

Investigation of Failure Mechanism of the Composite Tubes Made by Filament Winding Process by Acoustic Emission Method

S. Alimirzaei, M. Ahmadi Najafabadi*, A. Bani Mohammad Ali

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Review History:

Received: Oct. 14, 2021

Revised: Jan. 18, 2022

Accepted: Mar. 11, 2022

Available Online: Mar. 26, 2022

Keywords:

Filament-wound composite

Failure mechanisms percentage

Acoustic emission method

Numerical simulation

VUMAT subroutine

ABSTRACT: To study the energy absorption features in composite structures, it is necessary to identify the functional mechanisms and determine the impact of each on the energy absorption. In this study, the behavior of composite tubes under compressive axial load was investigated by acoustic emission monitoring. To make a filament wound composite tube, the optimal parameters were first determined using literature. In determining the optimal parameters, due to the uncertainty effect of fiber angles, from the intermediate range, the angle of 35 degrees was selected. Then, to ensure the experimental results, the finite element simulation method and the use of the VUMAT subroutine based on the 3D Hashin criterion were used. The results showed that the dominant failure mode was a local shear failure and lateral damage, which first caused the plastic deformation of the sample and then caused the growth of cracks in the fiber direction. Also, the highest percentage of failure mechanisms are matrix cracking, fiber breakage, and separation of fibers from the matrix, respectively. Finally, the use of the developed subroutine to predict the behavior of the structure was useful and was able to predict the behavior of the composite tube even after the maximum crushing force.

1- Introduction

With increasing speed limits in cars, ensuring failure against impact is one of the most important points in the design of structures. Thin-walled structures are widely used for this purpose, and many efforts are currently being made to increase energy absorption capacity. Due to the fact that metal tubes under buckling axial load are degraded and have a high weight, the use of composite tubes due to their lightweight and progressive mode is the most suitable option for energy absorbers [1].

The filament winding process is one of the most suitable production processes for cylindrical structures, which is usually used for the production of pipes, shafts, pressure vessels, etc. This process has high accuracy for positioning the fibers, controlling the volume fraction of the fibers, and making the desired angles (see Fig. 1).

HIWA model pressure device with a capacity of 5 tons was used to load the samples. According to Fig. 2, the test specimens were tested at a speed of 2 mm/min, and AEWin software and PCI-2 system with a sampling rate of 2 MHz were used to record acoustic emission data. The amount of displacement and load was continuously recorded by the testing machine and the Dino-Lite digital camera was used to capture the progressive failure of the composite tube (see Fig. 2).

2- Methodology

In order to calculate the percentage of failure mechanisms created in the structure, in addition to using the components of acoustic emission signals, it is necessary to use complex methods to process these signals. Fast Fourier transform and wavelet transform can be considered as common methods of signal processing. Instead of using the sine and cosine functions used in Fourier transform, which focuses on only one frequency, the wavelet transform uses functions as

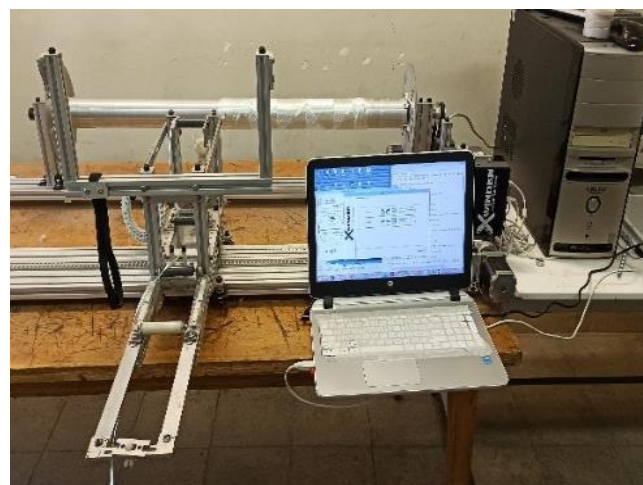


Fig. 1. Filament winding method

*Corresponding author's email: ahmadin@aut.ac.ir



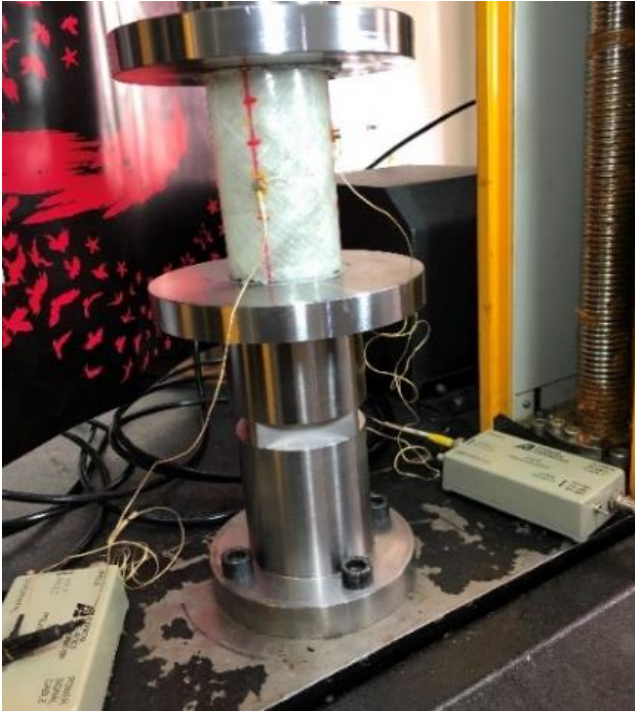


Fig. 2. Image of loading a cylindrical sample under a quasi-static axial load and sensors attached to the sample

wavelets consisting of several different frequencies. Discrete wavelet transform is one of the most widely used types of wavelet transform in which the main signal is broken down into components called generalities and details. In the next levels, the signal generalities are again divided into two parts, details and generalities, and this signal decomposition process continues to the desired level. From a mathematical point of view, discrete wavelet transform is defined as follows:

$$f(t) = c \sum_i \sum_k DWT(i, k) 2^{\frac{i}{2}} \psi(2^i t - k) \quad (1)$$

Inverse discrete conversion is also obtained according to the following equation:

$$DWT(i, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{i}{2}} \psi^*(2^i t - k) \quad (2)$$

where $f(t)$, $DWT(i, k)$, and i represent the desired signal, wavelet conversion coefficients, and decomposition level, respectively. Also, k , ψ and ψ^* represent the time domain, the mother wavelet transform and mixed ψ conjugate [2, 3]. Due to the fact that in discrete wavelet transform, high-frequency components are not decomposed, part of the data is deleted and not analyzed. In this research, in order to analyze all the components of the signal, packet wavelet transform

has been used. The working principle of this method is that, at the signal decomposition levels, in addition to generalities, the signal detail section is also divided into two sections, generalities, and details, each component having a specific frequency range. Therefore, each signal can be decomposed into a set of wavelet components, each with its own frequency range. Since the different distribution of energy at each level corresponds to a particular failure or failure, the energy percentage of each of the decomposed components is obtained using the energy criterion.

3- Results and Discussion

According to Fig. 3, the acoustic emission signals obtained from the sample test were decomposed into three levels and divided into 8 components. Then, using the energy criterion, the energy percentage of each of the 8 components of the signal decomposed in the third level was obtained. Each component has a specific frequency range depending on the level of decomposition at which it is located and whether the component is a high frequency or low frequency.

Analysis of these acoustic signals shows that the acoustic response of the structure to the load can be divided into four different regions. In the first area, no acoustic activity is observed in the structure. Examination of the amplitude range of the received signals at the beginning of the second region shows that the range of its changes is mainly related to the matrix cracking. The third area is mainly associated with an increase in the number of hits. Finally, the fourth or end region is associated with the reception of various types of acoustic signals, the strongest of which occurs with a very high amplitude, which is related to the fiber breakage (see Fig. 4).

4- Conclusion

In this study, the failure mechanisms created in 35° composite tubes were investigated by experimental methods, acoustic emission technique, and finite element simulation. It was found that:

The most common mode of failure in filament-wound tubes under this angle is local failure due to lateral damage and compressive deformation, which mainly begins with the separation of fibers from the matrix at the head of the sample, and then due to the inability to expand separation continued.

After local deformation creation, the crack begins to grow from that point along the twist angle of the fibers, eventually causing the specimen to cut and the upper part to sink into the lower part, and the crushing continues progressively.

The acoustic emission method was also used to validate the experimental results. The results of the observations showed that the behavior of the force-displacement diagram is completely consistent with the acoustic diagrams so that the force drop in the diagram is always associated with the release of acoustic energy, the amount of this energy varies depending on the type of failure mechanism that occurs in the sample.

Examination of the amplitude of acoustic signals showed that the onset of failure in cylindrical structures begins mainly with the cracking of the matrix and gradually occurs with increasing stress applied to the structure, separating the fibers from the matrix, matrix cracking, and fiber breakage, respectively. These failure mechanisms are recognizable from the amplitude range of acoustic signals.

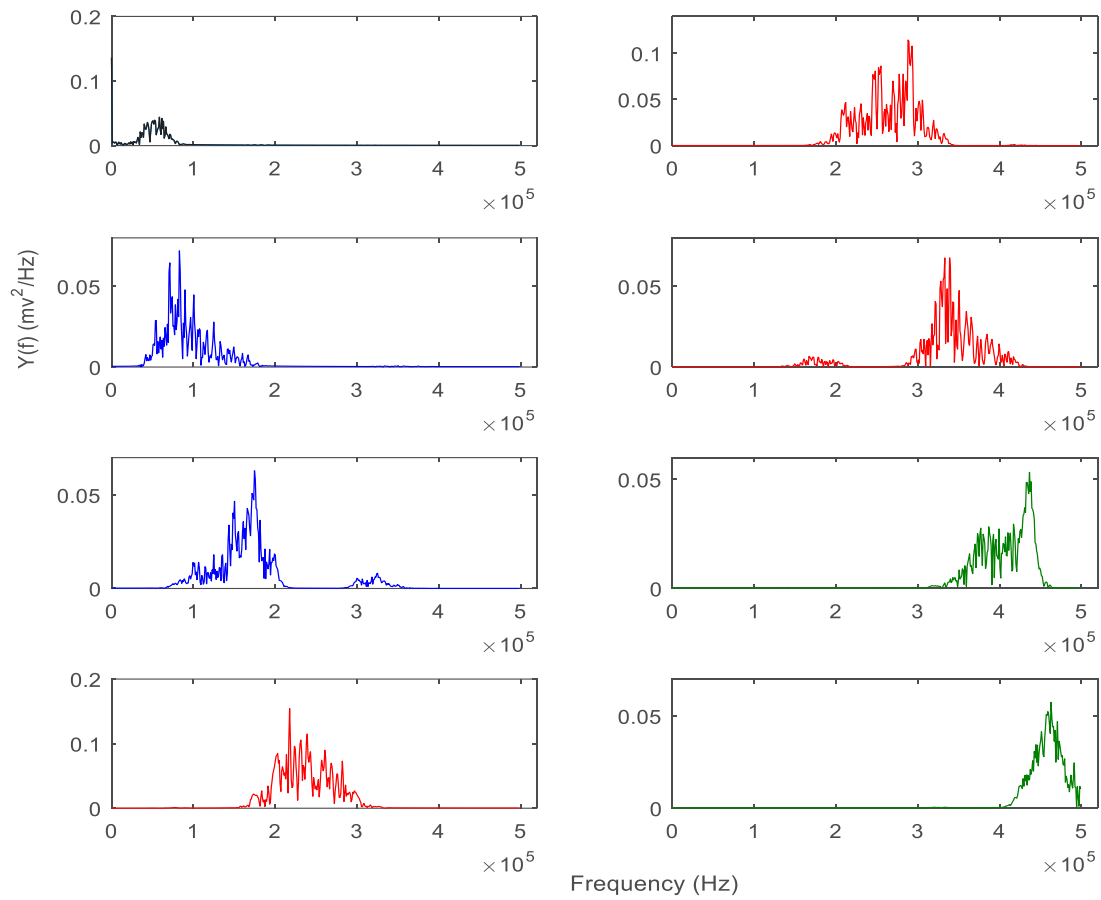


Fig. 3. Frequency distribution percentage of each of the 8 components resulting from the decomposition of acoustic emission signals

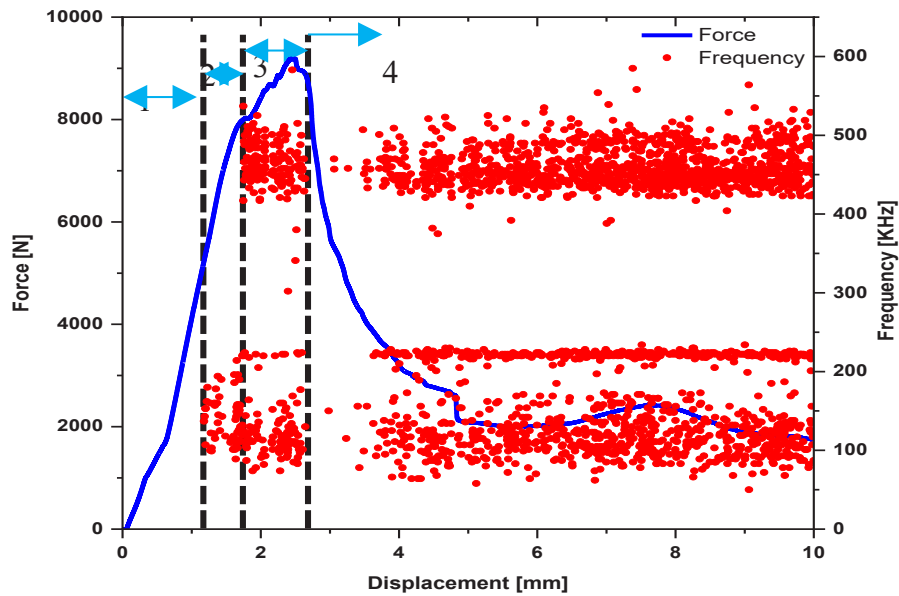


Fig. 4 Frequency of AE signals with respect to the displacement

3D Hashin failure criterion was used in the simulation of composite tubes. The results of finite element modeling showed that the 3D Hashin criterion used predicts the onset and growth of failure well.

References

- [1] K.C. Shen, G. Pan, Buckling and strain response of filament winding composite cylindrical shell subjected to hydrostatic pressure: Numerical solution and experiment, *Composite Structures*, 276 (2021) 114534.
- [2] G. Meurant, *Wavelets: a tutorial in theory and applications*, Academic press, 2012.
- [3] K. Soman, K. Ramachandran, *Insight into wavelets from theory to practice* 2nd edn, in, 2004.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Alimirzaei, M. Ahmadi Najafabadi, A. Bani Mohammad Ali, *Investigation of Failure Mechanism of the Composite Tubes Made by Filament Winding Process by Acoustic Emission Method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(6) (2022) 275-278.

DOI: [10.22060/mej.2022.20663.7292](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20663.7292)





بررسی خرابی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده با فرآیند رشته‌پیچی الیاف با روش نشرآوایی

سجاد علی میرزائی، مهدی احمدی نجف‌آبادی^{*}، امیر بنی محمد علی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶

کلمات کلیدی:

لوله کامپوزیتی رشته‌پیچی

درصد مکانیزم‌های خرابی

روش نشرآوایی

شبیه‌سازی عددی

زیرروال وی‌یومت

خلاصه: به منظور بررسی ویژگی‌های جذب انرژی در سازه‌های کامپوزیتی لازم است تا مکانیزم‌های عملکردی شناسایی شده و میزان تأثیر هر یک در میزان جذب انرژی مشخص شود. در این پژوهش به بررسی رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری با پایش سیگنال‌های نشرآوایی پرداخته می‌شود. برای ساخت لوله کامپوزیتی رشته‌پیچی شده در ابتدا با استفاده از تحقیقات صورت گرفته به تعیین پارامترهای بهینه پرداخته شد. در تعیین پارامترهای بهینه با توجه به وجود عدم قطعیت در تأثیر زاویه پیچش الیاف، از بین محدوده بهینه حد واسط این محدوده یعنی زاویه پیچش ۳۵ درجه انتخاب گردید. سپس برای اطمینان از نتایج تجربی، از روش شبیه‌سازی المان محدود و به کارگیری زیرروال وی‌یومت بر پایه معیار گسیختگی هاشین سه‌بعدی استفاده شد. نتایج نشان داد که مد خرابی غالب شکست موضعی برشی و آسیب جانبی بوده که در ابتدا باعث تغییر شکل پلاستیکی نمونه شده و سپس موجب رشد ترک در راستای زاویه پیچش الیاف می‌شود. همچنین بیشترین درصد مکانیزم‌های خرابی به ترتیب ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس می‌باشد. در نهایت استفاده از زیرروال توسعه داده شده برای پیش‌بینی رفتار سازه مفید واقع گردید و توانست رفتار لوله کامپوزیتی را حتی بعد از حداکثر نیروی لهدیگی نیز به خوبی پیش‌بینی کند.

۱- مقدمه

بررسی و مطالعه قرار گیرد، تا بتوان با شناخت رفتار این سازه‌ها در مقابل انواع بارگذاری‌ها، قابلیت اطمینان سازه را در حین بارگذاری افزایش داد. این مساله منجر به انجام تحقیقاتی در زمینه مقاومت مواد کامپوزیتی در برابر بارهای خارجی شده است. آگاهی از خواص و رفتار این مواد در برابر انواع بارگذاری‌ها مستلزم بررسی تحقیقات و مطالعات انجام شده توسط دیگران می‌باشد.

سودن و همکاران [۲] به بررسی تنش‌های شکست لوله‌های شیشه/اپوکسی ساخته شده با روش رشته‌پیچی^۱ تحت بارهای ترکیبی فشاری داخلی و فشاری محوری پرداختند. آن‌ها تنش‌های محوری و تنش‌های محیطی ناشی از انواع بارگذاری را مورد بررسی قرار دادند. روسو و همکاران [۳] به بررسی اثرات الگوهای مختلف پیچش^۲ الیاف بر روی رفتار خرابی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده با استفاده از روش رشته‌پیچی الیاف پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در نظر گرفتن الگوهای مختلف پیچش الیاف تأثیر کمی در سفتی این سازه‌های کامپوزیتی دارد. پارک و همکاران [۴] به تحلیل سازه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش پیچش الیاف با در نظر

با افزایش محدودیت سرعت در خودروها، اطمینان از خرابی در برابر ضربه وارده به عنوان یکی از مهم‌ترین نکات در طراحی سازه‌ها به شمار می‌آید. سازه‌های جدار نازک به طور گسترده برای این منظور استفاده می‌شوند و در حال حاضر نیز تلاش‌های بسیاری در زمینه افزایش ظرفیت جذب انرژی در حال انجام است. باتوجه به اینکه لوله‌های فلزی تحت بار محوری فشاری به صورت کم‌انرژی تخریب می‌شوند و وزن بالایی دارند، استفاده از لوله‌های کامپوزیتی بدلیل سبک بودن و نیز تخریب بصورت مد پیش‌رونده مناسب‌ترین گزینه برای ضربه‌گیرها می‌باشد [۱]. مقاطع استوانه‌ای کامپوزیتی در طول استقرار در محل و کارکرد، تحت بارهای مختلف قرار می‌گیرند. این بارها ممکن است در اثر عوامل مختلفی بوجود آمده و آسیب‌های داخلی قابل توجهی را بوجود آورند، که موجب کاهش شدید مقاومت باقیمانده در این مقاطع شود. از این‌رو رفتار سازه‌های کامپوزیتی در مقابل بارهای وارده و همچنین پارامترهای مؤثر بر آن‌ها باید به دقت مورد

1 Filament winding method

2 Mosaic pattern

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahmadin@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



گرفتن تغییر زاویه پیچش در راستای ضخامت سازه پرداختند. مرتینی و الیین [۵] تأثیر تنش اعمالی در طول لوله‌های ساخته شده به روش پیچش الیاف را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش نیروی کشش الیاف باعث افزایش خواص و استحکام سازه می‌شود. رفیعی [۶] به بررسی تجربی، تئوری و عددی کشش لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش رشته‌پیچی الیاف با هندسه‌ها، تعداد لایه‌ها و زوایای پیچش مختلف پرداخت. او در این پژوهش در ابتدا با استفاده از استانداردهای موجود در کاتالوگ به بررسی نمونه‌های طولی و محیطی بریده شده از نمونه اصلی پرداخت، سپس نمونه اصلی را تحت بارگذاری محیطی قرار داده و به مقایسه بین نتایج حاصل از سه روش مورد استفاده در این پژوهش پرداخت. مطالعات قابل توجهی در مورد رفتار خردشوندگی سازه‌های کامپوزیتی انجام شده است. ماملیس و همکاران [۷]، ویژگی‌های خردشوندگی لوله‌های کامپوزیتی جدار نازک تقویت شده با کربن را تحت بارهای محوری استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران [۸]، به بررسی خردشوندگی لوله‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی پرداختند و ظرفیت جذب انرژی و حالت‌های مختلف شکست را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. کلهر و کیس [۹] به بررسی اثرات زوایای مختلف پیچش الیاف و ضخامت لوله‌های کامپوزیتی بر روی جذب انرژی لوله‌های ترکیبی فولاد-شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت بخش شیشه/اپوکسی یک پارامتر مهم است که می‌تواند حالت فروپاشی و ظرفیت جذب انرژی را تغییر دهد.

در زمینه نشرآوایی یونگ و همکاران [۱۰] به بررسی مکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت‌های سیلیکون کارباید تقویت شده با الیاف کربن، تحت بارگذاری استاتیکی توسط روش نشرآوایی پرداختند. آن‌ها از تکنیک‌های همبستگی تصاویر دیجیتال^۱ برای افزایش درک مکانیزم‌های آسیب در کامپوزیت‌های سیلیکون کارباید استفاده کردند. همچنین برای ارزیابی میزان آسیب، پارامترها و شاخص‌های اصلی نشرآوایی را استخراج کردند و از روش طبقه‌بندی کی‌میز^۲ برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های نشرآوایی و مودهای خرابی ایجاد شده، استفاده کردند. فریدریش و همکاران [۱۱] به بررسی فرآیند گسترش آسیب در نمونه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارگذاری خمشی سه نقطه با استفاده از روش نشرآوایی پرداختند. برای تجزیه و تحلیل مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده آنها از فرکانس و دامنه سیگنال‌های

ثبت شده، استفاده کردند. سعیدی‌فر و همکاران [۱۲] طی پژوهشی رفتار جدایش بین‌لایه‌ای چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی را به روش نشرآوایی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از دو پارامتر سرعت انتشار سیگنال‌های نشرآوایی و همچنین انرژی تجمعی سیگنال‌های نشرآوایی رابطه‌ای برای مقدار رشد ترک بین‌لایه‌ای پیدا کردند.

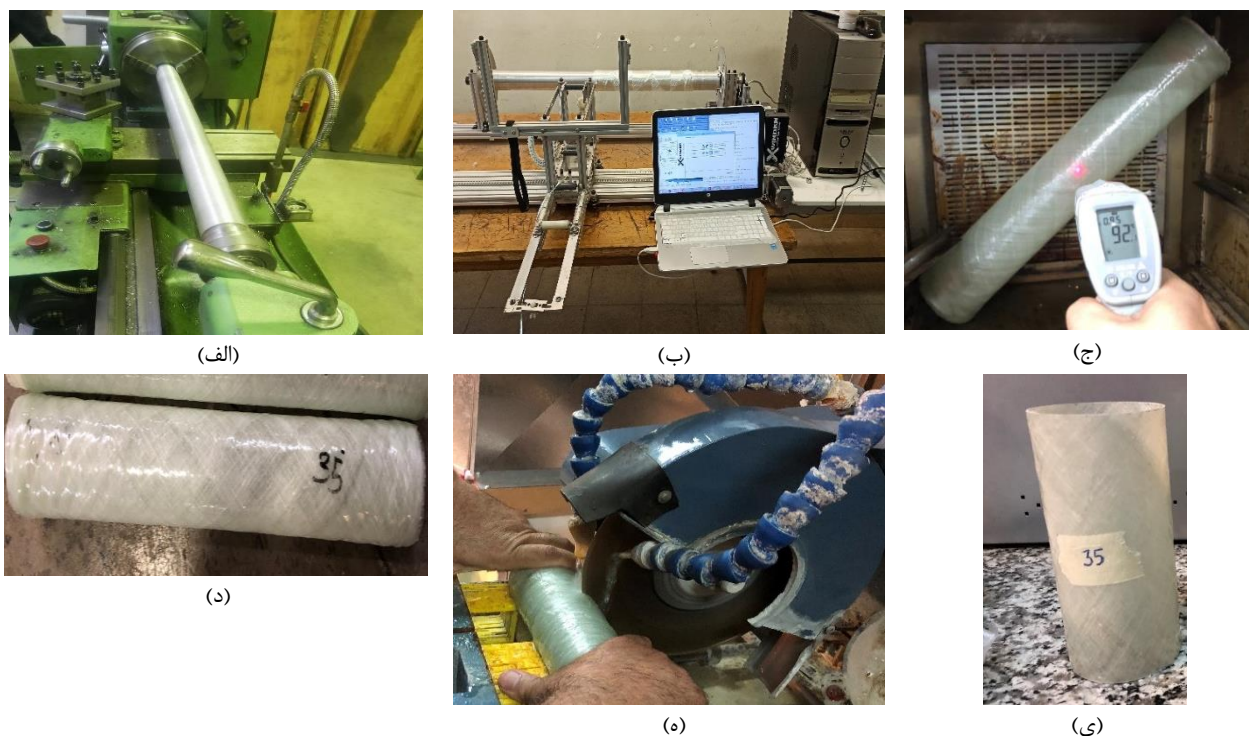
اسخو و چن [۱۳] و جونگی ژوا و همکاران [۱۴] با استفاده از زیرروال وی‌یومت^۳ در مدل آسیب پیشرونده اصلاح شده به پیش‌بینی خرابی ایجاد شده در چندلایه‌های کربن/اپوکسی تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. در این پژوهش‌ها وقوع خرابی ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای با استفاده از معیارهای شکست مبتنی بر روابط تجربی و سایر معیارهای توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته شد. فریرا و همکاران [۱۵]، وانگ و همکاران [۱۶] و لادویز و لدانتک [۱۷] از یک زیرروال وی‌یومت مکانیک آسیب پیوسته به منظور پیش‌بینی مکانیزم‌های شکست درون‌لایه‌ای در صفحات کامپوزیتی کربن/اپوکسی استفاده کردند. لی و همکاران [۱۸] به ارزیابی مدل‌های مختلف خرابی و رشد آسیب در سازه‌های کامپوزیتی تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تئوری‌های خرابی هاشین و پوک، نسبت به تئوری‌های بیشینه تنش و تسای وو آسیب فشاری ماتریس را با دقت بیشتری تخمین می‌زنند.

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار خردشوندگی لوله‌های کامپوزیتی $\pm 35^\circ$ درجه ساخته شده با روش رشته‌پیچی الیاف مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات نشان می‌دهند که آسیب در سازه‌های کامپوزیتی عمدتاً به صورت ترکیبی از مکانیزم‌های خرابی مختلف که شامل شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، جدالایی و شکست الیاف هستند، رخ می‌دهد و لازم است تا میزان تأثیر هریک از این مکانیزم‌ها شناسایی شود. به نظر می‌رسد تعیین درصد هریک از این سازوکارهای خرابی می‌تواند کمک شایانی در درک نحوه جذب انرژی توسط سازه مورد نظر بدست دهد تا در نهایت سازه‌ای با بیشترین میزان جذب انرژی طراحی و ساخته شود. به همین منظور در این پژوهش روش نشرآوایی به عنوان یک روش معتبر به منظور محاسبه درصد هریک از سازوکارهای خرابی در لوله کامپوزیتی رشته‌پیچی شده ارائه شد. در نهایت نمونه‌های کامپوزیتی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شدند و برای در نظر گرفتن پارامترهای خرابی، زیرروال وی‌یومت بر پایه معیار هاشین سه‌بعدی در نرم‌افزار فرترن نوشته شد و با نرم‌افزار آباکوس لینک گردید.

1 Digital image correlation

2 K-means

3 User material subroutine (VUMAT)



شکل ۱. مراحل مختلف ساخت و آماده سازی نمونه: (الف) ساخت ماندل، (ب) دستگاه رشته پیچی، (ج) پخت لوله، (د) لوله ساخته شده توسط دستگاه رشته پیچی الیاف، (ه) برش لوله کامپوزیتی و (ی) نمونه کامپوزیتی نهایی

Fig. 1. Different stages of fabrication and preparation of samples: a) Making mandrel, b) Filament winding machine, c) Tube curing, d) Pipe made by the filament winding machine, e) Composite pipe cutting, and f) Final composite sample

داده شد. در نهایت به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد در کوره حرارت داده شد تا نمونه به حداکثر استحکام خود برسد (شکل ۱-ج). در مرحله بعد برای برش لوله های کامپوزیتی، به منظور جلوگیری از کنده شدن الیاف و ایجاد جدایش بین لایه ای در سر نمونه ها مطابق شکل ۱-ه از یک تیغه الماسی سرعت بالا استفاده گردید.

۳- تجهیزات آزمایش

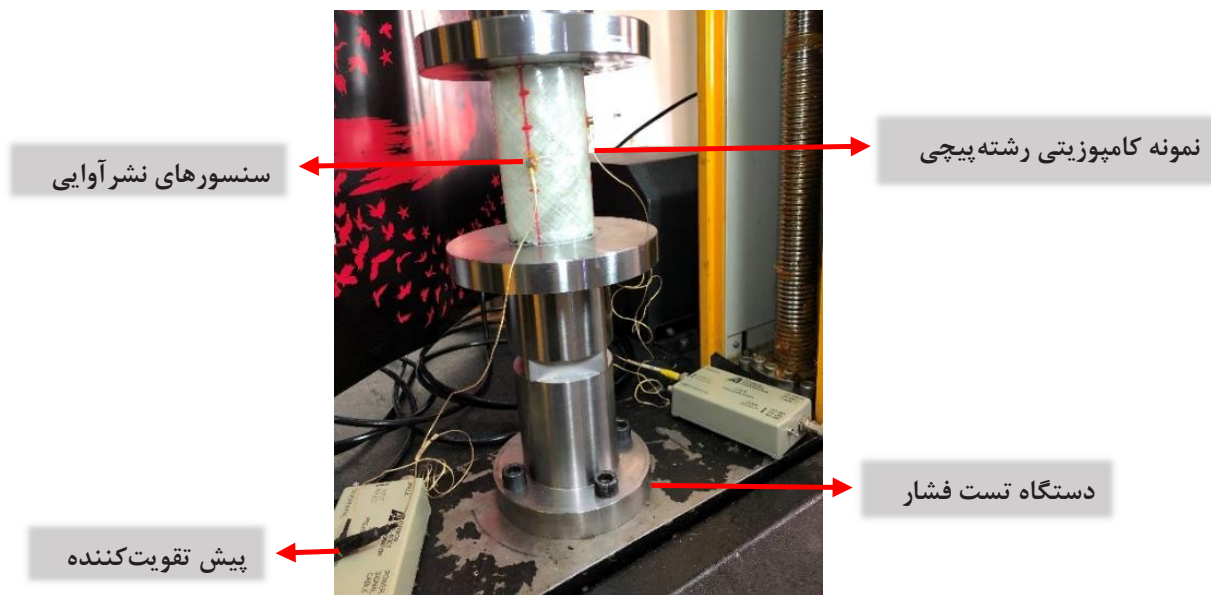
برای بارگذاری نمونه ها، از دستگاه فشار مدل هیوا^۴، با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. مطابق شکل ۲ نمونه های آزمایش با سرعت ۲ میلی متر بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفته شد و برای ثبت داده های نشر آوایی از نرم افزار آئی وی ن^۵ و سیستم پی سی آی-۳^۶ با نرخ داده برداری ۲ مگاهرتز^۷ استفاده شد. میزان جابجایی و بار به طور پیوسته توسط دستگاه تست فشار ثبت گردید و خرابی پیشرونده لوله کامپوزیتی با دوربین دیجیتال دینولایت ثبت شد.

۲- فرآیند ساخت و آماده سازی نمونه ها و مواد مورد استفاده

در این پژوهش از روش پیچش تر، که در آن از حمام رزین برای خیس کردن الیاف استفاده می شود و روشی معمول در صنعت به شمار می آید، استفاده شده است. پس از بررسی زاویه ترشوندگی رزین با الیاف، ویسکوزیته رزین و نیز میزان خیس شوندگی الیاف، رزین از نوع ال آر ۶۳۰^۱ با هاردنر ال اچ ۶۳۰^۲ و الیاف شیشه از نوع E و تکس ۱۲۰۰ به عنوان مناسب ترین مواد برای فرآیند ساخت انتخاب شدند. برای ساخت لوله کامپوزیتی از دستگاه رشته پیچی رومیزی ایکس وایندر^۳ استفاده شد. به منظور سهولت در خارج کردن ماندل از داخل نمونه، مطابق شکل ۱-الف از یک ماندل آلومینیومی که سطح آن پولیش کاری شده است استفاده گردید و قبل از پیچش الیاف بر روی ماندل، یک لایه نوار خاص به دور ماندل پیچیده شد. پس از اتمام فرآیند پیچش الیاف به دور ماندل (شکل ۱-ب)، به منظور پخت اولیه لوله کامپوزیتی بر روی دستگاه پیچش الیاف به مدت ۱ ساعت چرخانده شد. سپس از روی دستگاه باز شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار

4 HIWA
5 AEWIn
6 PCI-2
7 MHz

1 LR630
2 LH630
3 X-winder



شکل ۲. تصویری از بارگذاری نمونه استوانه تحت بار محوری شبه‌استاتیکی و سنسورهای متصل به نمونه

Fig. 2. Image of loading a cylindrical sample under a quasi-static axial load and sensors attached to the sample

سهم‌های بعدی را در ایجاد نقص هندسی دارند. همچنین نوع المان‌بندی تمامی اجزا لوله استوانه‌ای کامپوزیتی، برای اطمینان از انطباق هرچه بهتر المان‌بندی با ویژگی‌های هندسی، به صورت المان C3D8R با استفاده از کنترل ساعت‌شنی^۲ در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی بدلیل غیرخطی بودن خواص ماده، شرایط مرزی و هندسه توسط حلگر ضمنی^۳ انجام شد و برای بررسی خرابی، معیار خرابی به صورت زیرروال وی‌یومت در نرم‌افزار فرترن^۴ نوشته شد و با نرم‌افزار آباکوس لینک گردید.

۴-۱- معیار خرابی هاشین

معیارهای متعددی برای تخریب مواد کامپوزیتی ارائه شده است که در این پژوهش به معیار هاشین سه‌بعدی پرداخته می‌شود. معیار هاشین به بررسی چهار مکانیزم شروع خرابی در کامپوزیت‌ها می‌پردازد که عبارت‌اند از: ۱- شکست الیاف تحت کشش، ۲- شکست الیاف تحت فشار، ۳- شکست زمینه تحت کشش و ۴- شکست زمینه تحت فشار. شروع مکانیزم‌های خرابی با استفاده از این معیار به صورت جدول ۴ تعریف می‌شود:

۴- مدل‌سازی المان محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار تجاری آباکوس^۱ برای شبیه‌سازی لوله کامپوزیتی استفاده شد. با توجه به اینکه مدل‌سازی لوله‌های فیلامنت و ایندینگ به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار تعریف نشده است، لوله استوانه‌ای با در نظر گرفتن پهنای الیاف و نیز زاویه پیچش الیاف در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. مشخصات هندسی و خواص مکانیکی نمونه به ترتیب در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین قابل ذکر است که پهنای باند الیاف و ضخامت هر لایه کامپوزیتی به ترتیب ۳ و ۰/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

در واقعیت به دلیل اینکه یک سازه به صورت صاف و یکدست تولید نمی‌شود، قبل از انجام شبیه‌سازی، لازم است تا تحلیل نیرویی صورت گرفته و درصدی از تغییر شکل مربوط به بارگذاری محوری، به عنوان نقص در شبیه‌سازی اعمال شود. با توجه به نتایج تجربی، مشاهده گردید که بهترین روش برای ایجاد این نقص هندسی، استفاده از ترکیب خطی تغییر شکل‌های چند مود نخست تغییر شکل تحت بارگذاری محوری می‌باشد [۲۰]. با افزایش نیروی محوری، تأثیر مودها در ایجاد نقص هندسی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که اولین مود تغییر شکل بیشترین سهم و مودهای سوم و پنجم،

2 Hourglass
3 Implicit
4 Fortran

1 ABAQUS

جدول ۱. مشخصات هندسی لوله‌های کامپوزیتی

Table 1. Geometrical specifications of composite tubes

کمیت	اندازه (میلی‌متر)
طول استوانه	۱۲۰
قطر استوانه	۶۰
ضخامت	۱/۵

جدول ۲. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی

Table 2. Mechanical properties of composite tube

E_r (MPa)	E_θ (MPa)	E_z (MPa)	ρ (gr / cm ^۳)
۸۶۰۰	۸۶۰۰	۳۹۰۰۰	۱۷۸۰
G_{rz} (MPa)	ν_{rz}	ν_{rz}	ν_{rz}
۳۵۴۱	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳
Y^T (MPa)	X^T (MPa)	G_{rz} (MPa)	G_{rz} (MPa)
۳۹	۱۰۸۰	۳۴۶۴	۳۴۶۴
S^T (Mpa)	S^L (MPa)	Y^C (MPa)	X^C (MPa)
۷۴	۳۹	۱۲۸	۶۲۰

جدول ۳. انرژی‌های شکست نمونه کامپوزیتی [۱۹]

Table 3. Fracture energies of composite specimens [19]

پارامتر	مفهوم	مقدار (J / m ^۲)
G_f^T	انرژی شکست کششی الیاف	۱۰۷۶۴۰
G_f^C	انرژی شکست فشاری الیاف	۳۴۱۶۰
G_m^T	انرژی شکست کششی زمینه	۴۸۴۴/۷
G_m^C	انرژی شکست فشاری زمینه	۱۰۴۱۴/۵

جدول ۴. تئوری هاشین سه بعدی [۲۱]

Table 4. 3D-Hashin theory [21]

گسیختگی کششی الیاف	$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S^2} = 1$
گسیختگی فشاری الیاف	$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 = 1$
گسیختگی کششی زمینه	$\frac{(\sigma_r + \sigma_r)^2}{Y_T^2} + \frac{(\tau_{rr} - \sigma_r \sigma_r)}{S_t^2} + \frac{(\tau_{1r}^2 + \tau_{1r}^2)}{S^2} = 1$
گسیختگی فشاری زمینه	$\frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_t} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_r + \sigma_r) + \frac{1}{4S_c^2} (\sigma_r + \sigma_r)^2 + \frac{1}{S_t^2} (\tau_{rr} - \sigma_r \sigma_r) + \frac{1}{S^2} (\tau_{1r}^2 - \tau_{1r}^2) = 1$

را می‌توان از جمله روش‌های معمول پردازش سیگنال برشمرد. تبدیل موجک به جای استفاده از توابع سینوسی و کسینوسی که در تبدیل فوریه مورد استفاده قرار می‌گیرند و فقط بر روی یک فرکانس تمرکز دارند، از توابعی به عنوان موجک که از چندین فرکانس مختلف تشکیل شده‌اند استفاده می‌کند. تبدیل موجک گسسته^۳ یکی از پرکاربردترین نوع تبدیلات موجک می‌باشد که در آن سیگنال اصلی به اجزایی تحت عنوان کلیات و جزئیات تجزیه می‌شود. در سطوح بعدی، کلیات سیگنال مجدداً به دو بخش جزئیات و کلیات تقسیم می‌شوند و این روند تجزیه سیگنال تا سطح مورد نظر ادامه می‌یابد. از دیدگاه ریاضی، تبدیل موجک گسسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = c \sum \sum DWT(i, k) 2^{\frac{i}{2}} \psi(2^i t - k) \quad (1)$$

تبدیل گسسته معکوس نیز طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

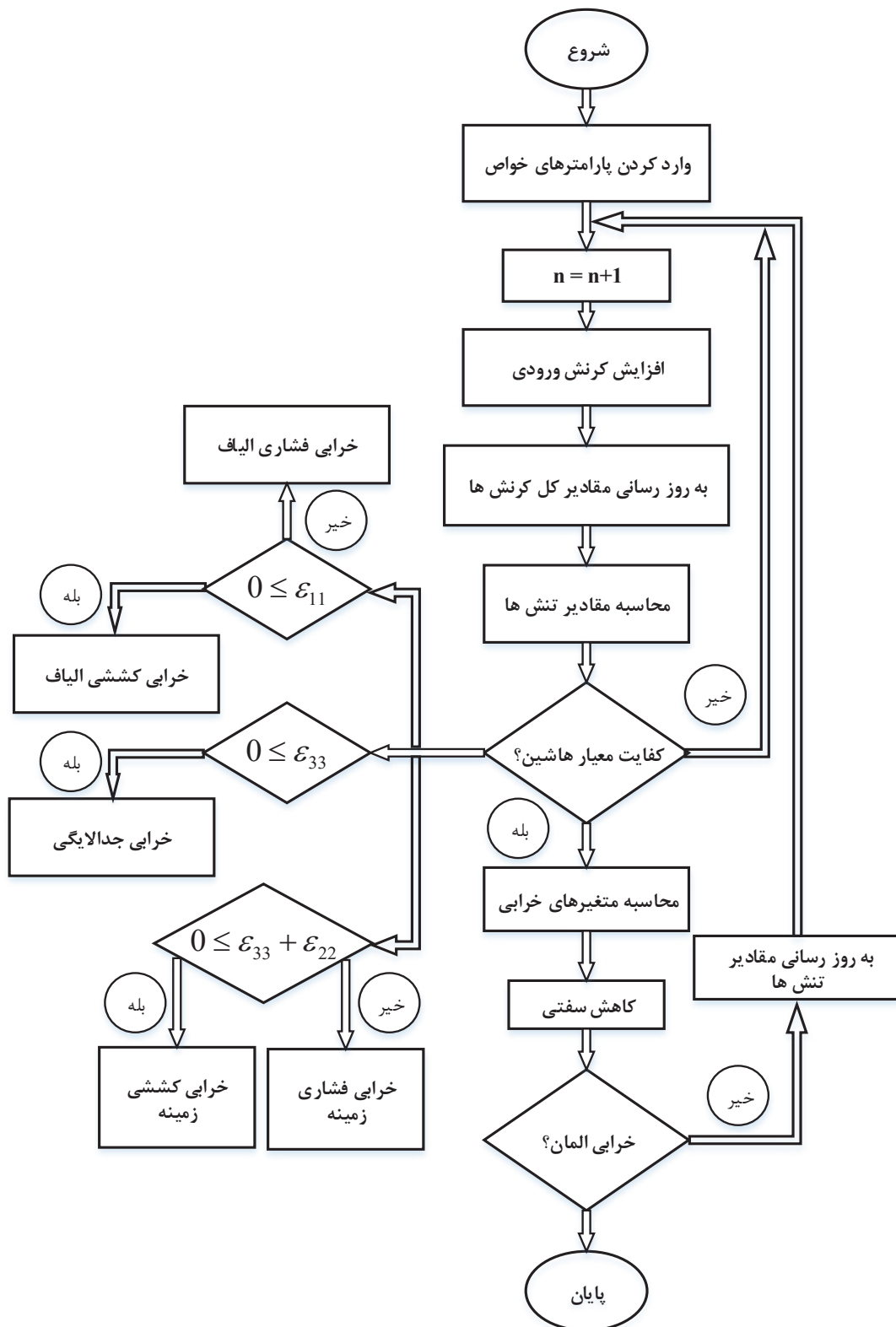
$$(i, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{i}{2}} \psi^*(2^i t - k) \quad (2)$$

در روابط فوق Y_C, Y_T, X_C, X_T به ترتیب مقاومت شکست کششی و فشاری لایه‌های مرکب در جهت الیاف و عمود بر آن بوده و S_t مقاومت برشی می‌باشد. در این پژوهش برای پیش‌بینی رفتار لوله کامپوزیتی با استفاده از معیار هاشین سه‌بعدی از زیرروال وی‌یومت برای تعریف رفتار و معادلات ساختاری ماده استفاده شد. در حین اجرای برنامه در طی هر گام زمانی، آباکوس اطلاعات گام کرنش را به زیربرنامه وی‌یومت انتقال می‌دهد. هنگامی که معیار خرابی تشخیص داده شد، خواص ماده با به روزرسانی متغیرهای آسیب کاهش می‌یابد و تنش در نقاط انتگرال‌گیری^۲ المان‌ها با کاهش ماتریس سفتی به روزرسانی می‌شود. سرانجام متغیرهای حالت به روزرسانی شده و برای تحلیل و آنالیز مرحله بعدی به آباکوس بازگردانده می‌شود. در شکل ۳ فلوچارت زیر برنامه نوشته شده برای معیار خرابی آورده شده است.

۵- تبدیل موجک

به منظور محاسبه درصد مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده در سازه، علاوه بر استفاده از مولفه‌های سیگنال‌های نشرآوایی، نیاز به استفاده از روش‌هایی پیچیده‌تر برای پردازش این سیگنال‌ها می‌باشد. تبدیل فوریه و تبدیل موجک

- 1 Increment
- 2 Integration



شکل ۳. فلوچارت معیار هاشین سه بعدی

Fig. 3. The flowchart of 3D-Hashin criteria

۶- بحث روی نتایج

۶-۱- تحلیل مکانیکی

همانطوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در بارگذاری لوله کامپوزیتی نیرو تا مقدار ۹۱۸۹/۹۷ نیوتن بالا رفته و سپس دچار یک افت می‌شود. مشاهدات بدست آمده از تست‌های تجربی نشان می‌دهد که شکست الیاف و ماتریس در سر نمونه‌ها به دلیل کرنش‌های بالا و نیز تنش‌های برشی عرضی بالایی است که به دو سر نمونه وارد می‌شود. به نظر می‌رسد کاهش جهت‌گیری الیاف در امتداد نیرو موجب کاهش استحکام کرنشی و افزایش تغییر شکل طولی نمونه می‌شود و نهایتاً استحکام فشاری نمونه را کاهش داده و باعث افت زیاد نیرو می‌شود. با توجه به نمونه‌های تخریب شده مشاهده شد که ماکروترک‌ها دقیقاً در امتداد زاویه پیش‌یافت الیاف رشد می‌کنند. همچنین به نظر می‌رسد که به دلیل اینکه تنش لازم برای ایجاد جدایش بین لایه‌ای در نمونه فراهم نمی‌شود، خرابی خود را به صورت تغییر شکل پلاستیک در قسمت بالایی نمونه نشان می‌دهد (شکل ۵). مشاهدات نشان می‌دهند که تغییر شکل سازه در نزدیک این گره‌ها ویژگی الاستیک از خود نشان می‌دهد، در حالیکه در نقاط تغییر شکل یافته به صورت غیریکنواخت در راستای ضخامت لوله اتفاق می‌افتد. قابل ذکر است که مقدار شکست الیاف در نمونه در نواحی ابتدایی بسیار ناچیز می‌باشد. علاوه بر این در ناحیه تغییر شکل الاستیک، ترک‌های بین لایه‌ای رشد کرده و به دلیل ایجاد تنش‌های برشی بالا توسط شکستگی و آسیب جانبی^۲ در این ناحیه، باعث ایجاد جدایش بین الیاف و ماتریس^۳ می‌شود. در ادامه با پایین آمدن فیکسچر با ایجاد تغییر شکل فشاری^۴ به دلیل مهیا شدن شرایط مود بازشوندگی^۵، الیاف جدا شده از قسمت بالایی نمونه به صورت گلبرگی شکل پایین آمده و مقدار نیرو شروع به افزایش می‌کند. در شکل ۶ تاریخچه تغییر شکل لوله کامپوزیتی آورده شده است. همانطوری که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، بررسی نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از تست تجربی نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده تطابق بسیار خوبی با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی دارد به طوریکه نیرو ابتدا به یک مقدار ماکزیمم رسیده و سپس دچار یک افت نیرویی می‌شود و پس از آن یک رفتار تقریباً نوسانی و مشابه با نتایج تست تجربی از خود نشان می‌دهد. در شکل ۷ و جدول ۵ به ترتیب نمودار حساسیت مش و تغییرات تنش در شبیه‌سازی عددی و مقایسه بین نتایج بدست آمده با استفاده از دو روش تجربی و عددی آورده شده است.

در روابط فوق $f(t)$ ، $DWT(i, k)$ و i به ترتیب بیانگر سیگنال مورد نظر، ضرایب تبدیل موجک و سطح تجزیه می‌باشند. همچنین k و ψ و ψ^* بیانگر حوزه زمانی، تبدیل موجک مادر و مزدوج مختلط هستند [۲۲ و ۲۳]. باتوجه به اینکه در تبدیل موجک گسسته، اجزای با فرکانس بالا تجزیه نمی‌شوند، بخشی از داده‌ها حذف شده و مورد تحلیل قرار نمی‌گیرند. در این پژوهش، به منظور تحلیل کلیه بخش‌های تشکیل‌دهنده سیگنال، از تبدیل موجک بسته‌ای^۱ استفاده شده است. اصول کار در این روش بدین صورت است که، در سطوح تجزیه سیگنال، علاوه بر کلیات، بخش جزئیات سیگنال نیز به دو بخش کلیات و جزئیات تقسیم می‌شود که هر جزء دارای محدوده فرکانسی خاص است. بنابراین هر سیگنال می‌تواند به مجموعه‌ای از اجزا موجک تجزیه شود که هر کدام دارای محدوده فرکانسی خاص خود می‌باشد. از آنجایی که توزیع متفاوت انرژی در هر سطح متناظر با یک شکست یا خرابی خاص است با استفاده از معیار انرژی، درصد انرژی هر یک از اجزاء تجزیه‌شده بدست می‌آید. اگر $f(t)$ یک سیگنال آکوستیکی باشد، آنگاه می‌توان سیگنال را به اجزا موجک مورد نظر در سطح j بصورت $f_j^1 \dots f_j^i$ تجزیه کرد. سپس برای محاسبه سطح انرژی هر جزء موجک $E_j^1 \dots E_j^i$ از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t}^t (f_j^i(t))^2 \quad (3)$$

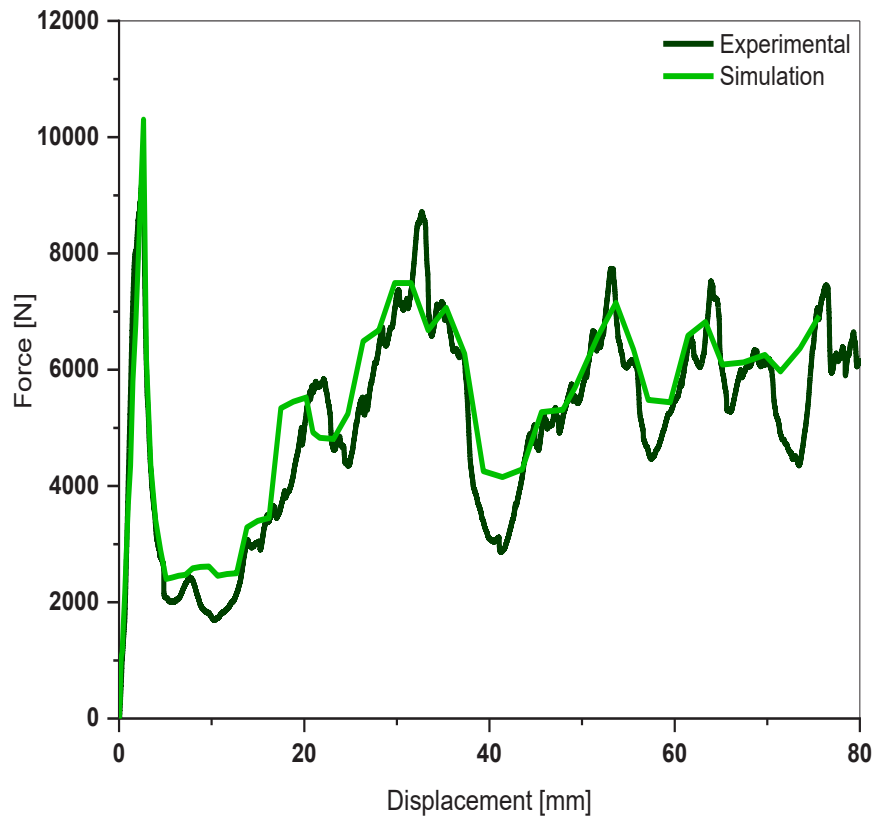
همچنین برای بدست آوردن انرژی کل سیگنال از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_{total}(t) = c \sum_i \sum_j E_j^i(t) \quad (4)$$

در نهایت توزیع نسبی انرژی برای هر جزء p_j^i ، از رابطه زیر بدست می‌آید:

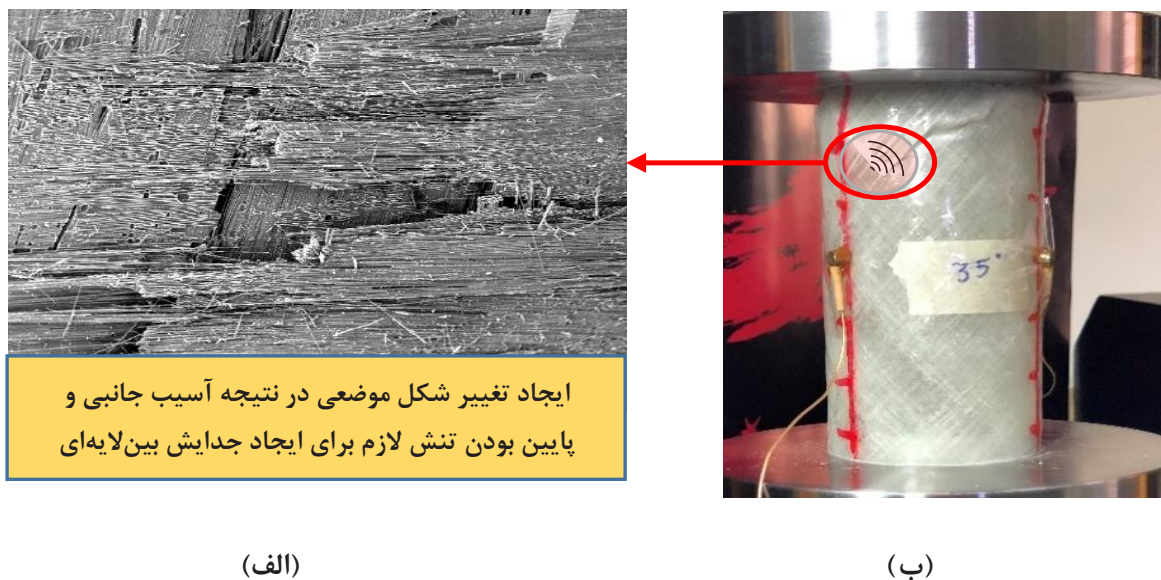
$$p_j^i(t) = c \sum_i \sum_j \frac{E_j^i(t)}{E_{total}(t)} \quad (5)$$

- 2 Lateral damage
- 3 Debonding
- 4 Compressive deformation
- 5 Opening mode



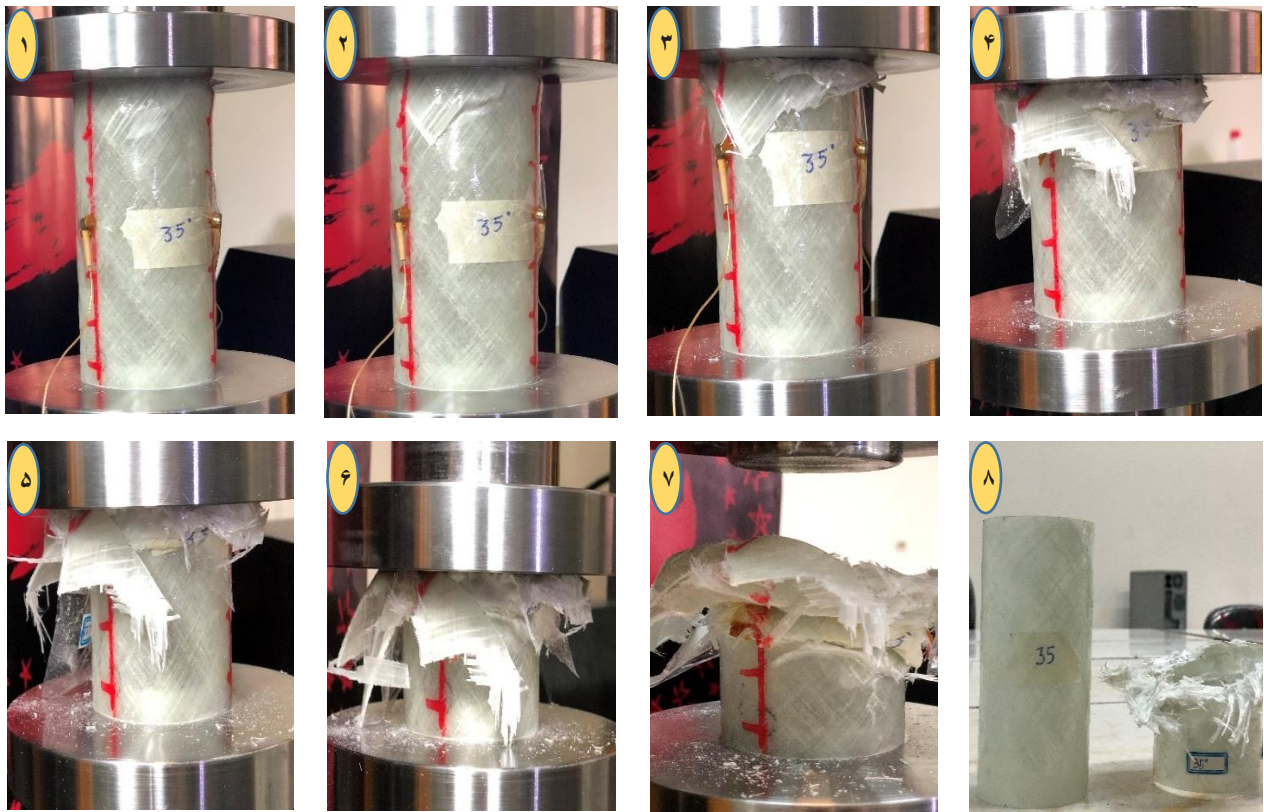
شکل ۴. مقایسه نتایج نمودار نیرو-جابجایی نمونه بارگذاری شده در دو حالت تست تجربی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 4. Comparison of the results of the force-displacement of the loaded sample in experimental test and numerical simulation



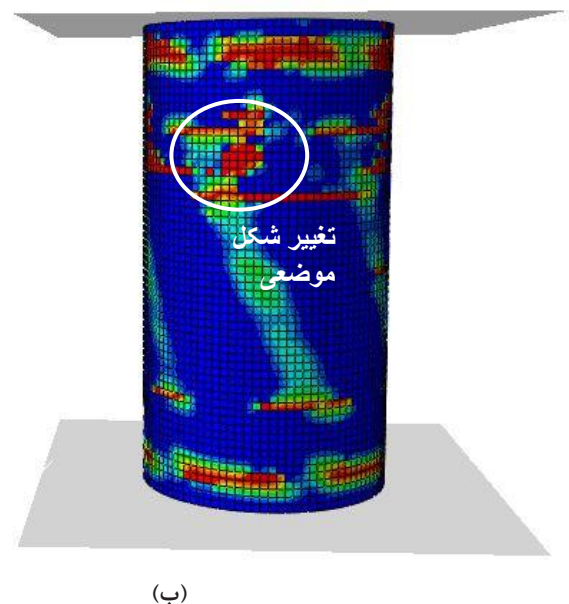
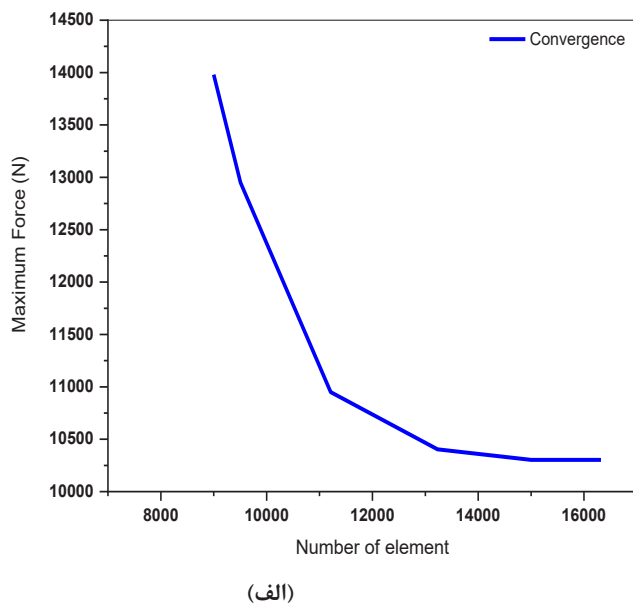
شکل ۵. تشریح شکست نمونه در اثر شکست موضعی: (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و (ب) بارگذاری فشاری نمونه

Fig. 5. Description of sample failure due to local failure: a) SEM image, and b) Compressive loading of the sample



شکل ۶. تاریخچه تغییر شکل لوله کامپوزیتی $\pm 35^\circ$ درجه ساخته شده با استفاده از روش رشته پیچی الیاف

Fig. 6. History of 35-degree filament wound composite tube deformation



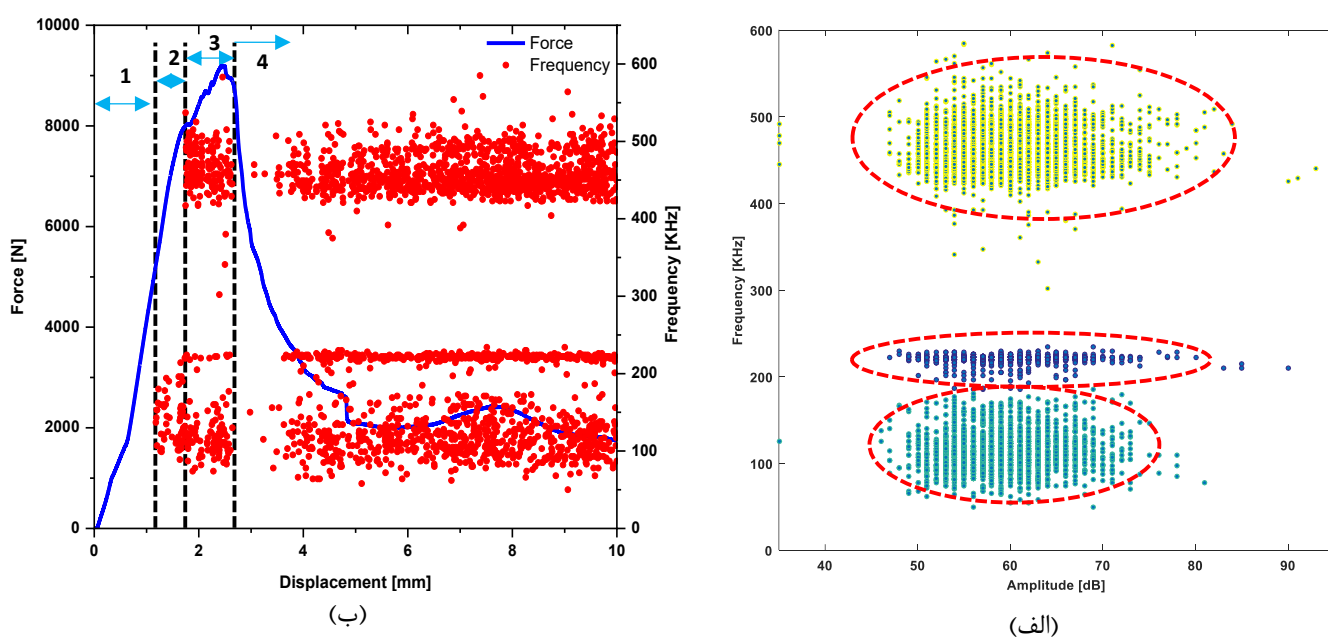
شکل ۷. الف) نمودار حداکثر مقدار نیرو نسبت به تعداد مش‌های مدل (حساسیت مش) و ب) تغییرات تنش در راستای خرابی

Fig. 7. a) Maximum force diagram per total mesh number (mesh sensitivity), and b) Stress change in the direction of failure

جدول ۵. مقایسه بین پارامترهای مختلف تست تجربی و شبیه‌سازی عددی

Table 5. Comparison between different parameters of the experimental test and numerical simulation

لوله کامپوزیتی ساخته شده با روش رشته‌پیچی الیاف	نیروی ماکزیمم (نیوتن)	جابجایی متناسب با نیروی ماکزیمم (میلی‌متر)	جذب انرژی (کیلو ژول)
تست تجربی	۹۱۸۹/۹۷	۲/۴۴	۳۷۷/۸
شبیه‌سازی عددی	۱۰۳۰۳/۴	۲/۶۴	۴۰۵/۴



شکل ۸. الف) فرکانس سیگنال‌های آکوستیک امیشن با توجه به جابجایی و ب) نمودار دامنه-فرکانس سیگنال‌های آکوستیک امیشن

Fig. 8. a) Frequency of AE signals with respect to the displacement, and b) Amplitude-frequency diagram of AE signals

شده در لوله کامپوزیتی می‌باشند. همانطوری که از شکل ۸-ب مشاهده می‌شود، بررسی و تحلیل این سیگنال‌های آکوستیکی نشان می‌دهد که پاسخ آکوستیکی سازه در برابر بارگذاری را می‌توان به چهار ناحیه مختلف تقسیم‌بندی نمود. در ناحیه اول هیچ نوع فعالیت آکوستیکی در سازه مشاهده نمی‌شود. در این ناحیه سازه تحت تغییرشکل الاستیکی بوده و به همین جهت هیچ مکانیزم خرابی در نمونه مشاهده نمی‌شود. شروع ناحیه دوم، عمدتاً با دریافت سیگنال‌های ضعیفی همراه است و به تدریج افزایش ضرب‌آهنگ به دنبال افزایش مقدار تنش در نمونه مشاهده می‌شود. بررسی محدوده دامنه

۶-۲- تحلیل نشرآوایی

بررسی محدوده دامنه سیگنال‌های نشرآوایی نشان می‌دهد که مقادیر دامنه سیگنال‌های آکوستیکی بین ۳۵ تا ۹۵ دسی‌بل می‌باشد (شکل ۸-الف) که بسته به نوع خرابی می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. همانطوری که از شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، با بررسی سیگنال‌های دریافتی با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی^۱ به نظر می‌رسد که داده‌های دریافتی در سه خوشه قرار می‌گیرند که هر کدام نشان‌دهنده مکانیزم‌های خرابی ایجاد

1 Hierarchical clustering

جدول ۶. درصد مکانیزم‌های خرابی بدست آمده با استفاده از روش نشرآوایی

Table 6. Percentage of failure mechanisms obtained using the acoustic emission method

نمونه	درصد مکانیزم خرابی (%)		
	ترک خوردگی ماتریس	جدایش الیاف از ماتریس	شکست الیاف
±۳۵	۵۹/۲۳	۸/۸۲	۳۱/۹۵

سیگنال‌های دریافتی در ابتدای این ناحیه نشان می‌دهد که محدوده تغییرات آن عمدتاً مربوط به ترک خوردگی ماتریس می‌باشد. با افزایش مقدار تنش، به تدریج ترک خوردگی عرضی نیز در نمونه ایجاد می‌شود که این مکانیزم در انتهای ناحیه دوم رخ می‌دهد. پس از آن، ناحیه سوم آغاز می‌شود که عمدتاً با افزایش تعداد ضرب آهنگ همراه است. در نهایت ناحیه چهارم یا ناحیه انتهایی با دریافت انواع مختلفی از سیگنال‌های آکوستیکی همراه است که بارزترین و قویترین آن‌ها که با دامنه بسیار بالایی رخ می‌دهد، مربوط به شکست الیاف می‌باشد.

ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس می‌باشد. از طرفی به نظر می‌رسد که، بهترین جذب انرژی در یک سازه توسط جدالایی و جدایش الیاف از ماتریس کنترل می‌شود. به عبارت دیگر سازه‌ای که جذب انرژی بالایی دارد عموماً باید درصد زیادی از انرژی را توسط این دو مکانیزم جذب کرده باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که یکی از روش‌های بهبود شرایط ضربه‌پذیری این سازه کامپوزیتی این باشد که با اضافه کردن افزودنی‌هایی^۳ مقاومت رزین را افزایش داده و یا از رزینی با خواص بهتر استفاده کرد.

۷- نتیجه‌گیری

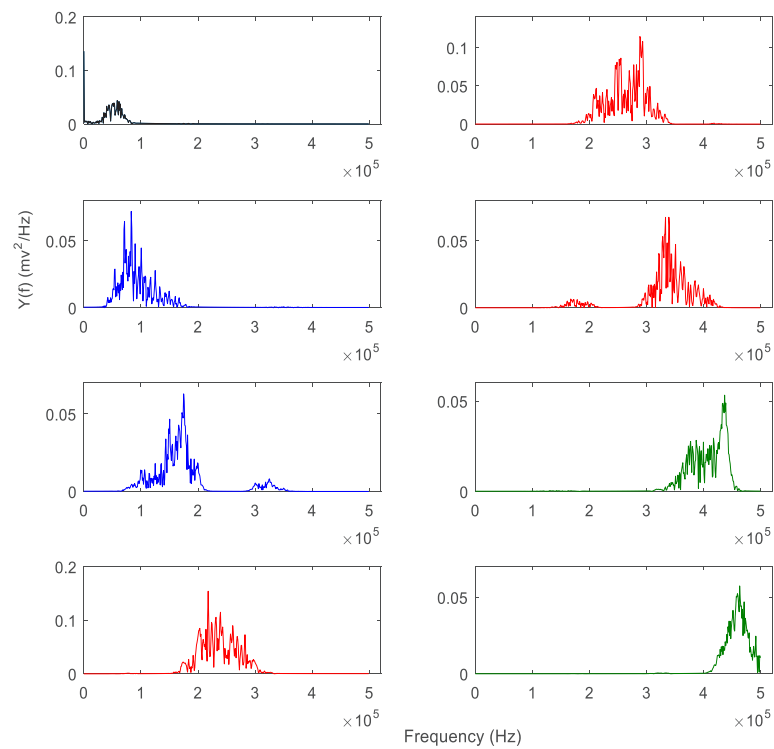
در این پژوهش به بررسی مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده در لوله کامپوزیتی ±۳۵ درجه بر مبنای پارامترهای هندسی بهینه استفاده شده در سایر تحقیقات به منظور افزایش میزان جذب انرژی پرداخته شد. نتایج حاصل از تست‌های تجربی نشان داد که غالب‌ترین مد خرابی در لوله‌های رشته‌پیچی شده تحت این زاویه، شکست موضعی در اثر آسیب جانبی و تغییر شکل فشاری می‌باشد که عمدتاً با ایجاد جدایش الیاف در سر نمونه آغاز شده و در ادامه به دلیل عدم توان گسترش جدالایی و ایجاد برش عرضی، خود را به صورت یک تغییر شکل در وسط نمونه نشان می‌دهد. پس از ایجاد تغییر شکل موضعی، ترکی از آن نقطه در امتداد زاویه پیش‌پیش الیاف شروع به رشد می‌کند و نهایتاً باعث برش نمونه شده و بخش بالایی در داخل قسمت پایینی آن فرو رفته و ادامه لهیدگی بصورت پیش‌رونده ادامه می‌یابد. به منظور صحت‌گذاری بر نتایج تجربی از روش نشرآوایی نیز استفاده شد. نتایج مشاهدات نشان داد که رفتار نمودار نیرو-جابجایی کاملاً با نمودارهای آکوستیکی همخوانی دارد، به طوریکه افت نیرو در نمودار همواره با آزاد کردن انرژی آکوستیکی همراه می‌باشد که مقدار این انرژی بسته به

۶-۳- تعیین درصد مکانیزم‌های خرابی با استفاده از تبدیل موجک

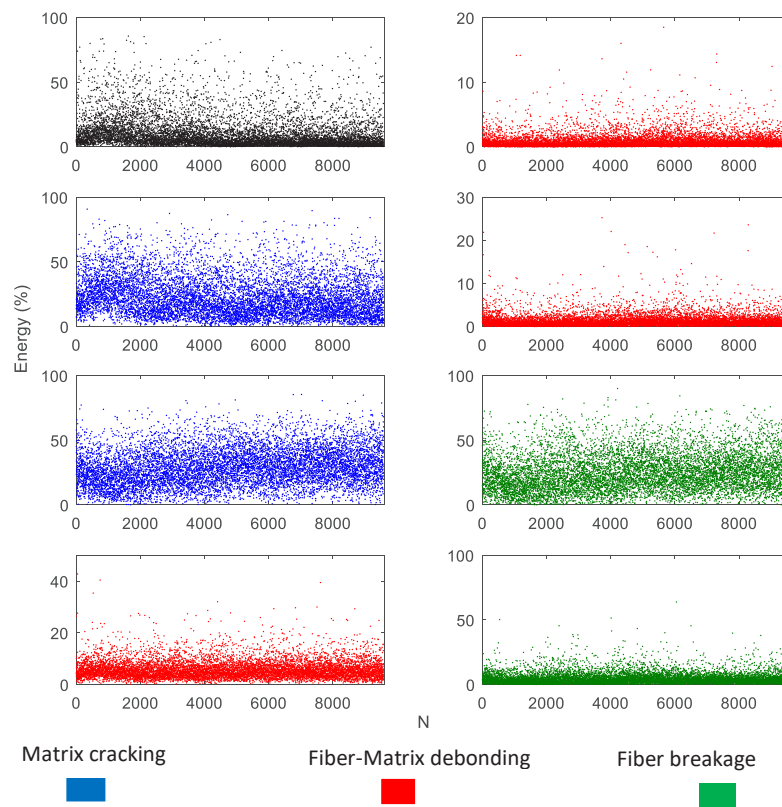
به منظور تعیین درصد مکانیزم‌های مختلف خرابی لوله کامپوزیتی، از تبدیل موجک بسته‌ای استفاده شد. بدین منظور، برنامه تبدیل موجک بسته‌ای در نرم‌افزار تجاری متلب^۱ نوشته شد. به منظور تعیین سطح تجزیه مناسب، از معیار آنتروپی^۲ استفاده شده و براساس آن نمونه‌ها تا سه سطح تجزیه شدند. با استفاده از کد نوشته شده، سیگنال‌های نشرآوایی بدست آمده از آزمایش نمونه‌ها، تا سه سطح تجزیه و به ۸ جزء تقسیم شدند. سپس با استفاده از معیار انرژی، درصد انرژی هر یک از ۸ جزء سیگنال تجزیه‌شده در سطح سوم، بدست آمد. هر جزء با توجه به سطح تجزیه‌ای که در آن قرار دارد و این که جزء با فرکانس بالا است یا فرکانس پایین، محدوده فرکانسی مشخصی دارد. در شکل ۹ و جدول ۶ به ترتیب هر یک از ۸ موجک حاصل از تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی و درصد مکانیزم‌های خرابی نشان داده شده است.

همانطوری که از جدول ۶ مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین درصد مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده در لوله کامپوزیتی، به ترتیب مربوط به

- 1 MATLAB
- 2 Entropy criterion



(الف)



(ب)

شکل ۹. الف) توزیع فرکانسی و ب) درصد انرژی هریک از ۸ جزء حاصل از تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی

Fig. 9. a) Frequency distribution, and b) Energy percentage of each of the 8 components resulting from the decomposition of acoustic emission signals

composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading: experimental, *Composite structures*, 69(4) (2005) 407-420.

- [8] H. Luo, Y. Yan, X. Meng, C. Jin, Progressive failure analysis and energy-absorbing experiment of composite tubes under axial dynamic impact, *Composites Part B: Engineering*, 87 (2016) 1-11.
- [9] R. Kalhor, S.W. Case, The effect of FRP thickness on energy absorption of metal-FRP square tubes subjected to axial compressive loading, *Composite Structures*, 130 (2015) 44-50.
- [10] G. Yong, X. Denghong, H. Tian, L. Ye, L. Naitian, Y. Quanhong, W. Yanrong, Identification of damage mechanisms of carbon fiber reinforced silicon carbide composites under static loading using acoustic emission monitoring, *Ceramics International*, 45(11) (2019) 13847-13858.
- [11] L. Friedrich, A. Colpo, A. Maggi, T. Becker, G. Lacidogna, I. Iturrioz, Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition, *Composite Structures*, 256 (2021) 113105.
- [12] M. Saeedifar, M.A. Najafabadi, J. Yousefi, R. Mohammadi, H.H. Toudeshky, G. Minak, Delamination analysis in composite laminates by means of acoustic emission and bi-linear/tri-linear cohesive zone modeling, *Composite Structures*, 161 (2017) 505-512.
- [13] S. Xu, P. Chen, Prediction of low velocity impact damage in carbon/epoxy laminates, *Procedia Engineering*, 67 (2013) 489-496.
- [14] J. Zhou, P. Wen, S. Wang, Finite element analysis of a modified progressive damage model for composite laminates under low-velocity impact, *Composite Structures*, 225 (2019) 111113.
- [15] G.F.O. Ferreira, M.L. Ribeiro, A.J.M. Ferreira, V. Tita, Computational analyses of composite plates under low-velocity impact loading, *Materials Today: Proceedings*, 8 (2019) 778-788.
- [16] C. Wang, T. Suo, C. Hang, Y. Li, P. Xue, Q. Deng, Influence of in-plane tensile preloads on impact responses

نوع مکانیزم خرابی که در نمونه اتفاق می‌افتد، متفاوت می‌باشد. همچنین بررسی دامنه سیگنال‌های آکوستیکی نشان داد که شروع خرابی در سازه استوانه‌ای عمدتاً با ترک‌خوردگی ماتریس شروع شده و به تدریج با افزایش تنش اعمالی به سازه، به ترتیب جدایش الیاف از ماتریس، شکست ماتریس و شکست الیاف، اتفاق می‌افتد که این مکانیزم‌ها به راحتی از روی محدوده دامنه سیگنال‌های آکوستیکی قابل تشخیص می‌باشد. در نهایت نمونه‌های کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند و صحت‌سنجی مدل عددی توسط اطلاعات تجربی انجام شد. در شبیه‌سازی لوله‌های کامپوزیتی از معیار خرابی هاشین سه‌بعدی استفاده شد. نتایج مربوط به مدل‌سازی المان محدود نشان داد که معیار هاشین سه‌بعدی استفاده شده، شروع و رشد خرابی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

منابع

- [1] K.C. Shen, G. Pan, Buckling and strain response of filament winding composite cylindrical shell subjected to hydrostatic pressure: numerical solution and experiment, *Composite Structures*, 276 (2021) 114534.
- [2] P.C. Soden, R. Kitching, P.C. Tse, Experimental failure stresses for $\pm 55^\circ$ filament wound glass fibre reinforced plastic tubes under biaxial loads, *Composites*, 20(2) (1989) 125-135.
- [3] J. Rousseau, D. Perreux, N. Verdiere, The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes, *Composites Science and Technology*, 59(9) (1999) 1439-1449.
- [4] J.S. Park, C.S. Hong, C.G. Kim, C.U. Kim, Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction, *Composite structures*, 55(1) (2002) 63-71.
- [5] P. Mertiny, F. Ellyin, Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(12) (2002) 1615-1622.
- [6] R. Rafiee, Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes, *Composites Part B: Engineering*, 45(1) (2013) 257-267.
- [7] A. Mamalis, D. Manolacos, M. Ioannidis, D. Papapostolou, On the response of thin-walled CFRP

- [20] S.W. Tsai, E.M.J.J.o.c.m. Wu, A general theory of strength for anisotropic materials, 5(1) (1971) 58-80.
- [21] G.D. Wang, S.K. Melly, Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1) (2018) 599-614.
- [22] K. Soman, K. Ramachandran, Insight into wavelets from theory to practice 2nd edn, in, 2004.
- [23] G. Meurant, Wavelets: a tutorial in theory and applications, Academic press, 2012.
- of composite laminated plates, International Journal of Mechanical Sciences, 161 (2019) 105012.
- [17] P. Ladeveze, E. LeDantec, Damage modelling of the elementary ply for laminated composites, Composites science and technology, 43(3) (1992) 257-267.
- [18] X. Li, D. Ma, H. Liu, W. Tan, X. Gong, C. Zhang, Y. Li, Assessment of failure criteria and damage evolution methods for composite laminates under low-velocity impact, Composite structures, 207 (2019) 727-739.
- [19] H.T. Hahn, S.W. Tsai, Introduction to composite materials, CRC Press, 1980.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Alimirzaei, M. Ahmadi Najafabadi, A. Bani Mohammad Ali, Investigation of Failure Mechanism of the Composite Tubes Made by Filament Winding Process by Acoustic Emission Method, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 1357-1372.

DOI: 10.22060/mej.2022.20663.7292



