

مقایسه روش‌های تحلیل فرکانسی بارگذاری خمشی کامپوزیت یاف کربن / اپوکسی توسط روش گسیل آکوستیکی

امیر مصطفی پور^۲

نیما بهشتی‌زاده^۱

دانشکده مهندسی مکانیک،

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد

دانشگاه تبریز، ایران

تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۴)

چکیده

در این پژوهش از روش گسیل آکوستیکی برای مطالعه رفتار مواد مرکب پایه پلیمری یاف کربن در زمینه اپوکسی و بررسی حوزه فرکانسی بارگذاری خمشی استفاده گردید. بدین منظور ارتباط رفتار خمشی ماده مرکب با سیگنال‌های ساطع شده از نمونه تحت بارگذاری بررسی گردید. بکارگیری هر دو روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک در این پژوهش، نتیجه یکسان آن‌ها را با ۵ درصد اختلاف در پی داشت. با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس بیشینه در این بارگذاری در حدود ۱۳۵ KHz و با استفاده از تبدیل موجک، ۱۴۲ KHz تعیین گردید. محدوده زمانی رویدادهای رخ داده در نمونه تحت بارگذاری توسط نمودارهای برخط به دست آمده از سیستم آکوستیکی پایش گردید. با محاسبه مقادیر توزیع انرژی در مکانیزم‌های خرابی، ۱۷٪ انرژی مربوط به شکست ماتریس، ۲۹٪ انرژی مربوط به جدایش یاف از ماتریس و ۴۸٪ انرژی مربوط به شکست یاف تعیین شد. در نهایت مکانیزم‌های شکست ماده مرکب با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. مقادیر انرژی به دست آمده و محدوده‌های زمانی و روند صعودی نمودارها، صحت سنجی خوبی با نمودار خمشی بر جای گذاشت.

واژه‌های کلیدی: مواد مرکب، یاف کربن / اپوکسی، گسیل آکوستیکی، مانیتورینگ بارگذاری، تست غیر مخرب

Comparison of Flexural Loading Frequency Analysis Methods of Carbon Fiber / Epoxy Composite by Acoustic

N. Beheshtizadeh

A. Mostafapour

Young Researchers and Elite club, Tabriz

Mechanical Engineering Department,

Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

University of Tabriz, Tabriz, Iran.

(Received: 6/April/2016; Accepted: 14/December/2016)

Abstract

Carbon / epoxy composite is one of the most useful polymer matrix composites that has special properties such as high strength-to-weight ratio, high hardness, high corrosion resistance, resistance to nuclear radiation and etc. has high consumption in different industries such as aerospace industry. Therefore loading monitoring of this type of composite is important. In order to determine various failure mechanisms, acoustic emission method has more performance than other non-destructive methods. In this research acoustic emission method was used to study carbon/epoxy composite and evaluate frequency range of flexural loading. For this purpose bending behavior of composite and relation between acoustic signals had studied. Using both fast Fourier transform and wavelet transform analysis methods in this research, led to the same result with margin of 5%. By using FFT analysis, maximum frequency of 135 KHz was determined while using wavelet transform, this amount led to 142 KHz. Time limits that events was occurred on the specimen, monitored by online diagrams that obtained from acoustical system. Energy distribution at failure mechanisms was obtained as 17%, 29% and 48% related to matrix fracture, debonding and fiber breakage respectively. Finally failure mechanisms of composite were confirmed by SEM images. Energy distribution amounts, time limits and ascending progress of diagrams validate bending diagram.

Keywords: Composite, Carbon fiber/epoxy, Acoustic emission, Load monitoring, Non-destructive test.

۱- کارشناس ارشد: N.Beheshtizadeh92@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

مواد مرکب موادی چندجزئی هستند که خواص آن‌ها در مجموع از هرکدام از اجزاء بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. ماده مرکب الیاف کربن/اپوکسی یکی از پرکاربردترین مواد مرکب زمینه پلیمری می‌باشد که به دلیل خواص ویژه‌ای از قبیل استحکام بالا نسبت به وزن، سفتی ویژه بالا و مقاومت خوردگی بالا مصرف بالایی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا دارد.

علی‌رغم مزیت‌های مذکور، در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. خرابی‌های رایج در مواد مرکب چند لایه عبارت‌اند از شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای [۱]. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین نوع خرابی در مواد مرکب چند لایه است که منجر به کاهش استحکام و مدول خمشی ماده مرکب می‌گردد [۲]. این امر به دلیل چقرمگی شکست بین لایه‌ای پایین در این گونه مواد است. چون این نوع خرابی در بین لایه‌ها اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیرقابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. برای تشخیص مودهای مختلف خرابی در مواد مرکب، تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی ارائه شده است. اغلب روش‌های تشخیص خرابی‌ها، جزء روش‌های غیرفعال می‌باشند، در حالی که اگر برای تشخیص مودهای مختلف خرابی، از روش‌های فعالی همچون گسیل آکوستیکی^۱ استفاده شود، پایش بلادرنگ سیستم امکان‌پذیر بوده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد [۳]. به منظور شناسایی مکانیزم‌های خرابی مواد مرکب، روش گسیل آکوستیکی کارایی بهتری در مقایسه با آزمون‌های غیر مخرب دیگر دارد. از مزایای استفاده از روش گسیل آکوستیکی در بررسی خرابی مواد مرکب، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ و تفکیک ساز و کارهای مختلف خرابی در این سازه‌ها اشاره نمود [۴].

ویلیامز و لی [۵] روش گسیل آکوستیکی را برای مانیتورینگ شکست مواد مرکب معرفی کردند. گروت و همکاران [۶] و یو و همکاران [۷] روش تشخیص خرابی مواد مرکب را با استفاده از فرکانس آکوستیکی آنالین پیشنهاد کردند. وو و چوی [۸] پروسه خرابی را در مواد مرکب لایه‌ای

ناچ‌دار توسط رخدادهای آکوستیکی دامنه بالا مطالعه کردند. گیوردانو و همکاران [۹] تحلیلی از کمیت خرابی‌ها در مواد مرکب پایه پلیمری با استفاده از گسیل آکوستیکی ارائه دادند. لوتوس و کوستوپولوس [۱۰]، ساسیکومار و همکاران [۱۱] و اولیورا و مارکوس [۱۲] در تحقیقاتی، پایش وضعیت مواد مرکب را با استفاده از گسیل آکوستیکی و شبکه‌های عصبی بررسی نمودند. سیجانی [۱۳] ارتباط بین ویژگی‌های آکوستیکی مانند شمارش سیگنال‌ها، دامنه و انرژی را با خواص فیزیکی مواد مرکب مورد بررسی؛ مانند جهت قرار گرفتن الیاف هماهنگ دانست. پاکت [۱۴] از پارامترهای نرخ تولید و دامنه سیگنال‌های آکوستیکی برای مکان‌یابی و تشخیص آسیب‌های به وجود آمده از صفحه کربن/اپوکسی تحت بارگذاری نوسانی فشاری استفاده نمود. بورچاک و همکاران [۱۵] از گسیل آکوستیکی برای تشخیص مراحل مختلف رشد آسیب در نمونه‌های کربن/اپوکسی تحت بارگذاری نوسانی کششی استفاده کردند. آن‌ها با بررسی منحنی‌های نرخ تولید و انرژی سیگنال‌های آکوستیکی چهار مرحله مختلف رشد آسیب در قطعات را تشخیص دادند و این چهار مرحله را به صورت ایجاد ترک اولیه در نمونه، رشد آهسته خرابی در نمونه، رشد سریع خرابی و رشد پایدار آسیب گزارش نمودند.

علاوه بر موارد ذکر شده، محققان در رابطه با بارگذاری‌های مختلف روی مواد مرکبی رفتارسنجی آن‌ها تحقیقات بسیاری انجام داده‌اند، لکن استفاده از روش گسیل آکوستیکی که روش جدیدی در مانیتورینگ بارگذاری‌ها به شمار می‌رود، معدود به چندین مطالعه در ارتباط با بارگذاری کششی روی مواد مرکب الیاف شیشه است. همچنین در این تحقیقات، از یک روش تحلیل سیگنال استفاده گردیده است و هیچ مقایسه و اعتبارسنجی بین روش‌های مختلف تحلیل سیگنال انجام نشده است، علاوه بر این، هیچ پژوهشی در زمینه بارگذاری خمشی مواد مرکب الیاف کربن در زمینه اپوکسی صورت نگرفته است.

هدف از این پژوهش، مطالعه رفتار مواد مرکب پایه پلیمری الیاف کربن در زمینه اپوکسی و بررسی حوزه فرکانسی بارگذاری خمشی توسط روش گسیل آکوستیکی می‌باشد. در واقع این پژوهش به بررسی رفتار خمشی و ارتباط آن با سیگنال‌های ساطع‌شده از نمونه تحت بارگذاری با دو روش تحلیل سیگنال متفاوت می‌پردازد و هدف آن، بررسی کارکرد

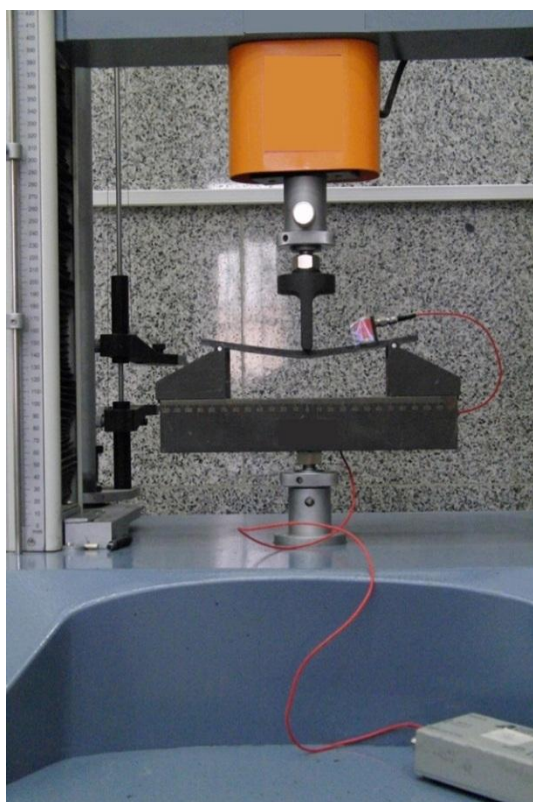
به روش ساخت، نمونه‌ها از بین چند مجموعه لایه ساخته شده در دفعات مختلف انتخاب شد تا اثر خطای انسانی کنترل گردد.



شکل (۱): نمونه مواد مرکب الیاف کربن/ اپوکسی

۲-۲- روش انجام آزمایش

پس از ساخت نمونه‌ها، مطابق شکل ۲، یک عدد سنسور آکوستیکی ما بین دو فک پایینی و به فاصله ۵۰ mm از وسط تیر بر روی سطح نمونه قرار داده شد. سپس نمونه بر روی دو فک پایینی دستگاه تست خمشی قرار گرفت.



شکل (۲): نمونه تحت بارگذاری.

بارگذاری به صورت متمرکز در وسط تیر بوده و تکیه‌گاه‌های انتهایی تیر به صورت غلتکی سر آزاد می‌باشند. سیگنال‌های گسیل آکوستیکی، در حین بارگذاری ذخیره شد.

روش‌های تحلیل سیگنال و انتخاب بهترین روش برای به‌دست آوردن بیشینه فرکانس بحرانی در بارگذاری خمشی سه نقطه است.

به دلیل اهمیت استفاده از ماده مرکب کربن/ اپوکسی در صنایع پیشرفته و تحمل بار خمشی بیشتر از سایر بارگذاری‌ها در کاربردهای مختلف، پایش وضعیت خرابی این سازه بسیار لازم و حیاتی است. بدین منظور نمونه‌های ماده مرکب مذکور در ابعاد استاندارد تست خمشی^۱ تحت بارگذاری قرار گرفته و سیگنال‌های آکوستیکی ساطع شده توسط روش‌های تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از مشاهدات تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم‌های خرابی تایید شد.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق در چهار بخش مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها، روش انجام آزمایش، تجهیزات آزمایش و روش‌های تحلیل سیگنال آکوستیکی آورده شده است.

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد استفاده شده برای ساخت ماده مرکب، شامل الیاف کربن ۲۰۰ گرم بر متر مربع نوع تی ۳۰۰ و ماتریس اپوکسی آر ۵۱۰ به همراه سخت کننده ۲۰ درصد اچ ۵۲۰ می‌باشد. با استفاده از روش لایه چینی دستی^۵ نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط قالب‌گیری شد. نمونه‌ها شامل ۱۰ لایه الیاف [0,90]₅ با ضخامت ۴/۱ mm و با درصد حجمی الیاف ۴۱٪ می‌باشد. به منظور جداسازی راحت نمونه‌ها پس از لایه چینی از سطح قالب، از یک پوشش ژله‌ای در سطح قالب استفاده شد. در انتها، نمونه‌ها علامت گذاری شده و برای انجام آزمایش خمشی، مطابق شکل ۱، با استفاده از اره مخصوص به ابعاد $60 \times 185 \text{ mm}^2$ مطابق استاندارد بریده شد. مطابق استاندارد تست خمشی مواد مرکب^۶، به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش، ۳ نمونه ساخته و آزمایش گردید. با توجه

- 1- ASTM-D790
- 2- T-300
- 3- R510
- 4- H520
- 5- Hand Lay up
- 6- ASTM-D790

۲-۳- تجهیزات آزمایش

هدف از پردازش سیگنال، استخراج ویژگی‌هایی از سیگنال است که شرایط و ویژگی‌های سیگنال را پایش نماید. بسته به نوع سیگنال، روش‌های متعددی پیشنهاد می‌گردد.

آنالیزهای آماری حوزه زمان و آنالیزهای طیفی حوزه فرکانس، مناسب برای سیگنال‌های پایدار می‌باشد. اما برای سیگنال‌های گسیل آکوستیکی گذرا، دو آنالیز اشاره شده کافی نیست و همچنین این دو روش مشکلاتی در استخراج داده‌ها دارند. به عنوان مثال انتقال داده‌ها از یک حوزه به حوزه دیگر، می‌تواند باعث از دست رفتن بخشی از داده‌ها شود. اگرچه تبدیل فوریه زمان کوتاه^۶ برای حل این مشکل ارائه شده است، اما موفقیت اندکی از آن به دست آمد. در حالی که این مشکل با گسترش روش‌های زمان - فرکانس به‌طور کلی مرتفع شد. تحلیل موجک^۷ بهترین گزینه برای اتصال دو حوزه زمان و فرکانس می‌باشد. آنالیز موجک ابزار مناسبی برای آنالیز موضعی تغییرات توان طیفی سیگنال با زمان است. با تبدیل حوزه زمان به زمان - فرکانس اولاً می‌توان تغییرات مودهای غالب را تعیین نمود و ثانیاً نشان داد این مودها چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند [۱۸].

جنبه‌های جدیدی از پردازش تصویر و سیگنال، در طول چند سال گذشته توسط تبدیل موجک^۸ معرفی شده است. بعضی از تحقیقات در طول دهه گذشته، تبدیل موجک را روش مناسبی جهت آنالیز سیگنال گسیل آکوستیکی نشان داده‌اند [۱۹]. آنالیز موجک به عنوان تجزیه یک سیگنال به بخش‌هایی بر حسب یک سیگنال مادر تعریف می‌شود.

تبدیل موجک $F(t)$ (هر تابع قابل انتگرال گیری) نسبت به موجک ψ توسط معادله (۱) بیان می‌شود [۲۰]:

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

که f نشان دهنده فرکانس، τ شیفت زمانی و ψ^* مزدوج مختلط موجک می‌باشد [۶]. تبدیل موجک بسته‌ای به صورت تابع $\psi_{j,k}^1$ نشان داده می‌شود که i پارامتر مدولاسیون^۹،

برای بارگذاری نمونه‌ها از یک دستگاه آزمایش کشش اونیورسال کالیبره شده با ظرفیت ۲ تن که میزان سرعت بارگذاری آن از ۰/۵ تا ۵۰۰ mm/min قابل تنظیم بود استفاده شد. قطعات مواد مرکب الیاف کربن/ اپوکسی با سرعت ۳ mm/min تحت بارگذاری قرار گرفت. برای ثبت داده‌های آکوستیکی از نرم افزار ای ای وین^۱ و سیستم پی سی آی -۲^۲، با نرخ داده برداری 2Ms/s استفاده شد. از یک سنسور پیزو الکتریک تک کریستال مدل آر ۱۵ ای^۳ استفاده شد. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت کننده با ضریب ۴۰ dB تقویت شد. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور از گریس سیلیکون خلا استفاده شد. برای حذف نویز زمینه، در حین نمونه برداری حد آستانه ۳۵ dB در نظر گرفته شد.

۲-۴- روش‌های تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی

گسیل آکوستیکی پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراصوتی ۱ KHz تا ۲۰ MHz رخ می‌دهد. امواج گسیل آکوستیکی، امواج تنشی یا الاستیکی هستند که در نتیجه آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی در اثر خرابی اتفاق افتاده در سازه‌ها، بوجود می‌آیند. این خرابی‌ها حاصل تنش‌های داخلی یا خارجی اعمال شده در سازه‌ها هستند. با نصب سنسور آکوستیکی روی نمونه و اعمال بارگذاری خمشی، تنش وارده به نمونه باعث ایجاد کرنش و خرابی شده و امواج حاصل، توسط سنسور آکوستیکی ضبط می‌گردد. اندازه‌گیری و شناسایی امواج الاستیک می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد منابع ساطع کننده امواج حاصل از خرابی‌ها در اختیار کاربر قرار دهد [۱۶]. از آنجایی که امواج آکوستیکی منتشر شده، خاصیت غیر پایداری^۴ و هم‌پوشانی گذرا^۵ دارند [۱۷]، برای تحلیل سیگنال گسیل آکوستیکی نیاز به بهره‌گیری از روش‌های مناسب پردازش سیگنال می‌باشد.

6- Short-Time Fourier Transform
7- Wavelet Analysis
8- Wavelet Transform
9- Modulation Parameter

1- AE-Win
2- PCI-2
3- R15a
4- Non-Stationary
5- Overlapping Transient

$$E_{Total}(t) = \sum_j E_j^i(t) \quad (۹)$$

به منظور پیدا کردن توزیع انرژی در هر کدام از اجزاء، نسبت انرژی های سطوح مختلف به انرژی کل در نظر گرفته شده و با رابطه (۱۰) تعریف می شود [۲۱]:

$$P_j^i(t) = \frac{E_j^i(t)}{E_{Total}(t)}, \quad i = 1, \dots, 2^j \quad (۱۰)$$

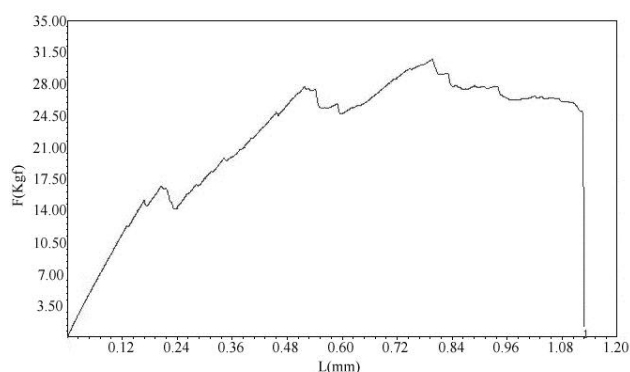
که در آن، $P_j^i(t)$ نسبت توزیع انرژی در هر سطح را نشان می دهد.

۳- بحث و نتایج

نتایج حاصل از بارگذاری خمشی سه نقطه در جدول ۱ آمده است. همچنین شکل ۳، نمودار خمشی حاصل از بارگذاری را نشان می دهد. سه قله عمده بارگذاری که در نمودار خمشی نیز آمده است، مکانیزم های شکست مواد مرکب پایه پلیمری را نشان می دهد که این نوع از ماده مرکب، شامل شکست ماتریس، جدایش بین الیاف و ماتریس و شکست الیاف می باشد.

جدول (۱): نتایج بارگذاری خمشی.

مدول	بیشترین فشار قابل تحمل (MPa)	بیشترین بار قابل تحمل (Kgf)
الاستیک (GPa)	۴/۵۵۳	۳۰/۶۹۱
۱۲/۰۹۷		



شکل (۳): نمودار خمشی حاصل از بارگذاری خمشی.

از آنجایی که شکست ماتریس اولین اتفاق در بارگذاری مواد مرکب است، اولین پیک با ضعیف ترین نیروی وارده مربوط به همین رویداد بوده، دومین پیک مربوط به جدایش

z پارامتر مقیاس^۱ و k پارامتر انتقال^۲ می باشد [۲۰]:

$$\psi_{j,k}^i = 2^{-\frac{j}{2}} \psi^i(2^{-j}t - k) \quad (۲)$$

در معادله (۲) $i=1,2,\dots,j^n$ بوده و n بیانگر سطح تجزیه موجک در ساختار درختی است. در این حالت، ψ^i از طریق معادلات (۳) و (۴) به دست می آید [۲۰]:

$$\psi^{2^i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right) \quad (۳)$$

$$\psi^{2^{i+1}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right) \quad (۴)$$

در معادلات (۳) و (۴)، ψ^i موجک مادر نامیده شده و $g(k)$ و $h(k)$ فیلترهای گسسته هستند که به پارامتر مقیاس و تابع موجک بستگی دارند [۲۱]. اجزاء موجک بسته ای سیگنال در یک سطح خاص، از معادله (۵) به دست می آید [۲۰]:

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \Delta t \quad (۵)$$

ضرایب موجک بسته ای $C_{j,k}^i$ مربوط به سیگنال $f(t)$ ، از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۲۰]:

$$C_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (۶)$$

مطابق معادله (۷)، بعد از تجزیه سیگنال تا سطح j-ام، سیگنال اصلی به عنوان جمع تمامی اجزاء موجک بسته ای در سطح j-ام نشان داده می شود [۲۰]:

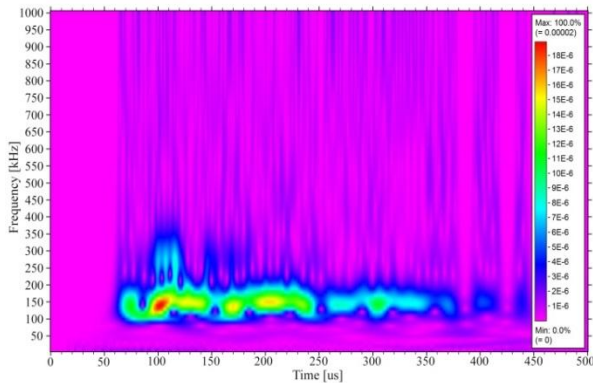
$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (۷)$$

اگر $f(t)$ یک سیگنال گسیل آکوستیکی باشد، آن گاه می توان سیگنال را به اجزاء موجک مورد نظر در سطح j به صورت $f_j^1, \dots, f_j^{2^j}$ تجزیه نمود. بر طبق سطح سیگنال تجزیه شده، مقادیر $E_j^1, \dots, E_j^{2^j}$ ، به عنوان انرژی اجزاء در سطح j-ام تعریف شده و با معادله (۸) قابل بیان است [۲۱]:

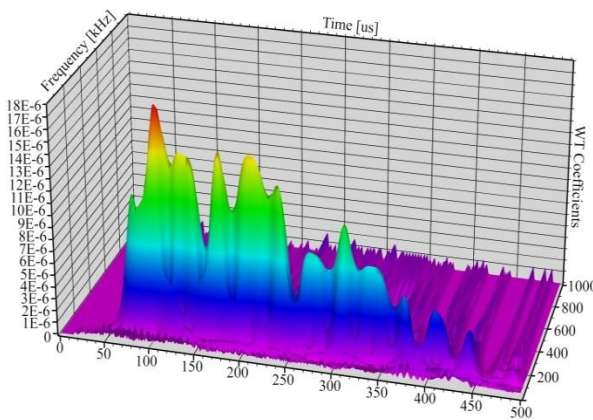
$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^i(\tau))^2 \quad (۸)$$

انرژی کل سیگنال با رابطه (۹) قابل محاسبه است [۲۱]:

با توجه در اشکال ۳ و ۵ نتیجه می‌شود که شکست ماتریس سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی پایین و شکست الیاف سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی بالا ایجاد می‌کند. همچنین در لحظه شروع رشد جدایش الیاف از ماتریس، به علت فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه، تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیکی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد.



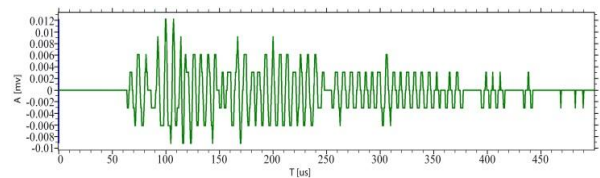
شکل (۶): نمودار توزیع تبدیل موجک بر اساس زمان و فرکانس.



شکل (۷): نمودار سه بعدی ارتباط ضرایب تبدیل موجک با زمان و فرکانس.

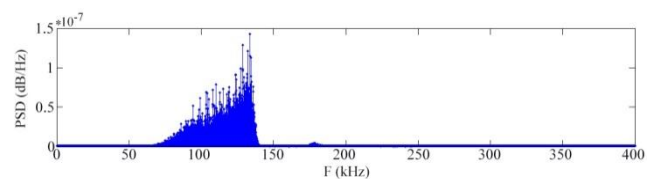
با دقت در نمودارهای حاصل از سیگنال برداری آکوستیکی حین بارگذاری خمشی - اشکال ۸، ۹ و ۱۰ - نتیجه می‌شود که تا ۱۱۰ ثانیه اول بارگذاری که دامنه در حد چند dB است، اتفاق خاصی در نمونه نیافتاده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که از ثانیه ۱۱۰ تا ۱۷۰ که نرخ رشد دامنه متوسط است، شکست ماتریس اتفاق افتاده و از ثانیه ۱۷۰ تا ۲۲۰، جدایش الیاف از ماتریس به وقوع می‌پیوندد که در نهایت با افزایش دامنه در

الیاف از ماتریس و سومین پیک نیز مربوط به شکست الیاف است. با توجه به نمودار خمشی به وضوح دریافت می‌شود که پس از شکست الیاف، توانایی تحمل بار مواد مرکب کاهش یافته و پس از گسیخته شدن همه الیاف تنیده شده به هم، به یکباره تحمل بار به صفر می‌رسد. این سه اتفاق عمده در حوزه فرکانسی معینی رخ می‌دهند. برای تعیین این حوزه فرکانسی، از سیگنال حاصل از تست گسیل آکوستیکی (شکل ۴)، تبدیل فوریه زمان کوتاه گرفته شد. شکل ۵ تبدیل فوریه زمان کوتاه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): سیگنال آکوستیکی دریافتی از دستگاه گسیل آکوستیکی.

همانطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، بیشترین مقدار فرکانس در محدوده ۱۳۵ KHz رخ می‌دهد. این در حالی است که تحلیل سیگنال با استفاده از تبدیل موجک، محدوده فرکانسی ۱۴۲ KHz را به عنوان حوزه فرکانسی بیشینه معرفی می‌کند. این مطلب در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین ارتباط بین سیگنال آکوستیکی (شکل ۴) که اولین دامنه ماکزیمم آن در ۱۰۰ میکروثانیه به وقوع پیوسته است، با فرکانس و ضرایب تبدیل موجک در شکل ۷ آورده شده است. نقطه ماکزیمم قرمز، بیانگر زمان ۱۰۰ میکروثانیه و فرکانسی حدود ۱۴۲ KHz است. همانطوری که قبلاً نیز اشاره شد، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد سه نوع خرابی غالب در مواد مرکب پایه پلیمری عبارت اند از: شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف [۳ و ۲۱].



شکل (۵): نمودار تبدیل فوریه زمان کوتاه.

الیاف از ماتریس و در نهایت شکست الیاف به وقوع می پیوندد و مکانیزم خرابی دیگری در بارگذاری خمشی این مواد مرکب اتفاق نیافتاده است. تفاوت تحلیل موجک با تحلیل فوریه زمان کوتاه، تنها ۵ درصد است. این مطلب نشان می دهد استفاده از روش های مختلف تحلیل سیگنال آکوستیکی، در تعیین ماکزیمم فرکانس بحرانی جواب یکسانی را در محدوده فرکانسی به دنبال دارد، لکن دقت روش تحلیل موجک اندکی بالاتر از تبدیل فوریه زمان کوتاه است.

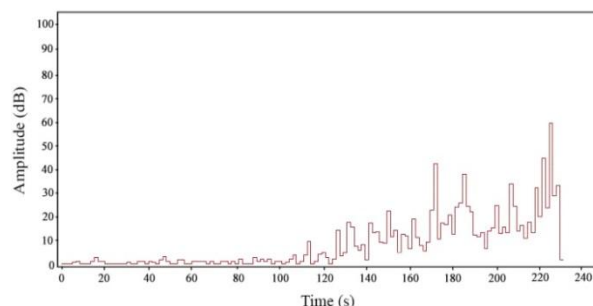
انرژی آزاد شده در لحظه وقوع هر خرابی توسط روابط ۸ تا ۱۰ قابل محاسبه است. با استفاده از این معادلات، انرژی آزاد شده در بازه های زمانی ۱۱۰ تا ۱۷۰ ثانیه، ۱۷۰ تا ۲۲۰ ثانیه و از ثانیه ۲۲۰ تا لحظه عدم تحمل بار محاسبه گردید. به منظور سهولت مقایسه مقادیر انرژی در سه بازه مذکور، با استفاده از رابطه ۱۰، توزیع انرژی در هر بازه تعیین گردید. حدود ۱۷٪ انرژی مربوط به بازه زمانی ۱۱۰ تا ۱۷۰ ثانیه، ۲۹٪ انرژی مربوط به ثانیه ۱۷۰ تا ۲۲۰ ام و ۴۸٪ از انرژی آزاد شده مربوط به ثانیه ۲۲۰ ام به بعد تعیین گردید. بر این اساس، حدود ۶٪ انرژی از آغاز بارگذاری تا ثانیه ۱۱۰ ام آزاد گردیده است.

ارتباط توزیع انرژی با مکانیزم های خرابی ذکر شده قابل قبول است. همان طوری که انتظار می رود، شکست ماتریس در فرکانس پایین، با دامنه کم و انرژی ۱۷٪ انجام می گیرد. در حالی که جدایش الیاف از ماتریس با ۲۹٪ انرژی و شکست الیاف با ۴۸٪ انرژی آزاد شده اتفاق می افتد.

این نتیجه گیری، با دیگر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه همخوانی خوبی دارد. وجود تفاوت های جزئی در دسته بندی مکانیزم های مختلف خرابی، ناشی از تفاوت در روش ساخت مواد مرکب، شرایط اعمال بار، شرایط محیطی آزمایش و دیگر عوامل می باشد که کاملاً طبیعی و معقول است.

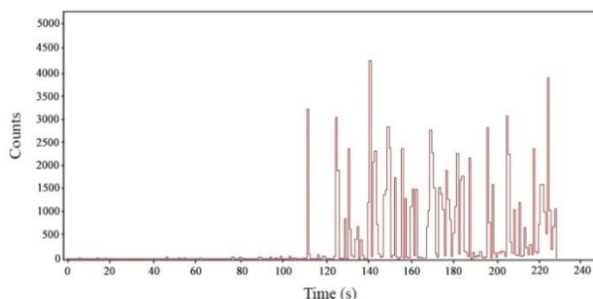
به منظور مشاهده مکانیزم های خرابی ماده مرکب مورد مطالعه، از سطوح شکست نمونه، تصاویر میکروسکوپی توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردید. شکل های ۱۱ و ۱۲ این تصاویر را نشان می دهد.

ثانیه ۲۲۵ و شکست الیاف، بارگذاری به اتمام می رسد. این مطلب در شکل های ۹ و ۱۰ نیز قابل مشاهده است.

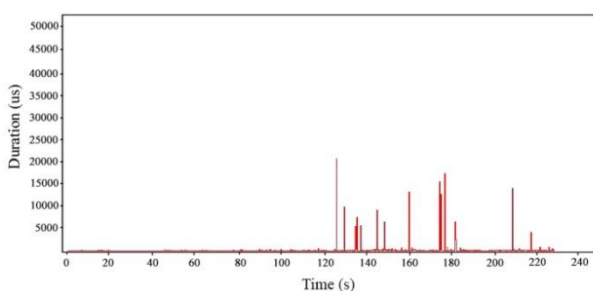


شکل (۸): نمودار دامنه - زمان.

در نمودارهای دامنه، شمارش و زمان استمرار بر حسب زمان، افزایش سازوکارهای صورت گرفته در نمونه تحت بارگذاری و سیر صعودی نمودارها به وضوح قابل مشاهده است. اگر بخواهیم این سیر صعودی نمودارهای برخط را با نمودار خمشی مقایسه کنیم،



شکل (۹): نمودار شمارش - زمان.



شکل (۱۰): نمودار زمان استمرار - زمان.

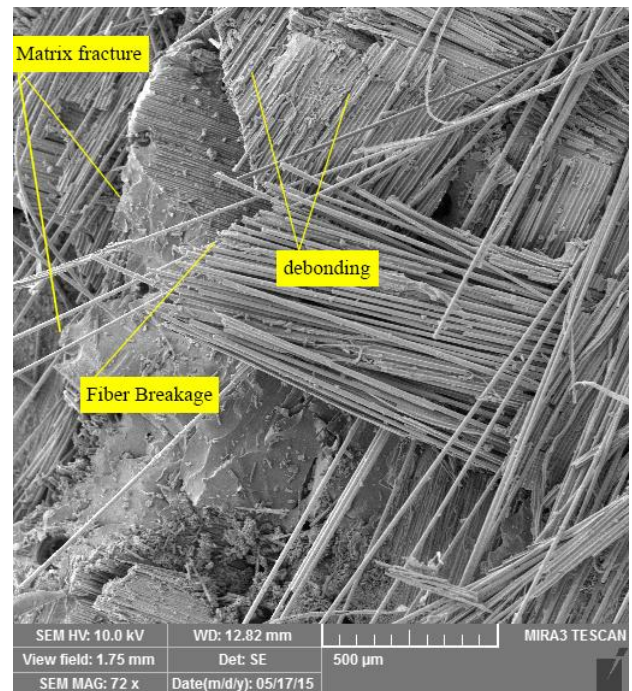
نتیجه می گیریم که فرض اولیه درست بوده و با افزایش شدت بارگذاری، شدت خرابی های صورت گرفته در نمونه نیز افزایش می یابد. یعنی ابتدا شکست ماتریس، سپس جدایش

۴- نتیجه گیری

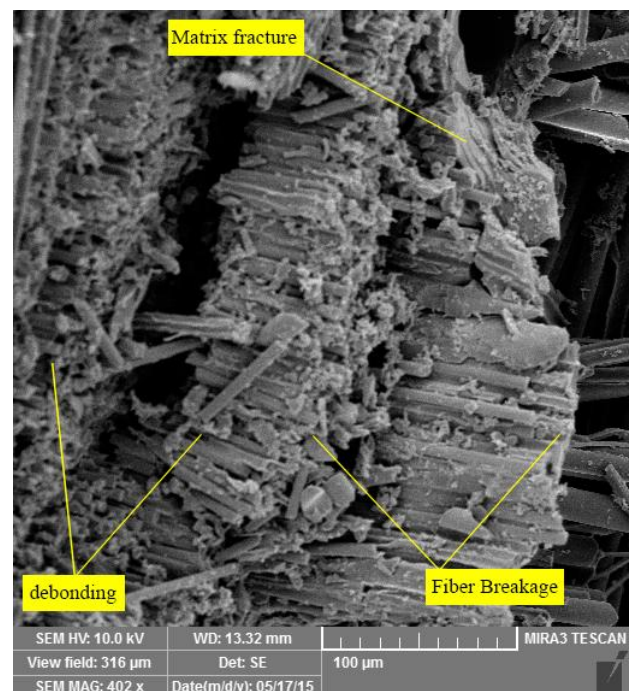
در این پژوهش از روش گسیل آکوستیکی برای بررسی حوزه فرکانسی بیشینه در بارگذاری خمشی مواد مرکب الیاف کربن در زمینه اپوکسی استفاده شد. سه رخداد عمده خرابی در این گونه از مواد مرکب از روی نمودار خمشی تخمین زده شد. با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس بیشینه در این بارگذاری در حدود ۱۳۵ KHz تعیین شد که روش تبدیل موجک نیز همین محدوده را با اختلاف ۵ درصدی- ۱۴۲ KHz- تایید کرد. محدوده زمانی رویدادهای رخ داده در نمونه تحت بارگذاری توسط نمودارهای برخط به دست آمده از سیستم آکوستیکی پایش گردید. با محاسبه مقادیر توزیع انرژی در مکانیزمهای خرابی، ۱۷٪ انرژی مربوط به شکست ماتریس، ۲۹٪ انرژی مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و ۴۸٪ انرژی مربوط به شکست الیاف تعیین شد. در نهایت مکانیزمهای شکست ماده مرکب در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. مقادیر انرژی به دست آمده و محدودههای زمانی و روند صعودی نمودارها، صحت سنجی خوبی با نمودار خمشی بر جای گذاشت.

۵- مراجع

1. Fotouhi, M., Pashmforoush, F., Shokri, V. and Ahmadi, M. "Investigation of Damage Mechanisms During Delamination in Composites by Use of Wavelet Transform", 3rd International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
2. Hajikhani, M., Soltannia, B., Oskouei, A.R. and Ahmadi, M. "Monitoring of Delamination in Composites by Use of Acoustic Emission", 3rd Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference, Tehran, Iran, 2009. (In Persian)
3. Saeedifar, M. Fotouhi, M. Mohammadi, R. Ahmadi Najafabadi, M. and Hosseini Toudeshky, H. "Investigation of Delamination and Interlaminar Fracture Toughness Assessment of Glass/Epoxy Composite by Acoustic Emission", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014 (In Persian)
4. Beheshtizadeh, N. Mostafapour, A. and Biglari, H. "Damage evaluation of composite beam in three point bending test by acoustic emission: frequency domain", Science and Technology of Aerospace, Vol. 5, No. 1, pp. 75-86, 2016 (In Persian)
5. Williams, Jr JH. and Lee, SS. "Acoustic emission monitoring of fiber composite materials and structures", J Compos Mater, Vol. 12, No. 4, pp. 348-370, 1978.



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع طولی شکست.



شکل (۱۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی شکست.

در این شکلها شکست ماتریس، جدا شدن الیاف از ماتریس و شکست الیاف به خوبی قابل مشاهده است.

14. Paget, C. A. "Delamination Location and Size by Modified Acoustic Emission on Cross-ply CFRP Laminates during Compression-Compression Fatigue Loading", ICCM17proceedings, UK, 2009.
15. Bouchak, M. Farrow, I. R. Bond, I. P. Rowland, C. W. "Acoustic Emission study of damage accumulation in CFRP composites under block loading", 11th European Conference on Composite Materials, Greece, 2004.
16. Guo, Y. B. Ammula, S. C. "Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining", International journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 1622-1627, 2005.
17. Zarif Karimi, N. Heidary, H. Ahmadi, M. Rahimi, A. and Farajpur, M. "Monitoring of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission", Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 15, pp. 169-183, 2014
18. Marec, A. Thomas, J.H. and Guerjouna, R.EI. "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, pp. 1441-1464, 2008.
19. Ni, Q. Q. and Iwamoto, M. "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites", Engineering Fracture Mechanic, Vol. 69, No. 1, pp. 717-728, 2002.
20. Soman, K. P. and Ramachandran, K. I. "Insight into Wavelets from Theory to Practice", 2Nd Ed, Prentice-Hall of India Pvt. Limited, 2005.
21. Oskouei, A. R. and Ahmadi, M. "Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in Glass/Polyester Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, 2010.
6. de Groot, P.J., Wijnen, PAM. and Janssen, RBF. "Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites", Compos Sci Technol, Vol. 55, No. 4, pp. 405-412, 1995.
7. Yu, YH., Choi, JH., Kweon, JH. and Kim, DH. "A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission", Compos Struct, Vol. 75, No. 1, pp. 163-169, 2006.
8. Woo, SC. and Choi, NS. "Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events" Compos Sci Technol, Vol. 67, No. 7, pp. 1451-1458, 2007.
9. Giordano, M., Calabro, A., Esposito, C., Amorec, A. and Nicolais, L. "An acoustic emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials", Compos Sci Technol, Vol. 58, No. 12, pp. 1923-1928, 1998.
10. Loutas, T.H. and Kostopoulos. V. "Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution", Compos Sci Technol, Vol. 69, No. 2, pp. 265-272, 2009.
11. Sasikumar, T., Rajendraboopathy, S., Usha, K. M. and Vasudev, ES. "Failure strength prediction of unidirectional tensile coupons using acoustic emission peak amplitude and energy parameter with artificial neural networks", Compos Sci Technol, Vol. 69, No. 7-8, pp. 1151-1155, 2009.
12. de Oliveira, R. and Marques, AT. "Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks", Comput Struct, Vol. 86, No. 3, pp. 367-373, 2008.
13. Czigany, T. "Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites, Mechanical properties and acoustic emission study", Compos Sci Technol, Vol. 66, No. 16, pp. 3210-3220, 2006.

