مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲-۳۷، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۲۵-۱۳۴، (یادداشت فنی)

Research Note

تحقیق آزمایشگاهی و عددی رفتارکمانشی و گسیختگی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با الیاف سوزنی تحت اثر بار فشار محوری

رباب ناصری قلقاچی * **(دانشجوی دکتری سازه)**
حسین شوکتی (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

پوسته‌های کامپوزیتی با توجه به خواص مکانیکی جذاب آنها، در صنایع مختلف هوا و فضا، انتقال نفت و گاز و مخازن نگهداری مایعات کاربرد فراوانی دارند. در این تحقیق رفتار پوسته‌های استوانه‌یی تقویت شده با الیاف شیشه‌ی سوزنی تحت بار فشار محوری به صورت تجربی و عددی بررسی شده است و مقدار بار بحرانی و حالت خرابی تعیین شده است. برای روش عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده و تحلیل غیرخطی ریکس با در نظرگرفتن ناکاملی‌های هندسی و تکیه‌گاهی انجام شده است؛ همچنین نسبت L/R در این پوسته‌ها ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که مود خرابی در این پوسته‌ها به دلیل ضخیم بودن جدار پوسته از نوع خرابی مواد و بیشتر به صورت آسیب ماتریس در فشار بوده است و با افزایش ارتفاع سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد ولی تقریباً بار خرابی در نمونه‌ها یکسان است و در مدل‌های عددی با افزایش نسبت شعاع به ضخامت بار خرابی تقلیل می‌یابد. از طرفی انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.

واژگان کلیدی: بار بحرانی فشاری، الیاف شیشه‌ی سوزنی، تحلیل ریکس، مود خرابی.

r.naseri@urmia.ac.ir
h.showkati@urmia.ac.ir

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی تحقیقات

سازه‌های پوسته‌یی از جمله سازه‌های پرکاربرد در صنایع مختلف مهندسی از قبیل مهندسی عمران محسوب می‌شوند. در سال‌های اخیر، تحقیق برروی سازه‌های پوسته‌یی و تانکرهای عمودی که به منظور ذخیره‌ی نفت و سایر مواد سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند، افزایش یافته است. سازه‌های پوسته‌یی تحت برخی از حالت‌های بارگذاری در معرض خرابی و کمانش قرار می‌گیرند و مطالعه در مورد خرابی و کمانش این سازه‌ها اهمیت بسیاری دارد. پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی به دلیل سختی و مقاومت به وزن بالا، جایگزین مناسبی برای پوسته‌های فولادی‌اند.

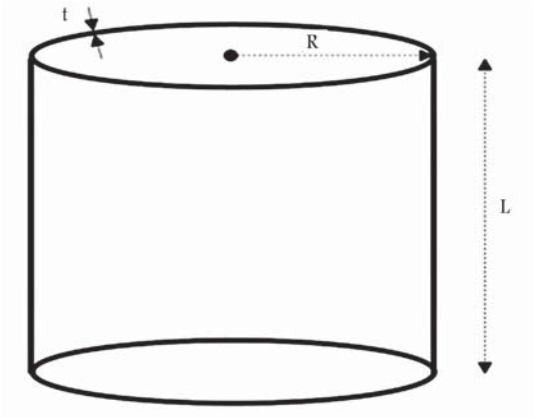
موضوع کمانش و خرابی پوسته‌های کامپوزیتی چندلایه در مقایسه با پوسته‌های ایزوتروپیک تاریخچه‌ی نسبتاً کوتاهی دارد. با وجود این، در طی این مدت کوتاه مطالعات متعددی در مورد تحلیل و مدل‌سازی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی چندلایه انجام شده است. با این حال، نظریه‌های مورد استفاده در این تحلیل‌ها عمدتاً توسعه‌یافته‌ی مدل‌های مختلف ایزوتروپیک هستند. اخیراً به منظور طراحی بهینه‌ی پوسته‌های کامپوزیتی چندلایه، پوسته‌های استوانه‌یی کاملاً غیرایزوتروپیک مورد توجه بیشتری قرارگرفته است.[۱-۵]

بار فشار محوری در این پوسته‌ها ممکن است ناشی از شرایط بارگذاری اولیه یا وزن سازه باشد. بیشینه باری که به خرابی و کمانش پوسته‌ی استوانه‌یی کامپوزیت منجر می‌شود به عواملی از قبیل مشخصات هندسی که شامل شعاع (R)، ارتفاع (L) و ضخامت (t) پوسته، نوع بار اعمال شده مانند بار فشار محوری، بار فشار خارجی و بارهای ترکیبی، شرایط مرزی، ناکاملی اولیه، تعداد لایه‌ها و نیز زاویه‌ی الیاف با محور x بستگی دارد (شکل ۱).[۶]

در سال ۱۹۷۰، خوت[۱][۷] روشی برای رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی چندلایه با در نظرگرفتن ناکاملی اولیه ارائه داد؛ او نتیجه گرفت که تأثیر ناکاملی اولیه در کمانش پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی کمتر از پوسته‌های ایزوتروپیک است. تنیسون و ماگریج[۲][۸] در سال ۱۹۷۳، یک روش طراحی جدید برای تخمین محافظه‌کارانه‌ی مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی تحت بار فشار محوری ارائه دادند. آنها ۱۴ نمونه پوسته‌ی استوانه‌یی کامپوزیتی چندلایه را با ناکاملی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بین نتایج نظری و آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی وجود دارد.

در سال ۱۹۹۸، القاضولی و همکاران[۳][۹] بارکمانشی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با الیاف حصیری شیشه‌یی را در آزمایشگاه تحت بار فشار محوری به دست آوردند و نشان دادند که در این پوسته‌ها مقدار بار بحرانی تجربی حدود

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۶/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۹
DOI:10.24200/J30.2021.56479.2833



شکل ۱. هندسه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی کامپوزیتی.

۷۵٪ بار نظری است و مقاومت کمانشی در آنها بستگی به زوایای الیاف دارد. بیسگانی[۴] [۱۰ و ۱۱] به روش تجربی، عددی و نظری بارکمانش پوسته‌های استوانه‌یی تقویت شده با الیاف کربن تحت بار فشار محوری را با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی و ترتیب لایه‌گذاری به دست آورد و نشان داد که تأثیر ناکاملی هندسی برروی بارکمانشی بستگی به ترتیب لایه‌گذاری دارد.

اسمردو[۵] [۱۲] در سال ۲۰۰۰ یک روش محاسباتی برای فرمول‌بندی بهینه‌ی مسائل بهینه‌سازی بر روی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی چندلایه تحت بار فشار محوری انجام داد و به این نتیجه رسید که برای موارد کاربردی، افزایش تعداد لایه‌ها بیش از چهار لایه (با زوایای مختلف) و همچنین تعداد پارامترها بیش از دو بی‌فایده است. در سال ۲۰۰۴ تفرشی[۶] [۱۳] یک مدل عددی برای تخمین بارکمانشی و پس‌کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با ناکاملی تحت بار فشار محوری ارائه داد. در سال ۲۰۱۲ پریادارسینی و همکاران[۷] [۱۴] رفتار پوسته‌های کامپوزیتی با الیاف کربن را تحت بار فشار محوری به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار بار بحرانی به نوع بارگذاری (استاتیکی و دینامیکی)، ناکاملی، نسبت شعاع به ضخامت بستگی دارد. ونکاتا و همکاران[۸] [۱۵] در سال ۲۰۱۳، بارکمانشی ۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی کاملاً مشابه را تحت بار فشار محوری به دست آوردند و با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ANSYS مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج آزمایشگاهی در صورتی که ناکاملی هندسی در نرم‌افزار ANSYS اعمال شود با نتایج عددی انطباق خوبی دارد. در سال ۲۰۱۵ شهرجردی و بهرامی[۹] [۱۶] مطالعه‌ی عددی بر روی رفتار پوسته‌های استوانه‌یی با الیاف کربن را تحت بار فشار محوری انجام و نشان دادند که بار کمانشی به ناکاملی، ترتیب لایه‌گذاری، و نسبت شعاع به ضخامت بستگی دارد. شیلو و همکاران[۱۰] [۱۷] در سال ۲۰۱۵ رفتار پوسته‌های کامپوزیتی با الیاف کربن را تحت بار فشار محوری در آزمایشگاه و به صورت عددی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تأثیر ناکاملی خروج از مرکزیت بار بر روی بارکمانشی بیشتر از ناکاملی هندسی است. کلمیدا و همکاران[۱۱] [۱۸] در سال ۲۰۱۸ رفتار لوله‌های کامپوزیتی با الیاف کربن را تحت بار فشار محوری بررسی کردند و نشان دادند که لوله‌های نازک‌تر تحت کمانش و لوله‌های ضخیم‌تر به صورت تخریب مواد خراب می‌شوند.

در سال ۲۰۱۸ شاهقلیان و همکاران[۱۹] بارکمانشی پوسته‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه را تحت بار فشار محوری به صورت تجربی و روش عددی همبستگی با ارتعاشات به دست آوردند. آنها ۵ نمونه کاملاً مشابه و با زاویه‌ی پیچشی ۷۲± را

شکل ۲. نمونه‌های آزمایشگاهی.

بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش عددی همبستگی با ارتعاشات بهترین روش پیش‌بینی بار بحرانی است.

با بررسی مطالعات پیشین می‌توان پی برد که تاکنون تحقیقی در مورد رفتار پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با الیاف سوزنی تحت بار فشار محوری انجام نگرفته است؛ از طرفی امروزه این پوسته‌ها در صنعت به دلیل اقتصادی بودن، خواص اجرایی عالی و تقویت بالا به دلیل قرارگیری الیاف در جهات مختلف کاربرد فراوانی دارند. بنابراین در این پژوهش، تعیین بار بحرانی و خرابی پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با الیاف سوزنی تحت بار فشار محوری در آزمایشگاه به عنوان معیاری برای طراحی، مدل‌سازی دقیق رفتار الیاف، تعیین مود خرابی نمونه‌ها، تأثیر ارتفاع و ضخامت بر روی بار خرابی، ارزیابی آسیب در الیاف و ماتریس و مقایسه‌ی نتایج تجربی با روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. بررسی تجربی

۱.۲. ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها از الیاف شیشه‌ی سوزنی و رزین اپوکسی به همراه مواد افزودنی از قبیل کبالت و متیل‌اتیل‌کتون‌پراکساید استفاده شد. این اپوکسی با ترکیب پلیمر زمینه‌ی CY۲۱۹ و سخت‌کننده‌ی HY۵۱۶۱ به دلیل استحکام بالای آن و در دسترس بودن به کار گرفته شد. الیاف مورد استفاده از جنس شیشه‌ی E و درصد حجمی الیاف برابر ۲۰ درصد بود. از آنجایی‌که مشخصات هندسی نمونه‌ها و جهت‌گیری الیاف در تمام نمونه‌ها یکسان بود، لوله‌ی استوانه‌یی با طول چندبرابر نمونه‌های استوانه‌یی با روش لایه‌چینی دستی ولی به صورت خودکار توسط شرکت فراسان ساخته شد و سپس تعداد ۳ نمونه استخراج شد (شکل ۲) در این روش الیاف دور یک لوله‌ی فولادی قالب[۱۲] پیچیده و با رزین آغشته می‌شوند و با توجه به تعداد لایه‌ها این فرایند ادامه می‌یابد؛ سپس لوله به چرخش درمی‌آید تا رزین به صورت یکنواخت پخش شود. در نهایت نمونه‌ی کامپوزیتی توسط دستگاه با دمایی بیش از دمای محیط پخته می‌شود. برای جداسازی لوله‌ی کامپوزیتی از لوله‌ی فولادی، در ابتدا بر روی سطح لوله‌ی فولادی واکس زده می‌شود.

مشخصات مکانیکی نمونه‌ها توسط شرکت فراسان، با استفاده از آزمایش کشش و روابط میکرومکانیک[۲۰ و ۲۱] به دست آمده و مطابق جدول ۱ ارائه شده است. هرکدام از نمونه‌ها دارای ۳ لایه است و زوایای الیاف به دلیل سوزنی بودن جهت مشخصی ندارند، قطر داخلی نمونه‌های استوانه‌یی برابر ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت آنها برابر ۲/۴ میلی‌متر است که نسبت قطر داخلی به ضخامت نمونه‌ها برابر ۸۳

جدول ۱. مشخصات مکانیکی پوسته‌ها.[۲۰]

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته $Gpa(E_{11})$	۷/۰۰
مدول الاستیسیته $Gpa(E_{22})$	۷/۰۰
مدول برشی $Gpa(E_{12})$	۰/۹۶
ضریب پواسون	۰/۲۶
مقاومت کششی MPa	۷۲
مقاومت فشاری MPa	۸۵
مقاومت برشی MPa	۱۲

جدول ۲. مشخصات هندسی پوسته‌ها.

نمونه	قطر داخلی (mm)	طول (mm)	ضخامت هر لایه (mm)	تعداد لایه	زاویه‌ی الیاف
SG ۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰/۸	۳	آرایش خاصی ندارند
SG ۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۰/۸	۳	آرایش خاصی ندارند
SG ۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۸	۳	آرایش خاصی ندارند

و نسبت ارتفاع به شعاع برابر ۱، ۱/۵ و ۲ است (جدول ۲). در نام‌گذاری نمونه‌ها SG نشان‌دهنده‌ی پوسته‌ی استوانه‌ی کامپوزیتی با الیاف شیشه است و عدد بیان‌گر ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر است.

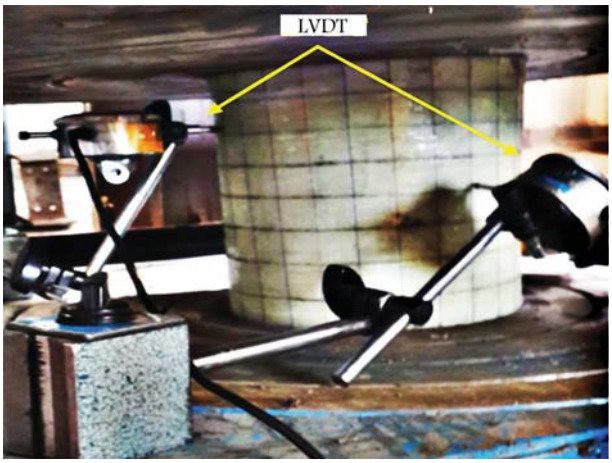
۲.۲. معرفی سیستم بارگذاری

بارگذاری مورد نظر در این پژوهش به صورت بار فشار محوری در لبه‌هاست. در آزمایشگاه برای اعمال بار مذکور از جک قائم هیدرولیکی به ظرفیت kN ۶۰۰ استفاده می‌شود، این جک به سیستم ستونی قائم متشکل از چهار عدد ناودانی UPE۱۸ متصل است و بار توسط این جک به پروفیلی که در زیر این جک قرار گرفته است، منتقل می‌شود. بار اعمالی به پروفیل به تکیه‌گاه‌ها که یکی ثابت و دیگری متحرک است، انتقال می‌یابد. به انتهای تکیه‌گاه متحرک یک بارسنج[۱۳] متصل هست که یک خیزسنج (LVDT) [۱۴] بر روی بارسنج نصب است و میزان جابه‌جایی را مستقیماً به رایانه منتقل می‌کند. از یک پروفیل قوطی‌شکل برای تبدیل بار متمرکز به بارگسترده در لبه‌ها استفاده می‌شود. بارگذاری قائم مربوطه به سبب واردکردن توسط جک الکتریکی دارای دقت کافی است و مقدار آن در هر مرحله به صورت کنترل تغییرشکل، تحت کنترل بود (شکل ۳).

۳.۲. طراحی تکیه‌گاه‌های مربوط به پوسته

در طراحی تکیه‌گاه‌ها سعی شد شرایطی فراهم شود که از حرکت نمونه‌ها به هنگام بارگذاری جلوگیری شود؛ بدین منظور در قسمت بالا و پایین پوسته صفحات فلزی قرار گرفت که داخل آن شیارهایی به اندازه‌ی قطر پوسته تعبیه شد که با چسب پوسته را در تکیه‌گاه‌ها محکم کرده است. یکی از تکیه‌گاه‌ها به صورت ثابت به زمین متصل است. تکیه‌گاه دیگر در راستای قائم حرکت دارد ولی از حرکت داخل صفحه جلوگیری شده است.

شکل ۳. سیستم بارگذاری به صورت کلی.



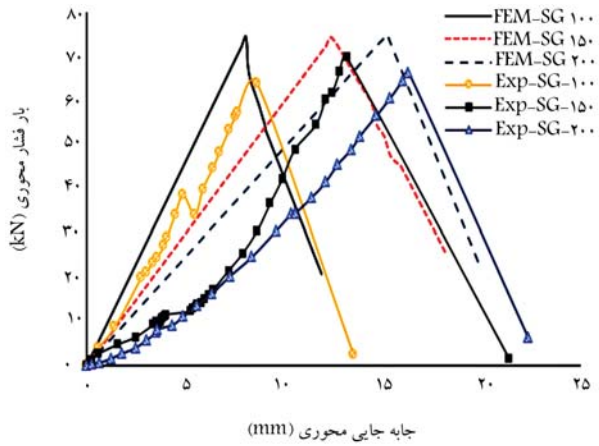
شکل ۴. نحوه‌ی نصب خیزسنج‌ها (LVDT).

۴.۲. نصب خیزسنج‌ها

برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی و تغییرشکل از چهار عدد خیزسنج استفاده شده است که سه مورد از آنها در وسط (D۲)، به فاصله‌ی ۱/۳ ارتفاع از لبه‌ی بالایی (D۳) و فاصله‌ی ۱/۳ ارتفاع از لبه‌ی پایینی (D۱) به صورت شعاعی و یکی هم به صورت قائم در بالا نصب شده است. دقت اندازه‌گیری این خیزسنج‌ها در حد یک‌صدم میلی‌متر است. به طوری که هر دور چرخش کامل عقربه‌ی آنها برابر یک میلی‌متر جابه‌جایی در راستای طولی است (شکل ۴).

۵.۲. رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر بارگذاری فشار محوری

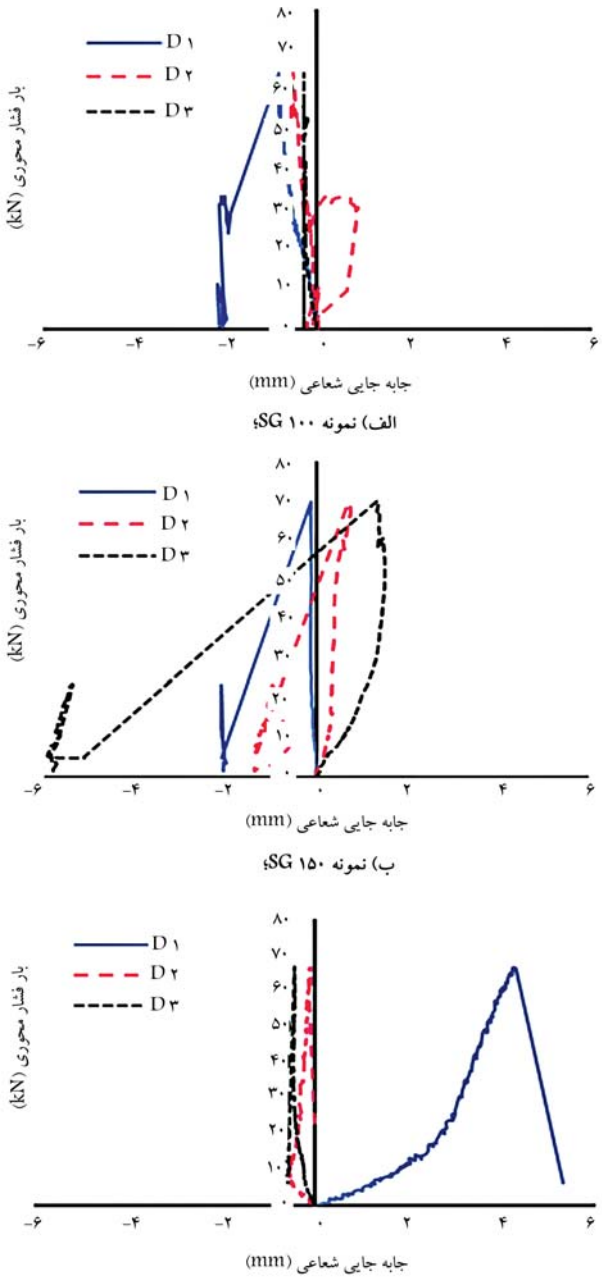
پس از آماده کردن تنظیمات مربوط به آزمایش، تمام نمونه‌ها به طور جداگانه تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند و بارگذاری تا رسیدن به خرابی نمونه‌ها ادامه پیدا کرد و در نهایت باربرداری انجام گرفت. بار فشار محوری توسط جک با سرعت ثابت به صورت کنترل جابه‌جایی اعمال شد. در طول مدت آزمایش مقدار بار در صفحه‌ی نمایش قابل کنترل بود. در شکل ۵ نمودار بار فشار محوری - جابه‌جایی محوری نمونه‌های استوانه‌یی کامپوزیتی به صورت عددی و تجربی رسم شده است.



شکل ۵. مقایسه‌ی نمودار بار فشار محوری - جابه‌جایی محوری نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت عددی و تجربی.

همان طور که در نمودار دیده می‌شود، در نمونه‌ی SG ۱۰۰ در حالت بارگذاری تجربی، در ابتدا بار فشار محوری و جابه‌جایی محوری هر دو افزایش می‌یابند؛ در بار ۳۸/۴۵ کیلونیوتن افت جزئی در بار توأم با صدای خفیف ترک‌خوردگی در هنگام آزمون اتفاق می‌افتد و بار به مقدار ۳۴/۰۳ کیلونیوتن می‌رسد که علت آن تشکیل ترک‌های مویی در داخل نمونه است. پس از آن بارگذاری تا رسیدن به بار نهایی ۶۳/۹۷ کیلونیوتن ادامه می‌یابد. در این بار نمونه با صدای شدید فروریزش می‌کند و افت ناگهانی بار اتفاق می‌افتد. ولی همچنان جابه‌جایی افزایش می‌یابد. پس از آن باربرداری انجام می‌گیرد. در نمونه‌ی SG ۱۵۰ در شروع بارگذاری، بار فشار محوری و جابه‌جایی محوری هر دو افزایش می‌یابند و در بار ۶۹/۷۸ کیلونیوتن با افت ناگهانی بار و صدای ترک‌خوردگی شدید فروریزش اتفاق می‌افتد. در نمونه‌ی SG ۲۰۰ نیز تا بار ۶۶/۴۱ کیلونیوتن بار فشار محوری و جابه‌جایی محوری هر دو افزایش می‌یابند. بلافاصله بعد از رسیدن بارگذاری به بار مذکور که بیشینه‌ی بار قابل تحمل توسط نمونه استوانه‌یی است، افت ناگهانی بار همراه با صدای ترک‌خوردگی شدید و خرابی نمونه به وجود می‌آید.

در این تحقیق همچنین جابه‌جایی شعاعی نمونه‌ها بررسی شد. در شکل ۶ نمودار بار فشار محوری - جابه‌جایی شعاعی نمونه‌های آزمایشگاهی در فواصل ۱/۳ ارتفاع از لبه‌های پایینی و بالایی و در وسط نمونه‌ها آورده شده است که توسط خیزسنج‌هایی که در این مکان‌ها قرار داده شده ثبت گردیده است. شکل ۶- الف جابه‌جایی شعاعی نمونه‌ی SG ۱۰۰ را نشان می‌دهد؛ از روی نمودار می‌توان دریافت که از همان ابتدا رفتار غیرخطی است و میزان جابه‌جایی شعاعی تا رسیدن به بیشینه‌ی بار خیلی ناچیز است که نشان‌دهنده این است که مقاومت غشایی نمونه‌ی SG ۱۰۰ قابل توجه است. بعد از رسیدن به بار ۶۳/۹۷ کیلونیوتن که بار نهایی قابل تحمل توسط نمونه است، افت ناگهانی در بار اتفاق می‌افتد ولی جابه‌جایی شعاعی همچنان افزایش می‌یابد. این افزایش در وسط نمونه در حدود ۱/۵ میلی‌متر است و به همراه تغییر جهت است که می‌تواند ناشی از تغییر مود کمانشی باشد. نکته‌ی قابل توجه اینکه در طول آزمون موج کمانشی و ترک‌خوردگی که با چشم قابل رؤیت باشد دیده نشد. شکل ۶ - ب جابه‌جایی شعاعی نمونه‌ی SG ۱۵۰ را نشان می‌دهد؛ همانند نمونه‌ی قبلی از همان ابتدا رفتار غیرخطی است و میزان جابه‌جایی شعاعی تا رسیدن به بیشینه‌ی بار خیلی ناچیز است. بعد از بار ۶۹/۷۸ کیلونیوتن که فروریزش و خرابی سازه اتفاق می‌افتد، در موقعیت ۱/۳ ارتفاع از لبه پایینی نمونه، جابه‌جایی شعاعی به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد که دلیل



الف) نمونه SG ۱۰۰؛

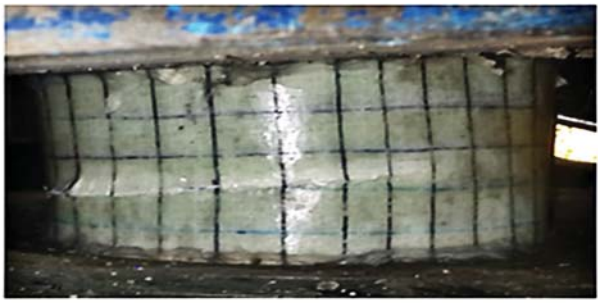
ب) نمونه SG ۱۵۰؛

ج) نمونه SG ۲۰۰.

شکل ۶. نمودار بار فشار محوری - جابه‌جایی شعاعی نمونه‌های آزمایشگاهی در وسط (D۲) و فاصله‌ی ۱/۳ ارتفاع از لبه‌ی پایینی (D۱) و لبه‌ی بالایی (D۳).

آن این است که فروریزش سازه که به صورت شکست ترد نمونه بود در نزدیکی تکیه‌گاه پایینی رخ داد. شکل ۶ - ج جابه‌جایی شعاعی نمونه‌ی SG ۲۰۰ را نشان می‌دهد. همانند نمونه‌های قبلی از همان ابتدا رفتار غیرخطی است و میزان جابه‌جایی شعاعی تا رسیدن به بیشینه‌ی بار به جز در موقعیت ۱/۳ ارتفاع از لبه بالایی، خیلی ناچیز است، در این موقعیت تغییر شکل شعاعی زیاد به همراه سخت‌شدگی دیده می‌شود.

شکل ۷ نمونه‌های مورد آزمایش را بعد از گسیختگی و فروریزش نهایی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود خرابی در هر سه نمونه تقریباً مشابه است و در نزدیکی تکیه‌گاه پایینی رخ داده است. در نمونه‌ها موج کمانشی قابل رؤیتی



الف) نمونه SG؛ ۱۰۰

ب) نمونه SG؛ ۱۵۰

ج) نمونه SG؛ ۲۰۰

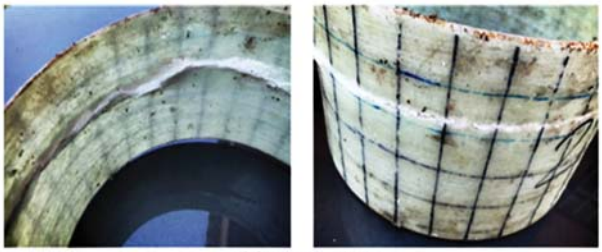
شکل ۷. فروریزش نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بار فشار محوری.

وجود نداشت و فروریزش و خرابی توام با صدای شدید ترک‌خوردگی و افت شدید بار اتفاق افتاد.

شکل ۸ جدار داخلی و خارجی نمونه‌های استوانه‌یی را بعد از باربرداری کامل نشان می‌دهد. همان طورکه مشاهده می‌شود در نمونه‌ها آسیب‌هایی در ماتریس و الیاف به وجود آمده است. در واقع خرابی نمونه‌ها از نوع مواد است که بیشتر به صورت شکست فشاری ماتریس است و در نمونه‌ی SG ۱۵۰ جداشدگی لایه‌یی هم رخ داده است.

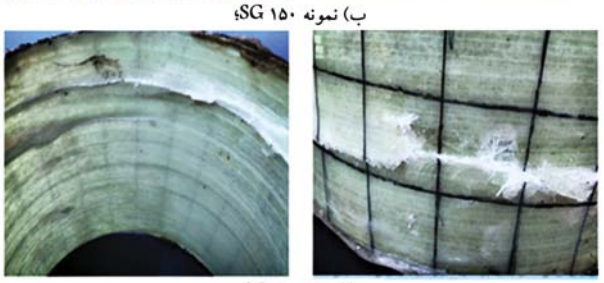
۳. مطالعه‌ی عددی

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس نسخه‌ی ۱۴-۶ استفاده شده است که از جمله نرم‌افزارهای اجزای محدود بسیارکاربردی دراین حوزه است. این نرم‌افزار دارای مجموعه اجزای بسیار گسترده‌یی است که هر نوع هندسه‌یی را می‌توان توسط این آن مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های رفتاری بسیار زیادی است که در مدل‌سازی



الف) نمونه SG؛ ۱۰۰

ب) نمونه SG؛ ۱۵۰



ج) نمونه SG؛ ۲۰۰

شکل ۸. باربرداری کامل و شکست‌های به وجود آمده در جدارهای داخلی و خارجی نمونه‌های آزمایشگاهی.

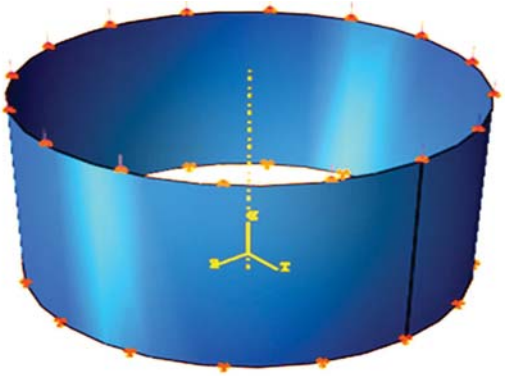
انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح کاربرد دارد.[۲۲] پوسته‌ی استوانه‌یی کامپوزیتی به صورت پوسته[۱۵] در نظرگرفته شده و از جزء ۴ گرهی S۴R استفاده شده است.

۱.۳. مدل‌سازی هندسی

مدل‌سازی تمام پوسته‌ها مطابق با مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی در ماژول پارت صورت می‌گیرد. بدین‌منظور از شکل پوسته و نوع دوران[۱۶] استفاده می‌کنیم و با توجه به شعاع و ارتفاع نمونه‌ها محور دوران پوسته را رسم و زاویه‌ی چرخش ۳۶۰ را اعمال می‌کنیم. برای اعمال اثرات صفحات بالایی و پایینی شرایط مرزی به صورت مفصلی در نظرگرفته شده است که در سه جهت اصلی x ,y ,z جابه‌جایی لبه‌ی نمونه‌ها مقید و فقط لبه‌ی بالایی در جهت y آزاد است.

۲.۳. اعمال خواص مکانیکی به اجزا

برای اختصاص خواص مکانیکی به پوسته، ماده‌ی الاستیک و ارتوتروپیک انتخاب می‌شود. لایه‌های کامپوزیت با استفاده از composite layup ایجاد شده‌اند و نوع المان با توجه به این‌که ضخامت نسبت به دو بعد دیگر ناچیز است، از نوع پوسته‌ی معمولی[۱۷] انتخاب می‌شود که این اجزا دارای ۶ درجه آزادی جابه‌جایی و چرخشی‌اند. برای اعمال خواص ماده به پوسته، سیستم مختصات استوانه‌یی محلی در نظرگرفته می‌شود، بار محوری به صورت بار یکنواخت در لبه‌ی بالایی اعمال



شکل ۹. هندسه‌ی نمونه SG ۱۰۰ و نحوه‌ی اعمال بارگذاری.

می‌شود. شکل ۹ مدل هندسی نمونه‌ی SG ۱۰۰ با اعمال بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد.

۳.۳. تعریف نوع تحلیل و خروجی‌های مورد نظر

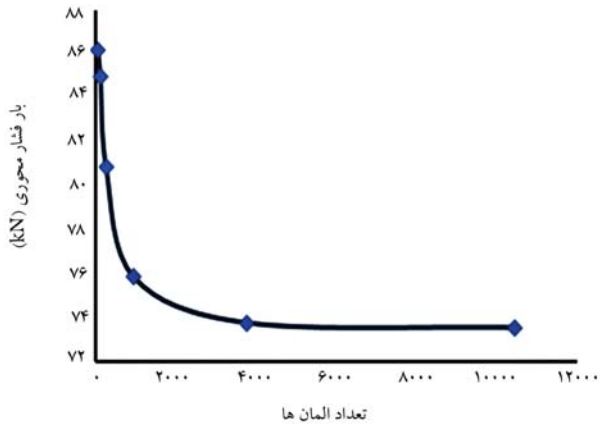
به منظور تحلیل پایداری نمونه‌های استوانه‌یی تحلیل خطی و غیرخطی انجام گرفت. در تحلیل خطی مودهای کمانش و مقادیر ویژه‌ی نظیر هر حالت به دست می‌آید که نتیجه‌ی تحلیل آن بر پایه‌ی نظریه‌ی کلاسیک کمانش استوار است و مقادیر به دست آمده از این روش تقریباً معادل حل کلاسیک است. در این روش امکان اعمال ناکاملی‌ها وجود ندارد. در این تحلیل اولین مود کمانش کمترین نیروی بحرانی را دارد. در این‌جا نتایج مربوط به سه مود کمانش اول برای مقایسه با نتایج تجربی آورده شده است. تحلیل غیرخطی با استفاده از ریکس[۱۸] با در نظرگرفتن اثرات غیرخطی هندسی و تغییرمکان‌های بزرگ در ابتدا بدون در نظرگرفتن ناکاملی هندسی صورت گرفته است. سپس ناکاملی تکیه‌گاهی و نیز ناکاملی هندسی با ضریب نقص اولیه‌ی ۰/۳ میلی‌متر با کدنویسی در مدل اعمال شده است تا بار نهایی به دست آمده به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در واقع اختلاف در ضخامت نمونه‌های ساخته شده نسبت به بیشینه‌ی ضخامت اندازه‌گیری شده در حدود ۰/۳ میلی‌متر یعنی ۱۲ درصد ضخامت بود؛ به همین علت مقدار ناکاملی هندسی ۱۲ درصد منظور شده است. این مقدار باید در مود کمانشی ضرب شود که به این منظور جابه‌جایی گره‌ها از تحلیل اولیه به دست آمده و نسبت به بیشینه‌ی جابه‌جایی نرمال‌سازی شده است.

۴.۳. هم‌گرایی مش

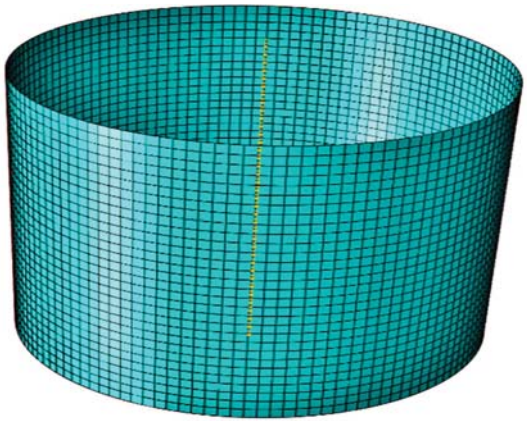
برای دست‌یابی به نتایج عددی با دقت بالا، مطالعه‌ی همگرایی مش باید انجام گیرد. در این تحقیق این کار بار در نظرگرفتن ۶ حالت مختلف برای تعداد اجزا و اندازه‌ی مش صورت گرفته است. شکل ۱۰ نمودار مش مناسب برای شبیه‌سازی نمونه‌ی SG ۱۵۰ را نشان می‌دهد که تعداد اجزا برابر ۳۷۸۰ و اندازه‌ی مش ۵ میلی‌متر است که در این تعداد مش، بار خرابی با ناکاملی به همگرایی می‌رسد و مقدار آن ۷۴/۱۹ کیلونیوتن است. در شکل ۱۱ مدل نهایی پوسته‌ی شبیه‌سازی شده با در نظرگرفتن مش‌بندی آورده شده است.

۵.۳. معیار خرابی

به منظور مدل‌سازی شروع و رشد آسیب از نظریه‌ی هاشین[۱۹] استفاده شده است. معیار هاشین آسیب ناهمسان‌گرد در مواد الاستیک - ترد[۲۰] را پیش‌بینی می‌کند



شکل ۱۰. نمودار هم‌گرایی مش (نمونه‌ی SG ۱۵۰).



شکل ۱۱. مش‌بندی SG ۱۵۰ در آباکوس.

و از این نظر برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های تقویت شده مناسب است؛ این معیار چهار مود خرابی به صورت کشش الیاف، فشار الیاف، کشش ماتریس و فشار ماتریس را در نظر می‌گیرد.[۲۳ و ۲۴] هرگاه مودهای تخریب برابر واحد شدند آسیب در آن نقطه از ماده شروع می‌شود. بعد از شروع آسیب، پیشروی خرابی به صورت تابعی از انرژی شکست در الیاف و ماتریس در نرم‌افزار معرفی می‌شود.

آسیب الیاف درکشش برای حالت $\sigma_{11} \geq 0$

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^{12}}\right)^2 \quad (1)$$

آسیب الیاف در فشار برای حالت $\sigma_{11} \leq 0$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c}\right)^2 \quad (2)$$

آسیب ماتریس درکشش برای حالت $\sigma_{22} \geq 0$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^{12}}\right)^2 \quad (3)$$

آسیب ماتریس در فشار برای حالت $\sigma_{22} \leq 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S^{23}}\right)^2 + \left(\left(\frac{Y^c}{2S^{23}}\right)^2 - 1\right)\frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^{12}}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش و X^t، X^c، Y^t، Y^c، S^{12} و S^{23} به ترتیب استحکام کششی طولی، استحکام فشاری طولی، استحکام کششی عرضی،

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل خطی مقادیر ویژه.

بار	نمونه‌ی SG ۱۰۰	SG ۱۵۰	SG ۲۰۰
بارکمانشی مود اول (kN)	۸۸/۵۳	۸۸/۰۴	۸۶/۹۹
بارکمانشی مود دوم (kN)	۸۸/۵۳	۸۸/۰۴	۸۶/۹۹
بارکمانشی مود سوم (kN)	۹۰/۸۸	۹۰/۳۵	۸۸/۸۶
بار خرابی تجربی (kN)	۶۳/۹۷	۶۹/۷۸	۶۶/۴۱
درصد اختلاف بار کمانشی مود اول با بار تجربی	۲۷/۷۴	۲۰/۷۴	۲۳/۶۶

جدول ۴. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی ریکس.

نمونه	بار خرابی تجربی (kN)	بار خرابی عددی (kN)	درصد اختلاف بار با تجربی
SG ۱۰۰	۶۳/۹۷	۷۴/۵۶	۱۴/۲۰
SG ۱۵۰	۶۹/۷۸	۷۴/۱۹	۵/۹۴
SG ۲۰۰	۶۶/۴۱	۷۳/۶۵	۹/۸۳

استحکام فشاری عرضی، استحکام فشاری طولی و دو استحکام برشی عرضی هستند.

۶.۳. بررسی عددی رفتار نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری محوری

بعد از مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها در حالت خطی سه مود کمانش نمونه‌ها مطابق جدول ۳ محاسبه و کوچک‌ترین حالت کمانشی به عنوان بار بحرانی در نظر گرفته شد که مقدار آن برای نمونه‌های SG ۱۰۰، SG ۱۵۰ و SG ۲۰۰ به ترتیب برابر ۸۸/۵۳، ۸۸/۰۴ و ۸۶/۹۹ کیلونیوتن است. در حالت غیرخطی پس از اعمال ناکاملی‌های تکیه‌گاهی و هندسی، مقدار بار بحرانی و فروریزش نمونه‌ها به دست آمد که برای نمونه‌های SG ۱۰۰، SG ۱۵۰ و SG ۲۰۰ به ترتیب برابر ۷۴/۵۶، ۷۴/۱۹ و ۷۳/۶۵ کیلونیوتن شد که با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده می‌توان پی برد که در تمام نمونه‌ها میزان بار بحرانی و فروریزش تقریباً برابر است و نشان‌دهنده‌ی این است که تأثیر ارتفاع برای نسبت‌های مورد مطالعه ناچیز است. در شکل ۵ جابه‌جایی محوری نمونه‌ها در برابر نیروی فشار محوری به صورت عددی و آزمایشگاهی رسم شده است.

در جدول ۴ مقایسه‌ی بین بار بحرانی آزمایشگاهی و نتایج تحلیل عددی غیرخطی آورده شده است. از مقایسه‌ی نتایج عددی با آزمایشگاهی ملاحظه می‌شود بار بحرانی نمونه‌های آزمایشگاهی کمتر از نمونه‌های عددی است و به ترتیب درصد اختلاف نتایج عددی با آزمایشگاهی برای نمونه‌های SG ۱۰۰، SG ۱۵۰ و SG ۲۰۰ برابر ۱۴/۲۰، ۵/۹۴ و ۸/۸۳ درصد است، که احتمالاً مربوط به تفاوت‌های بین ناکاملی‌های مدل‌های نرم‌افزاری با آزمایشگاهی و اجتناب‌ناپذیر بودن آنهاست. این مسئله موجب می‌شود سختی سازه در مدل‌سازی عددی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی اندکی بیشتر شود.

چهار حالت آسیب در معیار هاشین دوبعدی برای نمونه‌های پوسته‌ی استوانه‌یی طبق روابط ۱ تا ۴ تعریف شد که شامل آسیب الیاف در کشش، آسیب الیاف در فشار، آسیب ماتریس در کشش و فشار است و در شکل ۱۲ نحوه‌ی توزیع آسیب

جدول ۵. تأثیر نسبت قطر به ضخامت در بار خرابی مدل‌های عددی.

مدل	طول (mm)	نسبت قطر داخلی به ضخامت	تعداد لایه	بار خرابی (kN)
۱	۱۰۰	۴۰	۳	۲۱۲/۶۳
۲	۱۰۰	۵۰	۳	۱۶۳/۹۴
۳	۱۰۰	۶۰	۳	۱۳۱/۷۳
۴	۱۰۰	۷۰	۳	۹۸/۷۹
۵	۱۰۰	۹۰	۳	۶۶/۱۲

بر اساس نظریه‌ی هاشین برای این حالت‌ها، در نمونه‌ی SG ۱۰۰ در بار خرابی آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در این بار بیشترین خرابی به صورت آسیب ماتریس در فشار و در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها اتفاق افتاده است که با نتایج تجربی مطابقت دارد.

در شکل ۱۳ میزان پیشروی آسیب و خرابی نمونه‌ی SG ۱۰۰ آورده شده است که بیشتر به صورت خرابی ماتریس در فشار است و در نزدیکی تکیه‌گاه پایینی رخ داده است.

۷.۳. مطالعه‌ی پارامتریک

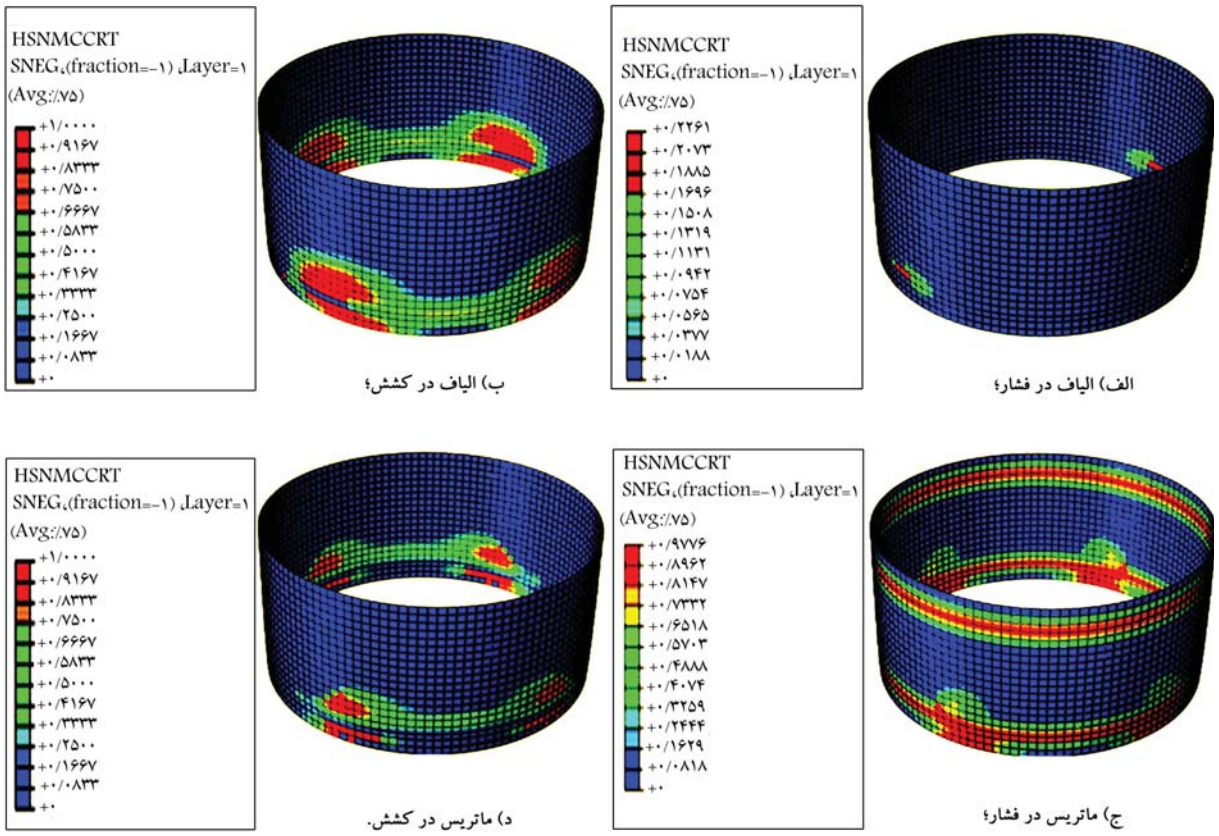
به منظور بررسی کارایی روش تحلیل عددی ارائه شده، تأثیر نسبت شعاع به ضخامت در بار بحرانی مدل‌های عددی مورد ارزیابی قرار گرفت، به این منظور ۵ مدل پوسته‌ی استوانه‌یی با الیاف سوزنی با ارتفاع ثابت ۱۰۰ میلی‌متر، تعداد ۳ لایه و نسبت‌های قطر داخلی به ضخامت ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۹۰ با مشخصات مکانیکی مطابق جدول ۱ مورد تحلیل قرار گرفت. در تمام نمونه‌ها طبق توضیحات بخش ۳.۳.، ناکاملی هندسی ۱۲ درصد ضخامت منظور شد. در جدول ۵ مقادیر بار بحرانی مدل‌ها مقایسه شده است؛ همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش نسبت قطر داخلی به ضخامت بار خرابی کاهش می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

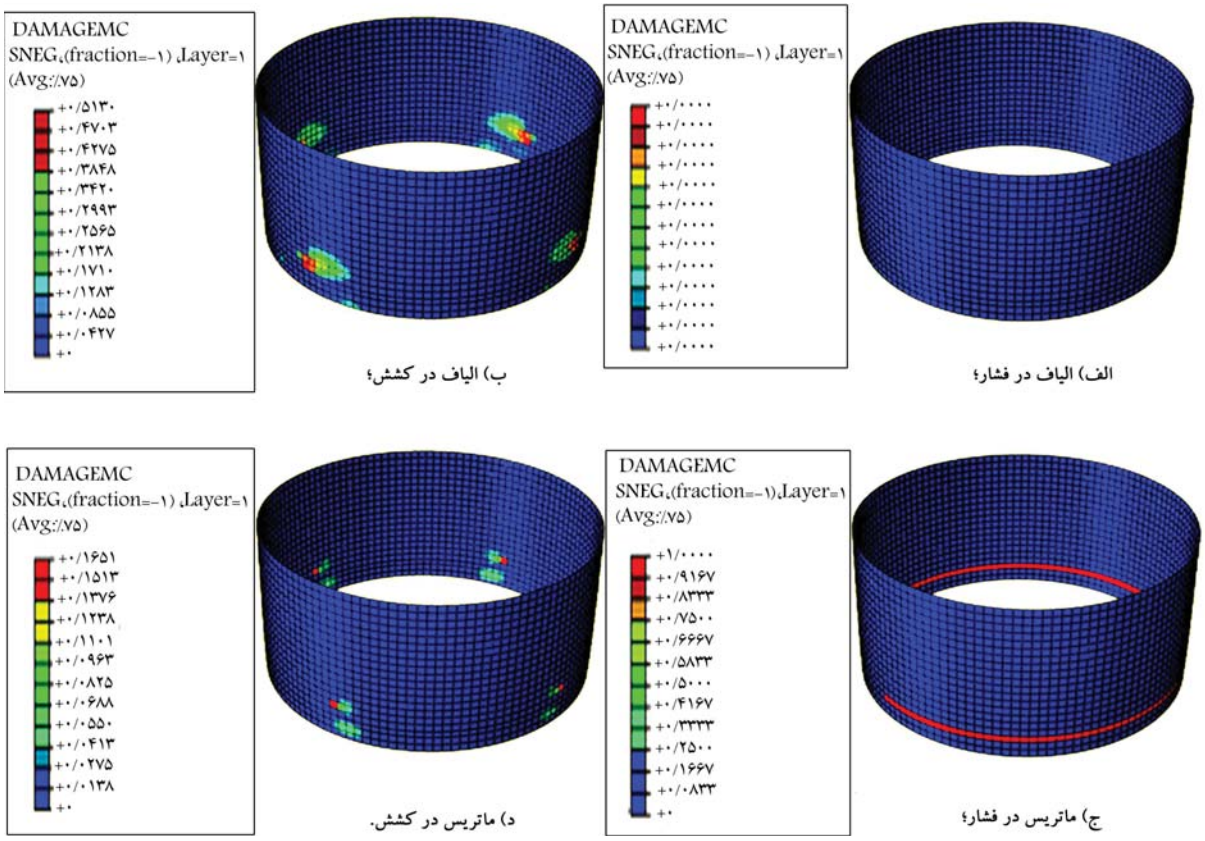
در این تحقیق رفتار پوسته‌های استوانه‌یی کامپوزیتی با الیاف شیشه‌ی سوزنی تحت بار فشار محوری به صورت عددی در نرم‌افزار آباکوس و تحلیل غیرخطی ریکس با در نظر گرفتن ناکاملی‌های هندسی و تکیه‌گاهی بررسی شد؛ سپس برای صحت‌سنجی از سه نمونه‌ی استوانه‌یی در آزمایشگاه استفاده شد و بار بحرانی و فروریزش نمونه‌ها تعیین شد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه به شرح زیر است:

۱- با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، بار بحرانی و فروریزش برای نمونه‌های آزمایشگاهی SG ۱۰۰، SG ۱۵۰ و SG ۲۰۰ به ترتیب برابر ۶۳/۹۷، ۶۹/۷۸ و ۶۶/۴۱ کیلونیوتن و با استفاده از نتایج عددی، به ترتیب برابر ۷۴/۵۶، ۷۴/۱۹ و ۷۳/۶۵ کیلونیوتن شد که با مقایسه‌ی بارهای به دست آمده آزمایشگاهی و عددی می‌توان نتیجه گرفت که برای محدوده‌ی L/R مورد مطالعه در این تحقیق تأثیر پارامتر ارتفاع ناچیز است.

۲- از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بارکمانشی در آزمایشگاه



شکل ۱۲. توزیع آسیب بر اساس معیار آسیب هاشین برای حالت‌های مختلف آسیب در نمونه‌ی SG ۱۰۰ در بار خرابی.



شکل ۱۳. خرابی نمونه‌ی SG ۱۰۰ در بار خرابی.

به صورت جزئی کمتر از بار تحلیلی عددی است و اختلاف بین آنها برای نمونه‌های مورد مطالعه به طور تقریبی بین ۶-۱۴٪ است که احتمالاً به دلیل تفاوت‌های ناکاملی‌های مدل‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی و اجتناب‌ناپذیر بودن آنهاست.

۳ـ مشاهده‌ی رفتار نمونه‌ها در حین آزمایش نشان داد که در نمونه‌ها هیچ‌گونه تورفتگی در طول آزمایش ایجاد نشد و با صدای ترک‌خوردگی و با کاهش ناگهانی بار نمونه‌ها دچار خرابی و فروریزش ناگهانی شدند.

۴ـ از بررسی نمودار بار فشار محوری - جابه‌جایی شعاعی می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت غشایی نمونه‌ها بسیار قابل توجه است و تغییر مود کمانشی در نمونه‌ها قبل از خرابی و فروریزش دیده نشد.

۵ـ با بررسی عددی رفتار نمونه‌ها می‌توان دریافت با افزایش ارتفاع سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۶ـ بررسی تأثیر نسبت شعاع به ضخامت در مدل‌های عددی نشان داد با افزایش این پارامتر، بار خرابی تقلیل می‌یابد.

۷ـ با بررسی نتایج آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که مود خرابی در پوسته‌های کامپوزیتی تحت بار فشار محوری برای نسبت پایین شعاع به ضخامت از نوع خرابی مواد است که این آسیب و خرابی بیشتر از نوع آسیب ماتریس در فشار است و در نزدیکی تکیه‌گاه پایینی اتفاق می‌افتد.

پانوشت‌ها

1. Khot
2. Tennyson and Muggeridge
3. Elghazouli et al.
4. Bisagni,
5. Smerdov
6. Tafreshi
7. Priyadarsini et al.
8. Venkata et al.
9. Shahrjerdi and Bahrami
10. Schillo et al.
11. Almeida et al.
12. mandrel
13. load cell
14. linear variable differential transformer (LVDT)
15. Shell
16. revolution
17. conventional shell
18. Riks
19. Hashin
20. elastic-brittle

منابع (References)

1. Weaver, PM. "Anisotropy-induced spiral buckling in compression-loaded cylindrical shells". *AIAA journal*, **40**(5), pp. 1001-7 (May 2002).
2. Wong, KF. and Weaver, PM. "Approximate solution for the compression buckling of fully-anisotropic cylindrical shells"., *AIAA journal*. **43**(12), pp. 2639-45 Dec (2005)
3. Semenyuk, NP and Trach, VM. "Stability and initial postbuckling behavior of anisotropic cylindrical shells under external pressure". *International Applied Mechanics*., **43**(3), pp. 314-28 (Mar 1 2007)
4. Takano, A. "Improvement of flügge's equations for buckling of moderately thick anisotropic cylindrical shells", *AIAA journal*., **46**(4), pp. 903-11 (Apr 2008)
5. Takano, A. "Buckling of thin and moderately thick anisotropic cylinders under combined torsion and axial compression", *Thin-Walled Structures*., **49**(2), pp. 304-16. (Feb 1 2011)
6. Shen, HS. "Postbuckling behavior of plates and shells. World Scientific", **13**, pp. 363-366 (Jan 2017).
7. Khot, NS. "Buckling and postbuckling behavior of composite cylindrical shells under axial compression"., *AIAA journal*. **8**(2), pp. 229-35 (Feb 1970).
8. Tennyson, RC and Muggeridge, DB. "Buckling of laminated anisotropic imperfect circular cylinders under axial compression", *Journal of Spacecraft and Rockets*, **10**(2), pp. 143-8 (Feb 1973)
9. Elghazouli, AY, Chryssanthopoulos, MK, Spagnoli, A. "Experimental response of glass-reinforced plastic cylinders under axial compression". *Marine Structures*, **11**(9), pp. 347-71 (Nov 1 1998).
10. Bisagni, C. "Experimental buckling of thin composite cylinders in compression", *AIAA journal*, **37**(2), pp. 276-8 (Feb 1999).
11. Bisagni, C. "Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post-buckling", *Composites Part B: Engineering*, **31**(8), pp. 655-67 (Jan 1 2000).
12. Smerdov, AA. "A computational study in optimum formulations of optimization problems on laminated cylindrical shells for buckling I". *Shells under axial compression. Composites science and technology*. **60**(11), pp. 2057-66 (Aug 1 2000).
13. Tafreshi, A. "Efficient modelling of delamination buckling in composite cylindrical shells under axial compression", *Composite structures*, **64**(3-4), pp. 511-20 (Jan 1 2004).
14. Priyadarsini, RS, Kalyanaraman, V, Srinivasan, SM. "Numerical and experimental study of buckling of advanced fiber composite cylinders under axial compression", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **12**(04), pp. 1250028 (Jul 2012).
15. Venkata, NY, Bhasker, P, Ravinder, RP. and et al. "Experimental investigation on buckling of GFRP cylindrical shells subjected to axial compression", *JOSR-JMCE*, **(9)**, pp. 20-25 (2013).
16. Shahrjerdi, A, Bahramibabamiri, B. "The effect of different geometrical imperfection of buckling of composite

cylindrical shells subjected to axial loading", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, **10**(1), pp. 6 (Dec 1 2015).

17. Schllo, C., Röstermundt, D and Krause, D. "Experimental and numerical study on the influence of imperfections on the buckling load of unstiffened CFRP shells" *Composite Structures*, **131**, pp. 128-38 (Nov 1 2015).
18. JH. Tonatto, ML. Ribeiro, ML. and et al. "Amico SC. Almeida Jr, Buckling and post-buckling of filament wound composite tubes under axial compression: linear, nonlinear, damage and experimental analyses", *Composites Part B: Engineering*, **149**, pp. 227-39 (Sep 15 2018).
19. Shahgholian-Ghahfarokhi, D. Raafat, M. R. and Rahimi, G. H. "Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using Vibration Correlation Technique", *Journal of Science and Technology of Composites*, **5**3, pp. 359-368 2018 (In Persian).
20. William FH. "Mechanical behavior of materials". *USA: University of Michigan*, pp 384 (2005).
21. Gibson RF. "Principles of composite material mechanics". *CRC press*, pp. 64-93 (Feb 10 2016).
22. ABAQS, Version 6.14-4. ABAQUS/Standard User`s Manual, ABAQUS Inc., USA (2014).
23. Hashin, Z. "Failure criteria for unidirectional fiber composites", *J Appl Mech*, **47**(2), pp. 329-34 (1980).
24. Hashin, Z. and Rotem, A. "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials", *Journal of composite materials*, **7**(4), pp. 448-64 (Oct 1973).