مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7، ص‌ص 307-312

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بکارگیری روش آکوستیک امیشن جهت شناسایی کسر جرمی مواد بکار رفته در کامپوزیت‌های پلیمری بر اساس تحلیل موجک بسته‌ای

امیر رفاهی اسکوئی*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

* تهران، صندوق پستی 136-16785، amir.refahi@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 31 فروردین 1394
پذیرش: 25 اردیبهشت 1394
ارائه در سایت: 19 خرداد 1394

کلید واژگان:
آکوستیک امیشن
تضعیف
موجک بسته ای
درصد جرمی
آزمایش غیر مخرب

چکیده

روش‌های سنتی بکار گرفته شده برای تخمین کسر جرمی در مواد کامپوزیتی، اغلب نیاز به آماده‌سازی و برش سطح مقطع نمونه دارد بطوری که این فرایندها باعث ایجاد آسیب در ساختار مواد می‌شود. در این مقاله روش غیرمخرب آکوستیک امیشن به همراه تحلیل موجک بسته‌ای برای ارزیابی درصد جرمی مواد کامپوزیتی از جنس گرافیت / اپوکسی استفاده شده است. معیار مورد استفاده در این کار بر اساس پارامتر تضعیف سیگنالهای آکوستیکی برای نمونه‌های کامپوزیتی با درصد جرمی‌های مختلف است. روابط بین ضرایب تضعیف دامنه و انرژی سیگنال‌ها و همچنین درصدهای جرمی مختلف، در دوحالت مجزا: یکی برای سیگنال‌های اصلی در کل دامنه فرکانسی و دیگری برای همان سیگنال با روش موجک بسته‌ای حاصل می‌شود. بعلاوه برای آزمایش مدل و اعتبارسنجی روابط بدست آمده از دو نمونه با درصد جرمی متفاوت از گرافیت در داخل رزین اپوکسی استفاده می‌شود. نتایج گویای این است که هر چقدر درصد گرافیت در ساختار کامپوزیت پایین باشد میزان تضعیف کمتر است. مشخصه حاصل برای تضعیف سیگنال بدست آمده از روش موجک بسته‌ای برای تشخیص درصد جرمی، در بازه فرکانسی 125 kHz تا 171.85 kHz، نسبت به مشخصه تضعیف سیگنال اصلی مناسب‌تر است. بطوری که مقدار خطای بدست آمده از محاسبه درصد جرمی با روش موجک بسته ای برابر با 1/9%، در حالی که برای سیگنال اصلی این مقدار برابر با 4/75% می‌باشد. بنابراین روش آکوستیک امیشن یک روش غیرمخرب کارآمد در جهت ارزیابی مقدار درصد جرمی کامپوزیت ها می تواند بکار گرفته شود.

Using acoustic emission to assess mass fractions of composite materials based on wavelet packet analysis

Amir Refahi Oskouei*

Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Techaer Training University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16785-136 Tehran, Iran, amir.refahi@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 April 2015
Accepted 15 May 2015
Available Online 09 June 2015

Keywords:
Acoustic Emission
Mass Fractions
Wavelet Packet
Non-Destructive Testing
Attenuation

ABSTRACT

Materials are often damaged during the process of detecting mass fractions by traditional methods. In this work, acoustic emission (AE) technology combined with wavelet packet analysis is used to evaluate the mass fractions of graphite/epoxy composites. Attenuation characteristics of AE signals across the composites with different mass fractions are investigated. The AE signals are decomposed by wavelet packet technology to obtain the relationships between the energy and amplitude attenuation coefficients of feature wavelet packets and mass fractions as well. Furthermore, the relationship is validated by test samples. The results show that the lower proportion of graphite will correspond to less attenuation. The attenuation characteristics of feature wavelet packets with the frequency range from 125 kHz to 171.85 kHz are more suitable for the detection of mass fractions than those of the original AE signal. The error of the graphite mass fraction calculated by the feature wavelet packet (1.9%) is lower than that of the original signal (4.75%). Therefore, the AE detection based on wavelet packet analysis is an ideal NDT method to evaluate mass fractions of composite.

1- مقدمه

روش‌های سنتی بکار گرفته شده برای تخمین کسر جرمی در مواد کامپوزیتی، مثل آنالیز اسپکتروسکوپی[1] و میکروسکوپ الکترونی روبشی[2]، اغلب نیاز به آماده‌سازی و برش سطح مقطع نمونه دارد [1،2]. بطوری که این فرایندها باعث می‌شود که ساختار مواد آسیب ببیند و ممکن است باعث ایجاد خسارات مالی و اقتصادی شود که با اصل صرفه‌جویی در انرژی و محافظت از محیط زیست تناقض زیاد دارد.

اخیرا"، برخی روش‌های آزمایش غیر مخرب[3] [3-5] برای مطالعه کسر جرمی مواد کامپوزیتی بکار برده می‌شود. یکی از روش‌های نوین در ارتباط با

1- Spectroscopy
2- Scanning Electron Microscopy (SEM)
3- Non-Destructive Testing (NDT)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Refahi Oskouei, Design, Using acoustic emission to assess mass fractions of composite materials based on wavelet packet analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 307-312, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]

آزمایش‌های غیر مخرب استفاده از تکنیک آکوستیک امیشن است که در اثر آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی در داخل مواد باعث انتشار سیگنال‌های آکوستیکی شده و این سیگنال‌ها به محیطی که در آن منتشر می‌شوند، بسیار حساس می‌باشند. مطالعات انجام شده بر روی سیگنال‌های آکوستیکی نشان داده است که خصوصیت انتشار امواج آکوستیکی در مواد مختلف بطور منظم قابل تغییر است [5-8]. هر چند در این مورد تحقیقات اندکی برای شناسایی کسر جرمی مواد کامپوزیتی بر اساس خصوصیت انتشار امواج آکوستیکی انجام شده است. برای تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی روش‌های مختلفی ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد. از بین این روش‌ها، روش موجک بسته-ای[1] به عنوان یکی از روش‌های برتر در پردازش سیگنال است. این روش پردازش سیگنال باعث کاهش اثرات نامطلوب حاصل از باندهای فرکانسی غیر مرتبط می‌شود و ویژگی‌هایی از سیگنال را که باعث بالا رفتن دقت و صحت تحلیل سیگنال‌ها می‌گردد، فراهم می‌سازد [9-11].

درکار حاضر ویژگی انتشار امواج آکوستیکی برای شناسایی کسر جرمی گرافیت در ساختار کامپوزیتی ذرات گرافیت/ رزین اپوکسی استفاده شده است. همچنین از آنالیز موجک بسته‌ای برای بدست آوردن مشخصه‌های سیگنال‌های تجزیه شده در باندهای فرکانسی مختلف بهره گرفته شده و سپس روابط بین کسر جرمی گرافیت و ویژگی‌های استخراج شده در باندهای فرکانسی خاص بدست می‌آید. در نهایت، کسر جرمی گرافیت بدست آمده با مقادیر واقعی مقایسه می‌شود. این تحقیق در جهت معرفی و ارائه یک روش غیرمخرب نوین بر اساس تکنولوژی آکوستیک امیشن برای شناسایی کسر جرمی در مواد کامپوزیتی است.

2- آنالیز موجک بسته ای

تبدیل موجک به عنوان روشی نسبتاً جدید در چند دهه اخیر برای پردازش سیگنال‌ها و تصاویر مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از محققان از روش موجک برای آنالیز سیگنال‌های آکوستیکی بهره جسته‌اند که در این ارتباط می‌توان به شناسایی مدهای مختلف شکست در کامپوزیت‌های پلیمری حین بارگذاری و عملیات سوراخ‌کاری این نوع مواد اشاره کرد [12،13]. در آنالیز موجک سیگنال اصلی به صورت اجزائی به نام کلیات[2] و جزئیات[3] شکسته می‌شود. کلیات دارای بخش فرکانس پایین و جزئیات دارای بخش فرکانس بالا از سیگنال اصلی می‌باشند. کلیات و جزییات دوباره به اجزای دیگری در سطح دوم شکسته شده و این فرایند تا رسیدن به نتیجه اپتیمم ادامه پیدا می‌کند [14،15]. در نتیجه سیگنال به یک ساختار درختی که شامل جزئیات و کلیات است، در چندین سطح تجزیه می‌شود. بطور کلی اگر $f(t)$ سیگنالی با انرژی محدود فرض شود آنگاه بر اساس تبدیل موجک معکوس رابطه (1) حاصل می‌شود:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left\{\int_{-\infty}^{+\infty}(W_\psi f)(a,b)\left[\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\right]db\right\}\frac{da^2}{a^2} \quad (1)$$

که در این معادله a پارامتر فرکانس، b پارامتر زمان، C_ψ ثابتی در ارتباط با تابع موجک اصلی (مادر)، ψ تابع موجک و $(W_\psi f)(a,b)$ ضرایب تبدیل موجک می باشد که به فرم معادله (2) تعریف می‌شود:

$$(W_\psi f)(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (2)$$

که $\bar{\psi}$ مزدوج تابع موجک است.

بعد از عمل تجزیه سیگنال توسط موجک، هر زیر سیگنال بدست آمده دارای محدوده فرکانسی خاص خود است. این محدوده‌های فرکانسی بسته به اینکه سیگنال در چند سطح تجزیه شده است، می‌تواند متغیر باشد. برای قسمت کلیات محدوده فرکانسی در سطح j از رابطه (3) بدست می‌آید:

$$\left[0,\frac{1}{2}f_s 2^{-j}\right] \quad (3)$$

و برای قسمت جزییات محدوده فرکانسی به شکل رابطه (4) می باشد:

$$\left[\frac{1}{2}f_s 2^{-j},\frac{1}{2}f_s 2^{-(j-1)}\right] \quad (4)$$

که f_s فرکانس نمونه‌برداری است.

در بین باندهای فرکانسی تجزیه شده برخی از آنها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و دارای اطلاعات مفیدی می‌باشند که برای پیدا کردن بهترین باند فرکانسی از معیار انرژی در هر باند فرکانسی استفاده می‌شود. فرض بر این است که بعد از تجزیه سیگنال $f(t)$ تا سطح j ام، بتوان آن را بصورت مجموع تمامی اجزا موجک بسته ای در سطح j ام مطابق رابطه (5) نشان داد:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (5)$$

که f_j^i زیر سیگنال i ام در سطح j است.

2-1- معیار انرژی برای موجک بسته‌ای

در ارتباط با سیگنال‌های آکوستیکی معیار انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل اینکه در باندهای مختلف فرکانسی توزیع انرژی متفاوت است، لذا می‌توان چنین تعبیر کرد که باند فرکانسی دارای بیشترین انرژی، در برگیرنده اطلاعات مفیدی است و همین اصل را می‌توان به عنوان پایه تئوری کار حاضر در نظر گرفت. اگر E_j^i به عنوان انرژی هر باند فرکانسی در سطح j در نظر گرفته شود، آنگاه انرژی هر باند فرکانسی از رابطه (6) بدست می‌آید:

$$E_j^i = \sum_{\tau=t_0}^{t}(f_j^i(\tau))^2 \quad (6)$$

و انرژی کل سیگنال با رابطه (7) بدست می‌آید:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{2^j} E_j^i \quad (7)$$

در کار حاضر نسبت انرژی‌های سطوح مختلف به انرژی کل برای محاسبه توزیع انرژی در هر باند فرکانسی در نظر گرفته شده است که بصورت رابطه (8) می‌توان آن را تعریف کرد:

$$P_j^i = \frac{E_j^i}{E_{\text{total}}} \quad i=1...2^j \quad (8)$$

که P_j^i نسبت توزیع انرژی در هر باند فرکانسی را نشان می‌دهد.

3- آزمایش‌های تجربی

3-1- آماده سازی نمونه‌های کامپوزیتی

از کامپوزیت اپوکسی/ گرافیت با درصدهای جرمی مختلف در این کار استفاده شده است. جدول 1 ترکیب‌های مختلف از نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

نمونه‌های G1 تا G4 برای آزمایش‌های تجربی بکار گرفته شدند و نمونه-های G5 و G6 برای اعتبارسنجی مدل با ترکیبات نشان داده شده در جدول 1 ساخته شدند. ابعاد تمامی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در کار حاضر برابر با 200 mm ×200 mm ×5 mm است.

1- Wavelet Packet
2- Approximations
3- Details

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]

جدول 1 مواد کامپوزیتی و ترکیبات مختلف آنها

کد بندی مواد	درصد جرمی گرافیت
G1	10
G2	40
G3	50
G4	70
G5	30
G6	60

3-2- دستگاه آکوستیک امیشن

شناسایی امواج تنشی در سیستم آکوستیکی با استفاده از سنسورهای پیزو-الکتریکی انجام می‌شود. امواج تنشی در اثر برخورد به سنسور تبدیل به امواج الکتریکی شده و با استفاده از پیش تقویت‌کننده دامنه آنها تقویت شده و توسط یک سری فیلترهای میان گذر فیلتر می‌شوند. دستگاه آکوستیک امیشن مورد استفاده در این کار سیستم PAC[1]PCI-2 است. چهار سنسور از نوع R15 با محدوده فرکانسی 50kHz تا 200kHz به همراه چهار پیش تقویت‌کننده برای اینکار استفاده شده‌اند. سنسورها توسط گریس به عنوان ماده واسط بر روی نمونه‌های کامپوزیتی با فاصله 40mm از هم در راستای یک خط مستقیم چسبانده می‌شوند (شکل 1). نقطه نشان داده شده در شکل 1 محل منبع سیگنال آکوستیکی است که با شکستن مداد در این نقطه سیگنال مورد نظر حاصل شده و اثر خود را بر روی سنسورها می‌گذارد. این روش به عنوان یک روش ساده و با قابلیت تکرار بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [16]. به منظور کاهش خطاهای اندازه‌گیری هر آزمایش سه بار تکرار می‌شود. تنظیمات دستگاه آکوستیک بر اساس جدول 2 می باشد.

3-3- نتایج و تحلیل آزمایش های تجربی

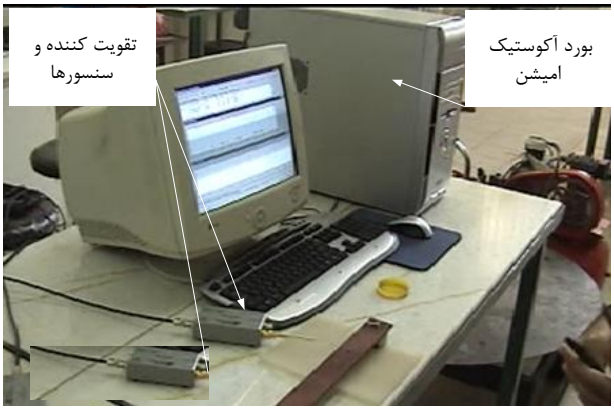
خصوصات مربوط به تضعیف امواج آکوستیکی در مواد مختلف می‌تواند بر اساس معیار نرخ تضعیف نسبی انرژی[2] و نرخ تضعیف نسبی دامنه[3] از روابط (9) و (10) بدست آید:

$$RARE_n = 20\log(E_n/E_1) \quad (9)$$

$$RARA_n = 20\log(A_n/A_1) \quad (10)$$

که در روابط بالا n عدد مربوط به هر سنسور (n=1,2,3,4)، E_n انرژی سنسور n-ام و A_n دامنه بیشینه سیگنال سنسور n-ام است. مقادیر میانگین بدست آمده از سه بار تکرار هر آزمایش به عنوان معیار اندازه‌گیری بکار برده می‌شود. سیگنال‌های آکوستیکی رسیده به سنسور شماره 1 که در فاصله 40mm نسبت به منبع شکست مداد قرار گرفته است، به عنوان سیگنال مرجع برای محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل‌های 2 و 3 به ترتیب تضعیف نسبی انرژی و دامنه نشان داده شده است.

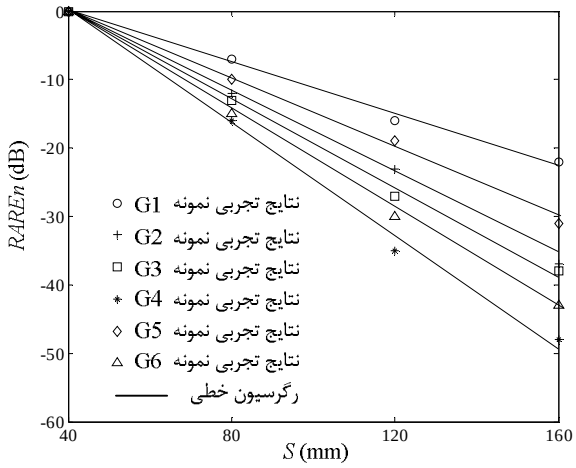
با توجه به نمودار شکل 2 شیب تضعیف انرژی نمونه‌های G1 تا G4 به ترتیب برابر با 0/15- ، 0/21- ، 0/29- و 0/37- می‌باشد و در نمودار شکل 3 شیب تضعیف دامنه برای همین نمونه ها به ترتیب برابر با0/14-، 0/21-، 0/28- و 0/36- می باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در اثر انتشار امواج آکوستیکی به اندازه 40mm در داخل مواد با ترکیبات مختلف مقدار تضعیف انرژی در نمونه‌های ذکر شده در بالا 6/7dB، 12/4dB، 17/2dB و 23/1dB و مقدار تضعیف دامنه 5/6dB، 8/4dB، 11/2dB و 14/4dB می باشد. بنابراین می‌توان گفت که افزایش مقدار کسر جرمی گرافیت در داخل کامپوزیت باعث افزایش تضعیف دامنه و انرژی می شود. به عبارت دیگر با افزایش فاز گرافیت در داخل ماتریس اپوکسی، چگالی فاز میانی افزایش می‌یابد و افزایش تعداد فازهای میانی به ناچار باعث تضعیف سیگنال‌های در حین انتشار می‌شوند [17]. با افزایش مقدار گرافیت تعداد فازهای میانی در واحد حجم بین اپوکسی و گرافیت بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد و این پدیده احتمالا به عنوان دلیل اصلی در جهت تسریع تضعیف بوجود آمده می‌تواند تلقی شود.



شکل 1 سامانه آزمایش: محل ضربه چیدمان سنسورها نسبت به هم

جدول 2 تنظیمات پارامترهای دستگاه آکوستیک امیشن

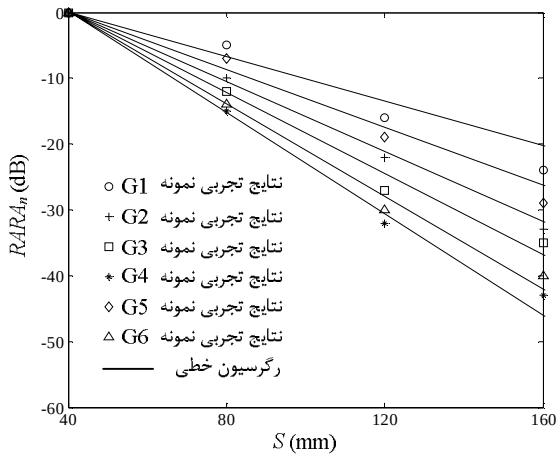
پارامتر	مقدار
فرکانس نمونه برداری	2 MHz
حد آستانه	30 dB
ضریب تقویت کنندگی	40
طول سیگنال	1024



شکل 2 رابطه بین نرخ تضعیف نسبی انرژی و فاصله انتشار امواج

1- Physical Acoustic Corporation
2- Relative Attenuation Rate of Energy
3- Relative Attenuation Rate of Amplitude

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]



شکل 3 رابطه بین نرخ تضعیف نسبی دامنه و فاصله انتشار امواج

همچنین از نمودارها چنین بر می‌آید که تضعیف در انرژی سریعتر از تضعیف در دامنه بوقوع می‌پیوندد. برای مثال، بطور همزمان در نمونه G1 تضعیف انرژی 0/19dB است ولی تضعیف دامنه 0/14 dB می‌باشد. نمونه‌های G2 تا G4 نیز از این قانون مستثنا نیستند و رفتاری شبیه نمونه G1 دارند. شاید این رفتار به این دلیل باشد که اطلاعات موجود در دامنه کمتر از اطلاعات موجود در انرژی باشد. به عبارت دیگر دامنه فقط مقدار بیشینه سیگنال را بازگو می‌کند در حالی که انرژی شامل اطلاعاتی فراتر از دامنه است. لذا انرژی به رفتار تضعیف بیشتر حساس است. در کار حاضر ضریب تضعیف انرژی به عنوان شاخص اندازه‌گیری درصد جرمی گرافیت در نمونه‌های کامپوزیتی بکار برده می‌شود. بر اساس روابط بین شیب‌های تضعیف انرژی و مقادیر کسر جرمی گرافیت در نمونه‌های G1 تا G4 معادله خطی (11) بدست می‌آید:

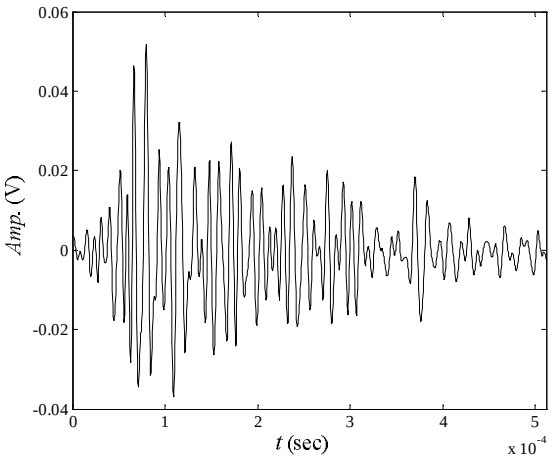
$$y = -2.56x - 0.22 \qquad (11)$$

که در این معادله y مقدار کسر جرمی گرافیت و x ضریب تضعیف انرژی سیگنال اصلی (شیب حاصل از نمودارهای تضعیف انرژی) می باشد.

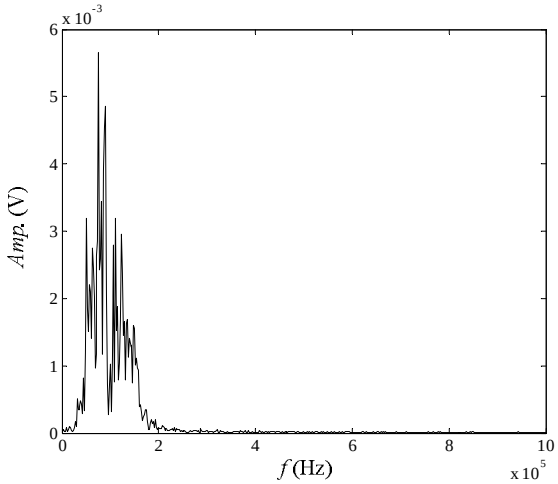
نمونه‌های G5 و G6 به منظور آزمایش صحت نتایج حاصل انتخاب شده‌اند. برای نمونه G5 شیب تضعیف انرژی 0/187- می‌باشد. لذا کسر جرمی گرافیت برای این نمونه بر اساس معادله 11 برابر با 26/4% است که در مقایسه با درصد جرمی واقعی دارای خطایی برابر با 3/6% می‌باشد. برای نمونه G6 شیب تضعیف انرژی بدست آمده برابر با 0/34- است و با جایگذاری در رابطه 11 درصد کسر جرمی گرافیت در این نمونه برابر با 65/1% می‌باشد که دارای خطایی در حدود 5/1% است.

تحلیل‌های انجام گرفته در بالا از روی سیگنال اصلی آکوستیکی در باند فرکانسی کامل آن انجام گرفته است. بنابراین اگر بتوان محدوده فرکانسی را تا حدودی محدود کرد خطاهای بدست آمده نیز کاهش پیدا می‌کنند به همین علت از روش موجک بسته‌ای برای این کار می‌توان بهره گرفت. از آنجایی که سیگنال‌های حاصل از شکست مداد در محدوده فرکانسی کمتر از 200kHz متمرکز شده‌اند (شکل 4) لذا تمامی سیگنال‌های آکوستیکی را توسط موجک دبیچیز[1] در 5 سطح تجزیه کرده و با محدود کردن باند فرکانسی که جز خواص موجک در حین تجزیه می‌باشد، می‌توان برخی خصوصیات سیگنال را در باندهای فرکانسی ویژه پیدا کرد. این باندهای فرکانسی ویژه در برگیرنده اطلاعات مفیدی در ارتباط با تضعیف انرژی و کسر جرمی گرافیت می‌تواند باشد. به این دلیل از موجک دبیچیز برای تحلیل سیگنال‌ها استفاده شده است که سیگنال‌های آکوستیکی نسبت به سیگنال‌های مکانیکی زمان دوره تناوب کوتاهتری دارند و خیلی تیز می‌باشند که صرفاً این خانواده موجک برای این کار مناسب است [5]. بر اساس آنچه که گفته شد و با بهره‌گیری از روابط (3) و (4) محدوده فرکانسی هر باند بدست می‌آید که برای کار حاضر 5 باند فرکانسی [62/5kHz -93/75kHz]، [93/75 kHz -125 kHz]، [125 kHz -156/25 kHz]، [156/25 kHz -187/5 kHz] و [218/75 kHz -125 kHz] با گام 31/25 kHz انتخاب شدند. این باندها به ترتیب با اسم باند 1، باند 2، باند 3، باند4 و باند 5 نامگذاری می‌شوند. در شکل‌های 5 تا 8 نمودار انرژی نرمال شده هر باند فرکانسی برای نمونه‌های G1 تا G4 آورده شده است.

از شکل‌های 5 تا 8 چنین می‌توان نتیجه گرفت که انرژی سیگنال‌های آکوستیکی عمدتاً در باند 4 ([156/25 kHz -187/5 kHz]) متمرکز شده‌اند. بنابراین باند 4 به عنوان باند فرکانسی ویژه (خاص) در نظر گرفته می‌شود که خصوصیات و اطلاعات سیگنال‌ها را در این محدوده در بر گرفته و به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری کسر جرمی گرافیت در داخل کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(الف)



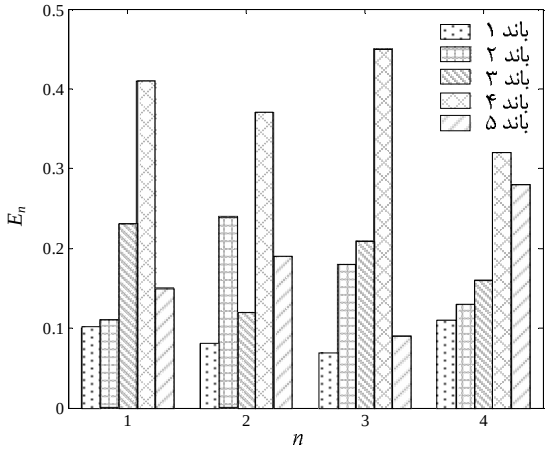
(ب)

شکل 4 الف) سیگنال آکوستیکی ناشی از شکست مداد در حوزه زمان
ب) محتوای فرکانسی سیگنال آکوستیکی

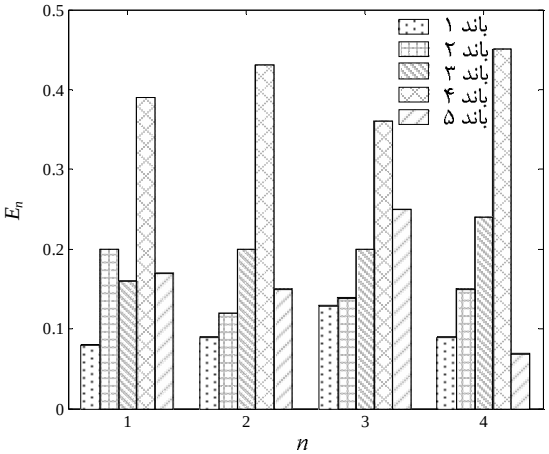
1- Daubechies

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

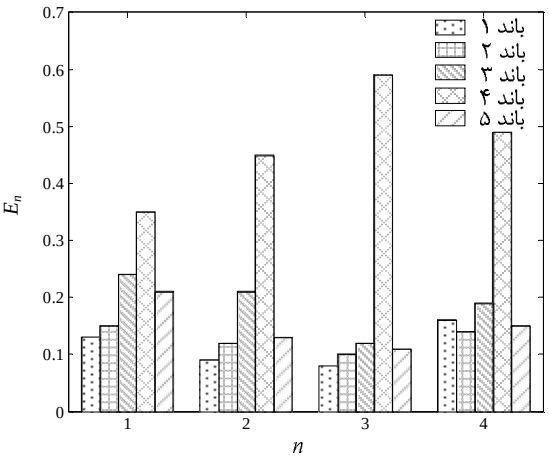
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]



شکل 5 انرژی نرمال شده باندهای فرکانسی نمونه G1 در برابر سنسورها



شکل 6 انرژی نرمال شده باندهای فرکانسی نمونه G2 در برابر سنسورها



شکل 7 انرژی نرمال شده باندهای فرکانسی نمونه G3 در برابر سنسورها

برای بدست آوردن مقادیر انرژی و تضعیف انرژی در باند 4، مشابه آنچه که برای سیگنال اصلی قبلاً انجام شد، عمل می‌شود. انرژی شبیه روش بکار برده شده برای سیگنال اصلی برای باند فرکانسی 4 نیز قابل ارائه است. بدین جهت سنسور 1 به عنوان انرژی مرجع در نظر گرفته شده و نرخ تضعیف نسبی انرژی از رابطه 9 محاسبه می‌شود. رابطه بین انرژی نسبی باند 4 و فاصله سنسورها در شکل 9 نشان داده شده است.

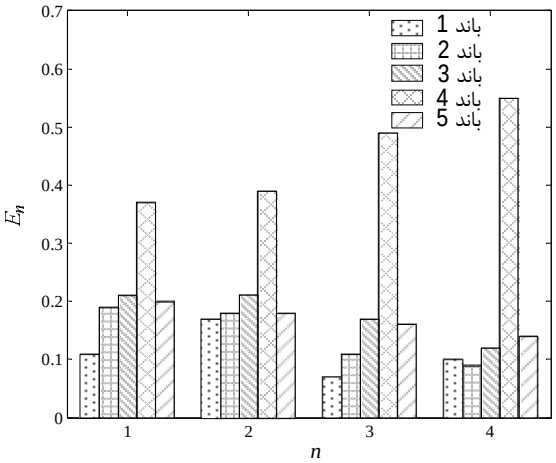
شکل 9 نشان می دهد که شیب تضعیف انرژی در باند 4 برای نمونه‌های G1 تا G4 به ترتیب برابر با 0/16-، 0/23-، 0/31- و 0/39- می‌باشد. همچنین مقادیر تضعیف انرژی در باند 4 برای نمونه های G1 تا G4 به ترتیب برابر با 8/4dB، 12/8dB، 17/6 dB و 2/2dB است. از مقادیر بدست آمده و با رگرسیون‌گیری خطی بین این مقادیر ارتباط بین مقدار کسر جرمی گرافیت و ضریب تضعیف انرژی بصورت رابطه (12) بدست می‌آید:

$$y = -2.45x - 0.24 \qquad (12)$$

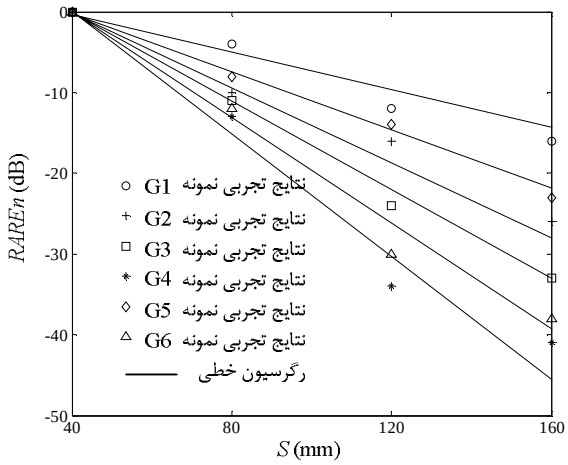
که در این رابطه y کسر جرمی گرافیت و x ضریب تضعیف انرژی در باند 4 می باشد. برای نمونه G5 و G6 شیب تضعیف انرژی در باند 4 به ترتیب 0/22- و 0/35- بدست آمده است که با جایگذاری در رابطه 12 مقدار کسر جرمی به ترتیب برابر با 28/2% و 61/75% بدست می آید که با مقادیر واقعی 1/8% و 1/75% اختلاف دارد.

از روابط بالا کسر جرمی گرافیت بوسیله ضریب تضعیف سیگنال در باند 4 محاسبه می‌شود. استفاده از روش باند فرکانسی با تحلیل موجک نسبت به روش استفاده از باند فرکانسی کامل از سیگنال اصلی داری خطای کمتری است. خطای روش موجک بطور میانگین 1/7% است که نسبت به میانگین خطای روش باند فرکانسی کامل (4/35%) کاهش یافته است.

بنابراین باند فرکانسی ویژه نسبت به سیگنال کامل برای اندازه گیری کسر جرمی مواد کامپوزیتی روش مناسب‌تری است.



شکل 8 انرژی نرمال شده باندهای فرکانسی نمونه G4 در برابر سنسورها



شکل 9 رابطه بین نرخ تضعیف نسبی انرژی و فاصله انتشار امواج

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش آکوستیک امیشن برای مطالعه کسر جرمی گرافیت در کامپوزیت گرافیت/ اپوکسی استفاده شده است. روابط بین خصوصیات انتشار امواج آکوستیکی اصلی و سیگنال‌های بدست آمده در باندهای فرکانسی خاص و کسر جرمی مواد بدست آمد. در ضمن، نتایج بدست آمده با نمونه‌های دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجا که کار حاضر با هدف پیدا کردن ارتباط بین امواج آکوستیک امیشن و کسر جرمی انجام شده است بنابراین صرفاً از دو منظر قرار بود بررسی شود یکی اینکه توانایی روش آکوستیک امیشن را مورد ارزیابی قرار دهد و دوم اینکه کارآمدی دو روش بکار گرفته شده برای تحلیل سیگنال‌ها را نسبت به هم بیان کند، لذا بر اساس اهداف تعیین شده نتایج اصلی بدست آمده به شرح زیر می باشد:

1) خصوصیات انتشار موج در مواد کامپوزیتی با خواص و ترکیبات مختلف، تفاوت دارد. مقادیر کمتری از گرافیت باعث کاهش تضعیف امواج آکوستیکی می‌شود. به دلیل اینکه چگالی فاز میانی با کاهش میزان گرافیت در زمینه کاهش می‌یابد که این نتیجه با نتیجه حاصل از مرجع [17] هم پوشانی دارد.

2) مقدار کسر جرمی محاسبه شده با روش موجک بسته‌ای دقیق‌تر از روش سیگنال اصلی است. خطای محاسباتی در روش موجک برای نمونه‌های آزمایش بطور میانگین تقریباً 2% می‌باشد که این خطا نسبت به خطای میانگین روش سیگنال اصلی (4/75%) کمتر است. لذا استفاده از روش آکوستیک امیشن بر پایه موجک بسته‌ای یک روش مناسب غیر مخرب برای شناسایی کسر جرمی مواد با خواص ترکیبی مختلف می‌باشد.

5- مراجع

[1] P. Stutzman, Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure, *Cement and Concrete Composites,* Vol. 26, No. 8, pp. 957-966, 2004.

[2] K. H. Kim, J. L. Ong, O. Okuno, The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites, *The Journal of Prosthetic Dentistry,* Vol. 87, No. 6, pp. 642-649, 2002.

[3] Y. Hwang, R. Radermacher, O. T. Hirata, Oil mass fraction measurement of CO2/PAG mixture, *International Journal of Refrigeration,* Vol. 31, pp. 256-261, 2008.

[4] A.V. Arefiev, X.H. Gao, R.T. Mikhail, X.M. Wang, B. Shim, B.N. Briezman, Size distribution and mass fraction of microclusters in laser-irradiated plasmas, *High Energy Density Physics,* Vol. 6, pp. 121-127, 2010.

[5] R. Khamedi, A. Fallahi, A. Refahi Oskouei, Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels, *Materials & Design,* Vol. 31, No. 6, pp. 2752-2759, 2010.

[6] A. Refahi Oskouei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate, *Materials & Design,* Vol. 32, No. 3, pp. 1444-1455, 2011.

[7] 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.

[8] M. A. Torres-Arredondo, C. P. Fritzen, Characterization and classification of modes in acoustic emission based on dispersion features and energy distribution analysis, *Shock and Vibration,* Vol. 19, No. 5, pp. 825-833, 2012.

[9] D. Baccar, D. Söffker, Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing,* Vol. 60–61, No. 0, pp. 198-207, 2015.

[10] A. Marec, J. H. Thomas, R. El Guerjouma, Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, *Mechanical Systems and Signal Processing,* Vol. 22, No. 6, pp. 1441-1464, 2008.

[11] E. Pomponi, A. Vinogradov, A. Danyuk, Wavelet based approach to signal activity detection and phase picking: Application to acoustic emission, *Signal Processing,* Vol. 115, pp. 110-119, 2015.

[12] G. Qi, Wavelet-based AE characterization of composite materials, *NDT&E International,* Vol. 33, pp. 133-144, 2000.

[13] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian, Acoustic emission based condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform, *Materials Science and Engineering A,* Vol. 412, No. 1-2, pp. 141–145, 2005.

[14] R. R. Coifman, M. V. Wickerhauser, Entropy-Based Algorithms for Best Basis Selection, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 38, pp. 713-718 1992.

[15] K.P. Soman, K.I. Ramachandran, Insight into Wavelets from Theory to Practice, India Prentice-Hall, 2004.

[16] ASME E976-99, Standard guild for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, 1999.

[17] X. H. Wang, C. M. Zhu, H. L. Mao, Z. F. Huang, Wavelet packet analysis for the propagation of acoustic emission signals across turbine runners, *NDT & E International,* Vol. 42, pp. 42-46, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9]