

## Laboratory and Numerical Investigations of the Effect Geometric Parameters on the Buckling Capacity of GFRP Thin-walled Cylindrical Shells under External Pressure

Hossein Showkati<sup>1\*</sup>, Ali Pashaei taghlidabad<sup>2</sup>

1- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, urmia, Iran

2- Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, International Pardis of Urmia University, Urmia, Iran

### ABSTRACT

*Buckling is one of the important issues in determining the mechanical behavior of cylindrical shells, especially composite shells. What makes the buckling matter important in composite cylindrical shells is the complexity of the behavior of these structures under the influence of a variety of special loads such as buckling under external pressure load. Uniform lateral loading in tanks occurs when tanks are in the 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. In this research, the air suction system is used in order to apply external pressure and study the buckling behavior of specimens. As the buckling occurs, tiny cracks are created with a mild sound in the shell wall and in the extreme stage the loading process stops when it collapses. In this paper, the effect of geometric parameters, such as the  $R/t$  and  $L/R$  of a composite tank under external pressure, on buckling behavior is investigated. Obtained results are compared with software and theoretical results. The results showed in specimen of the same length, by increasing the geometric parameter  $R / t$ , the buckling capacity of the shells decreases and the number of buckling modes increases and by increasing the geometric parameter  $L / R$ , the buckling capacity of the shells increases and the number of buckling modes decreases.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 July 2020  
**Revise Date:** 07 October 2020  
**Accept Date:** 23 January 2021

### Keywords:

*Buckling,  
Composite cylindrical shells,  
Geometric Parameters,  
Uniform external pressure,  
Buckling Capacity.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.240837.2199>

\*Corresponding author: Hossein Showkati  
Email address: h.showkati@urmia.ac.ir

## تحقیقات آزمایشگاهی و عددی تاثیر پارامترهای هندسی در ظرفیت کمانشی پوسته های استوانه ای کامپوزیتی جدار نازک تحت بارگذاری فشار خارجی

حسین شوکتی<sup>۱\*</sup>، علی پاشایی تقلیدآباد<sup>۲</sup>

۱- استاد، گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری عمران-سازه، پردیس دانشگاهی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

کمانش یکی از موضوعات مهم در تعیین رفتار مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای به ویژه پوسته‌های کامپوزیتی است. آنچه بررسی این موضوع را در پوسته های استوانه ای کامپوزیتی حائز اهمیت می‌سازد، پیچیدگی رفتار سازه ای این نوع ساختارها تحت اثر انواع بارگذاری های ویژه ای مانند کمانش تحت بار فشار خارجی است. بارگذاری فشار جانبی یکنواخت در مخازن موقعی رخ می دهد که مخازن در حالت تخلیه مایعات ذخیره شده در آنها می باشند. و اگر تمهیدات خاصی مانند باز کردن شیرهای تخلیه انجام نگیرد و یا درست عمل نکنند در اینصورت در مخازن کمانش اتفاق خواهد افتاد و موجب خرابی کلی مخازن خواهد شد. در این تحقیق جهت بررسی رفتار کمانشی نمونه های آزمایشگاهی تحت اثر فشار یکنواخت جانبی، از دستگاه مکش هوا استفاده می شود. همزمان با کمانش، ترک های ریز همراه با صدای خفیف در جداره پوسته ایجاد گردیده و پس از رسیدن به مرحله فرو ریختگی روند بارگذاری متوقف می-گردد. در این مقاله تاثیر پارامترهای هندسی بی بعد  $R/t$  و  $L/R$  تحت فشار بیرونی بر رفتار کمانشی آن بررسی شده است. رفتار کمانشی این پوسته ها تحت فشار خارجی در آزمایشگاه مورد بررسی و با نتایج نرم افزاری و تئوری مورد مقایسه قرار می گیرد. نتایج نشان داد در نمونه ها با طول مساوی با افزایش پارامتر هندسی  $R/t$ ، ظرفیت کمانشی پوسته ها کاهش و تعداد مدهای کمانشی افزایش می یابد و با افزایش پارامتر  $L/R$  ظرفیت کمانشی پوسته ها افزایش و تعداد مدهای کمانشی کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: کمانش، پوسته استوانه کامپوزیتی، پارامترهای هندسی، فشار خارجی یکنواخت، ظرفیت کمانشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.240837.2199">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.240837.2199</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.240837.2199	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۱/۰۴	۱۳۹۹/۱۱/۰۴	۱۳۹۹/۰۷/۱۶	۱۳۹۹/۰۵/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حسین شوکتی		
				h.showkati@urmia.ac.ir		

## ۱- مقدمه

موضوع کمانش پوسته ها، عموماً در رشته های مهندسی مکانیک، علوم دریایی و سازه های دریایی، مهندسی عمران، مهندسی شیمی و مهندسی هوا و فضا مطرح می گردد. کاربرد این موضوع را می توان برای مثال در طراحی ستون های فلزی، مخازن تحت مکش، لوله های طولی در دیگ های بخار جهت عبور گازهای داغ، بدنه زیردریایی، برخی از اجزاء سازه های کشتی ها، طراحی فضاییها و صنایع خودروسازی، به خصوص سازه هایی 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 می تواند باعث کمانش و شکست سازه شود.

مطالعات تجربی و عددی نشان می دهند که شکست ناشی از کمانش سازه ای، عامل اصلی خطر در پوسته های استوانه ای جدار نازک است. بارگذاری فشار جانبی یکنواخت در مخازن موقعی رخ می دهد که مخازن در حالت تخلیه مایعات ذخیره شده در آنها می-باشند. منشا این نوع بارگذاری اثر بار باد و نیز سرعت تخلیه محتویات مخزن می باشد و اگر تمهیدات خاصی مانند باز کردن شیرهای تخلیه انجام نگیرد و یا درست عمل نکنند در اینصورت در مخازن کمانش اتفاق خواهد افتاد و موجب خرابی کلی مخازن خواهد شد.

بررسی پدیده کمانش در پوسته های استوانه ای به پارامترهای خاصی از جمله هندسه قطعه، مشخصات ماده، تنش های پسماند قطعه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری بستگی دارد.

## ۱-۱- مزایای استفاده از مخازن کامپوزیتی

تولید و به کارگیری مخازن کامپوزیتی در حوزه های مختلف صنعت، پروژه های عمرانی و ... هیچ گونه مخاطره زیست محیطی ندارد علت این امر از آنجا نشأت می گیرد که کلیه مواد اولیه مورد استفاده در ساخت این مخازن، پس از انجام واکنش شیمیایی و تبدیل شدن به محصول (مخزن) از حالت خنثی برخوردار بوده و به همان شکل در محیط باقی مانده و هیچ گونه واکنشی از خود نشان نمی دهند. همچنین با توجه به اینکه یکی از معضلات اساسی لوله ها و مخازن فولادی و چدنی که در صنعت آب مورد استفاده قرار می گیرند، موضوع زنگ زدن است. زنگ زدگی موجب فرسودگی لوله یا مخزن و ترکیدن آن و نشت آب می شود، در این حالت هزینه تعویض و یا تعمیر بسیار بالایی خواهند داشت اما لوله ها و مخازن فایبرگلاس به دلیل پلیمر بودن آن ها از کوچک ترین خطر زنگ زدگی برخوردار نبوده و به طور متوسط از عمر بهره برداری پنجاه ساله برخوردار می باشند.

## ۱-۲- پیشینه تحقیق

<sup>1</sup>GFRP: مخفف عبارت پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه می باشد. مخازن GFRP به دلیل مزایای بسیار زیادی که نسبت به مخازن ساخته شده با مصالح دیگر دارند، روز به روز مورد استقبال بیشتری قرار می گیرند و در پروژه ها استفاده های فراوانی پیدا کرده اند. از این رو لازم است مطالعات و تحقیقات دقیق تری بر روی این گونه مخازن که رفتار متفاوتی نسبت به مخازن بتنی و فولادی دارند صورت گیرد. تحقیقات گسترده در زمینه کمانش و پس کمانشی مخازن فولادی جدار نازک تحت فشار خارجی وجود دارد ولی تحقیقات در زمینه پوسته های استوانه ای 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 پوسته های جدار نازک کامپوزیتی بعمل آید در بررسی تحقیقات در زمینه پوسته های کامپوزیتی، بیشتر به بررسی رفتار کمانشی و پس کمانشی مخازن جدار نازک در حالت های مختلف چیدمانی، استفاده یا عدم استفاده از تقویت کننده، تاثیر عیوب اولیه و عیوب هندسی بر فشار کمانشی، تاثیر نوع بارگذاری و شرایط مرزی بر فشار کمانشی و ... پرداخته شده است. و موضوع تاثیر پارامترهای هندسی مخازن کامپوزیتی بر رفتار کمانشی آن کمتر توجه شده است. از جمله تحقیقات صورت گرفته:

<sup>1</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer

دائل در سال ۱۹۳۴ [۱]، 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.

خوت در سال ۱۹۷۰ [۲]، روشی برای رفتار پس کمانشی پوسته های استوانه ای کامپوزیتی چند لایه با در نظر گرفتن ناکاملی ارائه کرد و نتیجه گرفت که تاثیر ناکاملی اولیه در کمانش پوسته های استوانه کامپوزیتی کمتر از پوسته های ایزوتروپیک است.

تسووالیس و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۳]، اثر عیوب هندسی و همچنین تاثیر شرایط مرزی به همراه عیوب بر رفتار کمانش مخازن کامپوزیتی لایه ای تحت فشار خارجی هیدروستاتیک را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اثر عیوب بر رفتار کمانشی زیاد است و برای داشتن یک پیش بینی درست باید علاوه بر آنالیز خطی، آنالیز اجزای محدود غیر خطی نیز انجام شود.

مورینو و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۴]، اثر الگوهای پیچشی بر رفتار مکانیکی سیلندرهای 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 تاثیر آشکاری ندارد. آنها همچنین دریافتند که مدهای کمانشی برای ابعاد و خصوصیات نمونه مورد استفاده، مستقل از الگوی پیچش می باشد.

های شن در سال ۲۰۰۸ [۵]، تئوری لایه مرزی را برای بررسی کمانش و پس کمانش پوسته های استوانه ای لمینتی تحت بار محوری و بار فشاری یکنواخت بکار برد او تغییر شکل غیر خطی قبل از کمانش و همچنین ناکاملی را در نظر گرفت و تکنیک آشفتگی (Perturbation) را برای بارهای کمانشی و مسیر تعادلی پس کمانش را بکار برد و نتیجه گرفت که خواص غیر ایزوتروپیک تاثیر مهمی روی بار کمانشی و رفتار پس کمانشی پوسته های استوانه ای تحت بار محوری و فشاری یکنواخت دارد و نشان داد. پارامترهای هندسی و ناکاملی هندسی بر روی مشخصات پس کمانشی تاثیر مهمی دارند.

هور و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۶]، رفتار پس کمانشی سیلندرهای کامپوزیتی تحت فشار هیدروستاتیک را مورد بررسی قرار دادند. به این ترتیب که ۵ عدد سیلندر از جنس نوارهای پیش آغشته کربن اپوکسی (USN ۱۲۵) با زاویه [۹۰ و ۰] مورد تست فشار هیدروستاتیک خارجی قرار گرفت و نتایج حاصل از تست با آنالیز اجزای محدود مقایسه شد. به این نتیجه رسیدند هیچیک از سیلندرها نتوانستند بار کمانشی اولیه خود را بعد از شکست های موضعی که بعد از کمانش رخ داد، تکرار کنند.

ح. اریکان در سال ۲۰۱۰ [۷]، با انجام آزمایشاتی آنالیز گسیختگی لوله های GFRP با انتهای باز دارای ترک های مورب با زوایای مختلف را تحت فشار داخلی انجام داد نمونه های او شامل هفت لوله با زوایای پیچش  $[\pm 55]$  و زوایای ترک ۰ و ۱۵ و ۳۰ و ۶۰ و ۴۵ و ۷۵ و ۹۰ بود و مقاومت نمونه ها با اعمال فشار داخلی بر حسب زوایای ترک تعیین شد و وابستگی مقاومت شکستگی به زوایای ترک بررسی شد و با این نتیجه رسیدند که ترک با زاویه ۹۰ درجه بیشترین مقاومت گسیختگی را داشت.

دی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۸]، مخازن کامپوزیتی جدار نازک رشته پیچ شده با کاربردهای زیردریایی را با آنالیز اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. هدف از این مطالعه، مقایسه میزان مقاومت در مقابل بار کمانشی در دو حالت با تقویت کننده و بدون آن می باشد سیلندرها از جنس کربن اپوکسی و با چیدمان  $(\pm 30 \text{ و } 90)$ ،  $(\pm 45 \text{ و } 90)$  و  $(\pm 60 \text{ و } 90)$  می باشند و به این نتیجه رسیدند که چیدمان  $(\pm 60 \text{ و } 90)$  بیشترین بار کمانشی را دارا بود.

م. وکیلی و ح. شوکتی در سال ۲۰۱۶ [۹]، بر روی تاثیر استفاده از رینگ تقویت کننده CFRP بر روی کمانش پافیلی پوسته های استوانه ای تحقیق انجام داده اند. این نوع کمانش در اثر تاثیر توام فشار داخلی بالا و نیروی محوری در پوسته های استوانه ای بوجود می آید. در این تحقیق استفاده از CFRP بعنوان روش جدید جهت تقویت پوسته های استوانه ای معرفی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از CFRP جهت تقویت پوسته ها تاثیر مثبت داشته و این نوع تقویتی در محل ایجاد کمانش پافیلی بهترین نتیجه مقاوم سازی را می دهد.

م. کامجو در سال ۲۰۱۶ [۱۰]، رفتار جداره پوسته های GRP بصورت توخالی و پر شده با بتن تحت بارگذاری جانبی فشاری قرار داده و رفتار جداره آنها تحت بار مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفتند که در لوله های خالی پس از پارگی الیاف و گسیخته شدن چسب

یا رزین شکست رخ می دهد. در حالی که برای نمونه های پر شده با بتن، مصالح پلیمری شیشه آسب کمتری دیده بودند و لوله های پر شده با بتن از لحاظ شکل پذیری و مقاومت عملکرد خوبی داشتند در حالی که نمونه های خال بیضی شدگی بیشتری نسبت به توپر از خود نشان دادند.

م.س ابرار و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۱۱]، بررسی های آزمایشگاهی روی رفتار پوسته های کامپوزیتی GFRP تولید شده به روش پیچش الیاف تحت فشار هیدرواستاتیک و بار محوری در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد انجام دادند. شش تست با نسبت های مختلف تنش های محوری و حلقوی به صورت بار محوری خالص (۰:۱) و (۰/۵:۱) و (۱:۱) و (۲:۱) و (۴:۱) و بار حلقوی خالص (۱:۰) آزمایش شدند آنها سه مد گسیختگی مجزا مشاهده کردند به این صورت گسیختگی کششی محوری در حالت بارگذاری محوری خالص، نشست در حالت بارگذاری محوری غالب و نشست موضعی در بارگذاری حلقوی غالب روی داد و با افزایش دما تاثیرات قابل ملاحظه ای روی مدهای گسیختگی و تنش ها حاصل شد.

تحقیقات صورت گرفته در زمینه مخازن کاملاً کامپوزیتی بسیار کم ولی در زمینه مخازن فلزی و یا استفاده از مصالح کامپوزیت بعنوان تقویتی در مخازن فلزی، بسیار زیاد می باشد، از قبیل: آ. آیدین و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۲]، ف. کوروک و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۳]، م. مالی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۴] و ن. نژند و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۵].

در میان این تحقیقات تنها مطالعه صورت گرفته در زمینه بحث کماتش مخازن تحت فشار خارجی، توسط هور و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۶]، است باین تفاوت که بار اعمالی در تحقیق فوق ترکیبی از فشار خارجی و محوری می باشد. در حالی که تحقیق حاضر تحت فشار خارجی یکنواخت بوده و نتایج آن قابل تعمیم به لوله گذاری نیز می باشد. در این مقاله، اثر پارامترهای هندسی  $R/t$  و  $L/R$  در رفتار کماتش مخازن استوانه ای GFRP تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- روابط تحلیلی

معادله دیفرانسیل پوسته های استوانه ای جدار نازک توسط Donnell بصورت معادله (۱) ارایه گردیده است.

$$D\nabla^8 w + \frac{Et}{R^2} w_{,xxxx} + \frac{1}{R} q \nabla^4 w_{,\theta\theta} = 0 \quad (1)$$

که در آن  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  و  $w$  تغییر مکان شعاعی بوده و  $x$  مختصات محوری و  $\theta$  مختصات شعاعی پوسته می باشد. از حل رابطه فوق برای بار کماتش بحرانی با شرایط مرزی کلاسیک، رابطه (۲) بدست می آید.

$$P_{cr} = E \frac{t}{R} \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{\pi R}{L} \right)^2 + n^2 \right]^2 \left( \frac{t}{R} \right)^2}{n^2} + \frac{\left( \frac{\pi R}{L} \right)^4}{n^2 \left[ \left( \frac{\pi R}{L} \right)^2 + n^2 \right]^2} \right\} \quad (2)$$

که با کمینه سازی  $P_{cr}$  نسبت به  $n$  رابطه (۳) حاصل می شود.

$$n^6 \frac{(n^2-1)^2}{(n^2-2/3)} = 36\pi^4 (1-\nu^2) \left( \frac{R}{L} \right)^4 \left( \frac{R}{t} \right)^2 \quad (3)$$

که پس از ساده سازی می توان به رابطه (۴) رسید.

$$n = \sqrt[4]{\frac{6\pi^2 \sqrt{1-\nu^2}}{\left( \frac{L}{R} \right)^2 \left( \frac{t}{R} \right)}} \approx 2.74 \sqrt{\frac{R}{L}} \sqrt[4]{\frac{R}{t}} \quad (4)$$

که  $n$  تعداد موجهای محیطی در بدنه پوسته در حالت کماتش می باشد.

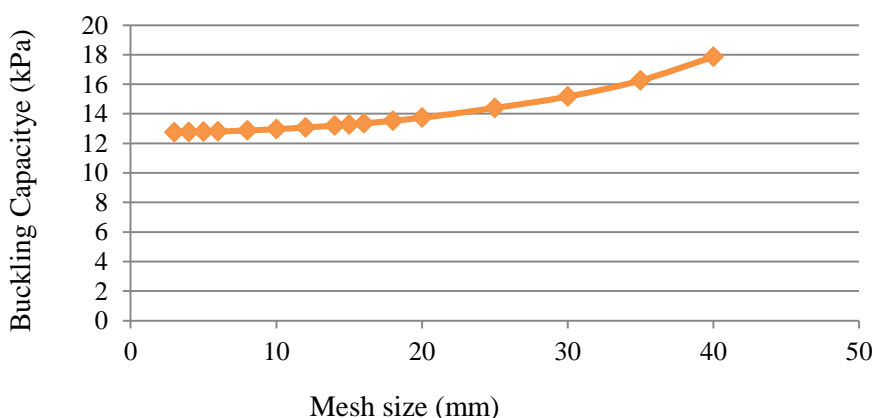
از سوی دیگر رابطه تجربی که توسط پرفسور شوکتی و انسوریان برای کماتش پوسته های استوانه ای تحت فشار جانبی در محدوده الاستیک ارائه شده است بصورت رابطه (۵) می باشد:

$$P_{cr} = 0.9 \gamma E \left[ \frac{R}{L} \left( \frac{t}{R} \right)^{2.5} \right] \quad (5)$$

که  $t$  ضخامت استوانه،  $R$  شعاع استوانه و  $L$  ارتفاع آزاد استوانه و "v" ضریب پواسون و  $E$  مدول الاستیسیته مصالح می باشند. روابط (۴) و (۵) برای ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از آنالیز المان محدود و نمونه های آزمایشگاهی در این تحقیق استفاده می شود.

### ۳- تحلیل کماتشی خطی و غیر خطی غیر به کمک روش عناصر محدود

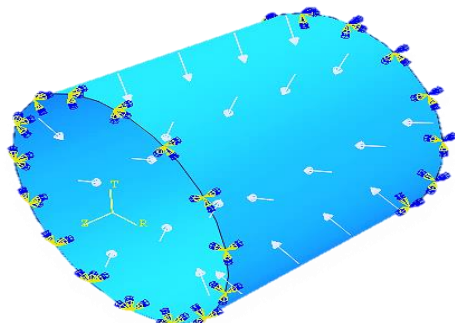
برای ارائه مدل اجزای محدود نمونه ها از نرم افزار ABAQUS [۱۶]، استفاده شده است نمونه های مدل سازی شده به صورت مخازن دارای قطر ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلیمتر و هر سه نمونه دارای ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر و ضخامت ها به ترتیب ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۳ میلی متر می باشند. در مدل سازی پوسته استوانه ای کامپوزیتی چندلایه در نرم افزار ABAQUS، برای مش بندی المان چهار ضلعی و چهار گرهی (S4R)، که یک المان دو انحنایی است و قابلیت تحلیل کرنش های بزرگ را دارا است و برای تحلیل نمونه ها، روش انتیگرال گیری کاهش یافته مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان ها می باشد. کاهش اندازه المانها، دقت و زمان محاسبات را افزایش می دهد و استفاده از المان های بزرگ مانع همگرایی مسئله شده و دقت مناسب حاصل نمی-گردد. از طرفی اگر تعداد المانها، از یک محدوده مشخصی تجاوز نماید، تغییر محسوسی در دقت حل مسأله مشاهده نمی شود. المان بندی به صورت یکنواخت انتخاب شد و به منظور آنالیز استقلال جواب ها از المان بندی، اندازه المانها از بزرگ به کوچک تا جایی که جواب مساله همگرا شود، بررسی شد. پس از بررسی های انجام یافته، مشاهده گردید المان با اندازه ۱۰ میلیمتر دقت مورد نیاز برای تحلیل فرآیند را داراست. شکل ۱ آنالیز حساسیت، ظرفیت کماتشی نسبت به اندازه مش آورده شده است.



شکل ۱: آنالیز حساسیت، ظرفیت کماتشی نسبت به اندازه مش

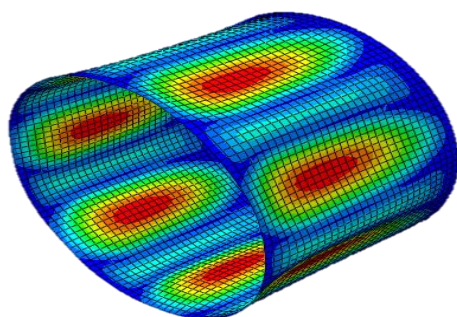
این نرم افزار قابلیت مدل سازی و تحلیل انواع مصالح به صورت الاستیک و پلاستیک را داراست که در این تحقیق با توجه به ماهیت مواد کامپوزیتی، این مواد به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن تعداد لایه ها و زوایای آنها نسبت به محور  $X$  مدل سازی می شوند. بارگذاری و شرایط مرزی مدل در محیط بار مشخص می شود. برای اعمال فشار خارجی، ابتدا سطح داخلی سیلندر انتخاب می شود. بارگذاری نیز به این صورت است که فشار یکنواخت به صورت محیطی به مخزن وارد می شود.

شرایط تکیه گاهی نمونه ها به صورت مفصلی مدل می شود. به این صورت که قسمت پایین در سه جهت انتقالی شعاعی، مماسی و محوری مقید هستند و در قسمت بالا نمونه ها فقط قید شعاعی و مماسی دارند و قید تغییر مکان محوری آزاد می باشد شکل ۲ نحوه بارگذاری و اعمال شرایط مرزی را نشان می دهد

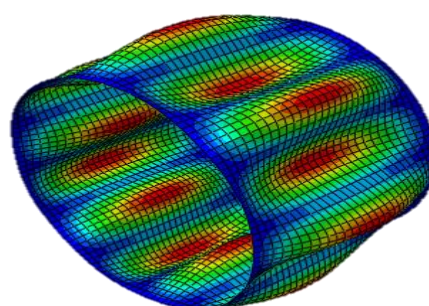


شکل ۲: بارگذاری و اعمال شرایط مرزی نمونه در

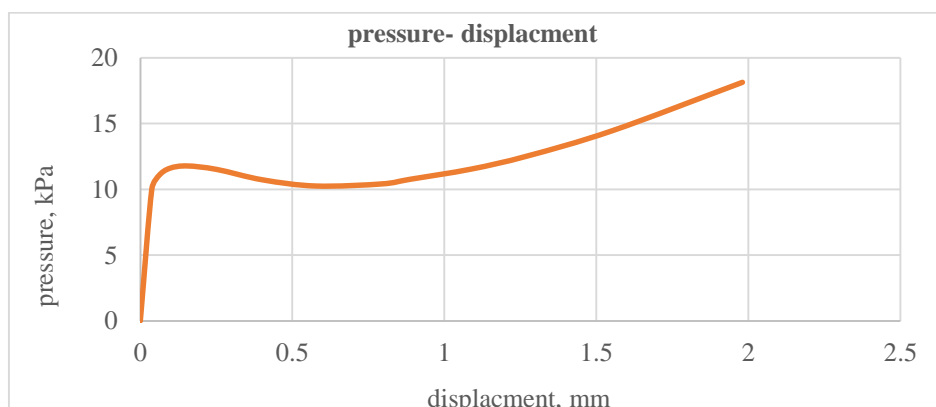
از آنجاییکه تحلیل کمانش خطی امکان پیش بینی رفتار پس کمانش را ندارد لذا به منظور دستیابی به رفتار پس کمانشی از تحلیل غیر خطی هندسی با الگوریتم Riks استفاده شد. برای نمونه های SPF1,2,3، شکل کمانش مود اول در تحلیل خطی و تغییر شکل تحلیل غیر خطی و نمودار ظرفیت کمانش LPF به ترتیب در شکل های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.



(ب)



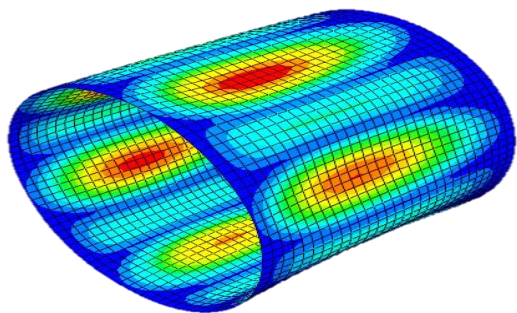
(الف)



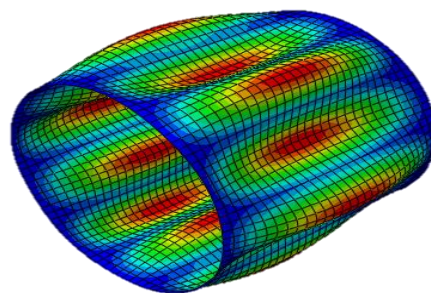
(ج)

شکل ۳: اشکال کمانشی و نمودار فشار- جابجایی نمونه SPF1 (الف) شکل کمانشی مد اول تحلیل خطی (ب) تغییر

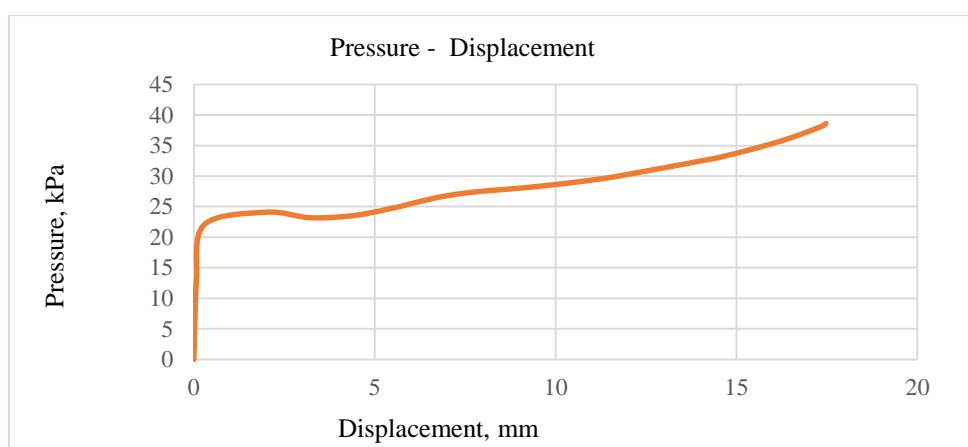
شکل غیر خطی (ج) نمودار فشار-جابجایی



(ب)



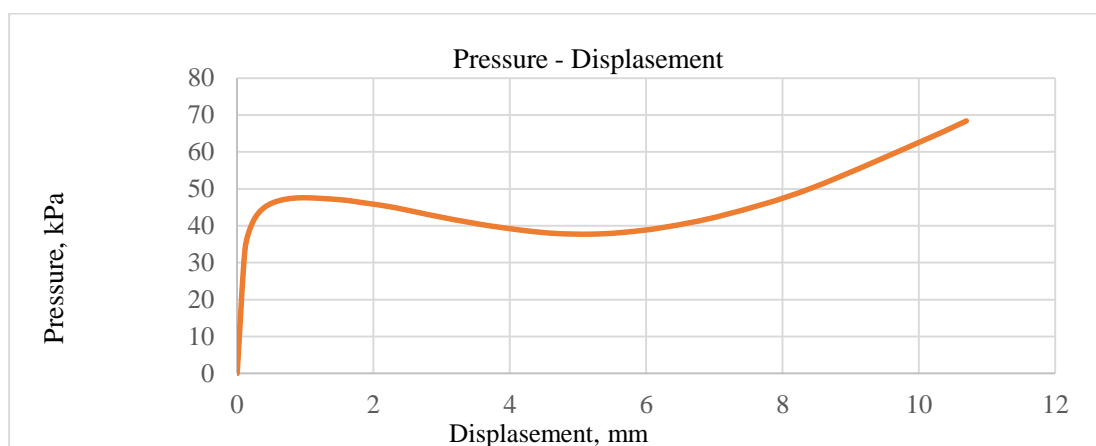
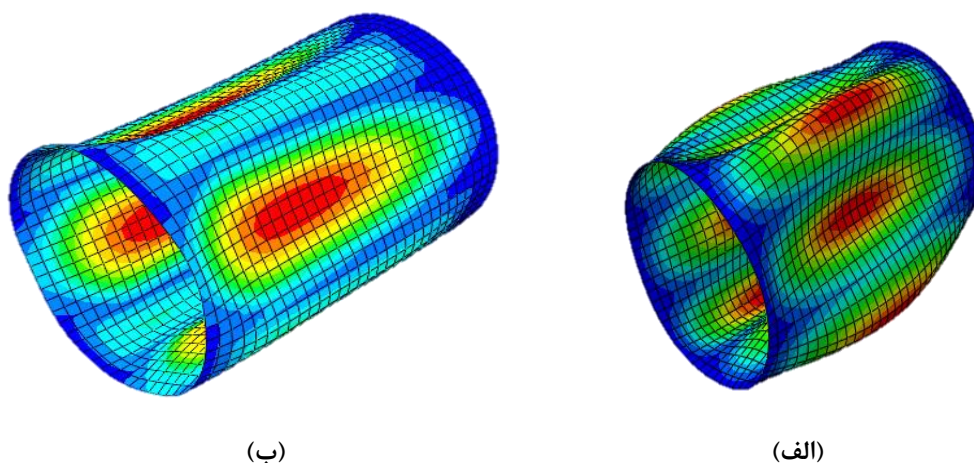
(الف)



(ج)

شکل ۴: اشکال کمانشی و نمودار فشار-جابجایی نمونه SPF2 (الف) شکل کمانشی مد اول تحلیل خطی (ب) تغییر شکل غیر خطی (ج) نمودار فشار-جابجایی





(ج)

شکل ۵: اشکال کمانشی و نمودار فشار-جابجایی نمونه SPF3 (الف) شکل کمانشی مد اول تحلیل خطی (ب) تغییر شکل غیر خطی (ج) نمودار فشار-جابجایی

#### ۴- تحقیقات آزمایشگاهی

انجام تست بر روی نمونه های آزمایشگاهی بطوریکه بتوان از نتایج حاصل از آن استفاده کرد و قابل مقایسه با نتایج تئوری و نرم افزاری باشد نیازمند شناخت کافی از مساله و فرضیات حاکم و شرایط تاثیر گذار بر آن می باشد. هر عامل دیده نشده و اعمال نادرست در آزمایشگاه، ناکاملی و یا نقص در یک نمونه تست به نمونه دیگر باعث واگرایی در پاسخ های به دست آمده خواهد شد. بنابراین باید دقت کافی در مدلسازی رفتار مصالح، شرایط تکیه گاهی و راه اندازی آن در آزمایشگاه، سرعت اعمال بار و بررسی دقیق نمونه های آزمایشگاهی و عدم وجود نقص قابل رویت در آن صورت بگیرد. تا بتوان با کمترین ضریب خطا مدلسازی نمونه های آزمایشگاهی انجام شود و نتایج ارزشمند آن برای استفاده های بعدی در دسترس قرار بگیرند.

## ۴-۱- معرفی نمونه های آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار کمانشی پوسته های جدار نازک کامپوزیتی تحت فشار یکنواخت خارجی در این مرحله سه نمونه آزمایشگاهی تهیه و در آزمایشگاه سازه های جدار نازک دانشگاه ارومیه مورد آزمایش قرار گرفتند، که مشخصات مکانیکی یکسانی داشته و عامل متغییر در آنها شعاع پوسته بود. مشخصات هندسی پوسته ها در جدول ۱ آورده شده است. لازم به یادآوری است که در رفتار پوسته های جدار نازک تحت بار خارجی پارامترهای هندسی بی بعد  $R/t$  و  $L/R$  به عنوان مهم ترین پارامتر مورد بررسی قرار می گیرند.

جدول ۱: مشخصات هندسی مخازن

ردیف	اسم نمونه	شعاع (mm)	طول (mm)	ضخامت کل (mm)	L/R	R/t	تعداد لایه الیاف	زاویه الیاف
۱	SPF1	۲۰۰	۳۰۰	۱/۲	۱/۵	۱۶۶/۶۷	۴	۰ و ۹۰
۲	SPF2	۱۵۰	۳۰۰	۱/۳	۲	۱۱۵/۳۸	۴	۰ و ۹۰
۳	SPF3	۱۰۰	۳۰۰	۱/۳	۳	۷۶/۹۲	۴	۰ و ۹۰

## ۴-۲- بارگذاری نمونه های آزمایشگاهی

جهت بررسی رفتار کمانشی نمونه های آزمایشگاهی تحت اثر فشار یکنواخت خارجی از پمپ مکش هوا استفاده می شود. این دستگاه هوای داخل مخزن را با دبی ثابت ۴۰ متر مکعب در ساعت به بیرون تخلیه می کند. که مقدار آن می تواند با بکارگیری چند شیر تخلیه تنظیم گردد. بنابراین با تخلیه هوای داخلی، فشار اتمسفر بتدریج و بصورت یکنواخت بر سطوح جانبی پوسته وارد می گردد. و از آنجا که هدف این آزمایش بررسی فشار جانبی یکنواخت بوده است لذا سیستم سازه ای بارگذاری به نوعی طراحی شده است که با استفاده از میله های نگهدارنده صفحه های بالا و پایین هیچ نیروی محوری به لبه های پوسته وارد نگردد

در صفحه انتهایی که بالای پوسته استوانه ای قرار گرفته است سه سوراخ تعبیه شده است که اولی به دستگاه مکش وصل بوده و عمل تخلیه هوا را انجام می دهد. سوراخ دوم به شیر تخلیه وصل بوده و وظیفه کنترل دبی تخلیه مخزن را بر عهده دارد. سوراخ سوم جهت اندازه گیری فشار داخلی به فشار سنج وصل می شود

در قسمتهای مختلف این نمونه ها در وسط ارتفاع و بصورت محیطی ابزارهای LVDT جهت اندازه گیری مقادیر تغییر مکان نقاط مختلف بر روی پوسته نصب شده و از سنسور فشار نیز جهت اندازه گیری فشار داخل مخزن استفاده شده است. تمام ابزارهای اندازه گیری توسط کابل رابط، اطلاعات بدست آمده نقاط مختلف را به دیتا لاگر و نرم افزار مربوطه ارسال می کنند. تعدادی از این ابزارها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: سیستم Set up و ابزارهای اندازه گیری جابجایی و فشار.

در آزمایش نمونه ها ، هوای داخل پوسته توسط دستگاه تخلیه هوا به بیرون کشیده شده و بارگذاری خارجی یکنواخت به پوسته اعمال می گردد . با کاهش فشار داخل مخزن ، بتدریج کمانش در بدنه پوسته آغاز می شود و با ادامه بارگذاری و با افزایش فشار خارجی تعداد موج های محیطی افزایش می یابد و پس از رسیدن به مرحله فرو ریختگی روند بارگذاری متوقف می گردد. نمونه های SPF1,2,3 پس از کمانش کلی در شکل ۷ نشان داده شده است..



(ب)



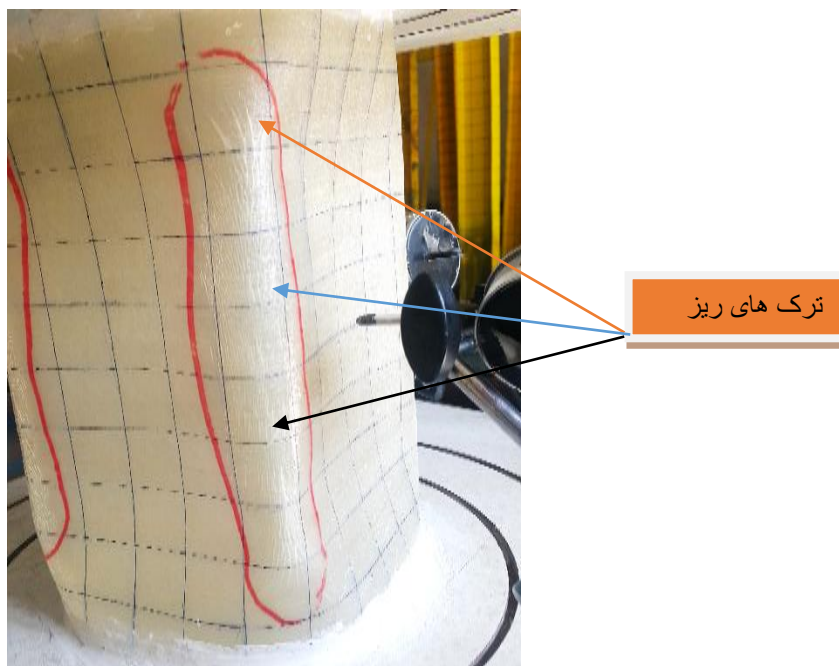
(الف)



(ج)

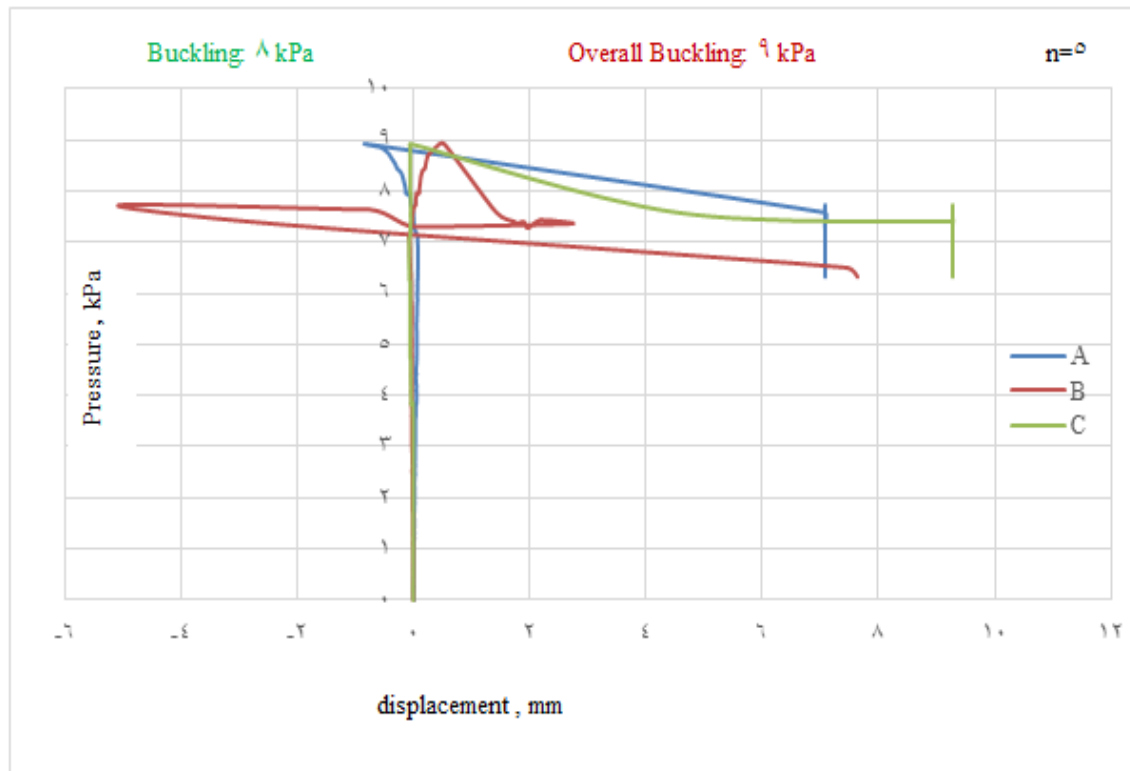
شکل ۷: کمانش کلی (الف) نمونه SPF1 ، (ب) نمونه SPF2 و (ج) نمونه SPF3

همزمان با شروع کمانش و تا وقوع کمانش کلی و تا پایان توقف بارگذاری ترک های ریز همراه با صدای خفیف در بدنه مخازن ایجاد شد که نمونه این ترک ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

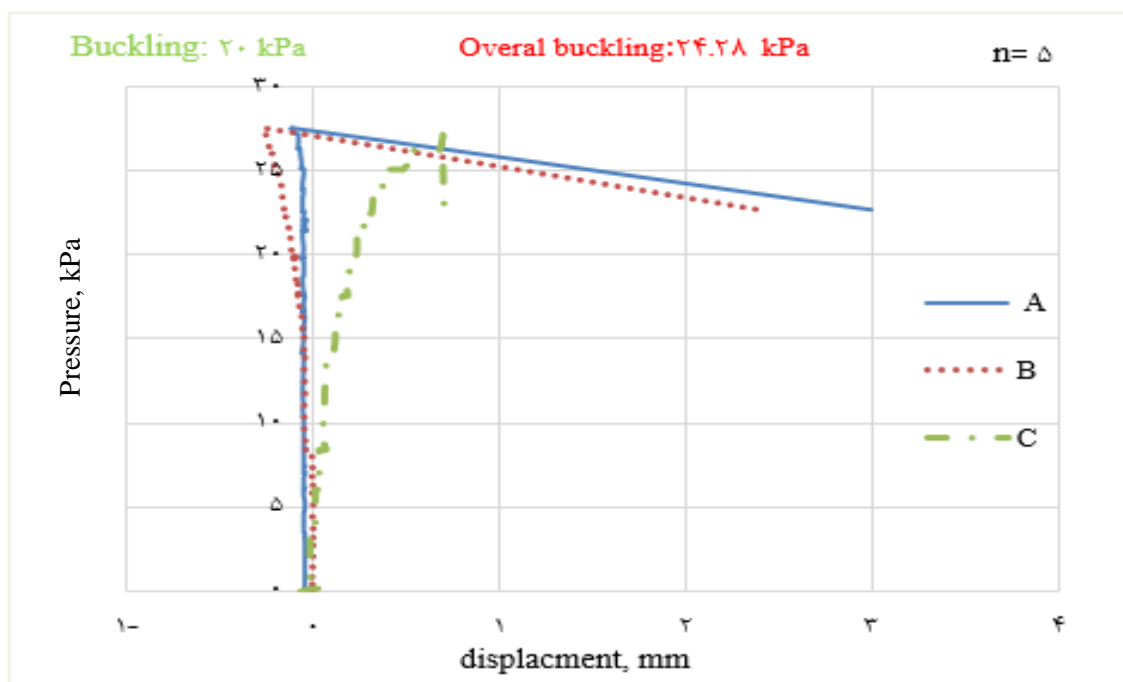


شکل ۸: ترک های ایجاد شده تا توقف بارگذاری

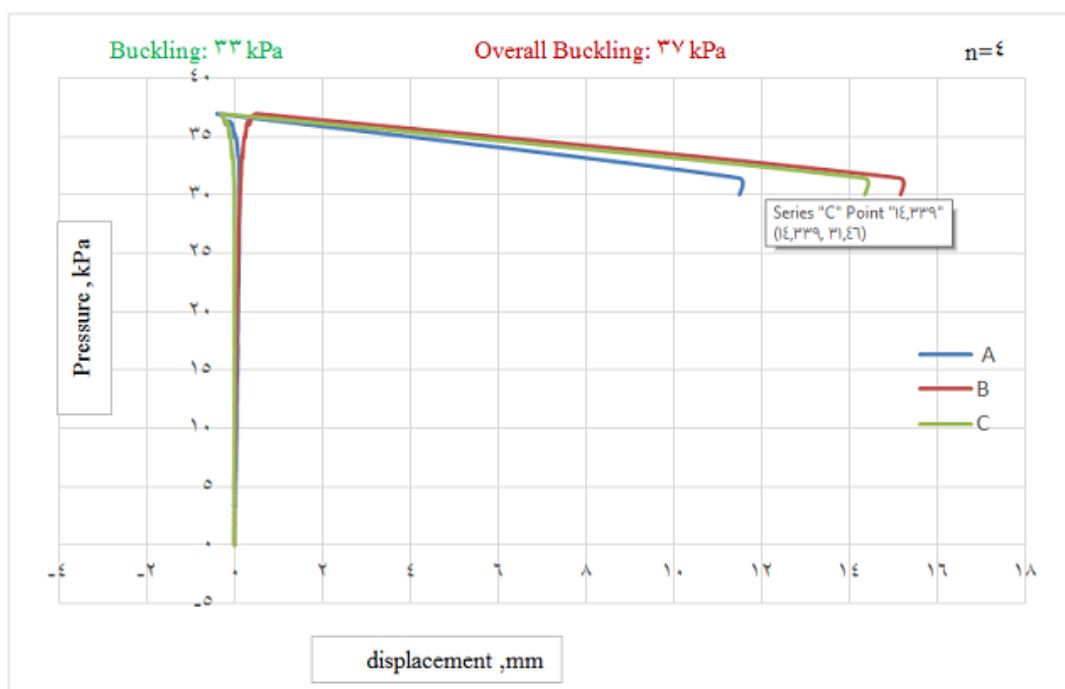
دیگرام های تغییر مکان - فشار ثبت از دیتا لاگر، در شکل های ۹ تا ۱۱ به ترتیب برای نمونه های SPF1,2,3، آورده شده است.



شکل ۹: دیاگرام فشار - جابجایی نمونه SPF1



شکل ۱۰: دیاگرام فشار - جابجایی نمونه SPF2



شکل ۱۱: دیاگرام فشار - جابجایی نمونه SPF3

## ۵- بررسی نتایج

## ۵-۱- نتایج مربوط به ظرفیت کمانش در روش آزمایشگاهی و عددی نمونه ها

در این بخش نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی (کمانش خطی و غیر خطی) به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت در این مقاله مخازن استوانه ای دارای شعاع های ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ و همگی دارای ارتفاع ۳۰۰ میلی متر، تحت فشار یکنواخت بیرونی مورد تست قرار گرفتند و ظرفیت کمانشی حاصل بروش آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی شد. که ظرفیت کمانشی نمونه ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقایسه ظرفیت مخازن GFRP با شعاع متفاوت

نمونه	R/t	L/R	تئوری	تحلیل		آزمایشگاه	Lab/ Riks	Lab SPF (n / 1)
				تحلیل خطی	غیر خطی			
				Eigenvalue	(Riks)			
SPF1	۱۶۶/۶۷	۱/۵	۱۶/۴۲	۱۲/۹۷	۱۰/۲۵	۸	٪۷۸/۰۴	٪۲۴/۲۵
SPF2	۱۱۵/۳۸	۲	۳۴/۸۳	۲۷/۳۶	۲۳/۲۰	۲۰	٪۸۶/۲	٪۶۰/۱۶

مطابق جدول شماره ۲ ظرفیت کمانشی به روش آزمایشگاهی نسبت به عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. در SPF3 مقایسه، ظرفیت کمانشی در روش آزمایشگاهی نسبت به عددی، در نمونه SPF1 با ۲۲٪، نمونه SPF2 با ۲۳٪ و نمونه SPF3 با ۱۳/۱۶٪ کاهش در ظرفیت کمانشی را نشان می دهد. که این امر به سبب برخی ناکاملی ها است که در آزمایشگاه وجود خواهد داشت و در شبیه سازی نخواهیم داشت. ولی با وجود آنها، نتایج انطباق خوبی دارند که حاکی از عملکرد مناسب مدل سازی در این مقاله می باشد.

ظرفیت کمانشی مخازن نسبت به ظرفیت مخزن کوچکتر (شعاع ۱۰۰ میلی متر) مورد مقایسه قرار گرفت بر اساس نتایج با توجه به ثابت بودن طول مخازن، با افزایش شعاع مخزن و کاهش نسبت L/R از عدد ۳ به ۲، ظرفیت کمانشی مخزن به ۶۰/۱۶٪ (۳۹،۴٪ کاهش در ظرفیت) و با کاهش نسبت L/R از عدد ۳ به ۱/۵، ظرفیت مخزن به ۲۴/۲۵٪ (۷۵/۷۵٪ کاهش در ظرفیت کمانش) رسیده است که نشان داد با افزایش شعاع در طول ثابت، ظرفیت کمانشی کاهش و مخزن در ظرفیت های پایین کمانش می نماید و تاثیر پارامتر هندسی R/t بر عکس پارامتر هندسی L/R بوده بدین معنا که با افزایش نسبت R/t، ظرفیت های بالا حاصل خواهند شد.

ظرفیت کمانشی به روش عددی و آزمایشگاهی در مقایسه به نتایج حاصل از روابط تحلیلی، به ترتیب حداکثر ۳۳/۴٪ و ۵۱/۲۸٪ کاهش در ظرفیت را نشان داد که بر اساس یافته ها در مقالات دیگر، انطباق خوبی دارند.

## ۵-۲- نتایج تعداد مود کمانشی تحلیل عددی و آزمایشگاهی

جهت بررسی تعداد مودهای کمانش، تعداد مودها به روش تئوری، تحلیل کمانش در نرم افزار ABAQUC و تعداد مودهای کمانشی نمونه ها در تست آزمایشگاهی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مقایسه تعداد مدهای کمانش

نمونه	R/t	L/R	n	
			تئوری	عددی
SPF1	۱۶۶/۶۷	۱/۵	۸	۷
SPF2	۱۱۵/۳۸	۲	۶	۶
SPF3	۷۶/۹۲	۳	۵	۴

نتایج جدول، اختلاف در تعداد مودها بروش تئوری، عددی و آزمایشگاهی را نشان می دهد و این اختلاف در نمونه ها با L/R برابر ۱/۵ به سه مد اختلاف و در L/R برابر ۳ و ۲ به یک مد اختلاف را نشان داده است که بدین معنا است که با کاهش شعاع مخازن، اختلاف در تعداد مدها به روش تئوری، عددی و آزمایشگاهی بسیار کاهش می یابد. که با یافته های موجود در مقالات مطابقت دارد. تاثیر پارامتر هندسی R/t بر عکس پارامتر هندسی L/R بوده بدین معنا، که با افزایش نسبت R/t، اختلاف در تعداد مودها به روش تئوری، عددی و آزمایشگاهی افزایش می یابد

نتایج نشان داد در مخازن با طول ثابت، با افزایش L/R، تعداد مودهای کمانش کاهش و با افزایش پارامتر هندسی R/t، تعداد مودهای کمانشی افزایش می یابد.

## ۶- نتیجه گیری

تحقیق حاضر بررسی روابط تحلیلی، تحلیل کمانش، آنالیز غیر خطی و تحقیقات آزمایشگاهی روی نمونه های استوانه ای GFRP با شعاع متفاوت بود که می توان به نتایج زیر اشاره نمود:

- ۱- رفتار پوسته در مقابل افزایش فشار حالت پایدار نشان می دهد و روند افزایش تغییر شکل در مقابل افزایش فشار نشان دهنده رفتاری با شیب ثابت است.
- ۲- بر اساس جدول شماره ۲، نتایج بدست آمده در آزمایشگاه با وجود بعضی از ناکاملی ها هندسی و فیزیکی کمتر از نتایج عددی و تحلیلی است ولی انطباق خوبی با هم دارند.
- ۳- اختلاف ظرفیت کمانشی در تحلیل بروش تحقیقی و شبیه سازی در نمونه های ۱ تا ۳ حداکثر ۲۲ درصد بدست آمد که حاکی از عملکرد مناسب مدل سازی در این تحقیق می باشد.
- ۴- بر اساس جدول شماره ۳، تعداد مودهای کمانشی حاصل از روابط تئوری و شبیه سازی (عددی)، ۱ تا ۳ مود بیشتر از تحقیقی می باشد و این اختلاف در نمونه SPF1 با شعاع بزرگ تر (L/R کمتر) بیشتر است.
- ۵- با افزایش پارامتر هندسی R/t، ظرفیت کمانشی پوسته ها کاهش و تعداد مدهای کمانشی افزایش می یابد و با افزایش پارامتر L/R ظرفیت کمانشی پوسته ها افزایش و تعداد مدهای کمانشی کاهش می یابد.
- ۶- پوسته های استوانه ای با الیاف GFRP، با وجود ترک، خاصیت الاستیک خوبی برخوردار بوده و بطوری که پس از باربرداری، نمونه کمانش یافته به حالت اولیه خود بازگشتند که این خاصیت در فلزات بسیار پایین تر می باشد.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از مدیریت و همکاران محترم کارخانه فراسان در تهیه نمونه های تست (مخازن GFRP) و از آقای مهندس جعفر عظیم زاده مسئول آزمایشگاه سازه های جدار نازک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، از همکاری ارزنده شان در انجام تست نمونه های آزمایشگاهی، کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] Donnell, L.H. (1934). *A new Theory for the Buckling of Thin Cylinders under Axial Compression and Bending*. Transactions of ASME 56: 795 – 806.
- [2] Khot, N.S. (1970). Buckling and Post buckling Behavior of Composite Cylindrical Shells under Axial Compression. *AIAA Journal*, Vol. 8, pp. 229-235.
- [3] Tsouvalis, N.G. and Zafeiratou, A.A. and Papazoglou, V.J. (2003). The Effect of Geometric Composite Laminated Cylinders under External Imperfections on the Buckling Behavior of hydrostatic pressure. *Journal of Composites*, Vol. 34, pp. 217–226.
- [4] Moreno H. and Douchin, B. and Collembet, F. and Choqueuse, D. and Davies, P. (2008). Influence of Winding pattern on the Mechanical Behavior of Filament Wound Composite Cylinders under External Pressure. *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 68, PP. 1015 -1024.
- [5] Shen, H.S. (2008). Boundary Layer Theory for the Buckling and Post buckling of anisotropic laminated Cylindrical Shells. Part I: Prediction under Axial Compression. *Composite Structure*, Vol. 82, PP. 346-361.
- [6] Hur, S. and Son, H. and KWeon, J. and Choi, J. (2008). Post buckling of Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure. *Journal of compos struct*, Vol. 86, PP.114-124.
- [7] Arikan, H. (2010). Failure Analysis of 3 Filament Wound Composite Pipe with an inclined Surface Crack under Static Internal Pressure, *Journal of Composite Structures*, Vol. 92, No. 1, pp. 182-187.
- [8] Dey, A. and Pandey, K.M. and Choudhury, P.L. (2014). A Comparison Study of Filament Wound Composite Cylindrical Shell used in under Water Vehicle Application by Finite Element Method. *5th International & 26th all India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*.
- [9] Vakili, M. and Showkati, H. (2016). Experimental and Numerical Investigation of Elephant Foot Buckling and Retrofitting of Cylindrical Shells by FRP. *Journal of Composites for Construction*, MAY, Vol. 112, pp. 256-264.
- [10] Kamjou, M. (2016). Experimental investigation of elasticity and ovaling of sections of polypropylene GRP tubes and concrete with different resistance. *Published at the international conference on civil, architectural, Urban and environmental management in the third millennium, Iran*.
- [11] Abrar, F. and et al. (2017). Impact Responses, Compressive and Burst Tests OF Glass/Epoxy (GRE) Composite pipes. *Journal of Physics*, Conference Series, Iop Publishing.
- [12] Aydin, A. C. and Yaman, Z. and Ağcakoca, E. and Kılıç, M. and Maali, M. and Dizaji, A. A. (2019). CFRP effect on the buckling behavior of dented cylindrical Shells. *International Journal of Steel Structures*, pp. 1-11.
- [13] Korucuk F. M. A., Maali, M., Kılıç, M., Aydın, A. C. (2019). Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells, *Thin-walled structures*, Vol. 143, 106259.
- [14] Maali, M. and Kılıç, M. and Yaman, Z. and Ağcakoca, E. and Aydın A. C. (2019). 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*, VOL. 137, pp. 29-39.
- [15] Najand, N. and Ebrahimi Fakhari, H. and Abolghasemi, A. and Hashemi, P. (2020). The effects of the production parameters of the extruded tubes on the buckling strength of cylindrical containers. *Production & Manufacturing Research*, VOL. 8, NO.1, pp. 196-221.
- [16] Bagheri, B. and Abbasi, M. and Kehtabche, M. (2012). *Abacus Application Reference*. Kian Rayaneh Sabz Publication, Tehran.