

## تحلیل پارامتری کمانش پوسته‌ی استوانه‌ی کنگره‌ای تقویت‌شده تحت فشار خارجی

محمدعلی رسولی\* استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، rasoli.ma@gmail.com

مرتضی طاهری کارشناسی ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، tahery.morteza@gmail.com

### چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار خارجی به طور فزاینده‌ای در بدنه شناورهای زیرسطحی غوص عمیق به کار می‌روند و فروپاشی آن‌ها عمدتاً در اثر پدیده کمانش است. بهبود مقاومت سازه‌ها در برابر کمانش با اصلاح هندسه سازه میسر می‌گردد. برای تقویت پوسته‌های استوانه‌ای از افزایش ضخامت پوسته و تقویت‌های حلقوی استفاده می‌شود. افزایش فشار و وجود محدودیت وزنی در سازه‌ها روش‌های جدیدتری را مطالبه می‌کند. در این پژوهش با ایجاد کنگره در میان حلقه‌ها و ترکیب عوامل هندسی موثر در کمانش، چگونگی تأثیر آنها بر افزایش فشار بحرانی کمانش سازه بررسی می‌گردد. به این منظور ابتدا یک استوانه با قطر و طول مشخص با تقویت‌هایی با ابعاد و فواصل مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با ایجاد کنگره با شعاع انحنای مختلف در شرایط کمانش بین حلقه‌های تأثیر آن بر فشار کمانش و نسبت استحکام به وزن بررسی می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، افزایش فشار کمانش بحرانی در پوسته‌ی کنگره‌دار شده در حالی که کمانش بین حلقه‌های رخ داده است بسیار قابل توجه می‌باشد. به بیان دیگر موثر بودن اصلاح هندسی به این روش وابستگی زیادی به بین حلقه‌ای بودن کمانش دارد.

واژه‌های کلیدی: پوسته‌های استوانه‌ای، کمانش، پوسته‌های کنگره‌ای، زیرسطحی، فشار بالا، غوص عمیق.

## Parametric analysis of buckling of corrugated cylinder shell under external pressure

M. A. Rasoli

Department of Mechanical Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Esfahan, Iran

M. Taheri

Department of Mechanical Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Esfahan, Iran

### Abstract

Cylindrical shells under external pressure are increasingly used in underwater vessels and their collapse is mainly due to the buckling phenomenon. Improving the resistance of these structures to buckle can be achieved by modifying the geometry of the structures. For reinforcement of cylindrical shells increasing the shell thickness and using ring stiffeners have been amongst the most popular methods. However, increased pressure and weight constraints of structures demand for more advanced methods. In this study, by corrugating of surfaces between the rings and combining the geometric factors those affecting the buckling, the effecting parameters on the critical buckling pressure of the structure were investigated. For this purpose, first a cylinder with a specific diameter and length with reinforcements of different dimensions and distances was evaluated. Then by corrugating with different radius of curvatures in inter-stiffener conditions the effect of these modifications on the buckling pressure and strength to weight ratio were investigated. The results of the analysis indicated that in the case of inter-stiffener buckling the increase of critical buckling pressure of corrugated shells is very significant. In other words, in this method the effectiveness of geometric modification is highly dependent on the inter-stiffener buckling.

**Keywords:** Cylindrical shells, Buckling, Corrugated shells, under water, High pressure, Deep dive .

مناسب قرار دارند. اما اگر حلقه‌های تقویت‌کننده به اندازه کافی قوی

نباشند، کل ترکیب حلقه و پوسته دچار کمانش کلی<sup>۱</sup> می‌گردند [۱].

با افزایش درخواستها برای کاوش در اعماق دریا و افزایش ایمنی برای حفظ سلامت نیروهای متخصص و پیشرفت تکنولوژی استفاده از وسایل بدون سرنشین با کنترل از راه دور و یا حتی هوشمند در دنیای امروز متداول شده است. پوسته‌های استوانه‌ای رایج‌ترین هندسه در بدنه‌ی شناورهای زیرسطحی هستند و فروپاشی آن‌ها عمدتاً در اثر پدیده کمانش رخ می‌دهد. لذا بررسی این پدیده در آنها اهمیت زیادی دارد.

بهبود مقاومت سازه‌ها در برابر کمانش با اصلاح هندسه سازه میسر می‌گردد. برای تقویت پوسته‌های استوانه‌ای از افزایش ضخامت پوسته و تقویت‌های حلقوی استفاده می‌شود. افزایش فشار و وجود محدودیت

### ۱- مقدمه

کمانش پدیده‌ای است که به عنوان ناپایداری الاستیک در سازه‌ها شناخته می‌شود. تحلیل رخ داد این پدیده در سازه‌هایی که تحت فشار یا تنش فشاری قرار می‌گیرند، مد نظر می‌باشد. ستون‌های ساده تحت بار فشاری به عنوان شناخته‌شده‌ترین سازه‌ها تحت تأثیر کمانش یا ناپایداری الاستیک هستند. این پدیده می‌تواند در تنش‌هایی بسیار پایین‌تر از استحکام تسلیم ایجاد شود. استوانه‌ها و گره‌های تحت فشار خارجی نیز در معرض پدیده کمانش قرار دارند. هنگامی که یک استوانه جدار نازک تحت فشار بیرونی یکنواخت قرار می‌گیرد، ممکن است در تنشی کمتر از تنش تسلیم کمانش کند، این حالت به عنوان ناپایداری پوسته شناخته می‌شود. یکی از روش‌های بهبود کارایی این سازه‌ها، تقویت‌کردن آنها با حلقه‌های دایره‌ای است که در فواصل

<sup>1</sup> Overall Buckling

وزنی در سازه‌ها، روش‌های جدیدتری را مطالبه می‌کند. به عنوان مثال ایجاد کنگره در فواصل بین حلقه‌ها می‌تواند در این خصوص راه‌گشا باشد. ترکیب عوامل هندسی موثر در کمانش و تحلیل چگونگی تأثیر این عوامل از اهمیت ویژه برخوردار است.

از سال ۱۹۰۸ که لورنز اولین حل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای<sup>۱</sup> تحت بار محوری را معرفی کرد، کمانش خطی و غیرخطی این پوسته‌ها تحت بارگذاری‌ها و نقص شکل‌های گوناگون مورد توجه محققان و پژوهشگران بوده است [۱]. در سال ۱۹۱۴ سائول و در سال ۱۹۱۷ فون میز فشار کمانش را برای استوانه تحت فشار خارجی یکنواخت محاسبه کردند [۲-۳]. همچنین فلاگه در سال ۱۹۳۲ فشار کمانش یک استوانه تحت خمش را به دست آورد [۴]. شورین ۱۹۲۵ و دانل ۱۹۳۳ هم کمانش استوانه تحت پیچش را بررسی کردند [۵-۶].

بدنه فشار چین‌دار ابتدا توسط راس و دیگر محققان پیشنهاد شد و مورد مطالعه قرار گرفت (راس ۱۹۸۷ [۷]). یان و همکاران ۱۹۹۱ [۸] یک تحلیل نظری از ناپایداری عمومی الاستیک دو استوانه‌ای تقویت‌شده در معرض بارگذاری فشار هیدرواستاتیک ارائه کردند. از نقطه نظر فشار کمانش<sup>۲</sup> فضای کابین‌های<sup>۳</sup> موجود و کاهش وزن، طیف زاویه مخروط<sup>۴</sup> معقول ارائه شده است. مطالعات نظری راس و پالمیر ۱۹۹۳ [۹]، راس و همفریس ۱۹۹۳ [۱۰]، راس و هیگل ۱۹۹۵ [۱۱]، نشان داده است که پوسته‌های تقویت‌شده چین‌دار کارایی بیشتری نسبت به استفاده از تقویت‌کننده‌های سنتی حلقه‌ای دارند. راس و پالمیر ۱۹۹۳ و راس و لیتل ۲۰۰۱ [۱۲] مطالعات نظری و تجربی در مورد فولاد و فیبرکربنی چین‌دار انجام دادند. راس و لیتل ۲۰۰۱ مطالعات نظری و تجربی در مورد فروریختگی پلاستیکی استوانه‌های فولادی چین‌دار دایره‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی ارائه دادند [۱۲].

راس، یان و همکاران [۸] تحقیق در مورد تأثیر زاویه مخروط بر استحکام ساختاری پوسته‌ی استوانه‌ای انجام دادند و این اثر را همانطور که توسط راس اظهار شده بود تایید کردند.

پایداری پوسته‌های استوانه‌ای چین‌دار توسط بوشنل و همکاران در سال ۱۹۷۲ [۱۳]، هافمن در سالهای ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ [۱۴-۱۵]، واترمن و راس ۲۰۰۰ [۱۶] نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیقات اثرات چین‌دار کردن مورد بررسی قرار گرفت. اخیراً، راس و همکاران ۲۰۱۳ [۱۷] تحقیقات تئوری و تجربی روی ۲۶ پوسته چین‌دار انجام دادند. قنبری و شوکتی ۲۰۱۱ [۱۸] یک مطالعه تجربی در مورد پایداری سازه‌ها و رفتار پوسته‌های بدون تقویت‌کننده تحت فشار خارجی یکنواخت گزارش کردند و رفتارهای کمانش و پس‌کمانش و همچنین تغییر شکل در چنین سازه‌هایی را مورد بررسی قرار دادند. قنبری و شوکتی ۲۰۱۴ [۱۹] رفتار کمانش پوسته‌های فولادی استوانه‌ای طویل بدون استفاده از تقویت‌کننده را نیز تحت فشار یکنواخت محیطی مطالعه کردند. علاوه بر این، قنبری و زیراکیان ۲۰۱۴ [۲۰] قابلیت استفاده از تکنیک‌های مختلف برون‌یابی را در پیش‌بینی دقیق بارهای بحرانی کمانش سازه‌های جدار نازک با خصوصیات

هندسی مختلف تحت فشار خارجی را نشان دادند. با اینکه افزایش فشار کمانش سازه با ایجاد کنگره در نوعی از شناورهای غوص عمیق مشاهده می‌شود، با این حال در مورد چگونگی و نکات ایجاد کنگره در ترکیب با سایر عوامل تقویت سازه هیچ متنی منتشر نشده است.

تحلیل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای به روش‌های مختلف از جمله روش‌های تحلیلی، تجربی و روش‌های مبتنی بر اجزای محدود قابل انجام است. هدف از این پژوهش تحلیل پارامترهای هندسی استوانه‌ی کنگره‌ای تقویت‌شده تحت فشار خارجی است. به این منظور ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در استاندارد ABS و روش اجزای محدود یک استوانه با قطر و طول مشخص با تقویت‌کننده‌هایی با ابعاد و فواصل مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با ایجاد کنگره با شعاع انحناهای مختلف در شرایط کمانش بین حلقه‌ای تأثیر آن بر فشار کمانش و نسبت استحکام به وزن بررسی می‌شود.

## ۲- مبانی و روش تحقیق

### ۲-۱- معادلات

در این بخش معادلاتی که در بخش‌های مختلف به منظور تحلیل کمانش پوسته استوانه‌ای استفاده شده ارائه می‌گردد. در ابتدا معادلات مرتبط با کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بدون تقویت و همراه با تقویت ارائه می‌شود. از این معادلات برای صحت‌سنجی بدست‌آمده از روش اجزای محدود استفاده می‌شود. پوسته استوانه‌ای علاوه بر مقاومت در برابر کمانش باید دارای استحکام استاتیکی کافی نیز باشد. لذا معادلات مربوط این بخش نیز به منظور محاسبه‌ی حداقل ضخامت پوسته ارائه می‌گردد. همچنین با توجه به محدودیت‌های وزنی مرتبط با پوسته‌ی سخت شناورهای زیرسطحی نسبت به شناوری حاصل از بدنه‌ی فشار روابط مربوط به این بخش نیز ارائه می‌گردد.

### معادله‌ی کمانش استوانه ساده

کمانش پوسته‌های استوانه‌ای در مواردی رخ می‌دهد که پوسته تحت بارهای فشاری، محوری، جانبی، پیچش و ... قرار گیرد. این نیروها می‌توانند به‌تنهایی یا با ترکیب با یکدیگر اعمال گردند. یک حالت ساده این شرایط اعمال فشار خارجی بر یک پوسته استوانه‌ای است. در این بارگذاری برای بدست آوردن فشار بحرانی کمانش شرایط مرزی با تکیه‌گاه ساده بیان می‌شود:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \Big|_{x=0,L}, \quad w = 0 \Big|_{x=0,L}$$

والمیر<sup>۵</sup> معادله (۱) را برای تعیین فشار بحرانی کمانش پیشنهاد داد [۲۱].

$$P_{cr} = \frac{DR}{n^2 - 1} \left\{ \left( \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{n^2}{R^2} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left[ 1 - 2 \left( v \frac{\pi^2 R^2}{L^2} + n^2 \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$+ \frac{Eh \pi^4}{R L^4 \left( \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) (n^2 - 1)} \quad n > 1$$

از این رابطه برای بررسی تأثیر ضخامت استوانه در فشار بحرانی

<sup>1</sup> Cylindrical shells

<sup>2</sup> Buckling pressure

<sup>3</sup> Cabin space

<sup>4</sup> Cone angle

<sup>5</sup> volmir

### ب- نیروی شناوری

در سازه‌های زیرسطحی نسبت وزن سازه سخت به نیروی شناوری معمولاً حدود ۲۰ درصد است. در این پژوهش این نسبت مد نظر قرار گرفته است. مقدار شناوری ناشی از یک جسم غوطه‌ور در آب از رابطه زیر قابل حصول است:

$$B = \rho \cdot V \cdot g \quad (6)$$

### ۲-۲- جنس پوسته

سهم وزنی که سازه بدنه فشار در شناورهای زیرسطحی به خود اختصاص می‌دهد، در حدود ۲۰ درصد وزن شناور در حالت غوطه‌وری است که معیاری در طراحی مفهومی شناورهای زیرسطحی است. البته این مقدار قابل تغییر است و به عنوان یک نقطه شروع در طراحی مفهومی محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر می‌توان از آلومینیوم و تیتانیوم استفاده کرد. مقایسه نسبت استحکام به وزن این دو آلیاژ نشان می‌دهد آلیاژ تیتانیوم جنس مناسب‌تری نسبت به آلیاژ آلومینیوم است ولی به دلیل قیمت بالای تیتانیوم در این پژوهش بر استفاده از آلومینیوم تمرکز می‌شود. مشخصات مکانیکی آلیاژ مورد استفاده در جدول ارائه شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم AL 7075 [۲۲]

مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	تسلیم (MPa)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
69	0.33	455	2700

### ۲-۳- پارامترهای هندسی

#### پارامترهای ثابت

در این پژوهش یک پوسته‌ی استوانه‌ای در یک طول و یک شعاع مشخص تحلیل و تأثیر عوامل مختلف در افزایش استحکام آن تحلیل و بررسی می‌گردد. شعاع و طول استوانه مشابه بخش استوانه‌ای یک گلاپدر زیرسطحی به نام سی‌گلاپدر انتخاب شده است. این شناور یک شناور تحقیقاتی است و عمق غوص آن ۱۵۰۰ متر می‌باشد. مشخصات هندسی کلی پوسته این شناور شامل شعاع و طول استوانه است که در این پژوهش شعاع استوانه ۱۲۰ میلی‌متر و طول آن ۵۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۲۳].

با توجه به اینکه ضخامت تأثیر زیادی بر وزن سازه دارد، لذا پس از تحلیل تأثیر آن، این پارامتر را به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته و حداقل آن با توجه به مقاومت استاتیکی سازه برای آلیاژ آلومینیوم بدست می‌آید.

#### پارامترهای متغیر

درک بهتر چگونگی تأثیر هندسه بر کماتش مستلزم پارامتری کردن مدل هندسی است. در راستای کاهش هزینه‌های زمانی و محاسباتی سعی شده تا ضمن حفظ جامعیت تحلیل‌ها، پارامترهای موثر در افزایش فشار کماتش مورد ارزیابی قرار گیرند.

در این قسمت پارامترهایی که برای این مدل از پوسته می‌توان در نظر گرفت تعیین می‌شوند. این پوسته، استوانه‌ای است که با حلقه‌هایی در سطح داخلی تقویت شده و فواصل بین حلقه‌ها چین‌دار شده است. نمای جانبی مدل هندسی در شکل به نمایش در آمده است. در این شکل متغیرهای هندسی موثر در تقویت سازه را می‌توان مشاهده کرد.

کمانش استفاده شده است و نتایج بدست آمده از روش اجزای محدود با این رابطه صحت سنجی شده است.

### معادلات کمانش استوانه‌ای تقویت شده با حلقه

در استاندارد ABS روابطی به منظور تعیین فشار کمانش بحرانی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده با حلقه ارائه شده است. این روابط مرتبط با مقاومت بین تقویتی، تنش طولی تقویت‌ها و کمانش کلی پوسته است. مقاومت بین حلقه‌ای، استحکام پوسته در برابر کمانش بین حلقه‌ها می‌باشد. تنش طولی باعث اختلال در حلقه می‌شود و کمانش کلی معرف کمانش توأمان حلقه و پوسته است. کمینه این مقادیر به عنوان فشار بحرانی کمانش پوسته تلقی می‌گردد. دسته معادلات (۲) معرف کمانش بین حلقه‌ای، دسته معادلات (۳) معرف تنش طولی در تقویت‌ها و دسته معادلات (۴) معرف کمانش کلی هستند.

به منظور ارزیابی نتایج تحلیلهای اجزاء محدود در این روابط از ضریب اطمینان یک استفاده شده و ضریب اطمینان پیشنهادی استاندارد لحاظ نشده است [۲۲].

متغیرهای روابط در استاندارد ABS قابل مشاهده است [۲۲].

$$\begin{aligned}
 p_c &= \frac{p_m}{2} \quad \text{if } p_m/p_y \leq 1 \\
 p_c &= p_y [1 - p_y/(2p_m)] \quad \text{if } 1 < p_m/p_y \leq 3 \\
 p_c &= \frac{5}{6} p_y \quad \text{if } p_m/p_y > 3 \\
 p_m &= \frac{2.42E[t/(2R)]^{5/2}}{(1-\nu^2)^{3/4} \left[ \frac{L}{(2R)} - 0.45 \left( \frac{t}{2R} \right)^{1/2} \right]} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_y &= \frac{\sigma_y t/R}{1-F} \\
 F &= \frac{A[1-(\nu/2)]G}{A+t_w t + (2NtL/\theta)} \\
 M &= L/\sqrt{Rt} \\
 A &= A_s(R/R_s) \\
 p_a &= p_c \eta \quad \eta = 0.8 \\
 p_1 &= \frac{2\sigma_y t}{R} \left[ 1 + \left( \frac{12}{1-\nu^2} \right)^{1/2} \gamma H \right]^{-1} \\
 \gamma &= \frac{A[1-(\nu/2)]}{A+t_w t + (2NtL/\theta)} \\
 p_a &= p_1 \eta \quad \eta = 0.67 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_n &= \left( \frac{Et}{R} \right) A_1 + \frac{EIA_2}{LR^3} \\
 A_1 &= \frac{\pi R}{[A_2 + (\lambda^2/2)][n^2 + \lambda^2]^2} \\
 \lambda &= \frac{\pi R}{L_c} \\
 A_2 &= n^2 - 1 \\
 p_a &= p_n \eta \quad \eta = 0.5 \quad (4)
 \end{aligned}$$

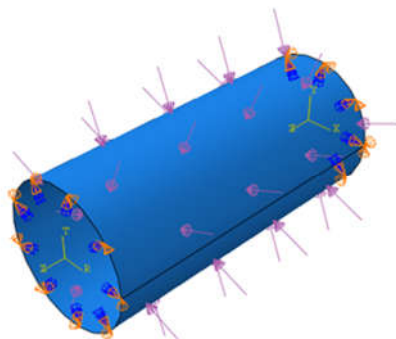
### سایر روابط کمکی

#### الف- استحکام استاتیکی پوسته

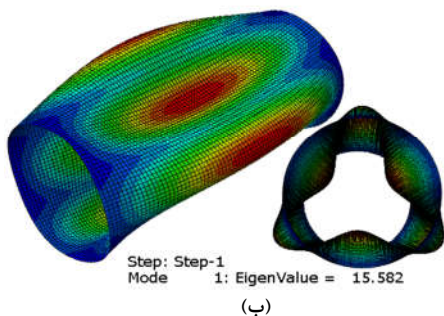
پوسته‌های تحت فشار خارجی علاوه بر مقاومت کمانش باید دارای استحکام استاتیکی باشند. لذا حداقل ضخامت مورد نیاز در یک استوانه را می‌توان از رابطه تنش معادل ترسکا بدست آورد:

$$\bar{\sigma} = \frac{pR}{2t} \quad (5)$$

نحوه بار گذاری و شرایط مرزی پوسته استوانه‌ای برای تحلیل کمانش در شکل - الف نشان داده شده است. این شرایط برای کلیه تحلیل‌ها یا برجا است. نتیجه تحلیل انجام شده بر یک پوسته استوانه‌ای ساده بدون تقویت در ضخامت ۷/۵ میلی‌متر نیز در شکل - ب مشاهده می‌گردد.



(الف)



(ب)

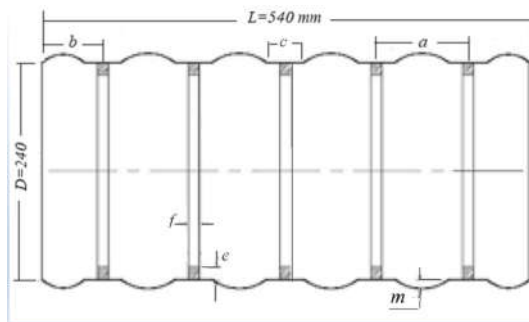
شکل ۲- الف - نحوه بارگذاری و شرایط مرزی ب - نتایج تحلیل کمانش خطی استوانه‌ای بدون تقویت‌کننده با نرم‌افزار آباکوس برای پوسته در ضخامت ۷/۵ میلی‌متر (شعاع ۱۲۰ میلی‌متر و طول ۵۴۰ میلی‌متر)

برای این استوانه بار بحرانی کمانش خطی در ضخامت ۷/۵ میلی - متر، ۱۵/۵۸۲ مگاپاسکال بدست آمده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، این فشار مربوط به کمانش کلی سازه است. فشار کمانش بدست آمده از رابطه ۱ نیز ۱۵/۷۳ مگاپاسکال می‌باشد که نشان دهنده دقت نتایج بدست آمده از نرم‌افزار است.

پس از ارزیابی اثر ضخامت پوسته، اثر افزودن تقویت‌های حلقوی داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی ابعاد مقطع تقویت‌ها بر فشار کمانش، داخل استوانه، در فواصل ۸۰ میلی‌متر در امتداد طول استوانه، حلقه‌هایی با مقطع مربعی در نظر گرفته می‌شود که با تغییر ارتفاع آنها از ۱۰ میلی‌متر تا ۲۰ میلی‌متر یازده تحلیل انجام گرفته شده است.

برای واکاوی تأثیر فاصله حلقه‌ها بر فشار بحرانی کمانش همراه با بررسی تأثیر اندازه حلقه و اثر آن بر وزن در فواصل مختلف تحلیل‌هایی با ترکیب کامل این متغیرها در سطوح در نظر گرفته شده انجام شد. در این تحلیل‌ها فاصله بین حلقه‌ها از ۷۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر با گام ۵ میلی - متر تغییر می‌کند و محدوده تغییرات ارتفاع مقطع حلقه نیز ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر با گام یک میلی‌متر است.

نتیجه تحلیل انجام شده در نرم‌افزار با ضخامت پوسته ۳ میلی‌متر



شکل ۱- متغیرهای ابعادی و هندسی موثر در بهبود تحمل فشار یک استوانه بر حسب میلی‌متر (مشخصات اصلی این استوانه شامل قطر و شعاع از مشخصات گلابدر استخراج شده)

متغیرهای موثر که در شکل نشان داده شده‌اند عبارت‌اند از: فاصله بین تقویت‌ها (a) فاصله بین تقویت‌ها برای هر حالت یکسان در نظر گرفته می‌شود. تعداد تقویت‌ها نیز تابع این پارامتر است. مقدار b وابسته به اندازه‌ی a و طول کلی استوانه است و پارامتر مستقلی نیست. فاصله بین کنگره‌ها (c) که در این تحقیق مسامی عرض مقطع حلقه‌ها در نظر گرفته شده است. ارتفاع حلقه‌های تقویت‌کننده (e) و عرض آنها (f)، شعاع انحنای کنگره‌ها با متغیر (m) تعیین می‌شود که به عنوان کنگره یا چین بین تقویت‌ها اعمال شده است.

## ۲-۴- مدل اجزای محدود

پوسته استوانه‌ای با المان S8R مدل شده است. این المان دارای شش درجه آزادی در هر گره است. المان مذکور مناسب برای صفحات منحنی است و سازگاری مناسب با تغییر شکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ دارد و تقویت‌ها با المان تیر B32 مدل شده‌اند. اندازه مش، دقت همگرایی و سرعت حل را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. به منظور دست‌یابی به اندازه مش مناسب، تحلیل‌ها با مش‌های مختلف انجام شد و سایز مناسب مش تعیین گردید.

## ۲-۵- تحلیل‌های نظری و عددی

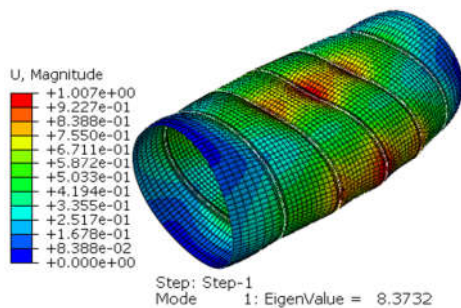
به منظور جلوگیری از پیچیدگی در تحلیل نتایج، متغیرهای مورد مطالعه به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرند. لذا در ابتدا یک استوانه ساده بدون تقویت‌کننده تحلیل می‌گردد تا اثر افزایش ضخامت و محدودیت‌هایی که ایجاد می‌کند ارزیابی شود. سپس با افزودن حلقه اثر اندازه حلقه و فاصله حلقه‌ها بررسی می‌شود و در نهایت با اعمال کنگره، اثر پارامترهای هندسی کنگره در شرایط وجود حلقه تحلیل می‌شود. با توجه به اینکه روابط تحلیلی برای استوانه ساده بدون تقویت‌کننده و تقویت شده وجود دارد نتایج بدست آمده در این دو بخش با نتایج بدست آمده از این روابط مقایسه می‌گردد تا از صحت تحلیل‌ها اطمینان حاصل شود.

اولین پارامتر ضخامت پوسته است. برای بررسی تأثیر ضخامت بر تغییرات فشار بحرانی کمانش استوانه ساده بدون تقویت، در ۱۱ ضخامت ۳، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۷/۵، ۸ میلی‌متر تحلیل شد.

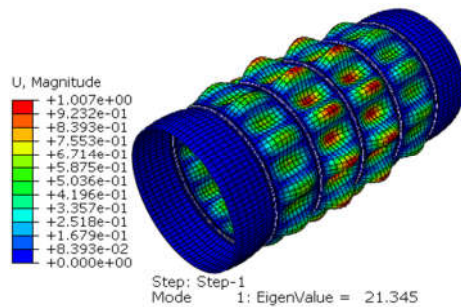
بدست آمده از استاندارد و تحلیل نرم‌افزاری نشان‌دهنده تطابق قابل قبول نتایج تحلیلهای عددی با نتایج بدست آمده از استاندارد است.

در ادامه اثر ایجاد کنگره در بین حلقه‌های تقویتی در استحکام بدنه در برابر کمانش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور یک کمان بین حلقه‌ها در نظر گرفته می‌شود. میزان قوس کمان با پارامتر  $m$  که در شکل نشان داده شده است مشخص می‌گردد.

برای بررسی تأثیر شعاع کنگره در حد فاصل حلقه‌ها در شرایط مختلف تحلیل‌هایی با تغییر پارامتر  $m$  از صفر تا ۶ میلی‌متر با گام یک میلی‌متر انجام شد. این تحلیل‌ها در ترکیب با تغییر پارامتر ارتفاع حلقه‌ها انجام شد. ارتفاع مقطع حلقه‌ها از ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر با گام یک میلی‌متر نظر گرفته شد. تحلیل در ترکیب کامل پارامترها در سطوح مختلف در نظر گرفته شد. در این تحلیل‌ها ضخامت پوسته ۳ میلی‌متر و فاصله بین حلقه‌ها ۹۵ میلی‌متر می‌باشد.



(الف) کمانش کلی پوسته

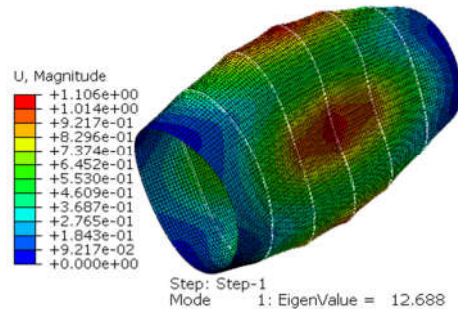


(ب) کمانش بین حلقه‌ای

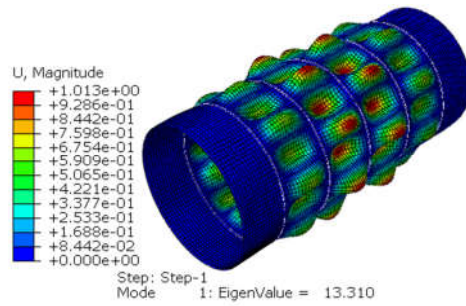
شکل ۴- تأثیر ایجاد کنگره در پوسته استوانه‌ای همراه با تقویت حلقوی بر فشار کمانش (هر دو تحلیل در ضخامت ۳ میلی‌متر و فاصله حلقه‌ها در هر دو ۹۵ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع حلقه‌ها در شکل الف ۱۰ میلی‌متر و در شکل ب ۱۶ میلی‌متر است)

نتیجه تحلیل‌های انجام شده در نرم‌افزار با ضخامت پوسته ۳ میلی‌متر با وجود ۵ عدد حلقه در فاصله ۹۵ میلی‌متر با دو ارتفاع حلقه ۱۰ و ۱۶ میلی‌متری و  $m=4.5$  میلی‌متر در شکل نشان داده شده است. با مقایسه نتایج حالت الف این شکل با نتایج حالت الف شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، با ارتفاع مقطع حلقه ۱۰ میلی‌متر ایجاد کنگره موجب کاهش فشار بحرانی کمانش به میزان ۴/۳۱۴ مگاپاسکال شده است. با مقایسه دو شکل واضح است که در هر دو وضعیت کمانش کلی رخ داده است. در حالی که با ارتفاع مقطع حلقه ۱۶ میلی‌متر، فشار کمانش ۲۱/۳۴۵ بدست آمده است. در این شرایط کمانش از نوع بین حلقه‌ای است. مقایسه شکل‌های ۴ الف و ب نشان می‌دهد که تأثیر کنگره در بهبود

با وجود ۵ عدد حلقه در فاصله ۹۵ میلی‌متر و با دو ارتفاع حلقه ۱۰ و ۱۳ میلی‌متری در شکل نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، کمانش ایجاد شده در سازه در شکل الف-کمانش کلی و کمانش ایجاد شده در شکل ب- از نوع کمانش بین حلقه‌ای است.



(الف)



(ب)

شکل ۳- تأثیر افزودن حلقه‌های تقویت بر فشار کمانش (هر دو تحلیل در ضخامت ۳ میلی‌متر و فاصله حلقه‌ها در هر دو ۹۵ میلی‌متر و ارتفاع حلقه در شکل الف ۱۰ میلی‌متر و در شکل ب ۱۳ میلی‌متر است)

با استفاده روابط (۲، ۳، ۴) فشار کمانش پوسته استوانه‌ای با ضخامت ۳ میلی‌متر و تقویت شده با حلقه تعیین شد که فاصله حلقه‌ها در آن ۹۵ میلی‌متر و حلقه‌ها با دو ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و ۱۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از حلقه‌های ۱۰ میلی‌متری، فشار کمانش کلی ۱۲/۳۲۷ مگاپاسکال و فشار کمانش بین حلقه‌ای ۱۵/۷۲۱ مگاپاسکال و تنش طولی تقویت‌ها ۱۲/۸۳۱ مگاپاسکال بدست آمد. با استفاده از حلقه‌های ۱۳ میلی‌متری، فشار کمانش کلی ۱۷/۳۵۱ مگاپاسکال و فشار کمانش بین حلقه‌ای ۱۳/۰۱ مگاپاسکال و تنش طولی تقویت‌ها ۱۶/۸۶۱ مگاپاسکال به دست آمد. در هر حالت کمینه این فشارها به عنوان فشار بحرانی کمانش در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در استاندارد فشار بحرانی کمانش در ارتفاع حلقه ۱۰ میلی‌متر معادل ۱۲/۳۲۷ مگاپاسکال و در ارتفاع حلقه ۱۳ میلی‌متر معادل ۱۳/۰۱ مگاپاسکال است. فشار بحرانی کمانش برای حالت‌های فوق با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نیز بدست آمد که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، فشار بحرانی کمانش برای حالت الف که ارتفاع حلقه در آن ۱۰ میلی‌متر است، ۱۲/۶۸۸ مگاپاسکال و نشان دهنده کمانش کلی و برای حالت ب که ارتفاع حلقه در آن ۱۳ میلی‌متر است، ۱۳/۳۱ مگاپاسکال و نشان‌دهنده کمانش بین حلقه‌ای است. مقایسه نتایج

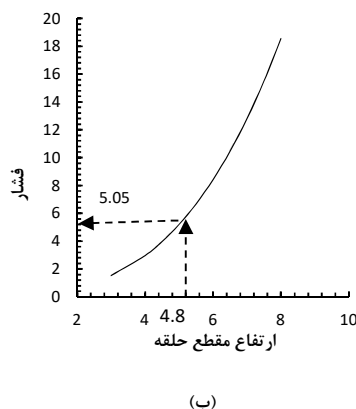
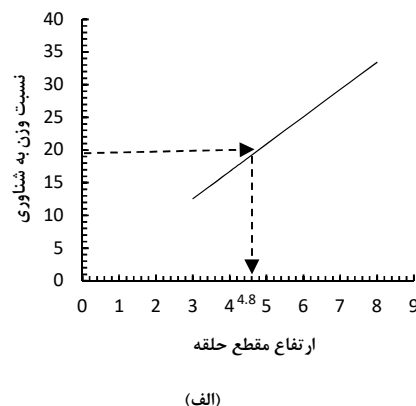
فشار کمانش وابسته به مقاومت سازه در برابر کمانش کلی است. در بخش نتایج به این موضوع با تعمق بیشتر پرداخته می‌شود.

### ۳- نتایج

در این بخش به تحلیل چگونگی تأثیر پارامترهای بیان شده بر کمانش پوسته پرداخته می‌شود. همچنین میزان بهبود تحمل فشار که هر پارامتر با توجه محدودیت‌های وزنی ایجاد می‌کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- بررسی تأثیر ضخامت پوسته بر فشار بحرانی کمانش

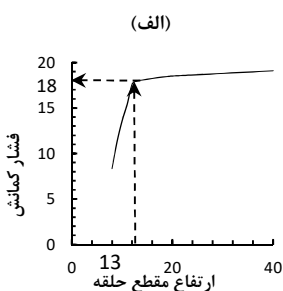
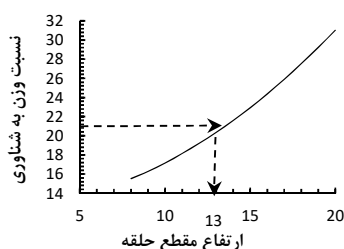
در این بخش به بررسی تأثیر ضخامت بر فشار بحرانی کمانش پرداخته می‌شود. شکل تغییرات نسبت وزن به شناوری و تغییرات فشار را بر حسب تغییرات ضخامت نشان می‌دهد. در شناورهای زیرسطحی وزن بدنه فشار حدود ۲۰٪ شناوری شناور در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل الف-الف مشاهده می‌شود، تقریباً در ضخامت ۵ میلی‌متر نسبت وزن به شناوری به ۲۰٪ می‌رسد. با توجه به شکل ب- در ضخامت ۵ میلی‌متر فشار کمانش تقریباً ۵ مگاپاسکال است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در استوانه مورد نظر، بدون استفاده از تقویت‌کننده افزایش مقاومت در برابر کمانش با افزایش ضخامت به دلیل محدودیت افزایش وزن تا ۵ مگاپاسکال محدود می‌شود.



شکل ۵- بررسی تأثیر ضخامت بر نسبت وزن به شناوری و فشار کمانش

#### ۳-۲- بررسی تأثیر ابعاد تقویت‌ها بر فشار بحرانی کمانش

در این بخش به بررسی تأثیر ابعاد تقویت‌کننده‌ها بر فشار بحرانی کمانش پرداخته می‌شود. شکل تغییرات نسبت وزن به شناوری و تغییرات فشار را بر حسب تغییر ابعاد تقویت‌کننده‌ها نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد در شناورهای زیرسطحی وزن بدنه فشار حدود ۲۰٪ شناوری شناور در نظر گرفته می‌شود. در شکل الف-الف مشاهده می‌شود با کاربرد حلقه با ارتفاع ۱۳ میلی‌متر و فاصله ۹۵ میلی‌متر نسبت وزن به شناوری به ۲۰٪ می‌رسد که فشار کمانش تقریباً ۱۷/۹ مگاپاسکال است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در استوانه مورد نظر، که با حلقه تقویت شده است، افزایش فشار کمانش با افزایش مقطع حلقه به دلیل محدودیت افزایش وزن به ۱۷/۹ مگاپاسکال محدود می‌شود. ولی با این وجود این مقاومت افزایش چشم‌گیری نسبت به مقاومت استوانه ساده دارد.

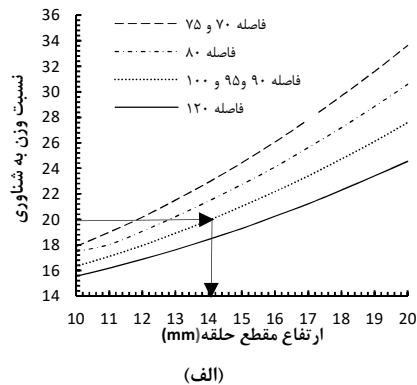
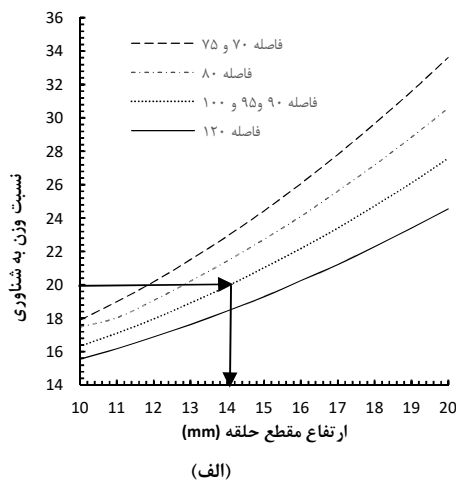


شکل ۶- تأثیر ارتفاع مقطع حلقه بر وزن و فشار کمانش

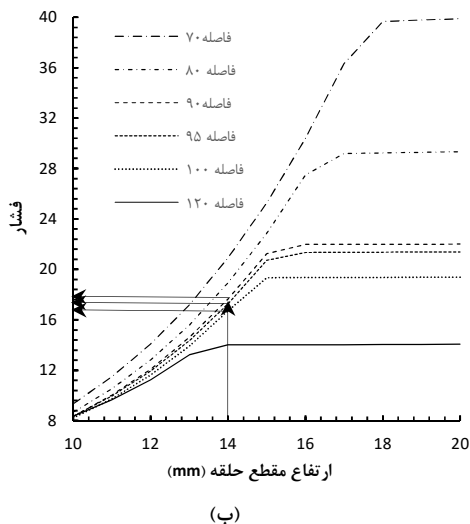
در شکل تغییرات فشار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات ارتفاع تقویت‌کننده‌های مربعی، در فواصل مختلف حلقه‌ها از یکدیگر مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ب- مشاهده می‌شود، در یک فاصله مشخص حلقه‌ها از یکدیگر، با افزایش ارتفاع مقطع حلقه فشار بحرانی کمانش به یک خط ثابت میل می‌کند، که این قسمت کمانش بین حلقوی می‌باشد. در این حالت افزایش ارتفاع حلقه‌ها در افزایش فشار بحرانی کمانش تأثیری چندانی ندارد و باعث افزایش وزن کلی سازه می‌شود.

با کاهش فاصله بین حلقه‌ها، حالت انتقالی از کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها در ارتفاع مقطع بزرگتری از حلقه رخ می‌دهد. دلیل این امر این است که با کاهش فاصله بین حلقه‌های سازه پدیده‌ی کمانش در فشار بیشتری رخ می‌دهد و در کمانش کلی هم حلقه و هم پوسته توأمان کمانش می‌کنند و برای اینکه کمانش بین حلقوی ایجاد شود، باید حلقه‌ها مقاومت بیشتری داشته باشند.

شناوری ۲۰ درصد، در محدوده ارتفاع حلقه ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر برای فواصل مختلف رخ می‌دهد. محدوده ارتفاع حلقه برای گذر از کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر در استوانه ساده و فشار کمانش مربوطه ۱۴ تا ۲۴ مگاپاسکال و برای استوانه کنگره دار ۱۴ تا ۱۸ میلی‌متر و فشار کمانش ۱۴ تا ۴۰ مگاپاسکال است. وجه مشترک این نمودارها برای نسبت وزن به شناوری ۲۰ درصد، ارتفاع حلقه ۱۴ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن ارتفاع حلقه ۱۴ میلی‌متر و نسبت وزن به شناوری ۲۰ درصد فاصله حلقه‌ها ۹۰ و ۹۵ و ۱۰۰ خواهد بود. در این شرایط فشار کمانش برای استوانه از حدود ۱۱/۵ تا ۱۴/۵ مگاپاسکال تغییر می‌کند که این مقدار برای استوانه کنگره‌دار ۱۶/۵ تا ۱۷/۵ مگاپاسکال تغییر می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود فشار کمانش در هر سه حالت افزایش داشته است.



شکل ۷- تأثیر تغییر ارتفاع مقطع حلقه بر الف- نسبت وزن به شناوری و ب- فشار کمانش



شکل ۸- تأثیر کنگره بر فشار بحرانی کمانش و نسبت وزن به شناوری

شکل تغییرات فشار کمانش برحسب ارتفاع مقطع حلقه برای استوانه تقویت شده با حلقه بدون کنگره و کنگره دار را در ۳ فاصله حلقه ۷۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، با فاصله بین حلقه ۷۰ میلی‌متر و  $m=0$  فشار کمانش در ارتفاع ۱۴ میلی‌متر معادل ۲۴ مگاپاسکال است

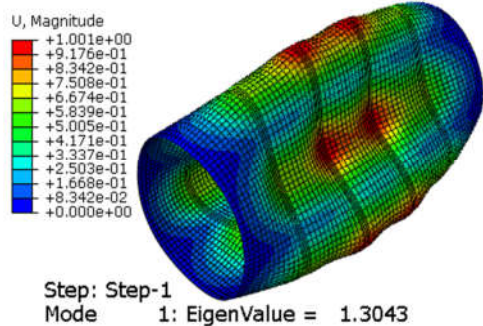
### ۳-۳- بررسی تأثیر ایجاد کنگره بر فشار بحرانی کمانش

هدف اصلی این مقاله ایجاد راهکاری برای افزایش فشار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده با حلقه است. به این منظور تلاش بر آن است تا با ایجاد کنگره بین تقویت‌ها، نحوه تغییر فشار بحرانی کمانش با شعاع انحناء کنگره بررسی گردد. همانطور که ملاحظه شد، با تقویت حلقه‌ها تا حدی می‌توان بار بحرانی کمانش را افزایش داد و بعد از تبدیل کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ای، تغییر ارتفاع تقویت‌کننده تأثیر چندانی بر افزایش فشار بحرانی کمانش ندارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پوسته بین حلقه‌ها توان تحمل فشار بیشتر را ندارد. همین امر باعث می‌شود که به اصلاح هندسه پوسته‌ی بین حلقه‌ها پرداخته شود. به این منظور پوسته‌ی بین حلقه‌ها کنگره‌ای در نظر گرفته شده است و چگونگی تأثیر آن بر تغییرات فشار کمانش بررسی می‌گردد.

شکل نتایج تحلیل تأثیر کنگره بر فشار بحرانی کمانش و نسبت وزن به شناوری را در استوانه‌ی تقویت شده با حلقه نشان می‌دهد. در این تحلیل‌ها میزان غوص یا کنگره بین حلقه‌ها  $m=4.5$  است تا با تغییر هندسه پوسته، استحکام آن افزایش یابد. با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که نسبت وزن به



تعریف شده است، که فاصله بین قله کمان ایجاد شده بین حلقه‌ها تا سطح استوانه است.



شکل ۱۰- فشار کمانش پوسته‌ای استوانه‌ای تقویت شده با ایجاد کنگره در بین فواصل مختلف بدون حلقه

شکل تحلیل کمانش یک استوانه کنگره‌دار بدون حلقه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ایجاد کنگره به تنهایی باعث ضعف در سازه شده و فشار کمانش از استوانه ساده بدون تقویت کمتر و معادل ۱/۳ مگاپاسکال است. این در حالی است که فشار کمانش در استوانه ساده ۱/۵ مگاپاسکال است.

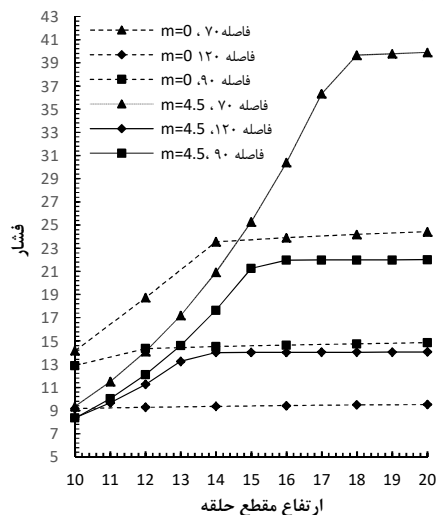
در شکل الف- تغییرات نسبت وزن به شناوری بر حسب ارتفاع مقطع حلقه برای  $m$ های متفاوت در فاصله حلقه‌های مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمودار نسبت شناوری به وزن در شعاع‌های متفاوت تقریباً مشابه هم هستند. دلیل این امر این است، چون حلقه‌ها در کلیه پوسته‌ها در فاصله ثابت از هم قرار دارند و تعداد حلقه‌ها در تمامی آنها ثابت است و با ایجاد کنگره‌های متفاوت از حالت استوانه ساده یعنی  $m=0$  تا  $m=6$  در بین آنها پوسته‌ی بین حلقه‌ها تغییر کرده است و به طبع آن هم وزن و هم شناوری در این پوسته‌ها افزایش یافته است. به دلیل کوچک بودن این تغییرات و افزایش توأمان وزن با شناوری نسبت این دو در حالت‌های متفاوت شعاع تغییر چندانی نمی‌کند و تقریباً روی یک منحنی قرار می‌گیرند.

در شکل ب- تغییرات فشار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات ارتفاع مقطع حلقه برای همان پوسته‌ها نشان داده شده است. با ملاحظه شکل می‌توان متوجه این موضوع شد که با افزایش ارتفاع مقطع حلقه، حالت انتقالی از کمانش کلی به کمانش بین حلقه-ای در شعاع‌های متفاوت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در  $m=4$  این ارتفاع در ۱۵ میلی‌متر رخ می‌دهد. ولی در  $m=6$  در ارتفاع مقطع حلقه ۱۶ میلی‌متر رخ می‌دهد که این افزایش ارتفاع مقطع حلقه بر خلاف افزایش فشار کمانش، افزایش قابل توجهی در وزن کلی سازه به وجود می‌آورد و به تبع آن نسبت وزن به شناوری افزایش می‌یابد. درست است که این تغییر یعنی افزایش شعاع  $m$  باعث افزایش چشم‌گیری در فشار بحرانی کمانش می‌شود، ولی افزایش نسبت وزن به شناوری مطلوب نیست. با توجه به شکل الف می‌توان مشاهده کرد که در ارتفاع مقطع حلقه ۱۴ نسبت وزن به شناوری ۲۰ درصد می‌باشد و در ارتفاع مقطع ۱۶ همین نسبت ۲۲ درصد شده‌است که دو درصد افزایش نشان می‌دهد.

و با افزایش ارتفاع حلقه کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها تبدیل می‌شود و در افزایش فشار کمانش موثر نیست. در همین شرایط و با ایجاد کنگره بین حلقه‌ها به میزان  $m=4.5$  میلی‌متر انتقال از کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها در ارتفاع ۱۸ میلی‌متر اتفاق می‌افتد و فشار کمانش بحرانی به ۴۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که حدود ۶۵ درصد بهبود را نشان می‌دهد. این در حالی است که محاسبات افزایش وزنی حدود ۶ درصد را نشان می‌دهند.

مقایسه دو نمودار با فاصله حلقه‌ها به میزان ۷۰ میلی‌متر نشان می‌دهد افزایش فشار کمانش، فقط با اعمال کنگره حاصل نمی‌شود و همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد موجب کاهش فشار کمانش نیز شده است. علت این موضوع فشار جانبی اضافی ناشی از ایجاد کنگره است که به تقویت‌ها وارد می‌شود. در واقع فشار روی پوسته در ناحیه بین تقویت‌ها به تقویت‌ها منتقل می‌شود. لذا افزایش ارتفاع تقویت‌ها ضروری است. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش ارتفاع تقویت‌ها تا جایی که کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها تبدیل شود می‌تواند موجب بهبود فشار کمانش شود که این مقدار در فاصله حلقه ۷۰ میلی‌متر ۴۰ مگاپاسکال بدست آمد.

مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که در هر دو حالت استوانه بدون کنگره و کنگره‌دار با افزایش فاصله بین حلقه‌ها، حالت انتقال از کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌ها در ارتفاع کمتری از مقطع حلقه رخ می‌دهد و فشار کمانش نیز افت می‌کند. برای رخ داد کمانش بین حلقه‌ای باید استحکام حلقه‌ها بیش از استحکام پوسته بین حلقه‌ها باشد و با افزایش فاصله بین حلقه‌ها استحکام پوسته بین حلقه‌ها کاهش می‌یابد. به همین دلیل ارتفاع حلقه برای حالت انتقالی کمتر می‌شود. با افزایش فاصله حلقه‌ها میزان بهبود فشار کمانش کمتر می‌شود و این مقدار برای فاصله ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر به حدود ۴۵ درصد می‌رسد.



شکل ۹- تأثیر ایجاد کنگره بین حلقه‌ها بر فشار کمانش

### ۳-۴- تأثیر میزان انحناء کنگره بر فشار کمانش بحرانی

در این بخش تأثیر میزان انحناء کنگره ایجاد شده بین حلقه‌ها بر فشار کمانش بررسی می‌گردد. در این متن میزان انحناء با متغیر  $m$



همانطور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، با افزایش میزان انحناء، نسبت فشار کمانش به وزن افزایش می‌یابد. نقاط اوج منحنی‌ها معرف نقطه انتقال از کمانش کلی به کمانش بین حلقه‌های در مود اول کمانش است. نکته مهم دیگر این است که با افزایش  $m$  کمانش بین حلقه‌های در مقطع حلقه بزرگتری رخ می‌دهد. افزایش میزان  $m$  موجب تغییر حجمی، به دلیل افزایش قطر جداره خارجی پوسته می‌گردد و فرایند طراحی را نیز تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در فرایند طراحی می‌توان از اثر  $m$  بر تغییر شناوری در  $m$  های کم چشم‌پوشی کرد. علت شیب نزولی منحنی‌ها پس از رسیدن به نقطه اوج عدم افزایش فشار کمانش پس از تبدیل به کمانش بین حلقه‌ی و افزایش ادامه دار وزن با افزایش ارتفاع حلقه‌ها است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر عوامل افزایش دهنده فشار کمانش در استوانه‌های تقویت‌شده با حلقه شامل ضخامت پوسته، ابعاد و فاصله حلقه‌ها و وجود و عدم وجود کنگره بین حلقه‌ها بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده با حلقه، در صورتی که تقویت‌های حلقه‌ای به میزان کافی قوی نباشند، کل ترکیب حلقه و پوسته دچار کمانش کلی می‌گردد. با تقویت حلقه‌ها فشار بحرانی افزایش قابل توجهی می‌یابد. این افزایش تا زمانی که کمانش بین حلقه‌ای رخ دهد ادامه خواهد یافت.

در شرایط کمانش بین حلقه‌ای، تقویت حلقه‌ها تأثیر چندانی بر فشار بحرانی کمانش نخواهد داشت، زیرا در این حالت آنچه که به کمانش سازه منجر می‌گردد ناشی از ضعف پوسته‌ی بین حلقه‌ها است. با تقویت پوسته‌ی بین حلقه‌ها با استفاده از کنگره‌دار کردن پوسته زمانی که حلقه‌ها از استحکام مناسبی برخوردار نباشند می‌تواند منجر به کاهش فشار بحرانی کمانش شود.

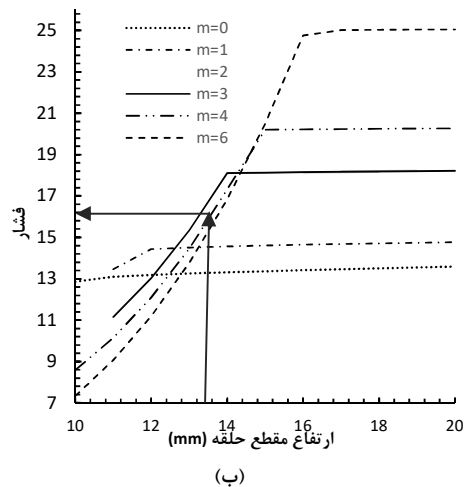
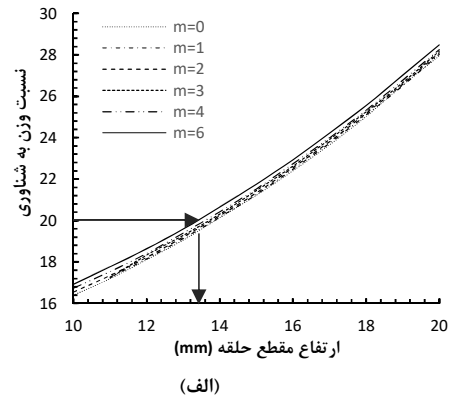
با افزایش ابعاد تقویتی‌ها در صورتی که پوسته‌ی بین حلقه‌ها با کنگره‌دار کردن اصلاح شده باشد، باعث افزایش در فشار بحرانی کمانش می‌شود.

افزایش فشار کمانش بحرانی در پوسته‌ی کنگره‌دار شده در حالتی که کمانش بین حلقه‌ای رخ داده است بسیار قابل توجه می‌باشد. به بیان دیگر موثر بودن اصلاح هندسی به این روش وابستگی زیادی به بین حلقه‌ای بودن کمانش دارد.

با افزایش شعاع کنگره ( $m$ ) در شرایط کمانش بین حلقه‌ای، فشار بحرانی کمانش افزایش خواهد یافت. این افزایش فشار به علت ضعف استحکام حلقه‌ها در برابر پوسته‌ی اصلاح شده بین آنها، منجر به خارج شدن حالت کمانش از کمانش بین حلقه‌ی می‌شود و کمانش کلی اتفاق خواهد افتاد.

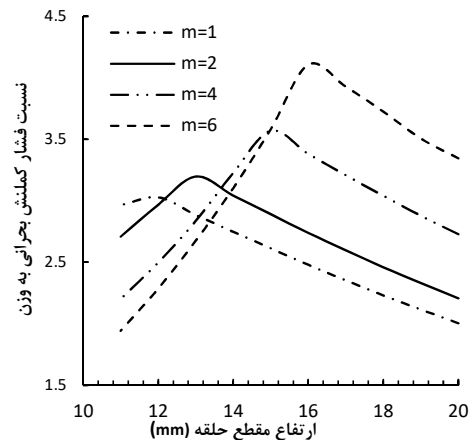
#### ۵- نمادها

$B$	نیروی شناوری ( $N$ )
$E$	ضریب الاستیسیته
$L$	طول ( $mm$ )
$P$	فشار خارجی ( $MPa$ )



شکل ۱۱- اثر شعاع کنگره بر فشار کمانش و نسبت وزن به شناوری در ارتفاع حلقه‌های مختلف. الف: تغییرات شناوری با تغییرات شعاع ب: تغییرات فشار کمانش با تغییرات شعاع

در شکل منحنی تغییرات فشار کمانش به وزن برای چهار پوسته‌ای استوانه‌ای با چهار  $m$  متفاوت بر حسب تغییر ابعاد مقطع حلقه‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات فشار کمانش به وزن برای چهار پوسته‌ای استوانه‌ای با شعاع انحنای متفاوت بر حسب تغییر ابعاد مقطع حلقه‌ها

[12] Ross, C.T.F., Little, A.P.F., The buckling of a corrugated carbon fiber cylinder under external hydrostatic pressure, *Ocean Eng.* 28 Vol.9. pp 1247-1264. 2001

[13] Bushnell, D., Crippling and buckling of corrugated ring-stiffened cylinders, *J. Spacecr. Rockets* Vol. 9., pp. 357-363 1972

[14] Öry, H. and Hoffmann, H., Stability of corrugated shells. In: Proceedings of the ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures, *Ghent University Ghent, Belgium*, pp. 567-576. 1987

[15] Öry, H., Hoffmann, H., Buckling and vibration of corrugated shells, Elishakoff, I., Arbocz, J., Babcock, C.D., Libai, A. (Eds.), "Buckling of Structures: Theory and Experiment." (*Studies in Applied Mechanics*), Vol. 19. Elsevier, New York, pp. 285-312 1988

[16] Ross, C.T.F., Waterman, G.A., Inelastic instability of circular corrugated cylinders under external hydrostatic pressure. *Ocean Eng.* Vol 27, pp. 331-343 2000

[17] Ross C.T.F., Waddington A., Punjau D., Dunn J., Bayly A., Sadler P., Ashwell J. and Little A.P.F., "Geometrical and material non-linear analyses of corrugated circular cylinders, suffering buckling, under external hydrostatic pressure. *Proceedings of Civil-Comp. Conference. Cagliari, Sardinia, Italy* 2013

[18] Niloufari A., Showkati H., Maali M., Fatemi S.M., Experimental investigation on the effect of geometric imperfections on the buckling and post-buckling behavior of steel tanks under hydrostatic pressure, *Thin-Walled Struct.* Vol. 74, pp. 59-69. 2014

[19] Ghazijahani, TG., Zirakian T., Determination of buckling loads of conical shells using extrapolation techniques, *Thin-Walled Struct.* Vol. 74, pp.292-299, 2014

[20] Ghazijahani TG., Showkati H., Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure, *J. Constr. Steel Res.* Vol 88, pp. 109-122 2013

[21] Volmir, A.S., Stability of Elastic Systems, Gos. Izd-vo Fiz. Mat. Lit., Moscow, 1963 (in Russian)

[22] ABS, American Bureau of Shipping Incorporated by Act of Legislature of the State of New York. Rules for Building and classing, Underwater vehicles, Systems and hyperbaric facilities 2018

[23] Tengfei T., Baoren L. Y. X., Lihui L., Xiaoyun Fu, Passive compensation analysis of Underwater glider under Seawater Pressure, The Japan Fluid Power System Society, Vol. 10, pp 3-4, 2017

فشار بحرانی کمانش (MPa)	$p_{cr}$
فشار حدی بین تقویتی سیلندر (MPa)	$p_c$
فشار کمانش فون میز برای سیلندر (MPa)	$p_m$
فشار تسلیم در صفحه میانی سیلندر (MPa)	$p_y$
فشار بیشینه مجاز برای هر حالت شکست (MPa)	$p_a$
فشار تسلیم طولی تقویت سیلندر (MPa)	$p_L$
فشار کمانش کلی سیلندر (MPa)	$p_n$
شعاع میانگین استوانه (mm)	$R$
شعاع داخلی استوانه (mm)	$r$
ضخامت پوسته (mm)	$t$
ضخامت جان تقویت (mm)	$t_w$
حجم آب جابجا شونده ( $mm^3$ )	$V$
ضریب کاربرد	$\eta$
ضریب پواسون	$\nu$
چگالی ( $kg/mm^3$ )	$\rho$
تنش نماینده (MPa)	$\bar{\sigma}$
کمینه استحکام تسلیم (MPa)	$\sigma_y$

#### ۶- مراجع

[1] Lorenz R., Buckling of a Cylindrical Shell under Axial Compression (In German), *J. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, 1908

[2] Southwell R., On the General Theory of Elastic Stability, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 213, pp. 497-508, 1914

[3] Von Mises R., Der Kritische Aussendruck Fur Allseits Belastete Zylindrische Rohre, *Fest Zurnal*, pp. 418-430, 1917

[4] Flugge, W., Die Stabilitat der Kreiszylinderschale, *Ing.Arch.*, Vol. 3, pp.463-506, 1932

[5] Schwerin E., Die torsionsstabilitat des dunnwandigen rohres, *ZAMM*, Vol. 5, pp. 235-243, 1925

[6] Donnell L., Stability of thin-walled tubes under torsion, *NACA*, Vol. 479, pp. 75-116, 1933

[7] Ross, C.T.F., A novel submarine pressure hall design, *J. Ship Res.* 31.Vol.3, pp. 186-188. 1987

[8] Yuan, K.Y., Liang, C.C., Ma Y.C. Investigation of the cone angle of a novel swedge-stiffened pressure hall, *J. Ship Res.* 35 Vol. 1, pp. 83-86 1991

[9] Ross, C.T.F., Palmer, A General instability of swedge-stiffened circular cylinders under uniform external pressure, *J. Ship Res.* 37 Vol.1, pp.77-85 1993

[10] Ross, C.T.F., Humphries, M., The buckling of corrugated circular cylinders under uniform external pressure. *Thin-Walled Struct.* 17 Vol. 4, pp. 259-271 1993

[11] Ross, C.T.F. and Heigl, T, Buckling of corrugated axisymmetric shells under uniform external pressure, In: *Proceedings of ASME Conference on Structural Dynamics and Vibration*. PD-Vol. 70, Houston, Texas, pp. 199-205 1995