ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



بکار گیری 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 136-1678، amir.refahi@srttu.edu

چکیدہ	اطلاعات مقاله
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. میار مورد استفاده در این کار بر اساس پارامتر تضعیف	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 31 فروردین 1394 پذیرش: 25 اردیبهشت 1394 ارائه در سایت: 19 خرداد 1394
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	کلید واژگان: اکوستیک امیشن تضعیف
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 مناسب تر است. بطوری که مقدار خطای بدست آمده از محاسبه درصد جرمی با روش	موجک بسته ای درصد جرمی آزمایش غیر مخرب
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 کاراَمد 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	Abstract
Original Research Paper Received 20 April 2015 Accepted 15 May 2015 Available Online 09 June 2015	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
Keywords: Acoustic Emission Mass Fractions Wavelet Packet Non-Destructive Testing Attenuation	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.

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 مخرب³ [3-5] برای مطالعه کسر جرمی مواد کامپوزیتی بکار برده میشود. یکی از روشهای نوین در ارتباط با

1-مقدمه

روشهای سنتی بکار گرفته شده برای تخمین کسر جرمی در مواد کامپوزیتی، مثل آنالیز اسپکتروسکوپی¹ و میکروسکوپ الکترونی روبشی²، اغلب نیاز به آمادهسازی و برش سطح مقطع نمونه دارد [2،1]. بطوری که این

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)

³⁻ Non-Destructive Testing (NDT)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آزمایش های 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 ای¹ به عنوان یکی از روشهای برتر در پردازش سیگنال است. این روش مردازش 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 می گردد، فراهم می سازد [1-1].

درکار حاضر ویژگی انتشار امواج آکوستیکی برای شناسایی کسر جرمی گرافیت در ساختار کامپوزیتی ذرات گرافیت *ا*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 می توان به شناسایی مدهای مختلف شکست در کامپوزیتهای پلیمری حین بارگذاری و عملیات سوراخکاری این نوع مواد اشاره کرد [13.12]. در آنالیز موجک سیگنال اصلی به صورت اجزائی به نام کلیات² و جزئیات ⁸ شکسته موجک سیگنال اصلی به صورت اجزائی به نام کلیات² و جزئیات ⁸ شکسته موجک سیگنال اصلی به صورت اجزائی به نام کلیات دارای بخش فرکانس بابلا از سیگنال اصلی می باشد. کلیات و جزئیات دارای بخش فرکانس معروز و جزئیات دارای بخش فرکانس پایین و جزئیات دارای بخش فرکانس موجک سیگنال اصلی می باند. کلیات و جزییات دوباره به اجزای دیگری در می موج دوم شکسته شده و این فرایند تا رسیدن به نتیجه اپتیمم ادامه پیدا سطح دوم شکسته شده و این فرایند تا رسیدن به نتیجه اپتیمم ادامه پیدا سیکن [15.14]. در نتیجه سیگنال به یک ساختار درختی که شامل جزئیات اس می کند [20.14]. در تیجه میگنال به یک ساختار درختی که شامل جزئیات سیگنالی با انرژی محدود فرض شود آنگاه بر اساس تبدیل موجک معکوس در باطه (1) حاصل می شود:

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

که در این معادله a پارامتر فرکانس، b پارامتر زمان، \mathcal{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 می شود:

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

که $ar{\psi}$ 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: [n - f = f - J]

$$[\mathbf{v}, \mathbf{\bar{z}}]_{s}$$
 (۵)
برای قسمت جزییات محدوده فرکانسی به شکل رابطه (4) می باشد:
 $[\mathbf{u}, \mathbf{\bar{z}}]_{s}$ (4)
 $[\mathbf{u}, \mathbf{\bar{z}}]_{s}$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\overline{2}} f_s \mathbf{2}^{-j} & \mathbf{\overline{2}} f_s \mathbf{2}^{-j-1} \end{bmatrix}$$

$$(4)$$

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:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} f_j^i(t)$$
(5)
$$\sum_{i=1}^{n} f_j^i(t) = \int_{t-1}^{t-1} f_j^i(t)$$

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:

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

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

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{2^{j}} E_{j}^{i} \tag{7}$$

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) می توان آن را تعریف کرد:

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

که Pj نسبت توزیع انرژی در هر باند فرکانسی را نشان میدهد.

3- آزمایشهای تجربی

3-1- آماده سازی نمونههای کامپوزیتی

از کامپوزیت اپوکسی *ا گ*رافیت 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 است.

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.21.9

¹⁻ Wavelet Packet

²⁻ Approximations 3- Details

جدول 1 مواد کامپوزیتی و ترکیبات مختلف آنها		
درصد جرمی گرافیت	کد بندی مواد	
10	G1	
40	G2	
50	G3	
70	G4	

30

60

3-2- دستگاه آکوستیک امیشن

G5

G6

شناسایی امواج تنشی در سیستم آکوستیکی با استفاده از سنسورهای پیزو-الکتریکی انجام میشود. امواج تنشی در اثر برخورد به سنسور تبدیل به امواج الكتريكي شده و با استفاده از پيش تقويت كننده دامنه آنها تقويت شده و توسط یک سری فیلترهای میان گذر فیلتر میشوند. دستگاه آکوستیک امیشن مورد استفاده در این کار سیستم PAC¹PCI-2 است. چهار سنسور از نوع R15 با محدوده فرکانسی 50kHz تا 200kHz به همراه چهار پیش تقویت کننده برای اینکار استفاده شدهاند. سنسورها توسط گریس به عنوان ماده واسط بر روی نمونه های کامپوزیتی با فاصله 40mm از هم در راستای یک خط مستقیم چسبانده می شوند (شکل 1). نقطه نشان داده شده در شکل محل منبع سیگنال آکوستیکی است که با شکستن مداد در این نقطه 1سیگنال مورد نظر حاصل شده و اثر خود را بر روی سنسورها می گذارد. این روش به عنوان یک روش ساده و با قابلیت تکرار بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [16]. به منظور کاهش خطاهای اندازه گیری هر آزمایش سه بار تكرار مى شود. تنظيمات دستگاه آكوستيك بر اساس جدول 2 مى باشد.

3-3- نتايج و تحليل آزمايش هاى تجربى

خصوصات مربوط به تضعیف امواج آکوستیکی در مواد مختلف میتواند بر اساس معیار نرخ تضعیف نسبی انرژی² و نرخ تضعیف نسبی دامنه³ از روابط (9) و (10) بدست آيد:

$RARE_n = 20 \log(E_n/E_1)$	(9)
$RARA_n = 20 \log(A_n/A_1)$	(10)

که در روابط بالا n عدد مربوط به هر سنسور E_n (n=1,2,3,4) انرژی سنسور ام و A_n دامنه بیشینه سیگنال سنسور nام است. مقادیر میانگین بدست-nآمده از سه بار تکرار هر آزمایش به عنوان معیار اندازه گیری بکار برده می شود. 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 می گیرند. 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 ترتيب برابر با 0/15- ، 20/0- ، 20/0- و 0/37- مى باشد و در نمودار شكل 3 شيب تضعيف دامنه براي همين نمونه ها به ترتيب برابر با14/0-، 21/0-، 0/28- و 0/36- مى باشد. لذا مىتوان نتيجه گرفت كه در اثر انتشار امواج آکوستیکی به اندازه 40mm در داخل مواد با ترکیبات مختلف مقدار تضعیف انرژی در نمونههای ذکر شده در بالا 17/2dB ،12/4dB و 23/1dB و 23/1dB و مقدار تضعيف دامنه 11/2dB ،8/4dB، 5/6dB و 14/4dB مى باشد. بنابراين می توان گفت که افزایش مقدار کسر جرمی گرافیت در داخل کامپوزیت باعث

3- Relative Attenuation Rate of Amplitude





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

جدول 2 تنظیمات پارامترهای دستگاه آکوستیک امیشن	
مقدار	پارامتر
2 MHz	فركانس نمونه برداري
30 dB	حد آستانه
40	ضريب تقويت كنندكى
1024	طول سیگنال



شكل 2 رابطه بين نرخ تضعيف نسبى انرژى و فاصله انتشار امواج

309

¹⁻ Physical Acoustic Corporation

²⁻ Relative Attenuation Rate of Energy



شكل 3 رابطه بين نرخ تضعيف نسبى دامنه و فاصله انتشار امواج

همچنین از نمودارها چنین بر میآید که تضعیف در انرژی سریعتر از تضعیف در دامنه بوقوع می پیوندد. برای مثال، بطور همزمان در نمونه G1 تضعیف انرژی 0/19dB است ولی تضعیف دامنه 0/14 dB میباشد. نمونههای G2 تا G4 نيز از اين قانون مستثنا نيستند و رفتاري شبيه نمونه G1 دارند. شايد اين 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 می-کند 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 اندازه گیری درصد جرمی گرافیت در نمونه های کامپوزیتی بکار برده می شود. بر اساس روابط بین شیب های تضعیف انرژی و مقادیر کسر جرمی گرافیت در نمونههای G1 تا G4 معادله خطی (**11)** بدست میآید: (11)

y = -2.56x - 0.22

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- می باشد. 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 فركانسي كامل آن انجام گرفته است. بنابراين اگر بتوان محدوده فركانسي 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 متمركز شدهاند (شكل 4) لذا تمامى سيگنالهاى آكوستيكى را توسط موجک دبیچیز¹ 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 می تواند باشد. به این دلیل از موجک دبیچیز برای تحلیل

سیگنالها استفاده شده است که سیگنالهای آکوستیکی نسبت به سیگنال-های 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 بهره گیری از روابط (3) و (4) محدوده فرکانسی هر باند بدست مىآيد كه براى كار حاضر 5 باند فركانسى [62/5kHz -93/75kHz]، [kHz]، [62/5kHz kHz -187/5 kHz] ,[125 kHz -156/25 kHz] ,[93/75 kHz -125 156/25] 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 آكوستيكى عمدتاً در باند 4 ([156/25 kHz -187/5 kHz]) متمركز شدهاند. بنابراین باند 4 به عنوان باند فرکانسی ویژه (خاص) در نظر گرفته می شود که خصوصیات و اطلاعات سیگنالها را در این محدوده در بر گرفته و به عنوان شاخصی برای اندازه گیری کسر جرمی گرافیت در داخل کامپوزیت مورد استفاده قرار می گیرد.



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

¹⁻ Daubechies

(12)



شکل 5 انرژی نرمال شده باندهای فرکانسی نمونه G1 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 می شود. 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 ترتيب برابر با 0/16-، 0/23-، 0/31- و 0/39- م. المد. همچنین مقادیر تضعیف انرژی در باند 4 برای نمونه های G1 تا G4 به ترتیب برابر با 17/6 dB ،12/8dB ،8/4dB و 2/2dB است. از مقادیر بدست آمده و با رگرسیون گیری خطی بین این مقادیر ارتباط بین مقدار کسر جرمی گرافیت و ضریب تضعیف انرژی بصورت رابطه (12) بدست می آید:

y = -2.45x - 0.24که 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 می شود. 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 سن*.*



شكل 9 رابطه بين نرخ تضعيف نسبى انرژى و فاصله انتشار امواج

- [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.

4-نتيجه گيري

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 بسته ای دقیق تر 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 (1754%) کمتر است. لذا استفاده از روش آکوستیک امیشن بر پایه موجک بسته ای یک روش مناسب غیر مخرب برای شناسایی کسر جرمی مواد با خواص ترکیبی مختلف میباشد.

5- مراجع

- 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.