

بررسی رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با مصالح GFRP تحت بار فشار خارجی

حسین شوکتی*^۱، علی پاشایی تقلیدآباد^۲

^۱ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

^۲ دانشجوی دکتری عمران-سازه، پردیس دانشگاه ارومیه، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۸/۱۲/۲۴، پذیرش: ۹۹/۷/۲۷، نشر آنلاین: ۹۹/۷/۲۷)

چکیده

پوسته‌ها به‌عنوان عناصر سازه‌ای در مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا اهمیت زیادی دارد. به‌علت کم بودن ضخامت پوسته در مقایسه با سایر ابعاد آن، کمانش به‌عنوان یک حالت حدی برای تحلیل پوسته به‌شمار می‌رود و مقاومت کمانشی یک معیار مهم برای طراحی می‌باشد. با ورود مصالح نوین از قبیل FRP (Fiber Reinforced Polymers) به بازار ساخت‌وساز، نیاز است رفتار و نقش این مصالح در کمانش سازه‌های پوسته‌ای بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است رفتار این مصالح به‌مراتب پیچیده‌تر از مصالح ایزوتروپیک (Isotropic) می‌باشد. در این تحقیق از بارگذاری فشار یکنواخت خارجی استفاده شده است. این نوع بارگذاری عموماً موقع تخلیه مخازن و پوسته‌های استوانه‌ای به‌وجود می‌آید. در این مقاله، تأثیر پارامتر هندسی بی‌بعد L/R در ظرفیت کمانشی و رفتار الاستیک پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با مصالح GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) به‌صورت عددی (با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS) و آزمایشگاهی، تحت بار فشار یکنواخت خارجی با شعاع ثابت و طول متغیر، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مطابقت خوبی با نتایج تحلیل‌های عددی مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. با افزایش پارامتر هندسی L/R ، ظرفیت کمانشی و تعداد مدهای کمانشی تقلیل می‌یابد و همچنین مخازن در تست دوباره نتوانستند ظرفیت اولیه خود را تکرار نمایند ولی نمونه‌ها در تست اولیه و تکرار با وجود تشکیل ترک‌ها، حالت الاستیک خود را حفظ و پس از باربرداری به حالت اولیه خود بازگردند.

کلیدواژه‌ها: مخازن استوانه‌ای، پارامتر هندسی، ظرفیت کمانشی، مصالح GFRP، فشار خارجی.

۱- مقدمه

نازک است. بارگذاری فشار جانبی یکنواخت در مخازن موقعی رخ می‌دهد که مخازن در حالت تخلیه مایعات ذخیره شده در آن‌ها می‌باشند. منشأ این نوع بارگذاری اثر بار باد و نیز سرعت تخلیه محتویات مخزن می‌باشد و اگر تمهیدات خاصی مانند باز کردن شیرهای تخلیه انجام نگیرد و یا درست عمل نکنند در این صورت در مخازن کمانش اتفاق خواهد افتاد و موجب خرابی کلی مخازن خواهد شد.

بررسی پدیده کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای به پارامترهای خاصی از جمله هندسه قطعه، مشخصات ماده، تنش‌های پسماند قطعه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری بستگی دارد. لذا برای به دست آوردن مدلی که بتواند هم در مقابل کمانش مقاومت کند و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه باشد، باید به این پارامترها توجه کرد.

موضوع کمانش پوسته‌ها، عموماً در رشته‌های مهندسی مکانیک، علوم دریایی و سازه‌های دریایی، مهندسی عمران، مهندسی شیمی و مهندسی هوا و فضا مطرح می‌گردد. کاربرد این موضوع را می‌توان برای مثال در طراحی ستون‌های فلزی، مخازن تحت مکش، لوله‌های طولی در دیگ‌های بخار جهت عبور گازهای داغ، بدنه زیردریایی، برخی از اجزاء سازه‌های کشتی‌ها، طراحی فضاپیماها و صنایع خودروسازی، به‌خصوص سازه‌هایی که نسبت بالای استحکام به وزن و عمر خستگی حائز اهمیت است مشاهده نمود نمونه رایج آن در عمران و مکانیک، طراحی مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی است که می‌تواند باعث کمانش و شکست سازه شود.

مطالعات تجربی و عددی نشان می‌دهند که شکست ناشی از کمانش سازه‌ای، عامل اصلی خطر در پوسته‌های استوانه‌ای جدار

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۱۴۱۱۰۶۵

آدرس ایمیل: h.showkati@urmia.ac.ir (ح. شوکتی)، a.pashaei@urmia.ac.ir (ع. پاشایی تقلیدآباد).

تأثیر آشکاری ندارد. آن‌ها همچنین دریافته‌اند که مدهای کمانشی برای ابعاد و خصوصیات نمونه مورد استفاده، مستقل از الگوی پیچش می‌باشد.

Hui Shen، در سال ۲۰۰۸ تئوری لایه مرزی را برای بررسی کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای لمینتی^۳ تحت بار محوری و بار فشاری یکنواخت به کار برد. او تغییر شکل غیرخطی قبل از کمانش و همچنین ناکاملی را در نظر گرفت و تکنیک آشفتگی^۴ را برای بارهای کمانشی و مسیر تعادلی پس کمانش را به کار برد و نتیجه گرفت که خواص غیر ایزوتروپیک تأثیر مهمی روی بار کمانشی و رفتار پس کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار محوری و فشاری یکنواخت دارد. علاوه بر این نشان داد که پارامترهای هندسی و ناکاملی هندسی بر روی مشخصات پس کمانشی تأثیر مهمی دارد.

Hur و همکاران، در سال ۲۰۰۸ رفتار پس کمانشی سیلندره‌های کامپوزیتی تحت فشار هیدروستاتیک را مورد بررسی قرار دادند، بدین ترتیب که ۵ عدد سیلندر از جنس نوارهای پیش آغشته کربن‌اپوکسی (USN ۱۲۵) با زاویه (۹۰ و ۰) مورد تست فشار هیدروستاتیک خارجی قرار گرفت و نتایج حاصل از تست با آنالیز اجزای محدود انجام گرفته، مقایسه شد. به این نتیجه رسیدند هیچ‌یک از سیلندرها نتوانستند بار کمانشی اولیه خود را بعد از شکست‌های موضعی که بعد از کمانش رخ داد، تکرار کنند. کامجو (۱۳۹۵) رفتار جداره پوسته‌های GRP^۵ به صورت توخالی و پر شده با بتن تحت بارگذاری جانبی فشاری و رفتار جداره آن‌ها تحت بار را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که در لوله‌های خالی پس از پارگی الیاف و گسیخته شدن چسب یا رزین شکست رخ می‌دهد. در حالی که برای نمونه‌های پر شده با بتن، مصالح پلیمری شیشه آسب کم‌تری دیده بودند و لوله‌های پر شده با بتن از لحاظ شکل‌پذیری و مقاومت عملکرد خوبی داشتند در حالی که نمونه‌های خالی بیضی‌شدگی بیشتری نسبت به توپر از خود نشان دادند.

Abarar و همکارانش، در سال ۲۰۱۷ بررسی‌های آزمایشگاهی روی رفتار پوسته‌های کامپوزیتی GFRP تولید شده به روش پیچش الیاف تحت فشار هیدرواستاتیک و بار محوری در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. شش تست با نسبت‌های مختلف تنش‌های محوری و حلقوی به صورت بار محوری خالص (۰:۱) و (۰:۱/۵) و (۱:۱) و (۲:۱) و (۴:۱) و بار حلقوی خالص (۱:۰) آزمایش شدند. آن‌ها سه مد گسیختگی مجزا در آزمایشات مشاهده کردند به این صورت که گسیختگی کششی محوری در حالت بارگذاری محوری خالص، نشست در حالت بارگذاری محوری غالب و نشست موضعی در

یکی از معضلات اساسی لوله‌ها و مخازن فولادی و چدنی که در صنعت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، موضوع زنگ‌زدن است. زنگ‌زدگی موجب فرسودگی لوله یا مخزن و ترکیدن آن و نشست آب می‌شود، در این حالت هزینه تعویض و یا تعمیر بسیار بالایی خواهند داشت اما لوله‌ها و مخازن فایبرگلاس این مشکل را ندارند و به طور متوسط از عمر بهره‌برداری پنجاه ساله برخوردار می‌باشند. به دلیل صاف و لغزنده بودن دیواره داخلی لوله‌ها و مخازن GFRP^۱، میزان اصطکاک سیال با دیواره به حداقل خود رسیده و جهت پمپاژ سیال به حداقل نیرو نیاز است.

تحقیقات گسترده در زمینه کمانش و پس کمانشی مخازن فولادی جدار نازک تحت فشار خارجی وجود دارد ولی تحقیقات در زمینه پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی بسیار کم است با توجه به پیشرفت علم و گسترش استفاده از مصالحی در عین وزن پایین استحکام بالا، ضرورت دارد که تحقیقات بیشتری در زمینه پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی به عمل آید در بررسی تحقیقات در زمینه پوسته‌های کامپوزیتی، بیشتر به بررسی رفتار کمانشی و پس کمانشی مخازن جدار نازک در حالت‌های مختلف چیدمانی، استفاده یا عدم استفاده از تقویت‌کننده، تأثیر عیوب اولیه و عیوب هندسی بر فشار کمانشی، تأثیر نوع بارگذاری و شرایط مرزی بر فشار کمانشی و ... پرداخته شد و موضوع تأثیر پارامترهای هندسی مخازن کامپوزیتی بر رفتار کمانشی آن کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله تحقیقات صورت گرفته Donnell، در سال ۱۹۳۴ متوجه شد که تحلیل پایداری خطی کافی نبوده و پیشنهاد کرد برای تحلیل پایداری نیاز به یک روش تحلیل است که تغییر شکل‌های بزرگ را در نظر بگیرد.

Khot در سال ۱۹۷۰، روشی برای رفتار پس کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه با در نظر گرفتن ناکاملی ارائه کرد او نتیجه گرفت که تأثیر ناکاملی اولیه در کمانش پوسته‌های استوانه کامپوزیتی کم‌تر از پوسته‌های ایزوتروپیک است.

Tsouvalis و همکاران، در سال ۲۰۰۳ اثر عیوب هندسی و همچنین تأثیر شرایط مرزی به همراه عیوب بر رفتار کمانش مخازن کامپوزیتی لایه‌ای تحت فشار خارجی هیدروستاتیک^۲ را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اثر عیوب بر رفتار کمانشی زیاد است و برای داشتن یک پیش‌بینی درست باید علاوه بر آنالیز خطی، آنالیز اجزای محدود غیرخطی نیز انجام شود. Moreno و همکاران، در سال ۲۰۰۸ اثر الگوهای پیچشی بر رفتار مکانیکی سیلندره‌های کامپوزیتی تحت فشار خارجی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الگوهای پیچشی بر استحکام و رفتار کمانشی مخازن جدار نازک و جدار ضخیم

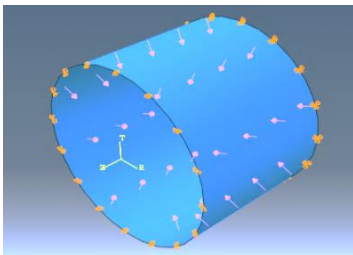
4. Perturbation
5. Glass Reinforced Polymers

1. Glass Fiber Reinforced Polymers
2. Hydrostatic
3. Laminate

۴- بررسی و ارزیابی نتایج آزمایشگاهی و المان محدود جهت طراحی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی چند لایه تحت فشار خارجی یکنواخت.

۳- تحلیل کمانشی خطی و غیرخطی به کمک روش عناصر محدود

برای ارائه مدل اجزای محدود نمونه‌ها از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. نمونه‌های مدل‌سازی شده به صورت مخازن دارای قطر ۴۰۰ میلی‌متر و ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر می‌باشند. در مدل‌سازی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه در نرم‌افزار ABAQUS، برای مش‌بندی از المان S4R (چهار گره‌ای با تکنیک انتگرال کاهش یافته)، که یک المان دو انحنایی است و قابلیت تحلیل کرنش‌های بزرگ را دارا است، استفاده می‌شود. علاوه بر این برای تحلیل نمونه‌ها نیز روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی و تحلیل انواع مصالح به صورت الاستیک و پلاستیک را داراست که در این تحقیق با توجه به ماهیت مواد کامپوزیتی، این مواد به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن تعداد لایه‌ها و زوایای آن‌ها نسبت به محور X مدل‌سازی می‌شوند. بارگذاری و شرایط مرزی مدل در محیط بار مشخص می‌شود. برای اعمال فشار خارجی، ابتدا سطح داخلی سیلندر انتخاب می‌شود. نحوه بارگذاری نیز به این صورت است که فشار یکنواخت به صورت محیطی به مخزن وارد می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ها به صورت مفصلی مدل می‌شود. به این صورت که قسمت پایین در سه جهت انتقالی شعاعی، مماسی و محوری مقید هستند و در قسمت بالا نمونه‌ها فقط قید شعاعی و مماسی دارند و قید تغییر مکان محوری آزاد می‌باشد شکل (۱) نحوه بارگذاری و اعمال شرایط مرزی را نشان می‌دهد. از آنجایی که تحلیل کمانش خطی امکان پیش‌بینی رفتار پس کمانش را ندارد و رفتار پس کمانشی سازه غیرخطی است لذا به منظور دستیابی به رفتار پس کمانشی از رویه آنالیز تحلیل غیرخطی هندسی با الگوریتم ریکس استفاده شد.



شکل ۱- نمونه تحت بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

بارگذاری حلقوی غالب روی داد و با افزایش دما تأثیرات قابل ملاحظه‌ای روی مدهای گسیختگی و تنش‌ها حاصل شد. تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه مخازن فلزی و با استفاده از مصالح کامپوزیت به‌عنوان تقویتی در مخازن فلزی، بسیار زیاد می‌باشد که به تعدادی از تحقیقات که توسط، Aydin و همکارانش ۲۰۱۹، Korucuk و همکارانش ۲۰۱۹، Mali و همکارانش ۲۰۱۹ و Najand و همکارانش در سال ۲۰۲۰ می‌توان اشاره کرد. در میان این تحقیقات تنها مطالعه صورت‌گرفته در زمینه بحث کمانش مخازن تحت فشار خارجی، توسط Hur و همکاران (۲۰۰۸) است؛ با این تفاوت که بار اعمالی در تحقیق فوق ترکیبی از فشار خارجی و محوری می‌باشد. در حالی که تحقیق حاضر تحت فشار خارجی یکنواخت بوده و نتایج آن قابل‌تعمیم به لوله‌گذاری نیز می‌باشد. در این مقاله، اثر پارامترهای هندسی L/R در رفتار کمانش و الاستیک مخازن استوانه‌ای GFRP تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

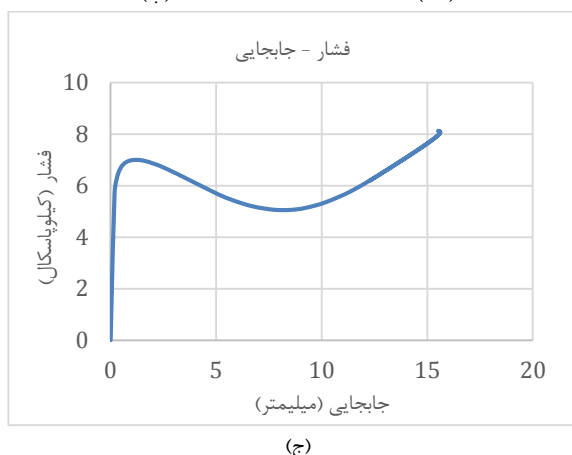
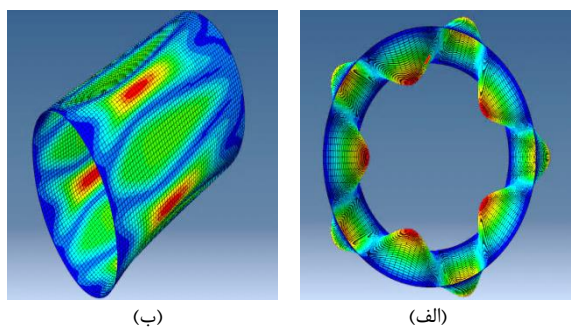
۲- روش تحقیق

با توجه به متغیرهای اصلی مسئله، به‌منظور دستیابی به هدف این تحقیق، سه نمونه آزمایشگاهی از پوسته‌های استوانه‌ای با مصالح کامپوزیتی چند لایه با الیاف حصیری شیشه‌ای (GFRP) به صورت نرم‌افزاری مدل‌سازی شده و مورد تست آزمایشگاهی قرار خواهند گرفت. نمونه‌های مورد استفاده در سه طول مختلف شامل ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر بوده و قطر و ضخامت هر سه نمونه به ترتیب برابر ۴۰۰ میلی‌متر و ۱/۲ میلی‌متر است که توسط شرکت محترم فراسان ساخته شده است. نکته قابل ذکر این‌که در این فرآیند لازم است به مسئله شکننده بودن الیاف توجه ویژه صورت گیرد. هم‌زمان با کمانش، ترک‌های ریز همراه با صدای خفیف در جداره پوسته ایجاد می‌گردد و پس از رسیدن به مرحله فروریختگی روند بارگذاری متوقف می‌گردد. روش تحقیق به صورت خلاصه عبارت است از:

۱- مدل‌سازی نرم‌افزاری پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی چندلایه، انتخاب رویه آنالیز و انجام تحلیل‌های خطی استاتیکی مقادیر ویژه و غیرخطی با الگوریتم و تحلیل غیر خطی ریکس^۶ و بررسی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت فشار خارجی یکنواخت.

۲- طراحی سیستم تست^۷ و تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها و تست آن‌ها و بررسی آزمایشگاهی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت فشار خارجی یکنواخت.

۳- تست مجدد نمونه‌ها و بررسی رفتار کمانشی و الاستیک پوسته‌ها تحت فشار خارجی.

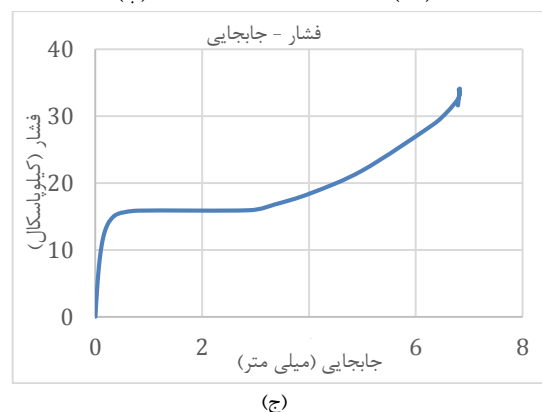
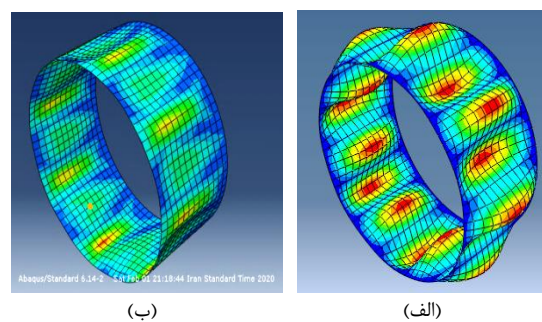


شکل ۴- نمونه SGF3: الف) کمانش مد اول تحلیل خطی،
ب) کمانش غیرخطی، ج) نمودار فشار- جابه‌جایی

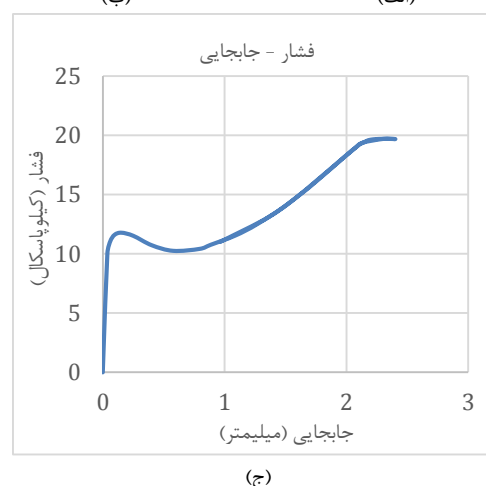
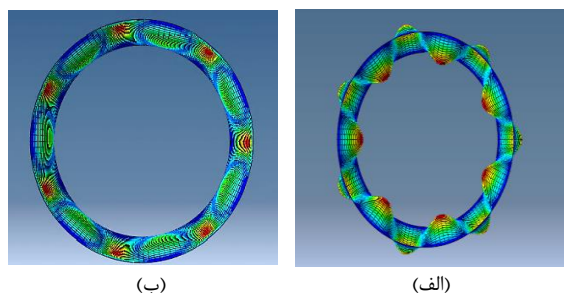
توانایی این روش ناشی از پیش‌بردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله به طریق طول کمان توسط این نوع حلگر می‌باشد که در آن نمونه جزئی در بار و جابه‌جایی به صورت هم‌زمان اعمال می‌شود. شکل کمانش مود اول در تحلیل خطی و تغییر شکل تحلیل غیرخطی و نمودار ظرفیت کمانش نمونه‌های 1, 2, 3, SGF، به ترتیب در شکل‌های (۲-الف، ب و ج)، (۳-الف، ب و ج) و (۴-الف، ب و ج) آمده است.

۴- تحقیقات آزمایشگاهی

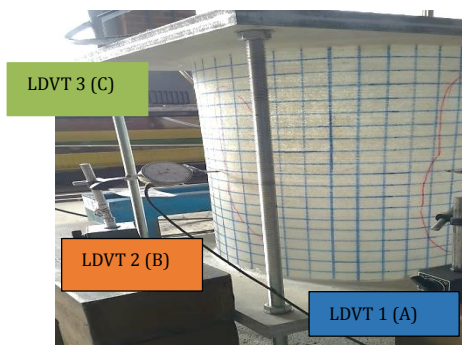
انجام تست بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی به طوری که بتوان از نتایج حاصل از آن استفاده کرد و قابل مقایسه با نتایج تئوری و نرم‌افزاری باشد نیازمند شناخت کافی از مسئله و فرضیات حاکم و شرایط تأثیرگذار بر آن می‌باشد. هر عامل دیده نشده و اعمال نادرست در آزمایشگاه، ناکاملی و یا نقص در یک نمونه تست به نمونه دیگر باعث واگرایی در پاسخ‌های به دست آمده خواهد شد. بنابراین باید دقت کافی در مدل‌سازی رفتار مصالح، شرایط تکیه-گاهی و راه‌اندازی آن در آزمایشگاه، سرعت اعمال بار و بررسی دقیق نمونه‌های آزمایشگاهی و عدم وجود نقص قابل‌رؤیت در آن صورت بگیرد. تا بتوان با کم‌ترین ضریب خطا مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شود و نتایج ارزشمند آن برای استفاده‌های بعدی در دسترس قرار بگیرند.



شکل ۲- نمونه SGF1: الف) کمانش مد اول تحلیل خطی،
ب) کمانش غیرخطی، ج) نمودار فشار- جابه‌جایی



شکل ۳- نمونه SGF2: الف) کمانش مد اول تحلیل خطی،
ب) کمانش غیرخطی، ج) نمودار فشار- جابه‌جایی



شکل ۵- سیستم Set up و ابزارهای اندازه‌گیری

در آزمایش نمونه‌ها، هوای داخل پوسته توسط دستگاه تخلیه هوا به بیرون کشیده شده و بارگذاری خارجی یکنواخت به پوسته اعمال می‌گردد. با کاهش فشار داخل مخزن، به تدریج کماتش در بدنه پوسته آغاز می‌شود و با ادامه بارگذاری و با افزایش فشار خارجی تعداد موج‌های محیطی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مرحله فروریختگی روند بارگذاری متوقف می‌گردد. پس از اتمام بارگذاری و ثبت وقایع زمان تست و کنترل‌های لازم، باربرداری توسط دستگاه به آرامی و با دقت به نمونه وارد می‌گردد. طوری که در انتهای باربرداری، کماتش‌های صورت گرفته به شکل اولیه خود برگردند و با اتمام باربرداری تست نمونه پایان می‌یابد. شکل (۶- الف، ب و ج)، نمونه‌های SGF1,2,3-P پس از کماتش کلی را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶- کماتش کلی: الف) نمونه SGF1-P، ب) SGF2-P،

ج) SGF3-P

۴-۱- بررسی رفتار کماتشی مخازن

۴-۱-۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار کماتشی پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی تحت فشار یکنواخت خارجی در این مرحله سه نمونه آزمایشگاهی تهیه و شش آزمایش انجام گرفت که مشخصات مکانیکی یکسانی داشته و تنها عامل متغیر در آن‌ها قطر پوسته بود. مشخصات هندسی پوسته‌ها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی مخازن مورد تست

اسم نمونه	قطر (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	L/R	R/t	نوع الیاف	زاویه الیاف
SGF1-P,R	۲۰۰	۳۰۰	۱/۲	۱/۲	۱۶۶.۷	حصیری	۰.۹۰
SGF2-P,R	۴۰۰	۳۰۰	۱/۲	۱/۲	۱۶۶.۷	حصیری	۰.۹۰
SGF3-P,R	۶۰۰	۳۰۰	۱/۲	۱/۲	۱۶۶.۷	حصیری	۰.۹۰

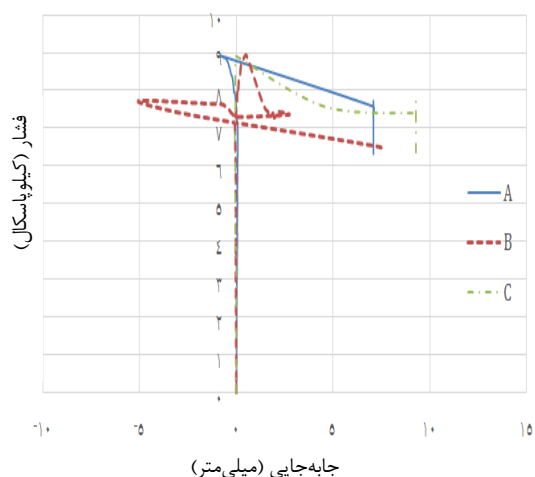
P: تست اولیه R: تکرار تست

۴-۱-۲- بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

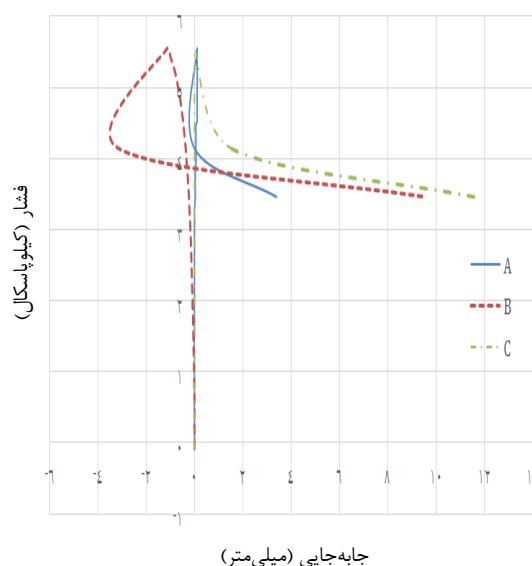
به منظور بررسی رفتار کماتشی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر فشار یکنواخت خارجی از پمپ مکش هوا استفاده می‌شود. این دستگاه هوای داخل مخزن را با دبی ثابت ۴۰ مترمکعب در ساعت به بیرون تخلیه می‌کند. که مقدار آن می‌تواند با به کارگیری چند شیر تخلیه تنظیم گردد. بنابراین با تخلیه هوای داخلی، فشار اتمسفر به تدریج و به صورت یکنواخت بر سطوح جانبی پوسته وارد می‌گردد و از آنجاکه هدف این آزمایش بررسی فشار جانبی یکنواخت بوده است لذا سیستم سازه‌ای بارگذاری به نوعی طراحی شده است که با استفاده از میله‌های نگه‌دارنده صفحه‌های بالا و پایین هیچ نیروی محوری به لبه‌های پوسته وارد نگردد.

در صفحه انتهایی که بالای پوسته استوانه‌ای قرار گرفته است سه سوراخ تعبیه شده است که اولی به دستگاه مکش وصل بوده و عمل تخلیه هوا را انجام می‌دهد. سوراخ دوم به شیر تخلیه وصل بوده و وظیفه کنترل دبی تخلیه مخزن را بر عهده دارد. سوراخ سوم جهت اندازه‌گیری فشار داخلی به فشارسنج وصل می‌شود.

در قسمت‌های مختلف این نمونه‌ها در وسط ارتفاع و به صورت محیطی ابزارهای LVDT^۱ جهت اندازه‌گیری مقادیر تغییرمکان نقاط مختلف بر روی پوسته نصب شده و از سنسور فشار نیز جهت اندازه‌گیری فشار داخل مخزن استفاده شده است. تمام ابزار اندازه‌گیری توسط کابل رابط، اطلاعات به دست آمده نقاط مختلف را به دیتا لاگر^۲ و نرم‌افزار مربوطه ارسال می‌کنند. تعدادی از این ابزارها و موقعیت LVDTها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۹- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF2-P



شکل ۱۰- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF3-P

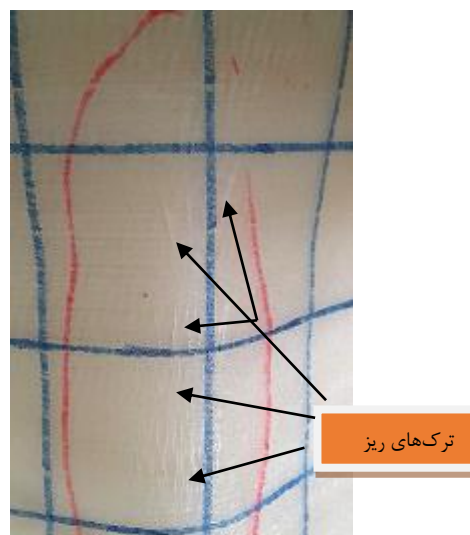
۴-۲- بررسی رفتار کمانشی و الاستیک مخازن در تکرار تست

۴-۲-۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

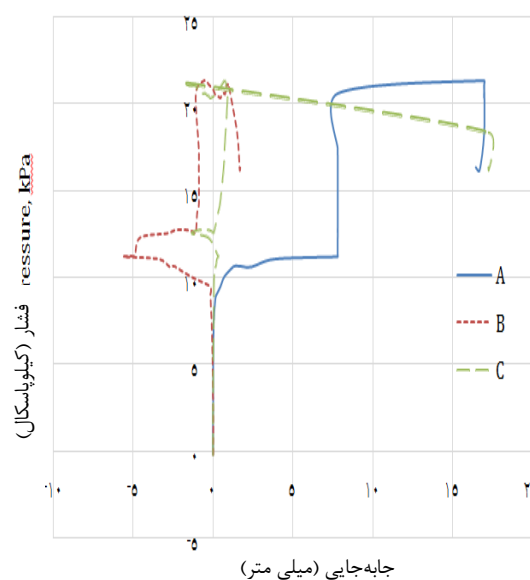
برای بررسی ظرفیت کمانشی پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی تحت فشار یکنواخت خارجی در اثر تکرار کمانش در این مرحله، سه نمونه آزمایشگاهی قبلی، پس از بارگذاری و باربرداری، مجدداً تحت بارگذاری فشار خارجی قرار گرفت؛ تا ظرفیت کمانشی و خاصیت الاستیک مخازن GFRP، تکرار در بارگذاری و باربرداری مورد بررسی قرار گیرد.

هم‌زمان با شروع کمانش و تا وقوع کمانش کلی و پایان توقف بارگذاری ترک‌های ریز همراه با صدای خفیف در بدنه مخازن ایجاد شد. که در تست اولیه این ترک‌ها در لایه بیرونی رخ داد که نمونه این ترک‌ها در شکل (۷) آورده شده است.

در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰)، دیاگرام‌های تغییر مکان در مقابل فشار، ثبت از دیتالاگر و نرم‌افزار به ترتیب برای نمونه‌های SGF1,2,3-P آورده شده است.



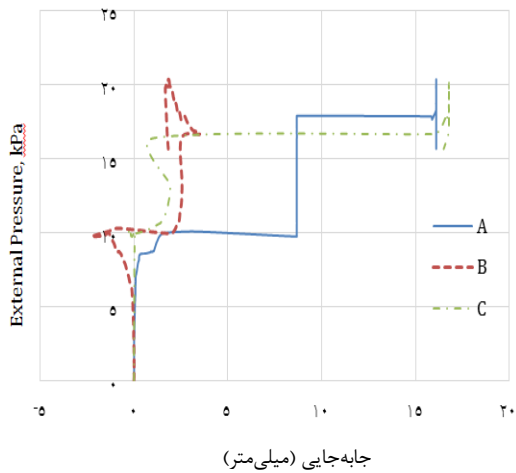
شکل ۷- ترک‌های ایجادشده تا توقف بارگذاری



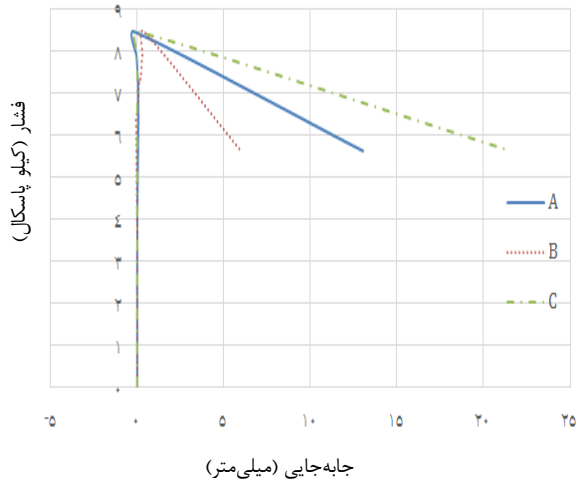
شکل ۸- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF1-P

۴-۲-۲- بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

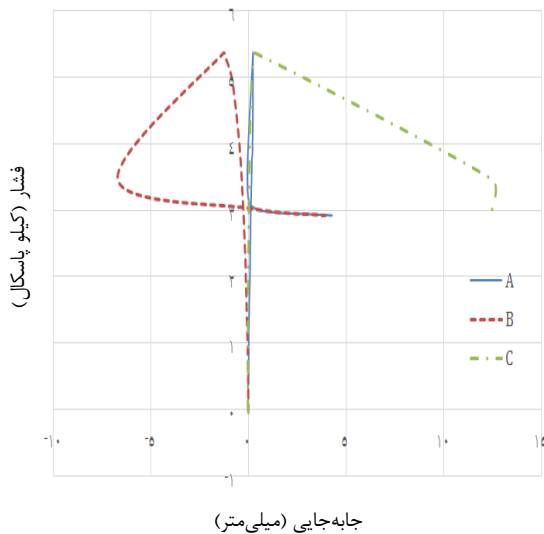
جهت بررسی رفتار کمانشی نمونه‌های آزمایشگاهی در اثر تکرار بارگذاری، تحت اثر فشار یکنواخت خارجی و خواص الاستیک، هریک نمونه‌ها جدول (۱) که تحت بارگذاری و باربرداری قرار گرفته بودند بدون جابه‌جایی LDVT ها و بی آن‌که از سیستم باز شوند و با همان حالت و پس از ترمیم چسب‌های اطراف لوله در تکیه‌گاه‌ها توسط پمپ مکش هوا تا مرحله کمانش کلی تحت بارگذاری فشار یکنواخت خارجی قرار گرفتند. هوای داخل پوسته توسط دستگاه تخلیه هوا به بیرون کشیده شده و بارگذاری خارجی یکنواخت به پوسته اعمال می‌گردد. با کاهش فشار داخل مخزن، به تدریج کمانش در بدنه پوسته آغاز می‌شود و با ادامه بارگذاری و با افزایش فشار خارجی تعداد موج‌های محیطی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مرحله فروریختگی روند بارگذاری متوقف می‌گردد. تعداد مودهای کمانش و محل کمانش -ها منطبق بر تست اولیه بود و میزان ترک و عمق ترک نسبت به تست اولیه تا حدودی افزایش یافته بود و به لایه‌های دیگر هم نفوذ داشت. ظرفیت کمانش اولیه و کمانش کلی نسبت به تست اولیه کاهش یافته بود ولی از ظرفیت خوبی برخوردار بودند. شکل (۱۱-الف، ب و ج)، نمونه‌های SGF1,2,3-R پس از کمانش کلی و در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)، دیاگرام‌های تغییر مکان در مقابل فشار، ثبت از دیتالاگر و نرم‌افزار به ترتیب برای نمونه‌های SGF1,2,3-R آورده شده است.



شکل ۱۲- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF1-R



شکل ۱۳- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF2-R



شکل ۱۴- دیاگرام فشار و جابه‌جایی نمونه SGF3-R



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۱- کمانش کلی: (الف) نمونه SGF1R، (ب) SGF2-R.

SGF3-R (ج)

۵- بررسی نتایج

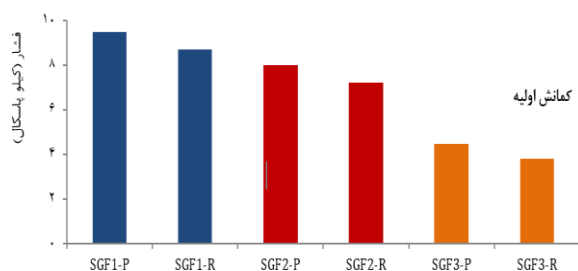
۵-۱- نتایج مربوط به ظرفیت کمانش اول، روش آزمایشگاهی و عددی نمونه‌ها در تست اولیه

در این بخش نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی (کمانش خطی و غیرخطی) به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت در این مقاله مخازن استوانه‌ای دارای ارتفاع (طول) ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ و همگی دارای شعاع ۲۰۰ و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر، تحت فشار یکنواخت بیرونی مورد تست قرار گرفتند و ظرفیت کمانشی حاصل بروش آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی شد. که ظرفیت کمانشی نمونه‌ها در تست اولیه، در جدول (۲) ارائه شده است.

مطابق جدول (۲) ظرفیت کمانشی به روش آزمایشگاهی نسبت به عددی مورد مقایسه قرار گرفته است در این مقایسه، ظرفیت کمانشی در روش آزمایشگاهی نسبت به عددی، در نمونه SGF1-P با ۱۴٪ و نمونه SGF2-P با ۲۰٪ و نمونه SGF3-P با ۲۱/۴٪ کاهش در ظرفیت کمانشی را نشان می‌دهد. که این امر به سبب برخی ناکاملی‌ها است که در آزمایشگاه وجود خواهد داشت و در شبیه‌سازی نخواهیم داشت. ولی با وجود آن‌ها، نتایج انطباق خوبی دارند که حاکی از عملکرد مناسب مدل‌سازی در این مقاله می‌باشد. با افزایش نسبت L/R از عدد ۱ به ۱/۵ ظرفیت کمانشی مخزن به ۸۴/۷۵٪ (۱۳/۲۵٪ کاهش در ظرفیت) و با افزایش L/R از عدد ۱ به ۳، ظرفیت مخزن به ۴۷/۳۶٪ (۵۲/۶۴٪ کاهش در ظرفیت کمانش) می‌رسد که نشان می‌دهد با افزایش طول مخازن در شعاع ثابت، ظرفیت کمانشی کاهش و مخزن در ظرفیت‌های پایین کمانش می‌نماید.

کاهش در ظرفیت کمانش وجود دارد. نمونه SGF3-P در تست اولیه، کمانش در ۴/۴۸ کیلوپاسکال رخ داده است در حالی که در تکرار تست، نمونه SGF3-R در ۳/۸ کیلوپاسکال کمانش صورت گرفت یعنی با ۱۵/۱۸٪ کاهش در ظرفیت کمانشی وجود دارد و این بدان معناست که نمونه‌ها در تکرار تست نتوانستند ظرفیت کمانشی اولیه را تکرار نمایند ولی نمونه‌ها در تکرار تست در بارگذاری و باربرداری‌ها و باوجود تشکیل ترک‌ها هم از ظرفیت خوبی برخوردار می‌باشند.

خاصیت مهندسی بسیار خوبی که در تست اولیه و تکرار تست، باوجود ترک‌های که در لایه‌های بدنه مخازن ایجاد شده بود. نمونه‌های مورد تست پس از باربرداری به حالت اولیه بازگشتند که نشان از خاصیت الاستیک خوب مصالح کامپوزیتی با الیاف شیشه می‌باشد که این خاصیت نشان می‌دهد که در صورت ایجاد کمانش مخازن در زمان تخلیه آن‌ها، به سبب درست کار نکردن شیرهای تخلیه رخ داده باشد با حذف بارگذاری مخازن با آسیب بسیار کم‌تر به حالت اولیه خود بازگشته و قابلیت استفاده مجدد را خواهند داشت.



شکل ۱۵- ظرفیت کمانش اولیه در تست اولیه و تکرار

۵-۳- نتایج مربوط به ظرفیت کمانش کلی، روش

آزمایشگاهی نمونه‌ها در تست اولیه و تکرار تست

نتایج مربوط به ظرفیت کمانشی کلی نمونه‌ها در جدول (۲) و شکل (۱۶) ارائه شده است.

جدول ۲- ظرفیت کمانش اولیه و کلی در تست اولیه و تکرار

نمونه	L/R	Per (kPa)	
		کمانش اولیه	کمانش کلی
SGF1-P	۱	۹/۴۶	۱۱/۱۸
SGF1-R	۱	۸/۷	۱۰/۲
SGF2-P	۱/۵	۸	۹
SGF2-R	۱/۵	۷/۲۲	۸/۵
SGF3-P	۳	۴/۴۸	۵/۵۴
SGF3-R	۳	۳/۸	۵/۳۶

۵-۲- مقایسه نتایج مربوط به ظرفیت کمانش اولیه، روش

آزمایشگاهی نمونه‌ها در تست اولیه و تکرار تست

در این بخش نتایج مربوط به ظرفیت کمانشی نمونه‌ها به روش آزمایشگاهی در نمونه‌های SGF1,2,3-P پس از این که تحت بار فشار خارجی قرار گرفتند و رفتار کمانشی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند، مجدداً تحت بارگذاری فشار یکنواخت خارجی قرار گرفته و ظرفیت کمانشی آن‌ها بررسی و نتایج این تست‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند که این نتایج در جدول (۳) و شکل (۱۵) ارائه شده است.

مطابق جدول (۳) در نمونه SGF1-P، اولین کمانش در ۹/۴۶ کیلوپاسکال رخ داده است در حالی که در تکرار تست، نمونه SGF1-R در ۸/۷ کیلوپاسکال، کمانش کرده یعنی ۸/۰۳٪ کاهش در ظرفیت کمانش وجود دارد. نمونه SGF2-P، در تست اولیه، کمانش در ۸ کیلوپاسکال رخ داده است در حالی که در تکرار تست، نمونه SGF2-R در ۷/۲۲ کیلوپاسکال کمانش کرده یعنی ۹/۷۵٪

محل‌ها از تکیه‌گاه خارج که در این حالت بارگذاری متوقف گردیده است. بر اساس نتایج جدول (۲)، نمونه‌ها در تست اولیه و هم در تکرار تست مانند ظرفیت کمانش اولیه، از ظرفیت کمانش کلی خوبی برخوردار بوده و به تناسب در تکرار تست‌ها نتوانستند ظرفیت کمانش کلی اولیه را تکرار نمایند.

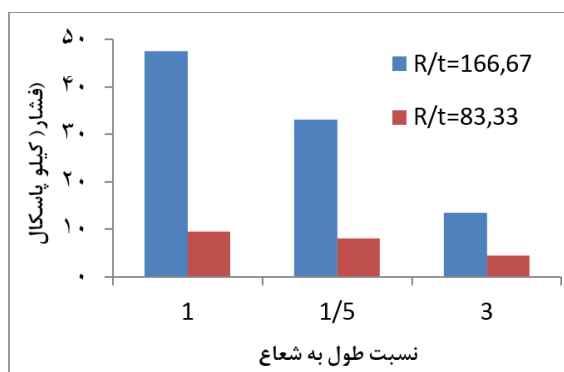
طبق نتایج جدول (۲)، کمانش کلی در نمونه‌ها بین یک تا ۲ کیلوپاسکال بعد از اولین کمانش ایجاد شده و بالاترین اختلاف در تشکیل کمانش کلی، مربوط به مخزن با L/R برابر یک است. تمام نمونه‌ها در آزمایشگاه، کمانش کلی رخ داد و نمونه‌ها پس از کمانش کلی ظرفیت‌شان بالاتر رفته و در مقابل بار وارده مقاومت نمودند تا آنجائی که نمونه به ظرفیت کامل خود رسیده یا در برخی

جدول ۳- مقایسه ظرفیت مخازن GFRP با طول متفاوت

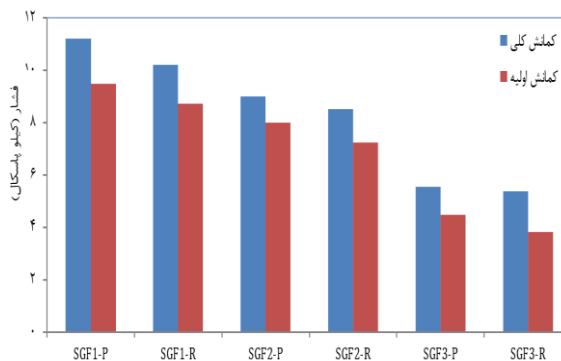
Lab SGFP(n/1)	Lab/ Riks	Pcr (kPa)			L/R	نمونه
		آزمایشگاه (Lab)	تحلیل غیرخطی (Riks)	تحلیل خطی Eigenvalue		
٪۱۰۰	٪۸۶	۹/۴۶	۱۱	۱۸/۷۷	۱	SGF1-P
٪۴۸/۵۷	٪۸۰	۸	۱۰	۱۲/۹۷	۱/۵	SGF2-P
٪۴۷/۳۶	٪۷۸/۶۰	۴/۴۸	۵/۷	۷/۵۱	۳	SGF3-P

جدول ۴- مقایسه ظرفیت مخازن GFRP تست اولیه و تکرار تست

Lab R/P	Lab/ Riks	Pcr (kPa)			L/R	نمونه
		آزمایشگاه (Lab)	تحلیل غیرخطی (Riks)	تحلیل خطی Eigenvalue		
٪۹۱/۹۷	٪۸۶	۹/۴۶	۱۱	۱۸/۷۷	۱	SGF1-P
	٪۷۹/۰۹	۸/۷				SGF1-R
٪۹۰/۲۵	٪۸۰	۸	۱۰	۱۲/۹۷	۱.۵	SGF2-P
	٪۷۲/۰۲	۷/۲۲				SGF2-R
٪۸۴/۸۲	٪۷۸/۶۰	۴/۴۸	۵/۷	۷/۵۱	۳	SGF3-P
	٪۶۶/۶۷	۳/۸				SGF3-R



شکل ۱۷- نمودار ظرفیت کمانش با نسبت R/t متفاوت



شکل ۱۶- نمودار ظرفیت کمانش اولیه و کلی در تست اولیه و تکرار

۴-۵- نتایج تعداد مود کمانشی تحلیل عددی و آزمایشگاهی

جهت بررسی تعداد مدهای کمانش، تعداد مودها در آنالیز تحت تحلیل کمانش در نرم افزار ABAQUS مربوط به مد کمانش اول و تعداد مدهای کمانشی نمونه‌ها در تست اولیه و تکرار در آزمایشگاه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- تعداد مدهای کمانشی در روش عددی و آزمایشگاهی

نمونه	L/R	n	
		آزمایشگاه	عددی
SGF1-P	۶	۹	۱
SGF1-R			
SGF2-P	۵	۷	۱/۵
SGF2-R			
SGF3-P	۴	۵	۳
SGF3-R			

نتایج جدول (۵)، اختلاف در تعداد مودها به روش آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد و این اختلاف در نمونه‌ها با L/R برابر یک، به سه مد اختلاف و در L/R برابر یک و نیم، به دو مد اختلاف و در L/R برابر سه، به یک مد را نشان می‌دهد که بدین معنا است که با افزایش طول مخازن، اختلاف در تعداد مدها به روش عددی و آزمایشگاهی بسیار کاهش می‌یابد. که با یافته‌های موجود در مقالات مطابقت دارد و بسیار جالب بود که تعداد مدهای کمانشی در تست اولیه و تکرار تست نمونه‌ها یکسان بودند.

۵-۵- تأثیر R/t در ظرفیت کمانشی مخازن GFRP

بررسی پدیده کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای به پارامترهای خاصی از جمله هندسه قطعه، مشخصات ماده، تنش‌های پسماند قطعه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری بستگی دارد. که در تحقیق حاضر با عنایت به ثابت بودن شعاع و ضخامت فقط پارامتر L/R بحث و بررسی شد و ضرورت داشت که تأثیر R/t در ظرفیت کمانشی مخازن هم اشاره کوتاهی داشته باشیم برای این کار نتایج ظرفیت کمانشی، مربوط به استوانه‌ای به قطر ۲۰۰ میلی‌متر، با R/t برابر ۸۳/۳۳، با نسبت‌های L/R متناسب با قطر ۴۰۰ میلی‌متر (تحقیق حاضر) مقایسه، که در شکل (۱۷) آورده شده است و نتایج نشان می‌دهند با افزایش R/t، ظرفیت مخازن کاهش خواهد یافت. که با یافته‌های موجود در مقالات مطابقت دارد.

۶- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر بررسی ظرفیت کمانشی به روش آزمایشگاهی و عددی و بررسی ظرفیت کمانشی در تکرار آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای GFRP با شعاع ثابت و طول متفاوت بود که می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

- رفتار پوسته‌ها در مقابل افزایش فشار حالت پایدار را نشان می‌دهد و روند افزایش تغییر شکل در مقابل افزایش فشار نشان‌دهنده رفتاری با شیب ثابت است.
- نتایج در آزمایشگاه باوجود بعضی از ناکاملی‌ها هندسی و فیزیکی کم‌تر از نتایج عددی است ولی انطباق خوبی با هم دارند.
- بررسی تأثیر افزایش ارتفاع مخزن GFRP نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع مخزن ظرفیت کمانشی کاهش می‌یابد.
- بررسی نتایج تست تکرار نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ها در تکرار تست نتوانستند ظرفیت اولیه را تکرار نمایند ولی از ظرفیت خوبی برخوردار بودند.
- بررسی نتایج و تحقیقات نشان می‌دهند که مخازن GFRPها از خاصیت الاستیک خوبی برخوردار می‌باشند طوری که باوجود ایجاد ترک در تست اولیه، در تکرار تست هم، پس از باربرداری به حالت اولیه خود برگردند که این خاصیت در فلزات وجود ندارد.
- بررسی نتایج نشان می‌دهد که کمانش کلی با اختلاف کمی از کمانش اول صورت گرفته است و نمونه‌ها هم در تست اولیه و هم در تکرار تست از ظرفیت کمانش کلی خوبی برخوردار می‌باشند.
- بررسی نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش طول مخزن تعداد اختلاف در تعداد مدهای کمانشی به روش عددی و آزمایشگاهی بسیار کم‌تر شده است.
- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که تعداد مدهای کمانشی در تست اولیه و تکرار تست مخازن یکسان خواهد بود.
- نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌سبب خاصیت الاستیک خوب GFRPها جایگزین خوبی برای مخازن فلزی باشند.

۷- قدردانی

از مدیریت و همکاران محترم کارخانه فراسان در تهیه نمونه‌های تست (مخازن GFRP) کمال تشکر و امتنان را داریم. از آقای مهندس جعفر عظیم‌زاده مسئول آزمایشگاه سازه‌های جدار نازک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، در همکاری خوبشان در انجام تست نمونه‌های آزمایشگاهی نهایت قدردانی را می‌نماییم.

۸- مراجع

باقری ب، عباسی م، کتابچی م، "مرجع کاربردی نرم‌افزار آباکوس"، انتشارات کیان رایانه سبز، تهران، ۱۳۹۱.

کامجو م، "بررسی آزمایشگاهی بیضی‌شدگی و پیوستگی جداره مقاطع لوله‌های پلیمری GRP و بتن با مقاومت‌های متفاوت"،

منتشر شده در کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست، هزاره سوم، ۱۳۹۵.

- Abrar F, Majid M, Ridzuan M, Syayuthi A, "Impact Responses, Compressive and Burst tests of Glass/Epoxy (GRE) Composite Pipes", Journal of Physics, Conference Series, Iop Publishing, 2017.
- Aydin AC, Yaman Z, Ağcakoca E, Kılıç M, Maali M, Dizaji AA, "CFRP Effect on the Buckling Behavior of Dented Cylindrical Shells", International Journal of Steel Structures, 2020, 20 (2), 425-435.
- Donnell LH, "A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending", Trans, A SME, 1934, 56 (11), 795-806.
- Hur S, Son H, KWeon J, Choi J, "Post Buckling of Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure", , 2008, .
- Khot NS, "Buckling and Post Buckling Behavior of Composite Cylindrical Shells under Axial Compression", AIAA Journal, 1970, 8, 229-235.
- Korucuk FMA, Maali M, Kılıç M, Aydın AC, "Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells", Thin-Walled Structures, 2019, 143, 106259.
- Maali M, Kılıç M, Yaman Z, Ağcakoca, Aydın AC, "Buckling and post-buckling behavior of various dented cylindrical shells using CFRP strips subjected to uniform external pressure: comparison of theoretical and experimental data", Thin-Walled Structures, 2019, 137, 29-39.
- Moreno H, Douchin B, Collembet F, Choqueuse D, Davies P, "Influence of Winding pattern on the Mechanical Behavior of Filament Wound Composite Cylinders under External Pressure", Journal of Composites Science and Technology, 2008, 68, 1015-1024.
- Najand N, Ebrahimi Fakhari H, Abolghasemi A, Hashemi P, "The effects of the production parameters of the extruded tubes on the buckling strength of cylindrical containers", Production & Manufacturing Research, 2020, 8 (1), 196-221.
- Shen HS, "Boundary Layer Theory for the Buckling and Post buckling of Anisotropic Laminated Cylindrical Shells, Part I: Prediction under Axial Compression", Composite Structures, (In press.)
- Tsouvalis NG, Zafeiratou AA, Papazoglou VJ, "The Effect of Geometric Composite Laminated Cylinders under External Imperfections on the Buckling Behavior of hydrostatic pressure", Journal of Composites, 2003, 34, 217-226.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation on the Buckling Behavior of GFRP Thin-walled Cylindrical Shells under External Pressure

Hossein Showkati*, Ali Pashaei Taghliabad

Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 15 March 2020; Accepted: 19 October 2020

Keywords:

Cylindrical tanks, Geometric parameter, Buckling capacity, GFRP materials, External pressure.

1. Introduction

Structural applications of composite materials are used in various structures of the oil and gas industry, water supply and sewage systems and a wide range of industries, such as marine, aerospace, and military industries. Experimental and numerical studies show that structural buckling failure is the major dangerous action for thin-walled cylindrical shells. Uniform lateral loading in tanks occurs when tanks are in a state of liquid discharge. Moreover, if special contrivances such as the drainage valves do not work or properly, then buckling phenomenon and will cause an overall failure in the tank. There is extensive research on the buckling and post-buckling of thin-walled steel tanks under external pressure, but research on composite cylindrical shells is very low. The only studies in the context of buckling of external pressure are done, by Hur et al. (2008) and Moreno et al. (2008), with the difference that in both studies, the type of material and loading is different from the present study. In this paper, the effect of the L/R geometrical parameters on the buckling behavior of GFRP cylindrical tanks will be studied.

2. Methodology

2.1. FE modeling

The Abaqus software (2012) has been used to provide finite element modeling. The specimens are models in 200 mm in radius and 200, 300 and 600 mm in height and 1, 2 mm thick. In modeling the multilayer composite cylindrical shell in the Abaqus software for the mesh used of four-sided and four-node elements (S4R), which is a two-curved element and has the ability to analyze large strains. The loading and boundary conditions of the model are determined in the loading environment. To apply external pressure, the inner surface of the cylinder is first selected. The supporting conditions of the samples are arranged in detail. The bottom part is tangential in the three radial, tangential, and axial directions. At the top, the specimens have only radial and tangential Constraint, and the axial movement is free. Since linear buckling analysis does not allow prediction of post-buckling behavior, a nonlinear geometric analysis using Riks algorithm was used to find out the behavior of buckling.

2.2. Laboratory investigation

2.2.1. Investigation of buckling behavior of tanks

In order to determine the buckling capacity of the GFRP tanks, three specimens of the same diameter and thickness and only length variable were prepared and tested under external pressure. By decreasing the pressure inside the tank, the buckling begins gradually in the shell body, with continued loading and by

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.showkati@urmia.ac.ir (Hossein Showkati), a.pashaei@urmia.ac.ir (Ali Pashaei-Taghliabad).

increasing the external pressure of the small cracks along with the mild sound created in the tank body and increasing the number of environmental waves after reaching the collapse stage. Displacement- pressure diagrams are given for the samples.

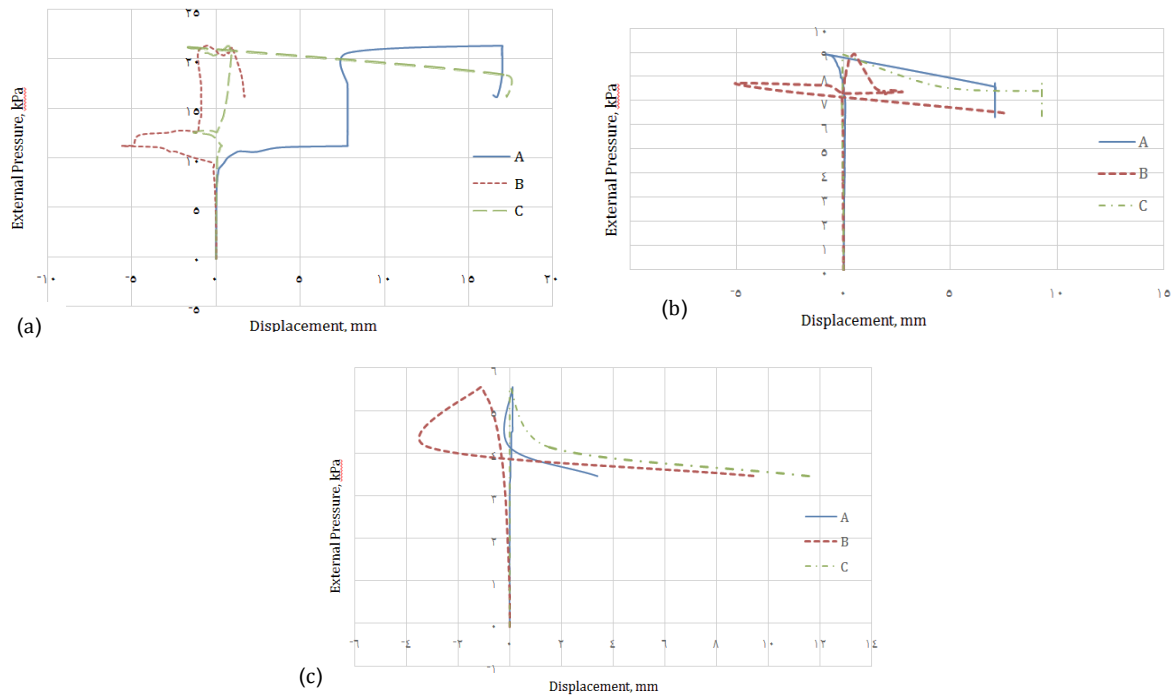


Fig. 1. Pressure- displacement diagram: a) SGF1- P Specimen, b) SGF2- P Specimen, c) SGF3- P Specimen

2.2.2. Investigation of buckling and elastic behavior of tanks in repeated test

To investigate the buckling capacity of thin-wall composite shells under uniform external pressure due to repeated buckling at this stage, two previous laboratory samples were subjected to external pressure loading after the test for the buckling capacity and elastic properties of GFRP tanks were repeated at uploading and downloading to be examined. Displacement- pressure diagrams are given for the specimen.

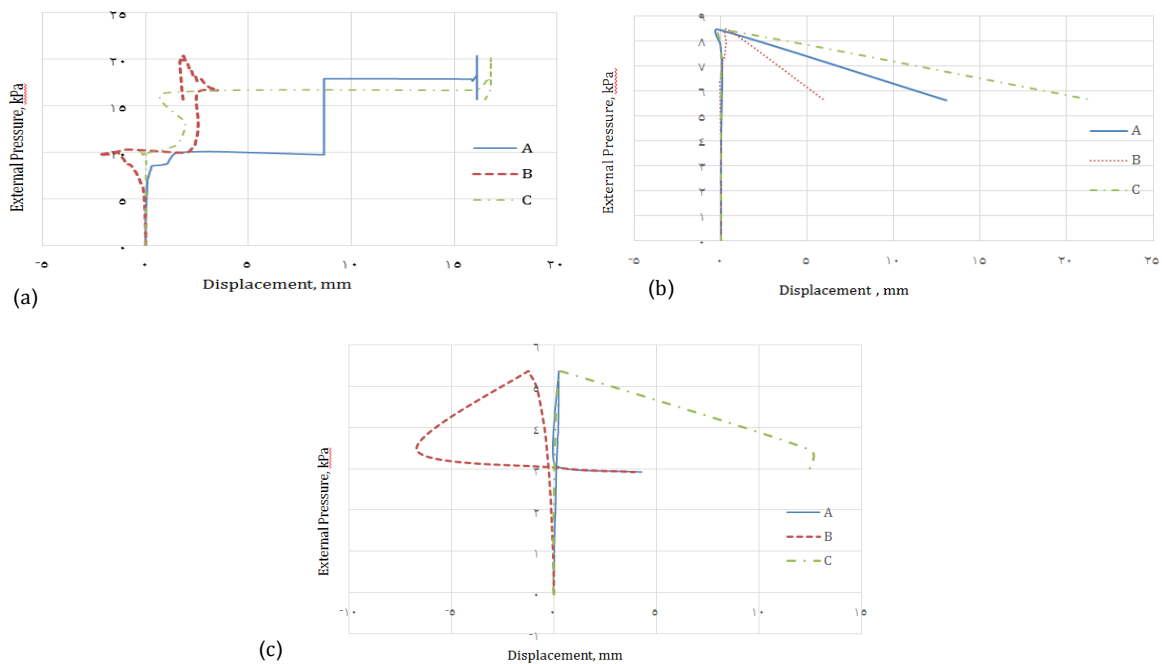


Fig. 2. Pressure- displacement diagram: a) SGF1- R Specimen, b) SGF2- R Specimen, c) SGF3- R Specimen

3. Results and discussion

3.1. Results of the numerical and Laboratory methods of the Specimens in the initial test:

According to Fig. 1, the buckling capacity in the laboratory compared with the numerical method. In this comparison, the laboratory buckling capacity ratio numerical showed a decrease in buckling capacity in SGP1 sample by 14.69%, SGF1 sample by 14% and 14.69%, SGF2 sample and in SGF3 sample by 21, 4%. This is due to some physical and geometric disadvantages, but they are well adapted. And by increasing the L/R ratio from 1 to 1.5 the tank capacity reaches to 84, 75% (15.25% decreases in buckling capacity) and from 1 to 3 the tank capacity reaches to 47, 36% (52, 64% decreases in buckling capacity).

3.2. Results of the sample Laboratory method in the initial test and repeated test:

In this section, the results of the buckling capacity of the specimens were investigated by SGF1, 2, 3-P specimens after being subjected to external pressure and their buckling behavior evaluated again under uniform external pressure loading. The tests were evaluated and compared with the results presented in Figure 2. According to Fig. 1 and 2, SGF1-P sample, buckling occurred at 9,46 kPa while in the same test repeat it decreased to 8,7 kPa, that's mean 8,03% decreased in capacity, and in SGF2-P sample buckling at 8 kPa while the test sample repeated occurred at 7,22 kPa buckling, with a 9,75% decrease in buckling capacity and in SGF3-P sample buckling at 4,48 kPa while the test sample repeated buckling occurred at 3,8 kPa, with a 15,18% decrease in buckling capacity, that means the specimens in the repeat test were unable to repeat the initial buckling capacity, but it was interesting to note that they also had a good buckling capacity and returned to the original after downloading. That shows the good elastic properties of composite tanks.

3.3. Results of numerical and Laboratory buckling modes:

According to the studies, there is a difference in the number of investing and numerical methods and this difference in samples with L/R equals 1, three modes and in L/R equals 1, 5, two modes and in L/R equals 3, one mode which means that As the length of the tank increased, the difference in the number of modes was reduced by numerical and Laboratory methods.

4. Conclusions

The present study was to investigate the buckling capacity of the numerical and experimental data and to investigate the buckling capacity in repeated experiments on GFRP cylindrical specimens with different radii and lengths, which can be summarized as follows.

Shell behavior against increasing pressure showed a steady-state, and the trend of displacement increase versus pressure increase indicates a behavior with a constant gradient. Laboratory Results although some of the geometrical and physical imperfections are lower than the numerical results, but they are in good agreement. 3- Examination of the effect of increasing the height of the GFRP tank shows that with increasing tank height, the buckling capacity decreases. Examination of the results of the repeated test of the samples showed that the samples in the repeat test could not replicate the initial capacity but had good capacity. The results showed that the GFRP tanks had good elastic properties so that they could return to their original state after unloading, although they did not show in the metals. The results of the research showed that the number of buckling modes decreased significantly with the increase in tank length. The results showed that the buckling modes were the same in the initial test and the repeated test of the tanks. The results show that due to the good elastic properties of GFRPs, they are a good substitute for metallic tanks.

5. References

- Hur S, Son H, KWeon J, Choi J, "Post buckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure", *Composite Structures*, 2008, 86 (1-3), 114-124.
- Moreno H, Douchin B, Collembet F, Choqueuse D, Davies P, "Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure", *Journal of Composites Science and Technology*, 2008, 68, 1015-1024.
- Bagheri B, Abbasi M, Ketabchi M, "Abaqus software application reference, kian publications green press", Tehran, 2012.