



## مقایسه بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بادرز، شامل دو نوع گشودگی دایروی یا لوزوی به روش‌های آزمایشگاهی و عددی

محمد بزرگ‌منش<sup>1</sup>، علیرضا نظام‌آبادی<sup>2\*</sup>، سید محمد مهدی نجفی‌زاده<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

\* اراک، صندوق پستی 38361-1-9131، iau-arak.ac.ir@nezamabadi-a

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 شهریور 1395

پذیرش: 06 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

کمانش

پوسته استوانه‌ای

گشودگی دایروی

گشودگی لوزوی

اجزای محدود

### چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای به صورت رایج در صنایع مختلف از جمله صنایع هواپیماسازی، موشک، خطوط لوله، دوچرخه‌سازی، زیردریایی‌ها، وسایل مکانیکی مختلف، اتومبیل، سازه‌های تزئینی ساختمان‌ها و... بکار می‌روند. پوسته‌های استوانه‌ای به دلیل وزن کم، مقاومت زیاد و راحتی ساخت، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع دارند. این سازه‌ها در حین کار، تحت انواع نیروها از جمله نیروهای محوری، پیچشی، فشار داخلی، یا ترکیبی از انواع بارگذاری قرار می‌گیرند. پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های مختلف، به خاطر داشتن ناپیوستگی‌های هندسی، تحت تأثیر تمرکز تنش و ناپایداری سازه می‌باشند. بررسی اثرات حفره روی تحمل باربری و رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای از دغدغه‌های سازندگان و طراحان بوده و هست. در این مقاله، کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با درز، با گشودگی‌های لوزوی یا دایروی تحت بار محوری به روش‌های عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. پوسته‌ها از جنس فولاد با استاندارد (No: 1.0110 ST 37, DIN) در نظر گرفته شده‌اند که یکی از پرکاربردترین مواد استفاده شده در صنایع مختلف از جمله ساختمان‌سازی سنتی و صنعتی، گاز، نفت و پتروشیمی می‌باشند. اثر گشودگی‌های مختلف بر بار بحرانی کمانش پوسته‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است و در ادامه، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه گردیده‌اند.

## Comparison of Buckling load of Cylindrical Shells with Seam, Consisting of Two Types of Circular or Lozenge Cutouts, by Numerical and Experimental Methods

Mohammad Bozorgmanesh, Ali Reza Nezamabadi\*, Seyed Mohammad Mehdi Najafizadeh

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Arak, Iran.

\* P.O.B. 38361-1-9131, Arak, Iran, a-nezamabadi@iau-arak.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 September 2016  
Accepted 27 October 2016  
Available Online 18 December 2016

### Keywords:

Buckling  
Cylindrical shell  
Circular opening  
Lozenge opening  
Finite Element

### ABSTRACT

Cylindrical shells are commonly used in various industries such as manufacturing airplanes, missiles, pipelines, bicycles, submarines, different automobile devices, decorative structures for buildings, etc. They have extensive applications in industries because of their low weight, high resistance and ease of use. While working, these structures undergo various forces such as axial, torsional, internal pressure, or a combination of different loadings. Cylindrical shells with different openings are under the effect of tension concentration and instability of structure due to their geometric disconnections. The study of pore effects on load carrying and buckling behavior of cylindrical shells has been and, still is, among the manufacturers and designers' concerns. In this paper, the buckling of cylindrical shells with seam, with lozenge or circular openings under axial load has been investigated using numerical and laboratory methods. The shells are of steel (standard: No: 1.0110 ST 37, DIN) which is one of the most common materials used in various industries including traditional and industrial construction, gas, oil and petrochemical industries. The effect of different openings on the buckling load of shells has been analyzed, and the obtained results have been compared with those obtained in the lab using Abacus software.

### 1- مقدمه

است، دانست. حال در نظر بگیرید که اگر پدیده‌هایی مثل کمانش در سازه‌های بسیار حساس مثل هواپیما، خودرو، وسایل نقلیه تندرو اتفاق افتد، مشخص است که چه حوادث وحشتناکی رخ خواهد داد. کاربرد اصلی سازه‌های پوسته‌ای در صنایع مختلف، از جمله زیردریایی‌ها، هواپیماسازی، ساختمان‌سازی و... می‌باشد. از مهم‌ترین تدابیر طراحان، طراحی سازه‌ای

پدیده کمانش را می‌توان از چالش‌های بزرگ در طراحی‌های مهندسان و تولیدکنندگان، خصوصاً در دنیای صنعتی نوین که ایمنی، قابلیت اطمینان، بازار پذیری و اقتصادی بودن برای مشتریان از یک طرف و از طرفی دیگر، مراعات استانداردهای مختلف کیفی و صنعتی محصولات، بسیار حائز اهمیت

Please cite this article using:

M. Bozorgmanesh, A. R. Nezamabadi, S. M. M. Najafizadeh, Comparison of Buckling load of Cylindrical Shells with Seam, Consisting of Two Types of Circular or Lozenge Cutouts, by Numerical and Experimental Methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 414-424, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است که در برابر تغییر شکل‌های ناگهانی مانند کمانش، مقاومت کرده و در صورت وقوع کمانش، در محدوده کنترل‌شده باشد. برای این طراحی‌ها، روش‌ها و تئوری‌های مختلفی ارائه شده است؛ بنابراین، دانستن چگونگی تأثیر نقایص مختلف در سازه و توزیع بار اطراف آن‌ها و تقویت سازه به‌منظور کاهش وزن و بالا بردن کارایی سازه، بسیار حائز اهمیت است. وجود یک نقص در پوسته استوانه‌ای، می‌تواند باعث بروز پاسخ‌های موضعی در نزدیکی نقص یا حفره شود. البته نیرویی که باعث این کمانش می‌شود، از نیروی کمانشی پوسته بدون نقص، کمتر است. کمانش می‌تواند به‌صورت خم شدن به پهلو و یا در شکل مجاله شدن سطح سازه اتفاق افتد، یا آنکه در کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، کمانش، الزاماً به شکل خم شدن و یا مجاله شدن نیست، بلکه به این صورت تعریف می‌شود که در اطراف گشودگی، تغییر شکل‌های پلاستیک و کوچک، به وجود می‌آیند که پوسته بعد از آن تغییر شکل‌ها، قدرت تحمل بار را از دست می‌دهد. کمانش به این شکل که در اطراف گشودگی‌ها یا دیگر عیوب هندسی مثل شیارها اتفاق می‌افتد، کمانش موضعی گفته می‌شود. شریعتی و همکارانش [1] به بررسی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک دارای گشودگی بیضوی تحت بارگذاری مایل پرداختند. آزمایش‌ها روی چندین نمونه فولادی ضدزنگ (steel 316ti)، توسط یک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون<sup>1</sup> 8802 انجام گرفته است و پس از مقایسه نتایج، همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی مشاهده کردند. همچنین تحقیقاتی روی رفتار کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، انجام دادند. نمونه‌ها، دارای شرایط مرزی ثابتی بوده‌اند. میلادی و همکارانش [2] اثرات گشودگی‌های دایروی را روی ظرفیت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار محوری خاص، بررسی کردند. پوسته‌ها، با خواص هندسی مختلف و دارای ترتیبی از اندازه‌های گشودگی مختلف بودند. تحلیل‌های عددی غیرخطی، به‌وسیله نرم‌افزار انسیس<sup>2</sup> انجام شدند. نتایج نشان دادند که گشودگی‌ها می‌توانند نقش کلیدی در ایجاد تمرکز تنش داشته باشند. همچنین، نشان دادند که اختلاف عمده‌ای بین تأثیرات گشودگی در کمانش پوسته‌های نازک‌تر و ضخیم‌تر، وجود دارد. از دیگر نتایج آن پژوهش، این است که گشودگی‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای با نسبت قطر به ضخامت کمتر از (1000)، ظرفیت کمانشی را حدود (10 تا 15) درصد، کاهش می‌دهند؛ همچنین گشودگی‌ها، ظرفیت کمانشی پوسته‌هایی با نسبت قطر به ضخامت بالاتر از (1000) را حدود (30 تا 35) درصد، کاهش می‌دهند. اکبری آلاستی و همکارانش [3] تأثیرات برش‌های شیار روی توزیع تنش و پاسخ کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک را بررسی کردند. تحلیل المان محدود سه‌بعدی توسط نرم‌افزار انسیس انجام شده است. آن‌ها تأثیرات پارامترهای مختلف، مثل زاویه برش‌های شیار و نسبت‌های هندسی از جمله شعاع و ضخامت را روی پاسخ کمانشی پوسته و توزیع میدان تنش، بررسی کردند. بار کمانشی پوسته‌های تحت نیروهای محوری و برشی، از روش آزمایشگاهی به دست آمد و نتایج آن‌ها با نتایج نرم‌افزاری مقایسه شده‌اند. عبدالحسین فریدون و همکارانش [4] توسط روش اجزاء محدود، به بررسی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی نازک با گشودگی بیضوی تحت بارگذاری مایل، پرداختند. در ابتدا، نتایج عددی به‌وسیله نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده به‌وسیله دستگاه سرو هیدرولیک 8802 اعتبارسنجی شدند. همچنین، تأثیرات اندازه گشودگی، زاویه گشودگی ( $\theta$ )، موقعیت گشودگی ( $L0/L$ ) و نسبت ابعاد گشودگی ( $b/a$ ) را روی رفتار کمانش

و پس کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای، بررسی کردند. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پهنای گشودگی تا زمانی که ارتفاع گشودگی ثابت است، به‌طور فزاینده‌ای بار کمانشی را کاهش می‌دهد و تغییر موقعیت گشودگی از وسط ارتفاع پوسته به‌طرف لبه‌ها، بار کمانشی را افزایش می‌دهد. هیلبرگر و همکارانش [5] با بررسی نتایج عددی و تجربی، نشان دادند که انتخاب پیکربندی‌های تقویت‌شده گشودگی، روی کمانش و پاسخ شکست از بارگذاری فشاری پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با گشودگی، مؤثر است. تأثیرات تقویت‌کننده، اندازه، ضخامت‌ها و ارتوتروپی<sup>3</sup> روی پاسخ سرتاسری پوسته‌های تحت بار فشاری را شرح دادند. به‌طور کلی، تقویت اطراف گشودگی در پوسته‌های با بار فشاری، می‌تواند باعث به تأخیر انداختن یا حذف پاسخ موضعی کمانش و افزایش بار کمانشی پوسته شود. شاطر زاده و همکارانش [6] رفتار پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مدرج تابعی تقویت‌شده تحت بار فشاری خارجی و احاطه‌شده توسط بستر الاستیک را بررسی کردند. نتایج عددی نشان می‌دهد که تقویت‌کننده‌ها و بستر الاستیک باعث بالا بردن پایداری پوسته‌ها شده است. همچنین افزایش ضخامت پوسته، کاهش شاخص کسر حجمی، بالا بردن تعداد تقویت‌کننده‌های طولی و حلقوی و به کار بردن بستر الاستیک باعث افزایش بار بحرانی کمانش شده است. پورسعیدی و همکارانش [7] رفتار پلاستیک یک پوسته استوانه‌ای الاستوپلاستیک با گشودگی‌های دایروی و مربعی را تحت بارهای ممان خمشی به‌صورت عددی و تجربی، بررسی کردند. یک دستگاه اندازه‌گیر خمش خاص، جهت انجام آزمون‌های ممان خمشی، طراحی و ساختند. نسبت قطر به ضخامت نمونه‌های فولادی ضدزنگ از نوع (Steel 304)، 40.4 بوده و نسبت طول به قطر 7.94 بوده است. نمونه‌ها را در پنج دسته غیرهمسان دسته‌بندی و آزمایش کردند و تأثیرات اندازه، موقعیت و تعداد گشودگی را روی ممان پلاستیک بررسی کردند. تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد. مقاومت ممان خمشی پوسته‌ها، با افزایش اندازه گشودگی کاهش می‌یابد و با تغییراتی در موقعیت گشودگی از طرف فشاری به کششی، افزایش می‌یابد. تأثیرات تعداد گشودگی‌ها (افزایش از 1 به 3 و متقارن) روی مقاومت خمشی پوسته‌ها، ناچیز مشاهده شد. شریعتی و همکارانش [8] به تحلیل و شبیه‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با طول و قطر متغیر و دارای یک گشودگی بیضوی، تحت فشار محوری به‌صورت سامانمند پرداختند. در آن تحقیق، تأثیرات اندازه گشودگی، زاویه گشودگی ( $\theta$ ) و نسبت‌های ( $L/D$ ) و ( $D/i$ ) را روی پاسخ‌های پیش‌کمانش، کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، بررسی کردند. برای چندین نمونه، آزمایش‌های تجربی را به‌وسیله دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون (8802) انجام دادند. تطابق خوبی بین نتایج اجزاء محدود و نتایج تجربی، مشاهده گردید. ضمناً تعدادی معادلات به شکل ضریب کاهش بار کمانش، به دست آوردند. هسون ته هو و همکارانش [9] یک روش برنامه‌ریزی خطی متوالی با یک استراتژی حرکت محدود ساده، برای تحقیق بر روی بهینه‌سازی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با اهمیت سه‌گانه زیر، بکار گرفته‌اند:

- 1- بهینه‌سازی جهت فیبر برای ماکزیمم کردن مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی بدون گشودگی.
- 2- بهینه‌سازی جهت فیبر برای ماکزیمم کردن مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با گشودگی دایروی.
- 3- بهینه‌سازی هندسی گشودگی برای افزایش مقاومت کمانشی پوسته

<sup>1</sup> INSTRON 8802 servo-hydraulic machine.

<sup>2</sup> ANSYS

<sup>3</sup> orthotropy

استوانه‌ای کامپوزیتی.

ضخامت ورق و... را روی بار بحرانی کمانش ورق، بررسی کردند. روش عددی آن‌ها توسط نرم‌افزار اجزای محدود انجام شد.

با توجه به تاریخچه پژوهش، دلایل نوآوری این مقاله این است که اولاً کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، با ابعاد حفره بزرگ که دوماً مکان قرارگیری گشودگی‌ها، اختلاف خیلی زیادی ندارند و سوماً دارای گشودگی لوزی باشند، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. چهارماً در مقاله‌های قبلی، کمتر از پوسته‌های بادرز استفاده شده (که کاربرد بسیار وسیعی در صنعت دارند) و دلیل پنجم اینکه، کسری از پژوهش‌های قبلی، فقط به روش عددی و یا فقط با روش آزمایشگاهی انجام شده‌اند و ششم اینکه، مقاله‌های قدیمی با نرم‌افزارهای قدیمی انجام شده‌اند؛ بنابراین در این مقاله که مراحل آن بسیار دقیق انجام شده، سعی شده است که بار کمانشی و رفتار کمانشی این استوانه‌ها، مورد بررسی قرار گیرند تا نتایج این‌گونه تحقیقات بااهمیت کاربردی، توسعه و تکامل یابند. در این پژوهش، روش عددی تحلیل کمانش توسط نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته و آزمایش‌های کمانش نیز توسط دستگاه هیدرولیک پیشرفته و دیجیتال (GOTTECH AL-7000 LA 20) انجام شده‌اند. در بخش‌های پایانی، نتایج حاصل در قالب جدول، منحنی‌ها و شکل‌ها، مقایسه شده‌اند.

## 2- آزمایش‌های تجربی

### 2-1- هندسه و خواص مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه‌های مورد بررسی، پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با درز هستند. طول، قطر بیرونی و ضخامت همه نمونه‌ها، یکسان هستند و اندازه آن‌ها به ترتیب، 250، 48 و 2 میلی‌متر هستند. مراکز هندسی گشودگی‌ها، در ارتفاع‌های 100، 125 و 150 میلی‌متر از لبه پایین، تعبیه شده است. در سه عدد از نمونه‌ها، یک گشودگی دایروی و در سه نمونه دیگر نیز، یک گشودگی لوزی قرار گرفته است. گشودگی‌های دایروی و لوزی، دارای مساحت یکسان 452.4 میلی‌متر مربع هستند. شعاع گشودگی‌های دایروی، 12 میلی‌متر است. برای گشودگی‌های لوزی، قطر کوچک و قطر بزرگ به ترتیب، 26 و 34.8 میلی‌متر هستند. نحوه قرارگیری گشودگی لوزی، به این صورت است که قطر کوچک لوزی، به‌صورت عمودی (راستای محور استوانه) است و قطر بزرگ لوزی، به‌صورت افقی (راستای عمود بر محور استوانه)، قرار گرفته است. در شکل 1 مشخصات هندسی نمونه‌ها نشان داده شده است.

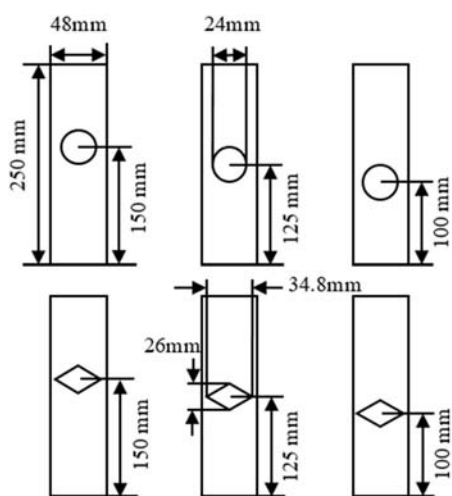


Fig. 1 Geometrical figure of cylindrical shells

شکل 1 شکل هندسی پوسته‌های استوانه‌ای

نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات بهینه‌سازی، نشان دادند که با توجه به ساختار هندسی و شرایط بارگذاری و سیستم مصالح، مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی، به‌طور زیادی تحت تأثیر جهات فیبر، شرایط انتهایی، وجود یک گشودگی و هندسه گشودگی هست. شریعتی و همکارانش [10] چگونگی تأثیرات طول، زاویه برش و شرایط مرزی را روی رفتار کمانش و پس‌کمانش پل‌های استوانه‌ای مطالعه کرده‌اند. بار محوری آزمایش‌های کمانش، توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون، انجام شده است. شرایط مرزی مختلف را توسط گیره‌های مناسبی، آماده‌سازی کردند. نتایج حاصل در این مقاله می‌تواند برای طراحی این‌گونه سازه‌ها بکار گرفته شود. تاجداری و همکارانش [11] رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک، دارای گشودگی‌های مثلثی متغیر با مساحت یکسان را تحت فشار محوری، بررسی کردند؛ و همچنین تأثیرات موقعیت گشودگی، نسبت طول به قطر ( $L/D$ ) و نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ ) را روی رفتار کمانش و پس‌کمانش این پوسته‌ها بررسی کردند. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، انجام گرفته است. همچنین برای چندین نمونه، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون (8802)، انجام شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود داشتند. شاید بتوان گفت که پژوهش آن‌ها، چه از لحاظ دقت و نظم و چه از لحاظ جامع بودن، یکی از بهترین تحقیقات در این زمینه می‌باشد و می‌توان از آن، به‌عنوان یک الگوی کامل برای کارهای مشابه استفاده شود. شریعتی و همکارانش [12] رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه کروی، استوانه‌ای و مخروطی از جنس فولاد ضدزنگ، تحت بارگذاری محوری را مطالعه کردند. هر نوع پوسته با در نظر گرفتن جرم یکسان و دو هندسه متفاوت شامل هندسه کامل و شیاردار، طراحی شده است. در این مقاله اثر هندسه، ضخامت، ارتفاع، وجود شیار بر روی پوسته‌ها و فاصله شیارها از یکدیگر، بر بار کمانش و مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌ها بررسی شد. آزمون تجربی به کمک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون 8802 و تحلیل عددی نرم‌افزار آباکوس<sup>1</sup>، انجام شد و نتایج مقایسه شده‌اند. تفرشی [13] مطالعه‌ای عددی را روی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با گشودگی مختلف، تحت بارهای فشاری محوری و فشار داخلی، توسط نرم‌افزار آباکوس انجام داد. وی تأثیرات اندازه و جهت گشودگی‌ها را بررسی نمود. مشاهده کرد که افزایش فشار داخلی، موجب افزایش ظرفیت تحمل در مقابل کمانش می‌شود و با افزایش اندازه گشودگی، بار کمانش کم می‌شود. نتایج نشان دادند که پاسخ استوانه دارای گشودگی، تحت تأثیر مساحت و جهت چرخش لایه‌ها، گشودگی و فشار داخلی می‌باشد. طاهری بهروز و همکارانش [14] به مطالعه عددی و تجربی تأثیر نواقص هندسی بر بار کمانش تحت نیروی محوری در استوانه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار و بدون سوراخ پرداختند. نتایج تجربی به‌دست‌آمده دقت نتایج عددی را تأیید می‌نماید. همچنین نشان داده شد در استوانه بدون سوراخ اعمال نواقص هندسی باعث افت زیاد بار کمانش در مقایسه با حالت بدون اعمال نواقص هندسی است ولی در استوانه‌های با وجود سوراخ، اعمال نواقص هندسی تأثیری کمتر از 10 درصد در کاهش بار کمانش دارند. شریعتی و همکارانش [15]، به بررسی عددی و آزمایشگاهی کمانش و پس‌کمانش ورق‌های تحت بار فشاری محوری پرداختند. جنس ورق‌ها از فولاد زنگ نزن بوده و اثر خواص مکانیکی و هندسی، طول ترک، زاویه ترک،

<sup>1</sup> Abaqus

یک انحنا یا فیلت<sup>1</sup> با شعاع حدود 1 میلی‌متر ایجاد می‌شود (به این انحنا یا فیلت، در اصطلاح کارگاهی «ار» گفته می‌شود که از حرف لاتین r گرفته شده و به معنای شعاع انحنا گوشه است). شکل نمونه‌های ساخته‌شده، در شکل 2 مشاهده می‌شوند.

### 2-3- آزمون کشش، جهت مشخص کردن خواص مکانیکی فولاد نمونه‌ها

برای تحلیل کمانش غیرخطی در نرم‌افزارها، باید خواص مکانیکی فولاد بکار رفته در نمونه‌ها را برای نرم‌افزار معرفی کرد. این خواص مکانیکی به‌وسیله مدول ینگ و منحنی تنش کرنش که از آزمون کشش پوسته حاصل می‌شوند، تعریف می‌شوند. در شکل 3 نمودار تنش کرنش ماده پوسته‌ها مشاهده می‌شوند.

این مرحله از مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی است، چراکه کوچک‌ترین اشتباهی در استخراج داده‌ها و نقاط منحنی تنش کرنش، می‌تواند منجر به ایجاد حدود پانزده درصد خطا در بار بحرانی شود و بسیار منحرف‌کننده باشد! گفتنی است که تبدیل تنش کرنش مهندسی به تنش کرنش واقعی، برای اکثر مسئولین آزمایشگاه‌ها و کاربران دستگاه‌ها و مهندسان، مفهومی ناآشنا است.



Fig. 2 figure of cylindrical shells

شکل 2 شکل پوسته‌های استوانه‌ای

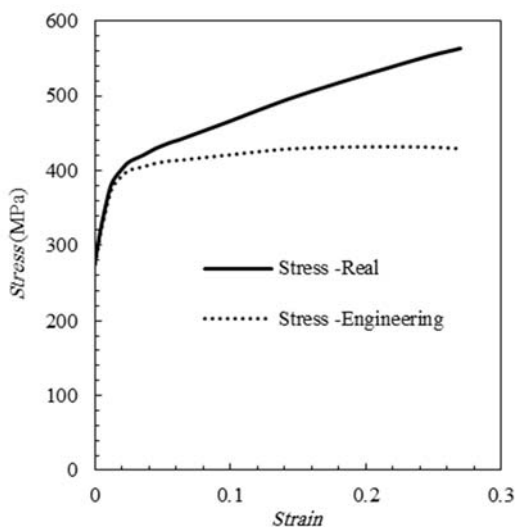


Fig. 3 Stress strain diagram of cylindrical shells

شکل 3 نمودار تنش کرنش پوسته‌های استوانه‌ای

نام‌گذاری به این صورت است که با دو رقم شروع می‌شود. سپس یک حرف لاتین نوشته شده که اولین حرف نام لاتین نوع گشودگی آن نمونه است، یعنی حرف (C)، ابتدای کلمه (Circle) و حرف (L)، ابتدای کلمه (Lozenge) است. سپس، عددی که به دنبال آن می‌آید، بیان‌کننده ارتفاع مرکز گشودگی از لبه پایینی نمونه‌هاست. نام‌ها به‌صورت زیر هستند:

(5-3-C 100) و (5-2-C 125) و (5-1-C 150)

(5-4-L 150) و (5-5-L 125) و (5-6-L 100)

### 2-2- نحوه ساخت قطعات نمونه‌ها

به‌منظور تولید نمونه‌ها، از لوله‌های فولادی با درز، از جنس (ST 37)، استفاده شده است. به‌محض تهیه کردن لوله (تمام لوله‌ها، چه آن‌هایی که از آلیاژهای کمیاب و گران بوده و چه لوله‌هایی که از مواد خیلی ارزان ساخته شده‌اند، معمولاً به‌صورت شاخه‌های شش متری تولید و به فروش می‌رسند)، ابتدا با استفاده از دستگاه برش (دستگاه اره آهن‌بر)، به قطعات کوچک‌تر بریده می‌شوند. ولی نکته مهم این است که در این مرحله، دقیقاً نباید به اندازه نمونه‌های مدنظر در پژوهش، بریده شوند؛ چراکه این مرحله فقط یک برشکاری اولیه است و سرعت برش (سرعت پیشروی دستگاه برش) خیلی زیاد است و بدیهی است که پلیسه‌ها و ناهمواری‌های زیاد ایجاد می‌شود و در اثر اینکه بار فشاری‌ای که جلوبرنده برشکاری است، زیاد و عمود بر بدنه لوله است، احتمال خم کردن جزئی در موضع برش وجود دارد (معمولاً دستگاه برشکاری برای اکثر فروشندگان و تولیدکنندگان لوله، مهیا است). مرحله بعدی، مرحله هم‌اندازه کردن دقیق لوله‌ها و هم‌سطح کردن دو طرف هر لوله یا در اصطلاح کارگاهی، گونیا کردن لبه‌ها، است. در این مرحله، سطح مقطع نمونه‌ها، الزاماً باید کاملاً صاف شوند، چراکه موقع قرارگیری در بین فک‌های دستگاه پرس هیدرولیک (جهت تست فشار)، باید لبه‌های پوسته‌ها، تماس به فک‌های دستگاه پرس شوند تا بارگذاری به‌صورت یکنواخت و گسترده وارد شود. برای این مرحله (هم‌اندازه کردن دقیق لوله‌ها)، از وسیله اندازه‌گیری نسبتاً دقیق کولیس و دستگاه تراشکاری، استفاده شده است (این مرحله در اصطلاح کارگاهی، آماده‌سازی نمونه‌ها گفته می‌شود).

نکته مهمی که در تمام مراحل هست، آن است که در اندازه‌گیری‌ها، اصلاً نباید به کولیس‌ها اطمینان کرد، چراکه در اثر کار و ضربه و یا فشار به شاخک‌ها، بعد از مدتی دقت خود را از دست می‌دهند و باید کالیبره شوند. پس قبل از اندازه‌گیری با آن‌ها، حتماً باید از کالیبره بودن آن (طبق استانداردها و گواهینامه‌های مربوطه)، مطمئن شد. در غیر این صورت، ممکن است ضخامت، طول، یا ابعاد گشودگی را با یک یا چند میلی‌متر خطا نشان دهند و این به‌نوبه خود می‌تواند بسیار گیج‌کننده باشد و کل پروژه را مختل کند. گفتنی است که اگر ضخامت در هنگام شبیه‌سازی با نرم‌افزار، یک میلی‌متر بیشتر تعیین شود، می‌تواند تا حدود هشت درصد خطا را نتیجه دهد. وسایل اندازه‌گیری دیگری مثل میکرومتر، ضخامت سنج الکترونیکی و کولیس‌های دیجیتال نیز هست که وسایل مذکور، دارای دقت اندازه‌گیری متفاوتی هستند و معمولاً دقت اندازه‌گیری هر وسیله، بر روی آن درج می‌شود؛ مثلاً دقت کولیس‌های کوچک‌تر، حدود 0.02 میلی‌متر و دقت میکرومترهای مختلف، حدود 0.01 میلی‌متر است.

در پایان نیز، بر روی هر پوسته یک گشودگی ایجاد می‌شود. نقشه نمونه‌ها و گشودگی‌های مربوطه را باید مطابق با آنچه در شکل 1 دیده می‌شود به کارگاه ساخت، تحویل داد تا نمونه‌ها دقیقاً مانند نقشه، دریافت شوند. توجه شود که در گشودگی‌هایی مانند لوزی و در گوشه‌های گشودگی،

<sup>1</sup> Fillet

مشخص شوند (در کامپیوتر دستگاه‌های آزمون کشش، کرنش معمولاً با حرف  $(e)$  نمایش داده می‌شود). در منحنی تنش کرنش (که نمونه‌ای از منحنی‌های بار جابجایی، برای بارگذاری کششی است)، گاهی محورها برحسب پارامترهای نیرو و جابجایی هستند؛ اما می‌توان هر موقع بعد از آزمون کشش، به آزمایشگاه مربوطه مراجعه کرد و با توجه به شماره گزارش مربوطه، فایل ثبت‌شده در کامپیوتر را باز کرده و محورهای منحنی را برحسب پارامترهای تنش (برحسب پاسکال) و کرنش  $(e)$  مدرج و مرتب کرد تا کل منحنی، خود را با پارامترهای جدید، به‌روزرسانی کند. توجه کنید که شکل کلی منحنی ممکن است اصلاً عوض نشود، چراکه برنامه طوری طراحی شده که عددهای روی محورها، عوض می‌شوند و نه شکل کلی منحنی.

حال یک منحنی تنش کرنش اسمی یا مهندسی داریم. بعد از استخراج حدود بیست نقطه از منحنی تنش کرنش مهندسی و تبدیل آن‌ها به تنش کرنش واقعی، می‌توان گفت که یک منحنی واقعی و درست برای یک کار واقعی و دقیق نرم‌افزاری به دست آمده است که رفتار مکانیکی واقعی ماده نمونه‌ها را بیان می‌کند. عدم این تبدیل، کل پروژه را مختل می‌کند و باعث انحراف کلی می‌شود.

در پایان، تنش کرنش ورودی به نرم‌افزار آباکوس باید تنش کرنش پلاستیک باشد (تنش واقعی و کرنش پلاستیک). این کار نیز، با یک فرمول ساده انجام می‌شود. پس کلاً سه نوع فرمول بکار می‌رود که اولی بر روی مقادیر تنش مهندسی یا اسمی و دومی نیز بر روی مقادیر کرنش مهندسی اعمال می‌شود و در پایان نیز، فرمول سوم بر روی مقادیر کرنش اعمال می‌شود تا کرنش‌های پلاستیک خالص به دست آیند.

یادآوری می‌شود که برای منحنی‌های تنش کرنش با شیب‌های ملایم (همان منحنی اولیه و دریافتی از آزمایشگاه، یا منحنی تنش کرنش اسمی)، معمولاً استخراج پانزده نقطه برای وارد کردن در نرم‌افزار کافی است، چراکه در واقع، از وصل کردن این نقاط، منحنی‌ای به دست می‌آید که خطوط راست واصل نقاط آن، با تقریب بسیار خوبی بر منحنی اول مماس می‌شود، به طوری که فاصله آن‌ها بسیار نامحسوس است؛ اما برای منحنی‌هایی که تلاطم و نوسانات زیادی دارند (در چنین موادی، معمولاً در ابتدای ناحیه پلاستیک، این‌گونه رفتاری مشاهده می‌شود)، در نقاط بیشینه و کمینه ناحیه تلاطم نیز، باید نقاط را استخراج و سپس به تنش کرنش واقعی و پلاستیک تبدیل کنید. البته برای چنین موادی حدود سی نقطه، کاملاً کافی است. استخراج بیشتر از این تعداد نقطه، بی‌فایده و در نتایج نهایی نرم‌افزاری، اثر بسیار ناچیزی دارد؛ به طوری که برای بار بحرانی کمانش، در حدود  $(0.005kN)$  هستند و در جواب‌های نرم‌افزاری، قابل رند کردن هستند. توجه شود که این بیست نقطه، باید در ناحیه بعد از نقطه تسلیم ماده استخراج شده و به روش مذکور، به نرم‌افزار داده شوند. از لحاظ علمی، نقاط ناحیه بعد از تنش بیشینه (تنش نهایی ماده) در محاسبات نرم‌افزاری، کاربردی ندارند؛ بنابراین، استخراج نقاط تنش کرنش اسمی با فاصله‌های تقریباً یکسان و تا قبل از نقطه بیشینه تنش نمودار، کافی است. نمودار تنش کرنش مهندسی و نمودار تنش کرنش واقعی (تنش واقعی و کرنش پلاستیک)، روی نمودار شکل 3 مشاهده می‌شوند.

#### 4-2- نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها

آزمایش‌ها در شرایط کاملاً یکسان استاندارد و در دمای معمولی (حدود 26 درجه سانتی‌گراد) انجام شده‌اند. در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی تک‌تک نمونه‌ها، به‌طور مختصر آورده شده است. این نتایج

متطابق نتایج آزمون کشش پوسته که با دستگاه (GOTECH AL-7000 LA) 20 انجام شده است، مدول الاستیسیته پوسته‌ها،  $(201.147 \text{ GPa})$  و تنش تسلیم پوسته‌ها  $(275.891 \text{ MPa})$  است و نسبت پواسون آن‌ها را  $(0.33)$  در نظر گرفته‌ایم (جدول 1).

#### 2-3-1- مراحل انجام آزمون کشش و استخراج اطلاعات آن

آزمایش در شرایط استاندارد (حدود 26 درجه سانتی‌گراد) انجام شده است. تقریباً همه آزمایشگاه‌هایی که آزمون فشار نمونه‌ها را (جهت آزمون کمانش) انجام می‌دهند، آزمون کشش را نیز انجام می‌دهند. در واقع اکثر دستگاه‌های پرس هیدرولیک، دو نوع فک دارند؛ دو فک برای ایجاد بار کششی (جهت قرارگیری نمونه آزمون کشش) و دو فک دیگر برای ایجاد بار فشاری (جهت آزمون فشاری یا آزمون کمانش). سپس یک قطعه از پوسته که بهتر است طول آن، حدود 25 سانتی‌متر کمتر نباشد، برش داده شده و به آزمایشگاه تحویل داده می‌شود تا نمونه‌ای برای آزمون کشش از آن جداسازی و آماده‌سازی شود. البته با توجه به ابعاد و ضخامت پوسته، طبق جداول استاندارد، یک نمونه از پوسته بریده می‌شود (شکل 4). این نمونه‌برداری توسط دستگاه وایرکات یا دستگاه فرز انجام می‌شود.

اکنون این نمونه دمبلی شکل جداشده از پوسته (که به شکل حرف لاتین I است و در پایین شکل 4 دیده می‌شود) در دستگاه آزمون کشش قرار می‌گیرد. با توجه به استانداردها و اندازه‌گیری دقیق، قبل از انجام آزمون کشش، یک ناحیه طولی روی بدنه قطعه دمبلی شکل، نشانه‌گذاری می‌شود و سطح مقطع آن نیز اندازه‌گیری می‌شود. بعد از انجام آزمون کشش و شکست قطعه دمبلی شکل، طول نهایی آن قسمتی که به‌عنوان طول اولیه، اندازه‌گیری شده بود، دوباره اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار اندازه اختلاف طول اولیه و طول ثانویه قطعه دمبلی شکل را با کلمه لاتین (Elongation)، ثبت و در برگه نتایج، نشان می‌دهند. دستگاه در طول فرآیند کشش، نیرو در هر لحظه از زمان و دراز شدگی نمونه در آن لحظه را ثبت می‌کند. در پایان هم با توجه به ابعاد سطح مقطع قطعه دمبلی شکل که کاربر به دستگاه می‌دهد، فشار یا همان تنش (نیرو بر سطح مقطع نمونه) روی محور عمودی نمودار تنش کرنش، حاصل می‌شود. گفتنی است که محورهای عمودی یا افقی نمودار تنش کرنش می‌توانند واحدهای مختلفی بنا به درخواست کاربر داشته باشند، ولی اکیداً بهتر است که محور عمودی نمودار تنش کرنش حاصل، برحسب پارامتر تنش و محور افقی، برحسب پارامتر کرنش، مدرج و

جدول 1 خواص مکانیکی پوسته‌ها

Table 1 Mechanical properties of shells

Elasticity Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	Poisson's Ratio
201.147	275.891	431.22	0.33



Fig. 4 figure of model for tension test

شکل 4 شکل مدل برای آزمون کشش



Fig. 6 figure of (5-1-C 150) and (5-4-L 150), after buckling  
شکل 6 شکل نمونه (5-1-C 150) و (5-4-L 150)، بعد از کمانش

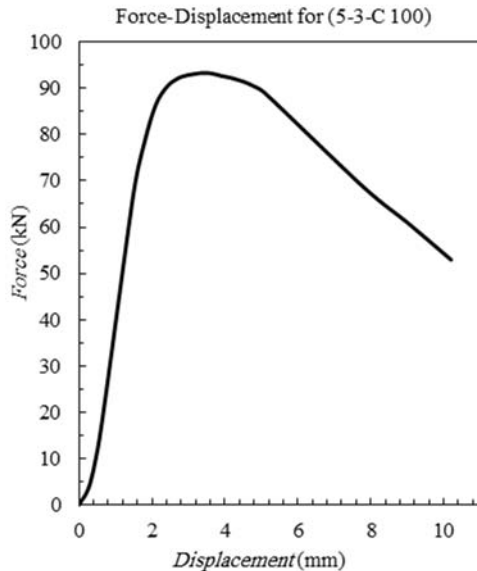


Fig. 7 Experimental load-displacement diagram for (5-3-C 100)  
شکل 7 نمودار بار جابجایی آزمایشگاهی برای (5-3-C 100)

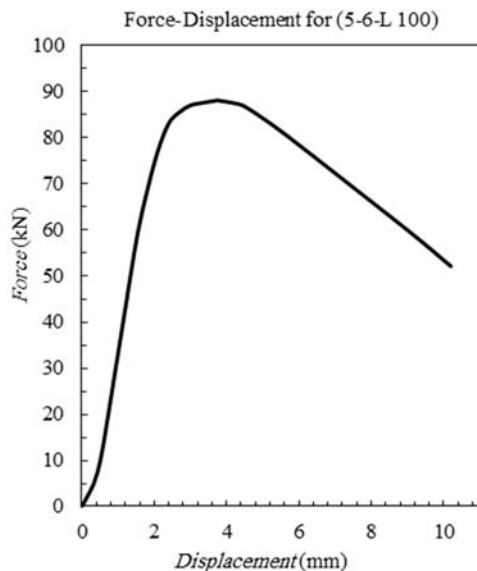


Fig. 8 Experimental load-displacement diagram for (5-6-L 100)  
شکل 8 نمودار بار جابجایی آزمایشگاهی برای (5-6-L 100)

### 3- شبیه‌سازی آزمایش‌ها و تحلیل عددی به روش اجزای محدود

برای شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار آباکوس (6.12-1) استفاده شده است. در ادامه، به مهم‌ترین قسمت‌های شبیه‌سازی اشاره شده است.

به‌صورت نمودارهای بار جابجایی، شکل نمونه‌های کمانش کرده و جدول بار بحرانی نمونه‌ها می‌باشند.

معیار کمانش در این بخش، قله نمودار بار جابجایی استخراج شده از دستگاه آزمون کمانش است. به عبارتی، بعد از انجام هر آزمون که بر روی هر نمونه انجام شد، برگه نتایج آن نیز از حافظه دستگاه استخراج شده است؛ در حین آزمون فشار، به‌محض تغییر شکل‌های اطراف گشودگی (همان کمانش موضعی)، سازه قدرت تحمل بار خود را از دست می‌دهد و توسط بارهای کمتری نیز، به کوتاه شدگی‌اش ادامه می‌دهد که این مرحله در نمودار بار جابجایی و در قله نمودار پیداست. قله نمودار بار جابجایی، بیشینه بار تحمل شده توسط سازه را بیان می‌کند که همان بار کمانش سازه است. همان‌طور که در شکل‌ها مشهود است، تقریباً تمام نمونه‌ها به یک شکل خم شده‌اند، این شباهت در نمودارهای بار جابجایی و شباهت بسیار زیاد آن‌ها نیز قابل مشاهده است. با توجه به نمودارهای بار جابجایی آزمایشگاهی، چه در قسمت قبل از کمانش و چه در قسمت بعد از کمانش و حتی در رفتار نمونه‌ها در لحظه کمانش (اطراف بار کمانش بر روی نمودار)، این شباهت محسوس است. دو دلیل عمده، در رابطه با این مطلب وجود دارد. اول اینکه در ساخت نمونه‌ها، ایجاد گشودگی‌ها و گونیا کردن لبه‌ها، بسیار دقت و حساسیت انجام گرفته است. همچنین این دقت‌ها، باعث می‌شود که شرایط هندسی نمونه‌ها، کاملاً به شرایط ایده‌آل نزدیک‌تر شده و از این لحاظ، به شرایط مدل نظیر خودشان در شبیه‌سازی نرم‌افزاری، بسیار شبیه‌تر شوند و طبیعتاً نتایج شبیه‌تر و منظم‌تری برایشان حاصل خواهد شد. دوم اینکه اختلاف ارتفاع گشودگی‌ها، نسبت به بسیاری از پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، کم بوده و مکان‌های قرارگیری آن‌ها، بسیار نزدیک به هم هستند و این باعث می‌شود که برخلاف پژوهش‌های قبلی، بارهای بحرانی و نمودارهای بار جابجایی نمونه‌ها، رفتارهای بسیار شبیه به هم و منظم‌تری داشته باشند. شکل‌های 5 و 6، نمونه‌های آزمایش‌شده را بعد از آزمون کمانش، نشان می‌دهند. در شکل‌های 7 و 8 نمودارهای بار جابجایی و شباهت زیاد آن‌ها قابل مشاهده‌اند. بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای هر نمونه، در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2 بار کمانشی پوسته‌ها، به روش آزمایشگاهی

Table 2 Experimental buckling load of shells

نام نمونه	بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج آزمایشگاهی (kN)
5-3-C 100	93.252
5-2-C 125	93.197
5-1-C 150	93.099
5-6-L 100	87.968
5-5-L 125	87.819
5-4-L 150	87.737



Fig. 5 figure of (5-2-C 125) and (5-5-L 125), after buckling  
شکل 5 شکل نمونه‌های (5-2-C 125) و (5-5-L 125)، بعد از کمانش

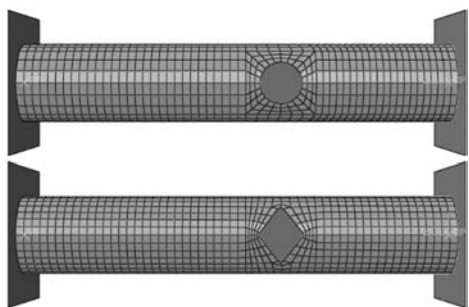


Fig. 9 Meshing figure of shells

شکل 9 شکل مش‌بندی پوسته‌ها

پلاستیک ماده در نظر گرفته نمی‌شود و نرم‌افزار فقط بر اساس رفتار ماده در ناحیه الاستیک و مدول یانگ و نسبت پواسون ماده، شروع به تحلیل می‌کند. در این مرحله، مدهای کمانش سازه (شکل‌هایی که سازه ممکن است در آن حالت کمانش کند)، به دست می‌آیند. اکنون اگر قطعه به هر کدام از آن مدهای احتمالی کمانش کند، یک بار بحرانی منحصر به فرد دارد که یک مقدار ویژه، نامیده می‌شود. البته می‌دانیم که کمانش در مدهایی احتمال وقوع بیشتری دارد که مقدار ویژه آن مد، کمتر است؛ به عبارتی، معمولاً سازه به شکل مدهای اول تا سوم، بخصوص مد اول، اتفاق می‌افتد. در اینجا، این نکته حائز اهمیت است که برخی مدها، دارای مقدار ویژه‌های نزدیک به هم هستند، پس احتمال وقوع کمانش در آن‌ها، قابل پیش‌بینی نیست و به همین علت در تحلیل نهایی کمانش، معمولاً چند مد اول را در نظر می‌گیرند و نه فقط مد اول را. در این نوع تحلیل، ماده الاستیک خطی فرض می‌شود و این ساده‌سازی باعث خواهد شد که محاسبه بار بحرانی با خطای زیادی همراه باشد، به طوری که بار بحرانی کمانش سازه را خیلی بیشتر از بار کمانشی واقعی سازه، پیش‌بینی می‌کند.

در تحلیل خطی که پیش‌نیاز تحلیل کمانش غیرخطی است، نتیجه نرم‌افزاری نسبت به نتیجه آزمایشگاهی، حدود ده تا بیست برابر، بزرگتر است.

مرحله دوم تحلیل کمانش، یا تحلیل غیرخطی کمانش به کمک روش استاتیک ریکس<sup>4</sup>، مقدار بار بحرانی کمانش سازه (مقدار واقعی بار کمانش نرم‌افزاری)، به دست می‌آید و رفتار ماده، الاستوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده در این مرحله، به نتایج واقعی بسیار نزدیک است. معیار کمانش در این مرحله، همان قله نمودار LPF است که یکی از خروجی‌های نرم‌افزار است و بعد از پایان تحلیل از نرم‌افزار استخراج می‌شود و بار کمانشی سازه را بیان می‌کند (پیشینه مقدار آن منحنی روی محور عمودی‌اش، عددی است که به صورت ضربی از بار وارد شده در محیط بارگذاری نرم‌افزار می‌باشد و چون همه واحدها برحسب سیستم SI هستند، این عدد نیز برحسب نیوتن محسوب می‌شود). در پایان این تحلیل، می‌توان نمودارهای بار جابجایی را به روش خاصی استخراج کرد. در شکل‌های 10 و 11، نمودارهای بار جابجایی حاصل از تحلیل نرم‌افزاری دیده می‌شوند. مقدار پیشینه منحنی بار جابجایی، بار کمانش پوسته محسوب می‌شود و می‌توان اندازه آن را به روش خاصی از نرم‌افزار استخراج و در کنار منحنی درج کرد. در جدول 3 بار کمانشی حاصل از نتایج نرم‌افزاری برای همه نمونه‌ها، دیده می‌شود. بهتر است بدانید که دومرحله‌ای بودن تحلیل کمانش در نرم‌افزار آباکوس، به طور چشم‌گیری، به کاربران کمک می‌کند. به عبارتی، اگر مشکلی در یک مرحله ایجاد شود، فقط آن مرحله اصلاح می‌شود و کل مراحل حل و

### 1-3- معرفی خواص مواد پوسته‌ها برای نرم‌افزار

اکثر مهندسان و استادان دانشگاه‌ها با منحنی‌های تنش کرنش ایده‌آل سروکار داشته‌اند که این موضوع، برای آموزش و یادگیری مباحث درسی بوده است و در واقع یک ساده‌سازی عمده است که برای روند تحلیلی و تسریع در آموزش، ضروری بوده و حتی برای مدل‌سازی‌های فرضی در نرم‌افزارها (برای تمرین و یا برای آموزش نرم‌افزارها)، کاملاً ضروری بوده است. این چنین اموری، با توجه به اهمیتی که دارند را می‌توان به‌عنوان فصل جدایش دانشگاه و دانشجویان با صنعت دانست؛ زیرا همچنان که برای دانشگاه بی‌اهمیت تلقی می‌شوند، در صنعت باید بسیار مورد توجه قرار گیرند و پایه محاسبات محسوب می‌شوند. در ابتدای بخش (2-3) توضیحات مرتبط با این موضوع داده شده است. همچنین برای تکمیل توضیحات این بخش، به مطالب بخش (2-3-1) مراجعه شود. یادآوری می‌شود که تنش کرنش ورودی به نرم‌افزار آباکوس باید تنش کرنش پلاستیک باشد (تنش واقعی و کرنش پلاستیک). این فرآیند، با به‌کارگیری سه نوع فرمول انجام می‌شود که اولی بر روی مقادیر تنش مهندسی یا اسمی و دومی نیز بر روی مقادیر کرنش مهندسی اعمال می‌شود و سپس، فرمول سوم بر روی مقادیر کرنش اعمال می‌شود تا کرنش‌های پلاستیک خالص به دست آیند. حال می‌توان، این نقاط را در نرم‌افزار وارد کرد.

### 2-3- شرایط مرزی

ابتدا، یک فک برای لبه پایینی و سپس، یک فک نیز برای فک بالایی طراحی و بر لبه‌های پوسته مماس شده‌اند. برای فک بالا، تمام جابجایی‌ها، به جز جابجایی در راستای محور و تمام درجات آزادی چرخشی، مقید شده‌اند و برای فک پایینی نیز، تمام درجات آزادی (سه درجه جابجایی و سه درجه چرخشی) مقید شده‌اند؛ به عبارتی، همه آن‌ها صفر در نظر گرفته شده‌اند. یک بار فشاری واحد نیز به مرکز فک بالا اعمال شده است که حاصل آن، بار فشاری گسترده یکنواخت روی لبه‌های پوسته‌ها است. این حالت‌ها، دقیقاً مانند فک‌های پرس هیدرولیکی است.

### 3-3- المان‌بندی:

نوع مش<sup>1</sup>، شکل، محل و تعداد المان‌ها بر نتایج تأثیر می‌گذارند. معمولاً با افزایش تعداد المان‌ها، تحلیل به نتایج بهتری نزدیک می‌شود، اما زمان تحلیل بالا می‌رود. المان‌بندی، در محیط (ماژول<sup>2</sup>) مش‌بندی، انجام می‌شود که خیلی پیشرفته، حرفه‌ای و بسیار گسترده است و به دانش بالایی در علوم مهندسی و مکانیک احتیاج دارد؛ بنابراین، در این محیط، بیش از ده‌ها مرتبه می‌توان مدل‌سازی را بهینه‌تر کرد و یا به اصلاح‌های کلی در آن پرداخت. از المان (S4R)، برای شبیه‌سازی پوسته‌ها استفاده شده است. مشخص است که این المان، از دسته المان‌های پوسته است و المانی چهار گره‌ای بوده و برای تحلیل آن از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته<sup>3</sup> استفاده می‌شود. نمونه‌های المان‌بندی شده، در شکل 9 نشان داده شده است.

### 4-3- فرآیند تحلیل

در تحلیل نرم‌افزاری، ابتدا یک تحلیل خطی به صورت پیش‌نیاز و سپس یک تحلیل غیرخطی انجام می‌شود. اولین مرحله، تحلیل خطی کمانش است و به وسیله تحلیل مقادیر ویژه محاسبه می‌شود. در این مرحله، خواص الاستیک

<sup>1</sup> Mesh

<sup>2</sup> module

<sup>3</sup> Reduced Integration

<sup>4</sup> Static, Riks

مشاهده می‌شود، در تحلیل تجربی و همچنین در تحلیل نرم‌افزاری، تغییر شکل‌های حاصله در اطراف گشودگی، شبیه به هم بوده و به این صورت است که تاشدگی پوسته در گوشه‌های گشودگی که در راستای افقی روبروی هم و در یک ارتفاع هستند، عکس هم می‌باشد. این شکل تاشدگی اطراف گشودگی، فقط در نمونه واقعی (5-2-C 125) با همه تفاوت دارد. البته، اینکه کمانش به چه شکلی اتفاق افتد، به آسانی قابل پیش‌بینی نیست، چراکه اغتشاش‌ها و ناپایداری‌ها در پوسته در هنگام کمانش، بسیار زیادند و سریع اتفاق می‌افتند و البته دلایل دیگری هم دارد. این موضوع در تحلیل نرم‌افزاری، به شدت مشاهده شد؛ یعنی به دفعات زیادی، مش‌بندی‌ها تغییر داده شد تا سرانجام توسط یکی از انواع مش‌بندی، این شکل کمانش حاصل شد (سعی شده که مش‌بندی نرم‌افزاری، برای همه نمونه‌ها یکسان باشد). البته این موضوع‌ها و بررسی دقیق و علمی آن‌ها را می‌توان در یک پژوهش جداگانه، مورد بررسی قرار داد. در شکل‌های 12 و 13 نمونه‌های شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شوند.

#### 4- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، با نتایج روش نرم‌افزاری که توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده، در جدول و نمودارهایی مقایسه شده‌اند و درصد خطای نتایج نرم‌افزاری برای هر نمونه، مشخص شده است. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزاری، اختلاف کم بین آن‌ها و نتایج بسیار دقیق تحلیل نرم‌افزاری مشهود است، چراکه با همه فرضیات و ساده‌سازی‌ها، باز هم این نتایج، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک هستند. دیده می‌شود که حداکثر خطای نتایج نرم‌افزاری از نتایج واقعی 6.1 درصد است. همچنین حداقل خطای حاصل 0.6 درصد است (جدول 4). میانگین خطاها در نمونه‌های دایروی،

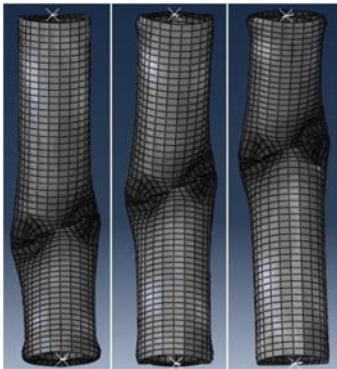


Fig. 12 figure of circular models, after buckling

شکل 12 شکل مدل‌های دایروی، بعد از کمانش

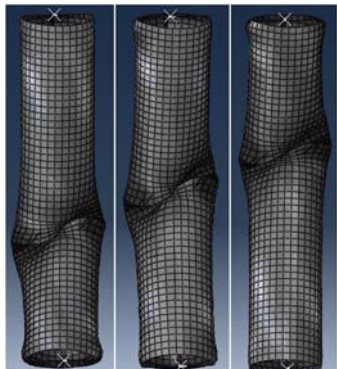


Fig. 13 figure of lozenge models, after buckling

شکل 13 شکل مدل‌های لوزی، بعد از کمانش

مدل‌سازی بازبینی نمی‌شود؛ یعنی، امکان اصلاحات جزئی و کلی مکرر در مدل‌سازی، خیلی تسریع و راحت‌تر می‌شود که به‌نوبه‌خود در حفظ نظم فرآیند تحلیل، بسیار حائز اهمیت است.

جدول 3 بار کمانشی پوسته‌ها، به روش نرم‌افزاری

Table 3 buckling load of shells by FEM method

نام نمونه	بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج نرم‌افزاری (kN)
5-3-C 100	87.572
5-2-C 125	88.686
5-1-C 150	88.074
5-6-L 100	86.500
5-5-L 125	87.290
5-4-L 150	86.590

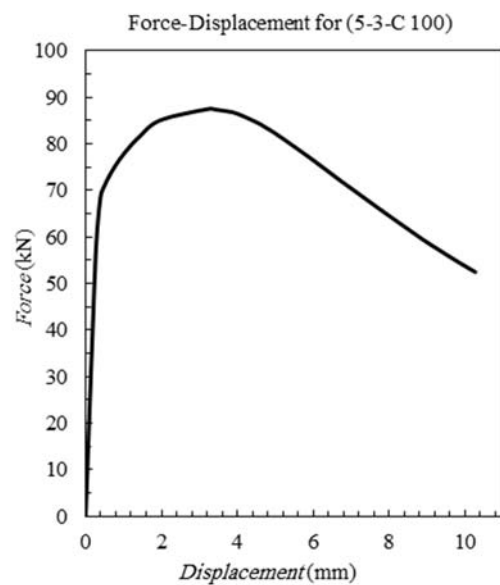


Fig. 10 Numerical load-displacement diagram for (5-3-C 100)

شکل 10 نمودار بار جابجایی عددی برای (5-3-C 100)

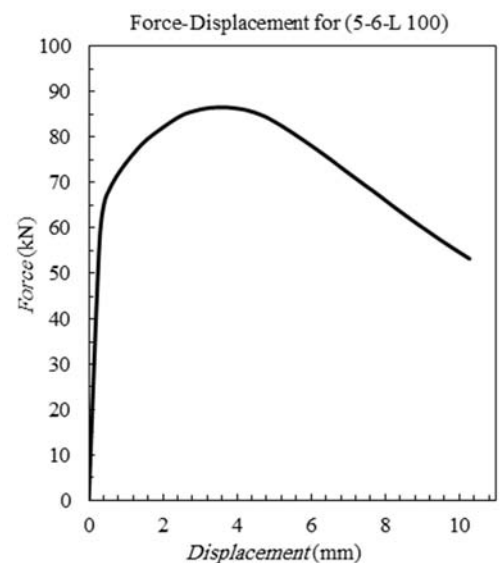


Fig. 11 Numerical load-displacement diagram for (5-6-L 100)

شکل 11 نمودار بار جابجایی عددی برای (5-6-L 100)



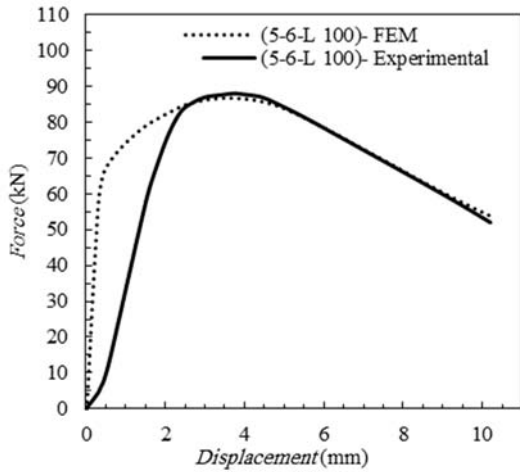


Fig. 16 Comparison of numerical and experimental load-displacement diagram for (5-6-L 100)

شکل 16 مقایسه نمودار بار جابجایی عددی و آزمایشگاهی برای (5-6-L 100)

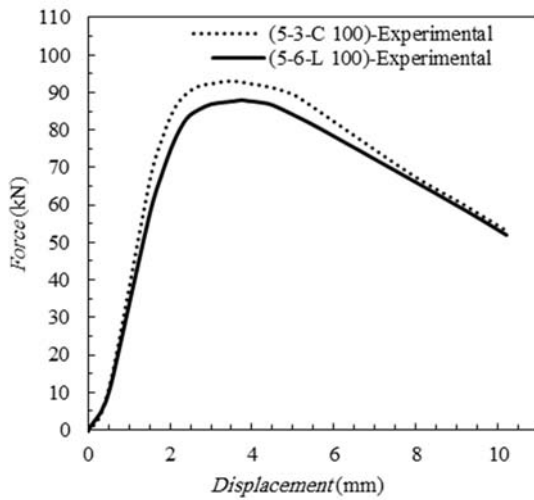


Fig. 17 Comparison of experimental load-displacement diagram for (5-3-C 100) and (5-6-L 100)

شکل 17 مقایسه نمودار بار جابجایی آزمایشگاهی برای (5-6-L 100) و (5-3-C 100)

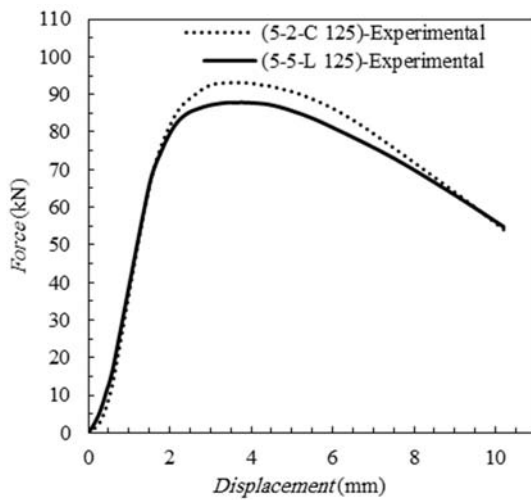


Fig. 18 Comparison of experimental load-displacement diagram for (5-2-C 125) and (5-5-L 125)

شکل 18 مقایسه نمودار بار جابجایی آزمایشگاهی برای (5-2-C 125) و (5-5-L 125)

جدول 4 مقایسه بارهای کمانشی پوسته‌ها، به روش‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

Table 4 Comparison of buckling load of shells by FEM and experimental methods

نام نمونه	بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج نرم‌افزاری (kN)	بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج آزمایشگاهی (kN)	درصد خطا
5-3-C 100	87.572	93.252	6.1 %
5-2-C 125	88.686	93.197	4.8 %
5-1-C 150	88.074	93.099	5.4 %
5-6-L 100	86.500	87.968	1.7 %
5-5-L 125	87.290	87.819	0.6 %
5-4-L 150	86.590	87.737	1.3 %

حدود 5.4 درصد و میانگین خطاها در نمونه‌های لوزی، حدود 1.2 درصد است. جالب است که میانگین همه خطاها (خطای حاصل برای همه نمونه‌ها)، حدود 3.3 درصد است. نمودار بار جابجایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، با نمودار بار جابجایی حاصل از نتایج نرم‌افزاری، در شکل‌های 14 تا 16، مقایسه و مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل‌های 17 تا 19 نمودارهای بار جابجایی آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

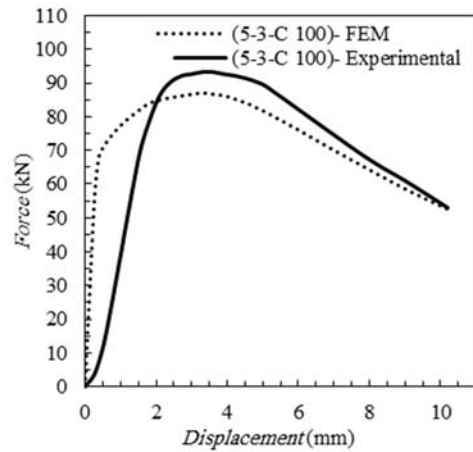


Fig. 14 Comparison of numerical and experimental load-displacement diagram for (5-3-C 100)

شکل 14 مقایسه نمودار بار جابجایی عددی و آزمایشگاهی برای (5-3-C 100)

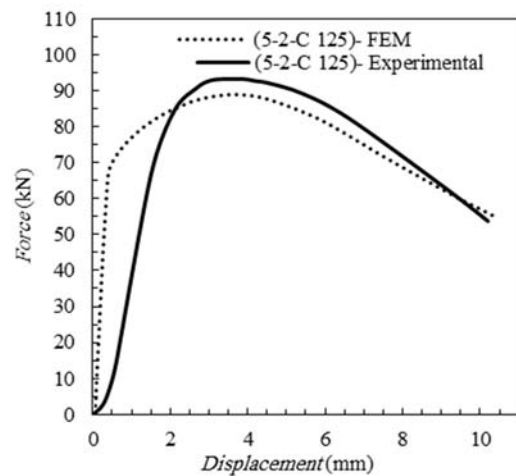
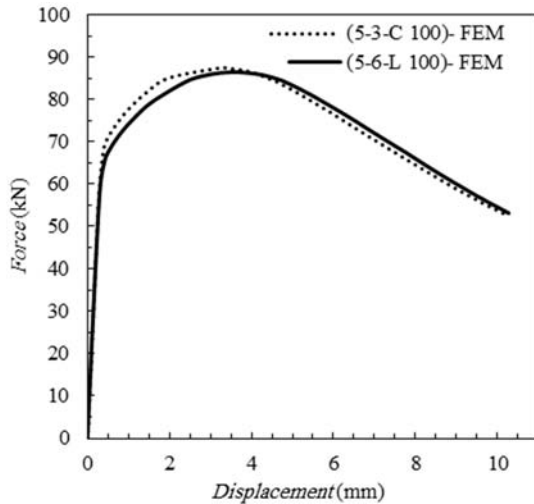


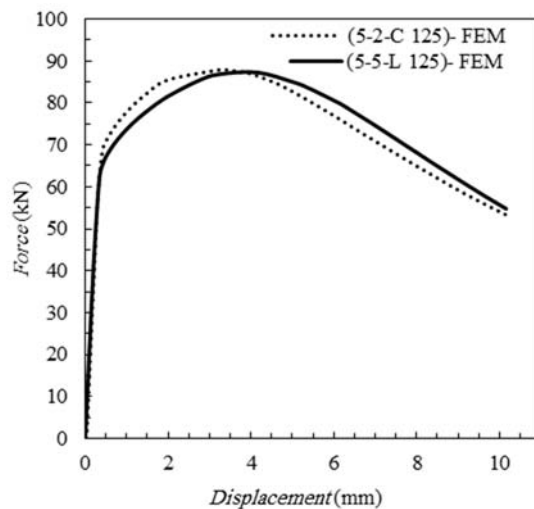
Fig. 15 Comparison of numerical and experimental load-displacement diagram for (5-2-C 125)

شکل 15 مقایسه نمودار بار جابجایی عددی و آزمایشگاهی برای (5-2-C 125)



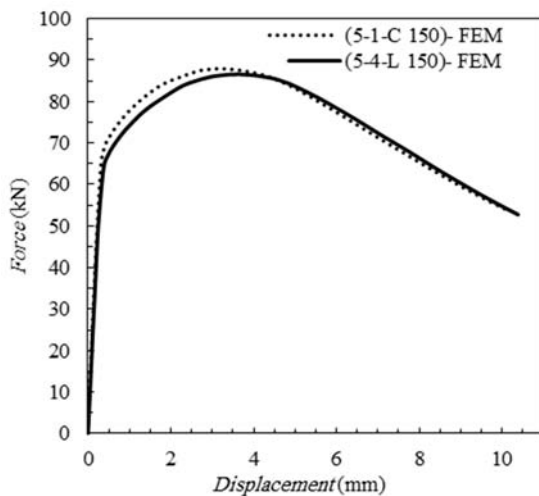
**Fig. 20** Comparison of numerical load-displacement diagram for (5-3-C 100) and (5-6-L 100)

شکل 20 مقایسه نمودار بار جابجایی نرم‌افزاری برای (5-3-C 100) و (5-6-L 100)



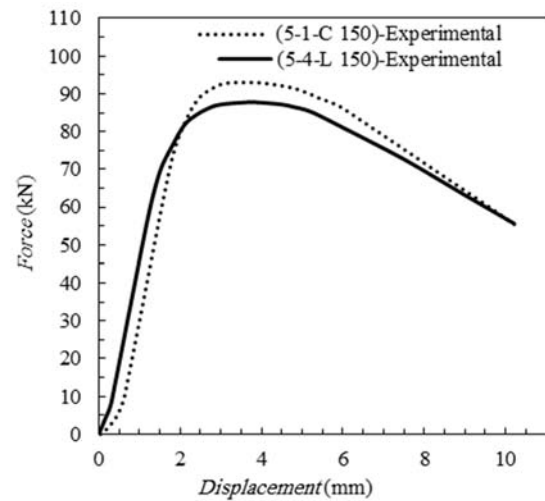
**Fig. 21** Comparison of numerical load-displacement diagram for (5-2-C 125) and (5-5-L 125)

شکل 21 مقایسه نمودار بار جابجایی نرم‌افزاری برای (5-2-C 125) و (5-5-L 125)



**Fig. 22** Comparison of numerical load-displacement diagram for (5-1-C 150) and (5-4-L 150)

شکل 22 مقایسه نمودار بار جابجایی نرم‌افزاری برای (5-1-C 150) و (5-4-L 150)



**Fig. 19** Comparison of experimental load-displacement diagram for (5-1-C 150) and (5-4-L 150)

شکل 19 مقایسه نمودار بار جابجایی آزمایشگاهی برای (5-1-C 150) و (5-4-L 150)

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی، شیب منحنی‌های بار جابجایی نمونه‌های با گشودگی دایروی، با شیب منحنی‌های بار جابجایی نمونه‌های با گشودگی لوزوی، در ناحیه قبل از کمانش، تقریباً یکسان هستند. به‌عنوان نتیجه دیگر، نمونه‌های دارای گشودگی لوزوی، نسبت به نمونه‌های دارای گشودگی دایروی، بار کمتری تحمل کرده‌اند، یعنی بار بحرانی کمانش کمتری دارند که البته بدیهی است، چراکه در گوشه‌های گشودگی لوزی که در خط افقی و روبروی هم قرار دارند، تمرکز تنش بالاتری به وجود می‌آید و این تنش بزرگ، جابجایی زیادتری هم به ازای افزایش بار مشخصی، نتیجه می‌دهد. نمودار بار جابجایی نتایج نرم‌افزاری (با المان S4R)، برای نمونه‌ها در اشکال 20 تا 22 مشاهده می‌شوند. این نمودارها به‌صورت مقایسه‌ای هستند. مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌های بار جابجایی حاصل از تحلیل نرم‌افزاری، در ناحیه قبل از کمانش، برای هر دو نمونه نظیر، تقریباً یکسان و بر هم منطبق هستند. با نزدیک شدن به قله نمودار، منحنی مربوط به نمونه دایروی، بالاتر قرار گرفته است. به عبارتی، نمونه دارای گشودگی دایروی، بار بیشتری تحمل می‌کند. این مطلب، یکی از نتایج مقایسه منحنی‌ها نیز هست که البته بدیهی و قابل‌انتظار است، چراکه در گوشه‌های گشودگی لوزوی که در خط افقی و روبروی هم قرار دارند، تمرکز تنش بالاتری به وجود می‌آید. ضمناً، شیب منحنی‌ها برای هر دو نمونه نظیر، در ناحیه قبل از کمانش، زیاد است، ولی شیب این منحنی‌ها، در ناحیه بعد از کمانش، خیلی کم شده. به عبارتی، نمونه‌ها قبل از کمانش، ظرفیت تحمل بار زیادی دارند، ولی به‌محض وقوع کمانش، با تغییرات کم بار، جابجایی زیادی دارند.

در شکل‌های 20 تا 22 نمودارهای بار جابجایی نرم‌افزاری مقایسه شده‌اند. با مقایسه نمودارهای بار جابجایی آزمایشگاهی با نمودارهای بار جابجایی نرم‌افزاری نمونه‌ها، دیده می‌شود که شیب نمودارهای بار جابجایی نرم‌افزاری در ناحیه پیش‌کمانش، خیلی بیشتر از شیب نمودارهای آزمایشگاهی است؛ اما شیب این نمودارها در ناحیه پس‌کمانش تقریباً یکسان‌اند. اختلاف در رفتار پیش‌کمانش، به دلیل ساده‌سازی‌های مربوط به نمودار تنش کرنش پوسته‌ها است؛ چراکه در نرم‌افزار، کاملاً خطی فرض می‌شود و با مدول یانگ تعریف می‌شود، درحالی‌که در واقع این ناحیه خطی نیست و کمی انحنای دارد.

## 5- بحث و نتیجه‌گیری

1- نمونه‌های دارای گشودگی دایروی، نسبت به نمونه‌های دارای گشودگی لوزی نظیرشان، بار بیشتری تحمل می‌کنند. این مطلب، بدیهی و قابل‌انتظار است، چراکه اولاً در گوشه‌های گشودگی لوزی که در راستای عمود بر محور پوسته و روبروی هم قرار دارند، تمرکز تنش بالاتری به وجود می‌آید و این تنش بزرگ، جابجایی زیادتری هم به ازای افزایش بار، نتیجه می‌دهد. دوماً، چون سطح مقطع پوسته دارای گشودگی لوزی (در اطراف گشودگی)، کمتر از سطح مقطع پوسته با گشودگی دایروی (در اطراف گشودگی) است، پس ضعیف‌تر بوده و بار کمتری تحمل می‌کند.

2- با مقایسه نتایج نرم‌افزاری و آزمایشگاهی برای بار کمانشی همه نمونه‌ها، نتیجه می‌گیریم که میانگین خطای نتایج نرم‌افزاری از نتایج واقعی، حدود 3.32 درصد است؛ بنابراین می‌توان گفت، نتایج نرم‌افزاری همراه با روش تحلیل و المان بندی مناسب برای چنین سازه‌هایی، قابل اعتماد است.

3- شیب منحنی‌های بار جابجایی، برای هر دو نمونه نظیر (یک نمونه دارای گشودگی لوزی و دیگری با گشودگی دایروی که ارتفاع گشودگی در هر دو نمونه یکسان باشد)، در ناحیه قبل از کمانش، زیاد است و بسیار نزدیک به هم هستند، ولی شیب این منحنی‌ها، در ناحیه بعد از کمانش، خیلی کمتر می‌شود. به عبارتی نمونه‌ها، قبل از کمانش، ظرفیت تحمل بار زیادی دارد، ولی به محض وقوع کمانش، با تغییرات کمی در مقدار بار، جابجایی زیادی خواهند داشت.

4- با توجه به اینکه، منحنی‌های بار جابجایی برای نمونه‌های نظیر، بسیار شبیه به هم هستند و فقط در مکان قله منحنی، کمی از هم فاصله می‌گیرند، می‌توان نتیجه گرفت که رفتار پس‌کمانش و پیش‌کمانش آن‌ها، بسیار مشابه و گاهی منطبق بر هم هستند. گفتنی است که این شباهت رفتار کمانشی، بیشتر در رفتار پیش‌کمانش نمونه‌ها، قابل مشاهده است. به عبارتی، با توجه به اکثر آن‌ها، نوع گشودگی، در رفتار پیش‌کمانش نمونه‌ها تقریباً بی‌اثر است. همان‌طور که از نمودارها و شکل‌ها مشهود است، نتایج تجربی و نرم‌افزاری مطابقت خوبی دارند و می‌توان با تحلیل نرم‌افزاری قبل از تولید، ابتدا شبیه‌سازی استوانه‌ها را با نرم‌افزار انجام داد و سپس با رفع مشکلات احتمالی و بهینه‌سازی‌های مختلف، نتایج تحلیل را بهبود داد.

5- با مقایسه منحنی‌های بار جابجایی عددی و تجربی، مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌های بار جابجایی، قبل از کمانش و در روش عددی، بیشتر از این شیب در روش تجربی است. دلیل این اختلاف، این است که خواص ماده، برای تحلیل نرم‌افزاری، بسیار ایده‌آل‌سازی شده است. به‌عنوان مثال، در منحنی‌های تنش کرنش آزمایشگاهی، شیب منحنی در ناحیه الاستیک، کاملاً ثابت نیست، ولی این ناحیه برای نرم‌افزار، با یک مدول یانگ تعریف می‌شود و کاملاً خطی فرض می‌شود.

## 6- مراجع

[1] M. Shariati, A. H. Fereidoon, A. Akbarpour, Buckling Load

- Analysis of oblique Loaded Stainless Steel 316ti Cylindrical Shells with Elliptical Cutout, *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 53-63, 2012.
- [2] S. Miladi, M. Razzaghi, A parametric study on inelastic buckling in steel cylindrical shells with circular cutouts, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-12, 2014.
- [3] R. A. Alashti, S. L. Rostami, G. Rahimi, Buckling analysis of composite lattice cylindrical shells with ribs defects, *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, Vol. 26, No. 4, pp. 411-420, 2012.
- [4] A. Fereidoon, K. Kolasangiani, A. Akbarpour, M. Shariati, Study on buckling of steel cylindrical shells with an elliptical cutout under combined loading, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25, 2013.
- [5] M. W. Hilburger, M. P. Nemeth, Buckling and failure of compression-loaded composite cylindrical shells with reinforced cutouts, *Collected Papers in Structural Mechanics Honoring Dr. James H. Starnes, Jr.*, pp. 363-386, 2005.
- [6] A. R. Shaterzadeh, K. Foroutan, Post-buckling analysis of eccentrically stiffened FGM cylindrical shells under external pressure and elastic foundation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 80-88, 2015. (in Persian فارسی)
- [7] E. Poursaeidi, G. Rahimi, A. Vafai, Plastic buckling of cylindrical shells with cutouts, *Asian Journal of civil engineering (Building and housing)*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 191-207, 2004.
- [8] M. Shariati, M. M. Rokhi, Buckling of steel cylindrical shells with an elliptical cutout, *International journal of steel structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 193-205, 2010.
- [9] H. T. Hu, S. S. Wang, Optimization for buckling resistance of fiber-composite laminate shells with and without cutouts, *Composite structures*, Vol. 22, No. 1, pp. 3-13, 1992.
- [10] M. Shariati, M. Sedighi, J. Saemi, H. Eipakchi, H. Allahbakhsh, Experimental study on ultimate strength of CK20 steel cylindrical panels subjected to compressive axial load, *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 117-130, 2010.
- [11] M. Tajdari, M. Azimi, M. Khorram, J. E. Jam, Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with triangular cutout subject to axial compression, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 24-37, 2013. (in Persian فارسی)
- [12] M. Shariati, M. Davarpanah, H. Chavoshan, H. R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 60-68, 2014. (in Persian فارسی)
- [13] A. Tafreshi, Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shells with cutouts subjected to internal pressure and axial compression loads, *International Journal of pressure vessels and piping*, Vol. 79, No. 5, pp. 351-359, 2002.
- [14] F. Taheri Behrooz, M. Omid, M. Mehrdad Shokrieh, Experimental and numerical examination of the effect of geometrical imperfection on buckling load in axially compressed composites cylinder with and without cutout, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 367-377, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] M. Shariati, A. M. Majd Sabeti, H. Gharooni, A numerical and experimental study on buckling and post-buckling of cracked plates under axial compression load, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 4, No. 1, pp. 43-54, 2014.