

بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر فرآیند سوراخ کاری کامپوزیت ها و پایش آن توسط روش آکوستیک امیشن *

حسین حیدری^(۱) نوید ظریف کریمی^(۲) مهدی احمدی نجف آبادی^(۳) عبدالرضا رحیمی^(۴)

چکیده سوراخ کاری فرآیند اصلی برای مونتاژ کردن سازه های کامپوزیتی به ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی می باشد. یکی از مهم ترین عیوبی که حین سوراخ کاری کامپوزیت ها اتفاق می افتد، جدایش لایه ای است. در این مقاله اثر پارامترهای سوراخ کاری شامل نرخ پیش روی، سرعت برشی و زاویه ی رأس مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه ای با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل بررسی می شود. با توجه به نتایج، نرخ پیش روی و به دنبال آن زاویه ی رأس مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر نیروی محوری می باشند. هم چنین نمودار احتمال نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه ای استفاده گردید. مطابق نتایج تنها اثر معنادار، نرخ پیش روی است. روش آکوستیک امیشن به همراه روش تحلیل سیگنال موجک برای پایش فرآیند سوراخ کاری و تفکیک حوزه ی فرکانسی مکانیزم های مختلف برش به کار گرفته شده است. پس از تحلیل سیگنال های آکوستیک امیشن در حوزه ی زمان-فرکانس (موجک)، المان ۲ (EPC2) با محدوده ی فرکانسی ۶۲/۵-۱۲۵ کیلوهرتز به ترک خوردن ماتریس و المان ۵ (EPC5) با محدوده ی فرکانسی ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ به برش الیاف نسبت داده شد.

واژه های کلیدی سوراخ کاری با مته ی مارپیچ، کامپوزیت، آکوستیک امیشن، آنالیز موجک.

Study of the Effect of Machining Parameters on Drilling of Composite Materials and Monitoring of Process by Acoustic Emission

H. Heidary N. Zarif Karimi M. Ahmadi Najafabadi A. Rahimi

Abstract Drilling is one of the main machining processes carried out in the assembly stage of automobile manufacturing and aerospace components. Generally, delamination is considered as a major problem during drilling of composite materials. In this paper, the effects of feed rate, cutting speed and drill point angle on thrust force and delamination factor have been studied by using full factorial design. According to the results, feed rate has the most significant effect on thrust force followed by drill point angle. Moreover, the Half-Normal plot was used to identify which experiment factors have significant effects on the delamination factor; According to the results, feed rate has the most important effect. Acoustic emission signals and wavelet analysis were employed to monitor drilling process and discriminate frequency distributions of different cutting mechanisms. After time-frequency analyzing of AE signals, component 2 (EPC2) with frequency range of 62.5-125 kHz was attributed to matrix cracking and component 5 (EPC5) with frequency range of 250-312.5 kHz and average energy of 32% was attributed to fiber cutting.

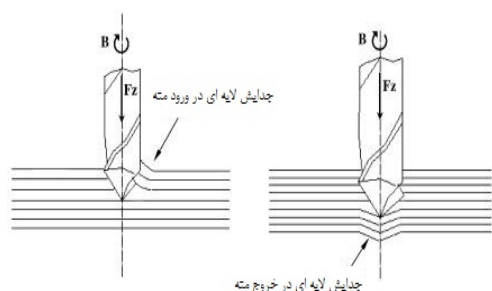
Key Words Twist Drilling, Composite, Acoustic Emission, Wavelet Analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱۰/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۴/۱ می باشد.

- (۱) نویسنده ی مسئول: دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق.
- (۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق.
- (۳) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- (۴) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

جدایش لایه‌ای یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت‌ها می‌باشد که معمولاً در سوراخ‌کاری در هنگام ورود و خروج مته اتفاق می‌افتد. به جدایش لایه‌ای در هنگام ورود مته Peel up و به جدایش لایه‌ای در هنگام خروج مته Push up می‌گویند (شکل ۱).



شکل ۱ عیوب جدایش لایه‌ای در ورود و خروج مته [4]

جدایش لایه‌ای در هر دو مکانیزم رابطه‌ای مستقیم با نیروی محوری دارد. در هنگام ورود مته پس از آن‌که لبه‌ی برشی با لمینت تماس برقرار نمود، نیروی برشی اعمال‌شده در جهت محیطی یک نیرو در راستای محوری به سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث جدایش لایه‌ای در صفحه بالایی لمینت می‌شود. زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد ضخامت لایه‌ی بریده‌شده کم می‌شود. در چنین نقطه‌ای تنش ناشی از نیروی محوری از مقاومت بین لایه‌ای فراتر می‌رود و جدایش لایه‌ای رخ می‌دهد [4].

معیارهای مختلفی برای اندازه‌گیری جدایش لایه‌ای وجود دارد. به‌طور مرسوم فاکتور جدایش (F_d) لایه‌ای مطابق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad \text{یا} \quad F_d = \frac{A_{max}}{A_0} \quad (1)$$

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

امروزه استفاده از کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه (Glass Fiber Reinforced Plastic) در صنایع مختلف به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است که علت آن خواص ویژه‌ی این دسته از کامپوزیت‌ها از قبیل سفتی ویژه‌ی بالا، مقاومت خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم و مقاومت در برابر اشعه‌های اتمی می‌باشد. در مقایسه با فلزات، GFRP با وزن سبک‌تر، مقاومت به‌زوال بیش‌تری به‌واسطه‌ی اثرات شیمیایی و بیولوژیکی دارد.

سوراخ‌کاری فرآیند اصلی برای اسمبل کردن سازه‌های کامپوزیتی به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی می‌باشد. برخی گزارش کرده‌اند که بیش از ۱۰۰۰۰۰ سوراخ در یک موتور کوچک سازه فضایی وجود دارد که اکثراً اتصال‌دهنده می‌باشند. با وجود حجم بالای عملیات سوراخ‌کاری با انتخاب بهینه‌ی پارامترها و کاهش میزان خرابی می‌توان به میزان ۶۰٪ از میزان تلفات و از کار افتادگی قطعات جلوگیری نمود. هم‌چنین با وجود تنوع بسیار سازه‌های کامپوزیتی از نظر نوع ترکیب، خواص و نوع بارگذاری و کارکرد، یافتن پارامترهای ماشین‌کاری بهینه نیازمند هزینه و زمان زیادی می‌باشد [1].

یافتن شرایط برش مناسب به‌واسطه‌ی هم‌زمانی وجود فایبر ساینده و سخت و ماتریس نرم، دشوار است. عیوب ماشین‌کاری سوراخ اثر مهمی در کاهش مقاومت و عمر خستگی لمینت‌های کامپوزیتی دارد. به‌علاوه دانش موجود در ماشین‌کاری فلزات به‌طور مستقیم قابل استفاده در کامپوزیت‌ها نمی‌باشد [2].

مهم‌ترین عیوب به‌وجودآمده در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها جدایش لایه‌ای، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف و اثرات سوء حرارتی می‌باشد. بیرون کشیده شدن الیاف در سوراخ‌کاری و نرم شدن ماتریس از عوامل انقباض سوراخ هستند [3].

دیویم و همکارانش [5] یک ضریب فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده را مطابق با رابطه‌ی زیر ارائه نمودند که بخش اول این رابطه اندازه‌ی ترک و بخش دوم اندازه‌ی خرابی را نشان می‌دهد:

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

با در نظر گرفتن تعاریف مناسب برای ضرایب α و β فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده برابر خواهد شد با:

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (3)$$

که A_d مساحت ناحیه‌ی خرابی است. بخش عمده‌ی تحقیقات در زمینه‌ی سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها درباره‌ی بهینه‌سازی و یافتن پارامترهای مناسب با استفاده از روش‌های مختلف می‌باشد. در فلزات مهم‌ترین پارامترهای بهینه‌سازی اغلب صافی سطح و کنترل سایب ابزار می‌باشد، در حالی که در کامپوزیت‌ها عدم عیوب و عدم کاهش مقاومت لمینت در ارجحیت قرار دارد. پارامترهای قابل کنترل در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها اغلب نرخ پیش‌روی، سرعت اسپیندل و پارامترهای هندسی مته می‌باشد. در مورد پارامترهای هندسی، پارامترهای جان مته و زاویه‌ی رأس تأثیر مهم‌تری بر نیروی محوری دارند. پایش آنلاین فرآیند سوراخ‌کاری مزایای بسیاری از جمله کنترل فرآیند در حین آزمایش را داراست، با این وجود تعداد روش‌های پایش آنلاین بسیار محدود می‌باشد. مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش، استفاده از داده‌های نیروی محوری و گشتاور برشی برای توصیف فرآیند است. اما این داده‌ها کافی نیست، چون اطلاعاتی در مورد مکانیزم‌های شکست نمی‌دهد. هم‌چنین هزینه‌ی تجهیزات مربوط بالا می‌باشد. در این مطالعه، برای ارزیابی فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها از روش آکوستیک امیشن

استفاده گردید. روش آکوستیک امیشن (AE) یکی از روش‌های آنلاین است که اساس آن بر دریافت امواج الاستیک منتشرشده از منابع موضعی به واسطه‌ی آزاد شدن سریع انرژی می‌باشد [6]. امواج آکوستیکی که از نمونه منتشر می‌شوند خاصیت غیر پایداری (Non-stationary) و هم‌پوشانی گذرا (Overlapping transient) دارند. منابع ایجاد سیگنال در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها به دو روش عمده طبقه‌بندی می‌شود: تغییر شکل به واسطه‌ی خرابی و فرآیند برش. به‌عنوان مثال ترک خوردن ماتریس متعلق به گروه اول و برش ماتریس متعلق به گروه دوم می‌باشد. برای شناسایی مکانیزم‌های مختلف شکست و برش در فرآیند سوراخ‌کاری استفاده از آنالیزهای مختلف سیگنال امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. هدف اصلی آنالیز سیگنال، استخراج اطلاعات از سیگنال‌هایی است که در ارتباط با پدیده‌های مختلف در فرآیندهای گوناگون می‌باشند. تحلیل و پردازش سیگنال‌ها، معمولاً در سه حوزه‌ی زمان، فرکانس و زمان-فرکانس قابل انجام است. در تحلیل‌های حوزه‌ی زمان، معمولاً ویژگی‌هایی از شکل موج (Waveform) استخراج می‌شود و با توجه به توزیع‌های آماری تفسیری بر روی سیگنال انجام می‌گیرد. در تبدیل فرکانسی مانند FFT بخش کوچکی از سیگنال در حوزه‌ی زمان که پنجره‌ی زمانی نامیده می‌شود، انتخاب می‌شود و طیف فرکانسی آن با استفاده از الگوریتم تبدیل به‌کار رفته در تحلیل محاسبه می‌گردد [7]. در تحلیل فرکانسی، هر مکانیزم خرابی به‌وسیله‌ی اختلاف در فرکانس ماکزیمم به‌دست آمده توسط آنالیز FFT به‌دست می‌آید. تحلیل در حوزه‌ی مشترک زمان و فرکانس موضوعی است که اولین بار گابور در سال ۱۹۴۶ با ارائه‌ی تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه سر فصل آن را گشود. برای تحلیل سیستم‌های یک‌نواخت که فرکانس‌های موجود در آن‌ها در زمان‌های مختلف ثابت باقی می‌ماند و همچنین سیگنال‌های ایستا از

روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه مانند PSD استفاده می‌شود. اما در پردازش سیگنال‌های غیریک‌نواخت که دارای فرکانس‌های متغیر با زمان و همچنین سیگنال‌های غیرایستا که مشخصات آماری آن‌ها به زمان وابسته است، تبدیل فوریه کارایی لازم را ندارد و قادر به آنالیز سیگنال‌هایی که شامل پدیده‌های گذرا، تغییرات ناگهانی و تحریک ضربه باشند، نخواهد بود. درحالی که این خصوصیات از مهم‌ترین ویژگی‌های یک سیگنال بوده و اغلب سیگنال‌های ارتعاشی دارای چنین خواصی هستند. برای رفع این مشکل از روش‌های تبدیل زمان-فرکانسی استفاده می‌شود که توانایی تحلیل سیگنال در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس را دارند [8].

در این بخش به بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی سوراخ‌کاری کامپوزیت و مونیتورینگ آن می‌پردازیم. برخی از محققان به بررسی پارامترهای مؤثر بر سوراخ‌کاری و بهینه‌سازی آن پرداختند. خاشابا و همکارانش [9] اثرات متغیرهای برش (سرعت برشی و نرخ پیش‌روی) را بر نیروی محوری، گشتاور و جدایش لایه‌ای ورودی و خروجی در سوراخ‌کاری FRCM با درصدهای مختلف فایبر بررسی نمودند. آن‌ها از آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی استفاده نمودند. نتایج نشان داد افزایش نیروی محوری و گشتاور با افزایش درصد الیاف رابطه‌ی مستقیم دارد.

بحث دیگری که در فرآیند سوراخ‌کاری مطرح است، مونیتورینگ آن می‌باشد. راویشانکار و همکارانش [10] برای پایش سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها از روش آکوستیک امیشن استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، افزایش نیروی محوری باعث افزایش تراز AE-RMS سیگنال می‌شود. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که ارزیابی خرابی ایجاد شده در سوراخ‌کاری به‌وسیله ویژگی‌های سیگنال آکوستیک امیشن امکان پذیر است. ارول و همکارانش [11] سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های

پلیمری را توسط AE پایش نمودند. مطابق با طیف فرکانسی سیگنال‌های به‌دست آمده مشخص گردید، محدوده‌ی فرکانسی فرآیند بین ۳۰-۱۵۰ کی‌هرتز باشد. گرچه هنوز از ابزار موجک در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها استفاده نشده است با این وجود برای تحلیل‌های سیگنال‌های آکوستیک امیشن در دیگر تست‌های مکانیکی از روش موجک استفاده گردیده است [12]. ولایدهام و همکارانش [13] از تبدیل موجک بسته‌ای (WPT) برای مونیتورینگ رفتار دینامیکی سوراخ‌کاری کامپوزیت‌هایی با درصد بالای الیاف استفاده نمودند. درصد بالای الیاف باعث سایش شدید ابزار می‌گردد. کینگ نی و همکارانش [14] ترتیب زمانی اتفاق افتادن هر مود و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر را برای شکست الیاف و دیگر مکانیزم‌های شکست به روش آنالیز موجک شناسایی نمودند. آن‌ها نشان دادند که آنالیز موجک ابزار قدرتمندی برای شناسایی مودهای میکروخرابی و مکانیزم‌های میکروشکست مشخص در مواد کامپوزیتی می‌باشد.

در مقالات اشاره‌شده تلاشی برای یافتن ویژگی مشخصی به‌منظور تحلیل پدیده‌های اتفاق‌افتاده در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها نشده است. به‌عبارت دیگر تا به حال محدوده‌ی فرکانسی معینی برای مکانیزم‌های مختلف برش و شکست در حین فرآیند ارائه نگردیده است. در این مقاله ابتدا به‌کمک روش طراحی آزمایش عاملی کامل مؤثرترین پارامترها و حالت بهینه‌ی شرایط ماشین‌کاری تعیین گردید. هم‌چنین پس از معرفی آنالیز موجک، فعالیت‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. در بخش‌های بعدی نتایج در حوزه‌های زمان و زمان-فرکانس آنالیز گردیده و در نهایت نتیجه‌گیری جامعی ارائه شده است.

موجک

در تحلیل فوریه سیگنال به اجزای سازنده‌ی سینوسی خود شکسته می‌شود اما در تبدیل موجک، سیگنال

اگر تابعی دو مشخصه‌ی فوق را داشته باشد یک موجک مادر نامیده می‌شود.

تابع ψ در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس محدود می‌شود و قابلیت اعمال انتقال (Shifting) به میزان b در حوزه‌ی زمان و مقیاس کردن (کشیدن و یا فشردن سیگنال) به میزان a در حوزه‌ی فرکانس را داراست. به این ترتیب $\psi_{a,b}(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > b \in \mathbb{R} \quad (6)$$

رزولوشن زمانی و فرکانسی تبدیل موجک، به مقدار مقیاس a بستگی دارد.

محاسبه‌ی مضارب موجک در تمام مقیاس‌ها و جابه‌جایی‌های ممکن، حجم محاسبات زیادی را نیاز دارد. به همین علت می‌توان نشان داد که اگر مقادیر مقیاس و جابه‌جایی به صورت $a = 2^j$ و $b = k2^j$ انتخاب شوند، علاوه بر آن که تحلیل بسیار کاراتر می‌شود، دقت نیز افزایش می‌یابد. به چنین تحلیلی، تبدیل موجک گسسته (DWT) می‌گویند. یعنی در واقع مقادیر مقیاس و انتقال باید به صورت اعداد خاص تعریف شوند. بنابراین تابع موجک در حالت گسسته به صورت زیر در می‌آید [15]:

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}n - k), \quad (j,k) \in \mathbb{Z}^2 \quad (7)$$

و ضرایب DWT سیگنال زمان گسسته $x(n)$ با روابط (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند:

$$C(j,k) = \sum_{n \in \mathbb{N}} x(n) \cdot \psi_{j,k}^*(n) \quad (8)$$

$$D_j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j,k) \psi_{j,k}(n) \quad (9)$$

در فرآیند جداسازی موجک گسسته، یک سیگنال به دو بخش تقسیم می‌گردد: تقریب (Approximation)

به صورت توابعی از مقیاس a (معادل فرکانس) و جابه‌جایی یا شیفت b (معادل زمان) از یک موجک شکسته می‌شود. تبدیل موجک در ابتدای دهه‌ی ۱۹۸۰ توسط مورلت معرفی شد که برای ارزیابی داده‌های زلزله به کار رفت. تبدیل موجک از مزایای زیادی نسبت به تبدیلات زمان-فرکانسی دیگر مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل ویگنر-ویل برخوردار است که از آن جمله می‌توان به تفکیک پذیری آن اشاره نمود. در واقع در تبدیل موجک به جای آن که سیگنال به هارمونیک‌های خود تجزیه شود، به توابع اصلی موضعی به نام موجک‌ها تجزیه می‌شود. هر موجک دارای انرژی محدود می‌باشد که در موقعیت متفاوتی نسبت به موجک‌های دیگر بر روی محور زمان قرار می‌گیرد و در فاصله‌ی کافی از موقعیت مرکزی خود، مقدار آن به سمت صفر می‌گراید. موجک‌ها در مقیاس‌های بالا بسیار کوتاه اند و در مقیاس‌های پایین، بازه‌ی زمانی نسبتاً طولانی تری را تحت پوشش قرار می‌دهند. این ویژگی موجک‌ها، در آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی دریافت شده از ماشین‌ها بسیار مناسب می‌باشد، چرا که رفتار موضعی سیگنال را آشکار می‌سازد.

موجک گسسته. یک تابع پیوسته‌ی زمانی با مقدار حقیقی یا مختلط $\psi(t)$ را در نظر بگیرید که دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱- انتگرال تابع در بازه‌ی $(-\infty, \infty)$ مساوی صفر باشد.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \cdot dt = 0 \quad (4)$$

۲- تابع متعلق به مجموعه‌ی توابع R^2 باشد یعنی:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 \cdot dt < \infty \quad (5)$$

لمینت‌ها به وسیله‌ی لایه چینی دستی و با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر آماده شدند. ضخامت کامپوزیت ۵ میلی‌متر و ۱۳ لایه با درصد حجمی الیاف ۶۰٪ و نسبت پواسون ۰/۳ است.

جدول ۱ خواص مکانیکی رزین اپوکسی و الیاف شیشه به‌کار رفته

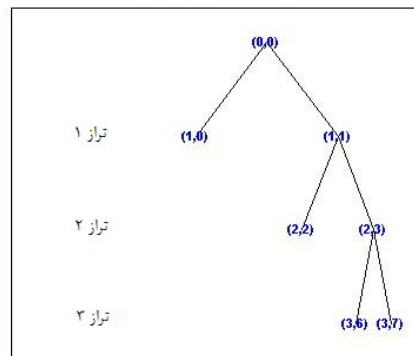
مقاومت نهایی کشش (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	*چگالی	
۸۰	۲/۷	۱/۱۲	رزین اپوکسی
۲۱۵۰	۷۴	۲۹۲	الیاف شیشه بافته شده

* برای پلیمر واحد چگالی g/cm^3 و برای الیاف شیشه چگالی سطح در نظر گرفته می‌شود یعنی g/cm^2

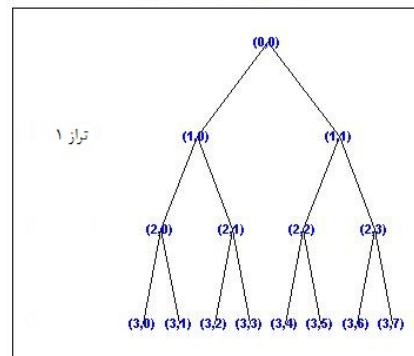
تجهیزات. آزمایش سوراخ‌کاری توسط ماشین فرز عمودی FP4M ساخته شده توسط شرکت تبریز انجام می‌گیرد. نیروی محوری در حین ماشین‌کاری توسط دینامومتر مدل B9255 متعلق به شرکت کیستلر (Kistler) اندازه‌گیری می‌شود. مته‌ی ماریپچ استاندارد HSS با قطر ۱۰ میلی‌متر و زاویه‌ی ماریپچ ۳۰ درجه برای آزمایش به‌کار گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر سایش بر آزمایش‌ها بعد از هر ۴ آزمایش ابزار تعویض شده و برای جلوگیری از واکنش‌های شیمیایی ناخواسته از مایع خنک‌کار استفاده نگردیده است. هر آزمایش دو بار تکرار شد. مجموعه آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. دستگاه آکوستیک امیشن متعلق به کمپانی PAC به‌همراه یک سنسور پیزوالکتریک با فرکانس رزونانسی ۵۱۳/۲۸ کیلوهرتز و محدوده‌ی فرکانسی بهینه ۱۰۰-۷۵۰ کیلوهرتز به‌کار گرفته شد. سیگنال‌های AE توسط سیستم داده‌برداری PCI-2 جمع‌آوری و توسط نرم‌افزار AEWIn به نمایش گذاشته می‌شود. سنسور بر روی نمونه، نزدیک سوراخ

و جزء (Detail). تقریب، بخش فرکانس پایین سیگنال می‌باشد و جزء، بخش فرکانس بالا می‌باشد. در مرحله‌ی بعد، تقریب به‌دست آمده خود به یک تقریب و جزء تجزیه می‌شود. این فرآیند 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 (Packet Wavelet)، جزء نیز به دو بخش تجزیه می‌شود. بدین سان موجک بسته‌ای آنالیز به‌تری را انجام می‌دهد. شکل (۲) درخت تبدیل موجک گسسته و بسته‌ای را نشان می‌دهد:

تبدیل موجک گسسته



تبدیل موجک بسته



شکل ۲ درخت تبدیل موجک گسسته و بسته‌ای

فرآیند آزمایشگاهی

مواد. نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه است. خواص رزین اپوکسی و الیاف شیشه در جدول (۱) آورده شده است.

کمی برای تعیین تقابل اثر پارامترها صورت گرفته است. دلیل انتخاب طرح عاملی کامل تعیین اثرات متقابل پارامترهاست. افزایش تعداد ترازها باعث افزایش چشم گیر آزمایش‌ها و در نتیجه هزینه می‌گردد. بنابراین، با توجه به فعالیت‌های قبلی صورت گرفته تنها دو تراز انتخاب گردید. طرح‌های عاملی کامل مزایای زیادی در طراحی آزمایش دارند. به‌عنوان مثال اگر اثر متقابل وجود داشته باشد، آن‌گاه استفاده از طرح عاملی کامل با هدف اجتناب از نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین طرح‌های عاملی کامل امکان برآورد اثرات یک عامل را به‌ازای سطوح مختلف عامل‌های دیگر فراهم می‌سازند و این باعث می‌شود تا نتایج حاصل به‌ازای محدوده‌ای از شرایط آزمایشی معتبر باشد. نرم‌افزار مینی‌تب (Minitab) که یکی از نرم‌افزارهای مشهور و قدرتمند در زمینه‌ی تحلیل‌های آماری می‌باشد، برای تهیه‌ی ماتریس طراحی و آنالیز داده‌ها به‌کار گرفته شد. سه فاکتور نرخ پیش‌روی، سرعت برشی و زاویه‌ی رأس مته هر یک در دو تراز (طرح کامل 2^3) به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای به‌عنوان مهم‌ترین پاسخ‌های خروجی در نظر گرفته شد. فاکتورهای ورودی، ترازهای مربوط و پاسخ‌های خروجی در جدول (۲) آورده شده است.

(با فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر)، با استفاده از گیرس سیلیکونی به‌عنوان کوپلنت آکوستیکی قرار داده شد. برای حذف نویز زمینه، حد آستانه ۳۵ دسی‌بل قرار داده شد.



شکل ۳ مجموعه آزمایش سوراخ‌کاری.

طراحی آزمایش. آزمایش‌های سوراخ‌کاری براساس طرح عاملی کامل (Full Factorial Design) طراحی گردید. منظور از طرح عاملی کامل این است که در اجرای کامل یا تکرار آزمایش، تمام ترکیب‌های حاصل از سطوح عامل‌های مورد نظر بررسی شود. در مطالعات صورت گرفته توسط نویسندگان [16] و سایر محققان [2, 4, 17] اثر پارامترهای ماشین‌کاری به‌وسیله‌ی طراحی آزمایش تاگوچی و آنالیز سیگنال به نویز بررسی گردیده است. با این وجود تلاش بسیار

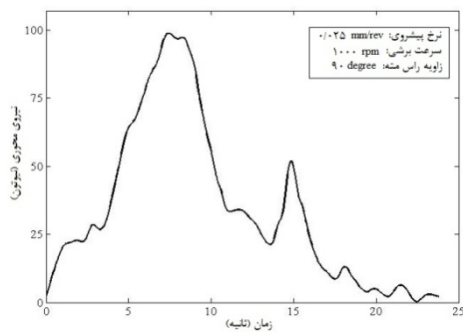
جدول ۲ فاکتورهای ورودی، ترازهای مربوط و پاسخ‌های خروجی آزمایش سوراخ‌کاری

پاسخ	ورودی			ترازها
	نرخ پیش‌روی (میلی متر بر دور)	سرعت برشی (دور بر دقیقه)	زاویه‌ی رأس مته (درجه)	
نیروی محوری فاکتور جدایش لایه‌ای	۰/۰۲۵	۳۱۵	۹۰	-۱
	۰/۱	۱۰۰۰	۱۳۰	+۱

نتایج آزمایشگاهی و بحث

تحلیل نیرویی فرآیند سوراخ‌کاری. معمولاً در سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی خرابی جدایش لایه‌ای شدیدتری در هنگام خروج مته رخ می‌دهد. محققان زیادی جدایش لایه‌ای را توسط روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند و نشان دادند که این پدیده با نیروی محوری هنگام خروج مته متناسب است. بنابراین با افزایش نیروی محوری، جدایش لایه‌ای شدیدتری اتفاق می‌افتد. شکل (۴) تغییرات نیروی محوری را در آزمایش سوراخ‌کاری تحت شرایط، نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در شروع فرآیند، نیروی محوری به‌شدت افزایش می‌یابد. اولین افت در نمودار را می‌توان به مکانیزم جدایش لایه‌ای در ورودی (Peel up) نسبت داد. پس از درگیری لبه‌ی جان (Chisel edge) نیروی محوری با ورود لبه‌های اصلی برش افزایش پیدا می‌کند و سپس برای مدت نسبتاً کوتاهی حول مقدار ثابتی نوسان می‌کند تا زمانی که جدایش لایه‌ای اتفاق بیافتد. در این لحظه نیروی محوری پله‌ای کاهش می‌یابد و هر افت در نمودار را می‌توان به باز شدن یا رشد ترک نسبت داد.

به‌همراه نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که در بخش آزمایش‌ها اشاره گردید هر تست دوبار تکرار شده و مقادیر میانگین آن ارائه گردید. ضمناً میزان انحراف از میانگین برای تمام آزمایش‌ها کم‌تر از ۰/۵٪ بوده است. البته دو بار تکرار آزمایش‌ها دلیل بر تکرارپذیری نتایج نبوده و این موضوع نیاز به بررسی بیش‌تری دارد. برای محاسبه‌ی فاکتور جدایش لایه‌ای، نمونه‌ها پس از سوراخ‌کاری به کمک اسکنر دیجیتال با رزولوشن ۳۰۰۰ dpi اسکن شدند. سپس مساحت ناحیه‌ی خرابی (A_d) و ماکزیمم قطر ناحیه‌ی خرابی (D_{max}) اندازه‌گیری گردید. نهایتاً با توجه به رابطه‌ی ۳ فاکتور جدایش اصلاح‌شده به‌دست آمد.



شکل ۴ تغییرات نیروی محوری در آزمایش سوراخ‌کاری

جدول (۳) هشت آزمایش طرح عاملی کامل ۳ را

جدول ۳ نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای برای هشت آزمایش طرح عاملی کامل

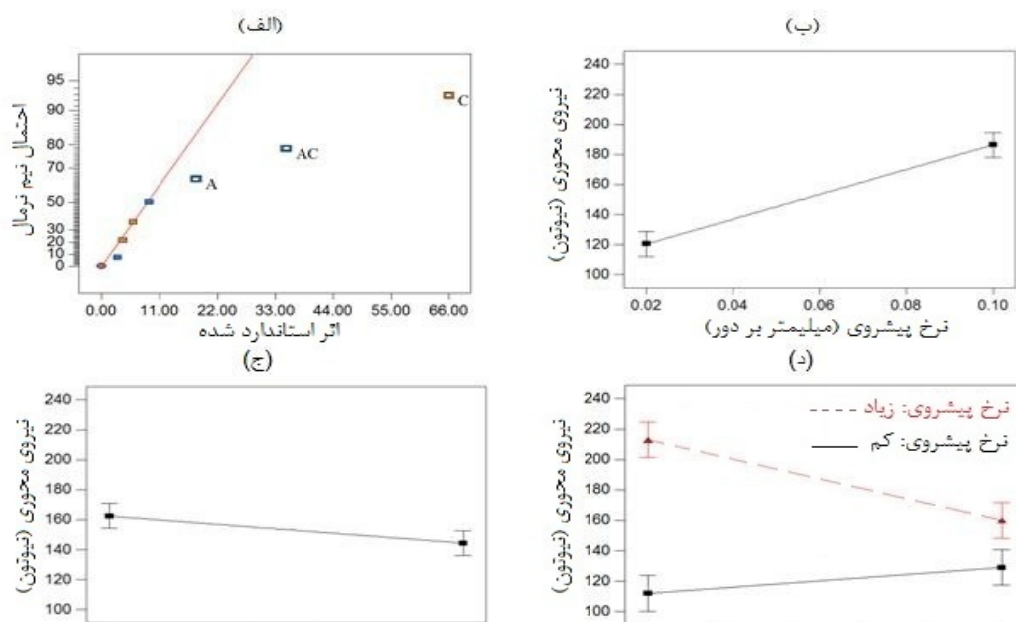
شماره‌ی آزمایش	نرخ پیش‌روی (میلی‌متر بر دور)	سرعت برشی (دور بر دقیقه)	زاویه‌ی رأس مته (درجه)	نیروی محوری (نیوتن)	فاکتور جدایش لایه‌ای
۱	۹۰	۳۱۵	۰/۰۲۵	۱۰۱	۱/۰۸
۲	۱۳۰	۳۱۵	۰/۰۲۵	۱۳۱	۱/۱۵
۳	۹۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۵	۱۲۳	۱/۱۰
۴	۱۳۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۵	۱۲۷	۱/۱۲
۵	۹۰	۳۱۵	۰/۱	۲۰۹	۱/۲۸
۶	۱۳۰	۳۱۵	۰/۱	۱۶۱	۱/۱۸
۷	۹۰	۱۰۰۰	۰/۱	۲۱۷	۱/۲۰
۸	۱۳۰	۱۰۰۰	۰/۱	۱۵۹	۱/۲۳

می‌یابد، سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته (Undeformed chip) افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش نیروی محوری می‌شود. در نرخ پیش‌روی بالا با افزایش زاویه‌ی رأس، زاویه‌ی لبه‌ی برش (Cutting edge angle) افزایش می‌یابد که مطابق تحلیل نیروی مکانیک برش مته باعث افزایش نیروی محوری می‌شود [18]. بنابراین به‌نظر می‌رسد به‌ترین شرایط برای کمینه کردن نیروی محوری به‌ازای سطوح کم نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس به‌دست می‌آید.

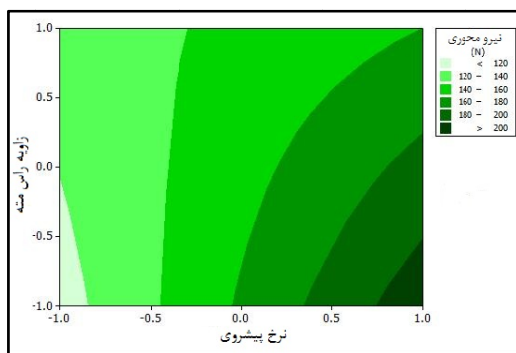
آنالیز پاسخ سطح (Response surface analysis) برای نمایش تأثیر هم‌زمان پارامترهای نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس مته بر نیروی محوری در شکل (۶) ارائه شده است. مطابق شکل درمی‌یابیم نیروی محوری در نرخ پیش‌روی بالا و زاویه‌ی رأس زیاد به‌صورت بحرانی است. بنابراین ایجاد جدایش لایه‌ای بالاتری انتظار می‌رود.

نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه‌ای در شکل (۷-الف) رسم شده است. با توجه به نمودار تنها اثر معنادار نرخ پیش‌روی (C) است. اثر این عامل در نمودار (۷-ب) رسم شده است که حاکی از اثر مثبت نرخ پیش‌روی است. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش نرخ پیش‌روی رفتار سوراخ‌کاری به ضربه نزدیک‌تر می‌گردد و طی آن فرصت لازم برای برش ماده با پانچ نمودن لایه‌ها به داخل ماده نفوذ می‌کند. نیروی متمرکز فشاری ایجادشده باعث خمش لایه‌های باقی‌مانده و متعاقباً رشد بیش‌تر ترک‌های بین لایه‌ای می‌شود. بنابراین به‌نظر می‌رسد به‌ترین شرایط برای کمینه کردن فاکتور جدایش لایه‌ای به‌ازای سطح کم نرخ پیش‌روی به‌دست می‌آید. این نکته را باید اشاره کرد که به‌واسطه‌ی تعداد سطوح انتخاب‌شده و میزان تکرارپذیری، نتایج به‌دست‌آمده فقط در محدوده‌ی بررسی شده مقادیر متغیرها معتبر می‌باشد.

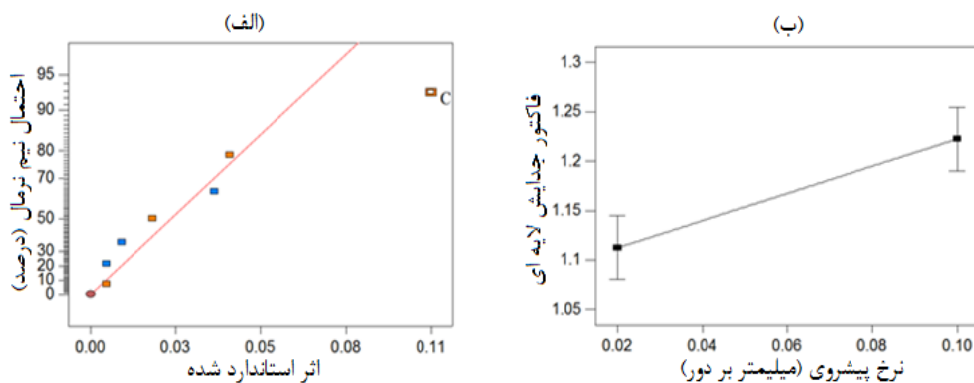
تحلیل نتایج نیروی محوری را با تهیه‌ی یک نمودار احتمال نیم‌نرمال (Half-normal probability plot) برای برآورد اثرات آغاز می‌کنیم. نمودار احتمال نیم‌نرمال ابزار گرافیکی است که از آن برای تعیین عوامل تأثیرگذار بر پاسخ در آنالیز طراحی عاملی کامل استفاده می‌شود. این نمودار میزان اثر عوامل آزمایش را به‌صورت استاندارد (مرتب‌شده به‌طور صعودی) در راستای محور افقی نشان می‌دهد. اثر استانداردشده برای یک عامل برابر با نسبت میانگین تمامی پاسخ‌ها به پاسخ بالاترین تراز یک فاکتور منهای نسبت میانگین تمامی پاسخ‌ها به پایین‌ترین تراز آن فاکتور است. در نمودار احتمال نیم‌نرمال اثرات، نقاطی که به‌دور از خط اصلی قرار می‌گیرند دارای اثرات مهم بر پاسخ می‌باشند. این اثرات هرچه مهم‌تر باشند دورتر از خط عبوری قرار می‌گیرند و به‌عبارت دیگر عوامل با تأثیر کم بر روی خط و یا نزدیک آن قرار می‌گیرند. در نمودار احتمال نیم‌نرمال تمامی اثرات مهم نمادگذاری می‌شوند و در سمت راست خط عبور داده‌شده قرار می‌گیرند. همان‌طور که از شکل (۵-الف) مشخص است، اثرات اصلی نرخ پیش‌روی (C) و زاویه‌ی رأس مته (A) و تقابل اثر آن‌ها معنادار هستند. اثرات اصلی نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس در نمودار (۵-ب و ج) رسم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نرخ پیش‌روی دارای اثر مثبت و زاویه‌ی رأس دارای اثر منفی می‌باشد. اگر قرار باشد بر مبنای اثرات اصلی نتیجه‌گیری شود، آن‌گاه باید نرخ پیش‌روی را در سطح پایین و زاویه‌ی رأس را در سطح بالا به‌کار ببریم تا نیروی محوری کمینه شود. با این وجود ضروری است که اثرات متقابل معنادار بررسی شوند. اثر متقابل نرخ پیش‌روی-زاویه‌ی رأس در شکل (۵-د) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، زاویه‌ی رأس به‌ازای سطوح زیاد و کم نرخ پیش‌روی به‌ترتیب تأثیر خیلی زیاد و کم را بر نیروی محوری نشان می‌دهد. هنگامی که نرخ پیش‌روی افزایش



شکل ۵ الف) نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات بر نیروی محوری، ب) اثر اصلی نرخ پیش‌روی، ج) اثر اصلی زاویه‌ی رأس، د) اثر متقابل نرخ پیش‌روی-زاویه‌ی رأس



شکل ۶ آنالیز پاسخ سطحی پارامترهای مؤثر بر نیروی محوری



شکل ۷ الف) نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات بر فاکتور جدایش لایه‌ای، ب) اثر اصلی نرخ پیش‌روی

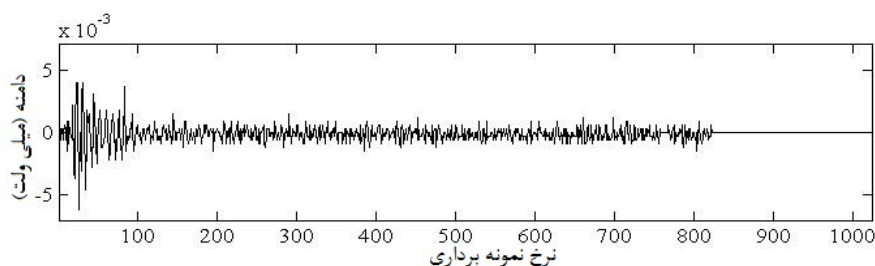
تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی فرآیند

سوراخ کاری

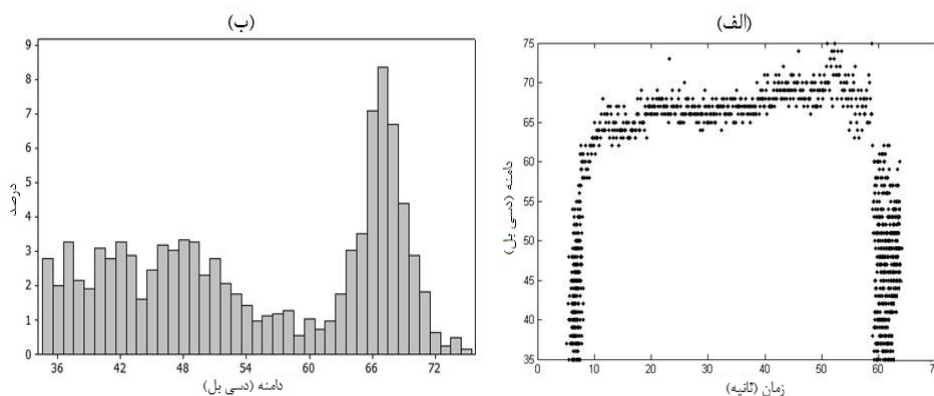
تحلیل حوزه‌ی زمان. آنالیز سیگنال‌های آکوستیک امیشن دریافت شده در حین فرآیند سوراخ کاری نیازمند استفاده از روش‌هایی علاوه بر حوزه‌ی زمان می‌باشد. با این وجود، آنالیز پارامتریک AE (حوزه‌ی زمان) هنوز به‌طور گسترده کاربرد دارد. یک سیگنال نوعی در حین فرآیند سوراخ کاری کامپوزیت الیاف شیشه‌ی رزین اپوکسی در شکل (۸) نشان داده شده است. از این سیگنال‌ها اطلاعات ارزشمندی به دست می‌آید که به‌طور خلاصه در زیر ارائه شده است.

و پس از چند ثانیه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این رشد ناگهانی عمدتاً به واسطه‌ی نفوذ جان مته (Chisel edge) می‌باشد. سپس دامنه برای مدتی طولانی حول مقدار ثابتی نوسان می‌کند که در این زمان فرآیند سوراخ کاری در حال انجام می‌باشد و حجم زیادی از ماده برداشته می‌شود. شکل (۸-ب) هیستوگرام دامنه را برای آزمایش اشاره شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیگنال‌های AE دریافت شده برای این آزمایش دارای دو محدوده‌ی دامنه‌ی غالب می‌باشند. محدوده‌ی غالب اول بین ۶۰-۷۰ دسی بل می‌باشد که مربوط به سیگنال‌های فرآیند سوراخ کاری است و محدوده غالب دوم ۳۵-۶۰ دسی بل است که مربوط به سیگنال‌های دریافت شده هنگام خروج و ورود مته می‌باشد. این نکته باید اشاره گردد که محدوده‌ی دامنه‌ی غالب برای همه‌ی آزمایش‌های سوراخ کاری بین ۵۵-۸۰ دسی بل است.

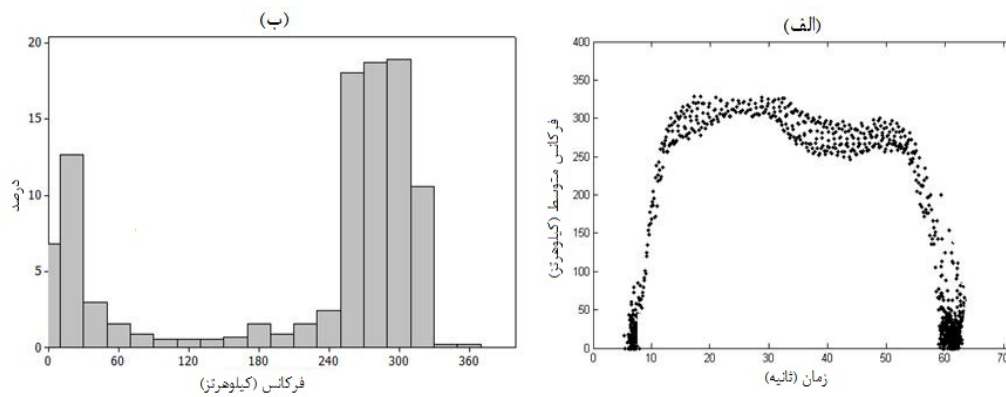
شکل (۹-الف) تغییرات دامنه بر حسب زمان را برای سوراخ کاری نمونه‌ی کامپوزیتی تحت شرایط نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه نشان می‌دهد. با شروع فرآیند دامنه به شدت شروع به افزایش می‌یابد



شکل ۸ سیگنال نوعی در حین فرآیند سوراخ کاری کامپوزیت الیاف شیشه رزین اپوکسی

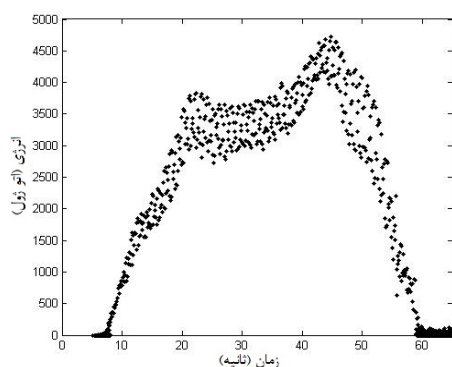


شکل ۹ الف) تغییرات دامنه بر حسب زمان برای سوراخ کاری نمونه‌ی کامپوزیتی، ب) هیستوگرام دامنه، شرایط سوراخ کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه



شکل ۱۰ الف) تغییرات فرکانس میانگین بر حسب زمان برای سوراخ‌کاری نمونه‌ی کامپوزیتی، ب) هیستوگرام فرکانس میانگین، شرایط سوراخ‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه

(Rectified) را انرژی گویند. انرژی به دامنه و زمان تداوم (Duration) هر سیگنال وابسته است و حساسیت کم‌تری به حد آستانه و فرکانس کاری دارد. با محاسبه انرژی به‌نوعی می‌توان بزرگی اتفاقی را که در یک سازه رخ می‌دهد را مانیتور نمود. در شروع فرآیند سوراخ‌کاری، انرژی سیگنال‌های AE افزایش و سپس اندکی کاهش می‌یابند. در مرحله‌ی بعدی انرژی آکوستیکی برای چندین ثانیه تقریباً تغییر چندانی ندارد و سپس با شیب کم‌تری نسبت به شیب اولیه شروع به افزایش می‌کند. این رشد ثانویه را می‌توان به جوانه‌زنی و رشد ترک جدایش لایه‌ای بین لایه‌ها در هنگام خروج مته نسبت داد.



شکل ۱۱ تغییرات انرژی بر حسب زمان تحت شرایط سوراخ‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه

تغییرات میانگین فرکانس سیگنال‌های AE و هیستوگرام آن به‌ترتیب در شکل (۱۰-الف و ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، محدوده‌ی میانگین فرکانسی غالب در حین فرآیند سوراخ‌کاری بین ۲۴۰-۳۳۰ کیلوهرتز می‌باشد. در واقع دو محدوده‌ی میانگین غالب برای سیگنال‌های دریافت‌شده وجود دارد. اولین محدوده‌ی غالب با فرکانس میانگین کم‌تر از ۲۰۰ کیلوهرتز را می‌توان به پدیده‌ی تماس جان مته و نفوذ آن در هنگام وارد شدن و نیز سایش ابزار با دیواره در هنگام خارج شدن نسبت داد. دومین محدوده‌ی فرکانسی غالب را نیز می‌توان به پدیده‌های برش کامپوزیت توسط لبه‌ی برنده‌ی اصلی و فرعی و خرابی‌های ایجادشده به‌واسطه‌ی سوراخ‌کاری نسبت داد. هم‌چنین با مشاهده‌ی نتایج همگی آزمایش‌ها، محدوده‌ی فرکانسی غالب برای سوراخ‌کاری در شرایط مختلف ماشین‌کاری بین ۲۰۰-۳۵۰ کیلوهرتز به‌دست آمد. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که سیگنال‌های تولیدشده در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها محدوده‌ی میانگین فرکانسی نسبتاً باریکی دارند که به نوعی می‌تواند جزء خصوصیات فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها باشد.

شکل (۱۱) تغییرات انرژی بر حسب زمان را نشان می‌دهد. سطح زیر نمودار سیگنال یک‌سوشده

دریافت شده شبیه تر می باشد.

برای آنالیز سیگنال‌های AE معیار انرژی به کار گرفته شد، زیرا توزیع مختلف انرژی در هر المان را می توان به مکانیزم برش یا خرابی خاصی در حین فرآیند سوراخ کاری نسبت داد. میزان انرژی هر المان بعد از تجزیه ی همه ی سیگنال‌های AE مطابق رابطه ی (۱۰) محاسبه می شود.

$$EC_i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_i(\tau))^2 \quad (10)$$

که $EC_i(t)$ (Energy of Component) نشان دهنده ی انرژی المان i در تراز معین می باشد. کل انرژی یک تراز برابر با مجموع انرژی همه ی المان‌های آن تراز می باشد. در این مقاله، نسبت انرژی در المان‌های مختلف به انرژی کل، برای یافتن درصد انرژی هر المان یا $EPC_i(t)$ (Energy Percentage of Component) به کار گرفته شد.

$$EPC_i(t) = \frac{EC_i(t)}{EC_{Total}(t)} \quad i=1...2j \quad (11)$$

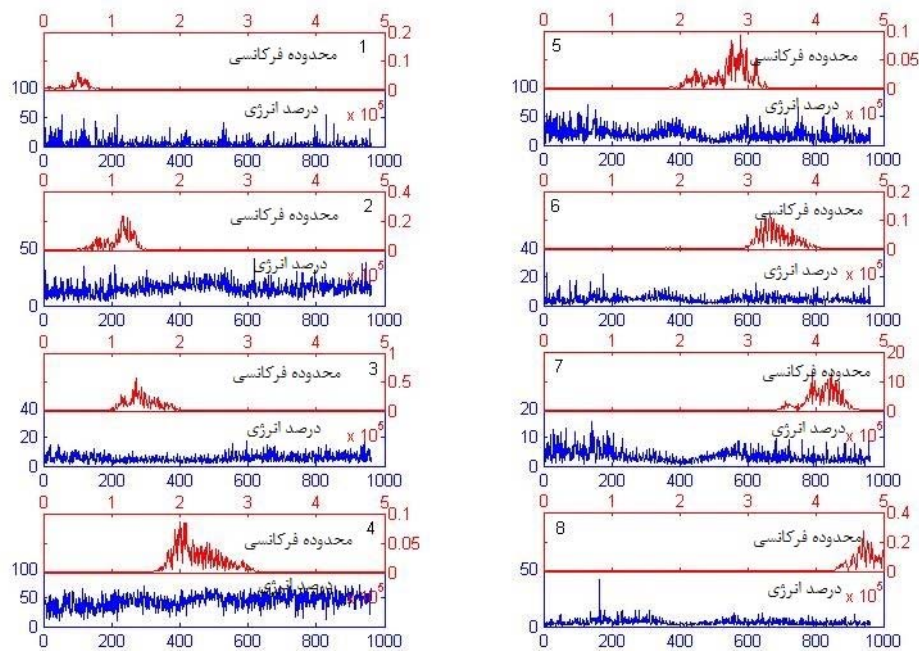
که j تراز تجزیه ($j=3$) و i تعداد المان‌ها می باشد ($i=3$). در بخش پایینی شکل (۱۲)، تجزیه ی موجک بسته ی سه تراز و درصد انرژی المان از سیگنال‌های AE دریافت شده از سوراخ کاری کامپوزیت تحت شرایط نرخ پیش روی 0.25 میلی متر بر دور، سرعت برشی 315 دور بر دقیقه و زاویه ی رأس 130 درجه نشان داده شده است.

هر المان در تراز سوم نمایانگر محدوده ی فرکانسی معینی می باشد که این محدوده از هر تراز به تراز دیگر افزایش می یابد. روش FFT برای به دست آوردن محتوای فرکانسی سیگنال‌های تجزیه شده به کار گرفته شد. محتوای فرکانسی هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده در شکل (۱۲) بخش بالایی دیاگرام نشان داده شده است.

تحلیل حوزه ی زمان - فرکانس. تئوری موجک بسته ی در بخش قبلی مقاله توضیح داده شد. اشاره گردید که سیگنال به مجموعه ای از المان‌ها (Component) تجزیه می شود و هر المان محدوده ی فرکانس معینی دارد. در حین فرآیند سوراخ کاری نمونه ی کامپوزیتی GFRP، تعداد زیادی سیگنال AE دریافت گردید. به عنوان مثال 970 سیگنال در حین سوراخ کاری نمونه با شرایط ماشین کاری نرخ پیش روی 0.25 میلی متر بر دور، سرعت برشی 315 دور بر دقیقه و زاویه ی رأس 130 درجه، ثبت گردید. برای آنالیز سیگنال‌ها، از نرم افزار متلب (MATLAB) جهت تحلیل موجک سیگنال‌ها استفاده گردید. مزیت نرم افزار متلب نسبت به دیگر نرم افزارهای تحلیل موجک، وجود جعبه ابزار (Toolbox) موجک با قابلیت‌های متنوع و همچنین قابلیت برنامه نویسی و تهیه ی کد مطابق با نیاز می باشد.

همه ی سیگنال‌های دریافت شده، در محیط کاری (Workspace) نرم افزار متلب وارد شدند. سپس تبدیل موجک بسته ی برای هر سیگنال استفاده گردید. سیگنال AE اولیه بعد از اعمال تبدیل موجک بسته ی به ترازها و المان‌های مختلف تجزیه می شود. هر المان محدوده ی فرکانس معینی دارد و مجموع همه ی المان‌ها در یک تراز معین سیگنال اولیه را می سازند. در تحلیل موجک دو پارامتر بسیار مهم وجود دارد که باید توسط کاربر تعریف شوند: ۱- تعداد ترازها و ۲- نوع موجک مادر.

در مطالعه ی اخیر، تعداد ترازها بر اساس معیاری ریاضی به نام انتروپی (Entropy)، سه تراز انتخاب گردید. برای انتخاب موجک مادر، که به ترین تطابق را با ویژگی های سیگنال AE داشته باشد، از میان موجک‌های مادر استاندارد به صورت چشمی، بازرسی انجام گردید. پس از مشاهده ی چشمی دریافتیم که موجک مادر 20 db (یکی از اعضای خانواده موجک دبیچز (Daubechies)) به خصوصیات سیگنال‌های AE



شکل ۱۲ درصد انرژی و محدوده فرکانسی هشت المان مختلف

جدول ۴ محدوده‌ی فرکانسی و درصد انرژی هشت المان از تراز سوم تحلیل موج

المان ۸	المان ۷	المان ۶	المان ۵	المان ۴	المان ۳	المان ۲	المان ۱	
۵۰۰-۴۳۷/۵	۴۳۷/۵-۳۷۵	۳۷۵-۳۱۲/۵	۳۱۲/۵-۲۵۰	۲۵۰-۱۸۷/۵	۱۸۷/۵-۱۲۵	۱۲۵-۶۲/۵	۶۲/۵-۰	محدوده‌ی فرکانسی (kHz)
۵/۹	۵/۲	۸/۱	۳۲	۲۳/۹	۷/۲	۱۳/۴	۴/۳	درصد انرژی

فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها عبارتند از: برش ماتریس، برش الیاف، جدایش لایه‌ای، بیرون‌کشیدگی الیاف و اصطکاک. مارس و همکارانش [13] با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های AE را در حین تست کشش کلاس‌بندی نمودند. آن‌ها نشان دادند که ترک خوردن ماتریس به‌عنوان اولین مکانیزم خرابی مشاهده‌شده در حین تست کشش، سیگنال‌هایی با محدوده‌ی فرکانسی پایین (۵۰-۱۵۰ کیلوهرتز) ایجاد می‌کند. اگرچه در فرآیند سوراخ‌کاری، ترکیبی از مکانیزم خرابی و عمل برش به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد، پیش‌بینی می‌شود که سیگنال‌های منتشرشده از برش و ترک خوردن ماتریس در فرآیند سوراخ‌کاری،

نمودار مشخص می‌کند که محدوده‌ی فرکانسی المان‌های تجزیه‌شده، از یک المان به المان دیگر افزایش می‌یابد. محدوده‌ی فرکانسی و درصد انرژی برای هشت المان از تراز سوم در جدول (۴) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین درصد انرژی در سه تراز المان ۲ (EPC2)، المان ۴ (EPC4) و المان ۵ (EPC5) قرار دارد. این سه المان حدود ۷۰٪ کل انرژی سیگنال را دارا هستند. به‌علاوه آن‌ها محدوده‌ی فرکانسی مختلفی دارند بنابراین می‌توانند به مکانیزم‌های مختلف شکست و خرابی در حین فرآیند سوراخ‌کاری نسبت داده شوند. مهم‌ترین منابع ایجاد سیگنال آکوستیک امیشن در

می باشد.

نتایج به طور خلاصه در زیر ارائه می شود:

- رفتار سوراخ کاری کامپوزیت از زمان ورود تا خروج توسط دیاگرام نیروی محوری تحلیل گردید. نمودار احتمال نیم نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر نیروی محوری به کار گرفته شد. بر مبنای اثرات اصلی، نرخ پیش روی دارای اثر مثبت و زاویه ی رأس دارای اثر منفی می باشد.

- آنالیز پاسخ سطح برای نمایش تأثیر هم زمان پارامترهای نرخ پیش روی و زاویه ی رأس مته بر نیروی محوری به کار گرفته شد. با توجه به نتایج، نیروی محوری در نرخ پیش روی بالا و زاویه ی رأس زیاد به صورت بحرانی بود. در نتیجه ایجاد جدایش لایه ای بالاتری انتظار می رود.

- نمودار احتمال نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه ای استفاده گردید. مطابق نتایج تنها اثر معنادار، نرخ پیش روی است.

- از پارامترهای حوزه ی زمان دامنه، فرکانس میانگین و انرژی برای تفسیر سیگنال های آکوستیک امیشن فرآیند سوراخ کاری استفاده گردید. مطابق نتایج، محدوده ی دامنه و فرکانس میانگین غالب به ترتیب برای همه ی آزمایش ها بین ۵۵-۸۰ دسی بل و ۲۰۰-۳۵۰ کیلوهرتز است.

- مطابق تحلیل های انجام گرفته در حوزه ی موجک، المان ۲ (EPC2) با محدوده ی ۱۲۵-۶۲/۵ کیلوهرتز به ترک خوردن ماتریس و المان ۵ (EPC5) با محدوده ی ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ به برش الیاف نسبت داده شد.

محدوده ی فرکانسی نسبتاً مشابهی با تست کشش دارد. از این رو، المان ۲ (EPC2) با محدوده ی ۱۲۵-۶۲/۵ کیلوهرتز می تواند به ترک خوردن ماتریس نسبت داده شود.

المان ۵ (EPC5) با محدوده ی ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ غالب ترین محدوده ی فرکانسی می باشد. در نتیجه، این المان از نظر انرژی می تواند به برش الیاف نسبت داده شود. برش الیاف توسط مته به واسطه ی سختی الیاف نیازمند انرژی بالای ورودی می باشد. هم چنین برش الیاف انرژی بالایی در نمونه آزاد می شود که توسط سنسور AE دریافت می گردد. دیگر المان غالب موجک (EPC4) را نمی توان به مکانیزم های دیگری نسبت داد چون شاهی برای ارتباط یک مکانیزم خرابی یا برش به این محدوده ی فرکانسی وجود ندارد.

نتیجه گیری

در این مقاله اثر پارامترهای نرخ پیش روی، سرعت برشی و زاویه ی رأس مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه ای با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل بررسی شد. هم چنین روش آکوستیک امیشن به همراه روش تحلیل سیگنال موجک برای پایش فرآیند سوراخ کاری و تفکیک حوزه ی فرکانسی مکانیزم های مختلف برش به کار گرفته شد. این نکته باید اشاره گردد که به واسطه ی تعداد سطوح انتخاب شده و میزان تکرارپذیری، نتایج به دست آمده فقط در محدوده ی بررسی شده ی مقادیر متغیرها معتبر

مراجع

1. Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P., "Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic : Experimental and finite element study", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 546-553, (2008).
2. Tsao, C.C. and Hocheng, H., "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44 pp.

- 1085–1090, (2004).
3. Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F. and Surcin, L., "Drilling of composite structures", *Composite Structure*, Vol. 52, pp. 511-516, (2002).
 4. Davim, J. P. and P. Reis, "Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments", *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 481–487, (2003).
 5. Davim, J. P., Rubio J. C. and Abrao A. M., "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1939–1945, (2007)
 6. Miller, R.K. and McIntire, P., "*Handbook of Nondestructive testing*", 2nd Edition Vol. 5, Acoustic Emission, American Society for Nondestructive Testing, (1987).
 7. Jemielniak, K., "Some aspect of acoustic emission signal processing", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 109, pp. 242-247, (2001).
 8. Weeks, M., "*Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*", Infinity Science Press, (2006).
 9. Khashaba, U.A., Seif, M.A. and Elhamid, M.A., "Drilling analysis of chopped composites", *Composites :Part A*, Vol. 38, pp. 61–70, (2007).
 10. Ravishankar, S.R. and Murthy, C.R.L., "Application of acoustic emission in drilling of composite laminates", *NDT&E International*, Vol. 33, pp. 429–435, (2000).
 11. Arul, S., Vijayaraghavan, L. and Malhotra, S.K., "Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, pp. 184–190, (2007).
 12. Marec, A., Thomas, J. H. and El Guerjouma, R. "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).
 13. Velayudham, A., Krishnamurthy, R. and 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, pp. 141–145, (2005).
 14. Ni Q. Q. and Iwamoto M., "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites", *Engineering Fracture Mechanic*, Vol. 69, pp. 717-728, (2002).
 15. D. Lee Fugal, "*Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing*", Space & Signals Technical Publishing, (2009).
 16. Karimi, N.Z., Heidary, H., Ahmadi, M., "Residual tensile strength monitoring of drilled composite materials by acoustic emission". *Material and Design*, Vol. 40, pp. 229–236, (2012).
 17. Kilickap, E., "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method drilling of GFRP composite." *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 6116-6122, (2010).
 18. Strenkowski, J.S., Hsieh, C.C., Shih, A.J., "An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1413–1421, (2004).