



# بررسی عددی و تجربی کمانش پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مثلثی تحت فشار محوری

مهدی تاجداری<sup>۱\*</sup>، مجید عظیمی<sup>۲</sup>، مهدی خرم<sup>۳</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۴</sup>

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، کرمانشاه

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۴- دانشیار، هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، کرمانشاه

\* کرمانشاه، صندوق پستی ۶۷۱۵۵-۱۹۵۷، tajdari@yahoo.com

**چکیده-** در این مقاله شبیه‌سازی و آنالیز پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک با ضخامت، طول‌ها و قطرهای مختلف، دارای حفره مثلثی شکل که به صورت محوری تحت بار فشاری قرار گرفته‌اند، و همچنین اثرات موقعیت حفره، نسبت طول به قطر ( $L/D$ ) و نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ ) روی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی این پوسته‌ها با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. همچنین برای نمونه‌ها، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه هیدرولیک انجام شده و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. مطابقت بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود.  
**کلیدواژه‌گان:** کمانش، پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک، تحلیل المان محدود، گشودگی‌های مثلثی، روش تجربی.

## Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with triangular cutout subject to axial compression

M. Tajdari<sup>1\*</sup>, M. Azimi<sup>2</sup>, M. Khorram<sup>3</sup>, J. Eskandari Jam<sup>4</sup>

1- Prof., Mech. Eng., Dept. of Mech., Science and Reserch Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran.

2- MSc. Student, Mech. Eng., Dept. of Mech., Science and Reserch Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

3- MSc. Student, Mech. Eng., Emam Hossein Univ., Tehran, Iran

4- Assoc. Prof., Mech. Eng., Dept. of Mech., Science and Reserch Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran.

\* P. O. B. 67155-1957, Kermanshah, Iran. tajdari@yahoo.com

**Abstract-** In this paper, simulation and analysis of thin steel cylindrical shells of various lengths and diameters and thickness with triangular cutouts have been studied. In this research buckling and post-buckling analyses were carried out using the finite element method by ABAQUS software. Moreover, the effect of cutout position and the length-to-diameter ( $L/D$ ) and diameter-to-thickness ( $D/t$ ) ratios on the buckling and post-buckling behavior of cylindrical shells have been investigated. In this work the cylindrical shells used for this study were made of mild steel and their mechanical properties were determined using servo hydraulic machine. Then buckling tests were performed using a servo hydraulic machine. In order to numerical analyze the buckling subject to axial load similar to what was done in the experiments; a displacement was applied to the center of the upper of the specimens. The results of experimental tests were compared to the results of the finite element method. A very good correlation was observed between numerical simulation and experimental result.

**Keywords:** Buckling, Steel Cylindrical Shells, Triangular Cutout, Finite Element Analysis, Experimental Method.

## ۱- مقدمه

قسمت اصلی سازه‌های هواپیماها، فضاپیماها و وسایل پرنده شامل سازه‌های استوانه‌ای جدار نازک می‌باشند. در بسیاری از موارد این سازه‌ها شامل حفره‌ها یا قسمت‌های باز هستند که به عنوان نمونه می‌توان درب، پنجره و یا قسمت‌های داخلی که به منظور کاهش وزن و یا عبور مکانیزم‌ها به کار می‌روند، را نام برد. سازه‌ها معمولاً در طول عمر خود انواع بارها از جمله بارهای فشاری را تجربه می‌کنند که در مواردی می‌توانند منجر به انهدام سازه شوند. لذا می‌بایست اثرات آنها شناخته شده و به دقت پیش‌بینی شوند تا کارایی بالاتر و طراحی مطمئن‌تری انجام شود.

وجود یک حفره در پوسته استوانه‌ای، هنگام بارگذاری می‌تواند باعث بروز پاسخ‌های موضعی نزدیک حفره شود. این پاسخ‌های موضعی شامل تغییر شکل‌های خارج از صفحه، تمرکز تنش‌های بالا در نزدیکی حفره می‌باشد. در یک پوسته استوانه‌ای تحت بار فشاری دارای حفره، حفره می‌تواند سبب یک پاسخ کمانشی موضعی در نزدیکی حفره شود، البته نیرویی که باعث این کمانش می‌شود از نیروی کمانشی پوسته بدون نقص، کمتر است.

مسئله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، از سال‌ها قبل از این مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. تیموشنکو با استفاده از تئوری کلاسیک برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری یکنواخت، فرمول (۱) را ارائه کرد [۱]:

$$N_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t^2}{R} \right) \quad (1)$$

که در آن  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  نسبت پواسون،  $t$  ضخامت پوسته و  $R$  شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله برای پوسته‌های نازک بدون گشودگی با نسبت  $L/R \leq 5$  جواب مناسبی می‌دهد [۲]. این معادله برای پوسته‌های با ضخامت متوسط ( $R/t < 50$ ) نیز اغلب مقدراری بیشتر از بار کمانش واقعی را نشان می‌دهد به طوری که پوسته قبل از رسیدن به این بار دچار کمانش می‌شود.

تا سال ۱۹۶۸ مطالعات اندکی که بتوان اثرات حفره را روی عملکرد پوسته‌های استوانه‌ای نشان بدهد انجام گرفته بود. از آن جمله تنیسون [۳] یک مطالعه تجربی روی تأثیر گشودگی

دایره‌ای در کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری با نسبت شعاع به ضخامت ۱۶۲ تا ۳۳۱ میلی‌متر انجام داد و بار کمانش تجربی بدست آمده را با نتایج تحلیلی مقایسه نمود. بروگان و آلمورث [۴] تأثیر گشودگی‌های مستطیلی تقویت شده روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی نموده و ضمناً نتایج تجربی پوسته‌های دارای گشودگی، با و بدون تقویت را با نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری استیج<sup>۱</sup> مورد مقایسه قرار دادند. استارنس [۵] نیز یک مطالعه تجربی روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی مدور تحت فشار محوری انجام داد. نسبت شعاع به ضخامت پوسته‌ها در این مطالعه از ۴۰۰ تا ۹۶۰ در نظر گرفته شده بود. بر پایه تجربه بدست آمده از آزمایشها، وی مسئله کمانش را خطی‌سازی کرد و یک حد بالا برای بار کمانش بوسیله روش ریلی-ریتز بدست آورد.

آلمورث و هولمز [۶]، یازده پوسته استوانه‌ای جدار نازک از جنس آلومینیوم با گشودگی‌های مستطیلی و تقویت کننده‌های مختلف که روی هفت نمونه آزمایش نصب شده بود را مورد آزمایش قرار دادند. بار کمانش پوسته‌های تقویت شده با بار کمانش پوسته‌های تقویت نشده مقایسه شد. همچنین نتایج بدست آمده از آزمایشها با نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری استیج مقایسه شد. مشاهده شد که برای پوسته‌های استوانه‌ای نازک با گشودگی‌های کوچک و متوسط، تقویت کننده سودمند نیست مگر اینکه طول پوسته زیاد باشد. آلمورث و همکارانش [۷] یک تحلیل غیرخطی پیچیده برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری با دو گشودگی دایره‌ای مقابل هم انجام دادند. آنها نشان دادند که نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی بدست آمده توسط استارنس مطابقت خوبی دارد. استارنس [۸] یک تحقیق تجربی و عددی دیگر در مورد تأثیر گشودگی‌های دایره‌ای، مربعی و مستطیلی روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری انجام داد. تودا [۹] نیز یک مطالعه تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای با سوراخ دایره‌ای تحت فشار محوری انجام داد. او همچنین با قرار دادن صفحه‌های حلقوی اطراف گشودگی تأثیر تقویت کننده‌ها را روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی دایره‌ای مورد بررسی قرار داد. پوسته‌هایی که او مورد آزمایش قرار داد از جنس پلی استر با نسبت شعاع به ضخامت ۱۰۰ و میلی‌متر

1. Stags

مربعات، ارائه دادند. زین الدینی و همکارانش [۱۵] کمانش موضعی اعضای لوله‌ای دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های تناوبی کشش و فشار را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بصورت شبیه‌سازی عددی بررسی و مدل اجزای محدود استفاده شده را با نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی کردند. همچنین اثر دامنه و تنش میانگین در بارگذاری دوره‌ای و تاثیر خوردگی بر نرخ رشد کرنش غیرخطی مورد تحقیق قرار گرفت. رحیمی و همکارانش [۱۶] تاثیر گشودگی مربع مستطیل بر رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای به روش‌های تجربی و المان محدود را بررسی کردند. آنها دریافتند که برای مساحت گشودگی ثابت مربع شکل، کمترین کاهش در بار بوجود می‌آید و برای شکل مستطیل، بعد بیشتر در جهت شعاعی باعث کاهش بیشتر بار بحرانی می‌گردد. شریعتی و مهدی زاده [۱۷] به شبیه‌سازی و تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای نازک فولادی با طول ها و قطرهای متفاوت، دارای گشودگی بیضوی، تحت بار فشاری محوری با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند و تاثیر موقعیت گشودگی و نسبت طول به قطر،  $(L/D)$  و قطر به ضخامت،  $(D/t)$  در رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. همچنین برای چندین نمونه، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه سروهیدرولیک انجام دادند و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی را با نتایج عددی مقایسه نموده و مطابقت بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی بدست آوردند و در نهایت با توجه به نتایج تجربی و عددی روابطی برای یافتن بار کمانش این‌گونه سازه‌ها ارائه دادند.

در این مقاله پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک با ضخامت و طول‌ها و قطرهای مختلف، دارای حفره مثلثی شکل تحت بار فشاری محوری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین اثرات موقعیت حفره، نسبت طول به قطر  $(L/D)$  و نسبت قطر به ضخامت  $(D/t)$  روی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی این پوسته‌ها با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. همچنین برای نمونه‌ها، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه هیدرولیک انجام شده و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج عددی مقایسه شده‌اند.

۴۰۰ با دو سوراخ مقابل هم انتخاب شده بود. مشاهده شد که اگر سوراخ‌ها به اندازه کافی کوچک باشند؛ تاثیر محسوسی روی مقاومت کمانش پوسته استوانه‌ای ندارند. با این وجود گشودگی‌های بزرگتر باعث افت چشمگیری در بار کمانش می‌شوند. آربوس [۱۰] و جولین [۱۱] طی تحقیقات تجربی نشان دادند که ظرفیت کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک بسیار کمتر از مقدار پیش بینی شده توسط تئوری کلاسیک است. همچنین جولین [۱۱] به طور تجربی و عددی تاثیر گشودگی‌های مربعی، مستطیلی و دایره شکل را روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری، بررسی کرد و یک رابطه پارامتری بین شکل و ابعاد گشودگی‌ها ارائه داد. همچنین تاثیر موقعیت و تعداد گشودگی‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نرم‌افزار اجزای محدود بکار گرفته شده کاستم ۲۰۰ بود. هیلبرگر و همکاران [۱۲] رفتار کمانش پنل‌های استوانه‌ای کامپوزیتی نازک با گشودگی دایروی مرکزی را بررسی کردند. در این مطالعه تاثیر ابعاد گشودگی، انحنای پنل و نقص‌های هندسی اولیه بررسی و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد. در این تحقیق، نرم‌افزار اجزای محدود استیج، بکار گرفته شد. مشاهده شد که نتایج تحلیل‌های غیرخطی بسیار دقیق تر از تحلیل‌های سنتی خطی است. به طور مشابه تفرشی [۱۳] نیز مطالعات عددی را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هشت لایه  $s[±۴۵,۰,۹۰]$ ، با گشودگی مستطیلی، تحت بارهای فشاری محوری و فشار داخلی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> انجام داد. او تاثیر اندازه و جهت گشودگی‌ها را مطالعه کرد و دریافت که افزایش فشار داخلی موجب افزایش ظرفیت تحمل در برابر کمانش می‌شود. هپنینگ‌هان و همکارانش [۱۴] با استفاده از تحلیل‌های عددی غیرخطی و به کمک نرم‌افزار<sup>۳</sup> تاثیر ابعاد و موقعیت گشودگی‌های مربعی شکل روی پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت نازک و متوسط، با طول‌های مختلف را بررسی کردند و نیز به کمک آزمایش‌های تجربی نتایج بدست آمده برای پوسته‌های با ضخامت متوسط را مقایسه کردند و در نهایت یک سری روابط پارامتری را براساس نتایج بدست آمده از تحلیل‌های تجربی و عددی و به کمک روش رگرسیون حداقل

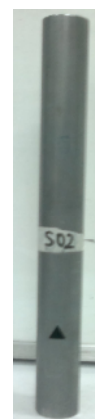
1. Castem2000
2. Abaqus
3. Ansys

## ۲- انجام آزمایش‌های تجربی

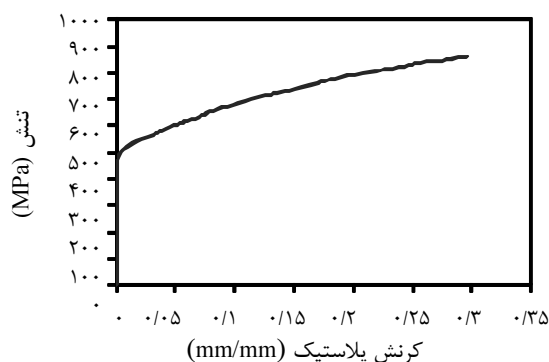
در این تحقیق برای بررسی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی دارای گشودگی مثلثی شکل و تحت بار محوری و مطالعه اثر این گشودگی و مکان آن بر بار کمانش سازه آزمایش‌های تجربی انجام شده است.

### ۲-۱- هندسه و خواص مکانیکی پوسته‌ها

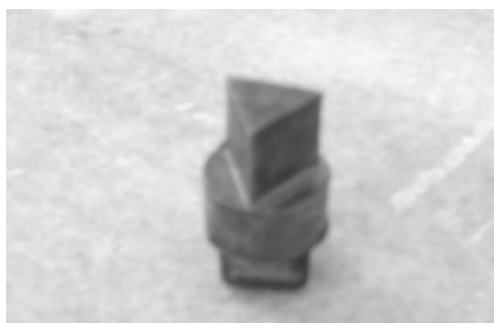
سازه‌های مورد نظر استوانه‌های جدار نازک با طول‌های ۳۳۲/۷، ۳۳۱، ۲۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر و قطرهای ۳۹/۰۵ و ۳۴/۹ میلی‌متر و ضخامت‌های ۱/۶ و ۱/۴۷ میلی‌متر می‌باشند. طبق شکل ۱ حفره‌هایی به صورت مثلثی و دارای اندازه‌هایی مطابق شکل ۲ در مکان‌های مختلفی از ارتفاع بر روی سطح استوانه ایجاد شد. همچنین برای جلوگیری از تمرکز تنش در گوشه‌های مثلث، این قسمت‌ها به صورت شعاعی به اندازه یک میلی‌متر طراحی شد.



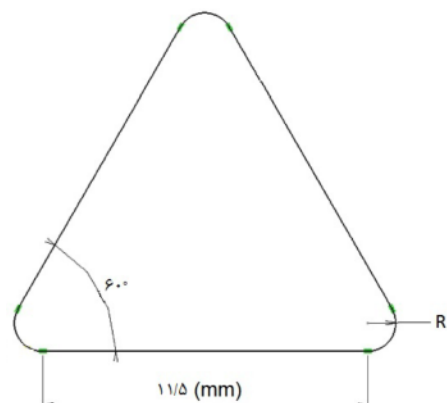
شکل ۱ نمونه تولید شده با حفره مثلثی شکل



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش پلاستیک فولاد مربوط به نمونه‌ها، آزمایش شده مطابق شرایط مرجع [۱۸]



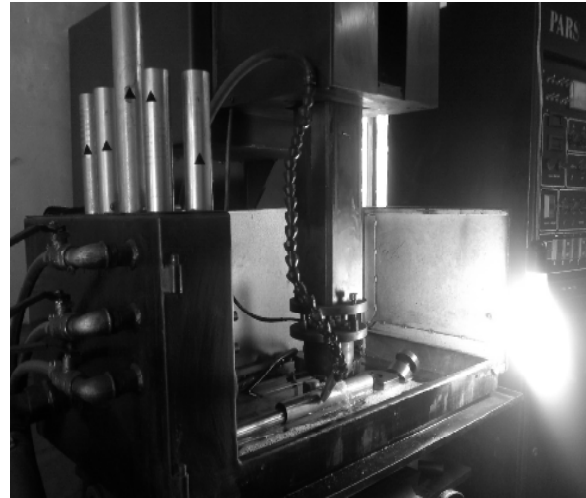
شکل ۴ قطعه مسی مثلثی جهت عملیات اسپارک



شکل ۲ ابعاد حفره مثلثی شکل



شکل ۶ پرس هیدرولیکی



شکل ۵ دستگاه اسپارک

نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیکی تحت بار محوری قرار گرفتند و جابجایی به میزان ۱۱ میلی‌متر به صورت متمرکز روی مرکز صفحه بالایی اعمال شد، همچنین در انجام آزمایش استوانه از پایین ثابت شده و فقط در راستای محور از بالای استوانه به سمت پایین حرکت می‌نمود. در شکل ۶ نمونه‌ای از فرآیند آزمایش مدل‌ها با دستگاه پرس هیدرولیکی نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۳- نتایج آزمایش‌های انجام شده

#### ۲-۳-۱- پوسته استوانه‌ای مرجع

برای ترسیم نمودارها بهتر است که داده‌های بدست آمده بی‌بعد شوند. در این تحقیق برای بی‌بعد کردن بار کمانش از بار کمانش مرجع که با رابطه (۲) تعریف می‌شود، استفاده شده است.

$$F_{ref} = \pi D t \times \sigma_y \quad (2)$$

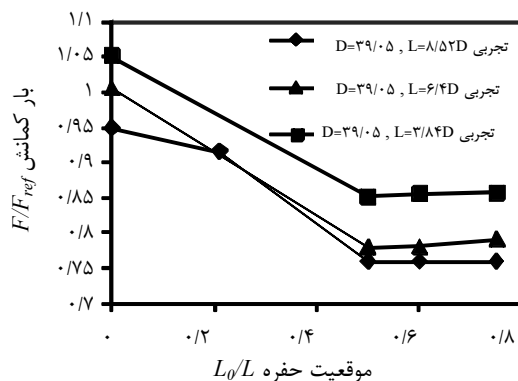
در این رابطه  $F_{ref}$  بار مرجع می‌باشد که در واقع بار لازم برای تسلیم شدن پوسته استوانه‌ای می‌باشد.  $D$  قطر خارجی،  $t$  ضخامت پوسته‌ها و  $\sigma_y$  نیز تنش تسلیم ماده تشکیل دهنده پوسته‌ها است. بنابراین بار مرجع برای نمونه‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F_{ref} = \pi \times 39.05 \text{ mm} \times 1.60 \text{ mm} \times 509 \text{ N/mm}^2 = 99859 \text{ N for } D = 39.05 \text{ mm} \quad (3)$$

$$F_{ref} = \pi \times 34.9 \text{ mm} \times 1.47 \text{ mm} \times 509 \text{ N/mm}^2 = 81995 \text{ N for } D = 34.9 \text{ mm} \quad (4)$$

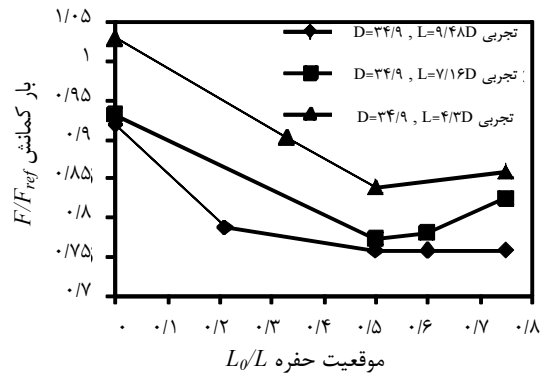
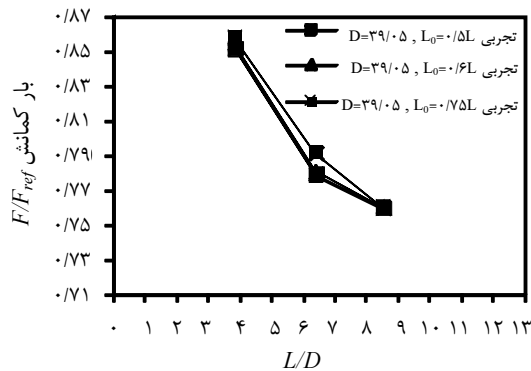
همچنین مقدار تغییر شکل فشاری پوسته‌ها با طول پوسته‌های استوانه‌ای بی‌بعد شده است.

۲-۳-۲- اثرات مکان حفره روی بار کمانشی نمودار بار کمانشی براساس موقعیت حفره‌ها برای پوسته‌های استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف برای نسبت ۲۳/۷۴ و  $D/t=24/4$  در شکل‌های ۷ و ۸ رسم شده است.



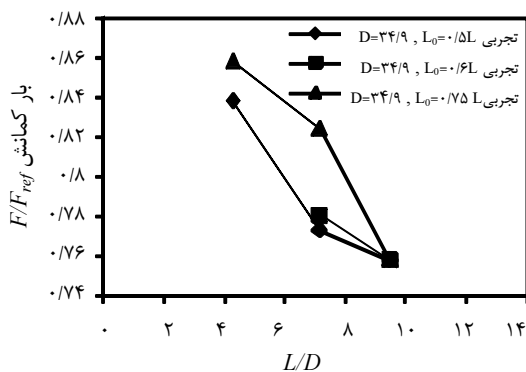
شکل ۷ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 24/4$

شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه، را نشان می‌دهند. واضح است که با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای، برای گشودگی‌هایی با موقعیت یکسان، بار کمانش کاهش می‌یابد و نیز پوسته‌هایی که دارای قطر بیشتری هستند، بار کمانش بیشتری دارند.



شکل ۸ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 23/74$

شکل ۹ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه برای  $D/t = 24/4$



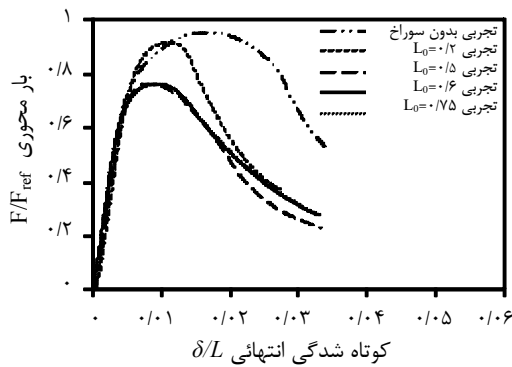
شکل ۱۰ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه برای  $D/t = 23/74$

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ منحنی‌های بار-جابجایی انتهایی، برای نمونه‌های آزمایش شده نشان داده شده است.

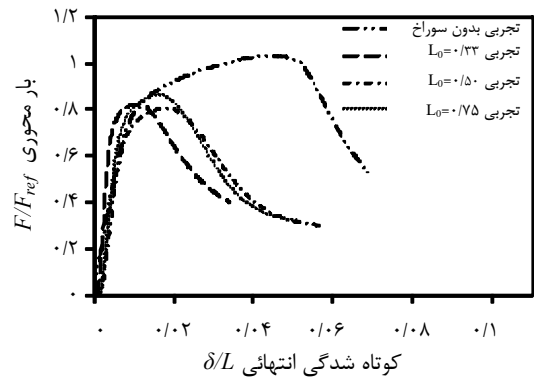
برای نمونه  $S08-D34.90-t1.47-L331-L0160$  با نسبت‌های  $L/D = 9/48$  و  $D/t = 23/74$ ، دارای گشودگی با ابعاد ثابت در موقعیت  $L_0/L = 0/5$ ، منحنی بار-جابجایی انتهایی و نماهای پوسته در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های تجربی برای پوسته‌های استوانه‌ای با حفره مثلثی

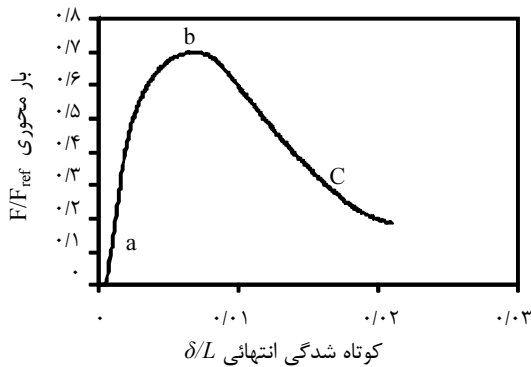
$F/F_{ref}$	بار کمانش (N)	موقعیت حفره ( $L_0/L$ )	نمونه‌ها
0.948	94755	0	S-D39.05-t1.60-L332.7-Perfect
0.916	91468	0.21	S02-D39.05-t1.60-L332.7-L070
0.759	75841	0.5	S03-D39.05-t1.60-L332.7-L0160
0.759	75848	0.6	S04-D39.05-t1.60-L332.7-L0200
0.759	75861	0.75	S05-D39.05-t1.60-L332.7-L0250
0.919	75409	0	S06-D34.90-t1.47-L331-Perfect
0.787	64579	0.21	S07-D34.90-t1.47-L331-L070
0.757	62146	0.5	S08-D34.90-t1.47-L331-L0160
0.758	62161	0.6	S09-D34.90-t1.47-L331-L0198.1
0.758	62175	0.75	S10-D34.90-t1.47-L331-L0250
0.932	76478	0	S11-D34.90-t1.47-L250 Perfect
0.773	63392	0.5	S12-D34.90-t1.47-L250-L0125.45
0.793	65050	0.6	S13-D34.90-t1.47-L250-L0150
0.824	67620	0.75	S14-D34.90-t1.47-L250-L0195.3
1.029	84425	0	S15-D34.90-t1.47-L150-Perfect
0.902	74002	0.33	S16-D34.90-t1.47-L150-L050
0.838	68772	0.5	S17-D34.90-t1.47-L150-L075
0.858	70406	0.75	S18-D34.90-t1.47-L150-L0115.3
1.051	104967	0	S19-D39.05-t1.60-L150-Perfect
0.851	85004	0.5	S20-D39.05-t1.60-L150-L075
0.854	85323	0.6	S21-D39.05-t1.60-L150-L090
0.857	85591	0.75	S22-D39.05-t1.60-L150-L0112.5
1.005	100381	0	S23-D39.05-t1.60-L250-Perfect
0.779	77793	0.5	S24-D39.05-t1.60-L250-L0125
0.780	77920	0.6	S25-D39.05-t1.60-L250-L0150
0.790	78980	0.75	S26-D39.05-t1.60-L250-L0187



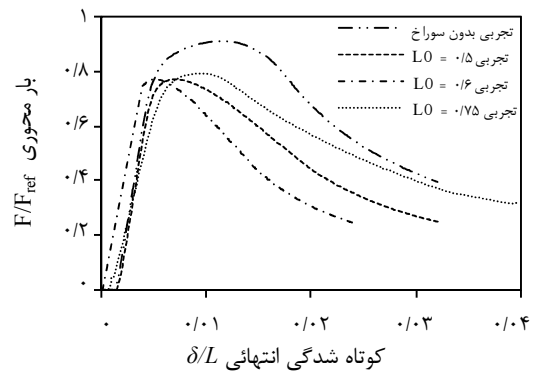
شکل ۱۴ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 8/52$  و  $D/t = 24/4$



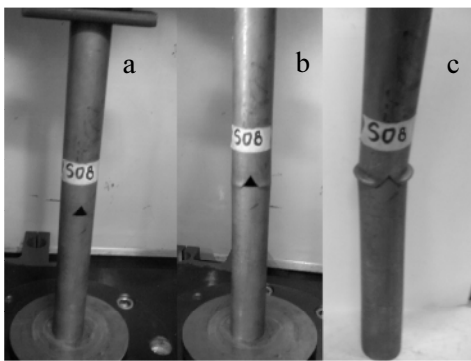
شکل ۱۱ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 4/3$  و  $D/t = 23/74$



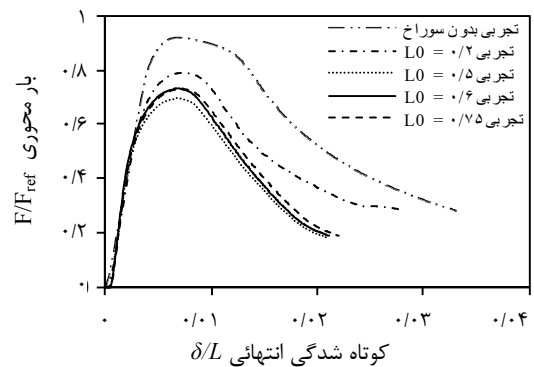
شکل ۱۵ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای نمونه S08-D34.90-t1.47-L331-L0160



شکل ۱۲ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 7/16$  و  $D/t = 23/74$



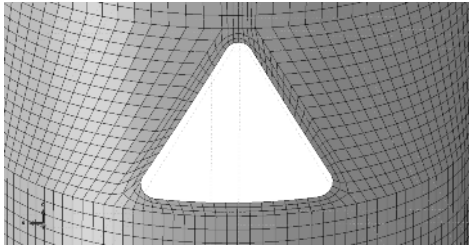
شکل ۱۶ نماهای پوسته برای نمونه S08-D34.90-t1.47-L331-L0160



شکل ۱۳ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 9/48$  و  $D/t = 23/74$

در استوانه‌هایی که گشودگی در نیمه ابتدایی طول ایجاد شده، بار کماتش نسبت به استوانه بدون سوراخ مقدار کمی، کاهش می‌یابد ولی با رسیدن موقعیت گشودگی به نیمه، بار کماتش کاهش بیشتری نموده و با تغییر موقعیت از نیمه به

از منحنی‌های بار-جابجایی مذکور مشاهده می‌شود با ایجاد گشودگی در پوسته، بار کماتش پوسته افت چشمگیری پیدا می‌کند.



شکل ۱۷ المان‌بندی سازه

### ۳-۳- فرآیند تحلیل

تحلیل‌های اجزای محدود خطی کمانش<sup>۲</sup>، برای پوسته‌های ساخته شده از مواد نرم، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند. زیرا در تحلیل خطی مقدار ویژه، خواص پلاستیک ماده در نظر گرفته نمی‌شود. با این وجود، باید برای تمام نمونه‌ها ابتدا یک تحلیل خطی انجام شود تا شکل مدهایی که مقدار ویژه کمتری دارند بدست آیند؛ زیرا کمانش معمولاً در این شکل مدها اتفاق می‌افتد. جابجایی‌های مربوط به این شکل مدها در فایلی ذخیره می‌شوند و در تحلیل بعدی (استاتیک، ریکس<sup>۳</sup>) به عنوان نقص اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تاثیر شکل مدها در تحلیل کمانش اعمال شود. در غیر این صورت، نرم‌افزار به طور اختیاری مد کمانش را انتخاب می‌کند که معمولاً به نتایج غیر واقعی منجر می‌شود.

بعد از انجام تحلیل خطی، یک تحلیل غیرخطی انجام شد تا منحنی بار-جابجایی بدست آید. مقدار ماکزیمم این منحنی، بار کمانش است. این مرحله استاتیک، ریکس نام دارد و از روش طول قوس برای تحلیل پس کمانش استفاده می‌کند. در این تحلیل، غیرخطی بودن خواص ماده و هندسه هر دو در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۸، شکل مد اول از نمونه S10-D34.90-t1.47-L331-L0250 نشان داده شده است.

### ۳-۴- نتایج تحلیل انجام شده با نرم‌افزار

نمودار بار بر حسب جابجایی و تغییر شکل آن در تنش فون میسز مربوط به نمونه S10-D34.90-t1.47-L331-L0250 در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده است.

سمت بالای استوانه بار کمانش نسبت به موقیعت نیمه مقدار کمی افزایش می‌یابد. کمانش به صورت موضعی اتفاق می‌افتد و سپس پوسته دچار خمش کلی می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌ها در ناحیه پیش کمانش برابر است ولی پس از کمانش رفتار آنها با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

### ۳- شبیه‌سازی آزمایشها با نرم‌افزار المان

#### محدود

برای انجام تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار آباکوس ۱-۱۰-۱۶<sup>۱</sup>، استفاده شد.

#### ۳-۱- شرایط مرزی

برای تحلیل کمانش تحت بار محوری مشابه آنچه در آزمایش انجام شد، جابجایی به صورت متمرکز روی مرکز صفحه بالایی اعمال شد که نتیجه آن ایجاد بار محوری گسترده و فشاری روی هر دو لبه استوانه می‌باشد. همچنین تمام درجات آزادی صفحه پایینی و نیز تمام درجات آزادی صفحه بالایی بجز حرکت در راستای محور، مقید شدند.

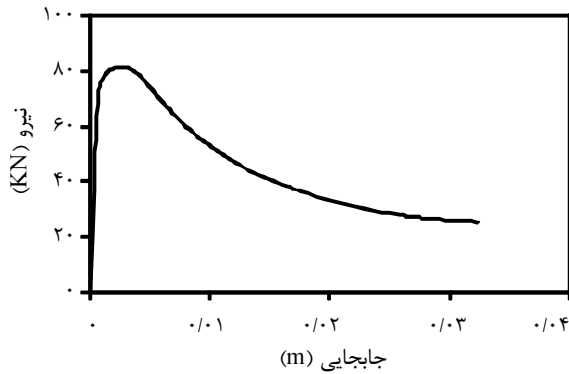
#### ۳-۲- المان‌بندی نمونه‌ها

در المان‌بندی، المان S4، در هنگام تحلیل خطی را لحاظ کرده و آن را در جواب تأثیر می‌دهد. این در حالی است که با تبدیل آن به S4R، خطای انتگرال‌گیری موجود کاهش می‌یابد. المان‌هایی مانند S4R5 که در انتهای نام آنها عدد ۵ آورده شده، دارای ۵ درجه آزادی در هر نود می‌باشند، که شامل سه تا انتقالی و دو تا چرخشی در صفحه می‌باشد. برای المان‌بندی نمونه‌ها از المان غیرخطی S8R5 که یک المان هشت گره‌ای، با شش درجه آزادی برای هر گره است؛ و برای تحلیل پوسته‌های نازک مناسب می‌باشد و نیز المان خطی S4R که یک المان چهارگره‌ای است و S4R5، استفاده شده است [۱۹]. قسمتی از یک نمونه المان‌بندی شده در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

2. Buckle  
3. Static, Riks

1. Abaqus 6.10-1

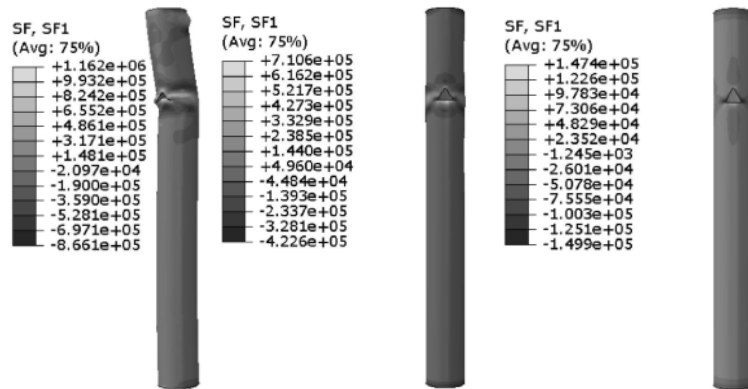




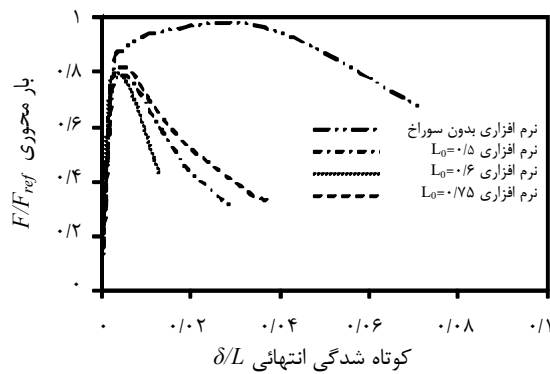
شکل ۱۹ نمودار بار بر حسب جابجایی نمونه  
S10-D34.90-t1.47-L331-L<sub>0</sub>250



شکل ۱۸ نتیجه تحلیل مد اول نمونه  
S10-D34.90-t1.47-L331-L<sub>0</sub>250



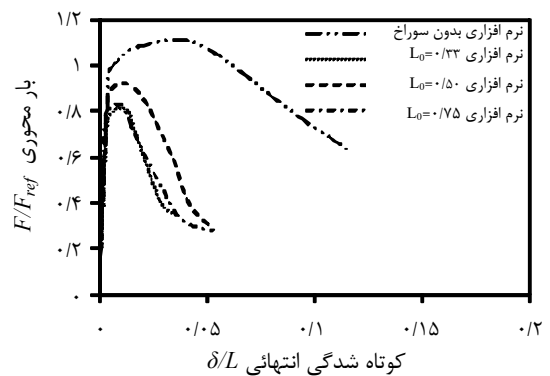
شکل ۲۰ تغییر شکل نمونه S10-D34.90-t1.47-L331-L<sub>0</sub>250 در تنش فون میسز



شکل ۲۲ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 7/16$  و  
 $D/t = 23/74$

از منحنی‌های بار-جابجایی مذکور مشاهده می‌شود با ایجاد گشودگی در پوسته و تحلیل با نرم‌افزار، بار کمناش پوسته افت چشمگیری پیدا می‌کند.

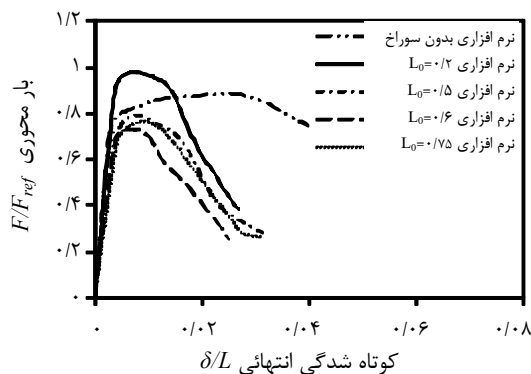
در جدول ۲ نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها با استفاده از المان‌های S4R5 و S4R و S8R5 آورده شده است. در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ منحنی‌های بار-جابجایی انتهایی، برای نمونه‌های تحلیل شده نشان داده شده است.



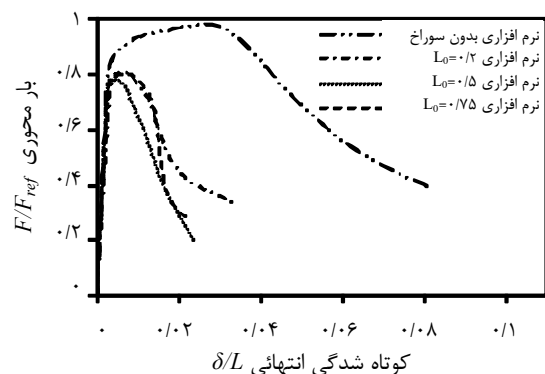
شکل ۲۱ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = 4/3$  و  
 $D/t = 23/74$

جدول ۲ نتایج تحلیل‌ها برای پوسته‌های استوانه‌ای با حفره مثلثی

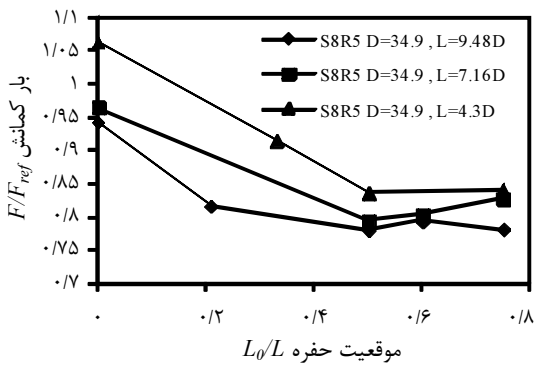
$F/F_{ref}$ (S8R5)	$F/F_{ref}$ (S4R5)	$F/F_{ref}$ (S4R)	بار کمانش S8R5 (N)	بار کمانش S4R5 (N)	بار کمانش S4R (N)	موقعیت حفره ( $L_0/L$ )	نمونه‌ها
۰/۹۳۷	۰/۹۲۵	۰/۹۷	۹۳۵۲۳	۹۲۳۶۳	۹۶۷۵۶	۰	S01-D39.05-t1.60-L332.7-Perfect
۰/۸۸۳	۰/۸۶۱	۰/۹۱	۸۸۱۳۲	۸۶۰۱۹/۹	۹۰۴۲۰	۰/۲۱	S02-D39.05-t1.60-L332.7-L <sub>0</sub> 70
۰/۷۴۲	۰/۷۲۶	۰/۷۷	۷۴۱۲۲	۷۲۴۹۴/۶	۷۶۷۱۶/۸	۰/۵	S03-D39.05-t1.60-L332.7-L <sub>0</sub> 160
۰/۷۴۵	۰/۷۳۳	۰/۷۸	۷۴۳۵۶	۷۳۱۴۸/۴	۷۷۹۶۷/۸	۰/۶	S04-D39.05-t1.60-L332.7-L <sub>0</sub> 200
۰/۷۵	۰/۷۴۶	۰/۸۱	۷۴۹۰۰/۳	۷۴۵۳۱	۸۰۴۰۰/۴	۰/۷۵	S05-D39.05-t1.60-L332.7-L <sub>0</sub> 250
۰/۹۴۳	۰/۹۳۸	۰/۹۶	۷۷۳۶۱	۷۶۸۸۳/۱	۷۰۶۹/۷	۰	S06-D34.90-t1.47-L331-Perfect
۰/۸۱۸	۰/۸۰۷	۰/۸۴	۶۷۰۳۵	۶۶۱۶۰/۲	۶۸۷۸۰/۱	۰/۲۱	S07-D34.90-t1.47-L331-L <sub>0</sub> 70
۰/۷۸۱	۰/۷۷۵	۰/۷۹	۶۴۰۲۵	۶۳۵۶۴/۸	۶۵۱۲۵	۰/۵	S08-D34.90-t1.47-L331-L <sub>0</sub> 160
۰/۷۹۶	۰/۷۸۱	۰/۸۱	۶۵۲۳۶	۶۴۰۰۱	۶۶۱۲۰/۲	۰/۶	S09-D34.90-t1.47-L331-L <sub>0</sub> 198.1
۰/۷۸۲	۰/۷۷۶	۰/۸۱	۶۴۱۲۶	۶۳۶۵۹	۶۶۱۲۴	۰/۷۵	S10-D34.90-t1.47-L331-L <sub>0</sub> 250
۰/۹۶۶	۰/۹۵۴	۰/۹۸	۷۹۱۶۹/۴	۷۸۲۰۷/۵	۸۰۵۶۰/۶	۰	S11-D34.90-t1.47-L250 Perfect
۰/۷۹۵	۰/۷۸۸	۰/۸۱	۶۵۱۸۶/۶	۶۴۶۴۸/۴	۶۶۲۵۶/۹	۰/۵	S12-D34.90-t1.47-L250-L <sub>0</sub> 125.45
۰/۸۰۴	۰/۷۹۳	۰/۸۳	۶۵۹۵۹/۷	۶۵۰۱۵/۴	۶۷۹۸۶/۱	۰/۶	S13-D34.90-t1.47-L250-L <sub>0</sub> 150
۰/۸۲۸	۰/۸۱۷	۰/۸۴	۶۷۸۹۶/۶	۶۶۹۷۳/۷	۶۸۹۵۶	۰/۷۵	S14-D34.90-t1.47-L250-L <sub>0</sub> 195.3
۱/۰۶۴	۱/۰۵۴	۱/۰۸	۸۷۲۳۲/۷	۸۶۴۳۰/۹	۸۸۹۶۰	۰	S15-D34.90-t1.47-L150-Perfect
۰/۹۱۶	۰/۹۰۷	۰/۹۲	۷۵۱۲۶/۶	۷۴۳۵۵/۶	۷۵۶۳۰	۰/۳۳	S16-D34.90-t1.47-L150-L <sub>0</sub> 50
۰/۸۳۷	۰/۸۵۳	۰/۸۶	۶۸۶۵۶	۶۹۹۶۰	۷۰۲۵۶	۰/۵	S17-D34.90-t1.47-L150-L <sub>0</sub> 75
۰/۸۴۱	۰/۸۳۱	۰/۸۵	۶۸۹۹۳	۶۸۱۰۹/۶	۶۹۹۶۰	۰/۷۵	S18-D34.90-t1.47-L150-L <sub>0</sub> 115.3
۱/۰۳۲	۱/۰۲۵	۱/۰۵	۱۰۳۰۱۶	۱۰۲۳۶۰	۱۰۴۵۰۶	۰	S19-D39.05-t1.60-L150-Perfect
۰/۸۵۲	۰/۸۴۴	۰/۸۶	۸۵۱۲۸	۸۴۲۶۳	۸۶۲۶۵	۰/۵	S20-D39.05-t1.60-L150-L <sub>0</sub> 75
۰/۸۵۶	۰/۸۴۸	۰/۸۷	۸۵۴۶۳	۸۴۶۵۶	۸۶۹۶۱	۰/۶	S21-D39.05-t1.60-L150-L <sub>0</sub> 90
۰/۸۶۱	۰/۸۵۴	۰/۸۸	۸۵۹۵۸	۸۵۲۳۶	۸۷۶۹۶	۰/۷۵	S22-D39.05-t1.60-L150-L <sub>0</sub> 112.5
۱/۰۲۲	۱/۰۱۴	۱/۰۴	۱۰۲۰۵۷	۱۰۱۲۵۶	۱۰۳۵۹۶	۰	S23-D39.05-t1.60-L250-Perfect
۰/۷۷۷	۰/۷۶۸	۰/۷۸	۷۷۵۹۶	۷۶۶۴۸/۵	۷۸۳۵۲	۰/۵	S24-D39.05-t1.60-L250-L <sub>0</sub> 125
۰/۷۸۱	۰/۷۷۳	۰/۷۹	۷۷۹۸۶	۷۷۲۳۰	۷۹۰۱۰	۰/۶	S25-D39.05-t1.60-L250-L <sub>0</sub> 150
۰/۷۹	۰/۷۸۲	۰/۸	۷۸۹۳۵	۷۸۱۲۵	۷۹۸۶۹	۰/۷۵	S26-D39.05-t1.60-L250-L <sub>0</sub> 187



شکل ۲۴ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = ۸/۵۲$  و  $D/t = ۲۴/۴$

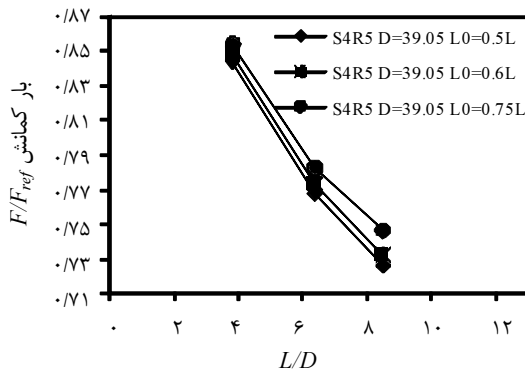


شکل ۲۳ منحنی بار-جابجایی انتهایی برای  $L/D = ۹/۴۸$  و  $D/t = ۲۳/۷۴$

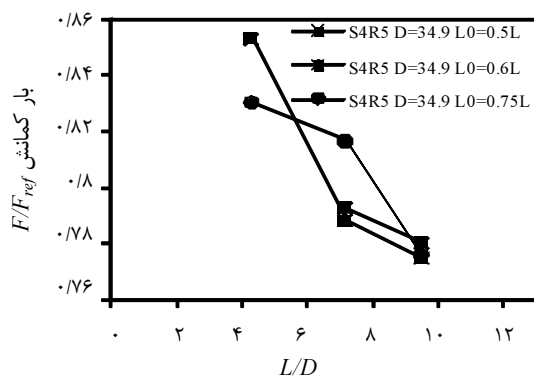


شکل ۲۸ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 23/74$  و المان S8R5

شکل‌های ۲۹ و ۳۰ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه، برای المان S4R5 را نشان می‌دهد.



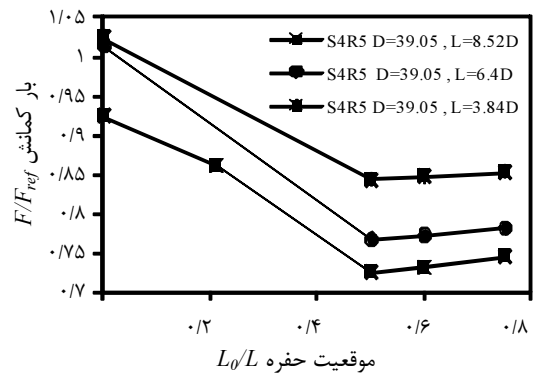
شکل ۲۹ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه برای S4R5 و المان  $D/t = 24/4$



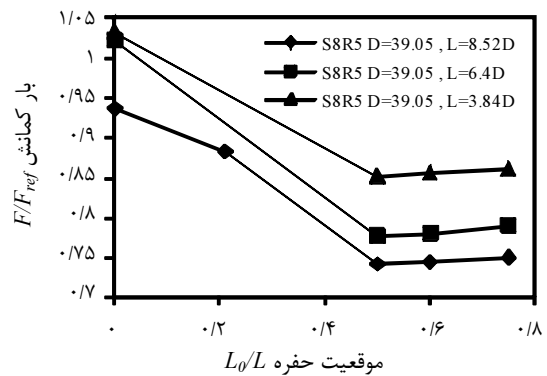
شکل ۳۰ منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه برای S4R5 و المان  $D/t = 23/74$

مشاهده می‌شود که در نسبت‌های  $L_0/L$  های برابر در نسبت‌های  $L/D$  کوچکتر، بار کمانش بیشتر است. به عبارت

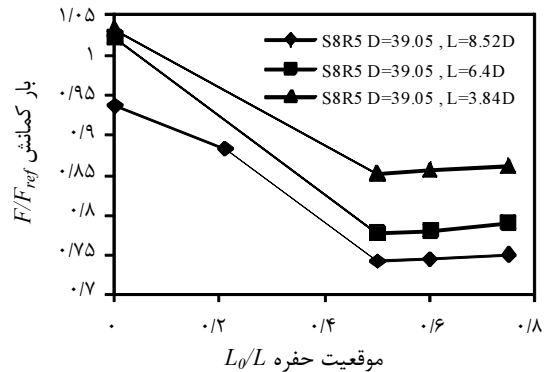
۳-۴-۱- اثرات مکان حفره روی بار کمانشی در تحلیل با نرم‌افزار نمودار بار کمانشی براساس موقعیت حفره‌ها برای پوسته‌های استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف برای نسبت‌های  $23/74$  و  $D/t=24/4$  و برای سه نوع المان S4R5 و S8R5 در شکل‌های ۲۵ تا ۲۸ رسم شده است.



شکل ۲۵ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 24/4$  و المان S4R5



شکل ۲۶ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 24/4$  و المان S8R5



شکل ۲۷ نمودار بار کمانشی برای نسبت  $D/t = 23/74$  و المان S4R5

بهرتر کاهش در قطر پوسته، بار کمانشی را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که، استوانه طویل‌تر نسبت به تغییر در موقعیت حفره حساس‌تر می‌باشد. واضح است که با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای، برای گشودگی‌هایی با موقعیت یکسان، بار کمانش کاهش می‌یابد و نیز پوسته‌هایی که دارای قطر بیشتری هستند، بار کمانش بیشتری دارند.

#### ۴- تایید نتایج عددی به کمک نتایج تجربی

نتایج بدست آمده از آزمایشات با نتایج حاصل از روش نرم‌افزاری در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

با مقایسه نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج بسیار ناچیز است. حداکثر اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المان خطی S4R در مقایسه با نتایج تجربی ۶/۵۱ درصد می‌باشد. همچنین برای المان S4R5 ۵/۹۶ درصد و برای المان غیرخطی S8R5 ۴/۹۵ درصد است. میانگین اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R در مقایسه با نتایج عددی ۳/۲ درصد، میانگین اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S8R5 ۱/۹ درصد و میانگین اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R5 ۲/۰۶ درصد است. بنابراین می‌توان گفت نتایج حاصل از تحلیل با المان-های با ۵ درجه آزادی خطای کمتری دارند.

جدول ۳ مقایسه نتایج تحلیل‌ها برای پوسته‌های استوانه‌ای با حفره مثلثی

نمونه‌ها	بار کمانش تجربی (N)	بار کمانش S4R5 (N)	بار کمانش S4R (N)	بار کمانش S8R5 (N)	خطای المان S4R5	خطای المان S4R	خطای المان S8R5
S01-D39.05-t1.60-L332.7-Perfect	۹۴۷۵۵	۹۲۳۶۳	۹۶۷۵۶	۹۳۵۲۳	۲/۱۱	۲/۵۲	۱/۳
S02-D39.05-t1.60-L332.7-L070	۹۱۴۶۸	۸۶۰۱۹/۹	۹۰۴۲۰	۸۸۱۳۲	۱/۱۵	۵/۹۶	۳/۶۵
S03-D39.05-t1.60-L332.7-L0160	۷۵۸۴۱	۷۲۴۹۴/۶	۷۶۷۱۶/۸	۷۴۱۲۲	۱/۱۵	۴/۴۱	۲/۲۷
S04-D39.05-t1.60-L332.7-L0200	۷۵۸۴۸	۷۳۱۴۸/۴	۷۷۹۶۷/۸	۷۴۳۵۶	۲/۷۹	۳/۵۶	۱/۹۷
S05-D39.05-t1.60-L332.7-L0250	۷۵۸۶۱	۷۴۵۳۱	۸۰۴۰۰/۴	۷۴۹۰۰/۳	۵/۹۸	۱/۷۵	۱/۲۷
S06-D34.90-t1.47-L331-Perfect	۷۵۴۰۹	۷۶۸۸۳/۱	۷۰۶۹/۷	۷۷۳۶۱	۴/۸۵	۱/۹۵	۲/۵۹
S07-D34.90-t1.47-L331-L070	۶۴۵۷۹	۶۶۱۶۰/۲	۶۸۷۸۰/۱	۶۷۰۳۵	۶/۵۱	۲/۴۵	۳/۸
S08-D34.90-t1.47-L331-L0160	۶۲۱۴۶	۶۳۵۶۴/۸	۶۵۱۲۵	۶۴۰۲۵	۴/۷۹	۲/۲۸	۳/۰۲
S09-D34.90-t1.47-L331-L0198.1	۶۲۱۶۱	۶۴۰۰۱	۶۶۱۲۰/۲	۶۵۲۳۶	۶/۳۷	۲/۹۶	۴/۹۵
S10-D34.90-t1.47-L331-L0250	۶۲۱۷۵	۶۳۶۵۹	۶۶۱۲۴	۶۴۱۲۶	۶/۳۵	۲/۳۹	۳/۱۴
S11-D34.90-t1.47-L250 Perfect	۷۶۴۷۸	۷۸۲۰۷/۵	۸۰۵۶۰/۶	۷۹۱۶۹/۴	۵/۳۴	۲/۲۶	۳/۵۲
S12-D34.90-t1.47-L250-L0125.45	۶۳۳۹۲	۶۴۶۴۸/۴	۶۶۲۵۶/۹	۶۵۱۸۶/۶	۴/۵۲	۱/۹۸	۲/۸۳
S13-D34.90-t1.47-L250-L0150	۶۴۰۲۰	۶۵۰۱۵/۴	۶۷۹۸۶/۱	۶۵۹۵۹/۷	۶/۲	۱/۵۵	۳/۰۳
S14-D34.90-t1.47-L250-L0195.3	۶۷۶۲۰	۶۶۹۷۳/۷	۶۸۹۵۶	۶۷۸۹۶/۶	۱/۹۸	۰/۹۶	۰/۴۱
S15-D34.90-t1.47-L150-Perfect	۸۴۴۲۵	۸۶۴۳۰/۹	۸۸۹۶۰	۸۷۲۳۲/۷	۵/۳۷	۲/۳۸	۳/۳۳
S16-D34.90-t1.47-L150-L050	۷۴۰۰۲	۷۴۳۵۵/۶	۷۵۶۳۰	۷۵۱۲۶/۶	۲/۲	۰/۴۸	۱/۵۲
S17-D34.90-t1.47-L150-L075	۶۸۷۷۲	۶۹۹۶۰	۷۰۲۵۶	۶۸۶۵۶	۲/۱۶	۱/۷۳	۰/۱۷
S18-D34.90-t1.47-L150-L0115.3	۷۰۴۰۶	۶۸۱۰۹/۶	۶۹۹۶۰	۶۸۹۹۳	۰/۶۳	۳/۲۶	۲/۰۱
S19-D39.05-t1.60-L150-Perfect	۱۰۴۹۶۷	۱۰۲۳۶۰	۱۰۴۵۰۶	۱۰۳۰۱۶	۰/۴۴	۲/۴۸	۱/۸۶
S20-D39.05-t1.60-L150-L075	۸۵۰۰۴	۸۴۶۴۳	۸۶۲۶۵	۸۵۱۲۸	۱/۴۸	۰/۸۷	۰/۱۵
S21-D39.05-t1.60-L150-L090	۸۵۳۲۳	۸۴۶۵۶	۸۶۹۶۱	۸۵۴۶۳	۱/۹۲	۰/۷۸	۰/۱۶
S22-D39.05-t1.60-L150-L0112.5	۸۵۵۹۱	۸۵۲۳۶	۸۷۶۹۶	۸۵۹۵۸	۲/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۳
S23-D39.05-t1.60-L250-Perfect	۱۰۰۳۸۱	۱۰۱۲۵۶	۱۰۳۵۹۶	۱۰۲۰۵۷	۳/۲	۰/۸۷	۱/۶۷
S24-D39.05-t1.60-L250-L0125	۷۷۷۹۳	۷۶۶۴۸/۵	۷۸۳۵۲	۷۷۵۹۶	۰/۷۲	۱/۴۷	۰/۲۵
S25-D39.05-t1.60-L250-L0150	۷۷۹۲۰	۷۷۲۳۰	۷۹۰۱۰	۷۷۹۸۶	۱/۴	۰/۸۹	۰/۰۸
S26-D39.05-t1.60-L250-L0187	۷۸۹۸۰	۷۸۱۲۵	۷۹۸۶۹	۷۸۹۳۵	۱/۱۳	۱/۰۸	۰/۰۶



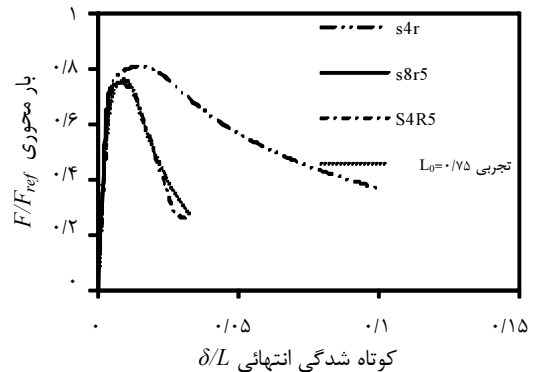
شکل ۳۳ تحلیل نرم‌افزاری و شکل تجربی برای نمونه S18-  
S4R5 و  $D34.90-t1.47-L150-L_0115.3$  و المان S4R5

### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

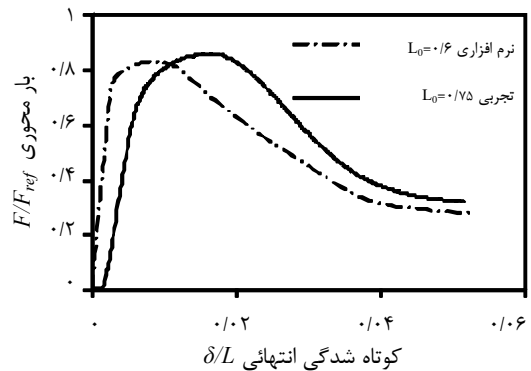
در این تحقیق با انجام مطالعات عددی و تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی نرم با نسبت‌های  $L/D$  و  $D/t$  متفاوت، دارای گشودگی‌های مثلی، رفتار کمانش این پوسته‌ها بررسی شد و بار کمانش این پوسته‌ها برای گشودگی‌هایی با ابعاد یکسان و موقعیت‌های مختلف بدست آمد و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- استفاده از روش‌های عددی برای مطالعه پارامتریک پوسته‌های استوانه‌ای، به تولید سازه‌های مطلوب با هزینه بسیار اندک کمک می‌کند.
- ۲- برای پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، ابتدا کمانش به صورت موضعی اتفاق افتاده و سپس خمش نهایی اتفاق می‌افتد.
- ۳- حضور گشودگی ظرفیت تحمل بار پوسته‌های استوانه‌ای را کاهش می‌دهد.
- ۴- تغییر مکان قرارگیری گشودگی از میانه ارتفاع پوسته به سمت لبه‌ها، بار کمانشی را افزایش می‌دهد و پوسته بلندتر نسبت به تغییر در مکان گشودگی حساس‌تر می‌باشد. افزایش قطر در حالی که ضخامت ثابت است، بار کمانشی را افزایش می‌دهد و افزایش در نسبت  $L/D$  بار کمانشی را کاهش می‌دهد.
- ۵- آنالیز با المان خطی (S4R5)، منطقه پس‌کمانش را به خوبی پیش‌بینی می‌کند، در حالی که آنالیز با المان غیرخطی (S8R5) بار کمانشی را بهتر پیش‌بینی می‌کند.
- ۶- نقص‌های حین ساخت، مهمترین دلیل اختلاف بین بار کمانشی عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.
- ۷- برنامه المان محدود آباکوس در نحوه مدل‌سازی و آنالیز از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

در شکل ۳۱ نمودار بار-جابجایی نمونه S05-D39.05- $t1.60-L332.7-L_0250$  برای سه المان ذکر شده نشان داده شده است همان‌طور که از نمودار مشخص است المان S4R5 قسمت پس‌کمانش را بهتر نشان می‌دهد. در مورد مرحله پیش‌کمانش، تمام المان‌ها نتایج مشابهی ارائه می‌دهند. نمودار بار-جابجایی نتایج تجربی و تحلیل با المان S4R5 نمونه‌ی S18-D34.90-t1.47-L150-L<sub>0</sub>115.3 به همراه تغییرات شکل آنها، در شکل‌های ۳۲ و ۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۳۱ منحنی‌های بار-جابجایی برای نمونه S05-D39.05-  
 $t1.60-L332.7-L_0250$  و المان‌های مختلف



شکل ۳۲ منحنی‌های بار-جابجایی تجربی و تحلیل نرم‌افزاری برای  
نمونه S18-D34.90-t1.47-L150-L<sub>0</sub>115.3 و المان S4R5

همان‌طور که از نمودارها و شکل‌ها مشخص است نتایج تجربی و تحلیل نرم‌افزاری مطابقت خوبی دارند. بنابراین می‌توان با اتکا به تحلیل نرم‌افزاری با آباکوس قبل از تولید، ابتدا شبیه‌سازی و تحلیل استوانه‌ها را با نرم‌افزار انجام داد و سپس با رفع مشکلات احتمالی به تولید محصول مبادرت کرد.

## ۶- مراجع

- [12] Hilburger M. W., Starnes J. H., Jr., and Waas A. M., "A Numerical and Experimental Study of the Response of Selected Compression-loaded Composite Shells with Cutouts", *Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Long Beach, CA, AIAA, 1998, pp. 98-1768.
- [13] Tafreshi A., "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, 2002, pp. 351-359.
- [14] Haipeng Han, Cheng J, Taheri F, Pegg N., "Numerical and Experimental Investigations of the Response of Aluminum Cylinders with a Cutout Subject to Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, 2006, pp. 254-270.
- [۱۵] زین الدینی م، پیکانو م، "شبییه‌سازی عددی کمانش موضعی اعضای لوله‌ای دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های تناوبی کشش و فشار"، *عمران مدرس*، دوره یازدهم، شماره ۴، ۱۳۹۰، صص ۹۷-۱۰۴.
- [۱۶] [رحیمی غ، رسولی س.ف.، "بررسی تاثیرگشودگی مربع مستطیل و ضریب منظر آن برمقاومت کمانش پوسته استوانه-ای مشبک کامپوزیتی"، *دهمین همایش انجمن هوافضای ایران*، تهران، ۱۳۸۹.
- [17] Shariati M., "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 11, 2008, pp. 1251-1261.
- [18] ASTM A370-05, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.
- [19] Madenci E. and Barut A., "Pre- and Postbuckling Response of Curved, Thin, Composite Panels with Cutouts Under Compression", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37, No. 9, 1994, pp. 1499-1510.
- [1] Timoshenko SP, Gere JM., *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [2] Ugural AC., *Stresses in Plates and Shells*, New York: McGraw-Hill, 1981.
- [3] Tennyson R. C., "The Effects of Unreinforced Circular Cutouts on the Buckling of Circular Cylindrical Shells", *Journal of Engineering for Industry*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 90, November 1968, pp. 541-546.
- [4] Brogan F. A. and Almroth B. O., "Buckling of Cylinders with Cutouts", *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 2, February 1970, pp. 236-240.
- [5] Starnes J. H., Jr., *The Effect of a Circular Hole on the Buckling of Cylindrical Shells*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1970.
- [6] Almroth B. O. and Holmes A. M. C., "Buckling of Shells with Cutouts, Experiment and Analysis", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 8, No. 8, 1972, pp. 1057-1071.
- [7] Almroth B. O., Meller E, and Brogan F. A., "Computer Solutions for Static and Dynamic Buckling of Shells", *Buckling of Structures*, Edited by B. Budiansky, IUTAM Symposium, Cambridge, Massachusetts, 1974, pp. 52-66.
- [8] Starnes J. H., Jr., "Effect of a Slot on the Buckling Load of a Cylindrical Shell with a Circular Cutout", *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 2, February 1972, pp. 227-229.
- [9] Toda S, "Buckling of Cylinders with Cutouts Under Axial Compression", *Experimental Mechanics*, Vol. 3, 1983, pp. 414-417.
- [10] Arbocz J., Hol JMAM., "Collapse of Axially Compressed Cylindrical Shells with Random Imperfections", *Thin-Walled Structures*, Vol. 23, No. 1-4, 1995, pp. 131-158.
- [11] Jullien JF, Limam A., "Effect of Openings on the Buckling of Cylindrical Shells Subjected to Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 31, No. 1-3, 1998, pp. 187-202.