



Evaluation of Damage of Filament Wound Composite Tubes under Lateral Loading by Acoustic Emission Method and Finite Element Simulation

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Amir Bani Mohammad A.¹,
Alimirzaei S.¹,
Ahmadi Najafabadi M.^{1*}

How to cite this article

Amir Bani Mohammad A, Alimirzaei S, Ahmadi Najafabadi M. Evaluation of Damage of Filament Wound Composite Tubes under Lateral Loading by Acoustic Emission Method and Finite Element Simulation. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(11):647-655.

¹ Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. ahmadin@aut.ac.ir

Article History

Received: June 14, 2022
Accepted: July 23, 2022
ePublished: October 29, 2022

ABSTRACT

Thin-walled composite structures are increasingly used in vehicles where light weight and high energy absorption capacity are important. Fiber reinforced composites, such as glass/fiber reinforced polymers, have attracted attention in automotive engineering due to their properties such as light weight and high mechanical properties. Fiber reinforced composites use the energy in various ways to damage their structure, which in terms of structural failure; delamination, fiber breakage, and matrix cracking are the predominant conditions. According to the literature, design parameters and optimal dimensions of glass/epoxy composite tubes were determined. After that, by using experimental testing, acoustic emission technique, and finite element method, various failure mechanisms of 45° filament wound composite tube were investigated. Examination of failure by acoustic emission method showed that the predominant mechanism for 45° samples is fiber breakage. In order to simulate the behavior of the samples, the VUMAT subroutine was used with the help of 3D Hashin criteria for the onset of damage and the continuous damage criterion was used to simulate the spread of failure. The agreement of the obtained experimental diagrams with the subroutine developed for the composite simulation confirmed the ability of the model to predict the behavior of the composite sample even after the maximum tolerable force. By comparing the force-displacement diagrams with the energy data obtained from the acoustic emission method, it was found that the acoustic emission method can be used to predict the behavior of composite pipes under lateral loading.

Keywords VUMAT Subroutine, Acoustic Emission, Failure Mechanisms, 3D Hashin, Composite Tubes

CITATION LINKS

1- Application of filament winding technology in composite pressure... 2- Study on compression load and energy absorption characteristics of... 3- Experimental investigation on multi-layered filament wound... 4- FRP Composite Tube Subjected to Quasi-Static Axial and... 5- A numerical study on energy absorption capability of lateral corrugated composite... 6- Theoretical study of absorbed energy by empty and... 7- Experimental and numerical investigation of buckling and post-buckling behavior of... 8- Modelling transverse cracking damage in thin, filament-wound... 9- Mechanical response of filament wound composite rings under... 10- A Progressive Damage Modelling of Glass/Epoxy Cylindrical Structure... 11- Intralaminar crack propagation of glass fiber... 12- Simulative Estimation of Reaction Force and... 13- Three point bending test of glass/epoxy composite... 14- Investigation of failure mechanism of the composite tubes... 15- Nonlinear progressive damage model for composite laminates... 16- Recent developments on damage modeling and... 17- A comprehensive study on detection... 18- Damage characterization of polymer-based composite... 19- Investigation of the damage mechanisms for mode I... 20- Damage mechanism characterization of... 21- On acoustic emission for failure investigation in... 22- Acoustic emission-based study to characterize... 23- Wavelet transform of acoustic emission... 24- Correlation of acoustic emission with finite element... 25- Real-time frequency determination of acoustic emission... 26- Crushing behavior of hybrid hexagonal/octagonal... 27- Damage and failure in carbon/epoxy filament wound ...

ارزیابی آسیب لوله‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده تحت بارگذاری جانبی با روش نشرآوایی و شبیه‌سازی المان محدود

امیر بنی محمد علی^۱، سجاد علی‌میرزائی^۱، مهدی احمدی نجف آبادی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

استفاده از ساختارهای کامپوزیتی جدارنازک به طور فزاینده در طراحی وسایل نقلیه‌ی سبک وزن با ظرفیت جذب انرژی بالا در تصادف‌ها، مورد اهمیت دارد. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، مانند پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن سبک و خواص مکانیکی بالایی که دارند علاوه بر صنایع خودروسازی، توجه روزافزونی را در دیگر صنایع به خود جلب کرده‌اند. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، انرژی وارده را به سازوکارهای مختلفی صرف خرابی ساختار خود می‌کنند که از نظر آسیب در سازه؛ جدایش الیاف از ماتریس، شکست الیاف و ترک‌خوردگی ماتریس، از شایع‌ترین مکانیزم‌های خرابی می‌باشند. در این پژوهش با بررسی تحقیقات گذشته، پارامترهای طراحی لوله‌های ساخته شده با الیاف شیشه و ابعاد بهینه جهت ساخت تعیین گردید. سپس با روش‌های مکانیکی، نشرآوایی و شبیه‌سازی المان محدود به بررسی انواع سازوکارهای خرابی در نمونه‌های رشته‌پیچی شده با زاویه ۴۵ درجه پرداخته شد. بررسی خرابی توسط روش نشرآوایی نشان داد که سازوکار غالب خرابی برای نمونه‌ها، شکست الیاف می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار نمونه‌ها با توسعه زیرروال وی‌یومت (VUMAT) و به کمک معیارهای آسیب هاشین سه‌بعدی برای شروع آسیب و معیار آسیب پیوسته در پیش‌بینی گسترش خرابی استفاده شد. تطابق نمودارهای تجربی بدست آمده با نتایج حاصل از زیرروال توسعه داده شده، مدل مورد نظر را به جهت پیش‌بینی رفتار نمونه کامپوزیتی حتی بعد از حداکثر نیروی قابل تحمل به خوبی تایید کرد. مقایسه نمودارهای نیروجابجایی با داده‌های انرژی حاصل از روش نشرآوایی مبین قابلیت روش نشرآوایی برای پیش‌بینی رفتار لوله‌های کامپوزیتی، تحت بارگذاری جانبی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زیرروال وی‌یومت، نشرآوایی، مکانیزم‌های خرابی، هاشین سه بعدی، لوله‌های کامپوزیتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

*نویسنده مسئول: ahmadin@aut.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از مواد کامپوزیتی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا به سرعت در حال افزایش بوده و جایگزین بسیار مناسبی بجای محصولات فلزی در کاربردهای متنوع می‌باشد. سازه‌های کامپوزیتی به مواد مهندسی رایج تبدیل شده‌اند و برای کاربردهای مختلفی از جمله قطعات خودرو، کالاهای ورزشی، قطعات هوافضا، کالاهای مصرفی و صنایع دریایی و نفتی طراحی و ساخته می‌شوند^[۱]. همچنین طراحی و ساخت این سازه‌های کامپوزیتی می‌تواند طوری باشد که به عنوان بخشی از سیستم‌های جاذب انرژی مورد استفاده قرارگیرند^[۲]. فرآیند رشته‌پیچی یکی از

مناسب‌ترین فرآیندهای تولید برای سازه‌های استوانه‌ای شکل است که معمولاً برای تولید لوله‌ها، شفت‌ها، مخازن تحت فشار و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند دقت بالایی برای موقعیت‌دهی الیاف، کنترل کسر حجمی الیاف و ساختن زوایای مدنظر دارد^[۳]. تحقیقات بسیاری در مورد رفتار خردشوندگی کامپوزیت‌ها و جذب انرژی آنها صورت گرفته است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

عبدوی^[۴] به بررسی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده با الیاف کربن تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و جانبی پرداخت. او در بارگذاری جانبی مشاهده کرد که لوله‌ها در ابتدای آزمایش به شکل بیضی تغییر شکل می‌دهند که در پی آن چهار خط شکست در حال گسترش مشاهده شد که این خطوط شکست به صورت قطری با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر ایجاد شده و با افزایش نیرو، سازه به شکل چهار بیضی مجاور به هم تبدیل می‌شود. در پژوهشی دیگر امیدوی و بنیز^[۵] به بررسی لوله‌های موجدار شعاعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی پرداختند. آنها اثر موجدار کردن لوله‌ها را بر روی رفتار خردشوندگی، جذب انرژی، مکانیزم‌های خرابی و مودهای خرابی لوله‌های شیشه/اپوکسی ساخته شده با فرآیند رشته‌پیچی الیاف مورد بررسی قرار دادند، نتایج آنها نشان داد که در بارگذاری محوری قابلیت تحمل نیرو به طور قابل توجهی تحت تاثیر موجدار کردن هندسه قرار می‌گیرد. الهی و همکاران^[۶] به بررسی تحلیلی و تجربی رفتار لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه و نیز لوله‌های کامپوزیتی پرشده با فوم تحت بارگذاری عرضی پرداختند.

داداشی و رحیمی^[۷] به مدل‌سازی شروع و رشد آسیب در استوانه‌های کامپوزیتی، تحت بارگذاری فشار جانبی پرداختند. در این تحقیق، مدل المان محدود با استفاده از زیرروال یومت (UMAT) بر پایه معیار هاشین (Hashin) ارائه شد و با نتایج تجربی صحت‌سنجی گردید. همچنین مکانیزم‌های شروع و گسترش خرابی مورد ارزیابی قرار گرفت. لی و همکاران^[۸] به ارائه مدل المان محدود جهت بررسی ایجاد و گسترش ترک عرضی در لوله‌های جدارنازک ساخته شده با فرآیند رشته‌پیچی الیاف تحت بار جانبی پرداختند. مدل ارائه شده در این پژوهش بر پایه رویکرد مکانیک آسیب پیوسته بوده و تاثیر آسیب را بر روی تغییر شکل و توزیع تنش لوله کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌دهد. ایگرز و همکاران^[۹] به بررسی تاثیر زاویه پیچش، ترتیب لایه‌چینی و نسبت قطر به ضخامت بر روی رفتار مکانیکی حلقه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش رشته‌پیچی الیاف تحت بارگذاری‌های فشاری عرضی، محوری و نیز کششی محیطی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که رفتار حلقه‌های ساخته شده به شدت به زاویه رشته‌پیچی وابسته می‌باشد. در زمینه زیرروال نویسی، محمد و طرفروی^[۱۰] با استفاده از زیرروال وی‌یومت به پیش‌بینی خرابی در اثر ضربه سرعت پایین در لوله‌های شیشه/اپوکسی پرداختند. وقوع خرابی ماتریس و

در روش مرطوب الیاف درست قبل از اینکه روی ماندرل پیچیده شوند در رزین مایع خیس‌انده می‌شوند. این روش در شرایط مساوی تقریباً نصف روش خشک هزینه دارد. به منظور ساخت نمونه‌ها در این پژوهش از دستگاه رشته‌پیچی ایکس‌وایندر (X-winder) (شکل ۱-الف) استفاده شد. در این روش با تعیین پارامترهایی همچون تعداد لایه‌ها، ضخامت و پهنای الیاف، زاویه رشته‌پیچی هر لایه، سرعت حرکتی الیاف و قطر هسته داخلی، مسیرهای حرکتی الیاف در قالب جی کد (G-code) استخراج شد و عملیات ساخت لوله به صورت خودکار صورت گرفت. با خوانده شدن جی کد، الیاف بعد از عبور از حمام رزین و خیس شدن به دور ماندرل پیچانده شده و فرآیند رشته‌پیچی انجام شد.

به جهت سهولت در خارج کردن لوله‌های نهایی، سطح ماندرل آلومینیومی پولیش شده و بر روی سطح آن واکس MR811 زده شد. به منظور ساخت نمونه‌ها از رزین LR630 به همراه سفت‌کننده (3 Hardener) H60 با نسبت ۱۰۰ به ۳۰ و الیاف شیشه با تکس (Tex) ۱۲۰۰ از نوع E ساخت کشور کره جنوبی استفاده شد. بعد از ساخت لوله‌ها بر روی دستگاه رشته‌پیچی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار گرفتند و سپس به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره حرارت داده شده تا نمونه‌ها پخته و به حداکثر استحکام خود برسند. در نهایت لوله‌ها توسط پروفیل‌بر در طول مورد نظر بریده شدند. نمونه‌های نهایی در این پژوهش دارای طول ۱۲۰ mm، قطر خارجی ۶۰ mm و ضخامت میانگین ۱ mm می‌باشند که دارای یک لایه با زاویه پیچش $\pm 45^\circ$ می‌باشند. درصد حجمی الیاف شیشه نیز بعد از محاسبه مطابق با استاندارد ASTM D2584 برابر با ۶۵/۷ درصد تعیین شد.

۳- تجهیزات استفاده شده در آزمایش

به منظور بارگذاری جانبی لوله‌ها مطابق شکل ۱ از دو صفحه مسطح متصل به گیره‌های دستگاه کشش استفاده شد. بارگذاری لوله‌ها توسط دستگاه فشار مدل هیوا (HIWA)، با ظرفیت پنجاه



شکل ۱) بارگذاری لوله استوانه‌ای تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی و سنسورهای متصل به نمونه

مناطق لایه‌لایه شده با استفاده از معیارهای شکست مبتنی بر روابط تجربی و سایر معیارهای توسعه یافته پیش‌بینی شد. چائو و همکاران^[11] با استفاده از زیرروال یومت، به بهبود شبیه‌سازی آسیب با بکارگیری معیارهای خرابی هاشین برای شبیه‌سازی فرآیند خردشدگی صفحات چندلایه کامپوزیتی ساخته شده از پیش آغشته‌های تک سو شیشه/اپوکسی پرداختند. دیمپل و همکاران^[12] به تخمین نیروی عکس‌العمل پرتابه در کامپوزیت‌های ساخته‌شده با الیاف کربن به روش المان محدود پرداختند. تئوری هاشین سه‌بعدی جهت بررسی رفتار خرابی کامپوزیت در نظر گرفته شد که به عنوان زیرروال وی‌یومت با نرم‌افزار آباکوس مرتبط گردید. همچنین به منظور صحت سنجی مدل ارائه شده نیروی عکس‌العمل وارد به ابزار حاصل از مدل المان محدود با نتایج تجربی مقایسه شد.

در زمینه نشرآوایی بهشتی‌زاده و همکاران^[13] به منظور تعیین سازوکارهای مختلف خرابی در بارگذاری خمشی سه نقطه، از تبدیل موجک و تحلیل چوی ویلیامز (Choi-Williams) برای پردازش سیگنال‌های نشرآوایی استفاده کردند. سه نوع سازوکار خرابی؛ شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی مشخص شد و محدوده فرکانسی مربوط به هر یک از این سازوکارهای خرابی تعیین گردید. علی‌میرزائی و همکاران^[14] به بررسی خرابی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده با فرآیند رشته‌پیچی شده توسط روش نشرآوایی تحت بارگذاری محوری پرداختند، آنها با بکارگیری روش تبدیل موجک (Wavelet transform) به تفکیک درصد خرابی هر یک از سازوکارهای خرابی در لوله‌های رشته‌پیچی شده پرداختند.

در این پژوهش رفتار لوله‌های شیشه/اپوکسی ساخته شده به روش رشته پیچی الیافی با زاویه ۴۵ تحت بارگذاری جانبی مورد بررسی قرار گرفت. خرابی‌های ایجاد شده در لوله‌های کامپوزیتی به صورت مجموعه‌ای از مکانیزم‌های خرابی شامل شکست الیاف، شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و جدالایی صورت می‌گیرند، از این رو لازم است درصد هر یک از این مکانیزم‌های خرابی مشخص شود. شناسایی درصد هر یک از این مکانیزم‌ها می‌تواند تاثیر به سزایی در شناخت شیوه جذب انرژی توسط سازه ایفا نماید. از این رو از روش نشرآوایی به عنوان روشی جهت شناسایی درصد مکانیزم‌های مختلف خرابی در لوله‌های ساخته شده استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی دقیق لوله‌های رشته‌پیچی شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس (Abaqus) زیرروال وی‌یومت بر پایه معیار هاشین سه بعدی با زبان برنامه فرترن نوشته شده و با نرم‌افزار مرتبط گردید.

۲- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون تجربی

فرآیند رشته‌پیچی الیاف به دو صورت مرطوب و خشک امکان پذیر می‌باشد که در این پژوهش از فرآیند مرطوب استفاده شده است.

جدول ۱) خواص مکانیکی لوله کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D3039 و ASTM 3518^[14].

مقدار	نماد	خاصیت مکانیکی (واحد)
۳۵۴۱	G_{12}	مدول برشی داخل صفحه (MPa)
۳۴۶۴	G_{13}	مدول برشی خارج از صفحه (MPa)
۳۴۶۴	G_{23}	مدول برشی خارج از صفحه (MPa)
۳۹۰۰۰	E_1	مدول الاستیک در جهت موازی با الیاف (MPa)
۸۶۰۰	E_2	مدول الاستیک در جهت عمود بر الیاف (MPa)
۸۶۰۰	E_3	مدول الاستیک خارج از صفحه (MPa)
۱۷۸۰	ρ	چگالی (kg/m^3)
۱۰۸۰	X_T	استحکام کششی در جهت موازی با الیاف (MPa)
۶۲۰	X_C	استحکام فشاری در جهت موازی با الیاف (MPa)
۳۹	Y_T	استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف (MPa)
۱۲۸	Y_C	استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف (MPa)
۰/۳	ν_{12}	ضریب پواسون
۰/۲۸	ν_{13}	ضریب پواسون خارج از صفحه
۰/۲۸	ν_{23}	ضریب پواسون خارج از صفحه
۳۹	S_{12}	استحکام برشی داخل صفحه (MPa)
۷۴	S_{13}	استحکام برشی خارج از صفحه (MPa)
۷۴	S_{23}	استحکام برشی خارج از صفحه (MPa)

۵- معیار خرابی

در این پژوهش از معیار هاشین سه بعدی به منظور بررسی شروع خرابی استفاده شد، معیار هاشین سه بعدی در چهار قسمت مختلف؛ گسیختگی فشاری و کششی الیاف و گسیختگی فشاری و کششی ماتریس برای بررسی خرابی رخ داده شده مورد استفاده قرار گرفت. به منظور کاهش خواص در این پژوهش از روش افت خواص تدریجی استفاده شد. در این روش، هنگام رخ دادن خرابی، خواصی از ماده که ارتباط با مد خرابی ایجاد شده دارد، به صورت تدریجی افت کرده و در نهایت به صفر رسید^[15]. در روش استفاده شده در این پژوهش پس از ایجاد آسیب، درایه‌های ماتریس سفتی از پارامترهای آسیب تاثیر گرفته و با افزایش آن‌ها، از مقدار اولیه سفتی کاسته شد. از این رو مطابق روابط (۵) تا (۱۵) درایه‌های مختلف ماتریس سفتی با لحاظ پارامترهای آسیب تغییر کردند:

$$C_{11} = (1 - d_f)C_{11}^0 \quad (۱)$$

$$C_{22} = (1 - d_f)(1 - d_m)C_{22}^0 \quad (۲)$$

$$C_{33} = (1 - d_f)(1 - d_m)C_{33}^0 \quad (۳)$$

$$C_{12} = (1 - d_f)(1 - d_m)C_{12}^0 \quad (۴)$$

$$C_{13} = (1 - d_f)(1 - d_m)C_{13}^0 \quad (۵)$$

$$C_{23} = (1 - d_f)(1 - d_m)C_{23}^0 \quad (۶)$$

$$G_{12} = (1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc})G_{12}^0 \quad (۷)$$

$$G_{13} = (1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc})G_{13}^0 \quad (۸)$$

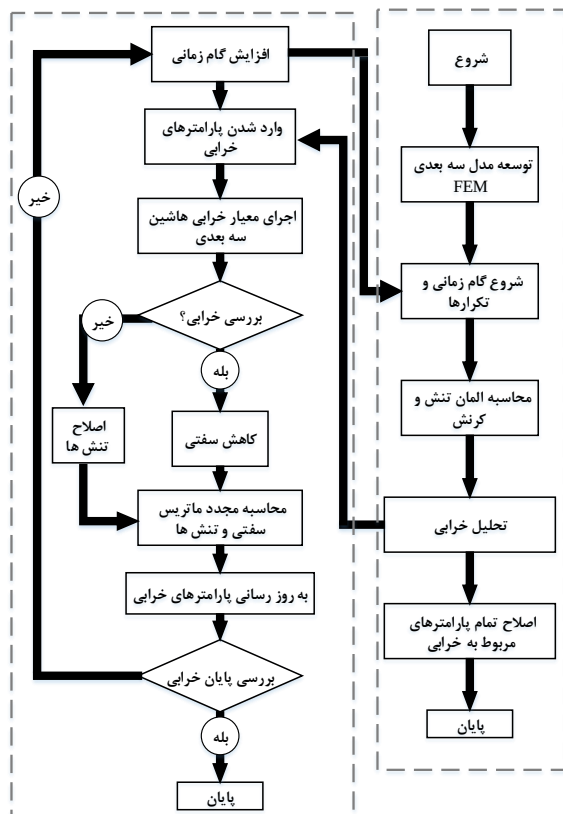
$$G_{23} = (1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc})G_{23}^0 \quad (۹)$$

کیلونیوتن و جمع‌آوری داده‌های نشرآوایی به کمک نرم‌افزار ای‌ای‌وین (AEWin) انجام شد. داده‌های نمودار نیرو-جابجایی به طور پیوسته توسط سیستم دستگاه آزمایش جمع‌آوری گردید و تغییر شکل نمونه توسط دوربین عکس‌برداری Canon 77D ثبت گردید.

۴- مدل‌سازی المان محدود

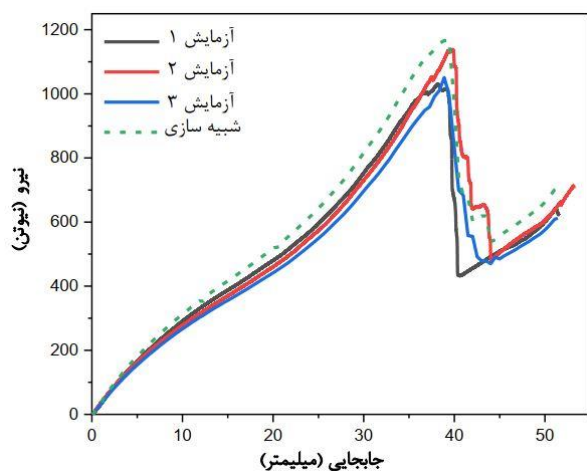
برای مدل‌سازی المان محدود لوله کامپوزیتی، لوله‌ای با طول ۱۲۰، قطر ۶۰ و ضخامت ۱ میلی‌متر طراحی شد. سپس به منظور تعریف پارامترهای مکانیکی در زیرروال از دستور (*props) استفاده شد، با توجه به اینکه نوزده پارامتر گوناگون به منظور تعریف معیارهای خرابی لازم بود، از این رو در قسمت زیرروال، هریک از این پارامترها با دستور (*props) تعریف شدند. مطابق جدول ۱، به منظور شناسایی هریک از این پارامترها به نرم‌افزار آباکوس از قسمت user material واقع در قسمت تعیین خواص مواد نرم‌افزار، مقدار عددی هر یک از این مقادیر وارد شد. خواص مکانیکی لوله کامپوزیتی در جدول ۱ مطابق استانداردهای ASTM D3039 و ASTM 3518 محاسبه گردیده است. لوله شبیه‌سازی شده دارای یک لایه زاویه پیچش ۴۵ درجه با کدبندی ± 45 می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های متداول عموماً از معیار خرابی هاشین دو بعدی که در نرم‌افزار آباکوس موجود است، استفاده می‌شود که شبیه‌سازی را به شدت محدود می‌نماید و به جهت شبیه‌سازی مجبور به استفاده از مدل‌سازی دو بعدی می‌باشیم، در صورتی که با استفاده از مدل هاشین سه بعدی تهیه شده در زیرروال وی‌یومت قادر خواهیم بود که برای بررسی سازه از مدل‌های سه بعدی استفاده نماییم که درک بهتری از شرایط موجود را فراهم می‌سازند. همچنین امکان بررسی هر یک از حالات خرابی به صورت جداگانه مهیا می‌شود.

به منظور اعمال جهت‌گیری الیاف، محوره‌های مختصات محلی تعیین گردید. به طوری که محور ۱ در راستای الیاف قرار گرفته و با محور لوله زاویه‌ای برابر با زاویه رشته‌پیچی را می‌سازد. محور ۲ عمود بر محور ۱ بر روی محیط استوانه قرار گرفته و محور ۳ نیز عمود بر سطح استوانه قرار گرفت. دو صفحه صلب نیز به عنوان قید و بند در دو سمت لوله تعریف می‌شوند، که یکی ثابت و دیگری محرک می‌باشد. تماس این دو صفحه با لوله به صورت General contact با ضریب اصطکاک ۰/۴ در نظر گرفته شد. میزان جابجایی تنها، برای قید بالا، به میزان ۵۵ میلی‌متر در جهت پایین آمدن در نظر گرفته شد و بقیه درجات آزادی حرکت قید، سلب گردید. نوع مش‌گذاری لوله کامپوزیتی نیز از نوع المان‌های ۴ گره با چهار وجهی خطی (C3D4) تعریف شد. همچنین برای مش زنی لوله تعداد ۳۲۷۱۸ المان مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲) فلوچارت معیار هاشین سه بعدی

روش‌های دیگر شبیه‌سازی لوله‌های رشته‌پیچی که فقط قابلیت تخمین حداکثر میزان نیرو و شبیه‌سازی را در حالت الاستیک داشتند، در این حالت جدید که با استفاده از زیرروال وی‌یومت و استفاده از معیار هاشین سه بعدی همراه شد، علاوه بر تخمین نزدیک به واقع حداکثر میزان نیرو، می‌توان روند و تغییرات نمونه را نیز حتی در حالت پلاستیک در طی وقوع خرابی، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد.



شکل ۳) مقایسه نتایج نمودار نیرو-جابجایی نمونه بارگذاری شده در دو حالت آزمون تجربی و شبیه سازی

که در این روابط پارامترهای d_{mc} ، d_{mt} ، d_{fc} ، d_m ، d_f بیانگر مود آسیب عمومی الیاف، مود آسیب عمومی ماتریس، مود آسیب کششی الیاف، مود آسیب فشاری الیاف، مود آسیب کششی ماتریس و مود آسیب فشاری ماتریس می‌باشند و ضرایب s_{mt} و s_{mc} که به منظور کنترل سفتی می‌باشند به ترتیب ۰/۵ و ۰/۹ فرض شدند [15].

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار خرابی در لوله‌های رشته‌پیچی شده از معیار هاشین سه‌بعدی به همراه زیرروال وی‌یومت به جهت تعریف خواص و روابط ساختاری استفاده گردید. آباکوس در ابتدای زمان هرگام، توزیع کرنش، متغیرهای حالت خواسته شده و تعاریف ساختاری مربوط به آن گام را فراهم کرد و سپس با استفاده از همین تعاریف، تنش را در انتهای هر نمو محاسبه شد. در زیرروال وی‌یومت متغیرهای مورد نیاز مانند شماره گره المان، تعداد معادلات مربوط به تنش‌های اصلی و معادلات ساختاری گنجانده شده و از طریق فایل for وارد آباکوس شدند. مهم‌ترین وظیفه تعریف تنش برای هر نمو و محاسبه آن برای هر نقطه در انتهای آن نمو می‌باشد. زیرروال وی‌یومت این داده را در هر نمو به‌روزرسانی کرده و دوباره برای ادامه‌ی حل به حل‌گر صریح (Explicit) آباکوس برگرداند. در این مرحله انرژی‌های داخلی نیز به‌روزرسانی شدند.

با توجه به معیار خرابی داده شده زمانی که هر المان به تنش تسلیم رسید، از روند معادلات و مدل حذف شده و حل‌گر برای این المان‌ها تنش و تغییرات کرنش را صفر در نظر گرفت. این مورد را می‌توان با اختصاص یک متغیر حالت کنترل کرد، این متغیر حالت در ابتدای حل عدد ۱ را قبول می‌کند و در هنگام حذف شدن به صفر می‌رسد. این صفر شدن زمانی اتفاق می‌افتد که المان مورد نظر با توجه به معیار مورد نظر داده شده تخریب و تسلیم کامل شده باشد. مقدار صفر، نشان دهنده حذف المان از مدل و صفر شدن تنش‌های مربوط به آن المان می‌باشد. الگوریتم به کار رفته در زیرروال وی‌یومت به صورت شکل ۲ می‌باشد.

۶- نتایج و بحث

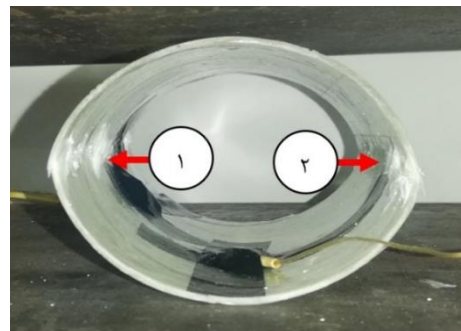
با توجه به شکل ۳ و جدول ۲ برای نمونه‌های ۴۵ درجه مشاهده شد که بعد از افزایش نیرو و رسیدن به حداکثر نیروی خردشوندگی یک افت فاجعه بار در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد دلیل آن اتمام تحمل نیرو توسط الیاف در لوله باشد، همچنین بعد از اتمام افت نیرو مجدداً افزایش نیرو در نمودار رخ می‌دهد که به نظر می‌رسد به دلیل قرارگیری لایه‌های خراب شده بر روی همدیگر است. با قراردادن نمودار شبیه‌سازی در کنار نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون‌های تجربی مشاهده شد که نمودارهای شبیه‌سازی می‌توانند با خطای ثابتی روند تغییر نیرو و حداکثر میزان نیروهای قابل تحمل را پیش‌بینی نمایند. برخلاف

جدول ۲) میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی لوله‌های کامپوزیتی رشته پیچی شده از جنس شیشه/اپوکسی تا فاصله ۵۰ میلیمتری

تست	زاویه پیچش	میزان جذب انرژی (N.mm)	حداکثر میزان نیرو (N)	حداکثر میزان نیرو آباکوس (N)	درصد اختلاف حداکثر نیرو	مقدار فاصله حداکثر نیرو (mm)
۱		۲۵۷۲۴/۲۶	۱۰۲۹/۸۲		۱۳/۳۳	۳۸/۱۲
۲	۴۵	۲۶۶۱۸/۱۸	۱۱۳۸/۴۷	۱۱۶۷/۱۱	۲/۶۰	۳۹/۴۵
۳		۲۵۵۶۱/۲۸	۱۰۵۰/۹۹		۱۱/۰۴	۳۸/۸۸

تحقیقات بر روی ترک‌های ایجاد شده در ماتریس نشان داده است که در کامپوزیت‌ها استحکام و سفتی عموماً در جهت قرارگیری الیاف می‌باشد و کامپوزیت‌ها در جهت عرضی عموماً ضعیف هستند از این رو با افزایش مقدار زاویه رشته‌پیچی نسبت به راستای نیروی وارده، ترک‌ها در رزین به راحتی در راستای الیاف گسترش پیدا می‌نمایند که همین عامل سبب افت شدید نیرو بعد از حداکثر نیرو می‌گردد [16]. جدالایی در بین دو لایه مجاور کامپوزیت زمانی اتفاق می‌افتد که به صورت یک ترک سطحی بین دو لایه ظاهر شود. رشد ترک بین‌لایه‌ای تحت اثر بار خارجی اعمال شده، منجر به کاهش تدریجی خواص مکانیکی چندلایه شده و می‌تواند منجر به خرابی تدریجی در سازه‌های کامپوزیتی گردد. طبق پژوهش‌های انجام شده [17] با افزایش درصد جدایش بین لایه‌ای، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی افزایش یافته و به واسطه آن جذب انرژی سیستم بهبود پیدا می‌کند. نتایج پژوهش حاضر نیز با این نتایج سازگاری داشته و این موضوع را اثبات می‌کند.

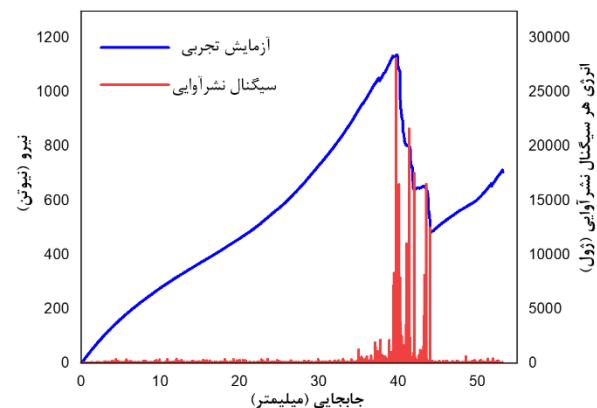
با توجه به شکل ۴ مشاهده شد که شروع خرابی در هر دو نمونه از نواحی ۱ و ۲ واقع در اواسط لوله شروع گردید. با پیشروی آزمایش و حرکت بیشتر قیدهای فشاری، در نهایت شکل لوله به حالت چشم مانند تبدیل می‌گردد، به گونه‌ای که پس از شروع بارگذاری و اعمال بار، سطح مقطع لوله از حالت دایره مانند خارج شده و سطحی بیضی مانند به خود گرفت. به گونه‌ای که در نواحی بالایی و پایینی لوله، لوله از قسمت درونی تحت کشش و از قسمت بیرونی خود تحت فشار قرار گرفت. هم چنین در نواحی چپ و راست نیز، لوله در قسمت‌های درونی خود تحت فشار و در قسمت‌های بیرونی خود تحت کشش قرار گرفت.



شکل ۴) تصویری از خرابی نمونه ۴۵ درجه تحت بارگذاری جانبی در انتهای بارگذاری

به منظور بررسی رفتار لوله رشته‌پیچی تحت بارگذاری جانبی فشاری، از ثبت فعالیت‌های نشرآوایی در حین بارگذاری، استفاده و از داده‌های آن برای ترسیم نمودارهایی مورد نیاز بهره‌برداری شد. این نمودارها شامل منحنی انرژی سیگنال‌های نشرآوایی و نیز نمودار ضرب آهنگ تجمعی سیگنال می‌باشد. همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، وقوع اولین خرابی قابل توجه در نمونه‌ها از انتهای ناحیه الاستیک خطی همراه با پرش‌های قابل توجهی در منحنی انرژی همراه است که عمدتاً به دلیل افزایش ناگهانی کرنش و آزاد شدن انرژی کرنشی اتفاق افتاده است. همچنین باتوجه به نمودارها مشاهده می‌شود که افت یا افزایش ناگهانی در نمودار نیرو-جابجایی با قله‌هایی در نمودار انرژی سیگنال‌های نشرآوایی همراه است که این همزمانی تاییدی بر صحت داده‌های نشرآوایی دریافتی از سازه می‌باشد.

به منظور مشاهده گسترش آسیب در هر یک از حالات خرابی، چهار متغیر Statev(*) در کد وی‌یومت تعریف شد تا بتوان هر یک از آسیب‌های رخ داده را به صورت جداگانه در قسمت SDV موجود در نرم‌افزار المان محدود مشاهده نمود. پارامتر SDV به صورت یک متغیر بین عدد صفر تا یک می‌باشد که هر چه مقدار این عدد برای هر المان بیشتر باشد، بیانگر شدت مقدار آسیب در آن المان می‌باشد. در المان‌هایی که آسیب رخ نداده است مقدار این پارامتر صفر و با رنگ آبی مشخص شد، اما در المان‌هایی که خرابی به حد قابل توجهی پیشروی کرده است مقدار این پارامتر نزدیک عدد یک بوده و رنگ آن مایل به قرمز می‌باشد.

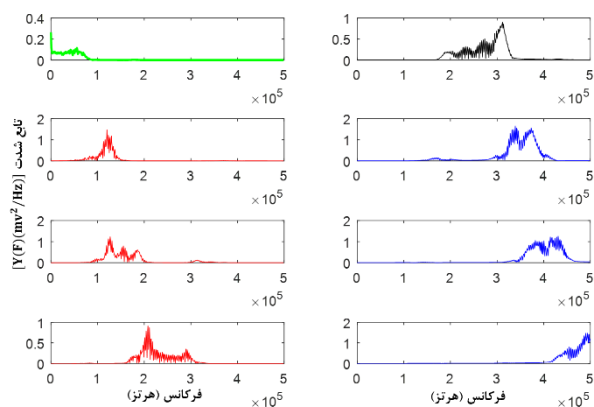


شکل ۵) نمودار نیرو-جابجایی و تحلیل نشرآوایی بر حسب انرژی سیگنال برای نمونه ۴۵ درجه

با توجه به شکل ۶-الف مشاهده شد که جواهر زنی آسیب در حالت کششی برای الیاف از دو انتهای لوله شروع شده و کم‌کم به مراکز آن گسترش پیدا کرد، در صورتی که آسیب فشاری الیاف (شکل ۶-ب) به طور پیوسته و همزمان در ناحیه کمان‌های راست و چپ لوله ایجاد شده و با پیشروی آزمایش به طور پیوسته افزایش پیدا کرد. هم چنین مشاهده شد که بخش عمده آسیب الیاف ناشی از

معینی می‌باشد که از این رو در هر یک از دسته‌ها قرار داده شد. در شکل ۷ توزیع فرکانسی هر یک از ۸ جزء حاصل از تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی برای نمونه ۴۵ درجه قابل مشاهده می‌باشد.

در نمونه‌های ۴۵ درجه با توجه به جدول ۳ مشاهده شد که به طور میانگین شکست الیاف با ۴۶/۹۶ درصد بیشترین سهم خرابی را ایفا می‌نماید و بعد از آن ترک خوردگی زمینه با ۳۷/۱۴ درصد و جدایش الیاف از ماتریس با ۱۵/۹۰ درصد، میزان خرابی‌های ما را تشکیل می‌دهند.



شکل ۷) توزیع فرکانسی هریک از ۸ جزء حاصل از تجزیه سیگنال‌های نشرآوایی

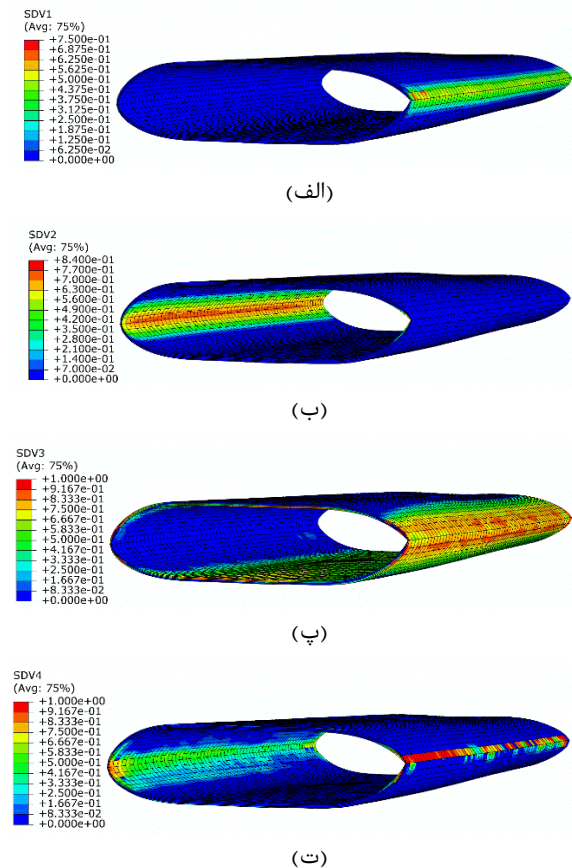
جدول ۳) درصد سازوکارهای خرابی بدست آمده با استفاده از روش نشرآوایی

درصد ساز و کارهای خرابی (%)			نمونه (درجه)
شکست الیاف	جدایش الیاف از ماتریس	ترک خوردگی زمینه	
۴۶/۹۶	۱۵/۹۰	۳۷/۱۴	۴۵±

تجزیه و تحلیل موجک به عنوان روش تجزیه یک سیگنال به اجزای سازنده بر حسب سیگنال مادر تعریف می‌شود. در فرآیند جداسازی موجک گسسته، یک سیگنال به دو بخش تقریب و جزئیات تقسیم می‌شود. تقریب قسمت فرکانس پایین و جزئیات قسمت فرکانس بالا سیگنال است. در مرحله بعد، تقریب به دست آمده به یک تقریب و جزئیات دیگر تقسیم می‌شود. این روند تا سطح مورد نظر ادامه داشت. داده‌های تلفات بین دو تقریب پیوسته در جزئیات در دسترس هستند. در موجک گسسته (wavelet discrete)، جزئیات دوباره تحلیل نمی‌شوند. در عوض، در موجک بسته‌ای (packet wavelet)، از همان روش برای تجزیه و تحلیل تقریب استفاده می‌شود و جزئیات نیز به دو بخش تقسیم می‌شوند، در این تحلیل، تعداد جزئیات در سطح n برابر با 2^n می‌باشد. بنابراین، تحلیل موجک بسته‌ای بهتر عمل می‌کند [18].

هر جزء دارای محدوده فرکانسی خاص است. بنابراین هر سیگنال می‌تواند به مجموعه‌ای از اجزا موجک تجزیه شود که هر کدام

در فشار قرارگرفتن ناحیه درونی لوله می‌باشد که بیشترین تاثیر را در درصد خرابی الیاف ایفا می‌کند. مطابق شکل ۶-ت مشاهده شد که در حالت خرابی ماتریس، آسیب‌های فشاری ماتریس نیز از دو انتهای لوله آغاز شده و به آرامی به مرکز لوله گسترش پیدا کردند. هم‌چنین در شکل ۶-پ مشاهده شد که آسیب کششی ماتریس که در دو کمان راست و چپ لوله، به طور پیوسته و همزمان ایجاد شده به مراتب تاثیر بیشتری نسبت به حالت آسیب فشاری ماتریس در قسمت درونی لوله دارد.



شکل ۶) مدل المان محدود گسترش آسیب برای نمونه ۴۵ درجه: (الف) آسیب کششی الیاف، (ب) آسیب فشاری الیاف، (پ) آسیب کششی ماتریس، (ت) آسیب فشاری ماتریس

۷- تعیین درصد مکانیزم‌های خرابی با استفاده از تبدیل موجک

داده‌های نشرآوایی بیشتر ارایه‌دهنده دیدگاه کیفی هستند و برای سنجش دقیق رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی ضروری است تا نمونه‌ها به صورت کمی نیز مورد سنجش قرار گیرند. از این رو برای تحلیل سیگنال‌های نشرآوایی از روش تبدیل موجک استفاده شد. برنامه تبدیل موجک دسته‌ای در نرم افزار متلب نوشته شده و سیگنال‌ها تا سه سطح تجزیه و به ۸ جزء تقسیم شدند. هر جزء سیگنال با استفاده از سطح تجزیه‌ای که در آن قرار دارد و اینکه جزء با فرکانس بالا یا پایین است، دارای یک محدوده فرکانسی

جدول ۴) درصد سازوکارهای خرابی بدست آمده با استفاده از روش نشرآوایی

جنس	نوع بارگذاری	فرکانس ترک خوردگی زمینه (kHz)	فرکانس جدایش الیاف از ماتریس (kHz)	فرکانس شکست الیاف (kHz)
کربن / اپوکسی	فشاری و کششی	۵۰<	۵۰-۱۵۰	۵۰-۴۰۰
شیشه / اپوکسی	فشاری	۲۵-۱۴۰	۳۵۰-۲۵۰	۴۵۰-۳۵۰
کربن / اپوکسی	کششی	۱۰۰<	۳۰۰-۲۰۰	۴۵۰-۴۰۰
شیشه / اپوکسی	فشاری	۲۵۰-۸۰	۳۷۵-۲۵۰	۴۸۰-۳۷۵
کربن / اپوکسی	کششی	۱۸۰-۹۰	۳۱۰-۲۴۰	۳۰۰>

برای همه نمونه‌های بررسی‌شده، سطح میانی نمونه‌ها به‌عنوان ناحیه آسیب مشاهده شد که با رفتار کمناشی دیواره‌های عمودی شروع می‌شود. این کمناش، قسمت‌های کوچک را ترغیب می‌کند تا موقعیت خود را دوباره تنظیم کنند که باعث ایجاد ترک عمودی در سطح میانی نمونه‌ها می‌شود [26].

علاوه بر این، حالت شکست اول را می‌توان به عنوان ترک زمینه نام برد که باعث آغاز شکست الیاف می‌شود که اکثر نمونه‌ها حالت شکست الیاف را، با ادامه بارگذاری جانبی نشان دادند. برای همه نمونه‌ها، شکست الیاف پس از ترک خوردگی زمینه به عنوان مکانیسم اصلی آسیب دیده شد. شکستن الیاف با لایه‌لایه شدن ادامه پیدا کرد. علاوه بر این، فرآیند خرد شدن جانبی همراه با کمناش موضعی حاصل گردید. فرآیند استاندارد شکست پایدار به عنوان تغییر مقطع از دایره‌ای به بیضی در همه نمونه‌ها اتفاق افتاد [27]. جدایش الیاف از زمینه به‌عنوان مود خرابی روی نمونه‌ها عمدتاً به دلیل چسبندگی سطحی ضعیف بین لایه‌ها، به ویژه در لایه‌های درونی دیده شد. پس از اعمال خردشوندگی، نمونه‌ها به دلیل اثر برگشت فوری مقداری به عقب برگشتند. اما به دلیل تغییر شکل پلاستیک و شکست در داخل نمونه‌ها، مشخصه دایره‌ای اولیه را نگرفتند. کمناش نمونه‌ها که باعث ایجاد ترک‌های عمودی در صفحه میانی شد، نقش مهمی در شکستن الیاف داشت و خرابی شکست الیاف عموماً به صورت ترک‌های طولی در سمت چپ و راست نمونه‌ها ظاهر گردید.

تأییدیه اخلاقی: نتایج علمی بیان شده حاصل فعالیت‌های پژوهشگران مقاله بوده و تا کنون در مجله دیگری چاپ نگردیده است؛ همچنین صحت نتایج بر عهده نویسندگان مقاله می‌باشد.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان مقاله انجام شده است و نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط دانشگاه صنعتی امیرکبیر و گزنت استاد راهنما (دکتر احمدی نجف آبادی) تأمین شده است.

منابع

1- Azeem M, Ya HH, Kumar M, Stabla P, Smolnicki M, Gemi L, Khan R, Ahmed T, Ma Q, Sadique MR, Mokhtar

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 اجزا تجزیه شده بدست می‌آید. اگر $y(t)$ یک سیگنال آکوستیکی باشد، آنگاه می‌توان سیگنال را به اجزا موجک مورد نظر در سطح z ام بصورت $y_j^1 \dots y_j^i \dots y_j^t$ تجزیه کرد. که برای محاسبه سطح انرژی هر جزء موجک، انرژی کل سیگنال و توزیع نسبتی انرژی برای هر جز به ترتیب از روابط (۱۰) تا (۱۲) استفاده می‌شود [19]:

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (y_j^i(\tau))^2 \quad (10)$$

$$E_{total}(t) = c \sum_i \sum_j E_j^i(t) \quad (11)$$

$$P_j^i(t) = c \sum_i \sum_j \frac{E_j^i(t)}{E_{total}(t)} \quad (12)$$

۸- نتیجه گیری نهایی

مشاهده گردید که اولین آسیب از قسمت داخلی استوانه‌ای و با ایجاد ترک در ماتریس ایجاد می‌گردد. با افزایش بارگذاری، جدالاییگی در سطح خارجی لوله ایجاد می‌شود که باعث کاهش قابلیت تحمل نیروی لوله و کاهش شیب نمودار نیرو-جابجایی شد. در کنار این جدالاییگی، ترک‌هایی نیز از سطوح داخلی استوانه تشکیل شد که هم در سطح و هم در ضخامت استوانه گسترش یافتند. با افزایش عمق ترک‌ها، شکستگی الیاف از سطح داخل استوانه شروع شده و به سمت خارج آن افزایش یافت. رشد ترک بین‌لایه‌ای تحت بار خارجی اعمال شده، سبب کاهش تدریجی خواص مکانیکی شده و سبب خرابی تدریجی در سازه کامپوزیتی گردید. همچنین زاویه‌دار بودن الیاف لوله نسبت به محور نیروی وارده، سبب رشد خرابی در ماتریس در راستای الیاف می‌شود که بیانگر این موضوع می‌باشد که در لوله‌های رشته‌پیچی شده استحکام و سفتی لوله عموماً در جهت قرارگیری الیاف می‌باشد. در واقع افزایش خرابی ماتریس سبب افت شدیدتر نیرو از قله نیرویی می‌گردد [20]. نتایج نمودارهای بدست آمده نشان داد که روش نشرآوایی تطابق خوبی با نمودار نیرو-جابجایی دارد، بطوریکه هر افت نیرو در نمودار تجربی با آزاد شدن انرژی آکوستیکی در منحنی‌های نشرآوایی همراه شد که خود تصدیق بر صحت روش نشرآوایی می‌باشد. به کمک پارامترهای SDV تغییرات هر یک از عوامل خرابی، به صورت جداگانه در چهار حالت مختلف در شبیه سازی المان محدود قابل مشاهده و بررسی می‌باشد، همچنین مشخص شد که خرابی فشاری الیاف و کششی زمینه نقش بیشتری را نسبت خرابی کششی الیاف و فشاری زمینه ایفا می‌نمایند. همچنین به منظور مقایسه بازه‌های فرکانسی مربوط به سازوکارهای خرابی با توجه به نوع بارگذاری و جنس‌های مختلف جدول شماره ۴ تنظیم گردید.

- 16- Liu P, Zheng J. Recent developments on damage modeling and finite element analysis for composite laminates: A review. *Materials & Design*. 2010;31(8):3825-34.
- 17- Chen D-M, Xu Y, Zhu W. A comprehensive study on detection of hidden delamination damage in a composite plate using curvatures of operating deflection shapes. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019;38(2):1-18.
- 18- Marec A, Thomas J-H, 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*. 2008;22(6):1441-64.
- 19- Fotouhi M, Saeedifar M, Sadeghi S, Ahmadi Najafabadi M, Minak G. Investigation of the damage mechanisms for mode I delamination growth in foam core sandwich composites using acoustic emission. *Structural Health Monitoring*. 2015;14(3):265-80.
- 20- Alimirzaei S, Najafabadi MA, Nikbakht A, Pahlavan L. Damage mechanism characterization of $\pm 35^\circ$ and $\pm 55^\circ$ FW composite tubes using acoustic emission method. *International Journal of Damage Mechanics*. 2022;10567895221095603.
- 21- Gutkin R, Green C, Vangrattanachai S, Pinho S, Robinson P, Curtis P. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mechanical systems and signal processing*. 2011;25(4):1393-407.
- 22- Fotouhi M, Najafabadi MA. Acoustic emission-based study to characterize the initiation of delamination in composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2016;29(4):519-37.
- 23- Ni Q-Q, Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002;69(6):717-28.
- 24- Mohammadi R, Najafabadi MA, Saeedifar M, Yousefi J, Minak G. Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017;108:427-35.
- 25- De Groot PJ, Wijnen PA, Janssen RB. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 1995;55(4):405-12.
- 26- Mahdi E, Sebaey T. Crushing behavior of hybrid hexagonal/octagonal cellular composite system: Aramid/carbon hybrid composite. *Materials & Design*. 2014;63:6-13.
- 27- Almeida Jr JHS, Ribeiro ML, Tita V, Amico SC. Damage and failure in carbon/epoxy filament wound composite tubes under external pressure: Experimental and numerical approaches. *Materials & Design*. 2016;96:431-8.
- AA. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. *Journal of Energy Storage*. 2022 May; 49:103468.
- 2- Wu L, Zhang Z, Zhang Q, Le G, editors. Study on compression load and energy absorption characteristics of glass fiber honeycomb tube. *Journal of Physics: Conference Series*; 2022: IOP Publishing.
- 3- Thirumavalavan K, Sarukasan D. Experimental investigation on multi-layered filament wound basalt/E-glass hybrid fiber composite tubes. *Materials Research Express*. 2022;9(4):045301.
- 4- Abdewi E. FRP Composite Tube Subjected to Quasi-Static Axial and Lateral Compression Loadings. 2016.
- 5- Jamal-Omidi M, Choopanian Benis A. A numerical study on energy absorption capability of lateral corrugated composite tube under axial crushing. *International journal of crashworthiness*. 2021;26(2):147-58.
- 6- Elahi SA, Rouzegar J, Niknejad A, Assaei H. Theoretical study of absorbed energy by empty and foam-filled composite tubes under lateral compression. *Thin-Walled Structures*. 2017;114:1-10.
- 7- Dadashi A, Rahimi G. Experimental and numerical investigation of buckling and post-buckling behavior of filament wound composite cylinders under lateral compression loading by parallel rigid plates. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019;6(1):151-66.
- 8- Li S, Reid SR, Soden PD, Hinton MJ. Modelling transverse cracking damage in thin, filament-wound tubes subjected to lateral indentation followed by internal pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005;47(4):621-46.
- 9- Eggers F, Almeida JHS, Azevedo CB, Amico SC. Mechanical response of filament wound composite rings under tension and compression. *Polymer Testing*. 2019;78:105951.
- 10- Mohammed MA, Tarfaoui M. A Progressive Damage Modelling of Glass/Epoxy Cylindrical Structure Subjected to Low-Velocity Impact. *Engineering Failure Analysis*. 2022;134:106036.
- 11- Zhao C, Ren R, Zhong J, Goh KL, Zhang K, Zhang Z, et al., editors. Intralaminar crack propagation of glass fiber reinforced composite laminate. In *Structures*; 2022: Elsevier.
- 12- Dimple D, Elango P, Prakash MK. Simulative estimation of reaction force and drill accuracy of CFRP composites. In *Materials Science Forum 2020* (Vol. 978, pp. 344-350). Trans Tech Publications Ltd.
- 13- Beheshtizadeh N, Mostafapour A, Davoodi S. Three point bending test of glass/epoxy composite health monitoring by acoustic emission. *Alexandria Engineering Journal*. 2019;58(2):567-78.
- 14- Alimirzaei S, Najafabadi MA, Ali ABM. Investigation of failure mechanism of the composite tubes made by filament winding process by acoustic emission method. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2022(Articles in Press).
- 15- Guo W, Xue P, Yang J. Nonlinear progressive damage model for composite laminates used for low-velocity impact. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2013;34(9):1145-54.