# ارزیابی حوزهٔ فرکانس خرابی تیر کامپوزیتی در تست خمش سه‌نقطه توسط روش اکوستیک امیشن

**نیما بهشتی‌زاده[۱]، امیر مصطفی‌پور[۲]، حسن بیگلری[۳]**

۱ کارشناس‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲ دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳ استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، hbiglari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۲

## چکیده

کامپوزیت الیاف شیشه / اپوکسی از جمله پرکاربردترین کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری است که به‌دلیل خواصی چون استحکام بالا نسبت به وزن، سفتی ویژهٔ و مقاومت خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم، مقاومت در برابر اشعه‌های اتمی و جذب‌کنندگی انرژی در صنایع مصرف بالایی دارد. سازوکار عدم تحمل بار، شروع ترک و خرابی به‌صورت‌های متنوعی ممکن است رخ دهد که هر یک فرکانس خاصی دارند. در این مقاله از روش اکوستیک امیشن برای بررسی سازوکارهای گوناگون خرابی در بارگذاری خمش سه‌نقطهٔ تیر کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی و تعیین حوزه‌های فرکانسی مرتبط استفاده می‌شود؛ همچنین از تبدیل موجک برای پردازش سیگنال‌های اکوستیکی استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از یک حسگر اکوستیکی سه نوع سازوکار خرابی غالب در این تیر کامپوزیتی شناسایی و محدودهٔ فرکانسی که خرابی‌ها در آن رخ می‌دهند تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد این سه سازوکار غالب؛ یعنی شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف، در بارگذاری خمشی به‌ترتیب دارای محدودهٔ فرکانسی صفر تا ۱۲۵، ۱۲۵ تا ۲۵۰ و ۳۷۵ تا ۵۰۰ کیلوهرتز هستند. نتایج این پژوهش عملکرد قابل قبول استفاده از روش اکوستیک امیشن در تعیین حوزهٔ فرکانسی بارگذاری خمش سه‌نقطهٔ تیر کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی را نشان می‌دهد.

## واژگان کلیدی

بارگذاری خمشی، تیر کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی، حوزهٔ فرکانسی، اکوستیک امیشن

## ۱. مقدمه

بیش از سی سال است که کامپوزیت‌ها، پلاستیک‌ها و سرامیک‌ها به‌عنوان مواد برتر شناخته شده‌اند. حجم کاربرد کامپوزیت‌ها پیوسته رشد کرده و در بازارهای جدید نفوذ و تسخیر زیادی داشته است. بسیاری از نیازهای صنعتی همانند صنایع فضایی، راکتورسازی،

الکترونیکی، ساختمان‌سازی، حمل‌ونقل و جز این‌ها نمی‌توانند با استفاده از مواد معمولی برآورده شود و نیاز به تغییر گستردهٔ خواص دارد. از طرف دیگر، در کاربردهای مهندسی اغلب تلفیق خواص مورد نیاز است. مثلاً در صنایع هوافضا، کاربردهای زیرآبی، حمل‌ونقل و جز این‌ها امکان استفاده از یک نوع ماده که تمامی خواص مورد نظر را فراهم آورد وجود ندارد. چنانکه در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا سبک باشند و مقاومت سایشی خوبی داشته باشند. چون نمی‌توان ماده‌ای یافت که تمامی خواص مورد نظر را داشته باشد، باید به‌دنبال چاره‌ای دیگر بود. کلید این مشکل، استفاده از کامپوزیت‌هاست. کامپوزیت‌ها موادی چندجزئی‌اند که خواص آنها در مجموع از هرکدام از اجزاء بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. کامپوزیت الیاف شیشه / اپوکسی یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است که به‌دلیل خواص ویژه‌ای چون استحکام بالا نسبت به وزن، سفتی ویژه بالا، مقاومت خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم، مقاومت در برابر اشعه‌های اتمی و جذب‌کنندگی انرژی، مصرف بالایی در صنایع مختلف دارد [۱]. به‌دلیل نیاز به ساخت سازه‌هایی با قابلیت اطمینان بالا، پایش وضعیت صحت و خرابی این دسته از کامپوزیت‌ها به‌دلیل مصارف بالای آن در صنعت، امری لازم و ضروری است. باوجود مزایای مذکور، در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. خرابی‌های رایج در چندلایه‌های کامپوزیتی عبارت‌اند از: شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای [۲].

جدایش بین‌لایه‌ای شایع‌ترین نوع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است که به کاهش استحکام و مدول خمشی کامپوزیت می‌انجامد [۳]. چون این نوع خرابی‌ها در بین لایه‌های کامپوزیت رخ می‌دهد، اغلب با بازرسی چشمی غیرقابل تشخیص بوده و یا تشخیص آن بسیار مشکل است. تاکنون برای تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای روش‌های غیرمخرب متنوعی ارائه شده است. از جملهٔ این روش‌ها می‌توان به گرمانگاری[۱]، روش فراصوتی و اشعهٔ ایکس اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایبی دارند [۴]. اغلب روش‌های تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای، جزء روش‌های غیرفعال‌اند، حال آنکه اگر برای تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای از روش‌های فعالی چون اکوستیک امیشن استفاده شود، پایش بلادرنگ سیستم امکان‌پذیر خواهد بود و قابلیت اطمینان سیستم افزایش خواهد یافت [۵]. به‌منظور شناسایی سازوکارهای خرابی کامپوزیت‌ها، روش اکوستیک امیشن کارایی بهتری در مقایسه با آزمون‌های غیرمخرب دیگر دارد. از مزایای استفاده از این روش در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت و تفکیک سازوکارهای متنوع خرابی در این سازه‌ها اشاره کرد [۶]. پژوهشگران بسیاری در این حوزه تحقیقاتی انجام داده‌اند. منابع اکوستیک امیشن در کامپوزیت‌ها، که شامل شکست زمینه، جدایش فیبر از زمینه و شکست فیبر است، توسط اونیو بررسی شده است [۷]. همچنین ارتباط بین توصیفگرهای اکوستیک امیشن و سازوکارهای خرابی کامپوزیت‌ها توسط مجموعه‌ای از مطالعات انجام شده است [۸–۱۱]. گودین و همکاران اکوستیک امیشن را به‌عنوان وسیله‌ای برای تشخیص انواع مختلف خرابی‌ها در مواد کامپوزیتی شیشه / پلی‌استر به‌کار گرفتند که هدف عمدهٔ کار آنها تحلیل سیگنال‌ها به‌منظور تشخیص منابع مختلف امواج ساطع شده بود [۱۲–۱۳]. نی و جینن نیز برای تعیین رفتار شکست کامپوزیت‌های تک‌فیبر از آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای استفاده کردند [۱۴]. آنها در این آزمایش، با استفاده از یک ترک مصنوعی از پیش تعبیه‌شده توسط نوار تفلون، رفتار لایه‌لایه‌شدن کامپوزیت را مطالعه کردند. یوسفی و همکاران رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونهٔ شیشه / اپوکسی تحت بارگذاری مود دو بررسی نمودند [۱۵]. آنها با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های اکوستیکی را تحلیل کردند و با استفاده از الگوریتم‌های کا. مینز[۲] و فازی سی. مینز[۳] موفق به تفکیک و دسته‌بندی انواع خرابی‌ها در نمونه‌ها شدند. نتایج نشان داد که انواع مختلف خرابی، از لحاظ توزیع دامنه همپوشانی زیادی داشته، اما از لحاظ توزیع فرکانسی مرز مشخصی نسبت به هم دارند. شکست الیاف بیشترین فرکانس و انرژی را داشته و شکست ماتریس دارای کمترین فرکانس و انرژی است. آروموگام و همکاران با استفاده از تبدیل موجک، سازوکارهای مختلف خرابی را در یک نمونهٔ شیشه / اپوکسی تحت تست کشش دسته‌بندی نمودند [۱۶]. نتایج آنها نشان داد که شکست الیاف بیشترین محدودهٔ فرکانسی را دارد. تحقیقات انجام‌شده در این حوزه، به بررسی رفتار شکست کامپوزیت‌های پایه پلیمری با استفاده از ترک از پیش تعبیه شده در تست‌های مود یک و دو، کشش و خمش پرداخته‌اند. در پایش بارگذاری این تحقیقات، از حداقل دو حسگر اکوستیکی استفاده شده است. هدف این مقاله، ارزیابی

رفتار شکست خمشی کامپوزیت الیاف شیشه / اپوکسی توسط روش اکوستیک امیشن و پایش مستمر آن با استفاده از یک حسگر اکوستیکی و بدون ایجاد هیچ عیب مصنوعی است. در واقع این پژوهش، به تعیین حوزه‌های فرکانسی مخرب در بارگذاری خمشی این کامپوزیت می‌پردازد که در صنعت بدون ایجاد هیچ‌گونه عیوب اولیه و مصنوعی به‌کار گرفته می‌شوند. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی در ابعاد استاندارد تست خمش[۴] تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته و سیگنال‌های اکوستیکی ساطع شده مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از آنالیز موجک، سیگنال‌های اکوستیکی به‌دست آمده تجزیه و حوزه‌های فرکانسی مخرب تعیین شد. با استفاده از مشاهدات تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نتایج حاصل تأیید شد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد مورد استفاده برای ساخت کامپوزیت، شامل الیاف شیشهٔ بافته‌شده[۵] ۲۰۰ گرم بر متر مربع نوع E [۶] و ماتریس اپوکسی R510 به‌همراه سخت‌کننده ۲۰ درصد H520 می‌باشد. با استفاده از روش لایه‌چینی دستی[۷] نمونه‌های کامپوزیتی برای ۴۸ ساعت در دمای محیط قالب‌گیری شد. نمونه‌ها شامل ۱۶ لایهٔ الیاف $_8$[۰/۹۰] با ضخامت ۴/۲ میلی‌متر و با درصد حجمی الیاف ۵۳ درصد می‌باشد. به‌منظور جداسازی راحت نمونه‌ها پس از لایه‌چینی از سطح قالب، از یک پوشش ژله‌ای در سطح قالب استفاده شد. در انتها، نمونه‌ها علامت‌گذاری شده و برای انجام آزمایش خمش، مطابق شکل ۱، با استفاده از ارهٔ مخصوص به ابعاد ۱۸۵×۶۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM-D790 بریده شد. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش، ۴ نمونه ساخته و آزمایش گردید.

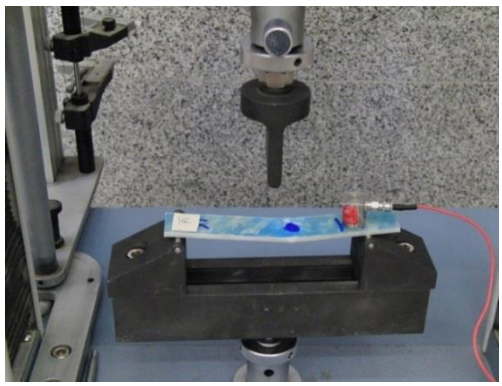
### ۲-۲. روش انجام آزمایش

پس از ساخت نمونه‌ها، مطابق شکل ۱، یک حسگر اکوستیک امیشن روی سطح نمونه قرار داده شد. سپس نمونه روی دو فک پایینی دستگاه تست خمش قرار گرفت. بارگذاری به‌صورت متمرکز در وسط تیر بوده و تکیه‌گاه‌های انتهای تیر به‌صورت غلتکی سر آزاد می‌باشند. سیگنال‌های اکوستیک امیشن، در حین بارگذاری ذخیره شد.

### ۲-۳. تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها از یک دستگاه آزمایش کشش اونیورسال کالیبره‌شده با ظرفیت ۲ تن، که میزان سرعت بارگذاری آن از ۰/۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه قابل تنظیم است، استفاده شد. قطعات کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های اکوستیکی از نرم‌افزار AEWIN و سیستم PCI-2 متعلق به شرکت پک[۸] با نرخ داده‌برداری دو میلیون بر ثانیه استفاده شد. از یک حسگر پیزوالکتریک تک‌کریستال مدل R15a استفاده شد. فعالیت‌های شناسایی‌شده، به‌وسیلهٔ پیش‌تقویت‌کننده با ضریب ۴۰ دسی‌بل تقویت شد. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و حسگر از گریس سیلیکون خلأ استفاده شد. برای حذف نوفهٔ زمینه، در حین نمونه‌برداری حد آستانهٔ ۳۵ دسی‌بل در نظر گرفته شد. فرایند در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین خواص حاصل از بارگذاری خمشی در جدول ۱ آمده است. نتایج خمشی دیگر نمونه‌ها با نمونه مورد بررسی در حدود ۳ الی ۵ درصد تفاوت دارد.

شکل ۱. نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی



شکل ۲. نمونهٔ تحت بارگذاری

### ۲-۴. تبدیل موجک

اکوستیک امیشن پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدودهٔ فراصوتی یک کیلوهرتز تا بیست مگاهرتز

رخ می‌دهد. امواج اکوستیک امیشن، امواج تنشی یا الاستیکی‌اند که در نتیجهٔ آزادشدن ناگهانی انرژی کرنشی در اثر خرابی اتفاق افتاده در سازه‌ها به‌وجود می‌آیند. این خرابی‌ها حاصل تنش‌های داخلی یا خارجی اعمال‌شده در سازه‌ها هستند. اندازه‌گیری و شناسایی امواج الاستیک می‌تواند اطلاعات باارزشی در مورد منابع ساطع‌کنندهٔ امواج حاصل از خرابی‌ها به‌دست دهد [۱۷]. امواج اکوستیکی خاصیت غیرپایداری[۹] و همپوشانی گذرا[۱۰] دارند [۱۸].

جدول ۱. نتایج تست خمش

| درصد ازدیاد طول | بیشترین بار قابل تحمل (کیلوگرم نیرو) | بیشترین فشار قابل تحمل (مگاپاسکال) | مدول الاستیک (گیگاپاسکال) |
|---|---|---|---|
| ۰/۸۱۰ | ۹/۴۶۹ | ۱/۴۰۰ | ۸/۸۴۴ |

بدینسان برای تحلیل سیگنال اکوستیک امیشن به بهره‌گیری از روش‌های مناسب پردازش سیگنال نیاز است. 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 حوزهٔ زمان و آنالیزهای طیفی حوزهٔ فرکانس مناسب برای سیگنال‌های پایدار می‌باشد. اما برای سیگنال‌های اکوستیک امیشن گذرا، دو آنالیز اشاره شده کافی نیست، همچنین این دو روش مشکلاتی در استخراج داده‌ها دارند. مثلاً انتقال داده‌ها از یک حوزه به حوزهٔ دیگر می‌تواند باعث از دست رفتن بخشی از داده‌ها شود. اگرچه تبدیل فوریهٔ زمان کوتاه[۱۱] برای حل این مشکل ارائه شده است، اما موفقیت اندکی از آن به‌دست آمد. در حالی‌که این مشکل با گسترش روش‌های زمان - فرکانس به‌طور کلی مرتفع شد. تحلیل موجک[۱۲] بهترین گزینه برای اتصال حوزه‌های زمان و فرکانس است. آنالیز موجک ابزاری مناسب برای آنالیز موضعی تغییرات توان طیفی سیگنال با زمان است. با تبدیل حوزهٔ زمان به زمان - فرکانس می‌توان تغییرات مودهای غالب را تعیین نمود و نشان داد این مودها چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند [۱۹]. جنبه‌های جدیدی از پردازش تصویر و سیگنال، طی چد سالیان اخیر توسط تبدیل موجک[۱۳] معرفی شده است. بعضی از تحقیقات طی دههٔ گذشته، تبدیل موجک را روش مناسبی جهت آنالیز سیگنال اکوستیک امیشن نشان داده‌اند [۲۰]. آنالیز موجک به‌عنوان تجزیه یک سیگنال به بخش‌هایی برحسب یک سیگنال مادر تعریف می‌شود. در فرایند جداسازی موجک گسسته، یک سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود: تقریب[۱۴] و جزء[۱۵]. تقریب بخش فرکانس پایین و جزء بخش فرکانس بالای سیگنال می‌باشد. در مرحلهٔ بعد تقریب به‌دست آمده خود به یک تقریب و جزء تقسیم می‌شود. این فرایند ادامه خواهد یافت تا زمانی‌که به تراز مطلوب برسد. اطلاعات از دست رفته بین دو تقریب متوالی در جزء موجود است. در موجک گسسته، جزءهای متوالی دوباره آنالیز نمی‌شوند. در عوض در موجک بسته‌ای[۱۶]، مشابه روشی که برای تجزیه تقریب به‌کار رفت، جزء نیز به دو بخش تجزیه می‌شود. در این حالت تعداد اجزا در سطح $j$ برابر با $2^j$ می‌باشد. بدینسان موجک بسته‌ای آنالیز بهتری را انجام می‌دهد [۸]. بنابراین تبدیل موجک بسته‌ای در این مقاله استفاده شد. شکل ۳ درخت تبدیل موجک بسته‌ای را نشان می‌دهد. در این شکل نحوهٔ نامگذاری هر مؤلفه نمایش داده شده است. حرف a نشان‌دهندهٔ تقریب، حرف s نشان‌دهندهٔ جزء و اعداد نشان‌دهندهٔ ترازها هستند.

تبدیل موجک F(t) (هر تابع قابل انتگرال‌گیری) نسبت به موجک $\psi$ توسط معادلهٔ ۱ بیان می‌شود [۲۱]:

$$CWT(f,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{\sqrt{f}}F(t)\psi^{*}\left(\frac{t-\tau}{f}\right)dt \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه $f$ نشان‌دهنده فرکانس، $\tau$ شیفت زمانی و $\psi^{*}$ مزدوج مختلط موجک می‌باشد [۸]. تبدیل موجک معکوس توسط معادلهٔ ۲ تعریف می‌شود [۲۱]:

$$f(t)=\frac{1}{C_{\psi}}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{|f|^{2}}CWT(f,\tau)\psi(t)df\,dt \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه $C_{\psi}$ ثابتی است که فقط به $\psi$ بستگی دارد و مقدار آن توسط معادلهٔ ۳ به‌دست می‌آید [۸]:

$$C_{\psi}=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|\psi(\omega)^{2}|}{\omega} \qquad (۳)$$

تبدیل موجک بسته‌ای به‌صورت تابع $\psi_{j,k}^{i}$ نشان داده می‌شود که $i$ پارامتر مدولاسیون[۱۷]، $j$ پارامتر مقیاس[۱۸] و $k$ پارامتر انتقال[۱۹] می‌باشد [۲۲]:

$$\psi_{j,k}^{i}=2^{\frac{-j}{2}}\psi^{i}\left(2^{-j}t-k\right) \quad (۴)$$

در معادلهٔ ۴، $i=1,2,3,\ldots,j^{n}$ بوده و $n$ بیانگر سطح تجزیهٔ موجک در ساختار درختی است. در این حالت $\psi^{i}$ از طریق معادلات ۵ و ۶ به‌دست می‌آید [۲۲]:

$$\psi^{2i}(t)=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{k=-\infty}^{+\infty}h(k)\psi^{i}\left(\frac{t}{2}-k\right) \quad (۵)$$

$$\psi^{2i+1}(t)=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{k=-\infty}^{+\infty}g(k)\psi^{i}\left(\frac{t}{2}-k\right) \quad (۶)$$

در معادلات اخیر، $\psi^{i}$ موجک مادر نامیده شده و $g(k)$ و $h(k)$ فیلترهای گسسته هستند که به پارامتر مقیاس و تابع موجک بستگی دارند [۲۳]. اجزای موجک بسته‌ای سیگنال در یک سطح خاص، از معادلهٔ ۷ به‌دست می‌آید [۲۲]:

$$\psi_{j}^{i}(t)=\sum_{k=-\infty}^{+\infty}C_{j,k}^{i}\ \psi_{j,k}^{i}(t)\Delta t \quad (۷)$$

ضرایب موجک بسته‌ای $C_{j,k}^{i}$ مربوط به سیگنال $f(t)$ از رابطهٔ ۸ قابل محاسبه است [۲۲]:

$$C_{j,k}^{i}=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\psi_{j,k}^{i}(t)dt \quad (۸)$$

مطابق معادلهٔ ۹، بعد از تجزیهٔ سیگنال تا سطح $j$ ام، سیگنال اصلی به‌عنوان جمع تمامی اجزای موجک بسته‌ای در سطح $j$ ام نشان داده می‌شود [۲۲]:

$$f(t)=\sum_{i=1}^{2^{j}}f_{j}^{i}(t) \quad (۹)$$

براساس رابطهٔ فرکانسی ساختار موجک بسته‌ای، محدودهٔ فرکانسی اجزای کلی و جزئی در سطح $j$ ام از روابط ۱۰ و ۱۱ به‌دست می‌آید [۲]:

محدودهٔ فرکانسی اجزای کلی:

$$f(t)=\sum_{i=1}^{2^{j}}f_{j}^{i}(t) \quad (۱۰)$$

محدودهٔ فرکانسی اجزاهٔ جزئی:

$$\left[\frac{1}{2}f_{s}\left(2^{-j}\right),\frac{1}{2}f_{s}\left(2^{-(j-1)}\right)\right] \quad (۱۱)$$

اگر $f(t)$ یک سیگنال اکوستیک امیشن باشد، آنگاه می‌توان سیگنال را به اجزای موجک مورد نظر در سطح j به‌صورت $f_{j}^{1},f_{j}^{2},\ldots,f_{j}^{i}$ تجزیه نمود. براساس سطح سیگنال تجزیه‌شده، مقادیر $E_{j}^{1},E_{j}^{2},\ldots,E_{j}^{i}$ به‌عنوان انرژی اجزاء در سطح j ام تعریف شده و با معادلهٔ ۱۲ قابل بیان است [۲۳]:

$$E_{j}^{i}(t)=\sum_{\tau=t_{0}}^{t}\left(f_{j}^{i}(\tau)\right)^{2} \quad (۱۲)$$

انرژی کل سیگنال با رابطهٔ ۱۳ قابل محاسبه است [۲۳]:

$$E_{Total}(t)=\sum_{j}E_{j}^{i}(t) \quad (۱۳)$$

به‌منظور پیداکردن توزیع انرژی در هر کدام از اجزاء، نسبت انرژی‌های سطوح مختلف به انرژی کل در نظر گرفته شده و با رابطهٔ ۱۴ تعریف می‌شود [۲۳]:

$$P_{j}^{i}(t)=\frac{E_{j}^{i}(t)}{E_{Total}(t)}\ i=1,\ldots,2^{j} \quad (۱۴)$$

که $P_{j}^{i}(t)$ نسبت توزیع انرژی در هر سطح را نشان می‌دهد. همچنین چون انرژی با دامنهٔ سیگنال‌ها رابطهٔ مستقیمی دارد، می‌توان تحلیل موجک را با معیار دامنه انجام داد و حوزه‌های فرکانسی غالب را تعیین نمود.

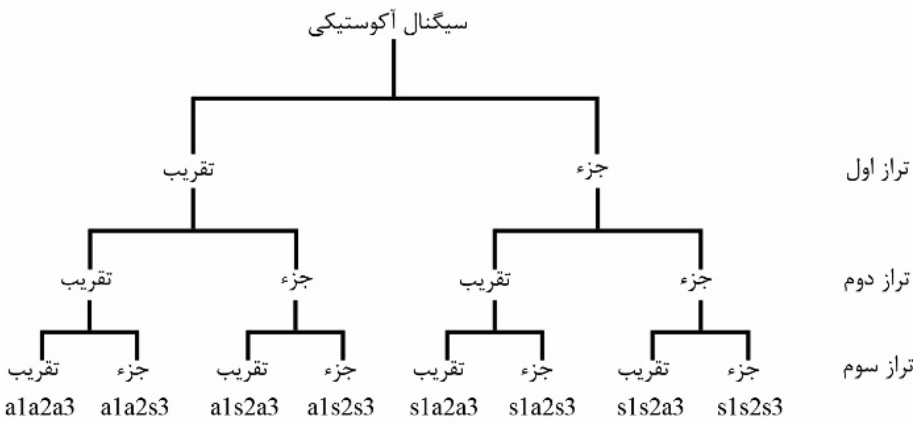
## ۳. بحث و نتایج

نتایج حاصل در سه بخش بیان می‌شوند. در بخش نخست، داده‌های اکوستیک امیشن ذخیره شده در حین بارگذاری خمشیِ نمونه تشریح و بررسی می‌شوند. در بخش دوم، با استفاده از روش تبدیل موجک بسته‌ای، سیگنال‌های اکوستیک امیشن پردازش و تحلیل شده‌اند. در بخش سوم اما، با استفاده از تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه، وجود انواع خرابی‌ها بررسی شده است.

### ۳-۱. تشریح داده‌های اکوستیکی

شکل‌های ۴ تا ۷ نمودارهای دامنه، شمارش، زمان استمرار و انرژی را برحسب زمان را نشان می‌دهند. این شکل‌ها نمودارهای برخطی را نشان می‌دهند که در حین بارگذاری خمشی توسط سیستم سیگنال‌پردازی اکوستیک امیشن به‌دست آمده‌اند. در واقع، کل سیگنال‌های دریافتی از حسگر به‌صورت نمودارهای دامنه، شمارش، زمان استمرار و انرژی برحسب زمان رسم شده‌اند. این نمودارها مربوط به فرایند کل بارگذاری نمونه از لحظهٔ اول تا لحظهٔ شکست است. کاملاً مشخص است که بارگذاری خمشی روی این نمونه ۳۴۰ ثانیه طول کشیده است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار خرابی، فرایند بارگذاری خمشی نمونه به چهار ناحیه ۰ تا ۲۰۰ ثانیه، ۲۰۰ تا ۲۸۰ ثانیه، ۲۸۰ تا

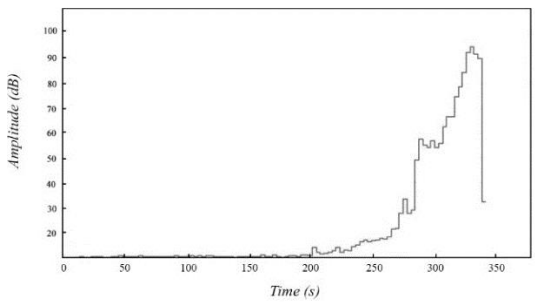
۳۳۰ ثانیه و ۳۳۰ تا ۳۴۰ ثانیه تقسیم شد. در بازهٔ اول بارگذاری، که شامل ۲۰۰ ثانیه اول می‌باشد، دامنه در حد چند دسی‌بل و تعداد سیگنال نزدیک به صفر است. زمان استمرار این سیگنال‌های کوچک تا حداکثر ۳۰۰ میکرو ثانیه رسیده است و به‌طور میانگین می توان زمان استمرار ۲۰۰ میکروثانیه را برای این بازه در نظر گرفت. این رخداد نشان‌دهندهٔ آن است که در ۲۰۰ ثانیه اول بارگذاری، اتفاقاتی رخ داده است که عمدتاً سیگنال‌های با دامنهٔ کم و با زمان استمرار میانگین ۲۰۰ میکروثانیه ضبط شده است. مطالعات نشان می‌دهد این‌گونه سیگنال‌های با دامنهٔ کم و با زمان‌های استمرار نوسانی، مربوط به آغاز ترک‌های ریز و میکروسکوپی در لایهٔ بیرونی ماتریس می‌باشد [۶، ۸]. این پدیده به‌دلیل حداکثر بودن تنش خمشی در لایه‌های بیرونی تیر رخ می‌دهد. نمودار دامنه زمان (نمایش داده شده در شکل ۴) بیانگر صعود با شیب ملایمی در بازهٔ زمانی ثانیه ۲۰۰ تا ثانیه ۲۸۰ است. این صعود نشان‌دهندهٔ افزایش دامنهٔ سیگنال‌های دریافتی از بارگذاری خمشی نمونه است. افزایش دامنهٔ سیگنال بیانگر افزایش اتفاقات و شدت آنها در نمونه تحت بارگذاری می‌باشد [۲۵]. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تعداد سیگنال‌های دریافتی در این بازه زمانی با افزایش دامنهٔ آنها افزایش می‌یابد. دریافت سیگنال‌های قوی منجر به افزایش زمان استمرار آنها نیز می‌شود که با توجه به شکل ۶ حداکثر ۱۲۰۰میکروثانیه زمان استمرار سیگنال می‌باشد. همچنان که با جدایش الیاف و ماتریس از همدیگر، انتظار تولید سیگنال‌های پیوسته با تعداد بیشتر، دامنه بیشتر و پیک‌های قوی‌تر وجود دارد، لذا مطابق شکل ۷، در این بازه از بارگذاری سه پیک عمده انرژی قرار دارد. در ثانیه‌های ۲۲۰ و ۲۳۰ و ۲۵۵ به‌ترتیب انرژی‌های ۲۴۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ و ۳۷۰۰۰ اتوژول آزاد شده است. تغییرات انرژی سیگنال‌های اکوستیکی می‌تواند نشان از وجود انواع مختلف سازوکارهای شکست در این مواد باشد. سیگنال‌های با انرژی بالا در این بازه، به آغاز جدایش بین الیاف و ماتریس مربوط هستند که با اتصال میکروترک‌های ایجادشده در ماتریس به همدیگر و رشد جدایش بین‌لایه‌ای تولید می شوند [۵]. این سیگنال‌ها در راستای جداشدن الیاف به‌هم پیوسته از ماتریس تولید شده‌اند و با افزایش شدت جدایش، شدت آنها نیز افزایش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد قبل از شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس اتفاق افتاده است [۱۸].



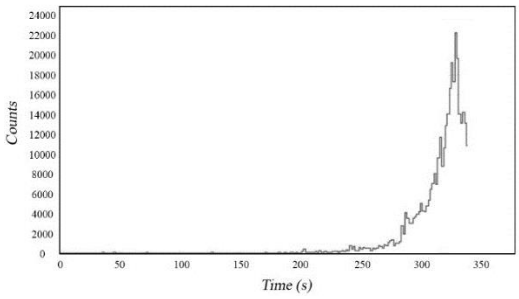

شکل ۳. درخت تبدیل موجک بسته‌ای

در ثانیه ۲۸۰، جهش بزرگی در نمودار دامنه زمان رخ داده که دامنه را از ۳۶ به ۵۸ دسی‌بل رسانده است. این جهش آغازگر بازه‌ای است که در آن روند صعودی نمودار تا ۳۳۰ ثانیه به‌شدت ادامه یافته است. این روند صعودی سبب شده است تعداد سیگنال‌های دریافت شده‌ای که از حد آستانه بالاترند، در ثانیه ۳۳۰ به ۲۲۰۰۰ عدد برسد. این در حالی است که زمان استمرار این سیگنال‌ها نیز از مرز ۳۴۰۰ میکروثانیه گذشته است. در بازه زمانی ۲۸۰ تا ۳۳۰ ثانیه، زمان استمرار طولانی‌تری در سیگنال‌ها ضبط شده است. همچنین، این بازه بیشترین تراکم انرژی را دارد. میانگین مقدار انرژی در این بازه زمانی برابر ۸۰۰ اتوژول است. در حالی که در طول ۳۴۰ ثانیه بارگذاری خمشی روی نمونه، چنین انرژی و تراکمی دیده نمی‌شود. این مهم، نشان‌دهندهٔ ترک خوردن و شکست رشته‌های الیاف می‌باشد. این مطلب در تحقیقات قبلی نیز آورده شده است [۲۵–۲۶]. با شکست هر رشته از الیاف شیشه، سیگنالی منتشر می‌شود که دامنهٔ آن بزرگتر از سیگنال‌های مربوط به شکست ماتریس است. چون رشته‌های الیاف شیشه در کنار هم هستند، با شکست هر رشته از الیاف، مسیر شکست الیاف بعدی هموارتر می‌شود و سیگنالی مشابه سیگنال قبلی ناشی از شکست الیاف تولید می‌شود. وجود سیگنال‌های با دامنه و انرژی مشابه در گسترهٔ بارگذاری ثانیهٔ ۲۸۰

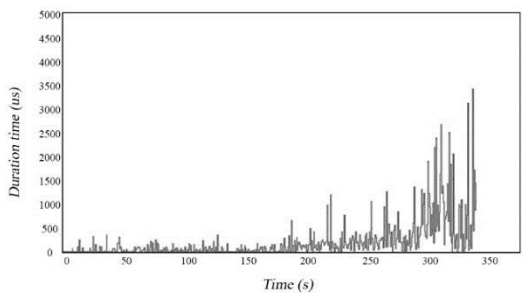
تا ثانیهٔ ۳۳۰ نشان می‌دهد که الیاف بیشترین نقش را در تحمل بار خمشی برعهده دارد [۲۵-۲۶]. پیک‌هایی که در نمودار انرژی زمان نیز دیده می‌شود، مربوط به شکست یک دسته از رشته الیاف‌های تنیده به هم است. آخرین مود خرابی در بارگذاری خمشی از ثانیهٔ ۳۳۰ تا ثانیهٔ ۳۴۰ می‌باشد. با توجه به نمودار دامنه زمان، سقوط ناگهانی دامنهٔ سیگنال‌های اکوستیکی از ثانیهٔ ۳۳۰ به بعد، مربوط به عدم توانایی نمونه در تحمل بارگذاری خمشی و شکست نهایی آن می‌باشد [۲۰]. این امر در نمودارهای دیگر نیز مشاهده می‌شود. در شکل ۷، افت انرژی سیگنال‌ها و در شکل ۵ افت شدید تعداد سیگنال‌های اکوستیکی از ۲۲۰۰۰ به ۱۱۰۰۰ در همین بازه زمانی وجود دارد.



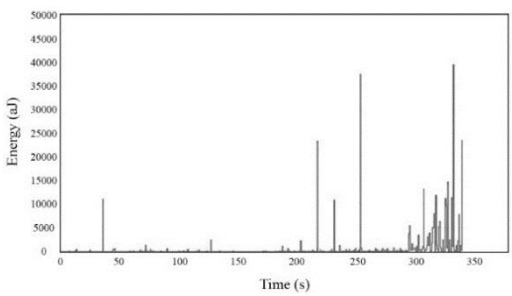

شکل ۴. نمودار دامنه زمان




شکل ۵. نمودار شمارش زمان




شکل ۶. نمودار زمان استمرار زمان




شکل ۷. نمودار انرژی زمان

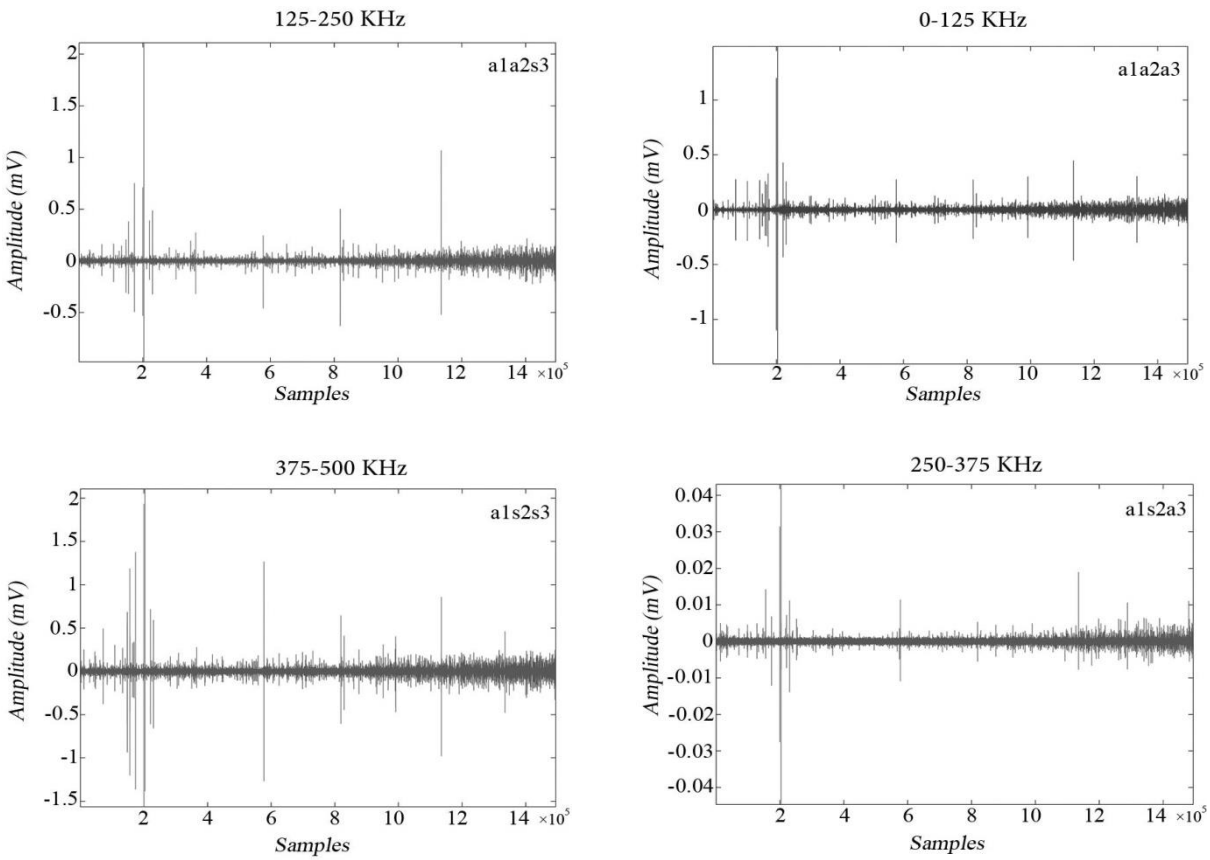
## ۳-۲. نتایج تبدیل موجک

برای تعیین درصد مودهای مختلف خرابی در نمونهٔ تحت بارگذاری خمشی، از تبدیل موجک بسته‌ای استفاده شد. بدین منظور، جعبه‌ابزار تبدیل موجک بسته‌ای نرم افزار تجاری متلب مورد استفاده قرار گرفت. همان‌گونه در بخش قبل اشاره شد، سیگنال به مجموعه‌ای از مؤلفه‌ها تجزیه می‌شود که هر مؤلفه محدودهٔ فرکانسی معینی دارد. چون انرژی رابطهٔ مستقیمی با دامنه دارد، در این مقاله برای آنالیز سیگنال‌های اکوستیک امیشن معیار دامنه به‌کار رفته است. برای انتخاب موجک مادر، که بهترین تطابق را با خصوصیات سیگنال داشته باشد، از روش مقایسهٔ چشمی در بین موجک‌های استاندارد مادر موجود استفاده شد و موجک مادر db20 (یکی از اعضای خانواده موجک دابچیس[۲۰]) که تشابه زیادی با خصوصیات سیگنال ثبت شده دارد، انتخاب شد. به‌منظور تحلیل موجک در سطح قابل قبولی از دقت، معیار آنتروپی شانون[۲۱] به‌کار گرفته شد. آنتروپی شانون با رابطهٔ ۱۵ تعریف می‌شود.

$$Y(x)=\sqrt{f_b}\,\sin c(f_b x)e^{2i\pi f_c x} \qquad (۱۵)$$

این معادله به دو پارامتر وابسته است؛ $f_b$ و $f_c$ که اولی پارامتر پهنای باند و دومی فرکانس مرکز موجک می‌باشد. تجزیهٔ سیگنال در مرحلهٔ سه‌بعدی تبدیل موجک، به هشت مؤلفه انجام شد. محدودهٔ فرکانسی این هشت مؤلفه از معادلات ۱۰ و ۱۱ به‌دست می‌آید. نتایج تبدیل موجک در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است. همان‌گونه که بیان شد، مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد سه نوع خرابی غالب در کامپوزیت‌های پایه پلیمری عبارت‌اند از: شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف [۲۴]. شکست ماتریس سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی پایین و شکست الیاف سیگنال‌هایی با دامنه و انرژی بالا ایجاد می‌کند. همچنین در لحظهٔ شروع رشد جدایش بین لایه‌ای، به‌علت فعال‌شدن مودهای مختلف خرابی در نمونه، تعداد و انرژی سیگنال‌های اکوستیکی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. از آنالیزهای موجک نتیجه می‌شود که مؤلفه‌های a1s2s3، a1a2s3 و a1a2a3

به‌ترتیب دارای سیگنال‌هایی با بیشترین دامنه و انرژی می‌باشند. این مطلب از دامنهٔ مؤلفه‌های ۱ تا ۸ نیز قابل استنباط است. لذا فرکانس‌های مرتبط با این مؤلفه‌ها بیانگر فرکانس‌های متناظر با شکست کامپوزیت شیشه / اپوکسی است. مطالعات نشان می‌دهد بیشترین انرژی و دامنه به‌ترتیب مربوط به شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و در نهایت شکست الیاف است [۵]. بدین ترتیب ترک‌خوردن و شکست ماتریس به مؤلفهٔ a1a2a3 با فرکانس پایین ( صفر تا ۱۲۵ کیلوهرتز)، جدایش الیاف از ماتریس به مؤلفه a1a2s3 با فرکانس متوسط (۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلوهرتز) و شکست الیاف به‌عنوان سومین و قوی‌ترین سازوکار خرابی، به مؤلفهٔ a1s2s3 با فرکانس بالا (۳۷۵ تا ۵۰۰ کیلوهرتز۳۷۵) مرتبط می‌گردد. این دسته‌بندی در هر چهار نمونه مورد بررسی قرار گرفت و نتاییج حاصل در سه نمونه از چهار نمونه کاملاً یکسان به‌دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق و تحقیقات قبلی در تخمین محدودهٔ فرکانسی مودهای خرابی مختلف در جدول ۲ به‌صورت کمی مقایسه شده است. مطابق جدول، نتایج حاصل از انجام آنالیز موجک، با نتایج مراجع دیگر در تخمین محدوده فرکانسی مربوط به هر مود خرابی تطابق منطقی دارد. وجود تفاوت‌های جزئی در دسته‌بندی فرکانس سازوکارهای مختلف خرابی، ناشی از تفاوت در مشخصات مواد به‌کار گرفته شده، روش ساخت کامپوزیت، شرایط اعمال بار، شرایط محیطی آزمایش و دیگر عوامل می‌باشد.




شکل ۸. نتایج تبدیل موجک مؤلفه‌های ۱ تا ۴

## ۳-۳. مشاهدات حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی

به‌منظور مشاهدهٔ مودهای خرابی موجود در تیر کامپوزیتی مورد مطالعه، از سطح شکست نهایی نمونه تصویر میکروسکوپی توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در این شکل، هر سه مود خرابی ترک‌های ریز ماتریس، جداشدن الیاف از ماتریس و شکست الیاف به خوبی قابل مشاهده است.

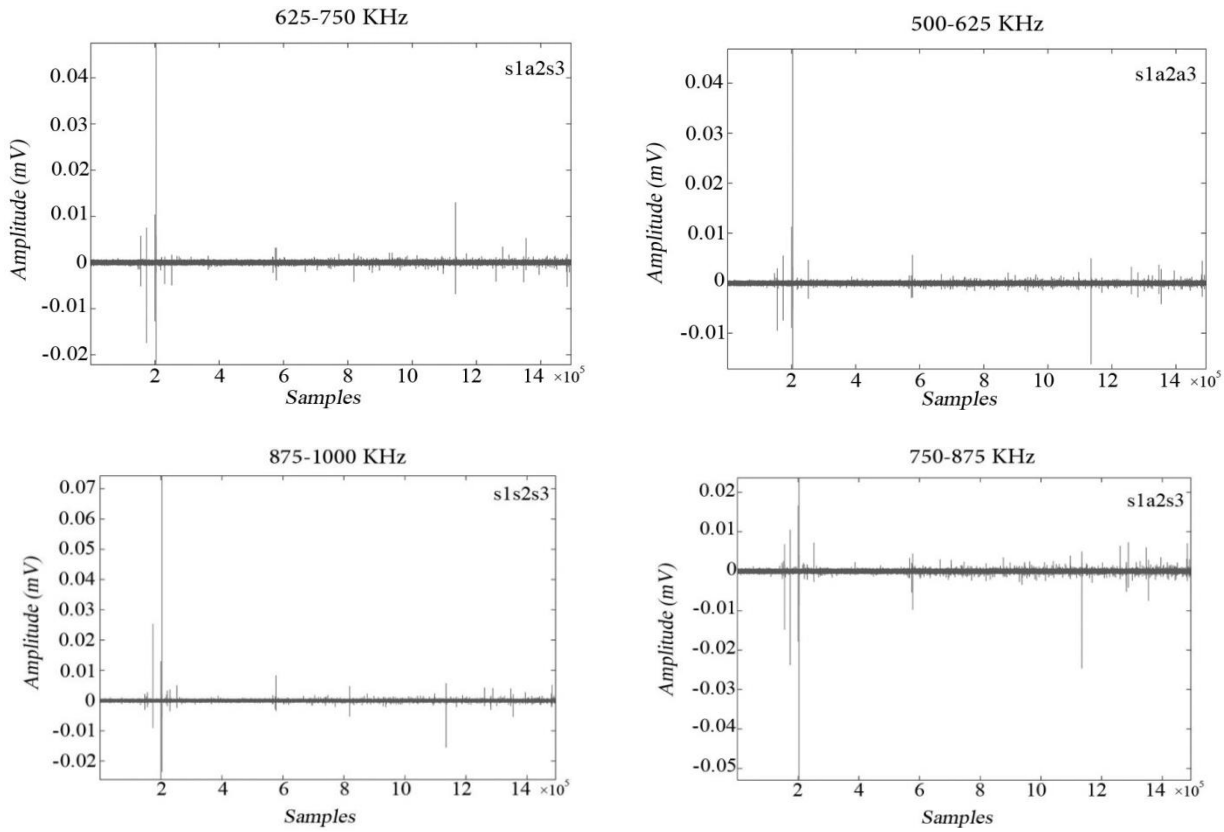
## ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش اکوستیک امیشن برای پایش وضعیت و بررسی مودهای مختلف خرابی در بارگذاری خمشی تیر کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی استفاده شده است. برای این منظور تنها از یک حسگر اکوستیکی استفاده شد. با استفاده از این روش، سه نوع مود خرابی غالب در تیر کامپوزیتی شناسایی و محدودهٔ

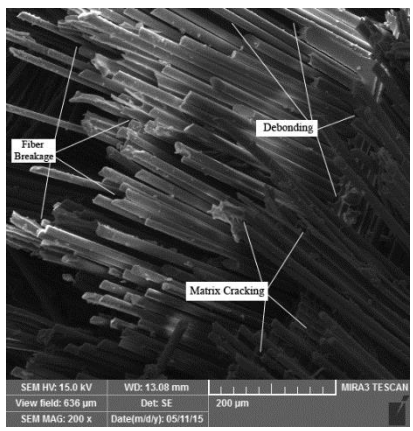
فرکانسی آنها تعیین شده است. به‌منظور شناسایی مودهای مختلف خرابی، از تبدیل موجک برای پردازش سیگنال‌های اکوستیکی استفاده شد. نتایج تبدیل موجک نشان داد این سه سازوکار غالب خرابی؛ یعنی شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف، در بارگذاری خمشی به‌ترتیب دارای محدودهٔ فرکانسی صفر تا ۱۲۵ کیلوهرتز، ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلوهرتز و ۳۷۵ تا ۵۰۰ کیلوهرتز هستند. نتایج پایش وضعیت این نوع کامپوزیت پرمصرف صنعتی بیانگر آن است که افزایش بارگذاری خمشی در تیر کامپوزیتی تا محدودهٔ فرکانسی کمتر از ۱۵۰ کیلوهرتز مجاز است. در واقع ترک‌خوردن ماتریس و شکست آن تا زمانی‌که به جدایش کامل الیاف از ماتریس و شکست الیاف منجر نشود، مخاطرهٔ زیادی را سبب نمی‌شود. به همین جهت، پایش آنلاین وضعیت بارگذاری در کاربردهای مهم و حساس این قطعات شدیداً توصیه می‌گردد.

## ۵. قدردانی

نویسندگان برخود لازم می‌دانند از زحمات سامان داودی به‌دلیل کمک در تهیهٔ کدهای تبدیل موجک و محمد قره آغاجی به‌جهت انجام آزمایش‌های تجربی مقاله تشکر و قدردانی کنند.




شکل ۹. نتایج تبدیل موجک مؤلفه‌های ۵ تا ۸




شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

جدول ۲. مقایسهٔ نتایج محدودهٔ فرکانسی خرابی‌ها در مودهای مختلف طبق کار حاضر و مراجع [۲،۱۸،۲۵،۲۶]

| مود خرابی | شکست ماتریس | جدایش الیاف از ماتریس | شکست الیاف |
|---|---|---|---|
| تحقیق حاضر | ۰–۱۲۵ | ۱۲۵–۲۵۰ | ۳۷۵–۵۰۰ |
| مرجع [۲] | ۱۰۰–۱۹۰ | ۲۰۰–۳۲۰ | ۳۸۰–۴۳۰ |
| مرجع [۱۸] | ۶۲/۵–۱۲۵ | ۲۵۰–۳۱۲/۵ | ۳۱۲/۵–۳۷۵ |
| مرجع [۲۵] | ۱۲۵–۲۵۰ | - | ۳۷۰–۴۵۰ |
| مرجع [۲۶] | ۸۰–۲۰۰ | ۲۱۰–۳۵۰ | ۳۶۰–۴۳۰ |

## ۶. مآخذ


[1] Khamedi, R., M. Nikmehr. "Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon- epoxy composite properties by Acoustic Emission." Modares Mechanical Engineering, 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 355-360, (In Persian).

[2] Fotouhi, M., 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, 2011, Tehran, Iran, (In Persian).

[3] Hajikhani, M., B. Soltannia, A. R. Oskouei, M. Ahmadi, M. "Monitoring of delamination in composites by use of Acoustic Emission." 3rd Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference, 2009, Tehran, Iran, (In Persian).

[4] Amenabar, I., A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, J. Aurrekoetxea. "Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades." Composites Part B: Engineering, 2011, Vol. 42, No. 5, pp. 1298-1305.

[5] Saeedifar, M., M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky. "Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission." Modares Mechanical Engineering, 2014, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, (In Persian).

[6] Shahri, M. N., J. Yousefi, M. Hajikhani, M. Ahmadi. "Investigation of delamination in composite materials using acoustic emission." 19rd National Conference on Manufacturing Engineering, 2010, Tabriz, Iran, (In Persian).

[7] Uenoya, T. "Acoustic emission analysis on interfacial fracture of laminated fabric polymer matrix composites." *Journal of acoustic emission*, 1995, Vol. 13, No. 3-4, pp. 95-102.

[8] Barre, S., M. Benzeggagh. "On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene." *Composites Science and Technology*, 1994, Vol. 52, No. 3, pp. 369-376.

[9] Guerjouma, R. E, J. C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier. "Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission." *Advanced engineering materials*, 2001, Vol. 3, No. 8.

[10] Yoon, D. J., W. J. Weiss, S. P. Shah. "Assessing damage in corroded reinforced concrete using acoustic emission." *Journal of engineering mechanics*, 2000, Vol. 126, No. 3, pp. 273-283.

[11] Woo, S. C., N. S. Choi. "Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events." *Composites science and technology*, 2007, Vol. 67, No. 7, pp. 1451-1458.

[12] Godin, N., S. Huguet, R. Gaertner, L. Salmon. "Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers." *NDT&E International*, 2007, Vol. 37, pp. 253–264.

[13] Godin, N., S. Huguet, R. Gaertner. "Integration of the Kohonen's self organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE

data collected during tensile tests on cross-ply composites." *NDT&E International*, 2005, Vol. 38, pp. 299–309.

[14] Ni, Q. Q., E. Jinen. "Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites." *Engineering fracture mechanics*, 1997, Vol. 56, No. 6, pp. 779-796.

[15] Yousefi, J., 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*, 2013, pp. 1-11.

[16] Arumugam, V., 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*, 2012, Vol. 38, No. 5, pp. 1087-1102.

[17] Guo, Y. B., S. C. Ammula. "Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining." *International journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, Vol. 45, pp. 1622-1627.

[18] Zarif Karimi, N., H. Heidary, M. Ahmadi, A. Rahimi, M. Farajpur. "Monitoring of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission." *Modares Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 13, No. 15, pp. 169-183, (In Persian).

[19] Marec, A., J. H. Thomas, R. EI. Guerjouma. "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, Vol. 22, pp. 1441-1464.

[20] Ni, Q. Q., M. Iwamoto. "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites." *Engineering Fracture Mechanic*, 2002, 69, pp. 717-728.

[21] Soman, K. P., K. I. Ramachandran. "Insight into Wavelets from Theory to Practice." 2nd Ed, Prentice-Hall of India Pvt. Limited, 2005.

[22] Fotouhi, M. "Investigation of delamination in composite materials during drilling using acoustic emission", MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2011, (In Persian).

[23] Saeedifar, M., M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, M. Hajikhani. "Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission." *Modares Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 14, No. 6, pp. 144-152, (In Persian).

[24] Oskouei, A. R., M. Ahmadi. "Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in Glass/Polyester Composites." *Journal of Composite Materials*, 2010, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807.

[25] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadinajafabadi, M. Hajikhani. "Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission." *Modares Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 14, No. 6, pp. 144-152, (In Persian)

[26] Fotouhi, M., 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*, Vol. 10, pp. 1-14, 2012.

## پی‌نوشت

1. thermography
2. K-means
3. Fuzzy C-means
4. ASTM-D790
5. woven
6. E-glass
7. hand layup
8. physical acoustics corporation (PAC)
9. non-stationary
10. overlapping transient
11. short-time Fourier transform
12. wavelet analysis

13. wavelet transform
14. approximation
15. detail
16. packet wavelet
17. modulation parameter
18. dilation parameter
19. translation parameter
20. daubechies
21. Shannon