



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 لهیدگی 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. با توجه 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 لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



ثبت شده، استفاده کردند. سعیدی فر و همکاران [۱۲] طی پژوهشی رفتار جدایش بین لایه‌های 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 بین لایه‌های پیدا کردند.

اسخو و چن [۱۳] و جونجی ژوا و همکاران [۱۴] با استفاده از زیرروال وی‌یومت^۲ 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 بین لایه‌ای 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 مکانیسم‌های شکست درون لایه‌ای 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 و و 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 مکانیسم‌های خرابی مختلف که شامل شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، جدالایگی و شکست الیاف هستند، رخ می‌دهد و لازم است تا میزان تأثیر هر یک از این مکانیسم‌ها شناسایی شود. به نظر می‌رسد تعیین درصد هر یک 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 هر یک 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.

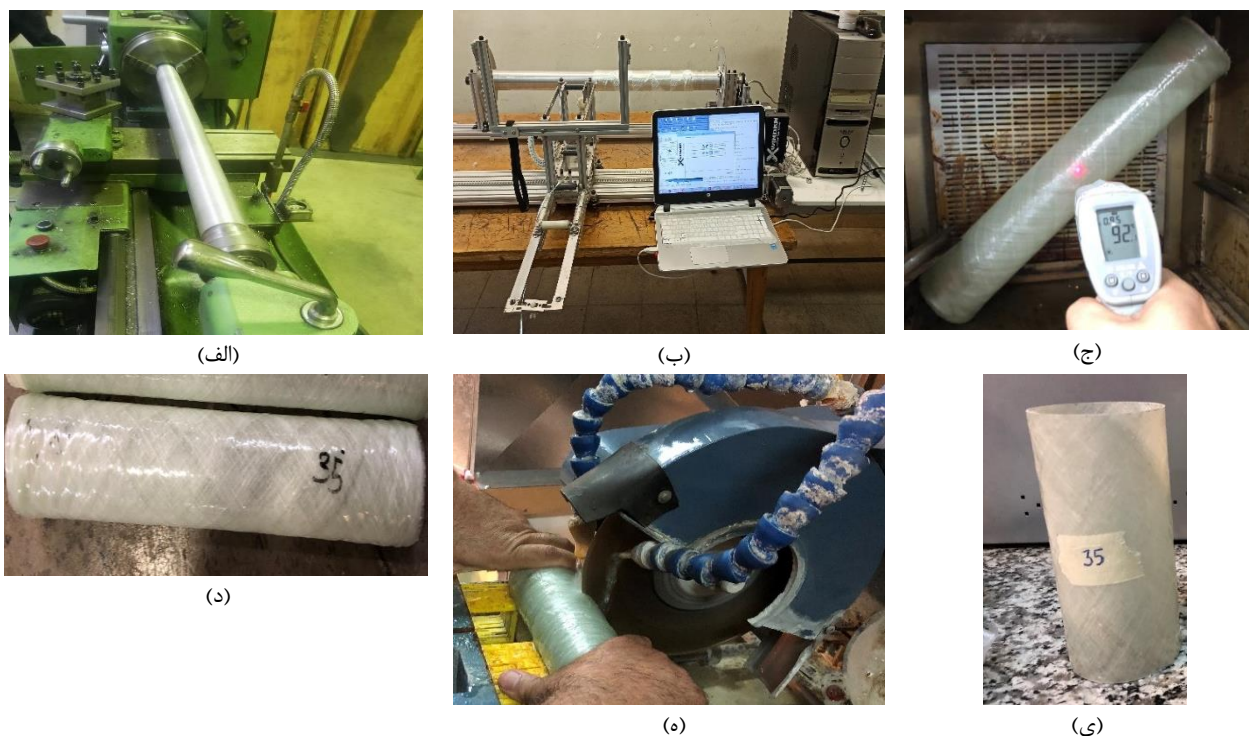
گرفتن تغییر زاویه پیچش در راستای ضخامت سازه پرداختند. مرتینی و الیین [۵] تأثیر تنش اعمالی در طول لوله‌های ساخته شده به روش پیچش الیاف را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش نیروی کشش الیاف باعث 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 مکانیسم‌های 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 مکانیسم‌های 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 خمش سه نقطه با استفاده از روش نشرآوایی پرداختند. برای تجزیه و تحلیل مکانیسم‌های خرابی ایجاد شده آنها از فرکانس و دامنه سیگنال‌های

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

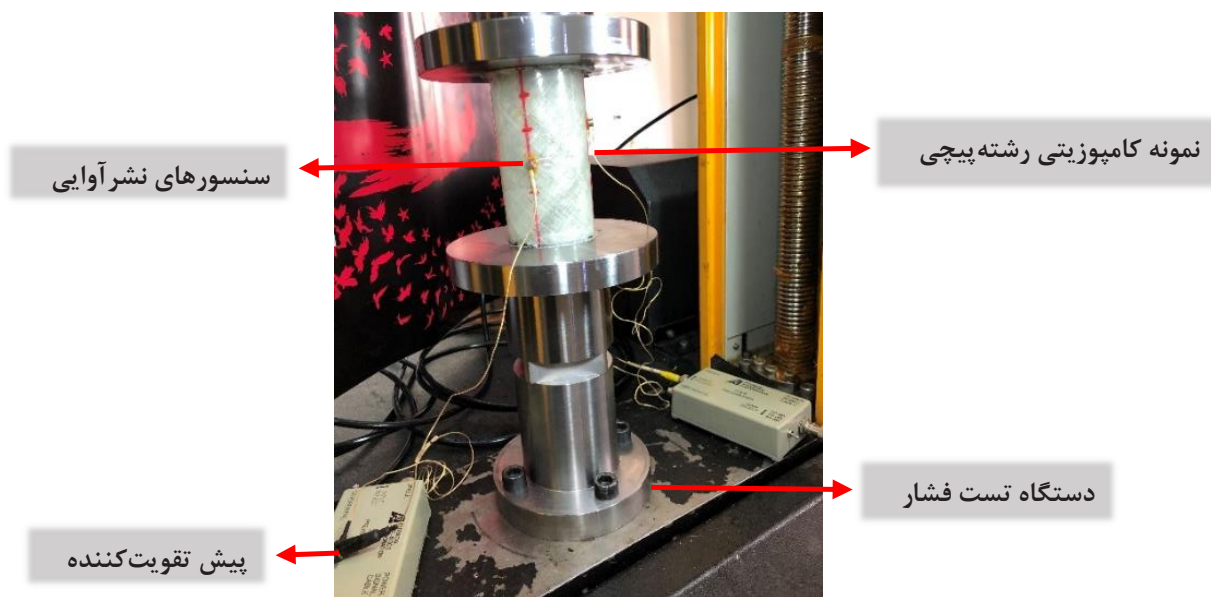
برای بارگذاری نمونه ها، از دستگاه فشار مدل هیوا^۴، با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. مطابق شکل ۲ نمونه های آزمایش با سرعت ۲ میلی متر بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفته شد و برای ثبت داده های نشر آوایی از نرم افزار آی آی وی^۵ و سیستم پی سی آی-۳^۶ با نرخ داده برداری ۲ مگاهرتز^۷ استفاده شد. میزان جابجایی و بار به طور 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 آل 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 C^3D^8R 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

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

جدول ۲. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی

Table 2. Mechanical properties of composite tube

E_{γ} (MPa)	E_{γ} (MPa)	E_1 (MPa)	ρ (gr / cm ^۳)
۸۶۰۰	۸۶۰۰	۳۹۰۰۰	۱۷۸۰
G_{12} (MPa)	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}
۳۵۴۱	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳
Y^T (MPa)	X^T (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (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]

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

جدول ۴. تئوری هاشین سه بعدی [۲۱]

Table 4. 3D-Hashin theory [21]

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

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:

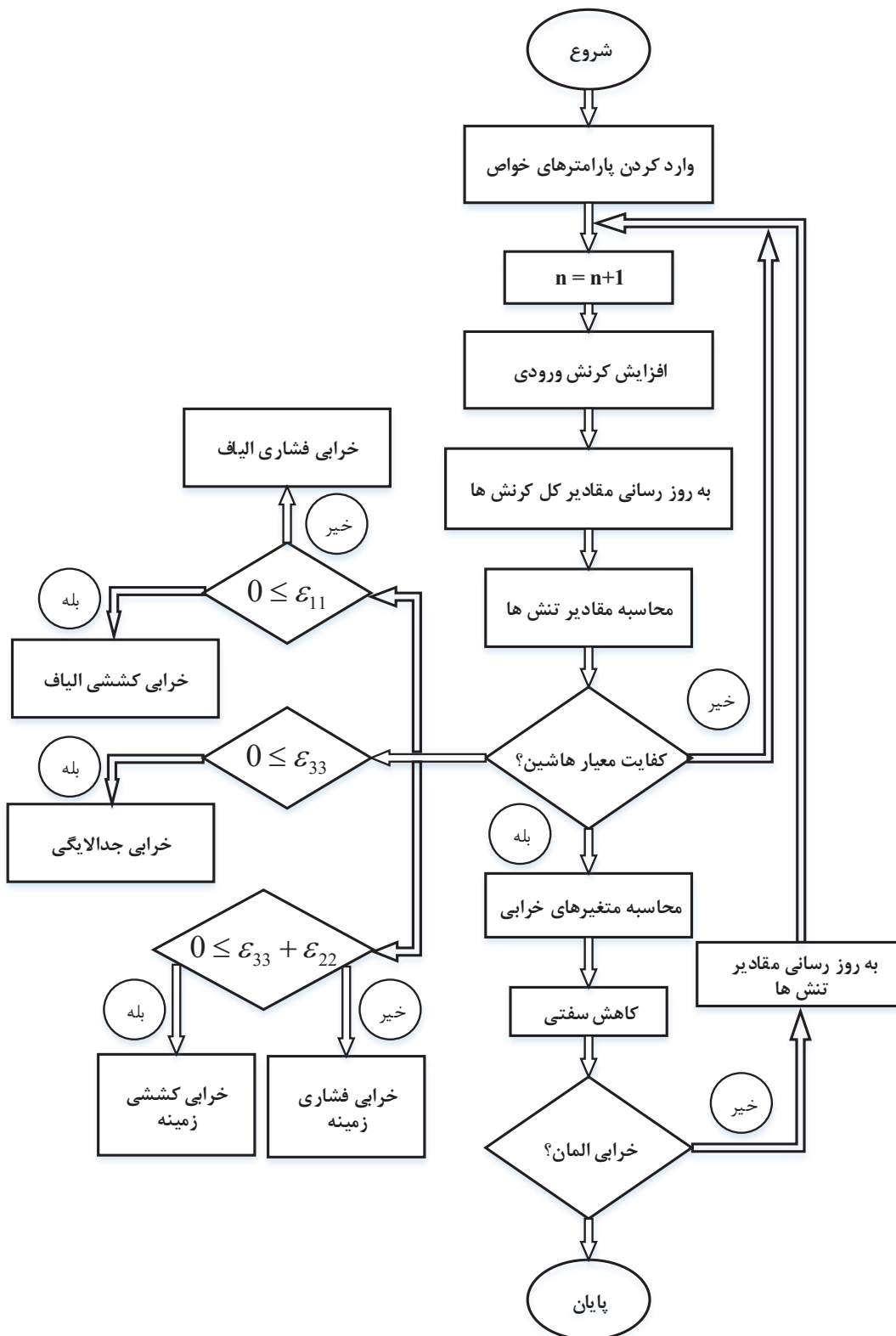
$$(i, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{i}{2}} \psi^*(2^i t - k) \quad (2)$$

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_i 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 فلوجارت 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. فلوجارت 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 پیش‌الیاف 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 اجزای تجزیه‌شده بدست می‌آید. اگر $f(t)$ یک سیگنال آکوستیکی باشد، آنگاه می‌توان سیگنال را به اجزا موجک مورد نظر در سطح J بصورت $f_1^j \dots f_j^j$ تجزیه کرد. سپس برای محاسبه سطح انرژی هر جزء موجک $E_1^j \dots E_j^j$ 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:

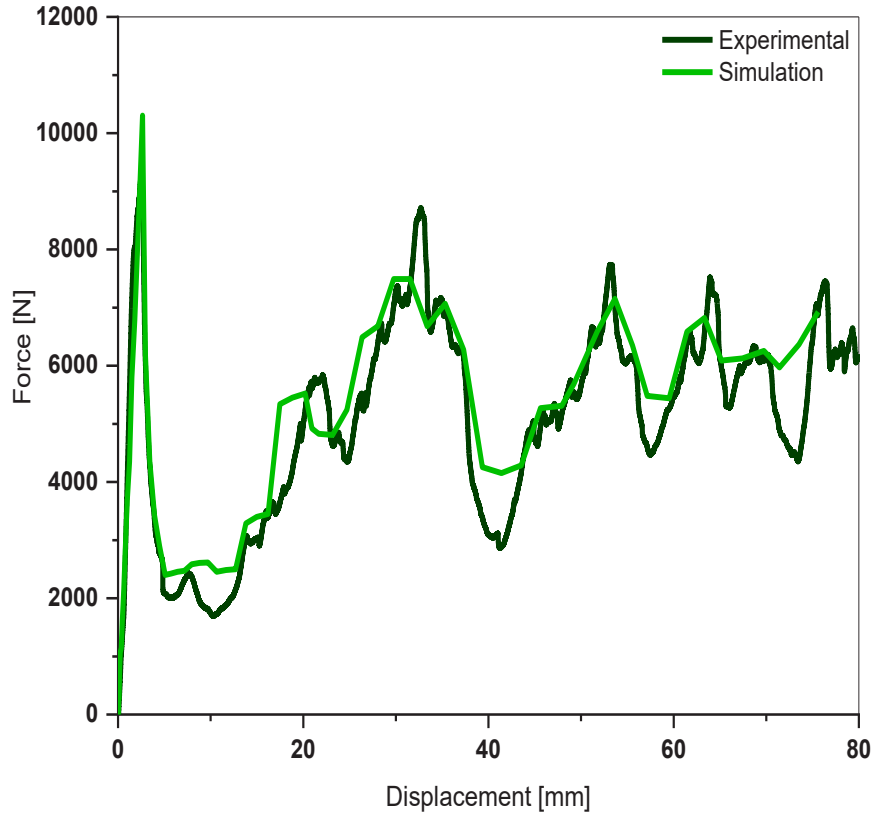
$$E_{total}(t) = c \sum_i \sum_j E_j^i(t) \quad (4)$$

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

1 Wavelet Packet transform

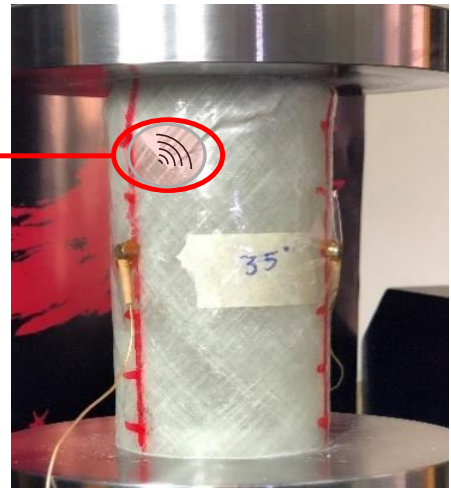


شکل ۴. مقایسه نتایج نمودار نیرو-جابجایی نمونه بارگذاری شده در دو حالت تست تجربی و شبیه‌سازی عددی

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



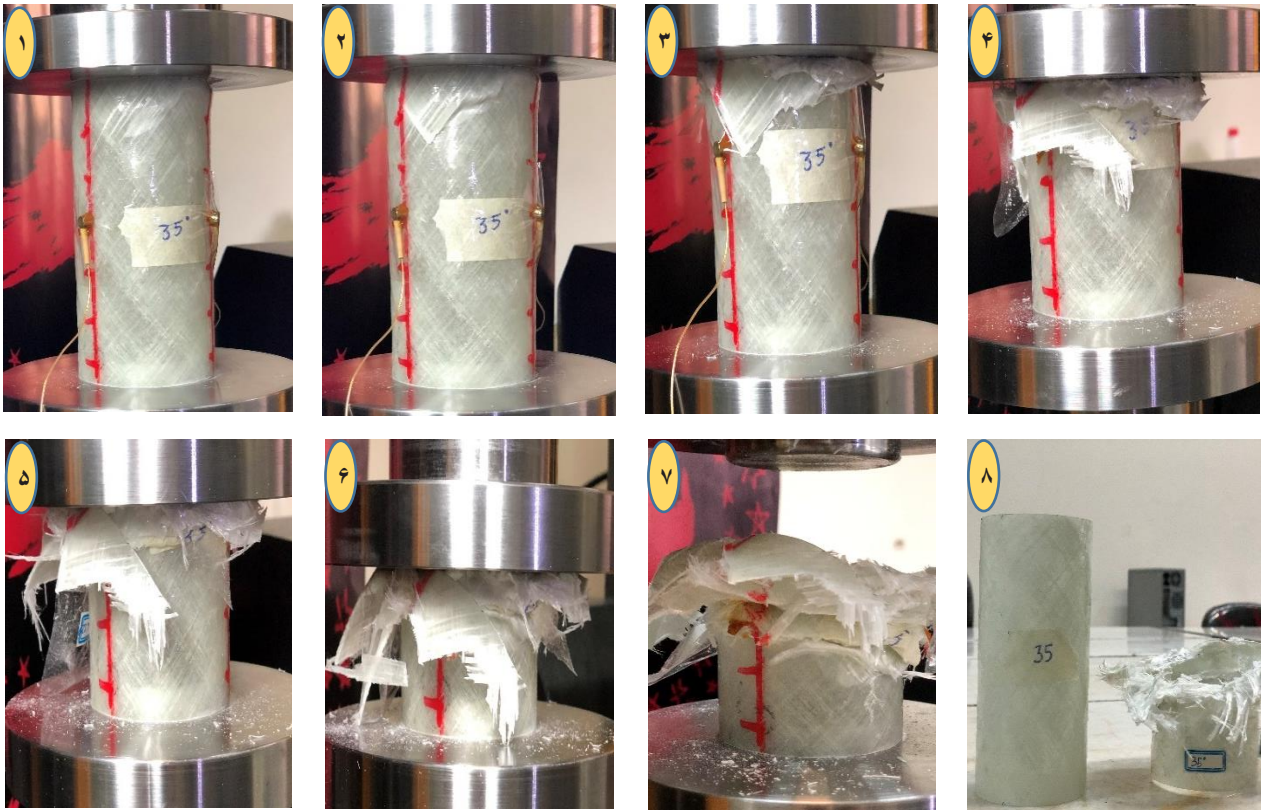
(الف)



(ب)

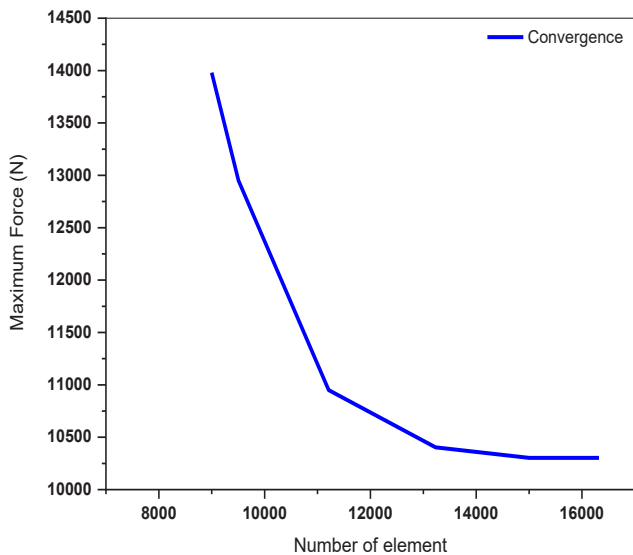
شکل ۵. تشریح شکست نمونه در اثر شکست موضعی: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و ب) بارگذاری فشاری نمونه

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

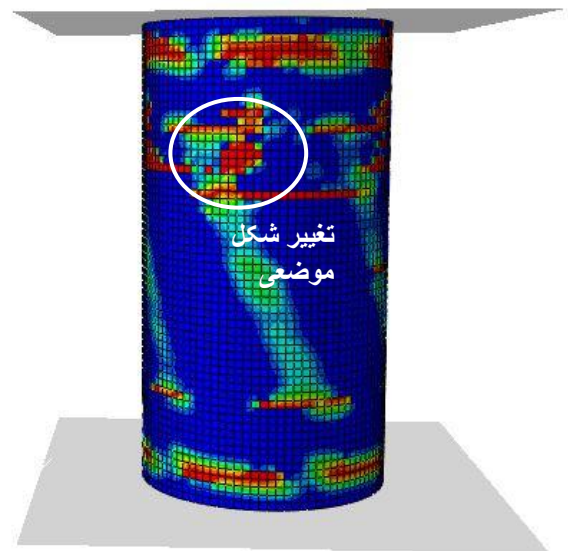


شکل ۶. تاریخچه تغییر شکل لوله کامپوزیتی $\pm 35^\circ$ درجه ساخته شده با استفاده از روش رشته پیچی الیاف

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



(الف)



(ب)

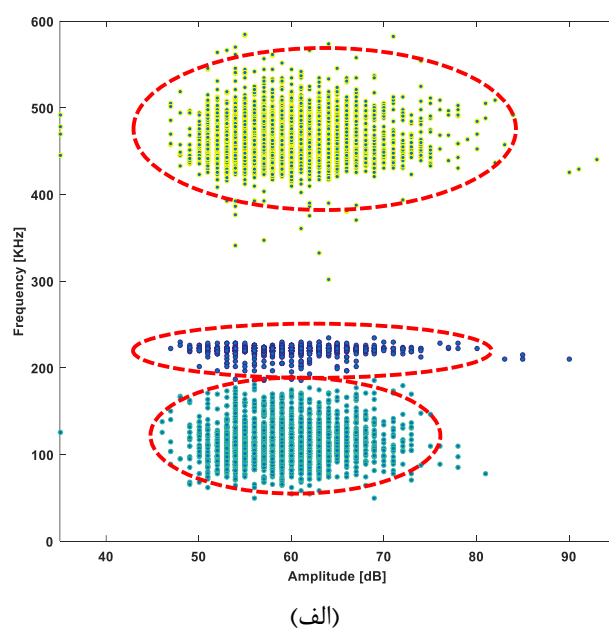
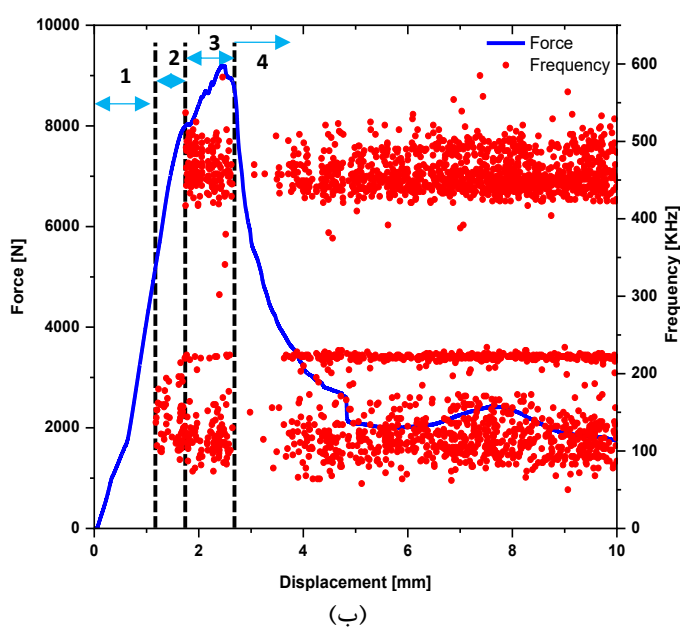
شکل ۷. الف) نمودار تغییرات حداکثر مقدار نیرو نسبت به تعداد مش‌های مدل (حساسیت مش) و ب) تغییرات تنش در راستای خرابی

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

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



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

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

ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس می‌باشد. از طرفی به نظر می‌رسد که، بهترین جذب انرژی در یک سازه توسط جدالایگی 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 جدالایگی 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 آزادکردن انرژی آکوستیکی همراه می‌باشد که مقدار این انرژی بسته به

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.

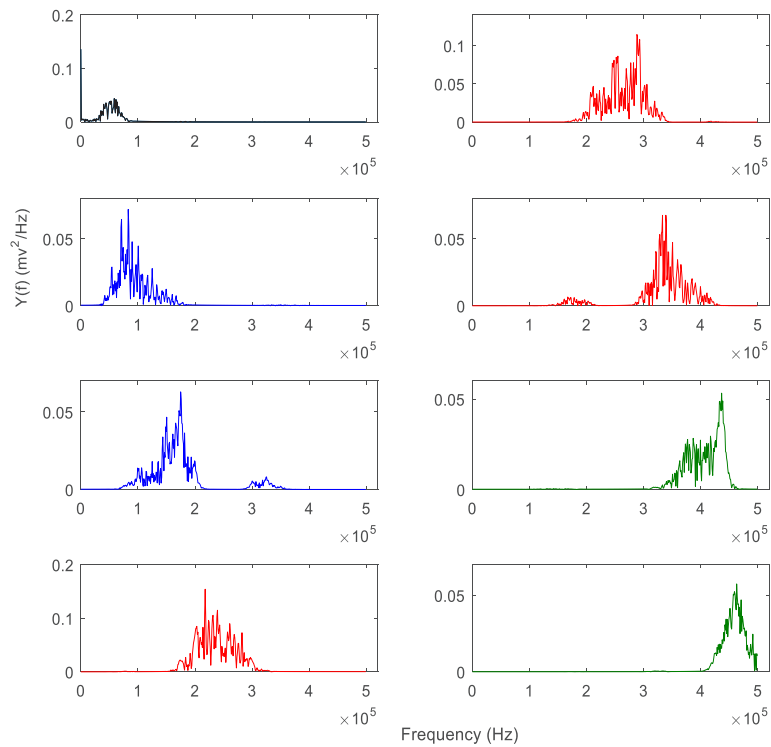
۶-۳- تعیین درصد مکانیزم‌های خرابی با استفاده از تبدیل موجک

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 این‌که 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.

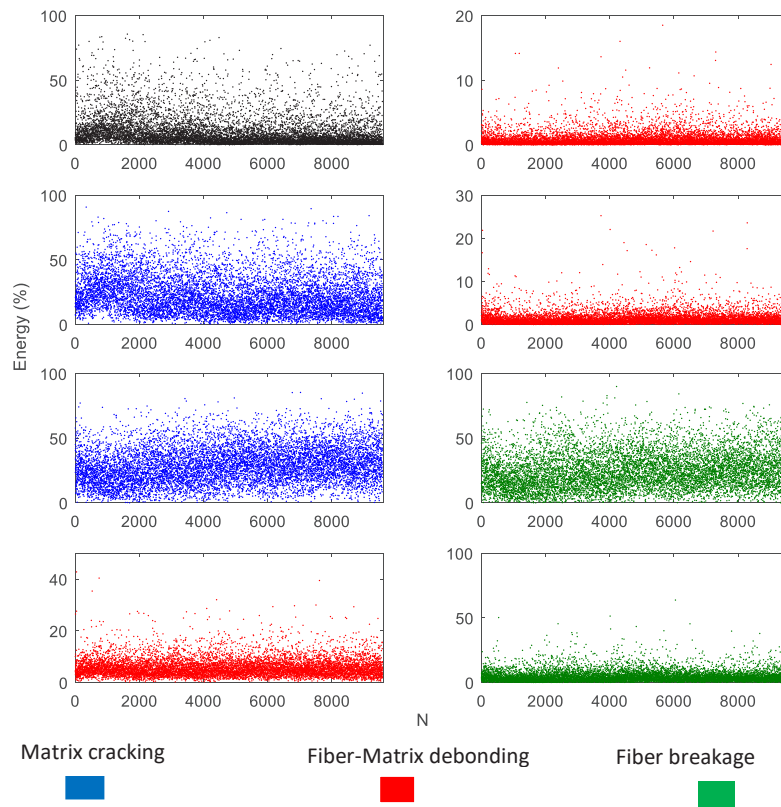
همانطوری که از جدول ۶ مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین درصد مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده در لوله کامپوزیتی، به ترتیب مربوط به

1 MATLAB
2 Entropy criterion

3 Additives



(الف)



Matrix cracking

Fiber-Matrix debonding

Fiber breakage

(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 ترک خوردگی 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 ± 55 filament wound glass fibre reinforced plastic tubes under biaxial loads, *Composites*, 20(2) (1989) 125-135.
- [3] J. Rousseau, D. Perreux, N. Verdier, 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



