



پایش استحکام کاهش یافته قطعات کامپوزیتی سوراخ شده توسط روش آکوستیک امیشن

نوید ظریف کریمی^۱، حسین حیدری^۲، مهدی احمدی نجف آبادی^{۳*}، عبدالرضا رحیمی^۴، مهدی فرج پور^۵

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۵- مربی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، ahmadin@aut.ac.ir

چکیده- سوراخ کاری کامپوزیت‌ها یکی از فرایندهای مهم در ساخت و مونتاژ سازه‌های صنعتی می‌باشد. با این حال سوراخ کاری کامپوزیت‌ها باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل کاهش مقاومت سازه می‌شود. در این مقاله اثر پارامترهای سرعت چرخشی اسپیندل، نرخ پیش‌روی و زاویه رأس مته بر کاهش استحکام کششی نمونه بررسی می‌شود. بدین منظور از روش طراحی آزمایشات تاگوچی در ۳ تراز و با ۳ فاکتور استفاده شد. همچنین روش آکوستیک امیشن به همراه روش تحلیل سیگنال موجک برای پایش استحکام کاهش یافته کششی و تفکیک حوزه فرکانسی مکانیزم‌های مختلف شکست بکار گرفته شد. مطابق نتایج، نرخ پیش‌روی به عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شد و محدوده فرکانسی شکست ماتریس ۶۲/۵-۱۲۵ کیلوهرتز، لغزش الیاف ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و شکست الیاف ۳۱۲/۵-۳۷۵ کیلوهرتز، محاسبه شد. **کلیدواژه‌ها:** سوراخ کاری، کامپوزیت، استحکام کاهش یافته، آکوستیک امیشن، آنالیز موجک.

Monitoring of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission

N. Zarif Karimi¹, H. Heidary², M. Ahmadi^{3*}, A. Rahimi⁴, M. Farajpur⁵

1- MSc Student, Mech. Eng., East Tehran Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

2- PhD Student, Mech. Eng., Univ. of Tafresh, Tafresh, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ. of Tech., Tehran, Iran

4- Assist. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ. of Tech., Tehran, Iran

5- MSc, Mech. Eng., East Tehran Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

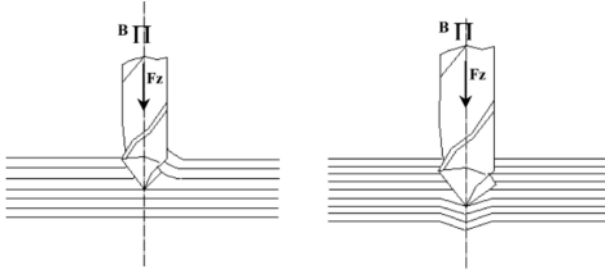
* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran. ahmadin@aut.ac.ir

Abstract- Drilling of composite materials is one of the major processes in the manufacturing and assembly of sub-component. However, drilling of composite laminates can cause several damages such as degradation in residual tensile strength. In this study, effects of cutting speed, feed rate and drill angle on residual tensile strength of drilled laminates has been investigated. For this purpose, the Taguchi method was employed for three factors at three levels. Acoustic emission signals and wavelet analysis are used to monitor residual tensile strength. The experimental results indicated that the feed rate has the most significant effect. Based on time-frequency analysis of AE signals, it was found that AE signals with frequency ranges of (62.5-125), (250-312.5) and (312.5-375) KHz were generated from matrix cracking, fiber slipping and fiber breakage respectively.

Keywords: Drilling, Composite Materials, Residual Strength, Acoustic Emission, Wavelet Analysis.

۱- مقدمه

محوری به سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث جدایش لایه‌ای در صفحه بالایی لمینت می‌شود.



شکل ۱ جدایش لایه ای در هنگام ورود و خروج مته

زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد ضخامت لایه بریده شده کم می‌شود. در چنین نقطه‌ای تنش ناشی از نیروی محوری از مقاومت بین لایه‌ای فراتر می‌رود و جدایش لایه‌ای رخ می‌دهد. این پدیده قبل از نفوذ کامل لمینت بوسیله مته رخ می‌دهد.

معیارهای مختلفی برای اندازه‌گیری جدایش لایه‌ای وجود دارد و بطور مرسوم فاکتور جدایش لایه‌ای مطابق روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شود.

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_0} \quad \text{or} \quad F_{d'} = \frac{A_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

D_0 قطر نامی مته، A_0 مساحت نامی سوراخ مته، D_{\max} حداکثر اندازه خرابی و A_{\max} اندازه ناحیه با قطر D_{\max} است.

دیویم و همکارانش سوراخ‌کاری با سرعت بالا کامپوزیت‌های GFRP را بررسی کردند. آنها یک ضریب فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده را مطابق رابطه (۲) ارائه کردند که بخش اول این رابطه اندازه ترک و بخش دوم اندازه خرابی را نشان می‌دهد [۳].

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{\max}}{D_0} + \beta \frac{A_{\max}}{A_0} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن ضرایب α و β طبق رابطه (۳)، فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$\alpha = 1 - \beta \quad \beta = \frac{A_d}{A_{\max} - A_0} \quad (3)$$

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{\max} - A_0} (F_d^2 - F_d) \quad (4)$$

که A_d مساحت ناحیه خرابی است. پارامترهای مختلف در روابط فوق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

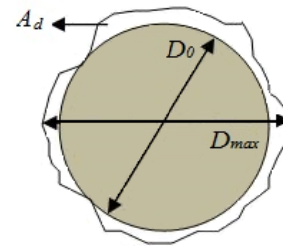
امروزه اهمیت و قابلیت‌های فراوان کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) بر کسی پوشیده نیست و در حوزه‌های متعددی، این مواد رقیب سر سختی برای مواد سنتی محسوب می‌شوند. خواص ممتاز این دسته از مواد مرکب از جمله مقاومت ویژه بالا، مقاومت به خوردگی بالا و وزن کم باعث رشد روز افزون بکارگیری این مواد بجای فلزات در صنایع مختلف می‌باشد.

مراحل ساخت مواد کامپوزیتی به دو دسته اولیه و ثانویه طبقه‌بندی می‌شود [۱]. ساخت اولیه، شامل فرایندهایی مانند لایه‌چینی دستی، رشته پیچی^۱ و قالب‌گذاری می‌باشد که منجر به ایجاد شبه شکل نهایی می‌گردد. به دلیل الزامات طراحی و ساخت امکان ساخت یک محصول به صورت یک پارچه وجود نداشته یا بسیار پرهزینه خواهد بود. از این رو عمل ساخت ثانویه برای مونتاژ کردن قطعات فرعی امری اجتناب ناپذیر است. در میان روش‌های مختلف ساخت ثانویه، سوراخ‌کاری سنتی با مته و استفاده از اتصالات پیچی هنوز یکی از پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود. با این وجود سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها همواره با چالش‌هایی روبرو بوده است. مهمترین چالش در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها توسط مته، ایجاد عیوب مختلف در قطعات است. برخی از این عیوب شامل شکست ماتریس، جدایش لایه‌ای^۲، بیرون کشیدگی الیاف و سوختگی ماتریس است، که باعث کاهش مقاومت سازه می‌شود. این کاهش مقاومت را میتوان در رفتار کامپوزیت، تحت بارهای کششی، فشاری و خستگی مشاهده کرد [۲].

جدایش لایه‌ای یکی از مهمترین مکانیزم‌های خرابی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها می‌باشد، که به طور معمول در هنگام ورود و خروج مته اتفاق می‌افتد. به جدایش لایه‌ای در هنگام ورود مته پیل آپ^۴ و به جدایش لایه‌ای در هنگام خروج مته پوش اوت^۵ می‌گویند (شکل ۱). جدایش لایه‌ای در هر دو مکانیزم رابطه‌ای مستقیم با نیروی محوری دارد. در هنگام ورود مته پس از آنکه لبه برشی با لمینت تماس برقرار کرد، نیروی برشی اعمال شده در جهت محیطی یک نیرو در راستای

1. Filament Winding
2. Near-Net
3. Delamination
4. Peel Up
5. Push Out

بیشتر در بخش موجک مقاله توضیح داده خواهد شد. در این بخش به بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه سوراخ کاری کامپوزیت و مونیتورینگ آن به اجمال پرداخته می‌شود. بیرهان و همکارانش اثر پارامترهای ماشین کاری را بر کیفیت سطح مواد کامپوزیتی بافته شده^۶ GFRP بررسی کردند [۵]. آنها نشان دادند که با افزایش سرعت چرخشی اسپیندل فاکتور جدایش لایه‌ای هم در ورود و هم در خروج مته کاهش می‌یابد. ولایدهام و کیریشنامورتی اثر هندسه نوک مته بر روی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای را بررسی کردند [۶]. آنها آزمایش سوراخ کاری را بر GFRP با استفاده از مته کاربیدی با هندسه‌های مختلف نوک مته انجام دادند. کیریشنامورتی و همکارانش از روش تاگوچی و بهینه سازی فازی خاکستری^۸ بر اساس ۵ خروجی نیروی محوری، گشتاور، جدایش لایه‌ای در ورود و خروج، عدم هم مرکزی سوراخ^۹ استفاده کردند. آنها از آنالیز واریانس برای یافتن درصد تأثیر پارامترهای مختلف استفاده کرده و دریافتند که نرخ پیش‌روی مهمترین عامل تأثیرگذار می‌باشد [۷]. در فعالیتی مشابه پالانیکومار از آنالیز درجه بندی نسبی خاکستری^{۱۰} برای یافتن نتایج پارامترهای بهینه در سوراخ کاری GFRP استفاده کرد. نتایج وی نشان داد نرخ پیش‌روی تأثیر مهمتری نسبت به سرعت چرخشی اسپیندل دارد [۸]. رویشانکار و همکارانش برای پایش سوراخ کاری کامپوزیت‌ها از روش آکوستیک امیشن استفاده کردند [۹]. نتایج آنها نشان داد، افزایش در نیروی محوری باعث افزایش تراز AE-RMS سیگنال می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که ارزیابی خرابی ایجاد شده در سوراخ کاری به وسیله ویژگی‌های سیگنال آکوستیک امیشن امکان‌پذیر است. در فرایند سوراخ کاری کامپوزیت‌ها، سیگنال‌های آکوستیکی تولید شده از منابعی همچون ترک خوردن ماتریس، برش الیاف، سایش ابزار، جدایش لایه‌ای و اصطکاک می‌باشد. اورسون و چراغی ویژگی‌های این منابع را بر اساس سیگنال آکوستیک تعیین کردند [۱۰]. رفاهی و همکارانش ویژگی‌های مکانیزم‌های خرابی در جدایش لایه‌ای مواد (I) مواد کامپوزیتی را توسط آکوستیک امیشن و آنالیز

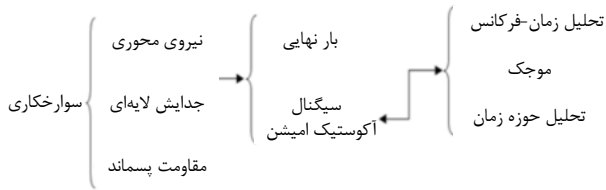


شکل ۲ شماتیک منطقه جدایش لایه ای اطراف سوراخ

در این مطالعه، برای ارزیابی خواص مکانیکی قطعه سوراخ شده از روش آکوستیک امیشن^۱ (AE) در حین تست کشش استفاده شد. روش آکوستیک امیشن یکی از روش‌های آنلاین است، که اساس آن بر دریافت امواج الاستیک منتشر شده از منابع موضعی به واسطه آزاد شدن سریع انرژی می‌باشد. امواج آکوستیکی که از نمونه منتشر می‌شوند خاصیت غیر پایداری^۲ و همپوشانی گذرا^۳ دارند. بدین سان برای تحلیل سیگنال آکوستیک امیشن نیاز به بهره‌گیری از روش‌های مناسب پردازش سیگنال می‌باشد. هدف از پردازش سیگنال، استخراج ویژگی‌هایی از سیگنال است، که شرایط و ویژگی‌های فرایند را پایش نماید. بسته به نوع سیگنال، روش‌های متعددی پیشنهاد می‌گردد. آنالیزهای آماری حوزه زمان و آنالیزهای طیفی حوزه فرکانس مناسب برای سیگنال‌های پایدار می‌باشند. اما برای سیگنال‌های آکوستیک امیشن گذرا، دو آنالیز اشاره شده کافی نمی‌باشد 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. تبدیل فوریه زمان کوتاه^۴ برای حل این مشکل ارائه شد، اما موفقیت اندکی بدست آمد. این مشکل، با گسترش روش‌های زمان-فرکانس بطور کلی مرتفع شد. تحلیل موجک^۵ بهترین گزینه برای اتصال دو حوزه زمان و فرکانس می‌باشد. آنالیز موجک ابزار مناسبی برای آنالیز موضعی تغییرات توان طیفی سیگنال با زمان می‌باشد. با تبدیل حوزه زمان به زمان-فرکانس اولاً می‌توان تغییرات مدهای غالب را تعیین نمود و ثانیاً نشان داد این مدها چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند [۴]. جزئیات

6. Woven
7. Glass Fiber Reinforced Polymer
8. Grey Fuzzy Optimization
9. Eccentricity of the Holes
10. Analysis of Grey Relational Grade

1. Acoustic Emission
2. Non-Stationary
3. Overlapping Transient
4. Short-Time Fourier Transform
5. Wavelet Analysis



شکل ۳ الگوریتم آنالیز سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها

هدف از مطالعه اخیر بررسی اهمیت پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت چرخشی اسپیندل و نرخ پیش‌روی) و زاویه رأس مته بر استحکام کششی کامپوزیت الیاف شیشه/رزین اپوکسی سوراخ شده است. برای این منظور از ابزار جدیدی استفاده شد. این روش شامل بکارگیری تبدیل موجک بسته‌ای برای تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن است که شامل حوزه زمان-فرکانس می‌باشد و متفاوت از تحلیل‌های آماری زمان یا طیفی حوزه فرکانس است. این روش، ابزار قدرتمندی برای شناسایی رشد خرابی در عملیات سوراخ‌کاری می‌باشد.

۲- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

تاگوچی یک روش طراحی آزمایش‌ها برای بررسی پارامترهای مختلف اثرگذار بر میانگین یا واریانس عملکرد فرایند پیشنهاد می‌دهد، که شامل استفاده از یک سری آرایه‌های ارتوگونال برای تعیین پارامترهای اثرگذار بر فرایند و تراز می‌باشد که هر یک از آنها باید تغییر کند، می‌باشد. آرایه‌ها به وسیله تعداد پارامترها و تعداد ترازها انتخاب می‌شوند. به جای تست همه حالت‌های ممکن، در روش تاگوچی بخشی از آزمایش‌ها انجام می‌گیرد و این باعث انتخاب داده‌های ضروری برای تعیین فاکتورهایی که بیشترین اثر را در فرایند دارند با کمترین مقدار آزمایش‌ها می‌شود.

برای تعیین اثر هر متغیر، نسبت سیگنال به نویز^۱ یا SN برای هر آزمایش محاسبه می‌شود. محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش اول در آرایه، از معادله (۵) بدست می‌آید [۱۷].

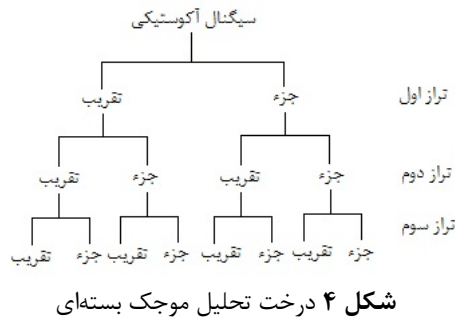
$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}$$

$$S_i^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2 \quad (5)$$

1. Signal to Noise

موجک مطالعه کردند [۱۱]. آنها معیار توزیع انرژی را برای یافتن المان‌های فرکانسی با انرژی بالا در سیگنال بکار بردند، که هر کدام از این المان‌ها به یک مکانیزم خرابی مرتبط شد. ولایدها و همکارانش از تبدیل موجک برای آنالیز سیگنال‌های آکوستیک امیشن آزاد شده از سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمری شیشه/فنولیک استفاده کردند [۱۲]. نتایج نشان داد که شاخصه‌های انتخاب شده از ضرایب موجک بسته‌ای، قابلیت شناسایی شرایط مته را به گونه‌ای مؤثر داراست. کینگ نی و همکارانش ترتیب زمانی اتفاق افتادن هر مود، تأثیر متقابل آنها بر یکدیگر را برای شکست الیاف و دیگر مکانیزم‌های شکست، توسط آنالیز موجک شناسایی کردند [۱۳]. آنها نشان دادند که آنالیز موجک ابزار قدرتمندی برای شناسایی مودهای میکرو خرابی و مکانیزم‌های میکروشکست مشخص در مواد کامپوزیتی می‌باشد. لوتاس و همکارانش به ارزیابی خرابی در کامپوزیت دارای سوراخ مرکزی، تحت بار شبه استاتیکی با استفاده از آنالیز زمان-فرکانسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن، پرداختند [۱۴]. بونجرنو و همکارانش خرابی ایجاد شده بواسطه سوراخ‌کاری و رفتار مقاومت خستگی کامپوزیت شیشه/اپوکسی را بررسی کردند [۱۵]. آنها رفتار خستگی را بطور کمی برحسب تغییر شکل سوراخ، جدایش لایه‌ای در ورودی و خروجی نشان دادند. همچنین یک مدل تئوری درباره مکانیزم فیزیکی رشد خرابی ارائه کردند. نتایج نشان داد که وجود عیوب در نقطه مرکزی مقطع سوراخ تأثیر زیادی بر رفتار خستگی می‌گذارد، در حالی که جدایش لایه‌ای اثر کمتری دارد. تگلیافری و همکارانش اثر پارامترهای برشی بر کیفیت برش و خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی GFRP بررسی کردند [۱۶]. آنها تأیید کردند که عرض منطقه خرابی متناسب با نسبت بین سرعت چرخشی اسپیندل و نرخ پیش‌روی (V_r/V_f) می‌باشد و بطورخاص کیفیت برش با افزایش نسبت (V_r/V_f) افزایش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که کیفیت در لبه سوراخ اثری بر استحکام کششی قطعه کار ندارد.

آنالیز فرایند سوراخ‌کاری می‌تواند از سه منظر مختلف مورد بررسی قرار گیرد: نیروی محوری، جدایش لایه‌ای و استحکام کششی کاهش یافته (شکل ۳).



تبدیل موجک معکوس توسط معادله (۸) تعریف می‌شود.

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|f|^2} CWT(f, \tau) \psi(t) df d\tau, \quad C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (8)$$

C_ψ ثابتی می‌باشد که فقط به ψ بستگی دارد [۱۸].

۴- فرایند آزمایشگاهی

۴-۱- وسایل و مواد

مواد استفاده شده برای ساخت کامپوزیت‌ها شامل الیاف شیشه نوع E و ماتریس اپوکسی آرالدایت^۵ LY556 به همراه سخت کننده HY 951 می‌باشند. با استفاده از روش لایه‌چینی دستی نمونه‌های کامپوزیتی در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت و تحت فشار یک صفحه فلزی، قالب‌گیری شد. لایه‌های نهایی شامل ۱۶ لایه تک جهته با درصد حجمی الیاف ۶۰٪ می‌باشند. به منظور جداسازی راحت لایه‌ها پس از لایه‌چینی از یک پوشش ژله‌ای در سطح قالب استفاده شد. برای انجام آزمایش کشش، نمونه‌ها به ابعاد ۱۵×۲۰۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد D3039 ASTM بریده شدند.

ماشین سوراخ‌کاری تبریز مدل FP4M با حداکثر سرعت اسپیندل ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیش‌روی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه جهت انجام آزمایش سوراخ‌کاری بکار گرفته شد. همچنین دستگاه انیورسال کشش جهت تعیین استحکام قطعات کامپوزیتی بکار گرفته شد. این دستگاه مجهز به سیستم بال اسکرو است و عملکرد آن به صورت جابجایی ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر سرعت حرکت فک‌ها در حین بارگذاری ثابت است. محدوده حرکتی عملکرد دستگاه از ۰/۱ تا ۵۰۰ mm/min و ماکزیمم تناژ آن ۵ تن یا ۵۰۰۰ kgf است. سرعت کشش نمونه‌ها ۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد.

5. Araldite

در رابطه (۵) تعداد آزمایش، u تعداد تکرار، N_i تعداد تکرار برای آزمایش i ام است.

در حالت حداقل و حداکثر کردن، نسبت سیگنال به نویز طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$SN_i = -10 \log \left(\sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right) \quad \text{برای حداکثر کردن}$$

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2} \right) \quad \text{برای حداقل کردن} \quad (6)$$

بعد از محاسبه SN برای هر آزمایش، میانگین مقادیر SN

برای هر فاکتور و تراز محاسبه می‌شود. کلیه مقادیر SN در جدول وارد شده و برای هر پارامتر RP (حداقل $-SN$ حداکثر $SN=RP$) محاسبه می‌گردد. مقادیر RP بالاتر، تأثیر بیشتر و مقادیر RP پایین‌تر، تأثیر کمتری دارند [۱۷].

۳- آنالیز موجک

آنالیز موجک به عنوان تجزیه یک سیگنال به بخش‌هایی بر حسب یک سیگنال مادر تعریف می‌شود. در فرایند جداسازی موجک گسسته^۱، یک سیگنال به دو بخش تقسیم می‌گردد: تقریب^۲ و جزء^۳. تقریب بخش فرکانس پایین و جزء بخش فرکانس بالا سیگنال می‌باشد. در مرحله بعد، تقریب بدست آمده خود به یک تقریب و جزء تجزیه می‌شود. این فرایند ادامه خواهد یافت تا زمانی که به تراز مطلوب برسد. اطلاعات از دست رفته بین دو تقریب متوالی در جزء موجود می‌باشد. در موجک گسسته جزء‌های متوالی دوباره آنالیز نمی‌شوند. در عوض در موجک بسته‌ای^۴ مشابه روشی که برای تجزیه تقریب بکار گرفته شد، جزء نیز به دو بخش تجزیه می‌شود. بدین سان موجک بسته‌ای آنالیز بهتری را انجام می‌دهد. شکل ۴ درخت تبدیل موجک بسته‌ای را نشان می‌دهد.

تبدیل موجک $F(t)$ (هر تابع قابل انتگرال‌گیری) نسبت به موجک ψ توسط معادله (۷) بیان می‌شود [۱۸]:

$$CWT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{f}} F(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{f} \right) dt \quad (7)$$

که f نشان دهنده فرکانس، τ شیف زمانی و * مزدوج مختلط موجک می‌باشد.

1. Discrete
2. Approximation
3. Detail
4. Packet Wavelet

استفاده شد. به منظور جلوگیری از سایش پس از هر ۴ آزمایش، مته ها دوباره تیز می‌شوند، همچنین هر آزمایش دو بار تکرار شد.

جدول ۱ سه تراز برای سه پارامتر در روش تاگوچی

پارامترها	ترازها		
نرخ پیش‌روی F (mm/rev)	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۱
سرعت دورانی N (rpm)	۳۱۵	۶۳۰	۱۰۰۰
زاویه رأس θ (degree)	۹۰	۱۱۰	۱۳۰

۵- نتایج و بحث

۵-۱- آنالیز سوراخ‌کاری توسط روش تاگوچی

نتایج تجربی برای نیروی محوری (F_{th})، فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده (F_{da}) و مقادیر محاسبه شده سیگنال به نویز در جدول ۲ آورده شده است. نمادهای I و II در این جداول مبین اولین و دومین تکرار برای هر آزمایش می‌باشند. همچنین نتایج نیروی نهایی کشش (F_{II}) و استحکام کششی (S_r) به همراه مقادیر SN در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر استحکام کششی (S_r) از تقسیم نیروی کششی نهایی (F_{II}) به مقطع عرضی باقی‌مانده پس از سوراخ‌کاری تعیین می‌شود. آزمایش‌های شماره ۱ تا ۹ مربوط به قطعات سوراخ شده بر پایه آرایه ارتوگونال L_9 تاگوچی و آزمایش ۱۰ نمونه بدون سوراخ می‌باشد.

برای تعیین اثر هر متغیر نسبت سیگنال به نویز یا عدد SN برای هر آزمایش محاسبه می‌شود. اصول روش تاگوچی و معادلات برای محاسبه نسبت SN در بخش قبلی اشاره شده است. هوجنگ و همکارانش نشان دادند که میزان جدایش لایه-ای رابطه مستقیم با نیروی محوری دارد [۱۹]. یک مقدار بحرانی برای نیروی محوری وجود دارد که در نیروهای کمتر از آن جدایش لایه‌ای قابل چشم‌پوشی است؛ به عبارت دیگر جدایش لایه‌ای هنگامی اتفاق می‌افتد که نیرو از این حد بحرانی تجاوز کند. برای جلوگیری از جدایش لایه‌ای، نیروی محوری بایستی کمینه شود؛ لذا حالت حداقل SN انتخاب شده است. با توجه به جدول ۴ فاکتور نرخ پیش‌روی و به دنبال آن زاویه رأس مته بیشترین اثر را بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای داشته‌اند.

نرم افزار آکوستیک امیشن وین^۱ و سیستم جمع‌آوری داده-ها پی‌سی‌آی^۲ متعلق به شرکت پک^۳ برای دریافت اتفاقات^۴ آکوستیکی در حین آزمایش کشش بکار گرفته شد. کارت صوتی دستگاه، مدل AEDSP-32 به همراه پردازشگر دیجیتال سیگنال است که ماکزیمم نرخ نمونه‌برداری آن ۸ مگاهرتز و دامنه آن بین ۲۰ تا ۱۰۰ دسی‌بل می‌باشد. نرخ نمونه برداری انتخاب شده در تمام آزمایش‌ها ۱ مگاهرتز می‌باشد. یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک تک کریستاله با پهنای باند بالا، رزونانسی، که توسط شرکت پک تولید شده، به عنوان سنسور آکوستیک امیشن استفاده شد. این سنسور به نام پیکو^۵ با فرکانس رزونانسی ۵۱۳/۲۸ کیلوهرتز و محدوده بهینه کاری ۷۵۰-۱۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های آکوستیک امیشن توسط سنسور دریافت شده و سپس توسط پیش تقویت کننده^۶ کننده^۶ با ضریب ۴۰ دسی‌بل تقویت می‌شوند. سطح سنسور با با گیرس سیلیکونی خلاء پوشیده شد تا انتقال سیگنال بین نمونه و سنسور به خوبی صورت گیرد. حد آستانه^۷ ۳۵ دسی‌بل تعیین شد تا از نویز زمینه در حین آزمایش اجتناب شود.

۴-۲- طراحی آزمایش

روش تاگوچی برای بهینه‌سازی سه پارامتر شامل نرخ پیش‌روی F ، سرعت چرخشی اسپیندل N ، و زاویه رأس θ بکارگرفته شد. فاکتور جدایش لایه‌ای و نیروی کششی نهایی به عنوان دو خروجی مهم در نظر گرفته شد. در حالت بهینه، فاکتور جدایش لایه‌ای که معیاری از میزان خرابی بواسطه سوراخ‌کاری است، باید حداقل شود و نیروی کششی نهایی که معیاری از استحکام کششی سازه است، باید حداکثر شود. جدول ۱، سه تراز از سه پارامتر اشاره شده را نشان می‌دهد. با استفاده از آرایه ارتوگونال L_9 تعداد آزمایش‌های مورد نیاز از $3^3=27$ به ۹ کاهش می‌یابد. همه آزمایش‌ها سوراخ‌کاری بدون مایع خنک‌کار و در سرعت‌های اسپیندل ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه انجام می‌شود. مته ماریچ تند بر (HSS) با قطر ۴ میلی‌متر، زاویه ماریچ ۳۰ درجه و زوایای رأس مختلف برای همه آزمایش‌ها

1. AEWIn
2. PCI-2
3. Physical Acoustics Corporation
4. Event
5. PICO
6. Preamplifier
7. Threshold

جدول ۲ آرایه ارتوگونال L₉ و نتایج نیروی محوری سوراخ کاری، فاکتور جدایش لایه‌ای

شماره آزمایش	متغیرها			F _{th} (N)			F _{da}		
	نرخ پیش‌روی	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته	SN	II	I	SN	II	I
۱	۱	۱	۱	۸۵	۸۳	-۳۸/۴۹	۱/۰۴	۱/۰۴	-۰/۳۴
۲	۱	۲	۲	۱۱۲	۱۱۸	-۴۱/۲۲	۱/۰۶	۱/۰۷	-۰/۵۵
۳	۱	۳	۳	۱۴۳	۱۳۸	-۴۲/۹۵	۱/۰۷	۱/۱۱	-۰/۷۵
۴	۲	۱	۲	۱۳۱	۱۳۶	-۴۲/۵۱	۱/۱۱	۱/۱۰	-۰/۸۷
۵	۲	۲	۳	۱۵۸	۱۵۶	-۴۳/۹۲	۱/۱۵	۱/۱۶	-۱/۲۵
۶	۲	۳	۱	۱۲۲	۱۱۸	-۴۱/۵۸	۱/۰۹	۱/۰۹	-۰/۷۵
۷	۳	۱	۳	۱۷۸	۱۸۱	-۴۵/۰۸	۱/۱۷	۱/۱۸	-۱/۴۰
۸	۳	۲	۱	۱۶۱	۱۵۹	-۴۴/۰۸	۱/۱۴	۱/۱۵	-۱/۱۷
۹	۳	۳	۲	۱۹۵	۲۰۵	-۴۶/۰۲	۱/۲۵	۱/۲۲	-۱/۸۳

جدول ۳ آرایه ارتوگونال L₁₀ و نتایج نیروی کشش نهایی و استحکام کششی کاهش یافته

شماره آزمایش	متغیرها			F _u (N)			S _r (N/mm ²)		
	نرخ پیش‌روی	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته	SN	II	I	SN	II	I
۱	۱	۱	۱	۹۰۲۶	۹۱۷۵	۷۹/۱۸	۱۶۴/۱	۱۶۶/۸	۴۴/۳۷
۲	۱	۲	۲	۸۸۲۶	۸۷۵۷	۷۸/۸۸	۱۶۰/۴	۱۵۹/۲	۴۴/۰۷
۳	۱	۳	۳	۸۶۰۵	۸۵۸۷	۷۸/۶۸	۱۵۶/۴	۱۵۶/۱	۴۳/۸۸
۴	۲	۱	۲	۸۶۱۵	۸۵۰۵	۷۸/۶۵	۱۵۶/۶	۱۵۴/۶	۴۳/۸۴
۵	۲	۲	۳	۸۵۰۳	۸۴۱۵	۷۸/۵۵	۱۵۴/۶	۱۵۳	۴۳/۷۴
۶	۲	۳	۱	۸۷۰۴	۸۶۵۱	۷۸/۷۷	۱۵۸/۲	۱۵۷/۳	۴۳/۹۶
۷	۳	۱	۳	۸۲۰۳	۸۲۹۹	۷۸/۳۳	۱۴۹/۱	۱۵۰/۹	۴۳/۵۲
۸	۳	۲	۱	۸۴۱۲	۸۴۶۶	۷۸/۵۳	۱۵۲/۹	۱۳۵/۵	۴۳/۷۰
۹	۳	۳	۲	۸۳۱۳	۸۲۱۳	۷۸/۳۴	۱۵۱/۱	۱۴۹/۳	۴۳/۵۳
۱۰	-	-	-	۱۲۲۳۱	۱۲۵۸۴	-	-	-	-

جدول ۴ نسبت سیگنال برای نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای

رتبه	Δ	مقدار میانگین			پارامترها	
		۳	۲	۱	نرخ پیش‌روی	نیروی محوری
۱	۴/۱۸	-۴۵/۰۶	-۴۲/۶۷	-۴۰/۸۹	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته
۳	۱/۴۹	-۴۳/۵۲	-۴۳/۰۷	-۴۲/۰۳	نرخ پیش‌روی	سرعت چرخشی
۲	۲/۶۰	-۴۳/۹۸	-۴۳/۲۵	-۴۱/۳۸	فاکتور جدایش لایه‌ای	زاویه رأس مته
۱	۰/۹۲۴۴	-۱/۴۷۰۳	-۰/۹۵۵۹	-۰/۵۴۵۹	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته
۳	۰/۲۴۱۲	-۱/۱۱۰۸	-۰/۹۹۱۷	-۰/۸۶۹۶	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته
۲	۰/۳۷۹۱	-۱/۱۳۴۲	-۱/۰۸۲۸	-۰/۷۵۵۱	سرعت چرخشی	زاویه رأس مته

لبه برش^۱ افزایش می‌یابد که ممکن است سبب افزایش نیروی محوری شود.

دلیل این امر آن است که با افزایش نرخ پیش‌روی، تأثیر جان مته افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه رأس، زاویه

1. Cutting Edge Angle

از بین داده‌های آکوستیک امیشن در حوزه زمان، دامنه و شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی به منظور تحلیل فرایند انتخاب شد. این پارامترها به دلیل بهتر توصیف کردن شرایط آزمایش انتخاب شدند.

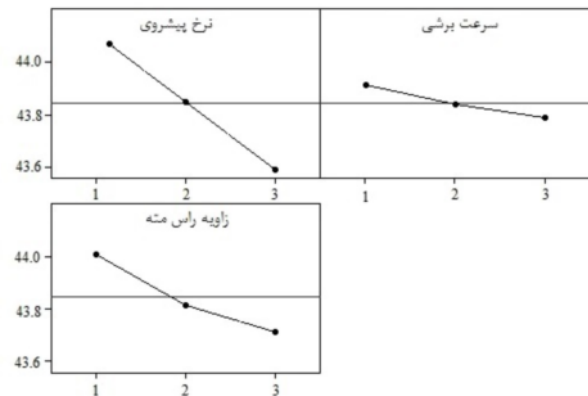
تغییرات دامنه و شمارش ضرب آهنگ‌ها در حین آزمایش کَشش برای نمونه‌های بدون سوراخ و سوراخ شده تحت شرایط بهینه به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مجموع تعداد دفعاتی را که سیگنال آکوستیک امیشن در هر مقطع زمانی انتخاب شده، از حد آستانه فراتر می‌رود، شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی^۱ گویند. مطابق شکل ملاحظه می‌شود شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی در تطابق خوبی با نیروی کَشش است. نمودار شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد. مرحله اول شامل یک دوره زمانی است که طی آن شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی تقریباً در حد ناچیزی باقی می‌ماند. این دوره زمانی، دوره خاموشی نام‌گذاری می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷-الف) نشان می‌دهد که زمان خاموشی برای نمونه بدون سوراخ ۶۵ ثانیه و برای نمونه سوراخ شده ۱۴ ثانیه می‌باشد. این مسأله را شاید بتوان این چنین توجیه کرد که در نمونه‌های بدون سوراخ پاره شدن الیاف در سطوح انرژی بالاتری اتفاق می‌افتد و به همین سبب زمان غیرفعال (زمانی که طی آن واقعه آکوستیکی ثبت نشده است) افزایش یافته است. همچنین در نمونه سوراخ شده به دلیل وجود منطقه جدایش لایه‌ای، ترک‌ها در ترازهای انرژی پایین‌تری شروع به رشد می‌کنند. مرحله دوم زمانی آغاز می‌شود که شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی با روند پایداری رشد می‌کند. مرحله نهایی نیز شامل شکست کامل می‌باشد. در این مرحله شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی بطور ناگهانی افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد.

اولین مکانیزم خرابی ظاهر شده در آزمایش کَشش کامپوزیت، ترک خوردن ماتریس می‌باشد؛ لذا می‌توان سیگنال‌های شناسایی شده اولیه را به این مکانیزم نسبت داد. مطابق شکل‌های ۶ و ۷-ب) محدوده دامنه برای این نوع سیگنال‌ها بین ۳۵-۵۰ دسی‌بل می‌باشد. این نوع سیگنال‌ها غالباً تا انتهای آزمایش ادامه خواهد یافت و بدان معنا است که مکانیزم ترک خوردن ماتریس تا مرحله نهایی (شکست کامل

استحکام کَششی یکی از خواص مکانیکی مهم مواد کامپوزیتی است که نقش به‌سزایی در تعیین عمر مفید سازه ایفا می‌کند؛ لذا هدف در اینجا افزایش استحکام کَششی است. به همین جهت حالت حداکثری SN انتخاب شده است. با توجه به شکل ۵ نرخ پیش‌روی، زاویه رأس مته و سرعت چرخشی اسپیندل به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام کَششی کاهش یافته داشته‌اند. افزایش نرخ پیش‌روی و زاویه رأس باعث افزایش خرابی اطراف سوراخ شده و در نتیجه باعث کاهش استحکام کَششی می‌شود. تغییر نرخ پیش‌روی (کاهش آن) منجر به کاهش بازدهی می‌شود؛ بنابراین اصلاح زاویه رأس برای بهبود استحکام کَششی کاهش یافته راه حل بهتری است. مطابق شکل ۵ در $F=0.025 \text{ mm/rev}$, $N=315 \text{ rpm}$ ، در $\theta=90^\circ$ استحکام کَششی به حداکثر مقدار نسبت SN می‌رسد. به عبارت دیگر استحکام کَششی به حداکثر خود می‌رسد، زمانی که تراز اول از هر پارامتر مورد مطالعه، انتخاب شود.

۵-۲- آنالیز حوزه زمان سیگنال آکوستیک امیشن در استحکام کَششی کاهش یافته

در هر آزمایش کَشش به دلیل آنکه هیستوگرام بارگذاری در طول آزمایش در اختیار است و هر مکانیزم شکست در تراز بارگذاری خاصی فعال می‌شود، تحلیل‌های حوزه زمان بسیار کارآمد می‌باشد. در این مرحله تنها به بررسی سیگنال‌های ناشی از شکست نمونه بدون سوراخ و نمونه سوراخ شده در حالت بهینه (حداقل نیرو و فاکتور جدایش لایه‌ای) که در بخش قبل با آنالیز تاگوجی تعیین شد، پرداخته می‌شود.

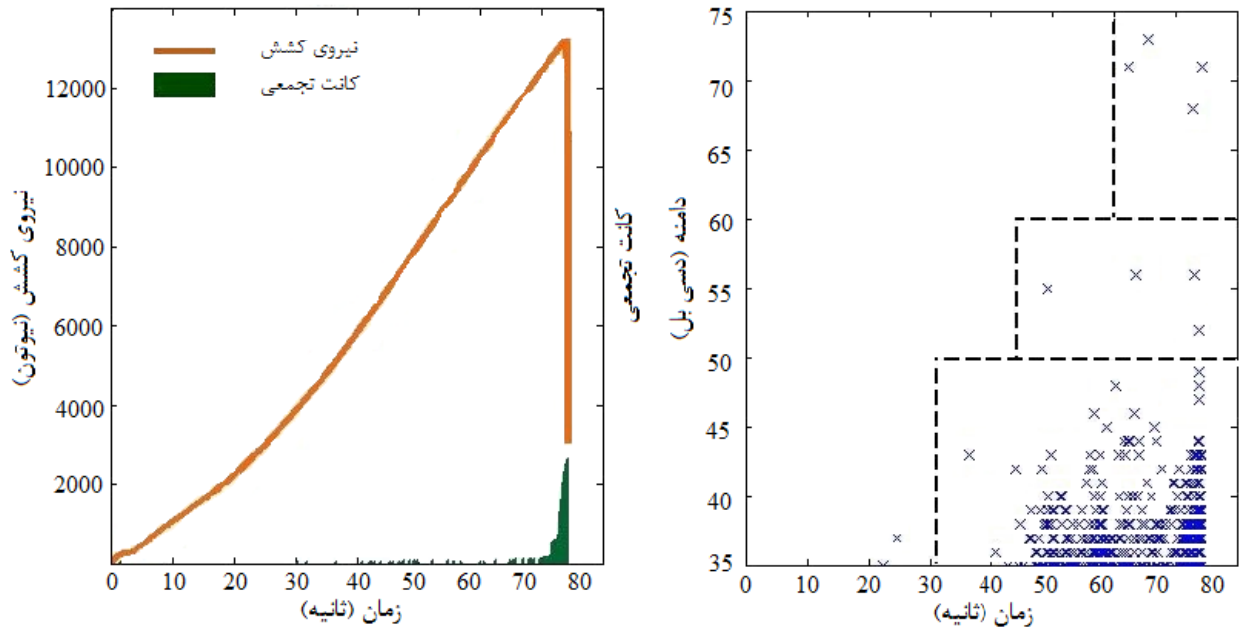


شکل ۵ مقادیر محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز برای استحکام کَششی کاهش یافته

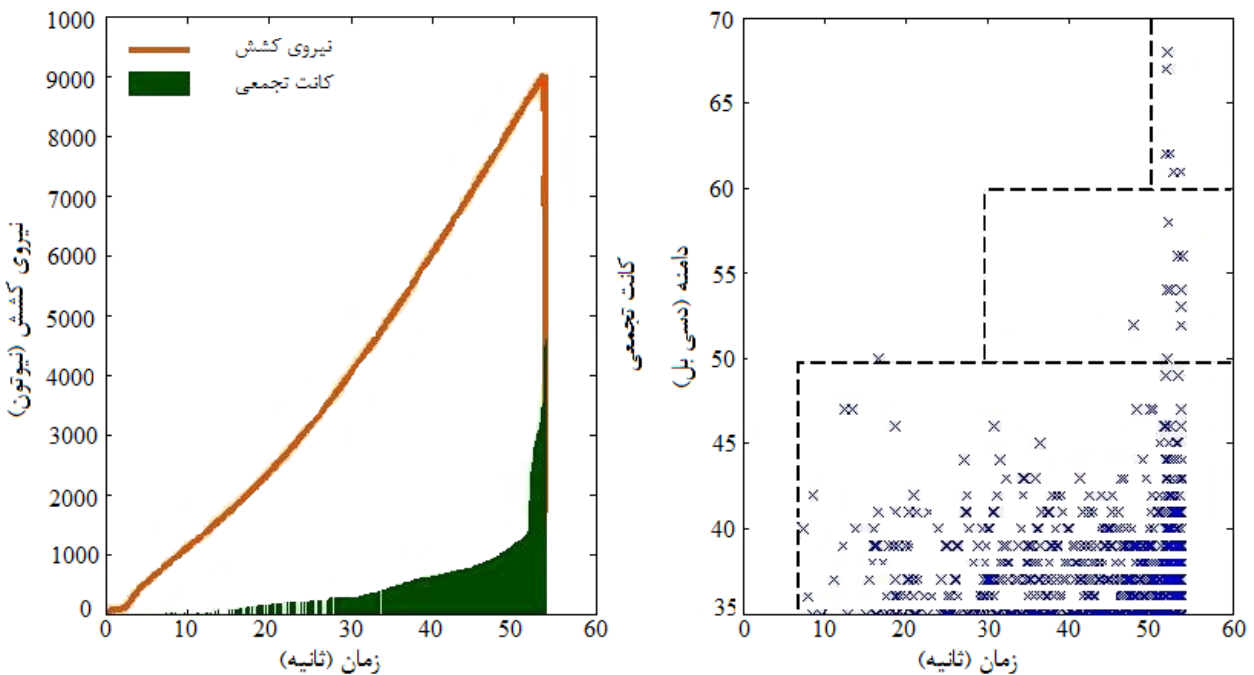
1. Cumulative Count

وجود ندارد، بنابراین مکانیزم‌های خرابی در تراز بالاتری از انرژی فعال می‌شوند. در مقابل، برای نمونه سوراخ شده به واسطه منطقه دچار جدایش لایه‌ای، انرژی خارجی کمتری برای فعال‌سازی مکانیزم‌های خرابی لازم است.

نمونه) ادامه می‌یابد. شکل ۸- الف یک سیگنال نمونه از این مکانیزم شکست را نشان می‌دهد. اختلاف مشاهده شده بین نمونه سوراخ شده و بدون سوراخ را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که در آزمایش کشش بخش عمده‌ای از انرژی خارجی صرف جوانه‌زنی ترک می‌شود. در نمونه بدون سوراخ، عیب اولیه



شکل ۶ نیروی کشش و شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی، دامنه بر حسب زمان برای آزمایش کشش نمونه بدون سوراخ

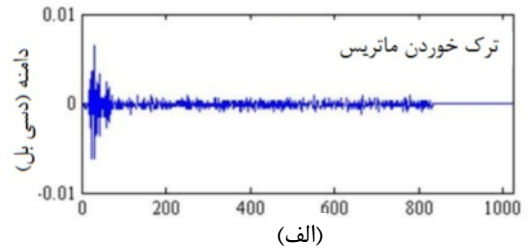


شکل ۷ نیروی کشش و شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی، دامنه بر حسب زمان برای آزمایش کشش نمونه سوراخ شده

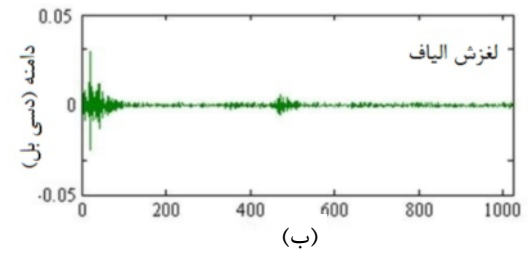
دیگر شکست فراهم می‌گردد.

لغزش الیاف در زمینه یکی از مکانیزم‌هایی است، که بواسطه اختلاف کرنش بین الیاف شیشه و رزین اپوکسی رخ می‌دهد. محدوده دامنه سیگنال این مکانیزم حدوداً ۵۰-۶۰ می- باشد. سیگنال نمونه مکانیزم لغزش الیاف در شکل ۸- ب نشان داده شده است. بالاترین حد دامنه مربوط به فرایند شکست الیاف می‌باشد که معمولاً در انتهای آزمایش مشاهده می‌شود. محدوده دامنه این مکانیزم ۶۰-۷۵ دسی‌بل می‌باشد. شکل ۸- ج سیگنال نمونه این مکانیزم را نشان می‌دهد.

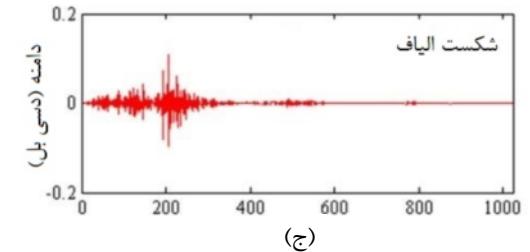
شکل ۹ نمودار انرژی آکوستیکی بر حسب دامنه را برای دو آزمایش کشش نمونه بدون سوراخ و سوراخ شده تحت شرایط بهینه نشان می‌دهد. برای آنالیز دیاگرام دامنه-انرژی، نمودار به ۳ ناحیه طبقه‌بندی شده است: ۱- دامنه کم - انرژی کم، ۲- دامنه متوسط - انرژی کم یا متوسط، ۳- دامنه بالا- انرژی بالا. این سه ناحیه را می‌توان به ترتیب به مکانیزم‌های ترک خوردن ماتریس، لغزش الیاف روی ماتریس و شکست الیاف نسبت داد. هدف از این مطالعه کلاس‌بندی دقیق تمام سیگنال‌ها نمی‌باشد و این ایده می‌تواند برای فعالیت‌های بعدی با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی فازی، الگوریتم K-mean یا دیگر روش‌های خوشه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد.



(الف)



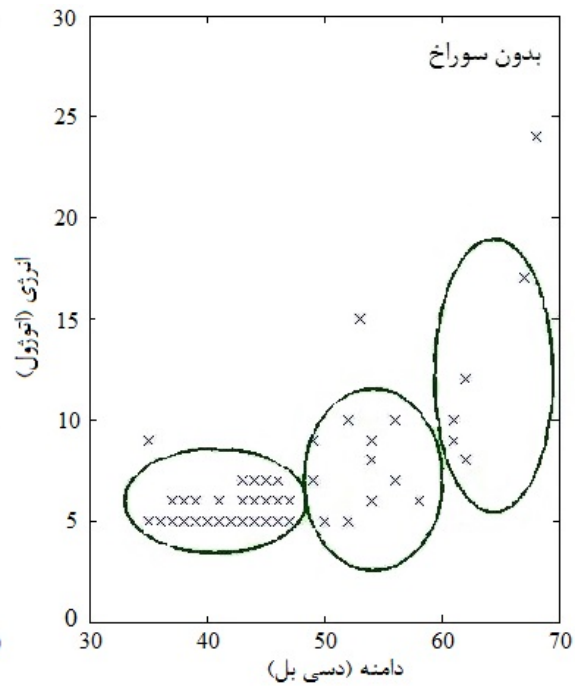
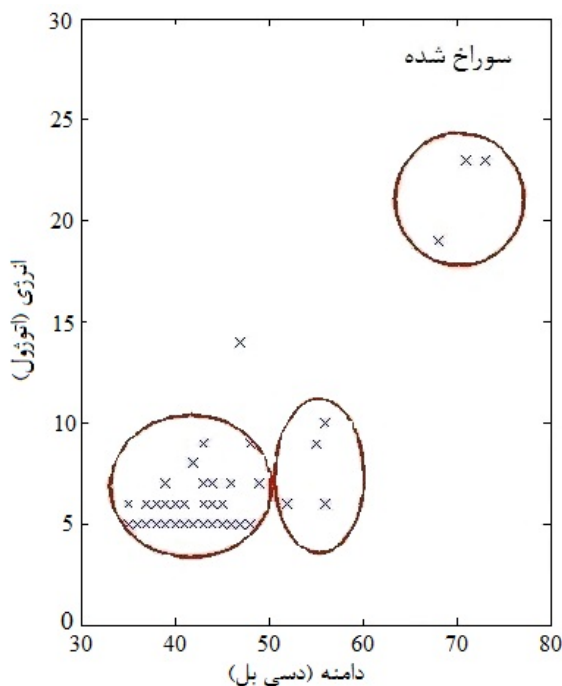
(ب)



(ج)

شکل ۸ سه سیگنال نمونه از مکانیزم‌های شکست؛ ترک خوردن ماتریس، لغزش الیاف و شکست الیاف

با افزایش بار محوری انرژی لازم برای فعال‌سازی مکانیزم‌های



شکل ۹ انرژی آکوستیکی بر حسب زمان نمونه بدون سوراخ و نمونه سوراخ شده

۵-۳- آنالیز داده های AE بر اساس موجک

تئوری موجک بسته‌ای در بخش قبلی مقاله توضیح داده شد. اشاره شد که سیگنال به مجموعه‌ای از المان‌ها^۱ تجزیه می‌شود و هر المان محدوده فرکانس معینی دارد. در این مقاله برای آنالیز سیگنال‌های آکوستیک امیشن معیار انرژی بکار گرفته شد. علت این است که اختلاف توزیع انرژی در هر المان می‌تواند به مکانیزم خرابی مشخصی مرتبط باشد. میزان انرژی هر المان پس از تجزیه همه سیگنال‌ها بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$EC_i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_i(\tau))^2 \quad (9)$$

که $EC_i(t)$ نشان دهنده انرژی المان i در تراز معین می‌باشد. انرژی کلی یک تراز برابر مجموع انرژی‌های تمام المان‌ها می‌باشد. در این تحقیق نسبت انرژی در المان‌های مختلف به انرژی کل محاسبه می‌گردد تا درصد انرژی برای هر المان بدست آید.

$$EPC_i(t) = \frac{EC_i(t)}{EC_{Total}(t)} \quad i = 1 \dots 2^j \quad (10)$$

که j تعداد ترازها و i تعداد تعداد المان‌ها می‌باشد.

بر پایه تئوری موجک بسته‌ای، دو پارامتر تعداد ترازها و انتخاب مناسب موجک مادر بسیار مهم می‌باشد. دو روش برای تعیین تعداد ترازها وجود دارد:

۱- مطابق با معیار ریاضی بنام آنتروپی

۲- سعی و خطای سیستماتیک. در این روش تعداد ترازها در حالت بهینه تعیین می‌شود، بدین صورت که با بیشتر شدن ترازها اطلاعات جدیدی بدست نیاید و کاهش ترازها نیز ناکافی باشد. در این مقاله از روش دوم استفاده شد و تعداد ترازها سه تعیین شد ($j=3$).

برای انتخاب موجک مادر که بهترین تطابق را با خصوصیات سیگنال داشته باشد، از روش مقایسه چشمی در بین موجک‌های استاندارد مادر موجود، استفاده شده است. پس از آزمون چشمی، موجک مادر db20 (یکی از اعضای خانواده موجک دبیچز^۳) که تشابه زیادی با خصوصیات سیگنال ثبت شده دارد، انتخاب شد. برخی از ویژگی‌های خانواده موجک دبیچز شامل بیوارتوگونال^۴، منظم، غیر متقارن و مناسب برای آنالیز داده‌های گذرا (مانند سیگنال‌های آکوستیک امیشن) است.

مطابق با تئوری نمونه‌برداری نایکوئیست^۵، حداکثر سرعت نمونه‌برداری^۶ باید دو برابر بالاترین فرکانس موجود در سیگنال باشد. در این مطالعه فرکانس نمونه‌برداری یک مگاهرتز تنظیم شد و بنابراین ماکزیمم فرکانس سیگنال‌های تبدیل شده ۵۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد ترازها سه در نظر گرفته شد ($j=3$) تعداد المان‌ها برابر با ۸ خواهد شد ($i=2^3$). محدوده فرکانسی برای این المان‌ها برابر است با: $\{0-62/5\}$ ، $\{62/5-125\}$ ، $\{125-187/5\}$ ، $\{187/5-250\}$ ، $\{250-312/5\}$ ، $\{312/5-375\}$ ، $\{375-437/5\}$ ، $\{437/5-500\}$ کیلوهرتز.

شکل‌های ۱۰- الف و ۱۱- الف درصد انرژی هر المان $EPC_i(t)$ سیگنال آکوستیک امیشن را در دو نمونه بدون سوراخ و سوراخ شده، حین آزمایش کشش نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محور عمودی درصد انرژی و محور افقی تعداد سیگنال‌ها می‌باشد. روش FFT برای بدست آوردن فرکانس هر سیگنال تجزیه شده بکار گرفته شد. فرکانس هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه‌های بدون سوراخ و سوراخ شده در شکل‌های ۱۰- ب و ۱۱- ب نشان داده شده است. مطابق شکل مشخص است که محدوده فرکانسی المان‌های تجزیه شده، از یک المان به المان دیگر افزایش می‌یابد. درصد انرژی برای آزمایش کشش نمونه‌های بدون سوراخ و با سوراخ در جدول ۳ نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود، بالاترین درصد انرژی در میان ۸ المان تراز سوم، المان ۲ ($EPC2$)، المان ۵ ($EPC5$) و المان ۶ ($EPC6$) می‌باشند. این سه المان حدود ۸۵٪ انرژی کل سیگنال را در بر دارند و دارای محدوده فرکانسی مختلفی هستند که به مکانیزم‌های مختلف شکست در حین آزمایش کشش، مرتبط می‌شوند. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد عدم وجود تفاوت در مکانیزم‌های غالب برای نمونه سوراخ شده و بدون سوراخ تحت کشش است. علت پدیده این است که مکانیزم‌های شکست در تست کشش همواره ثابت بوده و بنابراین با وجود سوراخ منابع فرکانسی تغییر چندانی نخواهند داشت. منابع اصلی آکوستیک امیشن در آزمایش کشش کامپوزیت‌ها، شکست ماتریس، لغزش الیاف، شکست الیاف و اصطکاک می‌باشد.

5. Nyquist

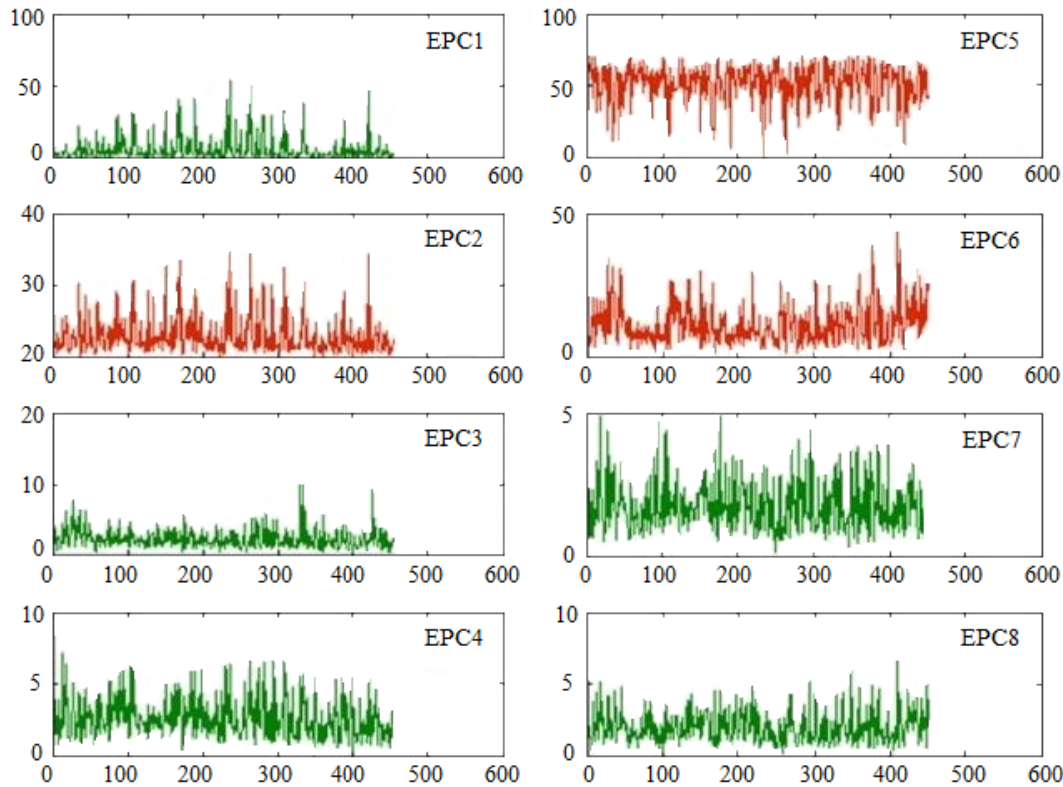
6. Sample Rate

7. Energy Percentage of Component

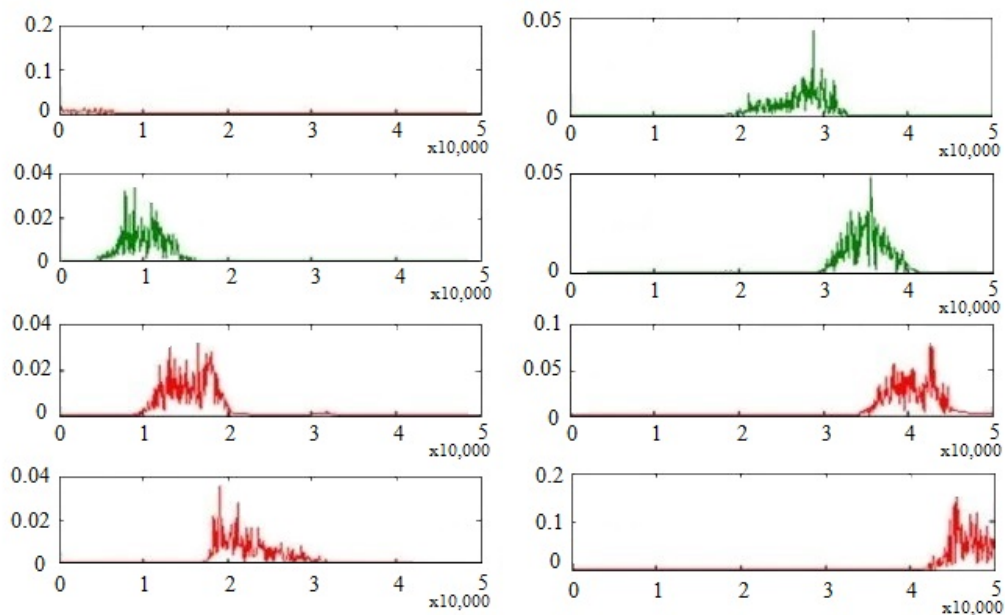
1. Component
2. Energy Component
3. Daubechies
4. Biorthogonal

نسبت دادن محدوده‌های فرکانسی غالب، به مکانیزم‌های خرابی مختلف می‌تواند به وسیله ارتباط بین فرکانس اصلی و سرعت آکوستیکی تعیین شود.

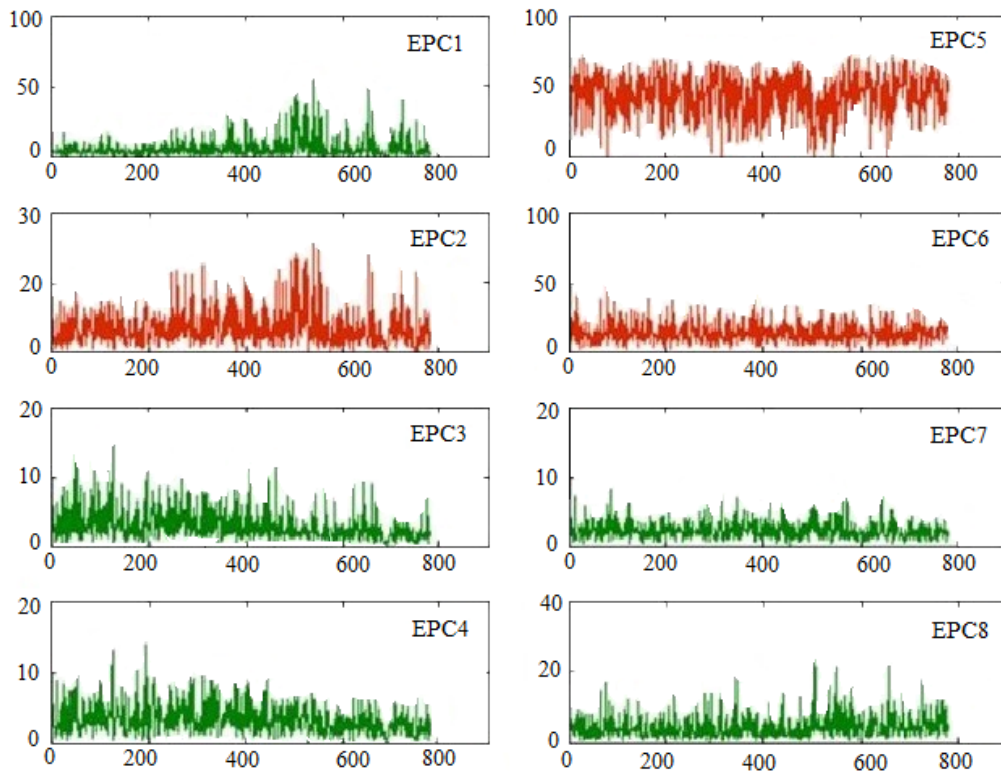
یکی از مهمترین مشکلات ایجاد ارتباط بین مکانیزم‌های مختلف شکست و محدوده‌های فرکانسی غالب حاصل از تجزیه موجک، می‌باشد.



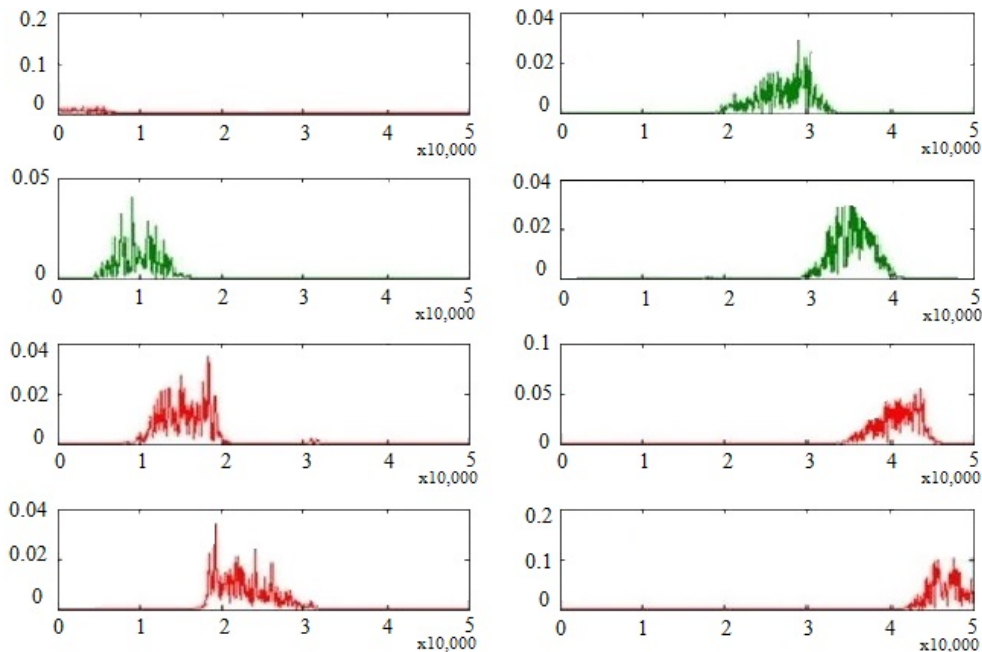
شکل ۱۰- الف درصد انرژی المان سیگنال آکوستیک برای نمونه بدون سوراخ



شکل ۱۰- ب فرکانس هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه بدون سوراخ



شکل ۱۱- الف درصد انرژی المان سیگنال آکوستیک برای نمونه سوراخ شده



شکل ۱۱- ب فرکانس هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه سوراخ شده

جدول ۵ انرژی هشت المان تراز سوم آنالیز ویولت

EPC8	EPC7	EPC6	EPC5	EPC4	EPC3	EPC2	EPC1	(N) استحکام کششی (Mpa)	نیروی نهایی کشش	آزمایش
۲/۰	۱/۷	۱۱/۴	۵۱/۴	۲/۷	۲/۳	۲۲/۹	۵/۵	۱۶۴/۱	۹۰۲۶	بدون سوراخ
۴/۶	۲/۳	۱۳/۶	۴۳/۷	۳/۳	۳/۰	۲۳/۴	۶	۱۶۳/۰۸	۱۲۲۳۱	سوراخ شده

توسط روش‌های با ناظر و بدون ناظر خوشه بندی کرد و سپس به تحلیل آنها توسط ویولت پرداخت. این ایده می‌تواند برای فعالیت‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیش‌روی و زاویه رأس مته بر استحکام کششی کاهش یافته پس از سوراخ‌کاری کامپوزیت شیشه-اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تنوع پارامترها و ترازها، روش طراحی آزمایشات تاگوچی برای یافتن حالت بهینه بر اساس استحکام کششی پیشنهاد استفاده شد. بر طبق تحلیل‌های حوزه زمان و زمان-فرکانس (موجک) از روی سیگنال آکوستیک امیشن ویژگی-هایی استخراج شد. که بر اساس آنها فرآیند کشش مانیتور شد. در زیر نتایج حاصل به صورت خلاصه آورده شده است:

- نرخ پیش‌روی و زاویه رأس مته به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی کاهش یافته داشته‌اند، در حالی که تأثیر سرعت چرخشی اسپیندل قابل چشم‌پوشی است. نحوه تأثیر این پارامترها بدین گونه است که با افزایش نرخ پیش‌روی و زاویه رأس مته، نیروی محوری افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی محوری، نرخ جوانه‌زنی ترک افزایش یافته که این ترک با اعمال نیروی کششی به سرعت رشد کرده و شکست کامل قطعه را به دنبال خواهد داشت. چنین نتیجه گرفته شد که می‌توان استحکام کششی را با انتخاب بهینه نرخ پیش‌روی و زاویه رأس مته بهبود بخشید. استحکام کششی پیشنهادی در نرخ پیش‌روی 0.25 mm/rev ، سرعت چرخشی اسپیندل 315 rpm و زاویه رأس 90° بدست آمد.

- شمارش ضرب آهنگ‌ها تجمعی به عنوان بهترین پارامتر برای تعیین مشخصه‌های استحکام کششی کاهش یافته انتخاب شد. فرآیند کشش از نظر آکوستیکی به سه مرحله اصلی که شامل مرحله خاموشی، رشد پایدار و شکست کامل می‌باشند، تقسیم شد و خصوصیات مکانیکی و آکوستیکی هر ناحیه تفکیک و مقایسه شد. همچنین اختلاف مشاهده شده بین نمونه بدون سوراخ و سوراخ شده تفسیر شد.

- مطابق با تحلیل دامنه و انرژی، سیگنال‌ها به سه دسته طبقه‌بندی شد و خصوصیات هر دسته تعیین شد. همچنین هر مکانیزم شکست به یکی از این دسته‌ها نسبت داده شد.

از طرفی سرعت آکوستیکی به چگالی و مدول الاستیسیته مطابق با رابطه (۱۱) وابسته است:

$$f \propto C \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (11)$$

که f فرکانس، C سرعت آکوستیکی الاستیک، ρ چگالی و E مدول الاستیسیته می‌باشد.

ترک‌خوردگی ماتریس اپوکسی محدوده فرکانسی کمتری نسبت به دیگر مکانیزم‌های خرابی دارد و بالاترین محدوده فرکانسی بواسطه شکست الیاف می‌باشد.

شکست ماتریس به عنوان اولین مکانیزم خرابی مشاهده شده، سیگنالی با محدوده فرکانسی پایین ایجاد می‌کند. بنابراین المان ۲ ($EPC2$) با فرکانس $62/5-125$ کیلوهرتز، می‌تواند به این مکانیزم خرابی نسبت داده شود. همان‌طور که گفته شد، شکست الیاف، آخرین مکانیزم خرابی ظاهر شده در آزمایش کشش، سیگنال‌هایی با بیشترین انرژی را در بین دیگر مودهای خرابی ایجاد می‌کند. با توجه به این نکته، شاید در نگاه اول این چنین نتیجه گرفته شود که المان ۵ با محدوده فرکانسی $250-312/5$ کیلوهرتز متعلق به شکست الیاف می‌باشد. اما باید به این نکته توجه داشت که با وجود انرژی بالای ایجاد شده بواسطه شکست الیاف، تعداد سیگنال‌های مرتبط به این مکانیزم به علت زمان کوتاه پدیداری آن، کمتر از دیگر مکانیزم‌ها می‌باشد. لذا برای انتخاب محدوده فرکانسی شکست الیاف، الزامی به انتخاب المانی با بالاترین انرژی نمی‌باشد. بنابراین المان سیگنال آکوستیک امیشن با بالاترین محدوده فرکانسی، المان ۶ یا $EPC6$ ، با فرکانس $375-312/5$ کیلوهرتز می‌تواند به شکست الیاف نسبت داده شود.

المان ۵ ($EPC5$) با محدوده فرکانسی $250-312/5$ کیلوهرتز یکی از فرکانس‌های غالب می‌باشد که بالاترین میانگین درصد انرژی را دارا می‌باشد. این المان می‌تواند به لغزش الیاف نسبت داده شود که پس از شکست ماتریس ظاهر می‌شود و تا انتهای تست ادامه خواهد یافت.

یک نکته انتقادی نسبت به استفاده از ابزار موجک در این مقاله و دیگر فعالیت‌های مشابه به آن وجود دارد و آن هم پوشانی بین بازه‌های فرکانسی فرایندهای مختلف شکست می‌باشد. به عنوان مثال در اینجا محدوده فرکانسی شکست الیاف و لغزش الیاف ممکن است با یکدیگر هم پوشانی داشته باشند. برای حل این مشکل ابتدا باید تک تک سیگنال‌ها را

- performance characteristics, *Measurement*, 45, 2012, pp. 1286-1296.
- [8] K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44, 2011, pp. 2138-2148.
- [9] Ravishankar S.R., Murthy C.R.L., "Application of acoustic emission in drilling of composite laminates", *NDT&E International*, Vol. 33, 2000, pp. 429-435.
- [10] Everson C.E., Cheraghi S.H., "The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, 1999, pp. 371-387.
- [11] Oskouei A.R., Ahmadi M., Hajikhani M., "Wavelet-based acoustic emission characterization of damage mechanism in composite materials under mode I delamination at different interface", *Express Polymer Letters*, Vol. 3, No. 12, 2009, pp. 804-813.
- [12] Velayudham A., Krishnamurthy R., Soundarapandian T., "Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 412, 2005, pp. 141-145.
- [13] Ni Q.Q., Iwamoto M., "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, 2002, pp. 717-728.
- [14] Loutas T.H., Kostopoulos V., Ramirez-Jimenez C., Pharaoh M., Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 1366-1375.
- [15] Bongiorno A., Capello E., Copani G., Tagliaferri V., "Drilled hole damage and residual fatigue behavior of GFRP", *European Conference on Composite Materials*, Naples, Italy, 1998, pp. 525-532.
- [16] Tagliaferri V., Caprino G., Diterlizzi A., "Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 30, No. 1, 1990, pp. 77-84.
- [17] Kilickap, E. "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite", *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, 2010, pp. 6116-6122.
- [18] Soman, K. P. and K. I. Ramachandran. *Insight Into Wavelets From Theory To Practice 2Nd Ed*, Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2005.
- [19] Hocheng H., Tsao C.C., "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 2006, pp. 1403-1416.
- محدوده تقریبی دامنه مکانیزم‌های شکست ماتریس، لغزش ییاف و شکست ییاف به ترتیب برابر (۳۵-۵۰) ، (۵۰-۶۰) دسی‌بل برای شرایط آزمایش و نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه در این مقاله تعیین شد.
- ابزار موجک برای تحلیل سیگنال‌های حاصل از تست کشش نمونه سوراخ شده و بدون سوراخ بکار گرفته شد. همچنین درصد انرژی هر المان برای شناسایی فرکانس‌های غالب در طول تست محاسبه شد. مطابق نتایج بالاترین درصد انرژی در میان ۸ المان تراز سوم، المان ۲ (EPC2)، المان ۵ (EPC5) و المان ۶ (EPC6) می‌باشند. این سه المان با محدوده‌های فرکانسی {۱۲۵-۶۲/۵}، {۳۱۲/۵-۲۵۰} و {۳۷۵-۳۱۲/۵} کیلوهرتز را می‌توان به ترتیب به مکانیزم‌های شکست ماتریس، لغزش ییاف و شکست ییاف نسبت داد.

۷- مراجع

- [1] Singh I., N. Bhatnagar., P. Viswanath, "Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study", *Materials & Design*, Vol. 29, 2008, pp. 546-553.
- [2] Bhatnagar N., Singh I., Nayak D., "Damage investigation in drilling of glass fiber reinforced plastic composite laminates", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 19, No. 6, 2004, pp. 995-1007.
- [3] Davim J. P., J. C. Rubio., A.M. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 1939-1945.
- [4] Marec A., Thomas J. H., Guerjouma 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, 2008, pp. 1441-1464.
- [5] Işık B., Ekici E., "Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, 2010, pp. 861-869.
- [6] Velayudham A., Krishnamurthy R., "Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, 2007, pp. 204-209.
- [7] A. Krishnamoorthy, S. Rajendra Boopathy, K. Palanikumar, J. Paulo Davim, Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple