



## مدل سازی شروع و رشد آسیب در استوانه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری فشار جانبی بین صفحه‌های موازی

امین داداشی، غلامحسین رحیمی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۰۱  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۰۶  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵

### کلمات کلیدی:

استوانه کامپوزیتی  
شروع و رشد آسیب  
معیار هاشین سه‌بعدی  
زیربرنامه یومت

**خلاصه:** مقاله حاضر به بررسی تجربی و عددی رفتار و چگونگی شروع و رشد آسیب در استوانه‌های کامپوزیتی رشته پیچی شده با زاویه‌ی پیچش  $\pm 75^\circ$  درجه با الیاف شیشه‌ای/پلی‌استر تحت بارگذاری فشار جانبی بین صفحه‌های صلب موازی می‌پردازد. نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری بین صفحه صلب موازی طبق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۲۴۱۲-۰۲ قرار گرفتند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت. به منظور لحاظ اثرات شروع و رشد آسیب، مدل آسیب هاشین ۳ بعدی استفاده شده است. جهت اعمال مدل آسیب هاشین ۳ بعدی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار برنامه‌نویسی فرترن ۷۷ زیر برنامه‌ای در قالب یومت کد نویسی گردید. تعریف خواص مکانیکی و استحکام‌های شکست استوانه کامپوزیتی، بر اساس اندازه‌گیری خواص الیاف و رزین به طور جداگانه طبق استانداردهای مربوطه و با استفاده از روابط میکرومکانیک لایه‌ها انجام گرفت. در تمامی آزمایش‌های انجام شده مشاهدات تجربی شامل سطح شکست به وجود آمده در اثر بارگذاری و علت وقوع مکانیزم‌های مختلف آسیب ایجاد شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توافقی مناسبی با یکدیگر دارند. بنابراین مدل سازی انجام شده قابلیت پیش‌بینی مناسب رفتار استوانه کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری مورد بررسی را داراست.

### ۱- مقدمه

استوانه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای در صنایع مختلفی همانند صنایع هوافضا، انتقال نفت و گاز، انتقال آب و صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استوانه‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده از جنس پلیمر و الیاف شیشه‌ای نسبت به استوانه‌های ساخته شده از موادی چون فلزات، بتن و پلیمرها دارای مزایایی مانند مقاومت در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، وزن سبک و پوشش داخلی صاف هستند. پیشرفت‌هایی که در ساخت استوانه‌های رشته‌پیچی شده ایجاد شده است، موجب افزایش علاقه به استفاده از آن‌ها در ساختارهای کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت‌شده با الیاف گردیده است. در نتیجه استفاده گسترده از استوانه‌های کامپوزیتی تولید شده موجب افزایش نیاز برای بررسی مناسب رفتار این نوع سازه‌ها شده است.

هال و همکاران [۱] در سال ۱۹۷۸ از کارافتادگی لوله‌های رشته

پیچی جی.آر.پی<sup>۱</sup> با زاویه پیچش  $54/44^\circ$  درجه و قطر داخلی  $50$  میلی‌متر و ضخامت  $1/5$  میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. اسپنسر و هال [۲] در سال ۱۹۷۸ شکست لوله‌های جی.آر.پی با زوایای پیچش الیاف  $35^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $65^\circ$  و  $75^\circ$  درجه با قطر داخلی  $50$  میلی‌متر تحت فشار داخلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل و مود<sup>۲</sup> شکست شدیداً به زاویه پیچش الیاف وابسته است.

سودن و همکاران [۳] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای تعیین پوش گسیختگی<sup>۳</sup> تیوب‌های رشته پیچی شده جی.آر.پی تحت تنش‌های مختلف در سال ۱۹۷۸ انجام دادند. آن‌ها از یک معیار شکست نیمه تجربی استفاده کردند. طبق نتایج مشاهده شد که شکل پوش شکست‌ها، به‌طور قابل ملاحظه‌ای با تغییرات اندک بار اعمالی وابسته به زاویه پیچش الیاف می‌تواند متفاوت باشد. از مقاله‌ای دیگر از

- 1 Glass Reinforced Polyester (GRP)
- 2 Mode
- 3 Failure Envelope

\* نویسنده‌دار مکاتبات: rahimi\_gh@modares.ac.ir



هیدرواستاتیک داخلی را مورد بررسی قرار داده است. الگوی پیچش نمونه‌ها  $\pm 55$  درجه با زاویه ترک ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه و نسبت طول ترک به ضخامت ۰/۵ در نظر گرفته شده است. استحکام ترکیدگی نمونه‌ها، تعیین و وابستگی بین استحکام ترکیدگی و زاویه ترک مشخص شد. به‌ویژه و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲، استوانه‌های کامپوزیتی ۴، ۶، ۸ لایه را به‌منظور بررسی اثر نسبت قطر به ضخامت در فشار داخلی که باعث شکست آن می‌شود، به روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس مدل کردند. در این کار فشار داخلی بحرانی با زاویه پیچش در نظر گرفته شده برای هر حالت گزارش شد. گانسانگرن و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ با در نظر گرفتن پارامترهای زاویه پیچش، وزن سلیکا اندازه دانه‌های سلیکا و کشش اولیه الیاف در سه سطح مختلف با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی<sup>۴</sup> و انجام آزمایش‌های استحکام کشش محوری<sup>۵</sup> طبق استاندارد آ.اس. تی.ام.دی ۶۳۸<sup>۶</sup>، استحکام کشش محیطی<sup>۷</sup> طبق استاندارد آ.اس. تی.ام.دی ۲۲۹۰<sup>۸</sup> و سفتی لوله<sup>۹</sup> طبق استاندارد آ.اس. تی.ام.دی ۲۴۱۲<sup>۱۰</sup> مناسب‌ترین مقدار را در بازه در نظر گرفته شده برای پارامترهای مذکور به دست آوردند.

رفیعی [۱۴] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تحلیل شبکه‌ای<sup>۱۱</sup> به بررسی تئوری و تجربی از کارافتادگی لوله‌ها جی.آر.پی پرداخت. در این مقاله با استفاده از استاندارد آ.اس. تی.ام.دی ۲۲۹۰، استحکام کششی محیطی لوله استخراج می‌شود. رفیعی و رشادی [۱۵] در سال ۲۰۱۴ به بررسی از کارافتادگی لوله‌های کامپوزیتی هسته‌دار پرداختند. در سال ۲۰۱۵ رفیعی و امینی [۱۶] مدل‌سازی پیشرفته‌ای را برای پیش‌بینی فشار از کارافتادگی<sup>۱۲</sup> لوله‌های کامپوزیتی الیاف شیشه‌ای تحت فشار هیدرو استاتیک داخلی توسعه داده‌اند. مطالعه عملی در روی یک لوله کامپوزیتی با قطر ۷۰۰ میلی‌متر با چیدمان [۹۰/±۵۲/۵] به‌عنوان یک لوله کامپوزیتی صنعتی انجام شده است. رفیعی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ به مدل‌سازی تصادفی<sup>۱۳</sup>

- 4 Taguchi's Design of Experiments
- 5 Axial Tensile Strength
- 6 ASTM D638
- 7 Hoop Tensile Strength
- 8 ASTM D2290
- 9 Pipe Stiffness
- 10 ASTM D2412
- 11 Netting Analysis
- 12 Functional Failure Pressure
- 13 Stochastic Modelling

همین نویسندگان [۴] استحکام شکست و نشتی لوله‌های جی.آر.پی<sup>۱</sup> با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. زوایای پیچش الیاف نمونه‌ها  $\pm 35$ ،  $\pm 55$  و  $\pm 75$  درجه در نظر گرفته شد. در سال ۱۹۸۴ رسناو [۵] لوله‌های جی.آر.پی را تحت سه بارگذاری فشار دوطرفه، فشار داخلی محیطی و بارگذاری کششی مورد آزمایش قرار می‌دهد. اولین کار را با لوله‌های با الیاف رشته پیچیده شده با زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۸۵ درجه و قطر ۵۰/۸ میلی‌متر انجام داد. در سال ۱۹۸۵ هیگتون و همکاران [۶] ۵۰ آزمایش در روی لوله‌های رشته پیچی ساخته شده با زاویه الیاف  $\pm 75$  درجه با قطر ۱۰۰ میلی‌متر تحت ترکیب‌های مختلف بارگذاری شامل فشار داخلی و کشش و فشار محوری انجام دادند. آن‌ها یک مجموعه از نتایج تجربی شکست تیوب‌های جی.آر.پی<sup>۲</sup> را ارائه دادند.

رفتار مکانیکی تیوب‌های جی.آر.پی با زاویه پیچش  $\pm 55$  درجه به‌صورت تئوری و تجربی در دو مقاله در سال ۱۹۹۷ توسط بای و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۸،۷] در مرجع [۷]، از روش پردازش تصویر به‌منظور شناسایی نواقص میکروساختاری که در حین فرآیند تولید ایجاد شدند، استفاده گردید. در مرجع [۸]، مدل‌سازی میکرومکانیکال برای مرتبط‌سازی شرایط مکانیکی با مکانیزم ترک‌خوردگی میکرو و تفکیک مود شکست و توزیع تنش مربوطه انجام شد. تخمین پوش به‌دست‌آمده از مدل‌سازی میکرو مکانیکال توافق خوبی با مشاهدات میکروسکوپی داشت.

تأثیر میزان کشش الیاف در فرآیند رشته پیچی بر روی عملکرد مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی در سال ۲۰۰۲ توسط مرتینی و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی در روی نمونه‌ها با قطر ۳۸/۱ میلی‌متر و الگوی پیچش  $\pm 60$  درجه با میزان کشش مختلف انجام گرفته است.

در سال ۲۰۰۷ اثر اندازه و عمق عیوب<sup>۳</sup> در مقاومت کششی لوله‌های کامپوزیتی جی.آر.پی توسط بورک و آلمیدا [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت امر به این موضوع پی برده شد که عمق آسیب، رفتار مکانیکی لوله‌ها را بسیار بیشتر از شعاع آسیب تحت تأثیر قرار می‌دهد. آریکن [۱۱] در سال ۲۰۱۰ از کارافتادگی لوله کامپوزیتی با جنس شیشه-اپوکسی با ترک مایل سطحی تحت فشار

- 1 Glass Reinforced Epoxy (GRE)
- 2 Glass Reinforced Vinylester (GRV)
- 3 Depth of the Defects

به دلیل تجمع خرابی‌های محلی (یا آسیب) با زیاد شدن بارگذاری افزایش می‌یابد. آسیب اولیه یک سازه کامپوزیتی چند لایه می‌تواند با استفاده معیار مناسبی پیش‌بینی شود [۲۰].

دولتی و همکاران [۲۱] در سال ۱۳۹۶ به تحلیل عددی موده‌های شکست صفحه کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه تگرگ پرداخته شده است. در پژوهش مذکور ابتدا به صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی سازه کامپوزیت با نرم افزار المان محدود ال اس داینا تحت ضربه پرتابه صلب فولادی پرداخته شده و سپس بارگذاری ضربه تگرگ مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر در چیدمان صفحه کامپوزیت، تغییر سرعت و شکل پرتابه از پارامترهای مورد بررسی هستند.

در این مقاله هدف بررسی رفتار غیرخطی سازه و چگونگی شروع و رشد مکانیزم‌های به وجود آمده آسیب در طی بارگذاری در استوانه‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده تحت بارگذاری فشار جانبی بین صفحه‌های صلب موازی و معرفی مدل‌سازی عددی مناسبی با روش المان محدود برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی این نوع سازه با لحاظ اثرات آسیب به صورت شبیه‌سازی سه‌بعدی می‌باشد. در مدل‌سازی عددی، جهت مدل‌سازی اثرات آسیب به وجود آمده در استوانه کامپوزیتی از روش مکانیک آسیب استفاده شده است. بدین منظور از معیار آسیب هاشین سه‌بعدی<sup>۱۰</sup> بهره گرفته شده است. جهت اعمال مدل آسیب هاشین سه‌بعدی، با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی فرترن ۷۷ زیر برنامه‌ای در قالب یومت<sup>۱۱</sup> کد نویسی شده است. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد مدل عددی استفاده شده، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در شرایط مورد آزمایش مقایسه شده است.

## ۲- بررسی تجربی

در این قسمت به ترتیب به شرح کارهای آزمایشگاهی انجام شده شامل نحوه ساخت نمونه‌ها، اندازه‌گیری خواص مکانیکی و چگونگی انجام آزمایش فشار بین دو صفحه صلب موازی پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱- ساخت نمونه

نمونه استوانه‌ها، از استوانه ساخته شده به روش رشته‌پیچی گسسته تهیه شدند. به منظور اینکه چیدمان و زاویه رشته الیاف در

به‌منظور بررسی عدم قطعیت<sup>۱</sup> در فرآیند رشته پیچی گسسته<sup>۲</sup> پرداختند. در سال ۲۰۱۶، رفیعی و مظهری [۱۸] آزمون هیدرو استاتیک بلند-مدت<sup>۳</sup> را برای لوله‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف انجام دادند. این آزمون بر اساس استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۲۹۹۲-۰۶<sup>۴</sup> تحت بارگذاری فشار داخلی برای ۲۴ نمونه لوله با قطرهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متری انجام شد. در این آزمایش‌ها عمر لوله‌ها بر اساس خزش صورت گرفته در طی زمان بررسی شد.

در سال ۲۰۱۶، اوستان و همکاران [۱۹] اثر پرکننده‌های نانو<sup>۵</sup> به لوله‌های کامپوزیتی رشته پیچیده شده کربن اپوکسی را بررسی کردند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های فشار ترکیدگی<sup>۶</sup> طبق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۹۹۷-۱۵۹۹ و کشش محیطی مطابق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۱۲-۲۲۹۰ بر روی نمونه‌های ساخته شده به این نتیجه دست یافتند که مقاومت آن‌ها در برابر ترکیدگی و استحکام محیطی به ترتیب ۱۷٪ و ۳۱٪ افزایش یافته است. در نمونه‌های ساخته شده از پرکننده‌های کربن نانوتیوب<sup>۸</sup> و برن نیتراید نانو ورق<sup>۹</sup> استفاده شده بود.

در حالت کلی مواد کامپوزیتی، با توجه به رفتار غیرهمسانگرد و گاهی ناهمگنی در ساختار سازه آن‌ها رفتاری کاملاً متفاوت نسبت به رفتار الاستیک خطی تا شکست را تجربه می‌کنند. در نتیجه، ساختارهای کامپوزیتی رفتار غیرخطی را نشان می‌دهند، زیرا شکست آن‌ها در یک سری توالی و پیشرفت‌های مکانیزم‌های مختلف آسیب رخ می‌دهد. به طور معمول، شکست به عنوان یک ترک کوچک بین الیاف و ماتریس شروع می‌شود. روند مداوم ایجاد ترک‌های کوچک منجر به تشکیل ترک‌های متعدد در سازه چندلایه‌ای کامپوزیت می‌شود. این ترک‌ها سفتی ماتریس را کاهش داده و باعث می‌شوند که الیاف یا سطوح اطراف آن تنش‌های بیشتری را نسبت به حالت طبیعی داشته باشند. بنابراین، شکست فاجعه‌آمیز ساختار کامپوزیت به ندرت در بار مربوط به شکست اولیه رخ می‌دهد. ساختار در نهایت

- 1 Uncertainties
- 2 Discontinuous Filament Winding Process
- 3 Long-Term Hydrostatic Test
- 4 ASTM D2992-06
- 5 Nanofillers
- 6 Burst Pressure Tests
- 7 ASTM D1599-99
- 8 Carbon Nano Tubes (CNTs)
- 9 Boron Nitride Nano Plates (BNNPs)

10 3D Hashin Criteria

11 UMAT

جدول ۱: مشخصات اسید و کبالت و درصدهای استفاده شده

Table 1: Acid and cobalt profile and percentages used

نام ماده	متیل اتیل کتون پراکساید	کبالت
حالت در دمای اتاق	مایع	مایع
رنگ	بی‌رنگ	بنفش
چگالی ویژه	۰/۳ الی ۰/۹۵	۱/۰۵ الی ۱/۰۹
دمای اشتعال (سانتی‌گراد)	۹۳	۹۵
درصد وزنی اختلاط (/.)	۱/۱	۱



شکل ۱: نمونه استوانه

Fig. 1: Cylindrical sample

منظور تأمین دقت لازم از دستگاه فرز سنگبر استفاده شد. در شکل ۱ نمونه استوانه ساخته شده مشاهده می‌شود. در جدول ۲ مشخصات هندسی مربوط به نمونه آورده شده است.

۲-۲- اندازه‌گیری خواص مکانیکی

آزمون کشش تک‌محوری، رایج‌ترین نوع آزمون‌های مواد برای تعیین مشخصات اولیه مکانیکی می‌باشد. با انجام این آزمون می‌توان در حالت کشش مدول الاستیسیته، تنش تسلیمی، استحکام نهایی، کرنش نهایی و چقرمگی (مساحت زیر نمودار تنش-کرنش) را بدست آورد. نمونه‌ها طبق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۰۳-۶۳۸، مطابق نوع یک تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. اندازه‌های مربوط به نمونه آزمون کشش در واحد میلی‌متر، در شکل ۲ نشان داده شده است.

آزمایش با دستگاه سنتام-اس.تی.ام دی ۲۰۴ در آزمایشگاه کامپوزیت و سازه‌های هوشمند دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. برای اندازه‌گیری دقیق کرنش از اکستنسیومتر تک‌محوری استفاده گردید.

تمامی نمونه‌ها به طور مشابه و یکسان با یک زاویه پیچش معین باشد، استوانه‌ای با طول چند برابر طول نمونه‌های مورد نظر ساخته و سپس ۳ نمونه از آن استخراج گردید. نمونه‌ها به طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. شایان ذکر است که ساخت استوانه کامپوزیتی به طور صنعتی و در شرکت دیبا فایبرگلاس انجام شده است.

مواد مورد استفاده در ساخت نمونه استوانه‌های کامپوزیتی، شامل رزین پلی‌استر و الیاف شیشه می‌باشد. این رزین از نوع رزین‌های ایزوفتالیک است. در تهیه رزین برای تهیه نمونه‌ها در ابتدا کبالت به رزین اضافه شده و پس از اختلاط کامل آن با رزین، متیل اتیل کتون پراکساید<sup>۱</sup> (اسید) به ترکیب آن‌ها افزوده می‌شود. الیاف مورد استفاده از جنس شیشه نوع E و به صورت دایرکت رووینگ<sup>۲</sup> استفاده شده است. در ساخت استوانه، به منظور رشته‌پیچی در ابتدا دسته الیاف به پهنای ۲۰۰ میلی‌متر که از کنار هم قرار گرفتن ۴۸ رشته الیاف تشکیل می‌شود، در مکان ابتدایی استوانه پیچیده می‌شود. دسته الیاف در ابتدا از حمام رزین عبور کرده که در خروجی حمام رزین، اضافی رزین از آن گرفته شده و سپس دسته رشته الیاف در حالت کشیده شده و مرتب از آن خارج می‌شود. در جدول ۱ اطلاعات کبالت و اسید مورد استفاده، ذکر شده است.

در طول ساخت استوانه در این بررسی، سرعت دورانی مندرل و سرعت رفت و برگشت حامل به طوری تنظیم شد که با یک‌بار رفت حامل و پیچش الیاف، سطح مندرل به صورت کامل پوشیده شود. رشته‌پیچی با زاویه الیاف  $\pm 75$  درجه انجام شد. در مرحله بعد استوانه رشته‌پیچی شده تحت حرارتی که از قرار گرفتن در مجاورت مشعل الکتریکی است در محدوده دمای ۸۰ الی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت دوار در زمان بیشتر از ۱۲۰ دقیقه قرار می‌گیرد، تا فرآیند پخت به صورت کامل و متقارن در تمامی استوانه انجام گیرد. برای اطمینان از کامل شدن فرآیند پخت سطح استوانه آزمایش سختی‌سنجی انجام می‌شود. سختی استوانه طبق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۲۵۸۳ می‌بایست در محدوده ۳۰ الی ۷۰ بارکول<sup>۳</sup> باشد.

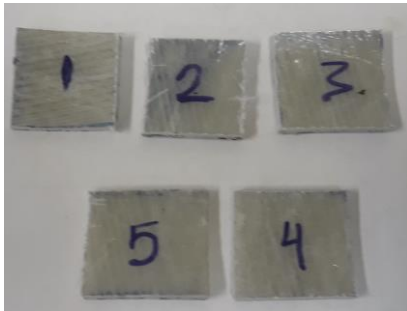
باید خاطر نشان کرد که در برش استوانه و تهیه نمونه‌ها می‌بایست در لبه‌های برش خورده نمونه‌ها هیچ‌گونه ترک و شکستی ایجاد نشود. با توجه به ماهیت شکنندگی الیاف و رزین پس از خشک شدن به

- 1 Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP)
- 2 Direct Roving
- 3 Barcol

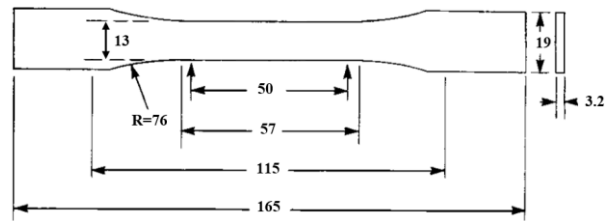
جدول ۲: ویژگی‌های هندسی نمونه استوانه

Table 2: Geometric features of the cylindrical sample

طول اسمی (mm)	قطر داخلی اسمی (mm)	ضخامت اسمی (mm)	تعداد لایه‌ها	زاویه رشته پیچی (degree)
۱۰۰	۲۰۰	۴	۷	±۷۵



شکل ۴: نمونه‌های مربوط به آزمایش سوزاندن  
Fig.4: Samples of the burning test



شکل ۲: هندسه و اندازه‌های مربوط به نمونه آزمایش کشش  
Fig. 2: Geometry and dimensions of the stretch test sample



شکل ۳: نمونه مربوط به آزمایش فشار رزین پس از قرارگیری در دستگاه  
Fig. 3: Specimen of the resin pressure test after placement on the device

کامپوزیتی بر خواص مکانیکی آن تأثیر دارد، درصد حجمی الیاف و رزین، طبق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۰۲-۲۵۸۴ با انجام آزمایش سوزاندن تعیین گردید. مطابق با استاندارد، ۵ نمونه کوچک با ابعاد تقریبی ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر از استوانه مورد بررسی، جدا و طبق شکل ۴ آماده گردید.

پس از تعیین خواص مکانیکی الیاف و رزین و نیز کسر حجمی آن‌ها، در این مرحله با استفاده از روابط میکرومکانیک خواص مکانیکی نمونه استوانه‌ها محاسبه شده است. پیش از اشاره به این روابط، خواص بدست آمده برای الیاف و زمینه در جدول ۳ خلاصه

آزمایش‌ها با سرعت ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید.

در مقاله حاضر به منظور بررسی دقیق رفتار رزین ابعاد نمونه آزمون‌های فشار طبق استاندارد ASTM D695-02 تعیین و ساخته شد. هندسه نمونه‌های آزمون فشار به صورت استوانه‌ای به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر و طول ۵۰/۸ میلی‌متر می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که دو وجه فوقانی و تحتانی نمونه آزمون فشار می‌بایست صاف و موازی یکدیگر باشد. این مورد در ساخت نمونه‌های مربوط به این آزمایش لحاظ گردید. در شکل ۳ نمونه آزمون فشار در دستگاه نشان داده شده است. با توجه به نحوه اعمال بارگذاری که به صورت فشاری است، برای ثبت کرنش، در این آزمایش نیازی نیست که از اکستنسومتر استفاده شود. در واقع، جابه‌جایی نمونه حین بارگذاری توسط فک بالایی که توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود، از دقت لازم برخوردار می‌باشد. لازم به ذکر است که سرعت انجام این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد مذکور (mm/min) ۱/۳ تنظیم شد.

خواص مکانیکی الیاف مانند مدول الاستیسیته، استحکام نهایی و ضریب پواسون از موارد تعیین‌کننده در خواص مکانیکی و آسیب کامپوزیت‌ها بشمار می‌رود. نمونه الیاف مورد آزمایش مطابق استاندارد آ.اس.تی.ام دی ۰۲-۲۲۵۶، طولی به اندازه ۲۵۰ میلی‌متر داشتند. سرعت کشش دستگاه طبق استاندارد مذکور ۲۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. آزمایش با دستگاه اینسترون-۵۵۶۶ انجام گرفت.

با توجه به آنکه نسبت در صد حجمی الیاف و رزین در یک قطعه

جدول ۳: خواص مکانیکی الیاف شیشه و رزین

Table 3: Mechanical properties of glass fiber and resin

مشخصه	الیاف	رزین پلی استر
چگالی $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	۲۶۰۰*	۱۲۶۵/۵۱
مدول الاستیسیته (GPa)	۶۱/۸۳	۲/۸۸۴
ضریب پواسون	۰/۱۸*	# ۰/۳۳
استحکام کششی (MPa)	۱۷۳۴/۴۳۶	۴۷/۶۸۷
استحکام فشاری (MPa)	۸۶۶/۷۱۸**	۹۵/۱۷۵
* [۲۳]		
** طبق مرجع [۱۶] استحکام کششی الیاف دو برابر استحکام فشاری آن است.		
# [۱۶]		

$$G_{12} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} G_m \quad ; \quad \eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi} \quad ; \quad \xi = 1 + 40V_f^{10} \quad (۵)$$

$$v_{23} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} v_m \quad ; \quad \eta = \frac{\frac{v_f}{v_m} - 1}{\frac{v_f}{v_m} + \xi} \quad ; \quad \xi = 1 \quad (۶)$$

در این روابط  $\rho_f$ ،  $\rho_m$  و  $\rho$  به ترتیب چگالی الیاف، زمینه و کامپوزیت نهایی را بیان می‌کند.  $E_1$  مدول الاستیسیته لایه در جهت الیاف،  $E_2$  مدول الاستیسیته لایه در جهت عمود بر الیاف درون صفحه‌ای،  $G_{12}$  مدول برشی درون صفحه‌ای،  $v_{12}$  ضریب پواسون درون صفحه‌ای لایه،  $v_{23}$  ضریب پواسون خارج صفحه‌ای لایه،  $E_f$  مدول یانگ الیاف،  $E_m$  مدول یانگ ماتریس،  $G_m$  مدول برشی ماتریس،  $V_f$  درصد حجمی الیاف،  $V_m$  درصد حجمی ماتریس،  $v_f$  ضریب پواسون الیاف،  $v_m$  ضریب پواسون ماتریس می‌باشند.

عبارت  $\eta V_f$  در مخرج روابط می‌تواند معنای درصد حجمی الیاف کاهش یافته<sup>۲</sup> باشد. اصطلاح کاهش یافته به این علت استفاده شده است که  $\eta \leq 1$  است. علاوه بر این از رابطه‌های که  $\eta$  بدست می‌آید، واضح است که  $\eta$  از خصوصیات مواد تشکیل دهنده و ضریب هندسه

شده است. لازم به ذکر است که از آنجاکه الیاف شیشه و نیز رزین ماده ایزوتروپ محسوب می‌شوند خواص مکانیکی آن‌ها در جهت محوری و عرضی یکسان خواهد بود [۲۲]. همچنین مدول برشی بر حسب مدول یانگ و ضریب پواسون قابل محاسبه است و از این رو، از درج آن در جدول صرف نظر شده است.

در این پژوهش به منظور محاسبه خواص مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده از معادلات هالپین-تسای<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. برتری این روش به دو علت است؛ اول سادگی آن که می‌تواند به آسانی در فرآیند طراحی استفاده شود و دوم اینکه این روش می‌تواند برای محدوده‌های معمول، اگرچه بسیار دقیق، برای نتایج میکرومکانیکی، تعمیم یابد [۲۴]. روابط بین خواص مواد تشکیل دهنده و خواص مکانیکی لایه مطابق روابط (۱) تا (۶) می‌باشد [۲۵].

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (۱)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (۲)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (۳)$$

$$E_2 = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad ; \quad \eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad ; \quad \xi = 2 + 40V_f^{10} \quad (۴)$$

جدول ۴: خواص الاستیک و استحکام استوانه

Table 4: Elastic properties and cylindrical strength

مشخصه	استوانه کامپوزیتی
چگالی $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	$\rho$
خواص الاستیک	$E_1$
مدول الاستیسیته (GPa)	$E_2 = E_3$
مدول برشی (GPa)	$G_{12} = G_{13}$
	$G_{23}$
ضریب پواسون	$\nu_{12} = \nu_{13}$
	$\nu_{23}$
استحکام	$X_T$
	$Y_T$
استحکام فشاری (MPa)	$X_C$
	$Y_C$
استحکام برشی (MPa)	$S$

برشی کامپوزیت برابر با ۶۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد [۱۶].  $d$  و  $S$  به ترتیب قطر الیاف و فاصله مرکز به مرکز قرارگیری الیاف نسبت به یکدیگر می‌باشند. روابط (۱۱) الی (۱۵) با فرض آرایش مربعی الیاف استخراج شده است. با مشخص بودن کسر حجمی الیاف، نسبت  $\frac{d}{s}$  طبق رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۲۲].

$$\frac{d}{s} = \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}} \quad (16)$$

با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده خواص مکانیکی و کسر حجمی الیاف و رزین، مطابق با روابط موجود، خواص مکانیکی نمونه استوانه‌ها محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.

### ۳-۲- آزمایش فشار بین دو صفحه صلب موازی

به منظور انجام آزمایش فشار بین دو صفحه صلب موازی طبق استاندارد ا.ا.س.تی.ام.دی ۲۴۱۲-۰۲ شرایط آزمایش تعیین گردید. این استاندارد برای اندازه‌گیری مشخصات استوانه حاصل از نمودار بار-جابجایی تحت بارگذاری دو صفحه صلب موازی می‌باشد. با انجام این آزمون مشخصه‌های سفتی لوله، ضریب سفتی و نیروی اعمالی بر لوله در جابه‌جایی مشخصی از آن بدست می‌آید. طبق این استاندارد ضخامت حداقلی صفحه‌های صلب می‌بایست ۶ میلی‌متر باشد. ابعاد آن‌ها می‌بایست در راستای قرارگیری طول نمونه، از طول آن کمتر نباشد؛ همچنین پهنای آن در حالت بیشترین طول تماس نمونه با صفحه صلب، ۱۵۰ میلی‌متر و بیشتر از آن باشد.

تقویت‌کننده<sup>۱</sup> یعنی  $\xi$ ، به خوبی تأثیر گرفته است [۲۴].

برای مدول‌های  $E_3$  مدول الاستیسیته لایه در جهت عمود بر الیاف بیرون صفحه‌ای و  $G_{13}$  مدول برشی بیرون صفحه‌ای و ضریب پواسون  $\nu_{13}$  ضریب پواسون خارج صفحه‌ای روابط (۷) الی (۹) فرض می‌شود.

$$E_2 = E_3 \quad (7)$$

$$G_{12} = G_{13} \quad (8)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} \quad (9)$$

همچنین مدول برشی  $G_{23}$  مدول برشی بیرون صفحه‌ای طبق رابطه (۱۰) حاصل می‌گردد [۲۶].

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \quad (10)$$

باید در نظر داشت که در استخراج روابط استحکام‌ها، استحکام همه الیاف‌ها یکسان فرض می‌شود. خواص استحکام مطابق روابط (۱۱) تا (۱۵) محاسبه شدند [۲۲].

$$X_T = S_f V_f + \frac{S_f}{E_f} E_m (1 - V_f) \quad (11)$$

$$X_C = \frac{1}{2} X_T^* \quad (12)$$

$$Y_T = E_2 \left( \frac{d}{s} \frac{E_m}{E_f} + \left( 1 - \frac{d}{s} \right) \right) \frac{S_m^T}{E_m} \quad (13)$$

$$Y_C = E_2 \left( \frac{d}{s} \frac{E_m}{E_f} + \left( 1 - \frac{d}{s} \right) \right) \frac{S_m^C}{E_m} \quad (14)$$

$$S = 65 \text{ MPa} \quad (15)$$

$X_T$ ،  $X_C$ ،  $Y_T$  و  $Y_C$  به ترتیب، استحکام کششی و فشاری کامپوزیت در راستای طولی و عرضی را نشان می‌دهند. استحکام برشی کامپوزیت نیز با  $S$  نشان داده شده است.  $S_f$  بیانگر استحکام الیاف در کشش و  $G_f$  مدول برشی الیاف است.  $S_m^C$  و  $S_m^T$  بیانگر استحکام کششی و فشاری ماده زمینه هستند و  $S$  نیز استحکام برشی زمینه را نشان می‌دهد. استحکام فشاری کامپوزیت در راستای طولی برابر با نصف استحکام کششی کامپوزیت و همچنین استحکام

کاهش می‌یابد که مقداری آسیب را تجربه کند. این در مقایسه با تئوری کلاسیک پلاستیک، در حالی است که سفتی بدون تغییر باقی می‌ماند و تنها استحکام با توجه به رفتار سفت شدگی<sup>۴</sup> / نرم شدگی<sup>۵</sup> تصحیح می‌شود [۲۸].

در این مقاله جهت مدل‌سازی اثرات آسیب به وجود آمده در استوانه کامپوزیتی از روش مکانیک آسیب استفاده شده است. بدین منظور از معیار آسیب هاشین سه‌بعدی بهره گرفته شده است. علت انتخاب معیار هاشین سه‌بعدی به دلیل آن است که در این معیار ۴ مود آسیب از هم تفکیک و در نظر گرفته شده است. در واقع این معیار در مقایسه با معیارهای دیگر مانند هافمن<sup>۶</sup>، تسای-هیل<sup>۷</sup>، تسای-وو<sup>۸</sup>، چنگ-چنگ<sup>۹</sup>، شهید-چنگ<sup>۱۰</sup> به جهت سه‌بعدی بودن رابطه و مؤثر بودن تمامی مؤلفه‌های تنش در روابط معیار و تفکیک ۴ مود آسیب، کامل‌تر به نظر می‌رسد. البته نسبت به سایر معیارهای سه‌بعدی دیگر مانند پاک<sup>۱۱</sup> که پارامترهای بیشتری نسبت به این معیار لازم دارد نیز در مجموع مناسب‌تر است چرا که با صرف زمان کمتری خواص مورد نیاز این معیار قابل حصول است.

### ۳-۱- معیار هاشین سه‌بعدی

به منظور مدل‌سازی شروع و رشد آسیب از معیار هاشین سه‌بعدی استفاده شد. با توجه به آنکه معیار هاشین برای یک تک لایه تک‌جهته استخراج شده است، استوانه کامپوزیتی رشته‌پیچی شده با یک استوانه کامپوزیتی چندلایه مدل‌سازی و در واقع هر لایه، یک لایه کامپوزیتی تک‌جهته در نظر گرفته شده است. با توجه به معیار هاشین سه‌بعدی، چهار حالت مختلف آسیب، یعنی آسیب الیاف در کشش، آسیب الیاف در فشار، آسیب ماتریس در کشش و آسیب ماتریس در فشار همگی لحاظ شدند. در ادامه معیارهای آسیب با فرض برابر بودن استحکام برشی طولی و عرضی معرفی می‌شود [۲۹].

$$1 - \text{آسیب الیاف در کشش برای حالت } \sigma_{11} \geq 0:$$



شکل ۵: تصویر دستگاه انجام آزمایش فشار بین دو صفحه صلب موازی  
Fig. 5: The image of the device performs the pressure test between two parallel rigid plates

سرعت انجام آزمایش‌ها برای تمامی حالات ۱۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه است. برای انجام آزمایش دو صفحه صلب به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر به ضخامت ۲ سانتی‌متر آماده گردید. لازم به ذکر است که در ابتدای انجام آزمایش‌ها پس از قرارگیری نمونه بین دو صفحه صلب و تنظیم فاصله با لبه‌های کناری صفحه‌ها، قبل از شروع بارگذاری، فاصله صفحه بالایی از صفحه پایینی، با توجه به قطر استوانه طوری تنظیم شد که نمونه بین دو صفحه مستقر ولی تحت فشار نباشد. این آزمایش توسط دستگاه تک‌محوره شیجین-دبلیو.دی.دبلیو-۳۰۰ ای<sup>۱</sup> در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. در شکل ۵ دستگاه پس از نصب صفحه‌های صلب نشان داده شده است. شایان ذکر است که اندازه نمونه مورد آزمایش طوری انتخاب شده است که استوانه کامپوزیتی مورد بررسی، لوله کوتاه به شمار می‌رود [۲۷].

### ۳- بررسی عددی

مکانیک آسیب به طور فزاینده‌ای برای تجزیه و تحلیل واماندگی در کاربری‌های مختلف مهندسی شامل مواد بتنی، سنگی، فلزات، کامپوزیت‌ها و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. مکانیک آسیب یک رویکرد غیر محلی<sup>۲</sup> (شبهه به مکانیک شکست)، اما با فرمول‌بندی ظاهری مشابه به نظریه نرم‌شدگی پلاستیک<sup>۳</sup> می‌باشد. در مکانیک آسیب، هر دو پارامتر استحکام و سفتی یک نقطه مادی در صورتی

- 4 Hardening
- 5 Softening
- 6 Hoffman
- 7 Tsai-Hill
- 8 Tsai-Wu
- 9 Chang-Chang
- 10 Shahid-Chang
- 11 Puck

- 1 SHIJIN WDW-300E
- 2 Non-Local
- 3 Softening Theory of Plasticity



است، مطابق روابط (۲۳) تا (۲۹) می‌باشد [۳۰].

$$C_{11}^0 = E_{11}^0 (1 - \nu_{23} \nu_{32}) \Delta \quad (23)$$

$$C_{22}^0 = E_{22}^0 (1 - \nu_{13} \nu_{31}) \Delta \quad (24)$$

$$C_{33}^0 = E_{33}^0 (1 - \nu_{12} \nu_{21}) \Delta \quad (25)$$

$$C_{12}^0 = E_{11}^0 (\nu_{21} + \nu_{31} \nu_{23}), \quad (26)$$

$$C_{13}^0 = E_{11}^0 (\nu_{31} + \nu_{21} \nu_{32}) \Delta \quad (27)$$

$$C_{23}^0 = E_{22}^0 (\nu_{32} + \nu_{12} \nu_{31}) \Delta \quad (28)$$

$$\Delta = 1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{23} \nu_{32} - \nu_{13} \nu_{31} - 2\nu_{21} \nu_{32} \nu_{31}) \quad (29)$$

پس از شروع آسیب درایه‌های مختلف ماتریس سفتی از پارامترهای آسیب تأثیر پذیرفته و با افزایش آن‌ها، از مقدار اولیه درایه‌های سفتی کاسته می‌شود. درایه‌های مختلف ماتریس سفتی با لحاظ پارامترهای آسیب از روابط (۳۰) تا (۳۸) پیروی می‌کنند [۳۰].

$$C_{11} = (1 - d_f) C_{11}^0 \quad (30)$$

$$C_{22} = (1 - d_f)(1 - d_m) C_{22}^0 \quad (31)$$

$$C_{33} = (1 - d_f)(1 - d_m) C_{33}^0 \quad (32)$$

$$C_{12} = (1 - d_f)(1 - d_m) C_{12}^0 \quad (33)$$

$$C_{13} = (1 - d_f)(1 - d_m) C_{13}^0 \quad (34)$$

$$C_{23} = (1 - d_f)(1 - d_m) C_{23}^0 \quad (35)$$

$$G_{12} = (1 - d_f)(1 - s_{mt} d_{mt})(1 - s_{mc} d_{mc}) G_{12}^0 \quad (36)$$

$$G_{13} = (1 - d_f)(1 - s_{mt} d_{mt})(1 - s_{mc} d_{mc}) G_{13}^0 \quad (37)$$

$$G_{23} = (1 - d_f)(1 - s_{mt} d_{mt})(1 - s_{mc} d_{mc}) G_{23}^0 \quad (38)$$

که  $d_f$  و  $d_m$  مطابق روابط ۳۹ و ۴۰ تعریف می‌شود [۳۰].

$$d_f = 1 - (1 - d_{ft})(1 - d_{fc}) \quad (39)$$

$$d_m = 1 - (1 - d_{mt})(1 - d_{mc}) \quad (40)$$

پارامترهای  $d_f$ ،  $d_m$ ،  $d_{ft}$ ،  $d_{fc}$ ،  $d_{mt}$  و  $d_{mc}$  به ترتیب بیانگر مود آسیب عمومی الیاف، مود آسیب عمومی ماتریس، مود آسیب کششی الیاف، مود آسیب فشاری الیاف، مود آسیب کششی ماتریس، مود آسیب فشاری ماتریس می‌باشد. طبق مرجع [۳۰] ضرایب  $s_{mt}$

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S^2} = 1 \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_{11}}{X_T} = 1 \quad (18)$$

اندازه هر کدام از روابط (۱۷) و (۱۸) که مقدار بزرگ‌تری داشت، مقدار آن در حساب پارامتر آسیب الیاف در کشش در محاسبات لحاظ می‌شود.

۲- آسیب الیاف در فشار برای حالت  $\sigma_{11} < 0$ :

$$\frac{\sigma_{11}}{X_C} = 1 \quad (19)$$

۳- آسیب ماتریس در کشش برای حالت  $\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} \geq 0$ :

$$\left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S^2} + \frac{\sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2}{S^2} = 1 \quad (20)$$

۴- آسیب ماتریس در فشار برای حالت  $\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} < 0$ :

$$\left[ \left( \frac{Y_C}{2S} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} \right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S^2} + \frac{\sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2}{S^2} = 1 \quad (21)$$

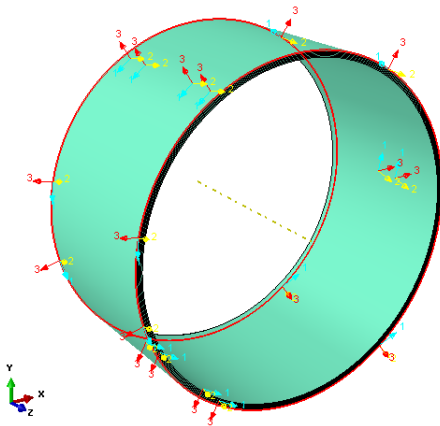
$$\frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S^2} + \frac{\sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2}{S^2} = 1$$

در روابط (۱۷) تا (۲۱)،  $\sigma_{11}$ ،  $\sigma_{22}$  و  $\sigma_{33}$  به ترتیب مؤلفه‌های تنش نرمال در جهت ۱، ۲ و ۳ است.  $\sigma_{12}$ ،  $\sigma_{13}$  و  $\sigma_{23}$  به ترتیب بیانگر تنش‌های برشی مربوط به صفحات برشی ۱۲، ۱۳ و ۲۳ است. جهت ۱ نشان‌دهنده جهت الیاف، جهت ۲ نشان‌دهنده عمود بر الیاف در صفحه و جهت ۳ بیانگر جهت عمود بر الیاف در خارج از صفحه است. در حقیقت جهت‌های ۱، ۲ و ۳ جهت دستگاه مختصات محلی در هر لایه می‌باشد [۲۹].

خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیت اورتوتروپیک طبق رابطه تنش- کرنش به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود [۳۰].

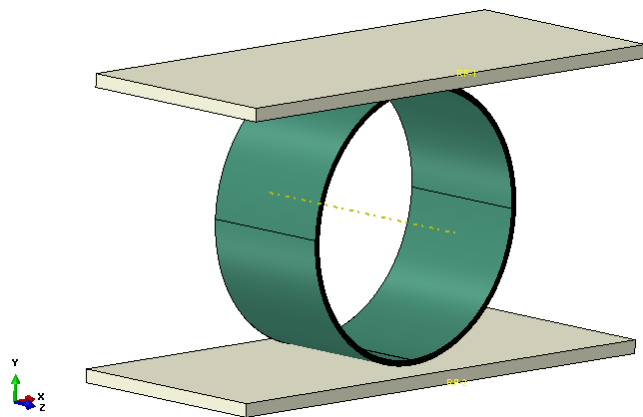
$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

ثوابت مربوط به ماتریس سفتی در حالتی که آسیب شروع نشده



شکل ۷: لایه‌های مختلف استوانه‌ی کامپوزیتی و نحوه تعریف دستگاه مختصات محلی برای هر لایه

Fig. 7: Different layers of composite cylinders and the definition of the local coordinate system for each layer

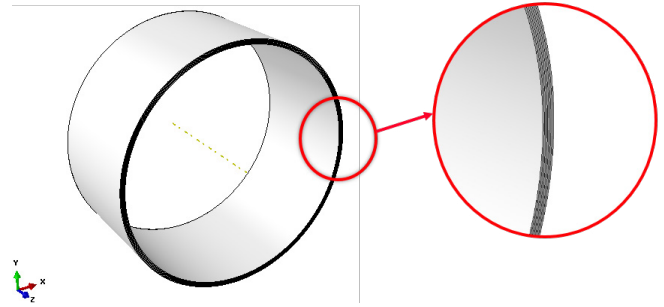


شکل ۸: وضعیت قرارگیری صفحه‌های صلب پس از مونتاژ

Fig. 8: Position of rigid plates after assembly

محلی استفاده شد. برای هر لایه، دستگاه مختصات استوانه‌ای با لحاظ جهت پیش‌یافتگی تعریف گردید. در واقع جهت محور ۱ در راستای الیاف، جهت محور ۲ در راستای عمود بر الیاف درون صفحه‌ای و جهت ۳ در راستای عمود بر الیاف خارج صفحه‌ای می‌باشد. در شکل ۷ نحوه اعمال دستگاه مختصات محلی آمده است.

به منظور تعریف صفحات صلب، ابتدا مکعب مستطیلی به صورت سه‌بعدی رسم سپس با اختصاص دادن نقطه‌ی مرجعی<sup>۲</sup> به آن، مکعب مستطیل رسم شده به صورت صلب تعریف گردید. لازم به ذکر است که علت تعریف نقطه مرجع در واقع مربوط به رفتار مواد صلب است. در واقع مواد صلب به قطعه‌هایی گفته می‌شود که جابه‌جایی نسبی بین نقاط مختلف آن وجود نداشته و تمامی نقاط هم‌زمان با یکدیگر



شکل ۶: هندسه استوانه و قسمت‌بندی ضخامت آن

Fig. 6: Cylindrical geometry and thickness section

و  $s_{mc}$  به منظور کنترل سفتی برشی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۵ فرض شده است.

جهت محاسبه پارامترهای آسیب، در روابط مربوط به چهار مود آسیب به جای عدد یک پارامتر آسیب در نظر گرفته شده است. به طور مثال مقدار عددی  $d_{ri}$  از روابط (۱۷) و (۱۸) بدست می‌آید. هر کدام از رابطه‌ها مقدار بزرگ‌تری داشته باشد، در محاسبات لحاظ خواهد شد. همین ترتیب برای سایر پارامترها به طور مشابه برقرار است. در این مدل‌سازی از ابتدای بارگذاری بر اساس مؤلفه‌های تنش پارامترهای آسیب حساب شده و در هر نمو بر خواص ماده البته به طور دقیق‌تر در ماتریس سفتی اثر داده می‌شود. این روش از مرجع [۳۰] اقتباس شده است.

### ۲-۳- شبیه‌سازی

در ابتدا سطح مقطع استوانه رسم و به وسیله دستور ارتفاع دادن<sup>۱</sup>، یک استوانه ایجاد گردید. سپس با توجه به تعداد لایه‌های رشته‌پیچی شده مقطع به ۷ قسمت مساوی تقسیم گردید. سپس استوانه ایجاد شده، در راستای طول با مقطع‌های دایره‌ای، قسمت‌بندی شدند. در نهایت استوانه‌ای با ۷ لایه با ضخامت‌های برابر حاصل شد. در شکل ۶ هندسه استوانه پس از رسم و قسمت‌بندی شدن ضخامت آن نشان داده شده است.

### ۳-۳- مدل‌سازی هندسه

خواص مکانیکی هر لایه مطابق با آنچه از نتایج آزمایش‌های تجربی، برای تعیین خواص بدست آمده در جدول ۴ خلاصه شده، در نظر گرفته شده است. برای اعمال جهت هر لایه، از دستگاه مختصات

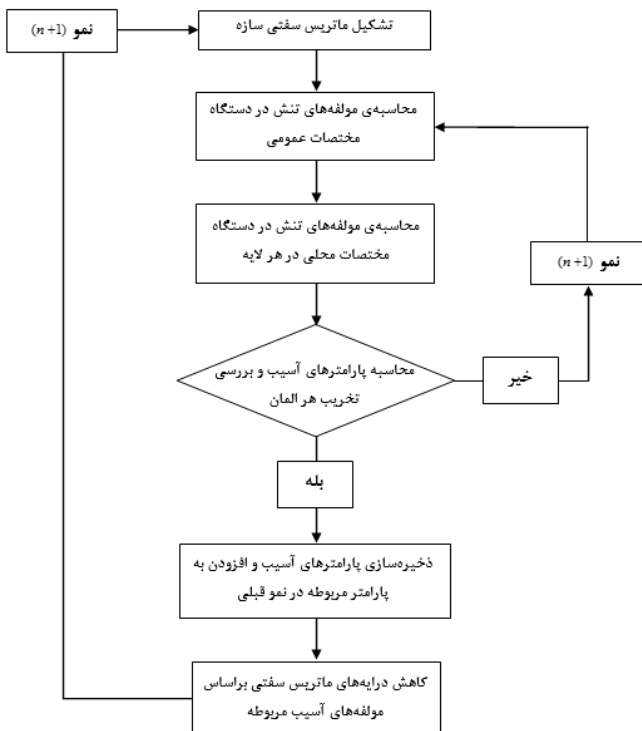
2 Reference Point

1 Extrude

مؤلفه‌های تنش، می‌توانند مقدار داشته باشند. در صورتی که مقدار آن‌ها صفر باشد یعنی در موقعیت جاری المان مربوطه بدون آسیب است و هنگامی که مقدار آن‌ها به یک برسد یعنی المان مربوطه کاملاً دچار آسیب شده و درایه سفتی مربوطه از دست رفته است. به منظور جلوگیری از مشکلات عدم همگرایی پس از کاسته شدن درایه‌های سفتی، کاهش مقدار درایه‌های مربوطه ناشی از پارامتر آسیب الیاف در کشش و الیاف در فشار تا مقدار  $0/0.25$  مقدار اولیه آن کاهش می‌یابد. برای کاهش مقدار درایه‌های مربوطه ناشی از پارامتر آسیب ماتریس در کشش و ماتریس در فشار این مقدار  $0/0.5$  تعیین گردید. فلوجارت الگوریتم روند تحلیل در شکل ۹ آورده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی نتایج در ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی برای نمونه استوانه‌ها بیان شده سپس با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه می‌شود.



شکل ۹: فلوجارت الگوریتم روند محاسبه پارامترهای آسیب و نحوه اعمال آن‌ها در حل عددی

Fig. 9: Flowchart algorithm of the process of calculating damage parameters and how they are applied in numerical solutions

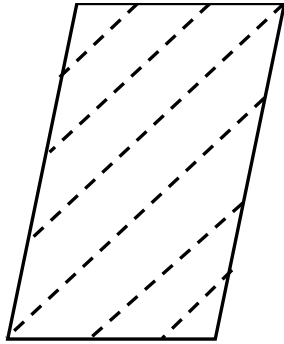
جابه‌جا می‌شوند. لذا جابه‌جایی یک نقطه از قطعه‌ی صلب مشخص کننده حرکت کل جسم می‌باشد. در واقع این نقطه مرجع با نسبت دادن آن به قطعه صلب، نماینده کل جسم صلب می‌باشد. در شکل ۸ نمای کلی مدل استوانه همراه با صفحه‌های صلب پس از مونتاژ آورده شده است. در شکل ۸، استوانه کامپوزیتی با رنگ سبز و صفحه‌های صلب با رنگ سفید نمایش داده شده است.

پس از مونتاژ قسمت‌های استوانه با صفحه‌های صلب، تماس بین استوانه و صفحات به کمک قید تماس عمومی<sup>۱</sup> و با فرض وجود ضریب اصطکاک  $0/3$  بین آن‌ها مدل شد [۳۱]. به منظور مدل‌سازی اعمال فشار، به صفحه صلب بالایی سرعت ثابت  $12/5$  میلی‌متر بر دقیقه در راستای عمود بر صفحه به طرف پایین تعریف و سایر درجه‌های آزادی آن بسته شد. همچنین تمامی درجات آزادی صفحه صلب پایینی بسته و به صورت ثابت مدل گردید.

جهت شبیه‌سازی فرآیند فشار جانبی استوانه در حالت مورد نظر و بررسی رفتار استوانه کامپوزیتی از روش حل غیرخطی ضمنی استفاده شده است. به منظور مش‌بندی استوانه کامپوزیتی از المان سه‌بعدی مرتبه دوم آجری شکل یعنی  $C3D20$  استفاده شد. این المان برای شبیه‌سازی‌های که در خمش در سازه اتفاق می‌افتد بهترین نتایج را حاصل خواهد کرد [۳۲]. با توجه به خواص استوانه کامپوزیتی و شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی، در قسمت‌های مختلف سازه استوانه کشش، فشار، برش، پیچش و خمش ایجاد می‌شود. در حقیقت سازه استوانه، حالت کلی سه‌بعدی تنش را تجربه کرده و تمامی مؤلفه‌های تنش نرمال و برشی مقدار دارند. بنابراین هر چند هزینه محاسباتی تحلیل‌های عددی افزایش پیدا خواهد کرد اما بهترین انتخاب المان  $C3D20$  خواهد بود.

برای شبیه‌سازی مذکور با لحاظ اثر آسیب در تحلیل سه‌بعدی، در روش حل ضمنی می‌بایست زیر برنامه یومت نوشته می‌شد. در نتیجه زیر برنامه یومت به زبان فرترن ۷۷ که قالب تعریف شده برای نرم‌افزار آباکوس می‌باشد، نوشته شد. معیارهای آسیب هاشین سه‌بعدی با توجه به روابط (۱۷) الی (۲۱) تعریف و درایه‌های سفتی ماتریس با لحاظ اثرات پارامترهای آسیب طبق روابط (۲۲) تا (۴۰) کد نویسی گردید.

در این کد مقادیر پارامترهای آسیب از صفر تا یک برحسب مقادیر



شکل ۱۰: دید از بالا به یک استوانه تک لایه کامپوزیتی پس از تغییر شکل  
**Fig. 10: Visibility from above to a single-layer composite cylinder after deformation**



شکل ۱۱: قسمت‌بندی مقطع دایره‌ای استوانه به ۴ کمان و تعیین شماره برای هر کمان

**Fig. 11: Segment the cross section of a cylinder into 4 arcs and assign a number for each arc**

#### ۱-۴-آزمایش استوانه کامپوزیتی تحت فشار بین دو صفحه صلب موازی

پس از قرار دادن نمونه استوانه بین دو صفحه صلب موازی و اعمال فشار از سمت صفحه بالایی، با پایین آمدن صفحه تغییر شکل سازه شروع می‌شود. استوانه در حین اعمال فشار به سمت پایین و در راستای عمود بر صفحه صلب تدریجاً و به صورت تابعی از جابه‌جایی صفحه تغییر شکل می‌دهد. علاوه بر این نوع تغییر شکل، استوانه در راستای صفحه بارگذاری نیز دچار تغییر شکل می‌شود. با افزایش جابه‌جایی صفحه صلب این تغییر شکل به وضوح قابل رؤیت خواهد بود. برای بیان دلیل این نوع تغییر شکل می‌توان گفت، نظر به اینکه استوانه کامپوزیتی از پیچانده شدن دسته الیاف در زاویه پیچش مشخص، ساخته می‌شود، در حین تغییر شکل، سازه دچار پیچش می‌شود. پیچش ایجاد شده باعث بروز تغییر شکل برشی در فرم سازه استوانه و تغییر شکل درون صفحه‌ای در صفحه‌ای به موازات صفحه صلب خواهد شد. برای بیان دقیق‌تر اگر لایه‌های استوانه کامپوزیتی را به صورت جداگانه بررسی شود، زمانی که یک تک لایه کامپوزیتی تحت بارگذاری مدنظر قرار می‌گیرد به علت زاویه پیچش الیاف دچار تغییر شکل برشی می‌گردد. جهت تغییر شکل برشی وابسته به جهت قرارگیری الیاف خواهد بود. در واقع شکل نهایی تغییر شکل یافته در جهت زاویه الیاف است. در شکل ۱۰ تصویر تغییر شکل یافته از نمای بالا برای یک تک لایه به صورت کیفی نشان داده شده است. خطوط خط‌چین نشان دهنده الیاف و زاویه قرارگیری در تک لایه کامپوزیتی می‌باشد.

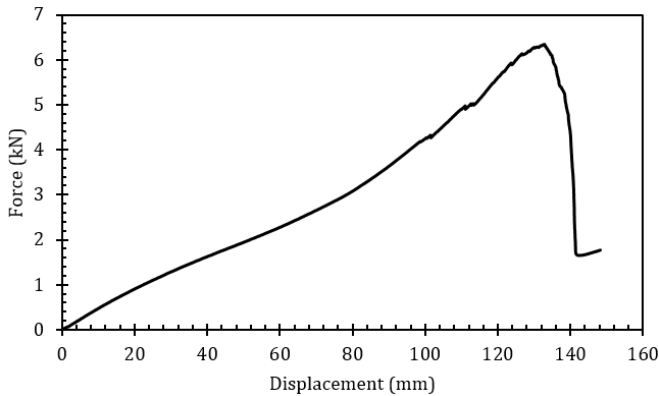
مشابه آنچه در شکل ۱۰ آمده است، اگر زاویه پیچش الیاف قرینه زاویه در شکل باشد، تغییر شکل حاصل نیز قرینه تغییر شکل نشان داده شده در شکل ۱۰ خواهد بود. حال زمانی که دو لایه با زوایای پیچش قرینه نسبت به یکدیگر در حالی که به صورت متوالی در راستای ضخامت بر روی هم قرار بگیرند؛ به علت تفاوت جهت تغییر شکل برشی حاصل، در سازه دو لایه تغییر شکل برشی به نسبت به تک لایه، کمتری ایجاد خواهد شد. اما به همین علت تنش برشی بین لایه‌های بین لایه‌ها ایجاد خواهد شد. در واقع پیچش ایجاد شده به خاطر همین تنش برشی بین لایه‌های خواهد بود.

به منظور بررسی کیفی تغییر شکل مقطع استوانه، شکل مقطع استوانه به چهار قسمت مطابق شکل ۱۱ قسمت‌بندی می‌شود. برای

اشاره راحت‌تر به هر کدام از کمان‌ها، با استفاده از شماره ۱ تا ۴ نام‌گذاری شده‌اند. لازم به ذکر است که شکل ۱۱ به صورت کیفی کشیده شده و مشخصات مربوط به هر کمان در طول بارگذاری متغیر است. علاوه بر آن به خاطر جلوگیری از پیچیده شدن شکل از تغییر شکل برشی استوانه در این شکل صرفه نظر شده است.

با دقت در نحوه تغییر شکل مقطع، کمان شماره ۱، که تحت اعمال نیرو است، قسمت خارجی استوانه تحت فشار است. با اعمال فشار، این قسمت با تغییر شکل کل سازه استوانه، تغییر شکل پیدا خواهد کرد. در نتیجه تغییر شکل، این کمان در قسمت داخلی استوانه تحت کشش قرار خواهد گرفت. برای قسمت تحتانی استوانه، کمان شماره ۳، مشابه آنچه ذکر شد، قسمت خارجی استوانه تحت فشار و قسمت داخلی آن تحت کشش قرار می‌گیرد.

با اعمال بارگذاری در سطح فوقانی استوانه، کمان شماره ۳ نیز تغییر شکل پیدا خواهد کرد. با افزایش طول کمان‌های شماره ۱ و ۳، به منظور ثابت ماندن محیط مقطع استوانه اندازه طول کمان‌های

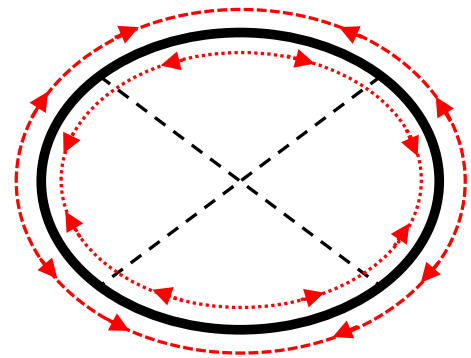


شکل ۱۳: نمودار تغییرات بار-جابجایی مربوط به نمونه استوانه کامپوزیتی شماره ۳

Fig. 13: Load-displacement variation diagram for composite cylinder number 3

داخلی در این محل کافی است به تغییر شکل مقطع استوانه توجه شود. با توجه به اینکه، قسمت خارجی تحت کشش و قسمت داخلی تحت فشار هستند، می‌توان نتیجه گرفت که در قسمت خارجی استوانه، مقطع استوانه تحت تنش کششی و در قسمت داخلی استوانه، مقطع تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد.

نقاط میانی کمان‌های شماره ۲ و ۴ علاوه بر تنش فشاری ناشی از بارگذاری خارجی، تنش‌های خمشی را نیز تحمل می‌کنند. با افزایش مقدار بارگذاری و تغییر شکل سازه، فاصله این موقعیت‌های هندسی از محور بارگذاری بیشتر شده، در نتیجه آن مقدار ممان خمشی در آن‌ها بیشتر خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش مقدار بارگذاری دو مؤلفه تنش حاصل از دو شکل بارگذاری فشاری و خمشی ایجاد شده در این محل، افزایش می‌یابند. در نتیجه موقعیت‌های مذکور نسبت به سایر موقعیت‌های هندسی در زاویه‌های مختلف مقطع استوانه حالت بحرانی دارد. با توجه به استحکام کششی و فشاری بدست آمده برای نمونه استوانه‌ها در جدول ۴ و دقت به این موضوع که اندازه استحکام فشاری در راستای الیاف نصف مقدار استحکام کششی در راستای الیاف است. بنابراین با توجه به این موضوع و در نظر داشتن چگونگی توزیع تنش در راستای ضخامت در این موقعیت‌ها قسمت داخلی مقطع نسبت به قسمت خارجی بحرانی‌تر است. چرا که در این ناحیه تنش فشاری ناشی از بارگذاری فشاری و تنش فشاری از ممان خمشی ایجاد می‌شوند. در حالی که در قسمت خارجی استوانه در این محل‌ها تنش کششی ناشی از ممان خمشی و تنش فشاری ناشی از بارگذاری فشاری وجود دارند. با در نظر داشتن توضیحات داده شده، می‌توان



شکل ۱۲: حالت‌های کششی و فشاری در سطوح داخلی و خارجی استوانه پس از تغییر شکل

Fig. 12: Tensile and compression states on the inner and outer surfaces of the cylinder after deformation

شماره ۲ و ۴ می‌بایست کاهش پیدا کنند. با توجه به آن که طول کمان‌های ۱ و ۳ در حین بارگذاری و پس از آن کاهش می‌یابد، در نتیجه قسمت‌های مذکور تحت فشار قرار می‌گیرند.

شایان ذکر است که با توجه به آنکه در کمان شماره ۱ در قسمت خارجی و داخلی استوانه، به ترتیب کمان تحت فشار و کشش قرار می‌گیرد، در نتیجه به ترتیب قسمت خارجی و داخلی، دچار کاهش و افزایش طول خواهند شد. با توجه به ثابت بودن محیط در قسمت داخلی و خارجی استوانه، در کمان شماره ۲، استوانه در قسمت خارجی و داخلی به ترتیب دچار افزایش و کاهش طول خواهد شد. بنابراین استوانه در این کمان در قسمت خارجی تحت کشش و در قسمت داخلی تحت فشار خواهد بود. در مورد کمان شماره ۴، به طور مشابه آنچه در مورد کمان شماره ۲ بیان شد، می‌توان ذکر کرد.

حالت‌های کششی یا فشاری که قسمت‌های مختلف استوانه در سطح داخلی و خارجی تحمل می‌کند به صورت کیفی در شکل ۱۲ به تصویر کشیده شده است.

علاوه بر حالت‌های ذکر شد، با توجه به توضیحات بند قبل، مشخص است که مقطع دایره‌ای شکل استوانه، دچار خمش نیز می‌گردد. با توجه به حالت هندسه پس از بارگذاری و تغییر شکل آن، با در نظر داشتن شکل ۱۲ کاملاً روشن است که با فاصله گرفتن از محل بارگذاری در راستای عمود بر صفحه صلب، مقدار ممان خمشی ایجاد شده در مقطع بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه محل وسط کمان شماره‌های ۲ و ۴ بیشترین فاصله را از محور بارگذاری دارند، ممان خمشی در این موقعیت‌های هندسی به حداکثر میزان خود خواهند رسید. برای تعیین نوع تنش کششی یا فشاری در قسمت خارجی و

به صورت الاستیک غیرخطی است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سفتی استوانه که همان شیب نمودار است کاهش می‌یابد. این کاهش تا  $42/83$  میلی‌متر یعنی  $21/4$  درصد تغییر قطر ادامه دارد. پس از  $42$  میلی‌متر تا مقدار  $100$  میلی‌متر شیب نمودار افزایش می‌یابد. این‌طور نیز می‌توان بیان داشت که از  $21/4$  درصد تا  $50$  درصد تغییر قطر، سفتی استوانه افزایش می‌یابد. پس از این تغییر شکل در نمودار نیرو-جابه‌جایی نوسان کوچکی در مقدار نیرو در نمودار مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه بیان گردید، رفتار استوانه در محدوده الاستیک را می‌توان به  $3$  ناحیه تقسیم‌بندی کرد. سؤالی که اینجا قابل طرح است این است که چرا شیب نمودار در قسمتی از نمودار روند کاهشی می‌یابد.

با توجه به نمودار شکل ۱۳، تا قبل از جابه‌جایی  $100$  میلی‌متر نمودار به صورت هموار تغییر کرده و با افزایش جابه‌جایی اندازه بار افزایش می‌یابد. اما پس از این مقدار رفتار نمودار به صورت هموار نبوده و در مقدار بار اعمالی تغییراتی مشاهده می‌شود. نمودار تغییرات بار-جابه‌جایی بعد از جابه‌جایی  $100$  میلی‌متر ( $50$  درصد قطر) در قسمت‌های مختلف دچار نوسان‌هایی می‌گردد. نوسان در نمودار با توجه به آنچه در فیزیک سازه استوانه رخ می‌دهد، قابل تفسیر است. پس از تغییر قطر و کاهش آن به زیر  $45$  درصد، آسیب در استوانه شروع می‌شود. آسیب از قسمت سطح داخلی استوانه، با به وجود آمدن ترک‌هایی در ماتریس شروع می‌شود. ترک‌های اولیه به وجود آمده در سطح داخلی مطابق شکل ۱۴ در جابه‌جایی  $90$  میلی‌متر ایجاد می‌شوند.

ترک‌های ایجاد شده در سطح داخلی استوانه بر روی ماتریس ایجاد شده و به همین جهت در مقدار تحمل استوانه تأثیر چندانی

نتیجه گرفت که قسمت بحرانی مقطع استوانه، قسمت داخلی مقطع استوانه، ناحیه میانی کمان‌های شماره ۲ و ۴ است.

جهت نشان دادن قابلیت تکرارپذیری آزمایش، سه نمونه استوانه به طول  $10$  سانتی‌متر به ترتیب مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت بیان کامل و شیوای مطالب، در ابتدای توضیحات این قسمت، در ابتدا نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به استوانه شماره ۳ در طی بارگذاری آورده می‌شود. با توجه به نمودار و نحوه تغییرات آن، اتفاقاتی که در روند افزایش بار حادث می‌شود، همراه با بیان علت آن شرح داده شده و پس از اتمام توضیحات این بخش در ادامه نتایج سه نمونه با یکدیگر مقایسه خواهند شد. در شکل ۱۳ محور عمودی نیروی اعمالی از طرف صفحه صلب بالایی و محور افقی مقدار جابه‌جایی در راستای حرکت صفحه صلب در نقطه میانی کمان شماره ۱ را نشان می‌دهد.

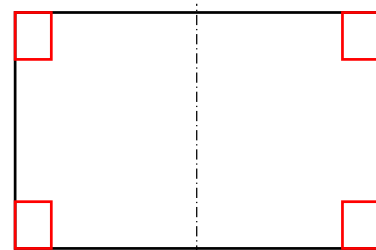
با توجه به نمودار شکل ۱۳ مشخص است که پس از جابه‌جایی  $10$  درصد قطر یعنی در جابه‌جایی  $20$  میلی‌متر، رفتار استوانه از حالت الاستیک خطی خارج می‌شود. تا قبل از این جابه‌جایی رفتار استوانه خطی است. نحوه رفتار نمودار بعد از  $10$  درصد تغییر قطر،



شکل ۱۴: ترک‌های اولیه ایجاد شده در سطح داخلی استوانه  
Fig. 14: Initial cracks formed on the inner surface of the cylinder



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: (الف) موقعیت هندسی جدایش‌های اتفاق افتاده در سطح خارجی استوانه (ب) جدایش‌های اتفاق افتاده در سطح خارجی استوانه حین بارگذاری  
Fig. 15: (a) Geometric location of the separations that occurred on the outer cylindrical surface (b) Separations occurred at the outer surface of the cylinder during loading



شکل ۱۷: تصویر جدایش بین لایه‌های در راستای ضخامت

**Fig. 17: Separation image between layers along the thickness**



شکل ۱۶: سطح مثلثی شکل جدایش بین لایه‌های در سطح خارجی نمونه استوانه پس از اتمام آزمایش

**Fig. 16: The triangular surface forms the separation between the layers at the outer surface of the cylindrical sample after completion of the test**



شکل ۱۸: وضعیت هندسی نمونه استوانه شماره ۳ در جابه‌جایی ۱۳۳ میلی‌متری

**Fig. 18: Geometric state of sample cylinder number 3 at 133 mm displacement**

حائز اهمیت است. اول آن‌که ناحیه جدایش به صورت مثلثی شکل بوده و زاویه‌ای که جدایش از آن شروع می‌شود برابر با زاویه پیچش الیاف است. در شکل ۱۶، تصویر سطح جانبی نمونه استوانه کامپوزیتی شماره ۳ پس از اتمام آزمایش نشان داده شده است. در این تصویر سطح مثلثی شکل جدایش و محل شروع جدایش نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶ مکانیزم خرابی شکست الیاف نیز در این شکل مشهود است.

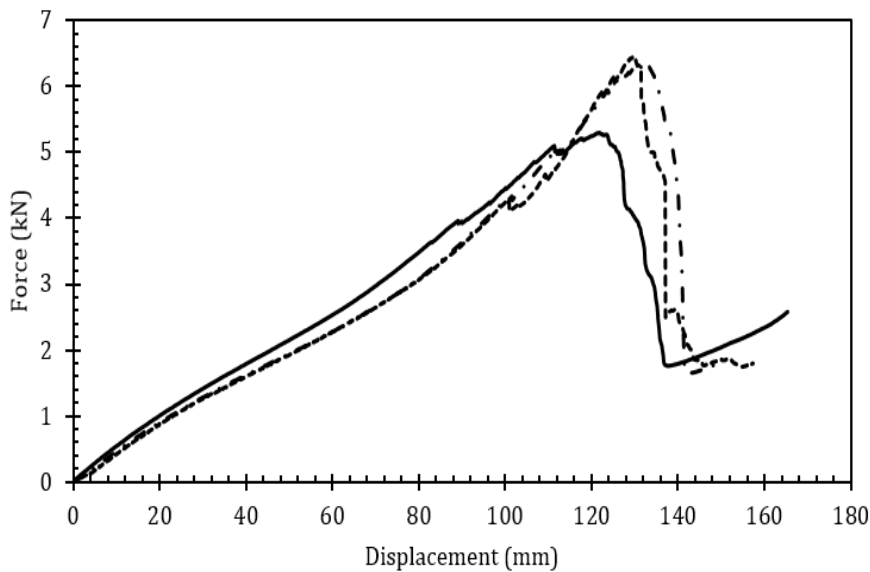
دوم این‌که سطح مثلثی جدا شده در طی بارگذاری به صورت مثلثی باقی‌مانده و بیشتر از مقدار مشخصی افزایش سطح پیدا نمی‌کند. به عبارت دیگر هر چند که در هر دو طرف استوانه جدایش اتفاق می‌افتد اما در امتداد محور استوانه افزایش سطح نمی‌دهد. با افزایش پیدا کردن میزان بار اعمالی لایه‌های زیرین، بیرونی‌ترین لایه نیز دچار جدایش می‌شوند. در واقع این آسیب در امتداد شعاع به صورت جدایش لایه‌های زیرین از یکدیگر گسترش می‌یابد. از سمت خارج به سمت داخل سطح جدایش بین لایه‌های بعدی کوچک‌تر می‌شود. در شکل ۱۷ این موضوع نشان داده شده است.

ندارند. اثرات این ترک‌ها به علت آنکه بسیار کوچک است در نمودار بار-جابه‌جایی تغییر قابل‌نمایشی را ایجاد نمی‌کند. با افزایش مقدار جابه‌جایی صفحه صلب بالایی علاوه بر گسترش ترک‌های به وجود آمده در سطح داخلی، در سطح خارجی استوانه، خارجی‌ترین لایه استوانه نیز در ناحیه‌های مثلثی شکل در ۴ قسمت چسبیده به لبه‌های ابتدایی و انتهایی نمونه استوانه دچار جدایش بین لایه‌های می‌شود. اثر رخ دادن جدایش به صورت نوسان‌هایی در نمودار بار-جابه‌جایی در جابه‌جایی ۱۰۰ میلی‌متر مشخص است. تغییرات به وجود آمده در نمودار هرچند اندک، حاکی از میزان اثرگذاری آسیب به وجود آمده است. در شکل ۱۵ به ترتیب محل ایجاد جدایش‌ها در دید بالا از استوانه به صورت کیفی و جدایش‌های اتفاق افتاده در دید روبه‌رو سطح مقطع استوانه آورده شده است.

با افزایش میزان جابه‌جایی صفحه صلب بالایی میزان آسیب‌ها از سطح داخلی و خارجی هم در عمق و هم در سطح افزایش پیدا می‌کنند. مطابق انتظاری که می‌رفت، آسیب از سطح داخلی استوانه ایجاد می‌شود. در مورد جدایش بین لایه‌های اتفاق افتاده چند نکته



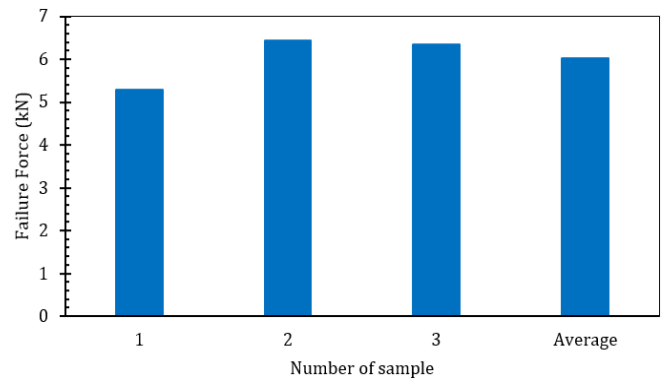
شکل ۱۹: وضعیت هندسی نمونه استوانه شماره ۳ در جابه‌جایی ۱۴۸ میلی‌متری  
 Fig. 19: Geometric state of sample cylinder number 3 at 148 mm



شکل ۲۰: نمودار بار-جابه‌جایی نمونه استوانه‌ها  
 Fig. 20: Load-displacement diagram of cylindrical sample

سمت سطح خارجی آن افزایش می‌یابد. نمونه استوانه تا زمانی نیرو تحمل می‌کند که ضخامت استوانه در نقاط میانی سطح مقطع کامل شکسته شوند. پس از شکست کامل سطح مقطع میانی استوانه، افت نیرو در نمودار بار-جابه‌جایی مشاهده می‌شود. در این نمونه استوانه افت نیرو در جابه‌جایی ۱۳۳ میلی‌متری قابل مشاهده است. در شکل ۱۸ وضعیت استوانه زمانی که افت نیرو در نمودار بار-جابه‌جایی اتفاق افتاده است به نمایش در آمده است.

همان‌طوری که در نمودار بار-جابه‌جایی شکل ۱۳ مشخص است، پس از حداکثر نیرویی که نمونه استوانه تحمل می‌کند، مقدار نیرو کاهش شدیدی پیدا می‌کند. با دقت در نمودار مشاهده می‌شود که مقدار بار به صفر نمی‌رسد. این بدان جهت است که هر چند سازه استوانه کامپوزیتی دچار شکست شده است، اما پس از این مرحله ماده باقی‌مانده از الیاف و ماتریس در مقابل نیرو تحمل می‌کنند. تصویر



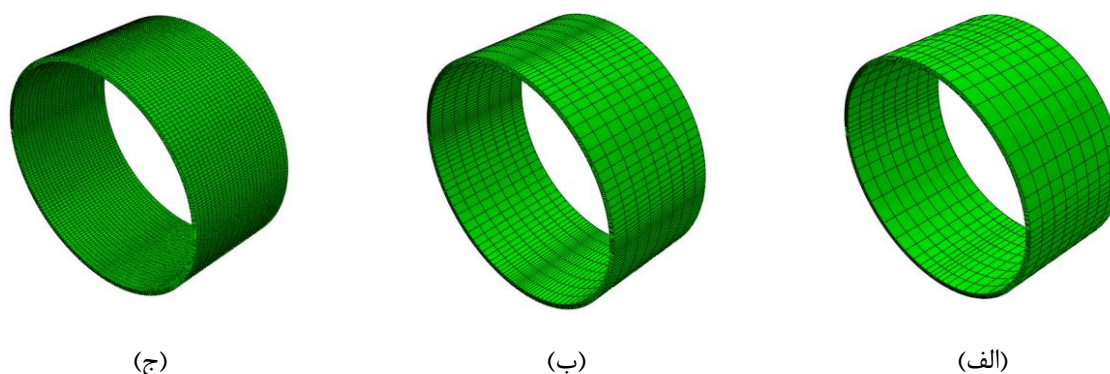
شکل ۲۱: نمودار میله‌ای مقایسه‌ای نیروی شکست  
 Fig. 21: The bar graph of the fracture force comparison

هم‌زمان با جدایش بین لایه‌ها از سطح خارجی، از سطح داخلی استوانه ترک‌های کوچک به وجود آمده، هم در سطح و در راستای ضخامت استوانه افزایش می‌یابند. با افزایش عمق ترک‌ها شکست الیاف به ترتیب از لایه اولی از سمت سطح داخلی استوانه شروع و به





شکل ۲۲: تصاویر از وضعیت قرارگیری الیاف در نمونه استوانه‌ها (الف) نمونه شماره ۱ (ب) نمونه شماره ۳  
**Fig. 22: Images of the position of the fibers in the sample cylinders (a) Sample No. 1 (b) Sample No. 3**



شکل ۲۳: نحوه المان‌بندی نمونه استوانه (الف) ۳۳۶۰ المان (ب) ۷۸۴۰ المان (ج) ۳۱۵۰۰ المان  
**Fig. 23: Modeling the cylindrical sample (a) 3360 elements (b) 7840 elements (c) 31500 elements**

در واقع نظم و یکنواختی که می‌بایست با در کنار یکدیگر قرار گرفتن رشته الیاف در دسته الیاف ایجاد می‌شود، در نمونه شماره ۱ ایجاد نشده است. این پدیده در واقع مربوط به عیوب ایجاد شده در فرآیند ساخت می‌باشد. در شکل ۲۲ تصاویر مربوط به نمونه استوانه‌های ۱ و ۳ آورده شده است.

شکل ۲۲ تصاویر از سطح داخلی استوانه هنگامی که در برابر نور گرفته شده است. همان‌طوری که از تصاویر شکل نمایان است، در نمونه مربوط به شماره ۱ بعضی از رشته الیاف تیره‌تر از سایرین هستند. این امر می‌تواند از قرارگیری رشته الیاف بر روی یکدیگر و همچنین ناشی از آن باشد که این رشته الیاف به صورت کامل با رزین آغشته نشده و اصطلاحاً کامل خیس نشده باشند.

#### ۲-۴- نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش لوله تحت فشار بین دو صفحه صلب موازی

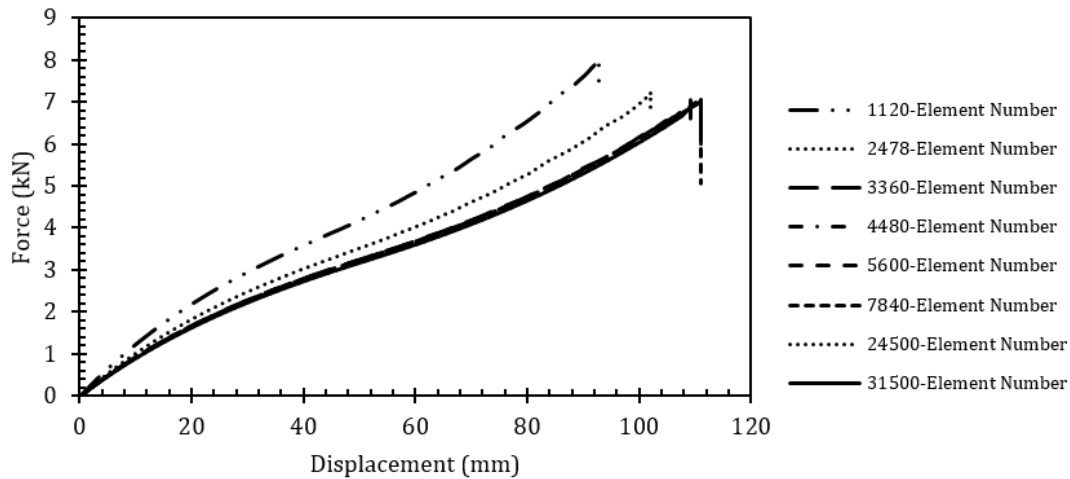
در این بخش نتایج شبیه‌سازی عددی صورت گرفته برای نمونه

سطح مقطع استوانه پس از شکست در شکل ۱۹ مقدار جابه‌جایی ۱۴۸ میلی‌متری نشان داده شده است.

نمودار بار-جابه‌جایی هر سه نمونه استوانه در شکل ۲۰ آورده شده است. با توجه به شکل ۲۰ مشخص است که رفتار نمودار هر سه نمونه مشابه یکدیگر است.

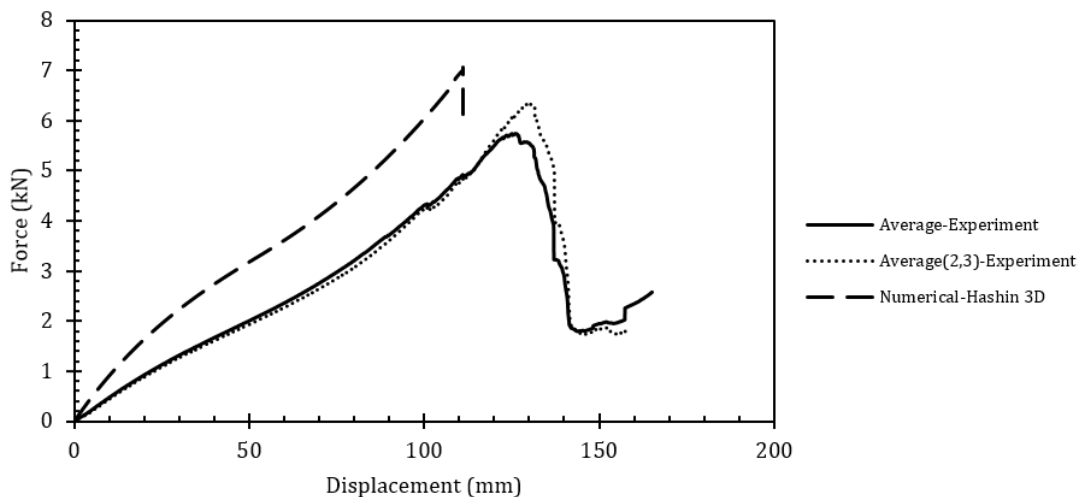
مقادیر نمودار مربوط به نمونه شماره ۱ با دو نمونه دیگر اختلاف داشته و نیروی شکست اختلاف قابل توجهی دارد. به منظور مقایسه نیروهای شکست سه نمونه مقادیر مربوط به هر کدام از نمونه‌ها در نمودار میله‌ای شکل ۲۱ آورده شده است. میزان نیروی شکست میانگین هر سه نمونه ۶/۰۳ کیلونیوتن است. برای نمونه شماره‌های ۲ و ۳، مقدار میانگین نیروی شکست ۶/۴ کیلونیوتن بدست آمد. با توجه به مقادیر میانگین‌ها قابل مشاهده است که مقدار نیروی شکست مربوط به نمونه شماره ۱، مقدار میانگین را ۶ درصد تغییر می‌دهد.

با دقت در سازه نمونه استوانه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که چینش الیاف در نمونه ۱ همانند نمونه‌های دیگر نیست.



شکل ۲۴: نمودار بار-جابجایی حاصل از حل با تعداد المان‌های مختلف

Fig. 24: The load-displacement diagram resulting from the solution with the number of different elements



شکل ۲۵: نمودار بار-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی عددی و میانگین نتایج تجربی نمونه استوانه‌های

Fig. 25: Load-displacement diagram resulting from numerical simulation and average experimental results of cylindrical samples

استوانه کامپوزیتی در شرایط فشار بین دو صفحه صلب موازی ارائه خواهد شد. قبل از ارائه نتایج، به بررسی مش‌بندی و استقلال از مش نتایج حاصله پرداخته می‌شود. در المان‌بندی هندسه دو نوع المان‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. در نوع اول المان‌بندی کل هندسه به صورت یکنواخت المان‌بندی شده و در نوع دوم با توجه به بحرانی بودن ۴ منطقه میانی کمان‌های نشان داده شده در شکل ۱۱ و کاهش تعداد المان‌های مورد استفاده در حل، این موقعیت‌های هندسی با بهره‌گیری از ابزار المان‌بندی جهت‌دار، نسبت به سایر قسمت‌های استوانه از تراکم بیشتر تعداد المان‌ها برخوردار شدند. به منظور بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد المان‌های مورد استفاده در تحلیل، این حل با تعداد المان‌های ۱۱۲۰، ۲۴۷۸، ۳۳۶۰، ۴۴۸۰،

۵۶۰۰، ۷۸۴۰، ۲۴۵۰۰ و ۳۱۵۰۰ انجام گرفت. در شکل ۲۳ تصاویر مربوط به نحوه المان‌بندی در تعداد المان ۳۳۶۰، ۷۸۴۰ و ۳۱۵۰۰ نشان داده شده است. بدیهی است با افزایش تعداد المان‌ها، حجم محاسباتی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین انتخاب نوع و تعداد المان‌های کافی برای انجام تحلیل امری مهم خواهد بود. البته تعداد المان‌ها باید از تعداد مشخصی کمتر نباشد که بر نتایج حل تأثیرگذار باشد. به همین جهت دو نوع المان‌بندی انجام و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد. در شکل ۲۴ نمودار مربوط به بار-جابجایی حاصل از تحلیل عددی با تعداد المان‌های مختلف آورده شده است. ذکر این نکته لازم است که حل مربوط به تعداد المان‌های ۱۱۲۰ تا ۷۸۴۰ به صورت

جدول ۵: مقادیر نیروی شکست و جابه‌جایی متناظر با آن برای هر سه نمودار حاصل از نتایج عددی و تجربی

**Table 5: The values of the breaking force and corresponding displacement for each of the three graphs derived from numerical and experimental results**

جابه‌جایی در شکست (mm)	نیروی شکست (kN)	
۱۱۱/۰۹	۷/۰۴۵	حل عددی
۱۲۶/۲۶	۵/۷۴۸	میانگین کل تجربی
۱۲۹/۸۵	۶/۳۴۴	میانگین نمونه شماره ۲ و ۳

جدول ۶: درصد خطای نیروی شکست و جابه‌جایی حاصل از روش عددی با نتایج تجربی

**Table 6: Error percent of fracture force and displacement resulting from numerical method with experimental results**

۲۲/۵۷	درصد خطای نیروی شکست با میانگین کل
۱۱/۰۵	درصد خطای نیروی شکست با میانگین نمونه شماره ۲ و ۳
۱۲/۰۲	درصد خطای جابه‌جایی شکست با میانگین کل
۱۴/۴۴	درصد خطای جابه‌جایی شکست با میانگین نمونه شماره ۲ و ۳

در مورد جابه‌جایی که شکست در آن اتفاق می‌افتد، از نمودار مشخص است که جابه‌جایی شکست نتیجه عددی از نتایج تجربی کوچک‌تر است. (از این به بعد به جابه‌جایی که شکست در آن رخ می‌دهد، جابه‌جایی شکست گفته می‌شود.) با توجه به آنچه در بند قبلی آمد، بدیهی است زمانی که نیروی شکست مقدار مشخصی باشد، هر چند که اختلاف کوچکی مابین نتایج عددی و تجربی وجود دارد، نموداری که شیب بزرگ‌تری داشته باشد، سریع‌تر به این مقدار رسیده و در نتیجه جابه‌جایی کمتری در این وضعیت خواهد داشت. این مطلب را به گونه‌ای دیگر می‌توان شرح داد، با توجه به آنچه در تجربه اتفاق می‌افتد، تمامی عوامل مختلف شامل عیوب موجود در نمونه و پدیده‌هایی که می‌توانند رخ بدهند مانند جدایش بین لایه‌ای، عملاً محقق می‌شوند. در نتیجه در این حالت سفتی سازه نسبت به حالت ایده‌آل که بدون عیب در نظر گرفته می‌شود، سفتی کمتر خواهد داشت و بنابراین می‌توان گفت در نیروی شکست مشخص جابه‌جایی بیشتری پیدا خواهد کرد. نمودار مربوط به میانگین نمودارهای نمونه شماره ۲ و ۳ آورده شده است تا اختلاف مابین نتایج تجربی و عددی با در نظر گرفتن و عدم در نظر گرفتن نمونه شماره ۱ مقایسه شود. در جدول ۵ مقادیر نیروی شکست و جابه‌جایی متناظر با آن برای هر سه نمودار حاصل از نتایج عددی و تجربی آورده شده است.

در جدول ۶ درصد اختلاف نیروی شکست و جابه‌جایی حاصل از

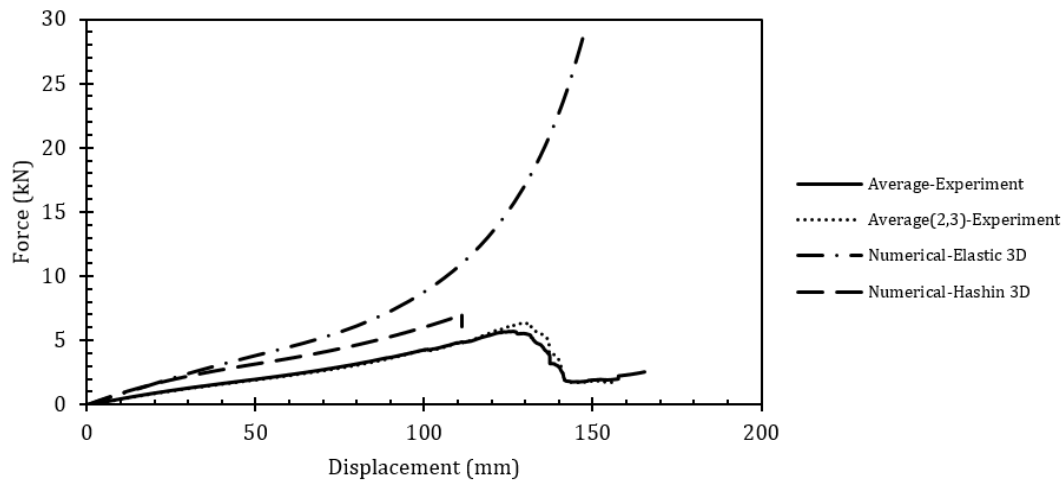
جهت‌دار یعنی با استفاده از نوع دوم المان‌بندی و تعداد المان‌های ۲۴۵۰۰ و ۳۱۵۰۰ به صورت یکنواخت یعنی با بهره‌گیری از نوع اول المان بندی، انجام شده‌اند.

با دقت در شکل ۲۴ مشخص است که نتایج حاصل از تحلیل با تعداد المان‌های مختلف چندان تأثیری در نتایج نهایی نداشته و بعد از تعداد ۵۶۰۰ المان می‌توان اظهار داشت که نمودارهای حاصل از تحلیل با تعداد المان‌های مختلف بر روی یکدیگر منطبق می‌شوند. این نتیجه تأثیر المان‌بندی مناسب برای حل این مسئله را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده برای تمامی تحلیل‌های بعدی از تراکم تعداد المان ۷۸۴۰ و با نوع المان‌بندی جهت‌دار استفاده خواهد شد. این انتخاب باعث کاهش حجم و زمان محاسباتی تحلیل‌ها می‌شود.

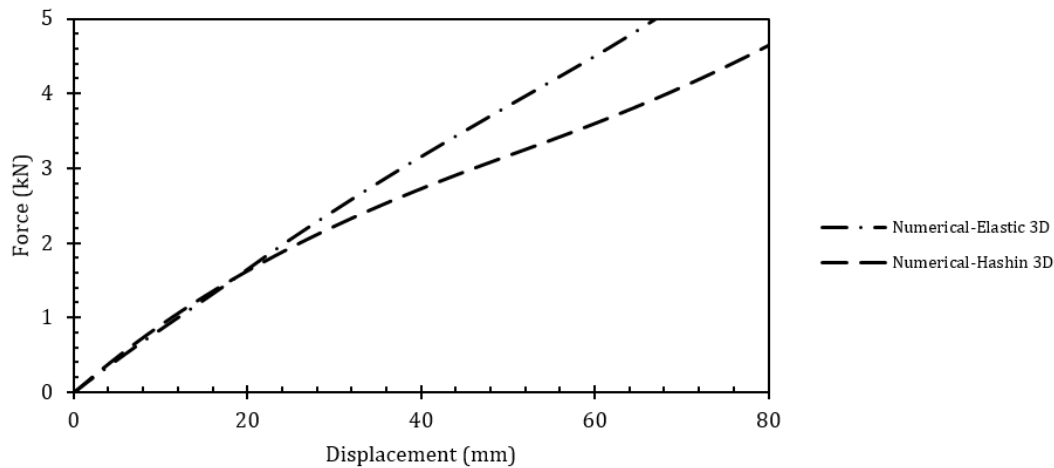
### ۳-۴- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه استوانه

در این قسمت نمودار بار-جابه‌جایی استوانه که بیانگر رفتار سازه استوانه کامپوزیتی می‌باشد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای آن که یک رفتار واحد از نتایج تجربی معرفی شود و همچنین اثر نتایج هر کدام از نمونه‌ها لحاظ گردد، میانگین عددی نمودارهای نمونه استوانه‌ها در مقایسه استفاده خواهد شد. در شکل ۲۵ نمودارهای بار-جابه‌جایی حاصل از شبیه‌سازی عددی و میانگین نتایج تجربی آورده شده است. در این نمودار میانگین نتایج شماره‌های ۲ و ۳ هم آورده شده است.

همچنان که از شکل ۲۵ نمایان است، رفتار نمودار حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارد. این نتیجه حاکی از آن است که روند شبیه‌سازی و انتخاب معیار آسیب و نحوه تعریف آن مناسب است. با دقت در نمودار شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که مقدار نیروی شکست پیش‌بینی شده توسط حل عددی بزرگتر از مقدار تجربی است. به منظور توضیح سبب این نتیجه باید دقت داشت که در نظر نگرفتن عیوب مانند عیوب هندسی، عیوب ساختاری و... همچنین عدم لحاظ پدیده‌هایی مانند جدایش بین لایه‌ای در روند مدل‌سازی منجر به آن می‌شود که سفتی سازه در مدل‌سازی عددی نسبت به آنچه در عمل سازه از خود نشان می‌دهد، بیشتر شود. به همین جهت نیرویی که سازه در جابه‌جایی مشخصی می‌تواند تحمل کند در نتایج عددی از نتایج تجربی مقدار بزرگ‌تری خواهد داشت.



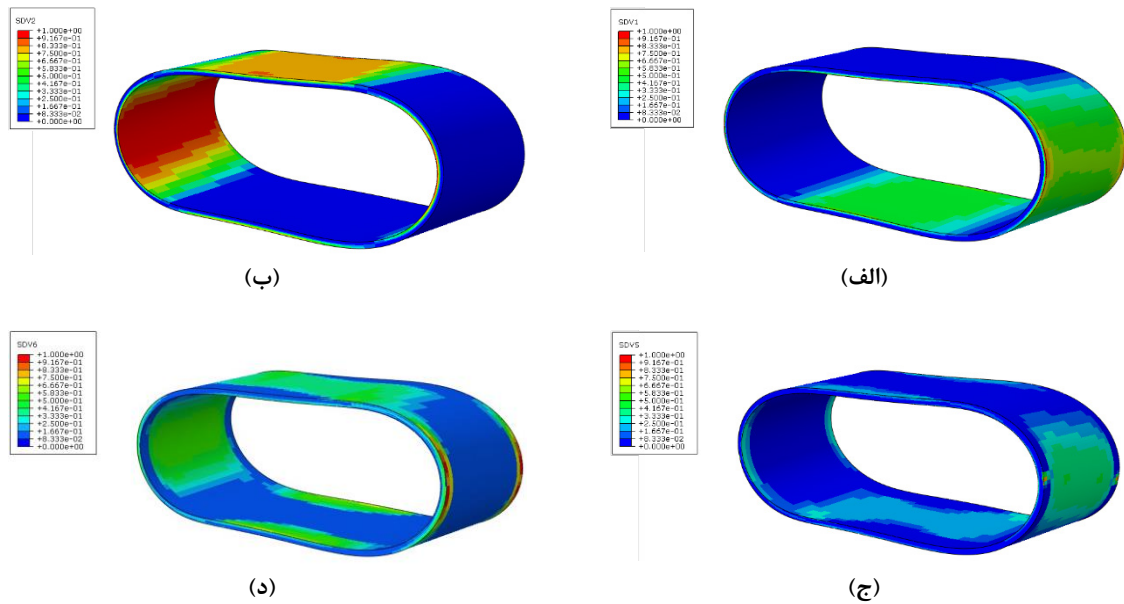
شکل ۲۶: نمودار بار-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی عددی با لحاظ تأثیر آسیب و بدون لحاظ تأثیر آسیب و میانگین نتایج تجربی  
**Fig. 26: The load-displacement diagram resulting from numerical simulation with regard to the effect of damage without regard to the effect of damage and the average experimental results**



شکل ۲۷: نمودار بار-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی عددی با لحاظ تأثیر آسیب و بدون لحاظ تأثیر آسیب  
**Fig. 27: Load-displacement diagram resulting from numerical simulation with regard to the effect of damage and without regard to the effect of damage**

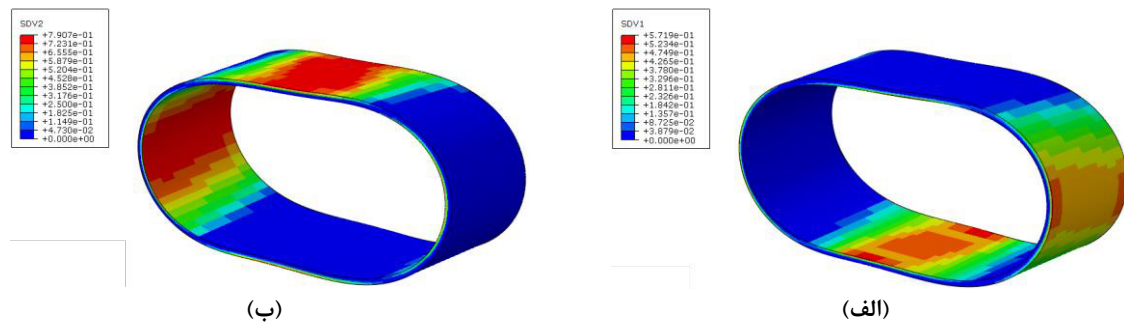
از حل عددی، نمودارهای بار-جاب‌جایی نمونه استوانه در حالتی که بدون لحاظ اثر آسیب تحلیل شده است در نمودار شکل ۲۶ آورده شده است. همان‌طوری که از شکل ۲۶ مشخص است در تحلیلی که اثرات شروع و گسترش آسیب لحاظ نشده است، مقدار نیروی تحملی نمونه استوانه با افزایش اندازه جابه‌جایی صفحه صلب بالایی افزایش می‌یابد. روند افزایشی این نمودار محدودیتی را نشان نمی‌دهد. با مقایسه نمودار تحلیل عددی با لحاظ تأثیر آسیب و بدون لحاظ تأثیر آسیب می‌توان قسمتی از نمودار که مقدار آسیب در رفتار سازه اثر نداشته را مشاهده کرد. به منظور دقیق‌تر شدن در نمودار شکل ۲۶، نمودارهای مربوط به تحلیل عددی با لحاظ تأثیر آسیب و بدون

روش عددی با نتایج تجربی آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که درصد اختلاف نیروی شکست مابین نتایج تجربی و عددی با در نظر گرفتن نتیجه نمونه شماره ۱، دو برابر شده است. در عین حال بدون لحاظ نمودار نمونه شماره ۱ درصد اختلاف جابه‌جایی شکست با میانگین نمونه شماره ۲ و ۳ نسبت به میانگین کل نمونه‌ها بیشتر می‌شود. این از آن جهت است که نمونه شماره ۱ در جابه‌جایی کوچک‌تری نسبت به دو نمونه دیگر دچار شکست می‌شود. البته تفاوت مابین درصد اختلاف در جابه‌جایی شکست در دو حالت مقایسه‌ای با یکدیگر مقدار کوچکی است. به منظور بررسی تأثیر در نظر گرفتن معیار آسیب بر نتایج حاصل



شکل ۲۸: توزیع پارامترهای آسیب در استوانه (الف) آسیب الیاف در کشش (ب) آسیب الیاف در فشار (ج) آسیب ماتریس در کشش (د) آسیب ماتریس در فشار

Fig. 28: Distribution of damage parameters in the cylinder (a) Strength of the fibers in the stretch (b) Strength of the fibers in the pressure (c) Damage of the stretch matrix (d) Damage of the matrix at the pressure



شکل ۲۹: مقایسه‌ی توزیع و اندازه پارامترهای آسیب در کشش و فشار در الیاف در جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر (الف) آسیب الیاف در کشش (ب) آسیب الیاف در فشار

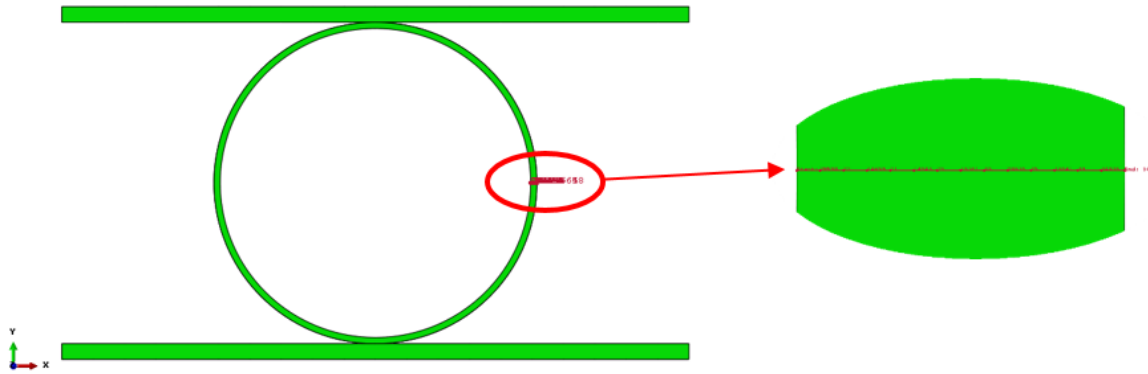
Fig. 29: Comparison of the distribution and size of damage parameters in elasticity and pressure in the fibers in a displacement of 80 mm (a) Stiffness damage of the fibers (b) Fiber damage at pressure

#### ۴-۴- بررسی توزیع پارامترهای آسیب در نمونه استوانه

چهار حالت آسیب در معیار هاشین سه‌بعدی تعریف شده است. این حالت‌ها شامل آسیب الیاف در کشش، آسیب الیاف در فشار، آسیب ماتریس در کشش و آسیب ماتریس در فشار می‌باشد. در شکل ۲۸ تصاویر مربوط به توزیع آسیب در چهار حالت مذکور در زمانی که استوانه حداکثر بارگذاری را تحمل می‌کند، آورده شده است. به جهت آن که چگونگی توزیع پارامترهای آسیب بهتر نمایان باشد، در تصاویر شکل ۲۸ صفحه‌های صلب نشان داده نشده است.

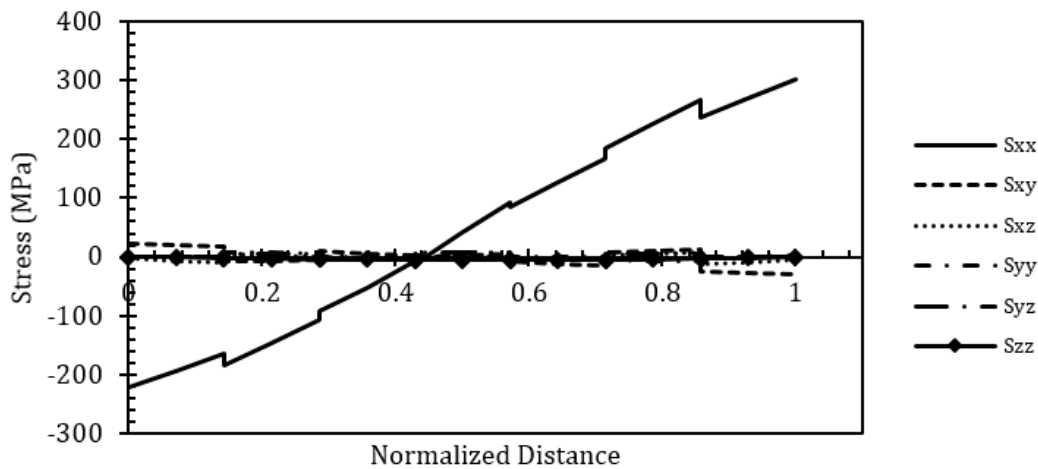
در شکل ۲۸، نام‌های SDV1، SDV2، SDV5، SDV6 و SDV6 به ترتیب نشان‌دهنده آسیب الیاف در کشش، آسیب الیاف در فشار،

لحاظ تأثیر آسیب به صورت جداگانه در نمودار شکل ۲۷ با اندازه محور عمودی و افقی محدود نمایش داده شده است. با دقت در نمودار شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی مقدار ۲۲ میلی‌متر نمودار هر دو حل بر روی یکدیگر منطبق هستند. یعنی اثرات آسیب که در معیار آسیب لحاظ شده است، همان‌طور که از فیزیک مسئله انتظار می‌رود تأثیری نگذاشته است. پس از این مقدار جابه‌جایی، به تدریج با افزایش بار اعمالی، اختلاف رفتار سازه استوانه کامپوزیتی از حالت ایده‌آل بدون در نظر گرفتن آسیب، رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند. بعد از این مقدار رفتار غیرخطی شروع می‌شود. مشابه چنین رفتاری در نمودار حاصل از نتایج تجربی نیز قابل مشاهده است.



شکل ۳۰: موقعیت هندسی مسیر انتخابی برای استخراج مؤلفه‌های تنش

Fig. 30: Geometric position of the selected path for extraction of stress components



شکل ۳۱: نمودار توزیع مؤلفه‌های تنش در لبه خارجی در جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر

Fig. 31: Distribution diagram of stress components at the outer edge at a displacement of 50 mm

آسیب را متحمل می‌شوند. همچنین سطوح خارجی استوانه در کمان‌های ۱ و ۳ دچار این حالت از آسیب شده‌اند. این نتایج نیز با توجه به تفسیری که از تغییر شکل سازه هندسه برداشت می‌شد، مطابقت دارد. مشابه همین موارد برای تصویرهای قسمت (ج) و (د) صادق است. البته تصویرهای (ج) و (د) آسیب در ماتریس را در کشش و فشار نشان می‌دهد.

البته شایان ذکر است که تمامی حالت‌های نشان داده شده در شکل ۲۸ برای یک وضعیت بوده و به منظور درک عمیق و راحت و همچنین شناخت دقیق از سهم هر کدام از حالت‌های مختلف آسیب تعریف شده در آسیب کلی استوانه به تفکیک توزیع مربوط به هر کدام به صورت جداگانه آورده شده است. به منظور بررسی آن که کدام از حالت‌های آسیب در کشش و فشار در الیاف سریع‌تر اتفاق می‌افتد و در روند رشد آسیب مؤثرتر است، مقایسه‌ای بین توزیع و اندازه مرتبط با آن در جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر صفحه صلب بالایی، انجام می‌گیرد.

آسیب ماتریس در کشش و آسیب ماتریس در فشار می‌باشد. در ادامه به منظور نام بردن مناسب موقعیت‌های هندسی مختلف از نام‌گذاری شکل ۱۱ استفاده شده است. وضعیت توزیع نشان داده شده در واقع بیانگر حالت‌های مختلفی است که در سازه استوانه اتفاق می‌افتد. با توجه به قسمت (الف) شکل ۲۸، همان‌طور که بر اساس هندسه تغییر شکل سازه انتظار می‌رفت، سطوح داخلی کمان‌های شماره ۱ و ۳ و سطوح خارجی کمان‌های ۲ و ۴ تحت کشش قرار می‌گیرند. مطابق شکل این مود آسیب در قسمت‌های مثلثی شکل لبه‌های داخلی و خارجی و در راستای جهت‌گیری الیاف واصل مابین آن‌ها بیشترین مقدار را دارد. از روی توزیع نشان داده شده این قسمت دچار آسیب بیشتر و شکست می‌شود. این نتیجه با نتایج مشاهده شده در آزمایش تجربی موافقت دارد.

در قسمت (ب) توزیع آسیب الیاف در فشار بیانگر آن است که قسمت‌های میانی کمان‌های ۲ و ۴ از سطح داخلی استوانه بیشتری

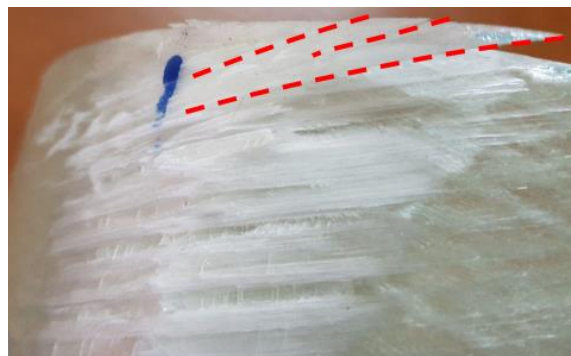
XX بعد از ۰/۴۳ اندازه ضخامت مقداری مثبت است. مثبت بودن نمودار بیانگر کششی بودن این مؤلفه تنش است. در صورتی که در قسمت میانی سمت سطح داخلی این مؤلفه فشاری است. بنابراین تنش کششی در سطح خارجی جدایش بین لایه‌ای را موجب خواهد شد. همچنین به خاطر فشاری بودن مؤلفه تنش مذکور در قسمت میانی سمت داخلی نه تنها باعث جدایش نخواهد شد بلکه از ایجاد آن هم جلوگیری خواهد کرد.

علاوه بر تأثیر مؤلفه‌های تنش مختلف بر جدایش بین لایه‌ای، کیفیت ساخت نیز تأثیرگذار است. عواملی مانند مقدار رزین جذب شده توسط الیاف، نحوه و نظم قرارگیری الیاف در کنار یکدیگر، عدم وجود حفره‌های کوچک در ماده و وجود رزین مناسب مابین لایه‌ها تأثیر مستقیمی بر زمان شروع جدایش و میزان گسترش آن را دارند. نکته قابل توجه این‌که علاوه بر جدایش بین لایه‌ای، جدایش بین رشته الیاف در یک دسته الیاف نیز ممکن است اتفاق افتد. نمونه‌ای از جدایش بین رشته‌ای در شکل ۳۲ نشان داده شده است. به منظور تشخیص بهتر، جدایش بین رشته‌ای با خطوط خط‌چین مشخص شده است. این مکانیزم از آسیب به علت آن‌که در فرآیند ساخت رشته الیاف به صورت موازی در یک دسته الیاف بدون قیدی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، امکان ایجاد آن به وجود می‌آید.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار سازه استوانه کامپوزیتی رشته‌پیچی شده با تعیین محدوده رفتار خطی و غیرخطی آن و همچنین چگونگی شروع و رشد مکانیزم‌های به وجود آمده آسیب در طی بارگذاری در استوانه‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده تحت بارگذاری فشار جانبی بین صفحه‌های صلب موازی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مدل‌سازی عددی مناسبی با استفاده از روش المان محدود برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی این نوع سازه با لحاظ اثرات آسیب به صورت شبیه‌سازی سه‌بعدی ارائه گردید.

با توجه به بررسی نتایج حاصل از دو روش عددی و تجربی، مشخص است که شبیه‌سازی انجام شده روشی مناسب برای بررسی رفتار استوانه کامپوزیتی می‌باشد. خطای حاصل از روش عددی کم‌تر از ۲۳ درصد حاصل شد. با توجه به عیوبی که در حین ساخت به وجود می‌آید و فرض‌های ایده‌آلی که در حین بارگذاری و اعمال شرایط



شکل ۳۲: جدایش بین رشته‌ای در دسته الیاف در سطح خارجی استوانه  
**Fig. 32: Separation between filaments in the bundle of fibers on the outer cylindrical surface**

در شکل ۲۹ توزیع پارامترهای آسیب الیاف در کشش و آسیب الیاف در فشار به نمایش درآمده است.

با دقت در مقادیر حداکثر هر کدام از پارامترهای آسیب نشان داده شده در شکل ۳۰ مشخص است که اندازه پارامتر آسیب الیاف در فشار در این وضعیت بارگذاری مقدار بیشتری از پارامتر آسیب الیاف در کشش دارد. این نتیجه با توجه به بارگذاری و تفسیری که از هندسه تغییر شکل شد، کاملاً موافقت دارد. با توجه به تصاویر شکل ۳۰ نتیجه می‌شود که رشد آسیب از سطح داخلی نسبت به سطح خارجی سریع‌تر صورت گرفته و سطح داخلی کمان ۲ و ۴ در طی بارگذاری موقعیت بحرانی دارند. در ادامه در مورد عوامل تأثیرگذار بر جدایش بین لایه‌ای اتفاق افتاده در سطح خارجی استوانه بحث خواهد شد.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر جدایش بین لایه‌ای در سطح خارجی، تنش برشی بین لایه‌ای ایجاد شده است. البته این تنها علت به وجود آمدن جدایش بین لایه‌ای نیست. بلکه توزیع تنش‌های نرمال نیز مؤثر هستند. این تنش‌ها نیز به اتفاق افتادن جدایش بین لایه‌ای کمک می‌کنند. مسیر تعریف شده برای استخراج مؤلفه‌های تنش در راستای ضخامت دقیقاً در وسط کمان ۲ از سطح داخل به سمت سطح خارج استوانه در لبه خارجی آن است. موقعیت هندسی مسیر انتخابی در شکل ۳۰ نشان داده شده است. مقادیر مؤلفه‌های تنش هنگامی که صفحه صلب بالایی ۵۰ میلی‌متر جابه‌جا شده، استخراج شده است.

در شکل ۳۱ نمودار مربوط به توزیع تمامی مؤلفه‌های تنش آمده است. با توجه به نمودار، بین مؤلفه‌های تنش، تنش نرمال XX در این مسیر بیشترین مقدار بین مؤلفه‌های تنش را دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این مؤلفه تنش بیشترین تأثیر را در جدایش بین لایه‌ای در سطح خارجی دارد. با توجه به نمودار مؤلفه‌ی تنش نرمال

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$C$  درایه‌ی ماتریس سفتی بعد از شروع آسیب،  $N/m^2$

$C^0$  درایه‌ی ماتریس سفتی قبل از شروع آسیب،  $N/m^2$

$d$  مؤلفه‌ی آسیب

$E$  مدول یانگ،  $N/m^2$

$G$  مدول برشی،  $N/m^2$

$\underline{d}$  نسبت قطر الیاف به فاصله‌ی آن‌ها از هم در آرایش مربعی

$\delta$  ضریب کنترل سفتی برشی

$X$  استحکام،  $N/m^2$

$Y$  استحکام،  $N/m^2$

$V$  استحکام،  $N/m^2$

#### علائم یونانی

$\rho$  چگالی،  $kg/m^3$

$\sigma$  تنش،  $N/m^2$

$\epsilon$  کرنش

$\nu$  ضریب پواسون

$\pi$  عدد پی

$\xi$  ضریب هندسه‌ی تقویت‌کننده

$\eta$  ضریب کاهش‌دهنده‌ی کسر حجمی الیاف

$\gamma$  کرنش برشی

$\Delta$  ثابت برحسب ضرایب پواسون

#### زیرنویس

$f$  الیاف

$m$  ماتریس

$ft$  کششی الیاف

$fc$  فشاری الیاف

$mt$  کششی ماتریس

$mc$  فشاری ماتریس

1 جهت محور  $x$ ، در راستای الیاف

2 جهت محور  $y$ ، در راستای عمود بر الیاف (درون صفحه‌ای)

3 جهت محور  $z$ ، در راستای عمود بر الیاف (خارج صفحه‌ای)

#### بالانویس

\* ارجاع به مرجع

\*\* ارجاع به مرجع

# ارجاع به مرجع

مرزی در شبیه‌سازی عددی اعمال می‌گردد، مناسب است. در نتیجه می‌توان بیان داشت مدل معیار هاشین سه‌بعدی با روابط مربوط به تأثیر پارامترهای آسیب بر ماتریس سفتی، می‌تواند معیار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار استوانه‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی شده تحت شرایط بارگذاری فشاری جانبی در بارگذاری‌های استاتیکی و شبه استاتیکی باشد.

مکانیزم‌های آسیب مؤثر در مسئله مورد بررسی به ترتیب اولویت شامل شکست الیاف، ترک ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای است.

آسیب در طی بارگذاری از سطح داخلی استوانه شروع شده و با افزایش مقدار بارگذاری، آسیب در راستای ضخامت از سطح داخلی به سمت سطح خارجی استوانه افزایش می‌یابد.

در شرایطی که استوانه کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری بین دو صفحه صلب موازی قرار می‌گیرد، هر دو شکل آسیب الیاف در کشش و الیاف در فشار در رسیدن استوانه به نیروی شکست مؤثر می‌باشند. البته آسیب ناشی از فشار، سریع‌تر از آسیب ناشی از کشش، توسعه و افزایش می‌یابد.

میزان نیروی شکست میانگین هر سه نمونه لوله مورد آزمایش ۶/۰۳ کیلونیوتن است.

طبق نتایج آزمایش تجربی، در جابه‌جایی ۳۵ درصدی قطر اولیه استوانه، آسیب در استوانه از سطح داخلی آن با ایجاد ترک‌هایی در زمینه استوانه کامپوزیتی شروع می‌شود.

با درنظر داشتن توافق مناسب نتایج تجربی و عددی با یکدیگر، در پایان می‌توان چنین اظهار داشت که با توجه به نمودار مقایسه‌ای نیرو-جابه‌جایی با درنظر گرفتن و بدون لحاظ تأثیر آسیب در مدل‌سازی عددی، استوانه کامپوزیتی رشته‌پیچی شده تحت بارگذاری فشار جانبی عرضی، تا جابه‌جایی ۱۱ درصدی قطر اولیه استوانه، رفتار خطی داشته و پس از آن رفتار غیرخطی خواهد داشت.

### تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم و مدیر فنی و تمامی عوامل شرکت دیبا فایبرگلاس به خاطر همکاری در ساخت نمونه استوانه‌های کامپوزیتی کمال قدردانی و تشکر می‌شود.



- fiber/vinyl-ester matrix reinforced composite pipes, *Composite Structures*, Vol. 79, pp. 270-279, 2007.
- [11] H.. Arikan, Failure analysis of ( $\pm 55$ ) 3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 182-187, 2010.
- [12] S. Bhavya, P.R. Kumar, S. Kalam, Failure analysis of a composite cylinder, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 3, pp. 01-07, 2012.
- [13] V. Gunasegaran, R. Prashanth, M. Narayanan, Experimental investigation and finite element analysis of filament wound GRP pipes for underground applications, *Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 1293-1301, 2013.
- [14] R. Rafiee, Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, pp. 257-267, 2013.
- [15] R. Rafiee, F. Reshadi, Simulation of functional failure in GRP mortar pipes, *Composite Structures*, Vol. 113, pp. 155-163, 2014.
- [16] R. Rafiee, A. Amini, Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes, *Computational Materials Science*, Vol. 96, pp. 579-588, 2015.
- [17] R. Rafiee, F. Reshadi, S. Eidi, Stochastic analysis of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes, *Materials & Design*, Vol. 67, pp. 422-427, 2015.
- [18] R. Rafiee, B. Mazhari, Simulation of the long-term hydrostatic tests on Glass Fiber Reinforced Plastic pipes, *Composite Structures*, Vol. 136, pp. 56-63, 2016.
- [19] T. Üstün, H. Ulus, S.E. Karabulut, V. Eskizeybek, Ö.S. Şahin, A. Avcı, O.J. Demir, Evaluating the effectiveness of nanofillers in filament wound carbon/epoxy multiscale composite pipes, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 96, pp. 1-6, 2016.
- [20] L.A. Martins, F.L. Bastian, T.A. Netto, Structural and functional failure pressure of filament wound
- [1] D. Hull, M. Legg, B. Spencer, Failure of glass/polyester filament wound pipe, *Composites*, Vol. 9, pp. 17-24, 1978.
- [2] B. Spencer, D. Hull, Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe, *Composites*, Vol. 9, pp. 263-271, 1978.
- [3] P.D. Soden, D. Leadbetter, P.R. Griggs, G.C. Eckold, The strength of a filament wound composite under biaxial loading, *Composites*, Vol. 9, pp. 247-250, 1978.
- [4] P.D. Soden, R.Kitching, P.C. Tse, Y.Tsavalas, M.J.Hinton, Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads, *Composites Science and Technology*, Vol. 46, pp. 363-378, 1993.
- [5] M.W.K. Rosenow, Wind angle effects in glass fibre-reinforced polyester filament wound pipes, *Composites*, Vol. 15, pp. 144-152, 1984.
- [6] J. Highton, A. Adeoye, P.D. Soden, Fracture stresses for  $\pm 75$  degree filament wound grp tubes under biaxial loads, Vol. 20, pp. 139-150, 1985.
- [7] J. Bai, P. Seeleuthner, P. Bompard, Mechanical behaviour of  $\pm 55^\circ$  filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: I. Microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanisms of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading, Vol. 57, pp. 141-153, 1997.
- [8] J. Bai, G. Hu, P. Bompard, Mechanical behaviour of  $\pm 55^\circ$  filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: II. Micromechanical model of damage initiation and the competition between different mechanisms, Vol. 57, pp. 155-164, 1997.
- [9] 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*, Vol. 33, pp. 1615-1622, 2002.
- [10] E. Buarque, J.R.M. d'Almeida, The effect of cylindrical defects on the tensile strength of glass

- design, CRC press, 2017.
- [27] A.C. Ural, Stresses in beams, plates, and shells, CRC Press, 2009.
- [28] D. Motamedi, S. Mohammadi, Fracture analysis of composites by time independent moving-crack orthotropic XFEM, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 54, pp. 20-37, 2012.
- [29] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fiber composites, Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, pp. 329-334, 1980.
- [30] J. Pederson, Finite element analysis of carbon fiber composite ripping using ABAQUS, Clemson University, USA, 2008.
- [31] H.R. Mahdavi, Analysis of behavior of composite pipes under internal cyclic pressure and external pressure, Tarbiat Modares University, Iran, 2015.(In Persian)
- [32] ABAQUS 6.14 Documentation, 2014.
- composite tubes, Materials & Design, Vol. 36, pp.779-787, 2012.
- [21] S. Dolati, J. Rezaeepazhand, A Numerical study of failure modes of a composite plate subjected to hail ice impact, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, pp. 77-86, 2018. (In Persian)
- [22] R.F. Gibson, Principles of composite material mechanics, CRC press, 2011.
- [23] F.T. Wallenberger, P. Bingham, Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications, Springer, 2010.
- [24] R.M. Jones, Mechanics of composite materials, CRC press, 1975.
- [25] J.H. Affdl, J. Kardos, The Halpin-Tsai equations: a review, Polymer Engineering and Science, Vol. 16, pp. 344-352, 1976.
- [26] E.J. Barbero, Introduction to composite materials