

# مطالعه تجربی و عددی کماتش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مختلف

محمود شریعتی، مسعود مهدی‌زاده رخی

۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲ گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۰۲/۰۸

تاریخ ارزیابی نهایی: ۱۳۹۰/۰۷/۱۲

## چکیده

در این مقاله مسئله پایداری پوسته‌های استوانه‌ای نازک فولادی با طول‌های مختلف و دارای گشودگی‌های یک طرفه و دوطرفه با اشکال هندسی متنوع (مربع، مستطیل، دایره، بیضی) تحت بار فشاری محوری و با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش کماتش توسط یک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ (INSTRON 8802) انجام شده و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. مطابقت بسیار خوبی بین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که میزان گسترش گشودگی‌های مختلف با مساحت یکسان در جهت محیطی استوانه‌ها و تمرکز تنش، عوامل موثر در ایجاد تفاوت در مقاومت کماتش این نوع پوسته‌ها هستند.

## کلیدواژه:

کوماتش، پوسته‌های استوانه‌ای، گشودگی، روش اجزای محدود، روش تجربی.

## مقدمه

تعیین بار کماتش در محدوده الاستیک خطی متمرکز شده بودند، اما به سرعت دریافتند که بار کماتش به دست آمده، از مشاهدات تجربی بیش‌تر است. از آنجایی که تاکنون روابط تحلیلی دقیقی برای پیش‌بینی بار کماتش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی ارائه نشده است، مطمئن‌ترین راه برای طراحی این سازه‌ها تکیه بر نتایج آزمایش‌های تجربی است.

جولین [۱] به طور تجربی و عددی تاثیر گشودگی‌های مربعی، مستطیلی و دایره شکل را روی کماتش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری، بررسی کرد. همچنین تاثیر موقعیت و تعداد گشودگی‌ها را نیز مورد مطالعه قرار داد. او نتیجه گرفت که بار بحرانی به زاویه گشودگی یا اندازه آن در جهت محیطی استوانه حساس است. نرم‌افزار اجزای محدود به کار گرفته شده کستم<sup>۱</sup> بود. در همان زمان به [۲] و همکاران تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی روی خمش و کماتش پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت متوسط دارای گشودگی دایروی و مستطیلی شکل انجام دادند. در این تحقیق، نسبت‌های قطر به ضخامت؛  $D/t = 50$  و طول به قطر؛  $L/D = 7/9$  در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان داد که گشتاور کماتش هنگامی که گشودگی در طرف کششی قرار دارد بیش‌تر از

سازه‌های پوسته‌ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه‌ای از بهترین سازه‌ها محسوب می‌شوند. این سازه‌ها به دلیل قدرت تحمل بار بالا، استحکام بالا و راحتی ساخت، همواره مورد توجه مهندسين در طراحی و ساخت وسایل مختلف بوده‌اند. پوسته‌های استوانه‌ای اغلب در سازه‌های مهندسی مانند هواپیماها، موشک‌ها، مخازن، خطوط لوله، اتومبیل‌ها و بعضی از سازه‌های زیردریایی به کار می‌روند. این اجزا در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای محوری فشاری قرار گرفته و دچار کماتش شوند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمت‌ها ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تاثیرگذار باشند. به علاوه شکل هندسی این گشودگی‌ها در بهینه کردن طراحی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مساله کماتش پوسته‌های استوانه‌ای، بیش از یک قرن است که مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. در ابتدا محققین روی

۱. استاد، mshariati44@gmail.com

۲. عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، (نویسنده مخاطب)، masoud\_mahdizadeh@yahoo.com

ضخامت نازک و متوسط، با طول‌های مختلف را بررسی کردند و نیز به کمک آزمایش‌های تجربی نتایج به‌دست آمده برای پوسته‌های با ضخامت متوسط را مقایسه کردند و در نهایت یک سری روابط پارامتری را براساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های تجربی و عددی و به کمک روش رگرسیون حداقل مربعات، ارائه دادند. شریعتی و مهدی‌زاده به طور مشابه تاثیر گشودگی‌های بیضوی شکل [۱۰] و شبه‌بیضوی [۱۱] را روی مقاومت کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با ابعاد مختلف، به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند و بر پایه نتایج تجربی روابطی را برای پیش‌بینی بار کمانش این گونه پوسته‌ها ارائه دادند. آن‌ها همچنین مسئله پایداری پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با گشودگی بیضوی شکل تحت گشتاور خمشی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲].

هرچند تاکنون مسئله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های مختلف، به طور جداگانه و با روش‌های عددی و تجربی بررسی شده است، اما هنوز مطالعه تجربی دقیقی به منظور مقایسه تاثیر انواع گشودگی‌ها بر بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای صورت نگرفته است.

ما در این مقاله تاثیر شکل انواع گشودگی‌ها (مربع، مستطیل، دایره، بیضی) را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با طول‌های مختلف بررسی و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. برای گشودگی‌های مستطیلی تاثیر راکور در گوشه‌های گشودگی نیز مطالعه شده است. گشودگی‌های ایجاد شده یک‌طرفه و دوطرفه هستند. مزیت دیگر این مطالعه بر مطالعات عددی گذشته این است که خواص الاستیک-پلاستیک واقعی ماده در نظر گرفته شده است. تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS 6.4-PR11 و آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲<sup>۷</sup> انجام شده است.

نتایج به‌دست آمده از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و برای طراحی پوسته‌های استوانه‌ای با نسبت‌های طول به قطر و قطر به ضخامت مشابه که از ماده مشابهی تشکیل شده باشند، مفید خواهند بود. افزون بر این نکات کلی به‌دست آمده برای طراحی تمامی پوسته‌های دارای گشودگی با شکل هندسی مشابه کاربرد دارند.

### هندسه، خواص مکانیکی و شرایط مرزی پوسته‌ها

در این تحقیق از پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با قطر  $D=42\text{mm}$ ، ضخامت  $t=78/0\text{mm}$  و سه طول متفاوت  $L=120\text{mm}$ ،  $L=273\text{mm}$  و  $L=420\text{mm}$ ، استفاده شده است. گشودگی‌ها در میانه ارتفاع پوسته‌ها و با مساحت ثابت ( $A \approx 113\text{mm}^2$ ) ایجاد

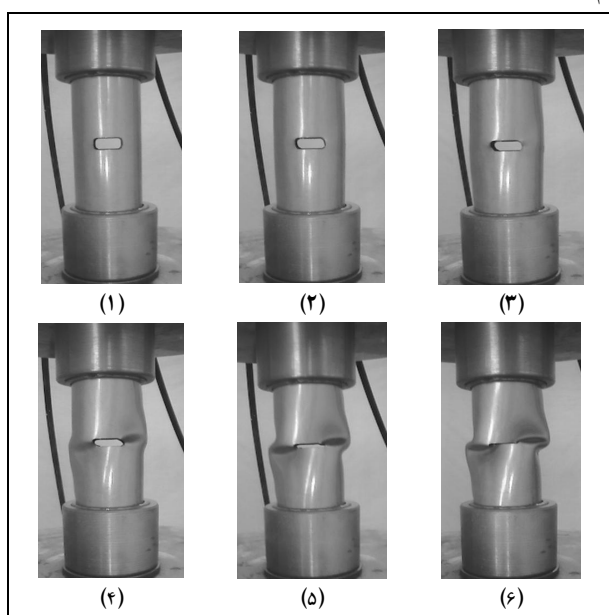
زمانی است که گشودگی در طرف فشاری قرار گرفته است. آن‌ها همچنین مطالعات پارامتری را روی تاثیر شکل، اندازه و موقعیت گشودگی در ظرفیت کمانش، انجام دادند. هیلبرگر [۳] و همکاران رفتار کمانش پنل‌های استوانه‌ای کامپوزیتی نازک با گشودگی دایروی مرکزی، را بررسی کردند. در این مطالعه تاثیر ابعاد گشودگی، انحنای پنل و نقص‌های هندسی اولیه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد. آن‌ها از نرم‌افزار اجزای محدود استگز<sup>۲</sup> استفاده کردند. مشاهده شد که نتایج تحلیل‌های غیرخطی بسیار دقیق‌تر از تحلیل‌های سنتی خطی است. به طور مشابه تفرشی [۴] نیز مطالعات عددی را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هشت لایه  $s$  [ $\pm 90/45/0$ ] با گشودگی مستطیلی، تحت بارهای فشاری محوری و فشار داخلی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</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. رحیمی و نوبهاری [۵] با استفاده از روش اجزای محدود و به کارگیری نرم‌افزار لوساس<sup>۴</sup> اثر گشودگی‌های مربعی، مستطیلی و دایروی را روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که بار کمانش پوسته‌های دارای گشودگی دایروی بیش‌تر از بار کمانش پوسته‌های دارای گشودگی مستطیلی یا مربعی با مساحت یکسان است. همچنین رحیمی و پورسعیدی [۶] نیز با استفاده از روش المان محدود و به کارگیری نرم‌افزارهای پترن<sup>۵</sup> و آباکوس استحکام پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های دایروی، مستطیلی و مربعی را تحت بارهای محوری فشاری و خمشی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش شعاع گشودگی مدور و عرض گشودگی مستطیلی در جهت پیرامون موجب کاهش استحکام پوسته می‌شود. پورسعیدی و همکاران [۷] نیز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی تحت بارگذاری خمشی را بررسی کردند. گشودگی‌ها در این مطالعه دایروی و مستطیلی شکل بودند. آن‌ها تاثیر اندازه، موقعیت و تعداد گشودگی‌ها را روی حد مقاومت خمشی پوسته‌ها مطالعه کردند. ورتدال و همکاران [۸] کمانش لوله‌های فولادی دارای گشودگی‌های مستطیلی با ابعاد مختلف، ایجاد شده در میانه پوسته، را تحت بار فشاری محوری به صورت تجربی مطالعه کردند. هان و همکاران [۹] با استفاده از تحلیل‌های عددی غیر خطی و به کمک نرم‌افزار انسیس<sup>۶</sup> تاثیر ابعاد و موقعیت گشودگی‌های مربعی شکل روی پوسته‌های استوانه‌ای با

پوسته‌های مطالعه شده در اینجا دقیقاً از همان جنسی هستند که در مرجع [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع داده‌های نمودارهای تنش-کرنش و تنش-کرنش پلاستیک ارائه شده است. پوسته‌ها در این تحلیل به صورت الاستیک-پلاستیک واقعی در نظر گرفته شده‌اند و داده‌های نمودار شکل ۲ عیناً در نرم‌افزار وارد شده‌اند؛ به عبارت دیگر رفتار واقعی ماده در تحقیق لحاظ شده است. بنابراین برای تحلیل عددی از داده‌های منحنی تنش-کرنش پلاستیک مربوط به شکل ۲، که در مرجع [۱۰] آمده استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدول الاستیک حدود ۱۸۷ GPa به دست آمده و نسبت پواسون برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

پوسته‌ها به صورت دوسر گیردار تحلیل شده‌اند. در آزمایش‌های لبه پایینی پوسته کاملاً ثابت شده و با اعمال یک جابجایی با سرعت کم به لبه بالایی، تغییرات نیروی اعمال شده به پوسته و میزان فشردگی پوسته در هر لحظه به طور خودکار توسط دستگاه آزمایش ثبت شده است. شرایط مرزی و فرآیند بارگذاری در شبیه‌سازی‌های عددی دقیقاً مطابق با آزمایش‌های تجربی است. شکل ۳ چند تصویر از آزمایش کمانش یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. می‌بینید که دو سر پوسته توسط دو استوانه فولادی متصل به فک‌های دستگاه، مهار شده است.

### المان‌بندی نمونه‌ها و فرآیند تحلیل عددی

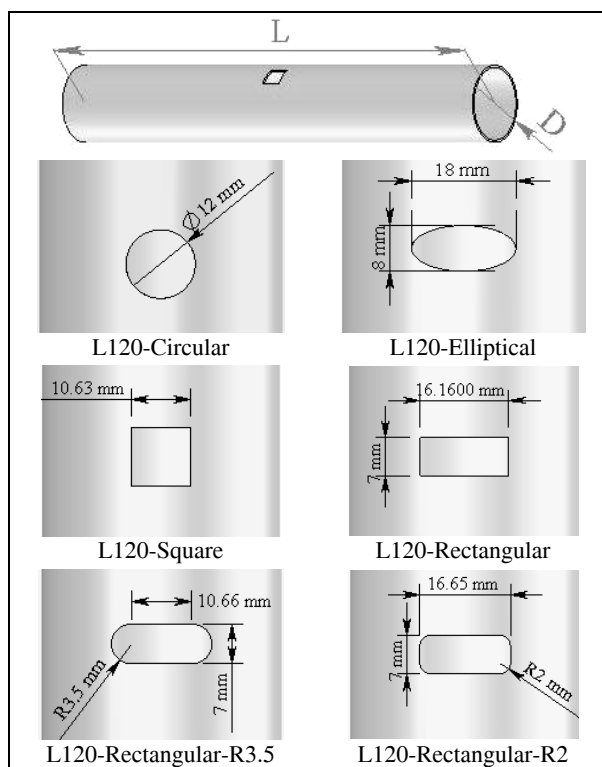
در تحلیل عددی، برای المان‌بندی نمونه‌ها از المان خطی S4R در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. المان S4R یک المان چهار



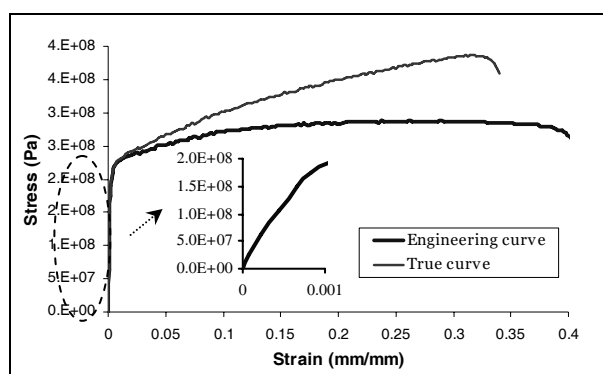
شکل ۳. آزمایش کمانش نمونه L120-Rectangular-R2-Double، در تصویر (۲) کمانش اتفاق افتاده است.

شده‌اند. هندسه و ابعاد گشودگی‌های ایجاد شده همراه با نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، عددی که بعد از حرف L آمده بیانگر طول پوسته به میلی‌متر، کلمه بعدی بیانگر شکل گشودگی و عدد بعد از R معرف شعاع راکور به میلی‌متر در گوشه‌ها و فقط برای گشودگی‌های مستطیلی است. برای مشخص کردن نمونه‌های دارای گشودگی دوطرفه از واژه "Double" در انتهای نام آن‌ها استفاده شده است و نمونه‌های بدون گشودگی با واژه "perfect" مشخص شده‌اند.

پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد آلیاژی نرم هستند که خواص مکانیکی آن با انجام آزمایش کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8 [13] توسط دستگاه اینسترون به دست آمده است. نمودار تنش-کرنش حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه پوسته و ابعاد گشودگی‌ها همراه با نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها



شکل ۲. نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش [۱۰]

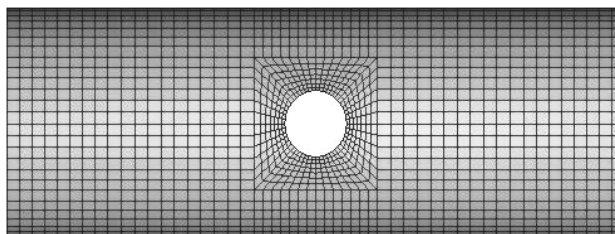
جدول ۱. بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی‌های یک‌طرفه حاصل از تحلیل‌های عددی و آزمایش‌های تجربی

| بار کمانش (N) |         | عنوان نمونه           |
|---------------|---------|-----------------------|
| عددی          | تجربی   |                       |
| ۲۳۲۸۵/۲       | ۲۳۰۰۸/۹ | L420-Perfect          |
| ۱۸۴۰۲/۰       | ۱۸۹۳۵/۴ | L420-Circular         |
| ۱۷۶۷۰/۶       | ۱۸۴۰۹/۸ | L420-Elliptical       |
| ۱۸۲۵۹/۷       | ۱۸۸۷۵/۷ | L420-Square           |
| ۱۷۴۳۹/۸       | ۱۸۱۷۹/۸ | L420-Rectangular      |
| ۱۷۴۶۶/۲       | ۱۸۳۲۲/۰ | L420-Rectangular-R2   |
| ۱۷۳۸۱/۴       | ۱۷۷۳۵/۷ | L420-Rectangular-R3.5 |
| ۲۳۴۴۷/۴       | ۲۳۲۸۰/۵ | L273-Perfect          |
| ۱۹۱۲۹/۶       | ۱۹۹۵۹/۷ | L273-Circular         |
| ۱۸۴۷۷/۷       | ۱۸۵۴۵/۸ | L273-Elliptical       |
| ۱۸۸۸۷/۷       | ۱۹۷۵۵/۵ | L273-Square           |
| ۱۸۲۶۷/۵       | ۱۸۳۶۵/۵ | L273-Rectangular      |
| ۱۸۲۷۴/۶       | ۱۸۶۲۷/۶ | L273-Rectangular-R2   |
| ۱۸۲۶۶/۵       | ۱۸۲۱۰/۱ | L273-Rectangular-R3.5 |
| ۲۳۴۸۴/۷       | ۲۳۹۲۵/۷ | L120-Perfect          |
| ۲۰۳۸۲/۱       | ۲۰۸۵۹/۶ | L120-Circular         |
| ۱۹۷۶۴/۸       | ۲۰۲۷۴/۹ | L120-Elliptical       |
| ۲۰۲۵۸/۶       | ۲۰۸۴۰/۴ | L120-Square           |
| ۱۹۵۸۱/۲       | ۱۹۹۳۰/۵ | L120-Rectangular      |
| ۱۹۶۳۸/۸       | ۲۰۰۸۹/۷ | L120-Rectangular-R2   |
| ۱۹۵۸۰/۶       | ۱۹۸۶۰/۷ | L120-Rectangular-R3.5 |

با مراجعه به جداول ۱ و ۲ و شکل‌های ۵ و ۶، مشاهده می‌شود که با ایجاد گشودگی مقاومت در برابر کمانش پوسته استوانه‌ای به میزان چشمگیری افت می‌کند. همچنین دیده می‌شود که گشودگی‌های دایروی و مربعی شکل تاثیر کمتری در کاهش مقاومت پوسته‌ها در برابر کمانش دارند، در حالی که بیش‌ترین افت در بار کمانش مربوط به گشودگی مستطیلی شکل با شعاع راکور زیاد است (در این هندسه عرض مستطیل در اثر راکور به نیم‌دایره تبدیل شده است؛ شکل ۱ را ببینید).

گره‌ای با شش درجه آزادی برای هر گره است. این المان هم برای تحلیل پوسته‌های ضخیم و هم برای تحلیل پوسته‌های نازک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و این قابلیت را دارد که با افزایش ضخامت تغییر شکل‌های برشی را محاسبه کند [۱۴]. یک نمونه المان‌بندی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی عددی به منظور افزایش دقت در نتایج، از هر دو تحلیل مقدار ویژه و تحلیل غیرخطی استفاده شده است. برای این منظور به ترتیب حل گره‌های باکل<sup>۸</sup> و استاتیک-ریکس<sup>۹</sup> در نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل مدهای به دست آمده از تحلیل باکل در تحلیل غیرخطی استاتیک-ریکس استفاده شده‌اند تا تغییر شکل نمونه‌ها در اثر کمانش به‌طور دقیق به دست آید [۱۰ و ۱۴].



شکل ۴. المان‌بندی نمونه L120-Circle-Double

### نتایج تحلیل اجزای محدود و آزمایش کمانش

بارهای کمانش به دست آمده از تحلیل‌های غیرخطی کمانش و آزمایش‌های تجربی برای نمونه‌های دارای گشودگی‌های یک‌طرفه و دوطرفه به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

نمودارهای بار کمانش بر حسب نسبت طول به قطر پوسته‌ها  $L/D$ ، حاصل از تحلیل‌های عددی، برای گشودگی‌های یک‌طرفه و دوطرفه به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. این نمودارها به خوبی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت  $L/D$  بار کمانش پوسته‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر پوسته‌های بلندتر مقاومت کمتری در برابر کمانش از خود نشان می‌دهند که این نتیجه با نتایج ارائه در مراجع [۱۰ و ۱۱] کاملاً مطابقت دارد.

جدول ۲. بار کمانش پوسته‌های استوانه‌های دارای گشودگی‌های دوطرفه حاصل از تحلیل‌های عددی و آزمایش‌های تجربی

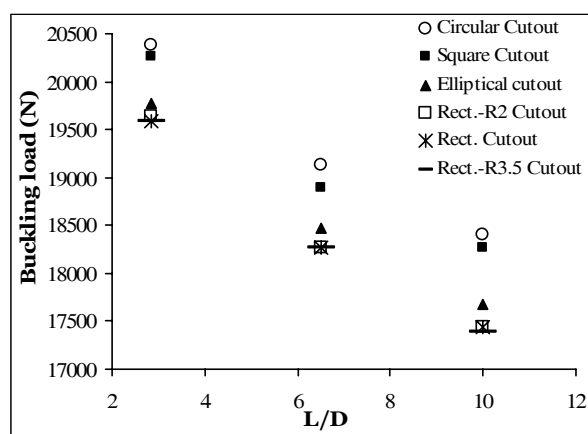
| عنوان نمونه                  | بار کمانش (N) |         |
|------------------------------|---------------|---------|
|                              | تجربی         | عددی    |
| L420-Circular-Double         | ۱۸۰۶۰/۲       | ۱۷۳۱۷/۸ |
| L420-Square-Double           | ۱۷۷۰۷/۱       | ۱۷۱۹۳/۷ |
| L420-Rectangular-R2-Double   | ۱۶۲۶۲/۲       | ۱۵۶۷۷/۵ |
| L420-Rectangular-R3.5-Double | ۱۶۱۰۱/۵       | ۱۵۵۸۳/۷ |
| L273-Circular-Double         | ۱۸۵۱۵/۷       | ۱۷۴۳۲/۸ |
| L273-Square-Double           | ۱۸۴۲۸/۴       | ۱۷۲۸۵/۲ |
| L273-Rectangular-R2-Double   | ۱۶۳۹۳/۰       | ۱۵۹۰۳/۴ |
| L273-Rectangular-R3.5-Double | ۱۶۱۴۲/۰       | ۱۵۶۸۹/۵ |
| L120-Circular-Double         | ۱۸۵۳۲/۱       | ۱۷۹۳۲/۹ |
| L120-Square-Double           | ۱۸۴۵۱/۰       | ۱۷۸۷۹/۸ |
| L120-Rectangular-R2-Double   | ۱۶۶۶۴/۲       | ۱۶۳۳۲/۳ |
| L120-Rectangular-R3.5-Double | ۱۶۵۷۷/۱       | ۱۶۲۹۱/۶ |

با توجه به اینکه مساحت گشودگی‌ها برابر است و با توجه به شکل ۱، می‌توان این نتیجه‌گیری کلی را ارائه نمود: پوسته‌هایی که گشودگی آن‌ها در جهت محیطی استوانه دارای بعد بیش‌تری است، مقاومت کمتری در برابر کمانش از خود نشان می‌دهند و بار کمانش آن‌ها کاهش می‌یابد.

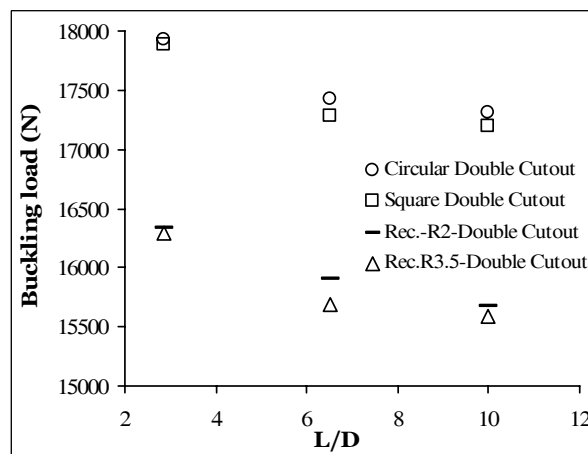
با توجه به نتیجه‌گیری بالا انتظار می‌رود که تاثیر گشودگی‌های مربعی در کاهش مقاومت پوسته کمتر از گشودگی‌های دایروی باشد. در مورد گشودگی‌های مستطیلی بدون راکور و راکورد نیز همین‌طور. اما نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که برای گشودگی‌های با مساحت یکسان، گشودگی‌های مربعی بیش‌تر از گشودگی‌های دایروی و گشودگی‌های مستطیلی بدون راکور، بیش‌تر از گشودگی‌های مستطیلی با راکور 2mm، در کاهش مقاومت کمانش پوسته تاثیر گذارند. علت این پدیده را می‌توان در شکل‌های ۷ و ۸ جستجو کرد.

شکل ۷ میدان تنش ون میز و شکل ۸ میدان کرنش پلاستیک معادل را در اطراف گشودگی‌های مختلف و در آستانه کمانش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هنگام کمانش، تنش در اطراف گشودگی‌ها بالا می‌رود (شکل ۷)، به گونه‌ای که اطراف گشودگی به حالت تسلیم می‌رسد (شکل ۸). همچنین ملاحظه می‌شود که برای گشودگی‌های مربعی و مستطیلی، این افزایش تنش در نواحی بیش‌تری از اطراف گشودگی و به‌ویژه گوشه‌ها رخ داده و موجب افزایش نواحی پلاستیک در میانه پوسته، و در نهایت کاهش مقاومت پوسته در برابر کمانش شده است. بنابراین تمرکز تنش در اطراف گشودگی‌ها عاملی است که به تسلیم شدن پوسته در اطراف گشودگی‌ها و کاهش مقاومت پوسته در برابر کمانش کمک می‌کند. به عنوان مثال در پوسته‌های دارای گشودگی مربعی شکل، با وجود اینکه اندازه گشودگی در جهت محوری کمتر از گشودگی دایروی است اما تمرکز تنش در گوشه‌های گشودگی مربعی باعث افزایش نواحی پلاستیک و در نتیجه کاهش بیش‌تر مقاومت پوسته در برابر کمانش نسبت به گشودگی‌های دایروی می‌شود.

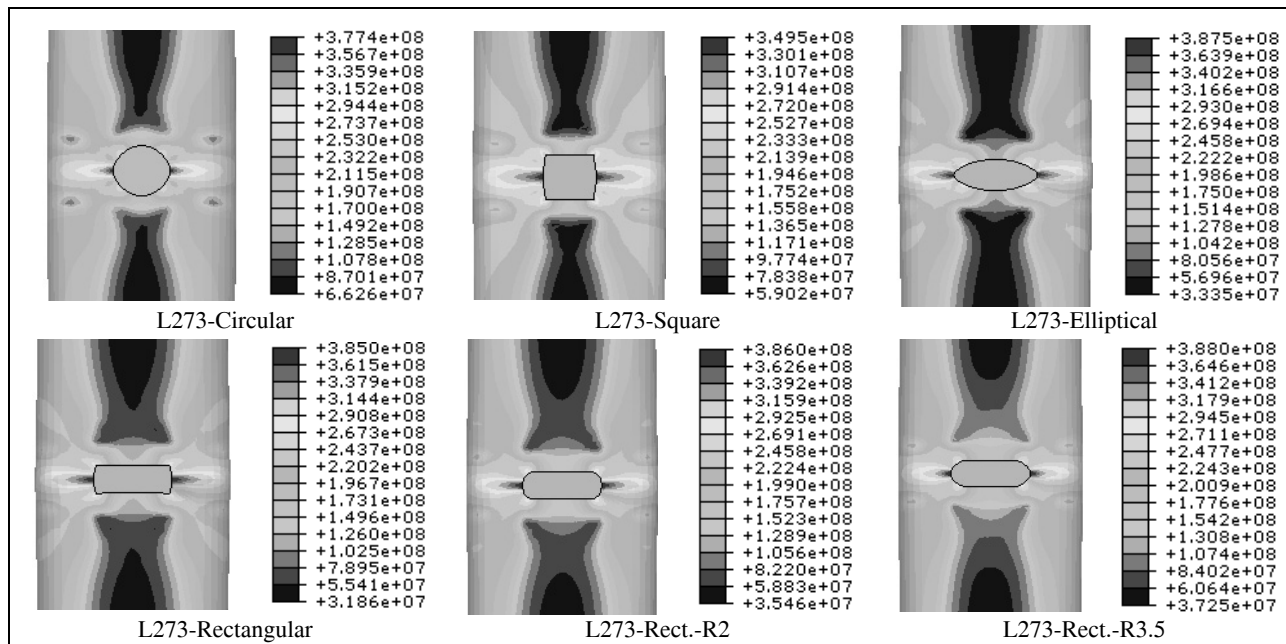
گشودگی بیضوی به علت گسترش بیش‌تر در جهت محیطی، نسبت به گشودگی‌های دایروی و مربعی، افت بیش‌تری را در بار کمانش پوسته موجب می‌شود. گشودگی‌های مستطیلی مانند گشودگی‌های مربعی در گوشه‌ها دارای تمرکز تنش می‌باشند که این موجب می‌شود اثر مخرب‌تری در مقاومت کمانش پوسته نسبت



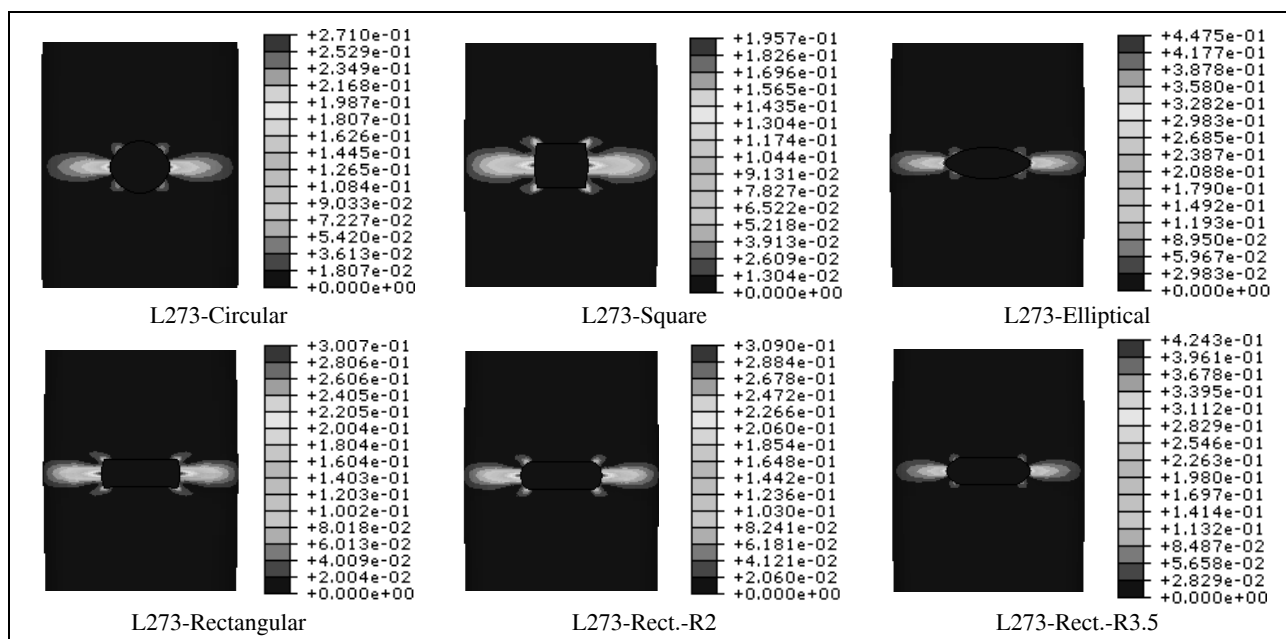
شکل ۵. نمودار بار کمانش حاصل از روش عددی در برابر نسبت L/D برای نمونه‌های دارای گشودگی‌های یک‌طرفه



شکل ۶. نمودار بار کمانش حاصل از روش عددی در برابر نسبت L/D برای نمونه‌های دارای گشودگی‌های دوطرفه



شکل ۷. کانتورهای تنش ون میز در نمونه‌های دارای گشودگی‌های یک‌طرفه در آستانه کماتش



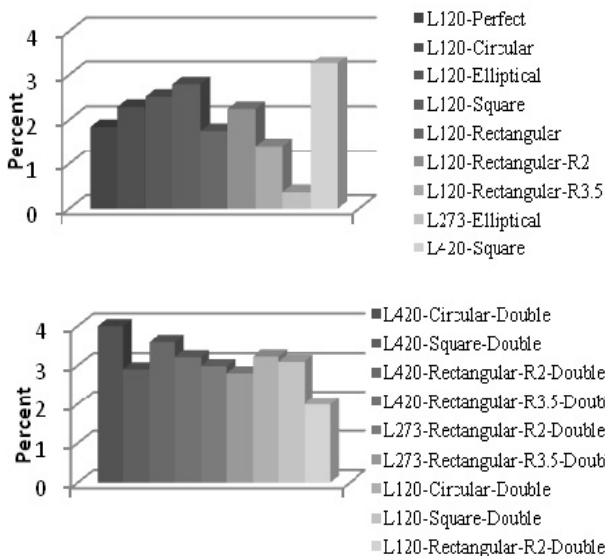
شکل ۸. کانتورهای کرنش پلاستیک معادل در نمونه‌های دارای گشودگی‌های یک‌طرفه در آستانه کماتش

کمانش گردد؛ بنابراین می‌توان گفت که تاثیر تمرکز تنش اطراف گشودگی‌ها در کاهش بار کمانش می‌تواند کمتر از تاثیر هندسه گشودگی باشد. نتایج به دست آمده برای پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی یک‌طرفه، در مورد پوسته‌های دارای گشودگی دوطرفه نیز صادق هستند؛ با این تفاوت که بار کمانش در پوسته‌های دارای گشودگی دوطرفه حدود ۵ تا ۱۵ درصد کمتر از پوسته‌های دارای گشودگی یک‌طرفه است.

به گشودگی‌های بیضوی داشته باشند. نکته دیگری که از شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان دریافت این است که با راکور زدن گوشه‌های یک گشودگی مستطیلی می‌توان تا حدودی نقاط تمرکز تنش و نواحی تسلیم شده در اطراف گشودگی را کاهش داد اما در عین حال باید توجه کرد که اگر قرار است مساحت گشودگی ثابت بماند، یک راکور زیاد از حد، مانند آنچه در مورد نمونه‌های دارای گشودگی مستطیلی با راکور ۳/۵ میلی‌متری دیده می‌شود، می‌تواند عرض گشودگی در جهت محیطی را افزایش داده و موجب کاهش بار

بیش تر است افت بیش تری را در مقاومت پوسته در برابر کمانش ایجاد می کنند.

تمرکز تنش اطراف گشودگی‌ها نیز در بار کمانش تاثیر گذار است ولی تاثیر آن می تواند کمتر از تاثیر هندسه گشودگی باشد.



شکل ۸. اختلاف بین بار کمانش عددی و تجربی تعدادی از نمونه‌ها

بنابراین می توان گشودگی‌ها را بر پایه شدت تاثیر آن‌ها روی کاهش مقاومت پوسته‌های استوانه‌ای در برابر کمانش از بیش تر به کمتر به صورت زیر مرتب کرد: گشودگی‌های مستطیلی، بیضوی، مربعی و دایروی شکل. این نتیجه برای پوسته‌های دارای گشودگی دو طرفه نیز صادق است.

بار کمانش برای پوسته‌های دارای گشودگی دو طرفه، در مقایسه با پوسته‌های دارای گشودگی یک طرفه، کمابیش بین ۵ تا ۱۵ درصد به ترتیب برای پوسته‌های بلند و کوتاه کاهش می یابد.

از نتایج ارائه شده در جداول ۱ و ۲ می توان برای طراحی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با نسبت‌های  $L/D$  و  $D/t$  مشابه و دارای گشودگی‌های یک طرفه و دو طرفه با اشکال مشابه و ابعاد متناسب استفاده کرد.

تاثیر افزایش عرض گشودگی بر کاهش بار کمانش، در نمونه‌های دارای گشودگی دو طرفه محسوس تر است. با مقایسه نمودارهای اشکال ۵ و ۶ مشاهده می شود که اختلاف بار کمانش بین نمونه‌های دارای گشودگی دایروی یا مربعی با نمونه‌های دارای گشودگی مستطیلی را کوردار در شکل ۶ (نمونه‌های دارای گشودگی دو طرفه)، بیش تر از دو برابر این اختلاف در نمونه‌های شکل ۵ (نمونه‌های دارای گشودگی یک طرفه) است.

### تایید نتایج حاصل از تحلیل عددی به کمک نتایج تجربی

به منظور تایید صحت نتایج عددی، برای هر نمونه تحلیل شده یک آزمایش کمانش توسط دستگاه سرو هیدرولیک پیشرفته اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. گشودگی‌ها توسط یک دستگاه فرز CNC روی پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شدند. بار وارده به هر پوسته و میزان فشردگی آن به طور خودکار توسط دستگاه ثبت شده است، در نتیجه نتایج از دقت بسیار بالایی برخوردارند. با مراجعه به جداول ۱ و ۲ مشاهده می شود که اختلاف بین بار کمانش به دست آمده از دو روش عددی و تجربی برای تمامی نمونه‌ها کمتر از ۶ درصد است. اختلاف بار کمانش عددی و تجربی تعدادی از نمونه‌ها در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.

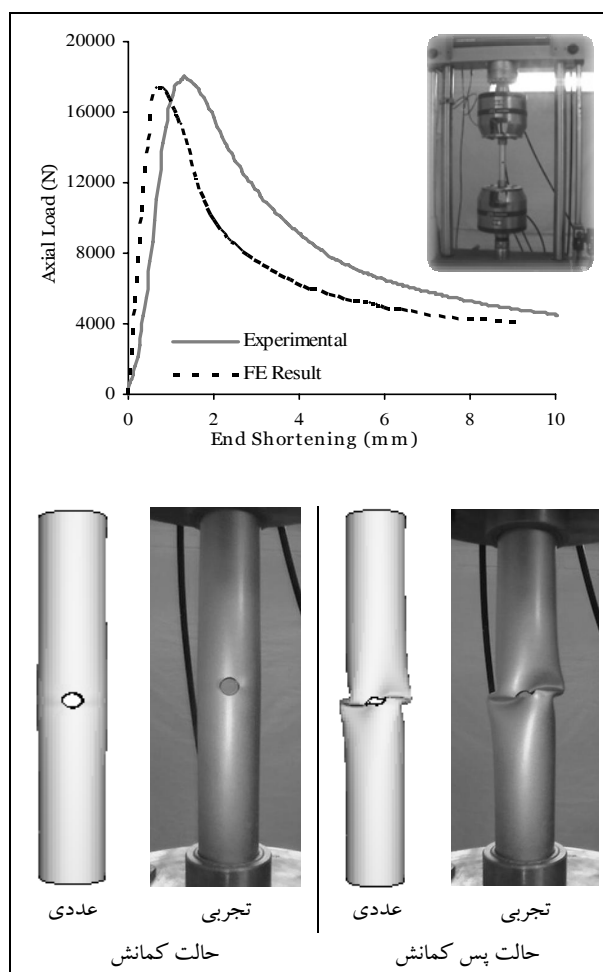
یک نمونه از منحنی‌های بار - فشردگی حاصل از هر دو روش عددی و تجربی به همراه تغییر شکل پوسته برای یکی از پوسته‌های استوانه‌ای در شکل ۱۰ ارائه شده است. بیشینه مقدار منحنی بار - فشردگی، بار کمانش پوسته را نشان می دهد. پیش از کمانش، بار تحمل شده توسط پوسته به طور خطی با فشردگی آن افزایش می یابد و پس از کمانش این بار به شدت افت می کند. در شکل ۱۰ مشاهده می شود که منحنی‌های بار - فشردگی و نیز تغییر شکل‌های حالت کمانش و پس کمانش حاصل از هر دو روش عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

### نتیجه گیری

در این تحقیق کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با طول‌های مختلف و دارای انواع گشودگی‌ها به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت و این نتایج به دست آمد:

در شرایطی که مساحت گشودگی‌های ایجاد شده در پوسته‌ها برابر باشند، گشودگی‌هایی که عرض آن‌ها در جهت محیطی

- with a circular cutout". *Int. J. Solids Structures*, Vol. 38, 2001, pp. 1495–522.
4. Tafreshi, A., "Buckling and postbuckling analysis of composite cylindrical shells with cutout subjected to internal pressure and axial compression load". *Int. J. Pressure Vessel Piping*, Vol. 79, 2002, pp. 351–9.
۵. رحیمی، غلامحسین، نوبهاری، غلامرضا، "مطالعه پارامتریک کمانش الاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با انواع گشودگی تحت بار محوری". نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال چهارم، شماره یکم، تیرماه ۱۳۸۱.
۶. رحیمی، غلامحسین، پورسعیدی، اسماعیل، "مطالعه پارامتری استحکام پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بار محوری و ممان خمشی". نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال ششم، شماره اول، آبان ۱۳۸۳.
7. Poursaeidi, E., Rahimi, G. H., Vafai, A. H., "Plastic buckling of cylindrical shells with cutouts". *Asian Journal of civil engineering (Building and housing)*, Vol. 5, NOS 3-4, 2004, pp. 191-207.
8. Vartdal, B. J., Al-Hassani, S. T. S., Burley, S. J., "A tube with a rectangular cutout. Part 2: subject to axial compression". *Proc IMechE*, Vol. 220, Part C, *J. Mechanical Engineering Science*, 2005.
9. Han, H., Cheng, J., Taheri, F., and 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.
10. Shariati, M., and Mahdizadeh Rokhi, M., "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression". *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, 2008, pp. 1251– 1261.
۱۱. شریعتی، محمود، مهدی زاده رخی، مسعود، "کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی شبه بیضوی تحت فشار محوری". نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۳، شماره ۱، اردیبهشت ۱۳۸۸.
12. Shariati, M., and Mahdizadeh Rokhi, M., "Investigation of buckling of Steel cylindrical shells with elliptical cutout under bending moment". *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 3, N. 1, 2009, pp. 7-15.
13. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A370–05.
14. ABAQUS 6.4-PR11 user's manual



شکل ۱۰. مقایسه منحنی‌های بار-فشرده‌گی و تغییر شکل‌های نمونه L273-Circular-Double حاصل از روش عددی و تجربی

#### پی نوشت

- |           |                 |
|-----------|-----------------|
| 1. CASTEM | 6. ANSYS        |
| 2. STAGS  | 7. INSTRON 8802 |
| 3. ABAQUS | 8. Buckle       |
| 4. LUSAS  | 9. Static-Riks  |
| 5. PATRAN |                 |

#### مراجع

- Jullien, J. F., and Limam, A., "Effect of openings on the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression". *Thin-Walled Structures*, Vol. 31, 1998, pp. 187–202.
- Yeh, M. K., Lin, M. C., and Wu, W. T., "Bending buckling of an elastoplastic cylindrical shell with a cutout". *Eng. Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 996–1005.
- Hilburger, M. W., Vicki O. B., and Michael, P. N., "Buckling behavior of compression-loaded quasi-isotropic curved panels