکانسی ساختار موجک بسته‌ای، محدوده فرکانسی اجزاء کلی و جزئی در سطح z ام، از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید [۱۵]:

$$\left[0, \frac{1}{2} f_s 2^j\right] \quad (8)$$

محدوده فرکانسی اجزاء جزئی:

$$\left[\frac{1}{2} f_s 2^j, \frac{1}{2} f_s 2^{-(j-1)}\right] \quad (9)$$

به منظور تعیین چگونگی توزیع انرژی در بین اجزای مختلف سیگنال تجزیه شده، از معیار انرژی استفاده می‌شود. اگر $f(t)$ یک سیگنال نشرآوایی باشد، آن‌گاه می‌توان سیگنال را به اجزاء موجک مورد نظر در سطح z بصورت $f_j^1, \dots, f_j^i, \dots, f_j^{2^j}$ تجزیه نمود. برطبق سطح‌سیگنال تجزیه شده، مقادیر $E_j^1, \dots, E_j^i, \dots, E_j^{2^j}$ به عنوان انرژی اجزاء در سطح z -ام تعریف شده و با معادله (۱۰) قابل بیان است [۱۶]:

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^i(\tau))^2 \quad (10)$$

انرژی کل سیگنال با رابطه (۱۱) قابل محاسبه است [۱۶]:

$$E_{Total}(t) = \sum_j E_j^i(t) \quad (11)$$

در این پژوهش، به منظور پیدا کردن توزیع انرژی در هر کدام از اجزاء، نسبت انرژی‌های سطوح مختلف به انرژی کل در نظر گرفته شده و با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود [۱۶]:

$$P_j^i(t) = \frac{E_j^i(t)}{E_{Total}(t)} \quad ; \quad i = 1 \dots 2^j \quad (12)$$

که $P_j^i(t)$ نسبت توزیع انرژی در هر سطح را نشان می‌دهد.

۳- بحث و نتایج

نتایج آزمایش‌ها در سه قسمت بیان شده است. در قسمت اول داده‌های نشرآوایی جمع‌آوری شده در حین آزمایش نمونه‌ها، تشریح می‌شود. در قسمت دوم، با استفاده از روش تبدیل موجک بسته‌ای، سیگنال‌های نشرآوایی پردازش شده و درصد هر سازوکار خرابی در نمونه‌ها تعیین می‌شود. در قسمت سوم، با استفاده از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها، نتایج بدست آمده از تبدیل موجک، صحت‌سنجی می‌شوند.

۳-۱- نتایج نشرآوایی

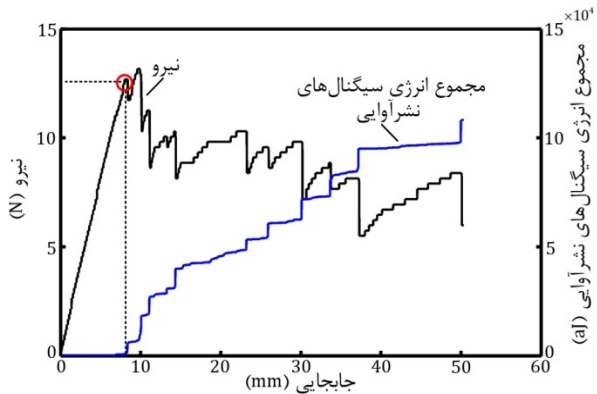
شکل‌های ۳ تا ۵، نمودار نیرو-جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی در حین بارگذاری نمونه‌های A1، A2 و A3 را نشان می‌دهد. براساس استاندارد [ASTM D5528، ۱۲]، نمودار نیرو-جابجایی یک نمونه کامپوزیتی تحت بارگذاری مود I را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود. ناحیه الف، که در آن نیرو با جابجایی رابطه‌ای خطی دارد. در این قسمت از نمودار، چون نرخ آزاد

1- Micro Crack

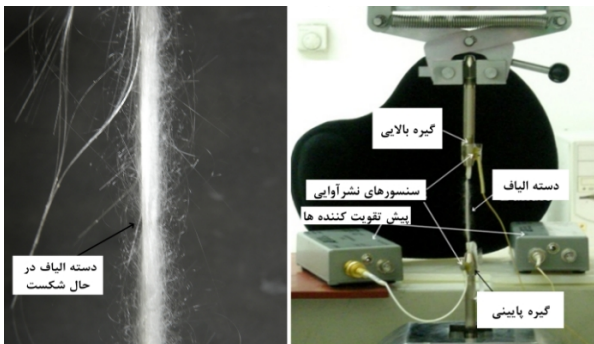
سیگنال‌های نشرآوایی به صورت لحظه‌ای افزایش یافته و در فواصلی که جدایش متوقف شده است، مجموع انرژی سیگنال‌ها، با شیب بسیار کمی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشخص شده است، اولین افزایش ناگهانی در مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، متناظر با نقطه غیرخطی شدن نمودار نیرو-جابجایی بوده، که طبق استاندارد این نقطه، شروع رشد اولیه جدایش بین‌لایه‌ای را نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از نمودار مجموع انرژی نشرآوایی، می‌توان لحظه شروع رشد جدایش را تعیین نمود.

توزیع متفاوت انرژی سیگنال‌های نشرآوایی در شکل‌های ۳ تا ۵، می‌تواند بیان‌گر وجود سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه‌باشد، که هر کدام از این سازوکارها، منجر به تولید سیگنال‌های نشرآوایی با انرژی مختلف می‌شود [۹،۱۱]. به منظور تفکیک این سازوکارهای خرابی، بایستی مشخصات سیگنال‌های نشرآوایی هر نوع خرابی به طور جداگانه بدست آید. بدین منظور، نمونه‌هایی از رزین خالص، فوم و الیاف ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. به عنوان نمونه، تصاویر مربوط به بارگذاری الیاف و رزین خالص، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. به منظور آزمایش الیاف، از دسته‌ای متشکل از 50 ± 14 الیاف استفاده شد. به منظور جلوگیری از خردشدن الیاف‌ها در داخل فک‌های دستگاه کشش، دو انتهای دسته الیاف‌ها توسط چسب اپوکسی قالب‌بندی شد. پس از سفت شدن اپوکسی، نمونه داخل فک‌های دستگاه کشش قرار داده شده و سنسورهای نشرآوایی با استفاده از گریس به سطح نمونه چسبانده شدند. سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به شکست الیاف در حین بارگذاری توسط سنسورها ثبت شد.

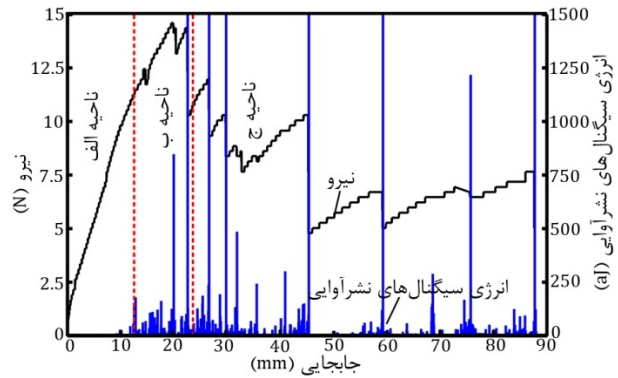
با انجام آزمایش‌های بارگذاری رزین خالص و فوم، الگوهای نشرآوایی مبنای، برای دسته‌بندی سیگنال‌ها بدست آمد. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ توزیع دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی را نشان می‌دهد.



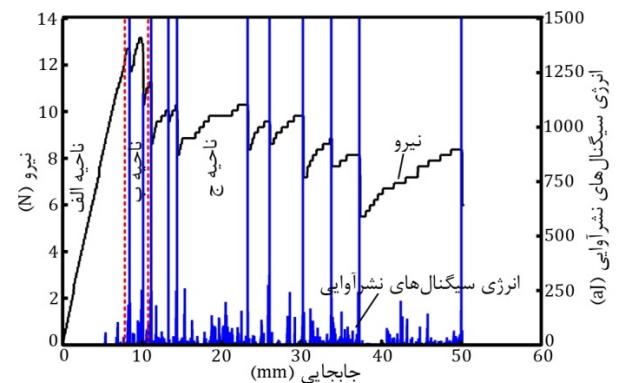
شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی و مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A3



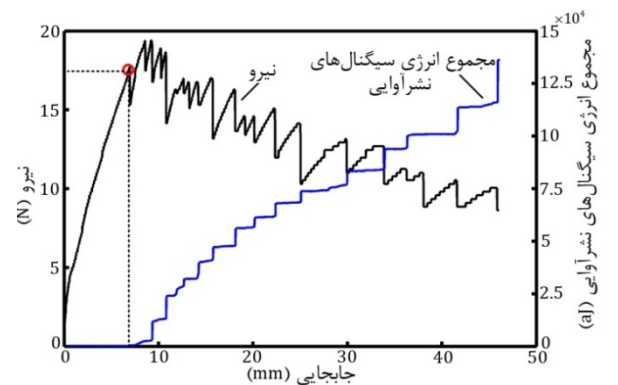
شکل ۹ آزمایش شکست الیاف



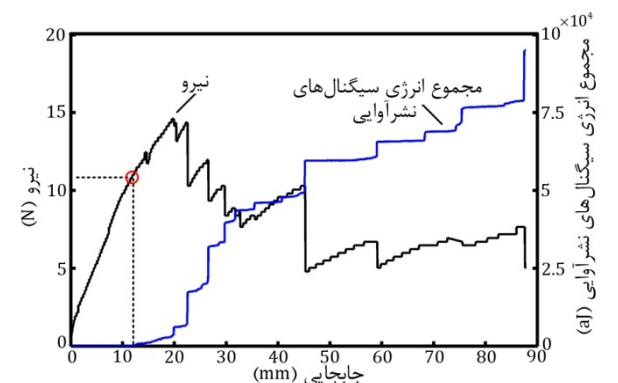
شکل ۴ نمودار نیرو-جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A2



شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A3

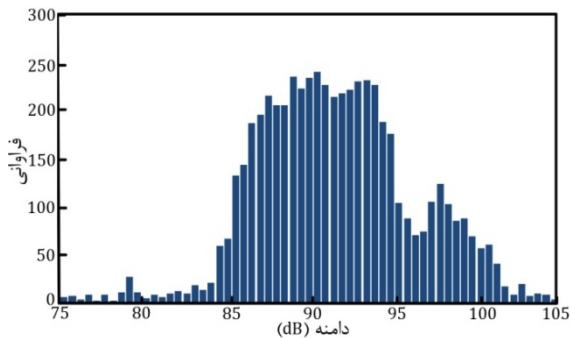


شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی و مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A1

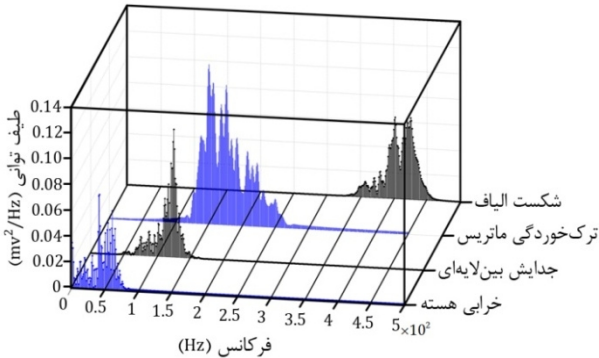


شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی و مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه A2

شکل‌های ۶ تا ۸، نمودار نیرو-جابجایی و مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در لحظاتی که جدایش رشد کرده و بار به طور ناگهانی افت می‌کند، مجموع انرژی



شکل ۱۴ توزیع دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به شکست الیاف



شکل ۱۵ توزیع فرکانسی سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی

جدول ۲ محدوده دامنه، انرژی و فرکانس سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به

سازوکارهای مختلف خرابی

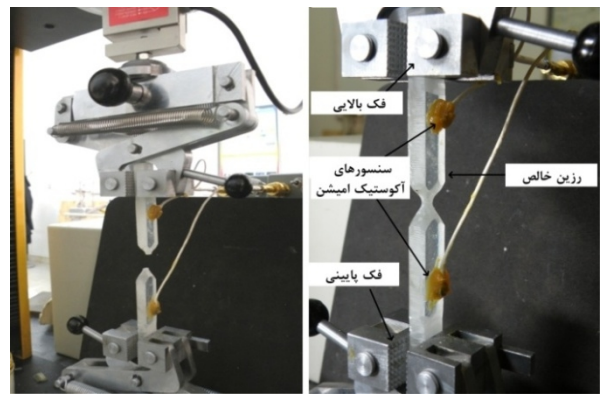
سازوکار خرابی	محدوده انرژی سیگنال‌ها (attojoule)	محدوده دامنه سیگنال‌ها (dB)	محدوده فرکانسی سیگنال‌ها (kHz)
خرابی هسته	۰-۳۰	۴۰-۶۵	۳۰-۷۰
جدایش بین‌لایه‌ای	۵-۲۳۰	۶۰-۸۰	۷۰-۱۳۵
ترک خوردگی ماتریس	۹۰-۳۹۰	۷۵-۸۵	۱۲۵-۲۵۰
شکست الیاف	۳۵۰-۱۲۵۰	۸۰-۱۰۵	۳۷۰-۴۵۰

باتوجه به جدول ۲، مشخص است که توزیع انرژی و دامنه سیگنال‌های مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی، هم‌پوشانی دارند. بنابراین استفاده از دامنه و انرژی سیگنال‌ها، برای دسته‌بندی خرابی‌ها، چندان مطلوب نبوده و همراه با خطا می‌باشد.

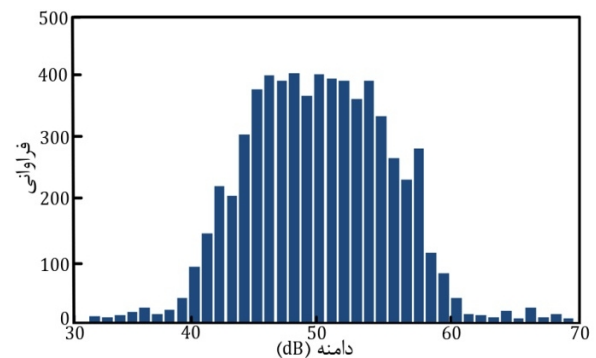
ستون آخر جدول ۲ و شکل ۱۵، توزیع فرکانسی سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی را، نشان می‌دهد. این سیگنال‌ها در حین آزمایش‌های تعیین الگوهای مبنای نشرآوایی، ثبت شده‌اند. شکل ۱۵ محدوده فرکانسی سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به هر سازوکار خرابی را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است محدوده فرکانسی سازوکارهای مختلف خرابی، هم‌پوشانی کمی داشته و از یکدیگر مجزا هستند. بنابراین از فرکانس سیگنال‌های نشرآوایی، برای دسته‌بندی و تفکیک انواع خرابی در نمونه‌ها استفاده می‌شود.

۳-۲- نتایج تبدیل موجک

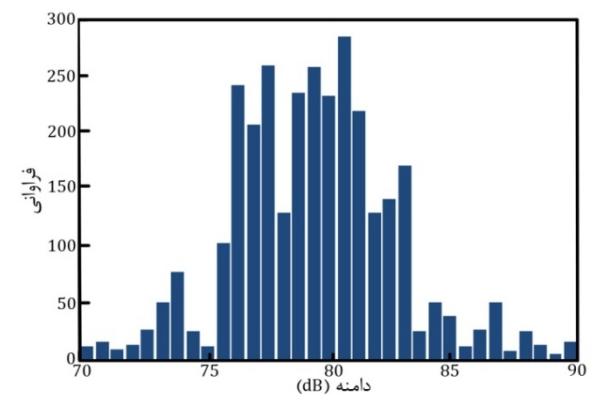
به منظور تعیین درصد سازوکارهای مختلف خرابی در هر نمونه، از تبدیل موجک بسته‌ای استفاده شد. بدین منظور، برنامه تبدیل موجک بسته‌ای، در نرم‌افزار تجاری متلب^۱ نوشته شد و با استفاده از آن، سیگنال‌های نشرآوایی



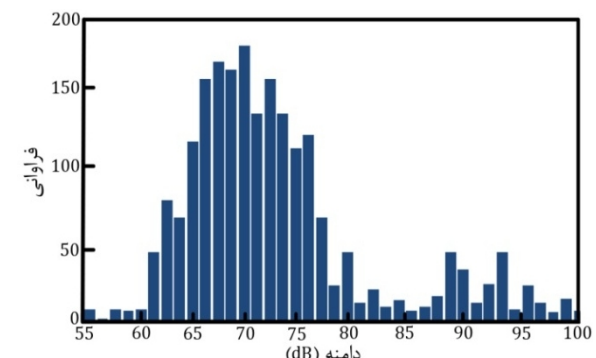
شکل ۱۰ آزمایش شکست رزین خالص



شکل ۱۱ توزیع دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به خرابی هسته



شکل ۱۲ توزیع دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به ترک خوردگی ماتریس



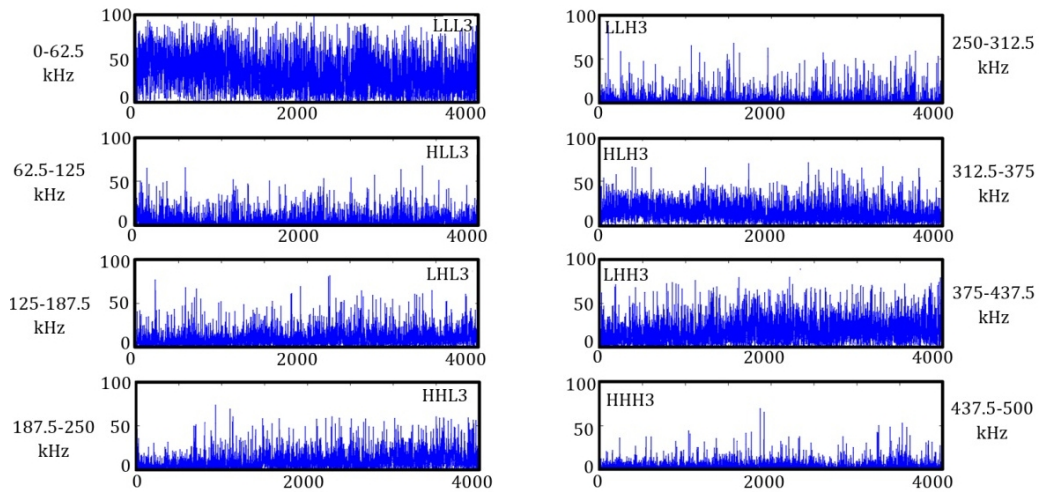
شکل ۱۳ توزیع دامنه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به جدایش بین‌لایه‌ای

همان‌طور که از شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ مشخص است، خرابی هسته کمترین دامنه و شکست الیاف بیشترین دامنه را دارد. محدوده انرژی، دامنه و فرکانس سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به سازوکارهای مختلف خرابی در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

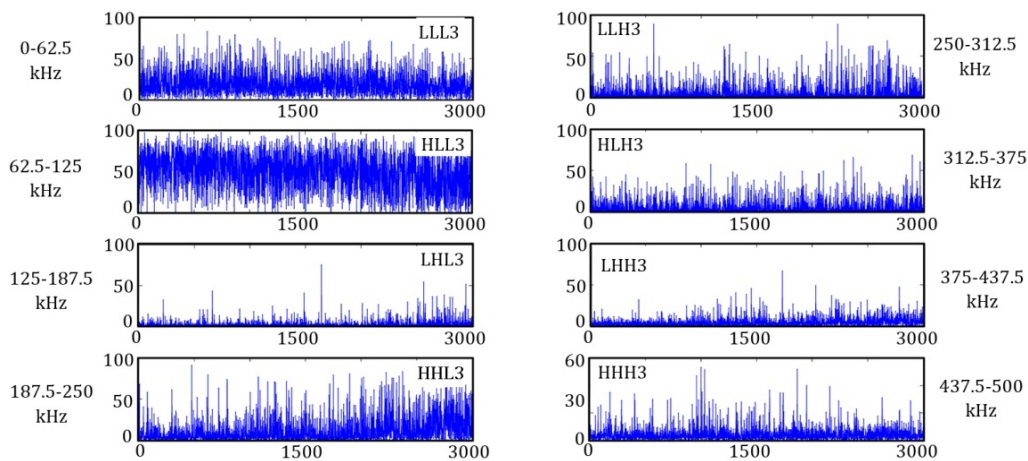
1- MATLAB

تجزیه شده سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به نمونه‌های A1، A2 و A3 را نشان می‌دهد. با مقایسه داده‌های ستون آخر جدول ۲ و توزیع فرکانسی اجزاء در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، مشخص است که جزء LLL3 متناظر با خرابی هسته، جزء HLL3 متناظر با جدایش بین‌لایه‌ای، مجموع دو جزء LHL3 و HHL3 متناظر با ترک‌خوردگی ماتریس و جزء LHH3 متناظر با شکست الیاف هستند.

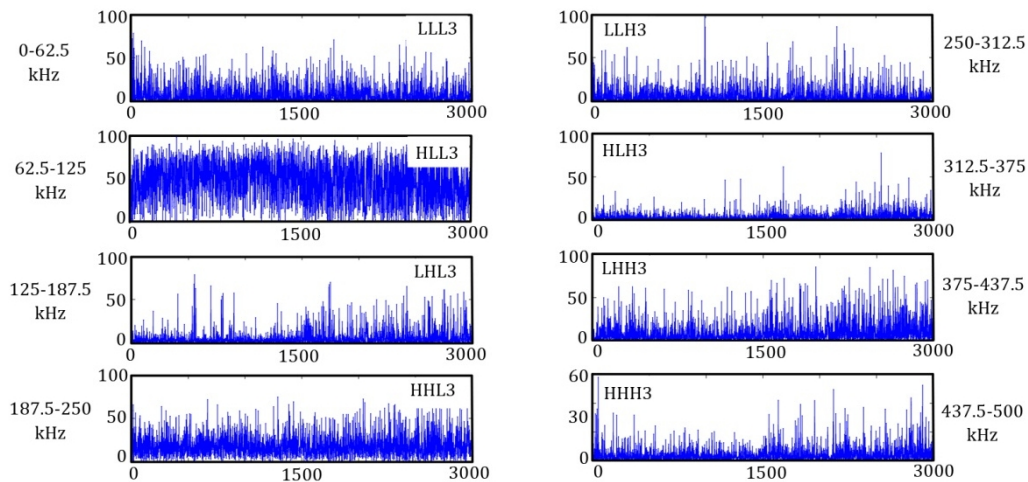
بدست آمده از آزمایش نمونه‌های A1، A2 و A3، تا سه سطح تجزیه و به ۸ جزء تقسیم شدند. سپس با استفاده از معیار انرژی، درصد انرژی هر یک از ۸ جزء سیگنال تجزیه‌شده، بدست آمد (معادلات (۱۰) تا (۱۲)). همان‌طور که در قسمت ۲-۴ بیان شد، هر جزء با توجه به سطح تجزیه‌ای که در آن قرار دارد و این‌که جزء با فرکانس بالا است یا فرکانس پایین، محدوده فرکانسی مشخصی دارد (معادلات (۸) و (۹)). شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، توزیع انرژی ۸ جزء



شکل ۱۶ توزیع انرژی اجزاء سطح سوم تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی نمونه A1



شکل ۱۷ توزیع انرژی اجزاء سطح سوم تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی نمونه A2



شکل ۱۸ توزیع انرژی اجزاء سطح سوم تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی نمونه A3

A2 و A3، جدایش بین‌لایه‌ای پوسته و هسته سازوکار غالب خرابی می‌باشند. جدول ۳ درصد انرژی اجزاء مختلف سیگنال تجزیه شده را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ درصد سازوکارهای خرابی متناظر با این اجزاء را، برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۲۰ سطوح شکست نمونه‌ها و تصاویر گرفته شده از آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشخص است، در نمونه A1، به دلیل اتصال مناسب پوسته به هسته، مقاومت در برابر رشد جدایش بین‌لایه‌ای اولیه در فصل مشترک پوسته و هسته زیاد بوده، در نتیجه مسیر رشد ترک اولیه، از صفحه بین پوسته و هسته، منحرف شده و ترک در داخل هسته که مقاومت کمتری در برابر رشدش وجود دارد، به رشد خود ادامه می‌دهد. در نتیجه سازوکارهای خرابی غالب در این نمونه، خرابی هسته است. اما در نمونه‌های A2 و A3، به دلیل چسبندگی ضعیف بین پوسته و هسته، ترک اولیه در همان صفحه فصل مشترک پوسته و هسته، رشد کرده و در نتیجه سازوکار غالب خرابی در این نمونه‌ها، جدایش بین‌لایه‌ای بوده، که منجر به جدایش پوسته از هسته شده است. این نتایج، با نتایج بدست آمده از تبدیل موجک که سازوکارهای غالب خرابی را در هر نمونه مشخص نمود (جدول ۳ و شکل ۱۹)، هم‌خوانی خوبی دارد.

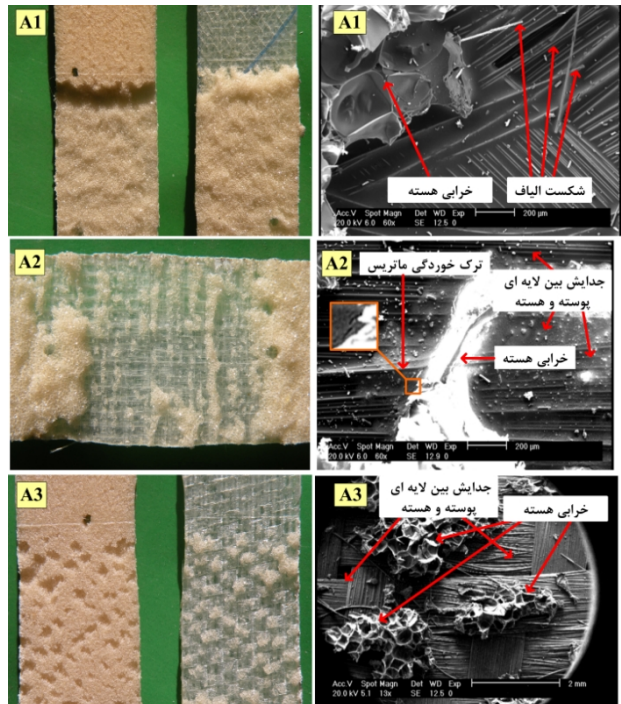
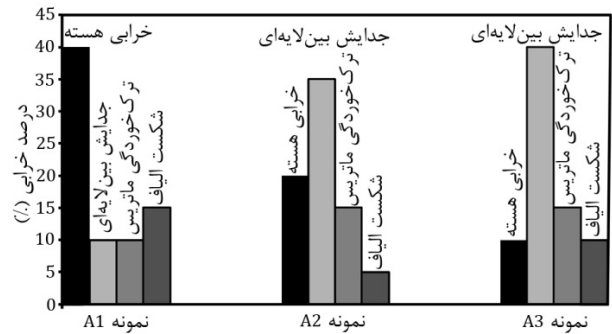
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش نشرآوایی برای بررسی انواع سازوکارهای خرابیکه در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های ساندویچی اتفاق می‌افتند، استفاده شد. با استفاده از این روش، رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های بارگذاری مود I، بررسی شد و لحظه شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای تعیین شد. در نمونه‌های ساندویچی با هسته فومی، ۴ سازوکار خرابی تشخیص داده شد، که عبارتند از: خرابی هسته، جدایش بین‌لایه‌ای پوسته و هسته، ترک خوردگی ماتریس و شکست الیاف. سپس با انجام آزمایش‌هایی، محدوده مشخصات سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به هر سازوکار خرابی تعیین شد. محدوده دامنه و انرژی سیگنال‌های این خرابی‌ها، با هم هم‌پوشانی داشتند، ولی محدوده فرکانسی آن‌ها هم‌پوشانی کمتری داشته و از هم مجزا بودند. بازه‌های فرکانسی ۳۰-۷۰ kHz، ۱۳۵-۱۷۰ kHz، ۲۵۰-۱۲۵ kHz و ۴۵۰-۳۷۰ kHz به ترتیب به خرابی هسته، جدایش بین‌لایه‌ای پوسته و هسته، ترک خوردگی ماتریس و شکست الیاف اختصاص داده شدند.

به منظور تعیین درصد سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه‌ها، از تبدیل موجک برای پردازش سیگنال‌های نشرآوایی استفاده شد. نتایج تبدیل موجک نشان داد که بیشترین درصد انرژی سیگنال‌های نشرآوایی در نمونه A1 متعلق به جزء LLL3 بوده، که متناظر با خرابی هسته می‌باشد. در نمونه‌های A2 و A3 بیشترین درصد انرژی در جزء HLL3 بود، که این جزء مربوط به جدایش بین‌لایه‌ای پوسته و هسته است.

تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها، سازوکارهای غالب خرابی را در نمونه‌ها نشان داد. این مشاهدات تطابق خوبی با نتایج بدست آمده از تحلیل موجک داشت.

نتایج این پژوهش نشان داد که روش نشرآوایی ابزاری مناسب برای بررسی سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های ساندویچی بوده و با پردازش سیگنال‌های نشرآوایی باروش تبدیل موجک، می‌توان درصد سازوکارهای مختلف خرابی را در این مواد تعیین نمود.



شکل ۲۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها

جدول ۳ درصد انرژی اجزاء سیگنال تجزیه شده متناظر با سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه‌ها

اجزاء	LLH3	HHL3+LHL3	HLL3	LLL3	محدوده فرکانسی (kHz)
A1	۴۰	۱۰	۱۰	۳۷	۳۷۵-۴۳۷/۵
A2 (%)	۲۰	۱۵	۳۵	۵	۱۲۵-۲۵۰
A3	۱۰	۱۵	۴۰	۱۰	۱۲۵-۲۵۰

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، در نمونه A1، جزء LLL3 با محدوده فرکانسی ۶۲/۵-۰ kHz، که متناظر با خرابی هسته می‌باشد، بیشترین درصد انرژی را داشته و پس از آن جزء LHH3، با محدوده فرکانسی ۳۷۵-۴۳۷/۵ kHz که متناظر با شکست الیاف است، بیشترین درصد انرژی را دارد. با توجه به شکل ۱۷ مشخص است که، در نمونه A2، جزء HLL3 با محدوده فرکانسی ۶۲/۵-۱۲۵ kHz، که متناظر با خرابی جدایش بین‌لایه‌ای می‌باشد، بیشترین درصد انرژی را داشته و پس از آن جزء LLL3، با محدوده فرکانسی ۶۲/۵-۰ kHz که متناظر با خرابی هسته است، بیشترین درصد انرژی را داراست. در شکل ۱۸ مشخص است که، در نمونه A3، بیشترین درصد انرژی مربوط به جزء HLL3 با محدوده فرکانسی ۱۲۵-۶۲/۵ kHz بوده، که متناظر با خرابی جدایش بین‌لایه‌ای است. بنابراین در نمونه A1، خرابی هسته و در نمونه‌های

۵- تشکر و قدردانی

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.

۶- مراجع

- [8] V. Arumugam, C. S. Kumar, C. Santulli, F. Sarasini, A. J. Stanley, Identification of Failure Modes in Composites from Clustered Acoustic Emission Data Using Pattern Recognition and Wavelet Transformation, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, No. 5, pp. 1087-1102, 2012.
- [9] 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.
- [10] M. Fotouhi, H. Heidary, M. Ahmadi, F. Pashmforoush, Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet and fuzzy C-means clustering, *Journal of Composite Materials*, February 1, 2012.
- [11] A. Quispitupa, B. Shafiq, F. Just, M. Banos, Fatigue Lifetime of Sandwich Composites Monitored Using Acoustic Emission Technique, 23rd Conference & Exposition, Structural dynamics; IMAC XXIII, 2005.
- [12] ASTM Standard D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [13] R. Raghuvver, B. Ajit, Wavelet Transforms: Introduction to Theory and Applications: Addison Wesley Publishing Company, 1998.
- [14] M. Fotouhi, Investigation of delamination in composite materials during drilling using acoustic emission, MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2011. (In Persian)
- [15] M. Fotouhi, F. Pashmforoush, V. Shokri, M. Ahmadi, Investigation of damage mechanisms during delamination in composites by use of Wavelet Transform, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [16] 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, Iran, 2011. (In Persian)
- [1] F. Deng, Acoustic emission applications to composite sandwich structures at room and low temperatures, PhD Thesis, Mechanical Engineering, Wayne State University, 2007.
- [2] B. Shafiq, A. Quispitupa, Fatigue characteristics of foam core sandwich composites, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 2, pp. 96-102, 2006.
- [3] J. Tomblin, T. Lacy, B. Smith, S. Hooper, A. Vizzini, S. Lee, Review of Damage Tolerance for Composite Sandwich Airframe Structures, U.S Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research Washington, 1999.
- [4] M.L. Silva, Damage Evolution in Composite Materials and Sandwich Structures Under Impulse Loading, PhD Thesis, Mechanical Engineering, California Institute of Technology, 2011.
- [5] N. J. Pagano, G. A. Schoepner, Delamination of polymer matrix composites: Problems and Assessment, *Comprehensive Composite Materials*, pp. 433-528, 2000.
- [6] R. K. Miller, *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*, 5 ed., American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [7] M. N. Shahri, J. Yousefi, M. Hajikhani, M. Ahmadi, Investigation of delamination in composite materials using acoustic emission, 19th National Conference on Manufacturing Engineering, Tabriz, Iran, 2010. (In Persian)