



## رصد شروع و رشد خرابی جدایش بین لایه‌ای در مواد کامپوزیتی با استفاده از روش غیرمخرب آکوستیک امیشن

پریناز بلالپور دستجردی<sup>۱</sup>، محمد فتوحی<sup>۲</sup>، سکینه فتوحی<sup>۳</sup>، مهدی احمدی نجف آبادی<sup>۴\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی: ۱۵۸۷-۴۴۱۳، ahmadin@aut.ac.ir

### چکیده

جدایش بین لایه‌ای در مواد کامپوزیتی یکی از بحرانی‌ترین و مهم‌ترین عیوب در این گونه مواد است. دانستن رفتار مواد مختلف در این عیب و داشتن اطلاعات کافی از آن در طراحی و تولید مواد مقاوم در برابر شروع ترک کمک زیادی خواهد کرد. در این مطالعه سیگنال‌های آکوستیکی حاصل از دو نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با لایه چینی‌های متفاوت [0]10 و [0,90]5s به صورت لحظه به لحظه ثبت شده است. سپس این سیگنال‌ها با استفاده از تابع انرژی کرنشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که مواد با لایه چینی‌های متفاوت، رفتار متفاوتی از لحاظ مقاومت در برابر شروع خرابی جدایی بین لایه‌ای از خود نشان می‌دهند. با استفاده از تابع انرژی کرنشی می‌توانیم رفتار مواد در مرحله شروع و رشد جدایی بین لایه‌ای را بررسی نماییم. این بررسی اطلاعات سودمندی را برای طراحی مواد مقاومتر و تولید مواد با کیفیت مطلوب، فراهم می‌نماید.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

آکوستیک امیشن

جدایی بین لایه‌ای

تابع انرژی کرنشی

شروع ترک

## Acoustic emission based study to investigate the initiation and growth of delamination in composite materials

Parinaz Belalpour dastjerdi<sup>1</sup>, Mohamad Fotouhi<sup>2</sup>, Sakine Fotouhi<sup>3</sup>, Mehdi Ahmadi<sup>4\*</sup>

1- Master of Science, Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

2- PhD student, Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

3- Master of Science student, Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ-South Tehran Branch., Tehran

4- Associate Professor, Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

\* P.O.B. 1587-4413 Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 14 July 2013  
Accepted 06 August 2013  
Available Online 17 May 2014

#### Keywords:

Acoustic Emission  
Delamination  
Strain Energy Function  
Damage Initiation

### ABSTRACT

Delamination is one of the main defects in composite materials. Studying the initiation and propagation of delamination is useful for the design and production of high quality resistant materials. Therefore understanding the behavior of delamination damage and having enough knowledge about that will be helpful. In this study, generated acoustic emission signals from two types of glass/epoxy composite specimens at different layups, [0,90]5s and [0]10, is recorded. After that signals were analyzed by applying strain energy function. The results indicate that specimens at different layups have different stiffness behavior toward damage initiation and growth. Using strain energy function method initiation and growth of delamination can be evaluated. The obtained results provide useful information for the design and production of high quality resistant composite materials.

### ۱- مقدمه

تقویت‌شده با الیاف شیشه، بواسطه اثرات شیمیایی و بیولوژیکی، وزن سبک‌تر، مقاومت به زوال بالاتر دارد.

با وجود اینکه مواد کامپوزیتی درحالت نهایی خود ساخته می‌شوند ولی سوراخکاری فرایند اصلی برای مونتاژ کردن سازه‌های کامپوزیتی بویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی می‌باشد [۱].

کیریشنامورتی و همکارانش اثر هندسه نوک مته و تاثیر آن بر نیروی

امروزه در صنایع مختلف، استفاده از کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه<sup>۱</sup>، به دلیل خواص ویژه آن از قبیل سفتی ویژه بالا، مقاومت خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم و مقاومت در برابر اشعه‌های اتمی، بطور قابل توجهی افزایش یافته‌است. در مقایسه با فلزات، کامپوزیت‌های پلاستیکی

1- GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)

### Please cite this article using:

P. Belalpour dastjerdi, M. Fotouhi, S. Fotouhi, M. Ahmadi, Acoustic emission based study to investigate the initiation and growth of delamination in composite materials, Modares Mechanical Engineering, Vol.14, No. 3, pp. 78-84, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آکوستیکی، تحلیل و بررسی شده است [۹]. بررسی‌ها نشان دهنده آن است که روش آکوستیک امیشن و تابع انرژی کرنشی روش‌های مناسبی برای رصد شروع و رشد عیب جدایی بین لایه‌های در فرآیند سوراخکاری مواد کامپوزیتی محسوب می‌شوند.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مشخصات آزمایش و توصیف

در این مطالعه، کار آزمایشگاهی بر روی کامپوزیت‌های شیشه‌اپوکسی انجام گرفت. رزین بکار رفته در نمونه‌ها، اپوکسی با چگالی  $1/46 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد. رزین و هاردنر استفاده شده برای نمونه‌ها به ترتیب SR1500 و SD7561 می‌باشد. الیاف استفاده شده از نوع E-Glass می‌باشد. تمامی قطعات با روش دستی<sup>۲</sup> ساخته شده‌اند و ۱۲ ساعت تحت کیسه خلا بود. بعد از این مرحله قطعات ۴۸ ساعت در هوای آزاد با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس قطعات شماره‌گذاری شده و توسط اهر برش کامپوزیت، به اندازه‌ی  $5 \times 5 \times 150 \text{ mm}$  بریده شدند. طول نمونه‌ها ۱۵۰، عرض ۵۰ و ضخامت آن‌ها ۵ میلی‌متر می‌باشد. تعداد لایه‌های نمونه‌ها ۱۰ و ضخامت تقریبی هر لایه  $0/5 \text{ mm}$  می‌باشد. نمونه‌ها دارای یک سوراخ کور می‌باشند که این سوراخ با در نظر گرفتن ماهیچه‌ای، حین فرآیند ساخت کامپوزیت، ایجاد شده است. علاوه بر آن، برای سهولت شروع جدایش، نمونه‌های آزمایش دارای یک ترک اولیه به ضخامت ۲۰ میکرومتر می‌باشند. ترک اولیه با جایگذاری نوار تفلونی در حین پروسه تولید ایجاد شده است. در مواد کامپوزیتی، آزمایش استاندارد در زمینه مطالعه جدایی بین لایه‌های ناشی از سوراخکاری در لایه‌های آخر، وجود ندارد. در این مطالعه از تست خمش سه نقطه استفاده شده است فاصله بین دو تکیه‌گاه در تست خمش سه نقطه،  $120 \text{ mm}$  می‌باشد. در این مطالعه از دو نوع لایه چینی  $[0]_{10}$  و  $[0,90]_{5s}$  استفاده شده است. از هر نوع لایه‌چینی سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور سهولت کار نمونه با لایه چینی  $[0,90]_{5s}$  را A1 و نمونه با لایه چینی  $[0]_{10}$  را A2 نامیده شد. چگالی الیاف شیشه در نمونه A1، A2 به ترتیب  $3/3 \text{ g/m}^2$ ،  $5/0 \text{ g/m}^2$  می‌باشد. نمونه‌های آزمایش از شرکت اس‌اس‌پی تهیه شده است.

### ۲-۲- دستگاه آزمایش

از یک دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا<sup>۳</sup>، با ظرفیت ۵ton با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری، استفاده شد. سرعت دستگاه کشش استفاده شده، بین ۰/۱ تا  $500 \text{ mm/min}$  قابل تنظیم می‌باشد. قطعات با سرعت  $2 \text{ mm/min}$  تحت آزمایش قرار گرفت. برای ثبت داده‌های آکوستیکی نیز از نرم‌افزار آکوستیک امیشن و سیستم PCI-2 پک<sup>۴</sup> با نرخ داده‌برداری ۱MHz استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو<sup>۵</sup>، محصول کمپانی پک، مدل R50D استفاده شد. فرکانس رزونانسی سنسور  $513/28 \text{ kHz}$  و محدوده بهینه کاری آن  $750-100 \text{ kHz}$  است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، بوسیله پیش تقویت‌کننده با ضریب  $40 \text{ dB}$  تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور از گریس سیلسکون خلا شده استفاده شد. برای حذف نویز زمینه، در حین نمونه‌برداری حد آستانه  $35 \text{ dB}$  در نظر گرفته شد. فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.

محوری و جدایش لایه‌های را بررسی نمودند. نیروی محوری می‌تواند بوسیله تغییر هندسه ابزار و کنترل نرخ پیشروی حداقل گردد اما کنترل نرخ پیشروی باعث کاهش تولید شده، در نتیجه تغییر ابزار، روش مناسب‌تری است. در میان پارامترهای هندسی مته، زاویه راس و هندسه جان مته تأثیر مهم‌تری بر بزرگی نیروی محوری دارند [۲].

ارول<sup>۱</sup> و همکارانش سوراخکاری کامپوزیت‌های پلیمری را توسط آکوستیک امیشن پایش نمودند. منابع آکوستیک امیشن در سوراخکاری، شکست ماتریس، برش الیاف، مکانیزم‌های اصطکاک، جدایش لایه‌های و سایش ابزار می‌باشد. هنگامی که بار محوری بزرگتر از مقاومت بین لایه‌های شود، ترک شروع به جواهرزنی می‌کند که انتشار آن باعث خرابی اطراف سوراخ می‌شود. این باعث سیگنال کوچکی در قطعه کار می‌شود در حالی که شکست الیاف سبب تولید سیگنال‌های بزرگ می‌شود. مطابق با طیف فرکانسی سیگنال‌های بدست آمده، مشخص گردید محدوده فرکانسی فرآیند بین  $150-300 \text{ kHz}$  می‌باشد. این محدوده یک مد مخلوط با حداکثر  $70 \text{ kHz}$  می‌باشد. وجود توان بالای اطراف فرکانس  $70 \text{ kHz}$  می‌تواند به همزمانی تعداد زیادی وقایع با زمان رشد کوتاه، از قبیل شکست الیاف، بیرون کشیده شدن الیاف و جدایش لایه‌های نسبت داده شود. زمانی که از یک مته HSS برای ایجاد سوراخ به تعداد بالا استفاده می‌شود، افزایش پایدار در پیک توان سیگنال آکوستیک امیشن کاملاً قابل مشاهده است، اما در نقاطی، یک جهش دیده می‌شود که به حد نهایی سایش نسبت داده می‌شود که در آن تنش اعمالی باعث ایجاد انواع عیوب در ماده می‌شود [۳].

گودین<sup>۲</sup> و همکارانش [۴، ۵] آکوستیک امیشن را به عنوان وسیله‌ای برای تشخیص انواع مختلف خرابی‌ها در مواد کامپوزیتی شیشه-پلی استر به کار گرفتند. که هدف عمده کار آنها تحلیل سیگنال‌ها به منظور تشخیص منابع مختلف امواج ساطع شده بود.

جدایش بین لایه‌های از مهم‌ترین خرابی‌ها در مواد کامپوزیتی محسوب می‌شود که باعث از کارافتادگی سازه و یا کاهش عمر آن می‌شود. این خرابی بستگی زیادی به نیروی پیشران مته دارد. که این نیروی محوری خود به پارامترهای سوراخکاری از قبیل نرخ پیشروی، سرعت برشی و هندسه ابزار بستگی دارد [۶]. ارزیابی کیفیت سوراخ از لحاظ خرابی در کامپوزیت‌ها نیاز به یک فرآیند رصد آنلاین مثل روش‌های نوری و گرمایی و ارتعاشی دارد. هر کدام از روش‌های بالا در عمل دارای مشکلات و مزایای خاص خود هستند. امروزه روش رصد سیگنال آکوستیک امیشن بعلاوه ویژگی خاص خود و دارا بودن قابلیت ذاتی برای پایش، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. آکوستیک امیشن پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراسوتی  $1 \text{ kHz}-20 \text{ MHz}$  رخ می‌دهد. امواج آکوستیک امیشن، امواج تنشی یا الاستیکی هستند که در نتیجه آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی در اثر خرابی اتفاق افتاده در سازه‌ها، بوجود می‌آیند. این خرابی‌ها حاصل تنش‌های داخلی یا خارجی اعمال شده در سازه‌ها هستند. اندازه‌گیری و شناسایی امواج الاستیک می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد منابع ساطع کننده امواج حاصل از خرابی‌ها در اختیار کاربر قرار دهد [۷]. امواج AE اطلاعات دقیقی بطور لحظه به لحظه از خرابی‌های حین سوراخکاری ارائه می‌دهد [۸]. در این مطالعه سیگنال‌های آکوستیکی تولید شده در حین تست خمش سه نقطه توسط روش آکوستیک امیشن برای لایه چینی‌های  $[0]_{10}$ ،  $[0,90]_{5s}$  ثبت شده است. سپس این سیگنال‌ها توسط تابع انرژی کرنشی و سایر پارامترهای

3- Hand Layup  
4- Hiwa  
5- PAC  
6- PICO

1- Arul  
2- Godin

در اثر بارهای مختلف و پیش‌بینی میزان استحکام باقیمانده در مواد کامپوزیتی را از این تابع استخراج کرد [۱۰، ۱۱]. تابع  $f(x)$  با بکارگیری اطلاعات مکانیکی و آکوستیکی برای پیشروی آسیب در داخل ماده قابل استفاده است. از طرف دیگر بخاطر اینکه تابع بالا تمامی تاریخچه رشد آسیب را در خود جای داده، می‌تواند به عنوان معیاری برای تشخیص عمر باقیمانده در ماده استفاده شود. که در این مورد می‌توان از انتگرال تابع  $f(x)$  برای رسیدن به این هدف استفاده کرد. تابع سنتزی وابسته به انرژی کرنشی و انرژی اتفاقات AE است و برای مطالعه کامپوزیت‌ها در کارکردهای مختلف از جمله توصیف پیشرفت خرابی در بارگذاری‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

این تابع به صورت لگاریتم نسبت انرژی کرنشی به انرژی آکوستیکی بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

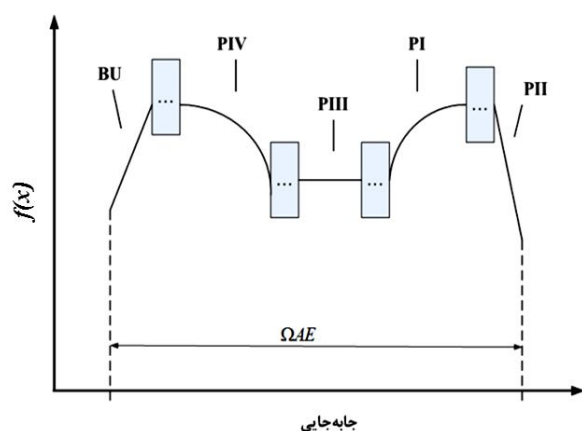
$$f(x) = \ln \left[ \frac{E_s(x)}{E_a(x)} \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $x$  متغیر موثر آزمایش می‌باشد که معمولا جابجایی یا کرنش است. مقدار  $E_a(x)$  به صورت انتگرال زیر نمودار انرژی AE-جابجایی تعریف می‌شود. نمونه‌ای از این نمودار در شکل ۲ به صورت شماتیک آمده است. در شکل ۲، منحنی، نشان‌دهنده منحنی نیرو-زمان است و خطوط قرمز رنگ انرژی آکوستیکی را برحسب زمان نشان می‌دهد.

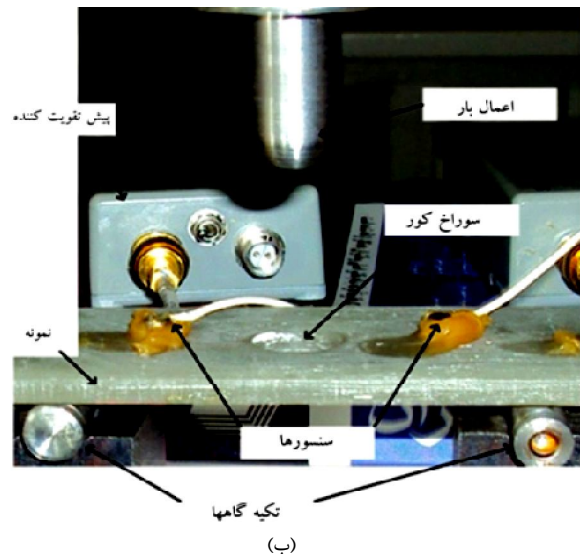
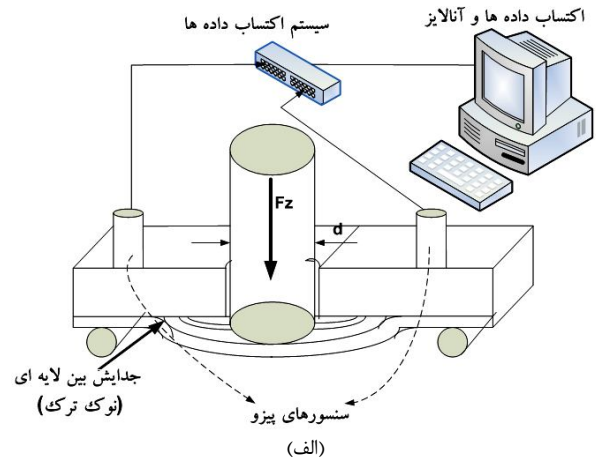
طبق مطالعات انجام گرفته توسط محققین، این تابع به وسیله ترکیب پنج نوع خرابی، تابع افزایشی  $PI(x)$ ، تابع افت ناگهانی  $PII(x)$ ، تابع ثابت  $PIII(x)$ ، تابع کاهش  $PIV(x)$  و  $BU$  قابل بیان است که در شکل ۳ به صورت صورت شماتیک آورده شده است.

از دیدگاه فیزیکی، قسمتی از تابع  $f(x)$  که توسط  $BU$  و  $PI(x)$  بیان می‌شود نشان‌دهنده ذخیره شدن انرژی کرنشی است. وقتی که در ماده، خرابی بزرگی اتفاق می‌افتد باعث آزاد شدن ناگهانی انرژی ذخیره شده در ماده می‌شود که یک اتفاق AE با گنجایش انرژی بالایی را تولید می‌کند، این قسمت توسط تابع  $PII(x)$  مشخص می‌شود. بعد از  $PII(x)$  توانایی نگهداری انرژی کرنشی ماده تغییر می‌کند.

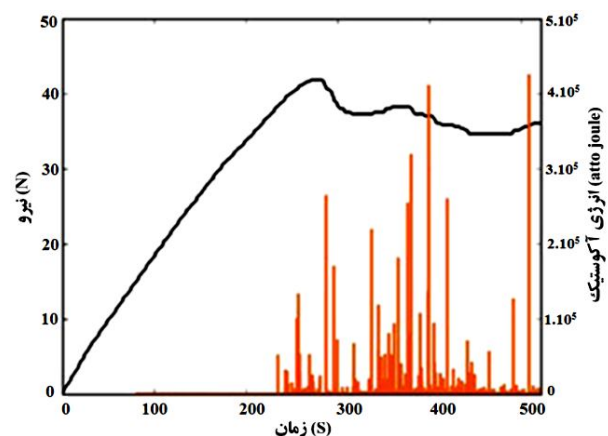
$PIII(x)$  مربوط به فاز ذخیره انرژی کرنشی پیش‌رونده در ماده می‌باشد.  $PIV(x)$  مربوط به قسمتی می‌شود که فعالیت AE بزرگتر از توانایی نگهداری انرژی کرنشی ماده است، یعنی خرابی به یک حداکثر رسیده است و ماده ظرفیت کمی برای تحمل بار دارد.



شکل ۳ توابع تشکیل دهنده تابع انرژی کرنشی SF



شکل ۱ الف) شماتیک تست خمش سه نقطه و (ب) نمونه تحت بارگذاری و تست خمش



شکل ۲ نمودار انرژی آکوستیک-زمان

### ۳- تابع سنتزی<sup>۱</sup>

داده‌های آکوستیکی کیفیت و سلامت سازه را بررسی می‌کنند، از طرف دیگر داده‌های مکانیکی بیشتر برای بدست‌آوردن شاخص کمی در رفتار مواد بکار برده می‌شوند. این تابع به انرژی کرنشی و انرژی حاصل از اتفاقات آکوستیکی جمع‌آوری شده بستگی دارد و می‌تواند برای مطالعه رفتار مورد استفاده قرار بگیرد بطوریکه می‌توان اطلاعاتی همچون میزان پیشروی آسیب در کامپوزیت‌ها

2- Increasing Function  
3- Sudden Drop Function  
4- Constant Function  
5- Decreasing Function

1- Sentry Function (SF)

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- بررسی شروع جدایش لایه‌های به کمک AE

از زیبایی کیفیت سوراخ از لحاظ خرابی در کامپوزیت‌ها، نیاز به یک فرایند رصد آنلاین مثل روش‌های نوری، گرمایی، ارتعاشی دارد. هر کدام از این روش‌ها در عمل دارای مشکلات و مزایای خاص خود هستند. امروزه روش رصد سیگنال آکوستیک امیشن بعلاوه ویژگی خاص خود و دارا بودن قابلیت ذاتی برای پایش، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، به بررسی دو نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی  $[0]_{10}$  و  $[0, 90]_{55}$  با لایه‌چینی‌های متفاوت پرداخته شده است.

سیگنال‌های آکوستیکی ناشی از تست خمش سه نقطه روی نمونه‌های کامپوزیتی به صورت لحظه به لحظه ثبت گردیده است. سپس این سیگنال‌ها با استفاده از تابع سنتزی و سایر مشخصه‌های آکوستیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

پنج پارامتر مهم سنجش سیگنال‌های AE عبارت‌اند از: شمارش ضرب‌آهنگ‌ها، دامنه، زمان استمرار، زمان رشد و انرژی وقایع. مهم‌ترین این پارامترها که در نتایج، مورد بررسی قرار گرفته شد انرژی وقایع و ضرب‌آهنگ‌ها است.

انرژی وقایع: به عنوان پارامتر نمودار بزرگی سیگنال آکوستیک امیشن است و برابر با سطح زیر منحنی سیگنال تقویت شده (MARS) است. شمارش ضرب‌آهنگ‌ها: تعداد پالس‌هایی هستند که از آستانه معینی عبور می‌کنند. این پارامتر از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین پارامترها برای بررسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن است.

به منظور به دست آوردن نتایج کمی، نرم افزار آکوستیک امیشن، پارامترهای آکوستیکی مربوطه را از موج‌های دریافت شده توسط سنسور استخراج کرده است. داده‌های مکانیکی نیز خروجی دستگاه کشش می‌باشد که حداکثر مقدار نیرو از داده‌های حاصل از دستگاه کشش قابل استخراج است. شکل ۴ دیگرام نیرو-جابجایی را در سرعت پیشروی  $2\text{mm/min}$  نشان می‌دهد. از روی فرآیند بارگذاری مشخص است که تا نزدیکی حداکثر نیرو، رابطه نیرو و زمان خطی است. اما بعد از نیروی بیشینه رابطه غیرخطی نیرو و زمان کاملاً قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بعد از بیشینه نیرو در قطعه A1، رشد ترک حالت پایدار و منظمی دارد. این امر در مورد قطعه A2 کاملاً متفاوت است. این رفتار متفاوت در دو لایه‌چینی، مربوط به پل زدن الیاف در نمونه A2 است. حداکثر مقدار نیروی قابل تحمل در دو لایه‌چینی در شکل نشان داده شده است. تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین حداکثر نیروی قابل تحمل در دو قطعه وجود دارد. افت و خیزهای نیرو در این نمودار مربوط به گسترش ترک است. در واقع رشد ترک و مهار شدن ناگهانی رشد ترک، موجب این افت و خیزها شده است. از شکل ۴ مشخص است که مقدار حداکثر نیرو در قطعه A2 بیشتر است.

این حقیقت بدین معنی است که نیروی بحرانی مورد نیاز برای شروع جدایی بین لایه‌های در این لایه‌چینی بزرگتر است. در حین تست خمش سه نقطه، مکانیزم‌های متفاوتی اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ناحیه‌های متفاوتی در توزیع کانت سیگنال‌های آکوستیکی قابل مشاهده است.

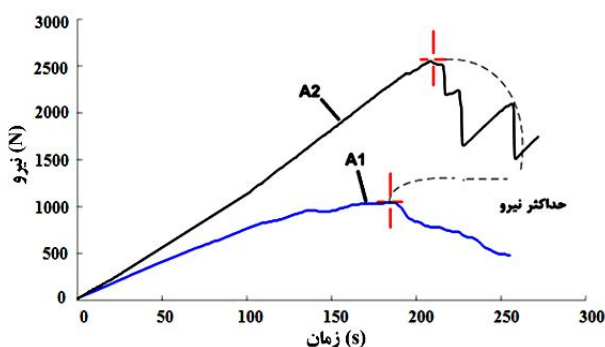
ناحیه اول: ناحیه‌ای که در آن خرابی قابل توجهی اتفاق نیافتاده است. قبل از ناحیه اول انرژی به صورت انرژی کرنشی ذخیره شده است. در ابتدای ناحیه اول انرژی کرنشی به یک مقدار بحرانی می‌رسد. این انرژی کرنشی بحرانی مربوط به انرژی مورد نیاز برای شروع جدایی بین لایه‌های می‌باشد. انرژی کرنشی

بحرانی برای دو لایه‌چینی، با دلیل تمرکز تنش متفاوت، در نوک ترک برای دو نمونه، متفاوت است. بعد از شروع جدایی، گسترش ترک بصورت یکنواخت و پایدار صورت می‌گیرد و میزان خرابی ایجاد شده در ناحیه اول قابل چشم‌پوشی است. در این ناحیه چندین سیگنال آکوستیکی ضعیف قابل مشاهده است که در اثر اصطکاک، تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی، شکست ماتریس و الیاف در ناحیه جدایی بین لایه‌های اولیه اتفاق می‌افتد. خرابی‌های موجود در این ناحیه تاثیر زیادی بر روی تفرانس‌های سوراخکاری ندارند. ناحیه دوم: در این ناحیه نیرو به یک حد مشخصی می‌رسد و سیگنال‌های آکوستیکی نسبتاً قوی ظاهر می‌شود. این سیگنال‌ها مربوط به شروع و رشد ترک می‌باشد. ابتدای ناحیه دوم به عنوان شروع شدید خرابی جدایی بین لایه‌های محسوب می‌شود. شروع خرابی شدید به خرابی اطلاق می‌شود که باعث از بین رفتن تفرانس‌های سوراخکاری می‌شود. به عبارت دیگر دو مرحله در شروع جدایی بین لایه‌های وجود دارد، مرحله اول خرابی زیادی به بار نمی‌آورد، در حالی که مرحله دوم منجر به خرابی زیادی شده و باعث ناکارآمدی قطعه می‌شود.

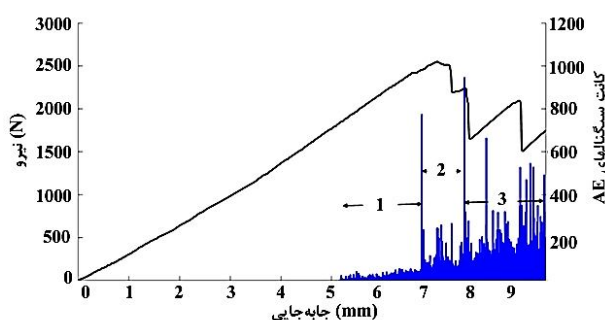
ناحیه سوم: این ناحیه به گسترش جدایی بین لایه‌های که منجر به شکست نهایی قطعه کار می‌شود، مرتبط است. به دلیل رشد سریع و ناپایدار ترک در این ناحیه، کانت و انرژی سیگنال‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

در این مطالعه، از روش‌های توزیع انرژی و کانت سیگنال‌های AE، برای به دست آوردن نیروی بحرانی مورد نیاز برای شروع ترک، استفاده شده است. در روش توزیع انرژی و کانت، نیروی متناظر با شروع ناحیه دوم که موجب ایجاد سیگنال‌های با انرژی و کانت بالا می‌شود، به عنوان نیروی بحرانی در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ نمودار توزیع انرژی و کانت را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، دو لایه‌چینی رفتار متفاوتی را از لحاظ توزیع انرژی و کانت نشان می‌دهند. در لحظات اولیه شروع تست، تقریباً هیچ توزیعی مشاهده نمی‌شود. با نزدیک شدن به حداکثر مقدار نیرو، نخستین سیگنال‌های آکوستیکی ظاهر می‌شوند.



شکل ۴ نمودار نیرو-جابجایی قطعه A1 و A2



شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی-کانت قطعه A2

1- Counts  
2- Event Energy



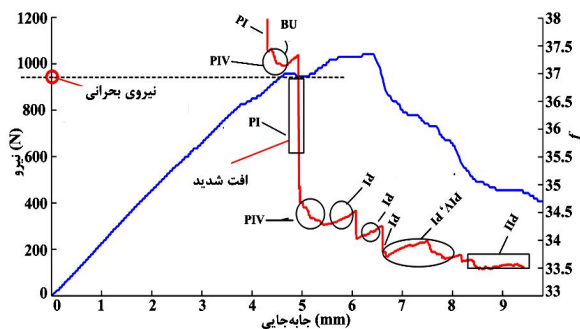
دارد و می‌تواند برای مطالعه رفتار ماده مورد استفاده قرار گیرد، بطوریکه می‌توان اطلاعاتی همچون میزان و نحوه پیشروی آسیب در کامپوزیت‌ها در اثر بارهای مختلف و پیش‌بینی میزان استحکام باقیمانده در مواد کامپوزیتی را از این تابع استخراج کرد. در این بخش، از روش بیشترین افت در تابع سنتری برای به‌دست‌آوردن نیروی بحرانی استفاده شده‌است. در روش بیشترین افت، نیروی معادل با بیشترین کاهش ناگهانی تابع سنتری، به عنوان نیروی بحرانی برای شروع جدایی بین لایه‌های در نظر گرفته می‌شود. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودار بار-جابجایی- $f(x)$  برای نمونه‌های A1 و A2 ترسیم شده است. اجزای مختلف تابع سنتری، در شکل‌ها مشخص و مورد بررسی قرار گرفته شده است.

مقدار پیشروی دستگاه کشش در این نمودارها  $2\text{ mm/min}$  است. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود برای تمام نمونه‌ها تابع سنتری دارای تابع  $\text{PII}(x)$  است. تابع  $\text{PII}(x)$  که با افت ناگهانی مشخص می‌شود، یک خرابی بزرگ را در ماده نشان می‌دهد. با دقت در نمودارهای قطعات، مشخص است که در هر نمونه یک  $\text{PII}(x)$  بزرگ وجود دارد که نسبت به تابع‌هایی از این نوع بزرگتر است. در این مطالعه، نیروی معادل با بزرگترین  $\text{PII}(x)$  به عنوان نیروی بحرانی در نظر گرفته شده است. دلیل این انتخاب این است که در شروع جدایی، انرژی کرنشی ذخیره شده در نمودار نیرو-جابجایی به یکباره آزاد می‌شود، که این امر باعث افت شدید تابع سنتری می‌شود. بعد از این افت شدید، توانایی نگهداری انرژی کاهش می‌یابد، اما کاملاً از بین نمی‌رود، که بیانگر این است که بعد از افت ذکر شده تحمل نگهداری کرنش در ماده پایین می‌آید.

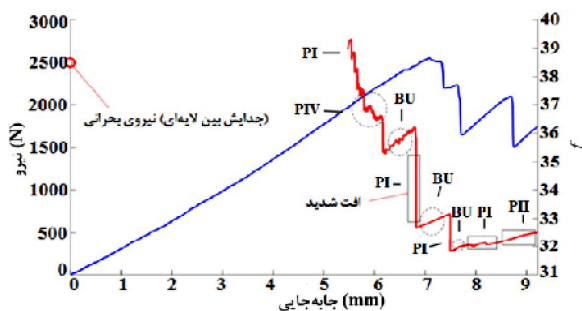
نحوه به دست‌آوردن نیروی بحرانی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مقدار نیروی بحرانی به دست‌آمده دارای انطباق خوبی با نتایج مربوط به توزیع انرژی و کانت است. مقدار عددی نیروی به دست‌آمده از روش سنتری، در جدول ۱ ذکر گردیده است.

جدول ۱ مقدار بار بحرانی به دست آمده از روش سنتری

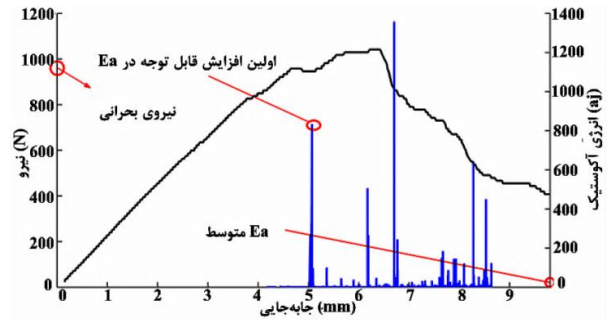
نوع قطعه‌کار	نیروی بحرانی (N)
A1	۹۷۱
A2	۲۴۹۷



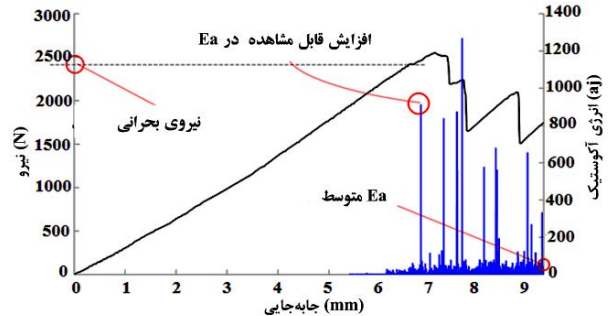
شکل ۱۰ نمودار تابع سنتری-نیروی برای قطعه A1



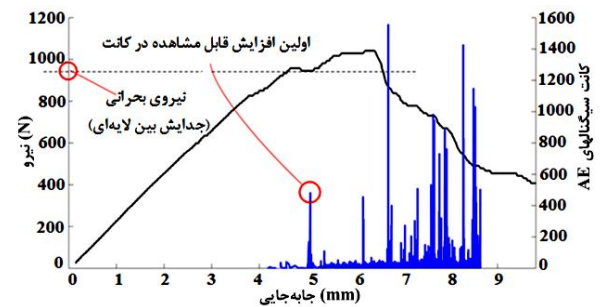
شکل ۱۱ نمودار تابع سنتری-نیروی برای قطعه A2



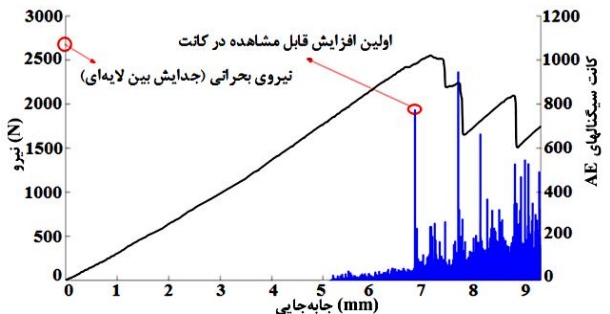
شکل ۶ به دست آوردن نیروی بحرانی برای قطعه A1 با استفاده از تکنیک توزیع انرژی



شکل ۷ به دست آوردن نیروی بحرانی برای قطعه A2 با استفاده از تکنیک توزیع انرژی



شکل ۸ به دست آوردن نیروی بحرانی برای قطعه A1 با استفاده از تکنیک توزیع کانت



شکل ۹ به دست آوردن نیروی بحرانی برای قطعه A2 با استفاده از تکنیک توزیع کانت

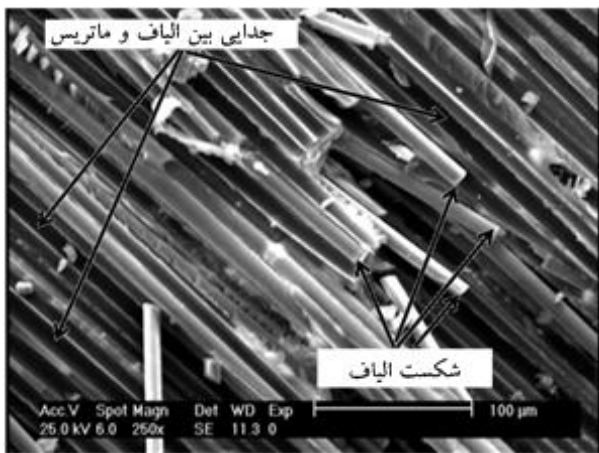
توزیع این سیگنال‌ها در طول تست متغیر است. در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ نحوه به دست‌آوردن نیروی بحرانی نشان داده شده‌است. دلیل متناظرگرفتن شروع ناحیه دوم به عنوان نقطه بحرانی، مربوط به ماهیت فرآیند جدایی بین لایه‌های است. زیرا در شروع جدایی انرژی کرنشی ذخیره شده در نمودار نیرو-جابجایی به یکباره آزاد می‌شود.

#### ۴-۲- مطالعه جدایی بین لایه‌های توسط تابع انرژی کرنشی

در این قسمت برای تحلیل رفتار جدایی بین لایه‌های از تابع سنتری که اطلاعات مکانیکی و آکوستیکی را یک‌جا جمع می‌کند، استفاده شده است. این تابع به انرژی کرنشی و انرژی حاصل از اتفاقات آکوستیکی جمع آوری شده بستگی



شکل ۱۲ مشاهدات صورت گرفته توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی (A1)



شکل ۱۳ مشاهدات صورت گرفته توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی (A2)

کاربرد دیگر تابع سنتری در مطالعه رفتار جدایی بین لایه‌های در مواد کامپوزیتی است. به همین منظور به مطالعه رفتار نمودار سنتری قبل و بعد از افت ناگهانی نمودار پرداخته شد. همانطور که از شکل مشخص است، قبل از بیشترین افت، نمودار سنتری در هر دو نمونه شامل توابع  $PII(x)$  و  $PIV(x)$  است. ترکیب این توابع نشان‌دهنده روند نزولی نمودار سنتری است که دلیل آن خرابی‌هایی مثل شکست ماتریس و فیبر در حین جدایی اولیه می‌باشد.  $PII(x)$  که با افت ناگهانی مشخص می‌شود یک خرابی را در ماده نشان می‌دهد. تابع نوع  $PIV(x)$  که تابع کاهشی است، بیانگر رشد ترک سریع، به همراه مکانیزم‌های خرابی ترکیبی می‌باشد. همچنین قبل از بیشترین افت تابع سنتری، تابع  $BU$  قابل مشاهده است. تابع  $BU$  فاز ذخیره کرنش<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد، هر چقدر شیب نمودار  $BU$  بیشتر باشد به همان میزان توانایی ذخیره سازی کرنش بیشتر می‌شود. یکی از دلایل ایجاد  $BU$  پدیده پل زدن الیاف است. همانطور که از نمودار مشخص است، تابع  $BU$  ایجاد شده در لایه‌چینی تک جهته، بزرگتر از الیاف بافته شده است که دلیل این امر وجود فیبرهای بلند است.

در نمونه A1، نمودار تابع سنتری بعد از بیشترین افت تابع سنتری، شامل ترکیب توابع  $PI$ ،  $PIII$ ،  $PII$  و  $PIV$  است. نمونه A2 نیز شامل ترکیب توابع  $PI$ ،  $PIII$ ،  $PII$  و  $BU$  است. پدیدار شدن  $BU$  در نمونه A2 نشان‌دهنده این است که در اثر وجود پدیده پل زدن الیاف، توانایی ذخیره‌سازی انرژی کرنشی بیشتری نسبت به الیاف بافته شده دارد.

تابع  $PI(x)$ ، فاز ذخیره کرنش را نشان می‌دهد، هر چقدر شیب نمودار  $PI$  بیشتر باشد، به همان میزان توانایی ذخیره سازی کرنش بیشتر می‌شود. تابع  $PIII(x)$  که به وسیله یک تابع ثابت مشخص می‌شود، رشد ترک خیلی نرم را نشان می‌دهد، همچنین بیانگر این است که نوع خرابی در آن منطقه تغییر نمی‌کند. باید یادآوری شود که مطالعات بالا در زمینه رفتار آکوستیکی، یک تست و مطالعه استاندارد نیست، بلکه به طراحی و تولید مواد مقاوم در برابر پدیده جدایی بین‌لایه‌ای کمک خواهد کرد.

### ۴-۳- مشاهدات حاصل از میکروسکوپ الکترونی

برای صحنه‌گذاری نتایج، از میکروسکوپ الکترونی فیلیپس مدل XL30 استفاده شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انواع خرابی ایجاد شده به وضوح قابل مشاهده است. شکست ماتریس، شکست الیاف، و جدایی بین الیاف و ماتریس به راحتی از نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود ترک خوردن ماتریس و جدایی بین الیاف و ماتریس مکانیزم‌های خرابی غالب در نمونه A1 می‌باشند. در حالی که مکانیزم‌های خرابی غالب در نمونه A2، شکست الیاف و جدایی بین الیاف و ماتریس است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شروع، گسترش و انواع خرابی صورت گرفته در جدایش لایه‌ای سوراخکاری لایه‌های آخر کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی با روش غیر مخرب آکوستیک امپشن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که استفاده از شبیه‌سازی تست خمش سه نقطه، روش مناسبی برای مطالعه‌ی موردی تاثیر پارامترهای مشخص بر خرابی جدایی بین‌لایه‌ای، در سوراخکاری لایه‌های آخر کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی است. همچنین استفاده از روش ترکیبی آکوستیکی- مکانیکی راهکار دیگری برای پی بردن به میزان کارایی قطعه در حین فرایند جدایش لایه‌ای و پیدا کردن میزان و نوع خرابی‌های بحرانی می‌باشد.

همچنین استفاده از روش‌های توزیع انرژی، توزیع کانت و بیشترین افت در تابع سنتری روش‌های مناسبی برای به دست آوردن نیروی بحرانی عامل شروع جدایی بین لایه‌ای است. بطوریکه با استفاده از این روش‌ها می‌توان به سوراخکاری مواد کامپوزیتی بدون عیب جدایی بین‌لایه‌ای پرداخت. نتایج بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روشی با نتایج مربوط به داده‌های آکوستیکی تا حد قابل قبولی مورد تأیید می‌باشد، بطوریکه پدیده‌های مشاهده شده و رفتارهای آکوستیکی به خوبی با یکدیگر هم‌خوانی دارند.

### ۶- فهرست علائم

تابع افزایشی	$PI(x)$
تابع افت ناگهانی	$PII(x)$
تابع ثابت	$PIII(x)$
تابع کاهشی	$PIV(x)$
انرژی کرنشی	$E_s(x)$
انرژی اتفاقات AE	$E_a(x)$
زیرنویس‌ها	
کامپوزیت تقویت شده با الیاف	GFRP
روش دستی	Hand Layup
مدل هیوا	Hiwa
تابع سنتری	Sentry Function (SF)
کانت	Counts

1- Strain Storing Phase

- [5] N. Godin, S. Huguët, 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*, Vol.38, 2005, pp.299-309.
- [6] Y. H. Yu, J. H. Choi, J. H. Kweon, D. H. Kim, A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission, *Composite Structures*, Vol.75, 2006, pp.163-169.
- [7] Y. B. Guo, S. C. Ammula, Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining, *International journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 2005, pp. 1622-1627.
- [8] E. Govekar, J. Gradisek, I. Grabec, Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining process, *Ultrasonic*, Vol. 38, 2000, pp. 598-603.
- [9] G. Minak, A. Zucchelli, *Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques*, In: Durand LP, editor. Composite Materials Research Progress. Nova Science Publishers, 2008, pp.165-207.
- [10] G. Minak, A. Zucchelli, *Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques*, Composite Materials Research Progress, Nova Science Publishers, 2008, pp.165-207.
- [11] G. Minak, P. Morelli, A. Zucchelli, Fatigue residual strength of circular laminate graphite-epoxy composite plates damaged by transverse load, *Composites Science and Technology*, Vol.69, 2009, pp.1358-1363.
- [12] G. Minak, P. Morelli, A. Zucchelli, Fatigue residual strength of circular laminate graphite-epoxy composite plates damaged by transverse load, *Composites Science and Technology*, Vol.69(9): 2009, pp1358-1363.

انرژی اتفاق	Event Energy
فاز ذخیره کرنش	Phase Strain Storing
پک	PAC
پیکو	PICO
تابع افزایشی	Increasing Function
تابع افت ناگهانی	Sudden Drop Function
تابع ثابت	Constant Function
تابع کاهش	Decreasing Function

## ۷- مراجع

- [1] W. Koenig, C. Wulf, P. Grass, and H. Willersheid, *Machining of fiber reinforced plastics*, Ann. CIRP, Vol. 34, 1985, pp.536-548.
- [2] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, 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.
- [3] S. Arul, L. Vijayaraghavan, S. K. Malhotra, Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.185, 2007, pp.184-190.
- [4] N. Godin, S. Huguët, 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*, Vol.37, 2004, pp.253-264.