

مطالعه تجربی و عددی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با گشودگی شبه بیضوی تحت بار فشاری محوری

محمود شریعتی^{i*}؛ مسعود مهدی زاده رخیⁱⁱ

چکیده

درک چگونگی تاثیر گشودگی روی ظرفیت تحمل بار و رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای یک مسئله اساسی در طراحی اجزای سازه‌های بکار رفته در اتومبیلها، هواپیما ها و نیز سازه‌های دریایی می‌باشد. در این مقاله شبیه سازی و تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با طولهای متفاوت، شامل گشودگی شبه بیضوی، تحت بار فشاری محوری با استفاده از روش عددی اجزای محدود انجام و تاثیر موقعیت گشودگی و نسبت طول به قطر در رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بررسی شده است. همچنین برای چندین نمونه، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده و نتایج بدست آمده از آزمایشهای تجربی با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. برابری بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی و نتایج تجربی دیده می‌شود. در پایان با توجه به نتایج تجربی و عددی رابطه‌ای برای یافتن بار کمانش اینگونه سازه‌ها ارائه شده است.

کلمات کلیدی: کمانش، پوسته‌های استوانه‌ای، گشودگی شبه بیضوی، روش اجزای محدود، روش تجربی.

Experimental and Numerical Study of Buckling of Steel Cylindrical Shells with Quasi Elliptical Cutout Subjected to Axial Compression load

M. Shariati; M. Mahdizadeh Rokhi.

ABSTRACT

Understanding the influences of cutout in load bearing capacity and buckling behavior of cylindrical shells is a fundamental concern in the design of structural components used in automobiles, aircrafts, and marine structures.

In this article, simulation and analysis of steel cylindrical shells with various lengths, including quasi elliptical cutout, subjected to axial compression load were systematically carried out using finite element method and the investigation examined the influence of the cutout location and the shell aspect ratio (L/D) on the buckling, and the postbuckling responses of the cylindrical shells. For several specimens an experimental investigation was also carried out via an INSTRON 8802 servo hydraulic machine. The results obtained from the experiments were compared with numerical results. A very good agreement was observed between the mentioned results. Finally, corresponding to experimental and numerical results, an expression was derived for finding the buckling load of such structures.

KEYWORDS : Buckling, Cylindrical Shells, Semi Elliptical Cutout, Finite Element Method, Experimental Method.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۵/۷

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۱۰/۲۱

^{i*} نویسنده مسئول و دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. Email: mshariati@shahroodut.ac.ir

ⁱⁱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. Email: masoud_mahdizadeh@yahoo.com

۱- مقدمه

استگز بکار گرفته شد. دیده شد که نتایج تحلیلهای غیر خطی بسیار دقیق تر از تحلیلهای سنتی خطی است. به طور مشابه، تفرشی [۷] نیز مطالعات عددی را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با گشودگی مستطیلی شکل، تحت بارهای فشاری محوری و فشار داخلی، با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام داد. هان [۸] و همکارانش با استفاده از تحلیلهای عددی غیر خطی و به کمک نرم افزار انسیس 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 آزمایشات تجربی نتایج بدست آمده برای پوسته‌های با ضخامت متوسط را با نتایج عددی مقایسه کردند و در پایان روابط پارامتری را نیز براساس نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی و تجربی به کمک روش رگرسیون حداقل مربعات، ارائه دادند. شریعی و مهدی زاده [۹] به طور مشابه تاثیر گشودگی‌های بیضی شکل را روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با ابعاد مختلف، مطالعه کردند.

با توجه به اینکه تا کنون گشودگی‌های شبه بیضی مطالعه نشده‌اند، در این مقاله تلاش شده با استفاده از نرم افزار آباکوس مجموعه‌ای از تحلیلهای خطی و غیر خطی انجام شود که هدف از انجام آنها بررسی تاثیر موقعیت گشودگی‌های شبه بیضی روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با نسبتهای $L/D = 2/85, 6/10, 5$ و $D/t = 35$ می‌باشد. همچنین با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ برای چندین نمونه آزمایش تجربی کمانش انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از روش اجزای محدود مقایسه شده‌اند. در ادامه دیده خواهد شد که نتایج برابری بسیار زیادی با یکدیگر دارند. همچنین براساس نتایج عددی حاصل، رابطه‌ای برای یافتن بار کمانش این گونه پوسته‌ها ارائه شده است.

۲- تحلیل عددی با استفاده از روش اجزای محدود

نرم افزار استفاده شده در این مقاله، برای تحلیل عددی اجزای محدود، نرم افزار آباکوس است.

۲-۱- هندسه و خواص مکانیکی پوسته

هندسه پوسته‌های تحلیل شده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. پوسته‌های استوانه‌ای مورد مطالعه دارای قطر $D = 42\text{mm}$ و طولهای $L = 119/7, 273, 420\text{mm}$ هستند. ضخامت پوسته‌ها $t = 1/2\text{mm}$ می‌باشد. گشودگی‌های ایجاد شده به صورت شبه بیضی هستند. بعد a در جهت محور استوانه و بعد b عمود بر محور استوانه در نظر گرفته

پوسته‌های استوانه‌ای اغلب در سازه‌های مهندسی مانند هواپیما، 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 کمانش شوند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمتها ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تاثیر گذار باشند. مساله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، بیش از یک قرن است که مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. در آغاز محققین روی تعیین بار کمانش در محدوده الاستیک خطی متمرکز شده بودند، اما به سرعت دریافتند که بار کمانش بدست آمده، از یافته‌های تجربی بیشتر است. تحقیقات تجربی [۱] و [۲] ثابت کرد که ظرفیت کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک بسیار کمتر از مقدار پیش بینی شده توسط تئوری کلاسیک است. از تئوری کلاسیک می‌توان برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری یکنواخت، با بکار بردن فرمول (۱)، استفاده کرد [۳]:

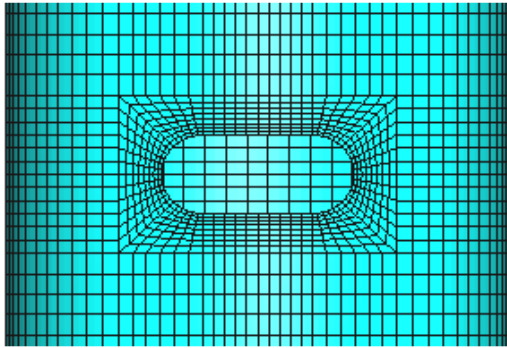
$$N_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t^2}{R} \right) \quad (1)$$

که در آن E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، t ضخامت پوسته و R شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله جواب مناسبی برای پوسته‌های نازک بدون گشودگی با نسبت $L/R \leq 5$ می‌دهد [۴]. این معادله برای پوسته‌های با ضخامت متوسط ($R/t < 50$) نیز اغلب مقداری بیشتر از بار کمانش واقعی را نشان می‌دهد به طوری که پوسته قبل از رسیدن به این بار دچار کمانش می‌شود. باید توجه کرد که معادله (۱) فقط برای پوسته‌هایی که از مواد الاستیک و ایزوتروپ ساخته شده باشند به کار می‌رود.

جولین [۲] به طور تجربی و عددی تاثیر گشودگی‌های مستطیلی شکل روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری را بررسی کرد و یک رابطه پارامتری بین شکل و ابعاد گشودگی‌ها ارائه داد. همچنین تاثیر موقعیت و تعداد گشودگی‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در همان زمان به [۵] و همکارانش تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی روی خمش و کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت متوسط دارای گشودگی انجام دادند. هیلبرگر [۶] و همکارانش رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی نازک با گشودگی مربعی شکل را بررسی کردند. در این تحقیق، نرم افزار اجزای محدود

۲-۳- المان بندی نمونه‌ها

برای المان بندی نمونه‌ها از المان غیر خطی S8R که یک المان هشت گره‌ای، با شش درجه آزادی برای هر گره است، و نیز المان خطی S4R که یک المان چهارگره‌ای است [۱۰]، استفاده شده است. قسمتی از یک نمونه المان بندی شده در شکل (۳) دیده می‌شود.



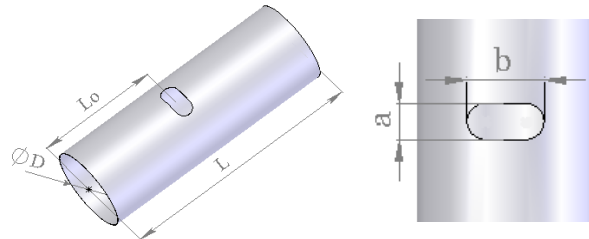
شکل (۳): قسمتی از یک نمونه المان بندی شده

۲-۴- فرایند تحلیل

تحلیلهای اجزای محدود خطی، بخصوص برای پوسته‌های ضخیم، بار کماتش را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کنند. با این وجود، باید برای تمام نمونه‌ها ابتدا یک تحلیل خطی (مقدار ویژه) انجام شود تا شکل مدهایی که مقدار ویژه کمتری دارند بدست آیند، زیرا کماتش در این شکل مدها اتفاق می‌افتد. جابجایی‌های مربوط به این شکل مدها در فایل‌های ذخیره می‌شوند و در تحلیل بعدی (استاتیک-ریکس) به عنوان نقص اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تاثیر شکل مدها در تحلیل کماتش اعمال شود. در غیر این صورت نرم افزار به طور اختیاری مد کماتش را انتخاب می‌کند که این معمولاً به نتایج غیر واقعی منجر می‌شود. این مرحله در نرم افزار باکل نام دارد. برای این مرحله از روش حلگر ساب اسپیس در نرم افزار استفاده شده و سه شکل مد اول از هر نمونه بدست آمده است. گفتنی است که به دلیل وجود قیده‌های تماسی بین صفحات صلب و پوسته استوانه‌ای، از روش حلگر لانکسوز در این نمونه‌ها نمی‌توان استفاده کرد. در شکل (۴)، سه شکل مد اول از نمونه $L_{119/7} - L_{083/79} - a7 - b16$ نشان داده شده است. بعد از انجام تحلیل باکل یک تحلیل غیر خطی انجام می‌شود تا منحنی بار - جابجایی بدست آید. مقدار ماکزیمم این منحنی بار کماتش است. این مرحله استاتیک-ریکس نام دارد و از روش طول-کمان برای تحلیل پس کماتش استفاده می‌کند.

شده است. فاصله بین مرکز گشودگی تا لبه پایینی استوانه، L_0 در نظر گرفته شده است.

نام گذاری نمونه‌ها به عنوان مثال، به صورت $L420 - L_0110 - a5 - b15$ می‌باشد که عدد بعد از L بیان کننده طول نمونه، عدد بعد از L_0 بیانگر فاصله مرکز گشودگی تا لبه پایینی نمونه و اعداد بعد از a و b نمایانگر ابعاد گشودگی در جهات نشان داده شده هستند.



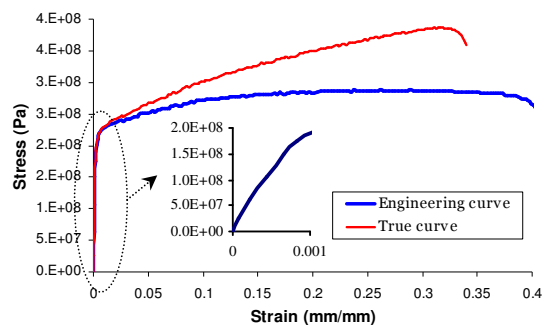
شکل (۱): هندسه پوسته استوانه ای

پوسته‌های استوانه‌ای انتخاب شده از جنس فولاد نرم هستند که خواص مکانیکی این آلیاژ فولادی با انجام آزمایش کشش، به کمک دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ بدست آمده است.

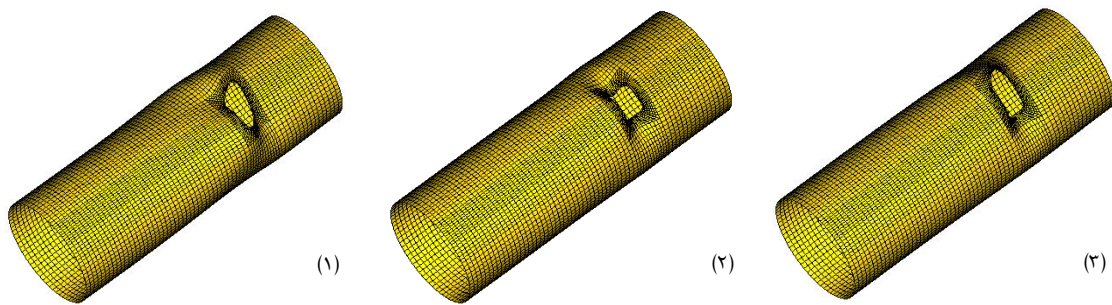
مقدار مدول الاستیسیته، $E=187GPa$ بدست می‌آید. همچنین مقدار نسبت پواسون $\nu=0/3$ در نظر گرفته شده است. منحنی‌های تنش - کرنش در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر کرنش‌های پلاستیک و تنشهای وابسته نیز همان مقادیر ارائه شده در شکل (۲) از مرجع [۹] می‌باشند.

۲-۲- شرایط مرزی

برای اعمال شرایط مرزی روی لبه‌های پوسته استوانه‌ای، از دو صفحه صلب متصل به دو انتهای استوانه استفاده شده است. بار به صورت متمرکز روی مرکز صفحه بالایی اعمال شده که نتیجه آن ایجاد بار محوری گسترده و فشاری روی هر دو لبه استوانه می‌باشد. تمام درجات آزادی صفحه پایینی و نیز تمام درجات آزادی صفحه بالایی بجز حرکت در راستای محور استوانه، مقید شده است.



شکل (۲): منحنی تنش - کرنش



شکل (۴): مدهای کمانش نمونه $L_{0119/7} - L_{083/79} - a7 - b16$ (۱) مد اول (۲) مد دوم (۳) مد سوم

داده شده است. همچنین نمای ایزومتریک و نمای بالای پوسته استوانه‌ای در شکل ارائه شده است که میدانهای تنش ون میزز و کرنش پلاستیک معادل در موقعیت‌های مشخص شده روی نمودار، را نشان می‌دهند. توجه کنید که منحنی‌های بار - فشردگی انتهایی که در این قسمت ارائه شده‌اند، مربوط به تحلیل با المان خطی (S4R) است، زیرا همانطور که در بخش (۴) ملاحظه خواهد شد، المانهای خطی در مقایسه با سایر المانها، برای ماده مورد مطالعه، ناحیه پس کمانش بهتری را نتیجه می‌دهند.

همانطور که از شکل (۵) پیداست، قبل از اینکه نمونه دچار کمانش شود (قسمت خطی منحنی شکل (۵))، نواحی اطراف گشودگی در جهت جانبی تسلیم شده و لبه‌های گشودگی دچار خمش موضعی می‌شوند که این پدیده به علت پایین بودن تنش تسلیم ماده رخ می‌دهد. با افزایش بار، وسعت این نواحی پلاستیک شده افزایش می‌یابد. هنگامی که بار به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، پوسته در اطراف گشودگی دچار کمانش موضعی می‌شود. سپس بار اعمال شده به پوسته افت پیدا می‌کند. دیده می‌شود پس از رسیدن بار به مقدار ماکزیمم، تغییر شکلهای قابل توجهی در اطراف ناحیه گشودگی رخ می‌دهد. این بار ماکزیمم به عنوان بار آستانه شروع کمانش پوسته در نظر گرفته می‌شود. همچنین دیده می‌شود پوسته به سمت گشودگی دچار خمش کلی می‌شود. لبه‌های بالا و پایین گشودگی به هم نزدیک می‌شوند و جابجایی‌های شعاعی نزدیک گشودگی در مقایسه با شعاع پوسته خیلی بزرگ می‌شوند. هنگامی که بار تا حد معینی افت پیدا می‌کند، نواحی نزدیک دو انتهای پوسته و در سمت مخالف گشودگی با انحنای قابل توجهی کمانش می‌کنند. این نواحی که به حالت پلاستیک رسیده‌اند با سرعت زیادتری تغییر شکل می‌دهند. گسترش نواحی تسلیم شده در پایان منجر به خمش و فروپاشی سریعتر پوسته می‌شود. باید توجه کرد که کمانش کلی پوسته استوانه‌ای شبیه کمانش ستون اولبری است [۸].

۵-۲- پوسته استوانه‌ای مرجع

برای پوسته‌های ضخیم ساخته شده از ماده‌ای با مدول الاستیسیته و تنش تسلیم پایین، معادله کلاسیک (۱) نتیجه قابل قبولی نمی‌دهد، زیرا پوسته قبل از رسیدن به بار کمانش، تسلیم می‌شود. این گفته از نتایج بدست آمده آشکار می‌شود. در این تحقیق بار کمانش مرجع برای پوسته‌های مورد نظر به صورت رابطه (۲) تعریف شده است:

$$N_{ref} = \sigma_Y t = 205 \text{ N/mm}^2 \times 1.2 \text{ mm} = 246 \text{ N/mm} \quad (2)$$

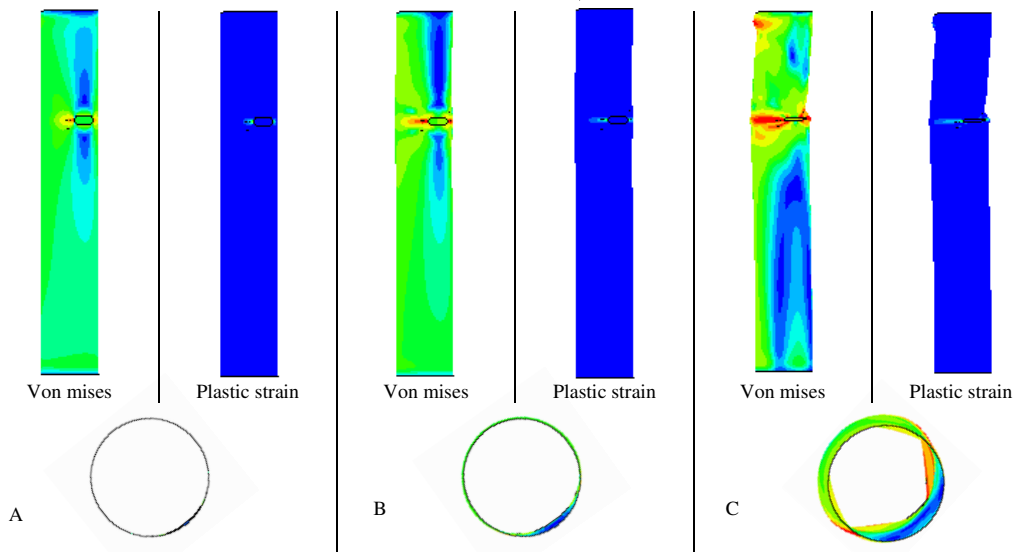
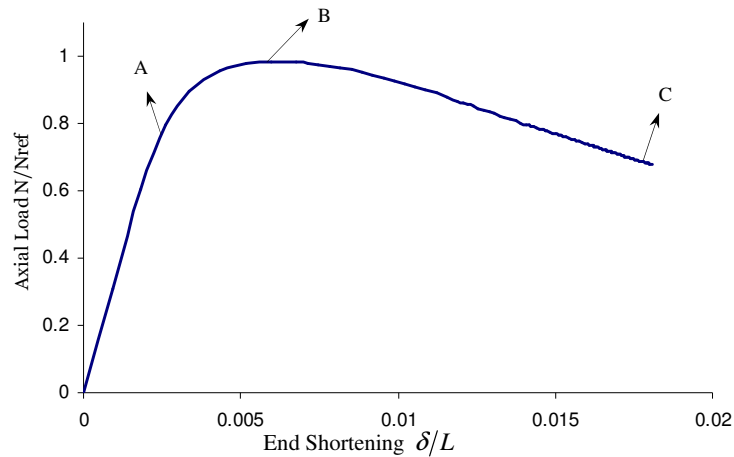
که N_{ref} مقدار بار لازم برای تسلیم پوسته استوانه‌ای بر واحد محیط مقطع استوانه، σ_Y مقاومت تسلیم ماده و t ضخامت پوسته است. در نتایج ارائه شده، تمام بارهای کمانش با این بار مرجع بی‌بعد شده‌اند. همچنین مقدار تغییر شکل فشاری پوسته با طول پوسته استوانه‌ای بی‌بعد شده است. باید توجه شود که پوسته استوانه‌ای نسبت به صفحه میانی متقارن است، بنابراین قرار گرفتن گشودگی در بالا یا پایین صفحه میانی با فاصله یکسان از آن نتایج مشابهی بدست می‌دهد. در این تحقیق گشودگی‌ها در نمونه‌های تحلیل شده از صفحه میانی به سمت بالا قرار گرفته‌اند.

۳- نتایج تحلیل به روش عددی اجزای محدود

در این بخش نتایج روش عددی برای پوسته‌های استوانه‌ای ارائه شده است. برای دقت بیشتر نتایج، غیر خطی بودن خواص ماده و المان، هر دو در نظر گرفته شده است. جزئیات و نتایج تحلیل نمونه‌ها در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

۳-۱- منحنی بار-تغییر شکل و توزیع تنش اطراف گشودگی

یک نمونه از منحنی‌های بار بر حسب تغییر طول استوانه برای نمونه $L_{273} - L_{0191} - a7 - b16$ در شکل (۵) نشان



شکل (۵): منحنی بار - فشردگی انتهایی، کانتورهای تنش ون میزز، کانتورهای کرنش پلاستیک معادل، برای نمونه‌ی

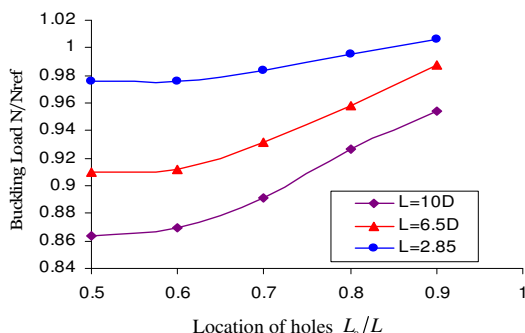
L۲۷۳ - L۰۱۹۱ - a۷ - b۱۶

فشردگی انتهایی برای تعدادی از نمونه‌های جدول (۱) در شکل (۷) نشان داده شده است. دیده می‌شود با ایجاد گشودگی در پوسته، بار کمانش پوسته افت چشم گیری پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که پوسته‌های بلندتر، نسبت به ایجاد گشودگی حساسترند. بعنوان مثال، با ایجاد یک گشودگی به ابعاد ۱۶×۷

۲-۳- تاثیر تغییر موقعیت گشودگی بر رفتار کمانش

پوسته‌های استوانه‌ای

نتایج تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی شبه بیضوی یکسان در موقعیت‌های مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر موقعیت گشودگی بر بار کمانش تاثیر می‌گذارد. شکل (۶) به روشنی نشان می‌دهد که با تغییر موقعیت گشودگی از میانه پوسته به طرف لبه‌های پوسته، بار کمانش افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که پوسته‌های با طول بلندتر، نسبت به تغییر موقعیت گشودگی حساسترند. به عنوان مثال برای پوسته‌های با نسبت، $L/D = ۱۰$ با تغییر موقعیت گشودگی، از میانه پوسته به فاصله ۹۰ درصدی طول پوسته، بار کمانش نزدیک به ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که برای پوسته‌های با نسبت، $L/D = ۲/۸۵$ این افزایش در بار کمانش کمتر از ۴ درصد است. همچنین آشکار است که پوسته‌های بلندتر، بار کمانش کمتری دارند. منحنی‌های بار -



شکل (۶): منحنی بار - موقعیت گشودگی، برای پوسته‌های استوانه‌ای با طولهای مختلف

میلیمتر در میانه پوسته، بار کماتش برای پوسته های بلند ($L/D=10$)، متوسط ($L/D=6/5$) و کوتاه ($L/D=2/85$)، به ترتیب نزدیک به ۲۶ درصد، ۲۳ درصد و ۱۵ درصد کاهش می یابد. دیده می شود که تمام منحنی های شکل (۷) بعد از رسیدن به بار ماکزیمم و در ناحیه پس کماتش یک نقطه تلاقی دارند. قبل از نقطه تلاقی، منحنی های مربوط به پوسته های با نسبت L_0/L بزرگتر، بالاتر از سایر منحنی ها قرار دارند، اما بعد از نقطه تلاقی این منحنی ها پایین تر از منحنی های با نسبت L_0/L کوچکتر قرار می گیرند. دلیل این پدیده را می توان ایجاد تغییر شکلهای و نواحی پلاستیک شده بزرگتر در اطراف گشودگی در اثر اعمال بار بیشتر بر پوسته های با نسبت L_0/L بزرگتر دانست. توجه کنید که شیب تمامی منحنی ها قبل از کماتش (ناحیه خطی) بدون توجه به موقعیت گشودگی، یکسان است.

۴- تایید نتایج عددی به کمک نتایج تجربی

آزمایشات تجربی، به منظور تایید درستی نتایج بدست آمده از روش عددی، روی چندین نمونه با گشودگی شبه بیضوی دلخواه، انجام شد. برای انجام آزمایشات از یک دستگاه پیشرفته سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ استفاده شد. از دو

استوانه شیاردار از جنس فولاد ابزار برای مقید کردن نمونه ها استفاده شد. نتایج بدست آمده در جدول (۲) ارائه شده است. منحنی های بار - جابجایی حاصل از روش عددی و تجربی برای دو نمونه در شکل های (۸b) و (۹) مقایسه شده اند. با مقایسه نتایج عددی و تجربی دیده می شود که بار کماتش با مقایسه نتایج عددی از المانهای غیر خطی S8R، با مقدار تجربی مربوطه، برابری بسیار زیادی دارد و مقدار خطای حاصل شده برای اکثر نمونه ها کمتر از ۱ درصد است. همچنین ملاحظه می شود که المانهای خطی S4R، بار کماتش را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کنند. با این وجود خطای حاصل از تحلیل انجام شده با این المانها، برای اکثر نمونه ها کمتر از ۴ درصد است. نتایج عددی ارائه شده در شکل (۸a) تاثیر انواع گشودگی ها را روی بار کماتش پوسته های استوانه ای نشان می دهد.

مقایسه منحنی های شکل (۸b) می رساند که المانهای خطی نسبت به المانهای غیر خطی، رفتار پس کماتش پوسته های استوانه ای با گشودگی شبه بیضوی، ساخته شده از آلیاژ فولادی مشابه، را دقیقتر پیش بینی می کنند. این تفاوت ناشی از تفاوت در تابع شکل، فرمول بندی و خواص المانها است.

جدول (۱): نتایج تحلیل اجزای محدود پوسته های استوانه ای با گشودگی شبه بیضوی

تاثیر موقعیت گشودگی روی بار کماتش پوسته های استوانه ای با طولهای مختلف

بار کماتش بی بعد (N/N_{ref})		موقعیت گشودگی (L_0/L)	ابعاد گشودگی $a \times b$ ($mm \times mm$)	طول استوانه (mm)	عنوان نمونه
المان S8R	المان S4R				
۱/۱۷۲۸	۱/۲۱۸۴	-----	-----	۴۲۰	L۴۲۰ - Perfect
۰/۸۶۳۷	۰/۹۱۷۴	-/۵	۷×۱۶	۴۲۰	L۴۲۰ - L ₀ ۲۱۰ - a۷ - b۱۶
۰/۸۶۹۶	۰/۹۲۴۸	-/۶	۷×۱۶	۴۲۰	L۴۲۰ - L ₀ ۲۵۲ - a۷ - b۱۶
۰/۸۹۱۰	۰/۹۴۶۸	-/۷	۷×۱۶	۴۲۰	L۴۲۰ - L ₀ ۲۹۴ - a۷ - b۱۶
۰/۹۲۷۰	۰/۹۸۲۰	-/۸	۷×۱۶	۴۲۰	L۴۲۰ - L ₀ ۳۳۶ - a۷ - b۱۶
۰/۹۵۴۲	۱/۰۰۵۵	-/۹	۷×۱۶	۴۲۰	L۴۲۰ - L ₀ ۳۷۸ - a۷ - b۱۶
۱/۱۷۷۲	۱/۲۲۹۰	-----	-----	۲۷۳	L۲۷۳ - Perfect
۰/۹۰۹۵	۰/۹۶۰۲	-/۵	۷×۱۶	۲۷۳	L۲۷۳ - L ₀ ۱۲۶/۵ - a۷ - b۱۶
۰/۹۱۱۸	۰/۹۶۶۸	-/۶	۷×۱۶	۲۷۳	L۲۷۳ - L ₀ ۱۶۳/۸ - a۷ - b۱۶
۰/۹۳۱۷	۰/۹۸۳۳	-/۷	۷×۱۶	۲۷۳	L۲۷۳ - L ₀ ۱۹۱ - a۷ - b۱۶
۰/۹۵۸۲	۱/۰۱۰۹	-/۸	۷×۱۶	۲۷۳	L۲۷۳ - L ₀ ۲۱۸/۴ - a۷ - b۱۶
۰/۹۸۷۶	۱/۰۳۶۶	-/۹	۷×۱۶	۲۷۳	L۲۷۳ - L ₀ ۲۴۵/۷ - a۷ - b۱۶
۱/۱۷۰۲	۱/۲۰۳۷	-----	-----	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - Perfect
۰/۹۷۵۴	۱/۰۲۵۴	-/۵	۷×۱۶	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - L ₀ ۵۹/۸۵ - a۷ - b۱۶
۰/۹۷۵۵	۱/۰۲۶۵	-/۶	۷×۱۶	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - L ₀ ۷۱/۸۲ - a۷ - b۱۶
۰/۹۸۳۶	۱/۰۳۳۰	-/۷	۷×۱۶	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - L ₀ ۸۳/۷۹ - a۷ - b۱۶
۰/۹۹۵۶	۱/۰۴۲۴	-/۸	۷×۱۶	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - L ₀ ۹۵/۷۶ - a۷ - b۱۶
۱/۰۰۶۲	۱/۰۵۶۳	-/۹	۷×۱۶	۱۱۹/۷	L۱۱۹/۷ - L ₀ ۱۰۷/۷ - a۷ - b۱۶

جدول (۲): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی برای پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی شبه بیضوی

عنوان نمونه	طول استوانه (mm)	ابعاد گشودگی $a \times b$ (mm × mm)	موقعیت گشودگی (L_o/L)	بار کمانش بی بعد (N/N_{ref})	
				المان S4R	المان S8R
L۴۲۰ - Perfect	۴۲۰	-----	-----	۱/۲۱۸۴	۱/۱۷۲۷
L۴۲۰ - L _o ۲۱۰ - a۹ - b۱۵	۴۲۰	۹×۱۵	۰/۵	۰/۹۲۸۴	۰/۸۸۳۴
L۴۲۰ - L _o ۲۱۰ - a۱۵/۵ - b۷/۵	۴۲۰	۱۵/۵×۷/۵	۰/۵	۰/۹۹۱۹	۰/۹۵۲۹
L۴۲۰ - L _o ۲۱۰ - a۱۵ - b۸	۴۲۰	۱۵×۸	۰/۷۴	۱/۰۱۳۴	۰/۹۸۵۷
L۴۲۰ - L _o ۲۱۰ - a۷/۵ - b۱۵/۵	۴۲۰	۷/۵×۱۵/۵	۰/۷۴	۰/۹۷۰۰	۰/۹۲۹۰
L۴۲۰ - L _o ۳۷۰ - a۱۵ - b۹/۵	۴۲۰	۱۵×۹/۵	۰/۸۸	۱/۰۳۲۰	۰/۹۹۸۲
L۲۷۳ - Perfect	۲۷۳	-----	-----	۱/۲۲۹۰	۱/۱۷۷۳
L۲۷۳ - L _o ۲۰۲ - a۱۲ - b۱۱	۲۷۳	۱۲×۱۱	۰/۷۴	۱/۰۳۷۳	۰/۹۹۹۱
L۱۱۹/۷ - L _o ۵۹/۸۵ - a۱۵ - b۸/۵	۱۱۹/۷	۱۵×۸/۵	۰/۵	۱/۰۶۲۹	۱/۰۳۰۶
L۱۱۹/۷ - L _o ۵۹/۸۵ - a۷/۵ - b۱۵/۵	۱۱۹/۷	۷/۵×۱۵/۵	۰/۵	۱/۰۳۶۹	۰/۹۸۷۲

گشودگی شبه بیضوی است. با استفاده از روش چند جمله‌ای-های لاگرانژ [۱۱]، K_{cutout} به صورت رابطه (۴) بدست آمد:

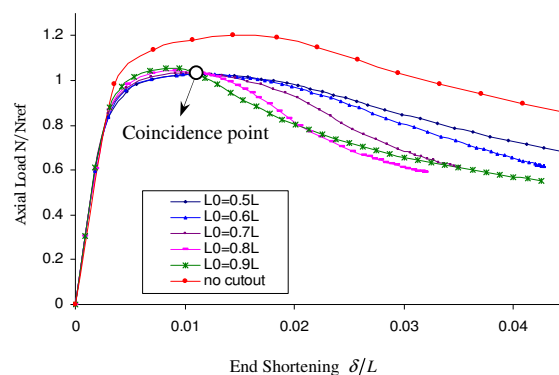
$$K_{cutout} = -9.902\lambda^4 + 26.533\lambda^3 + 0.899\gamma - 26.258\lambda^2 + 11.310\lambda - 0.438\gamma^2\lambda^4 + 1.194\gamma^2\lambda^3 - 1.205\gamma^2\lambda^2 + 0.531\gamma^2\lambda + 4.574\gamma\lambda^4 - 12.528\gamma\lambda^3 + 12.761\gamma\lambda^2 - 5.674\gamma\lambda - 0.884 - 0.085\gamma^2 \quad (۴)$$

رابطه (۴) ضریب تصحیح بار کمانش برای پوسته‌های استوانه‌ای با طولهای متفاوت، دارای گشودگی شبه بیضوی با ابعاد ثابت (۱۶mm × ۷mm)، و درموقعیت‌های متفاوت را ارائه می‌دهد. در این رابطه، $\lambda = L_o/L$ و $\gamma = L/D$ است. این رابطه برای نسبت $D/t=۳۵$ بدست آمده است.

۶- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات عددی و تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی نرم با گشودگی‌های شبه بیضوی، و نسبت‌های L/D متفاوت، رفتار کمانش این پوسته‌ها بررسی شد.

نتایج نشان می‌دهد که حضور گشودگی ظرفیت تحمل بار پوسته‌های استوانه‌ای را کاهش می‌دهد. با تغییر موقعیت گشودگی از میانه پوسته به طرف لبه‌های پوسته بار کمانش افزایش می‌یابد و پوسته‌های با طول بلندتر نسبت به تغییر موقعیت گشودگی حساسترند. همچنین برای گشودگی‌های با مساحت یکسان، گشودگی شبه بیضوی بیشترین تاثیر را در کاهش مقاومت پوسته در برابر کمانش دارد. در پایان فرمولی برای محاسبه بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی شبه بیضوی در ابعاد (۱۶mm × ۷mm)، در موقعیت‌های مختلف



شکل (۷): منحنی‌های بار در مقابل کوتاه شدن پوسته، برای پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه ($L/D=۲/۸۵$) با گشودگی شبه بیضوی در موقعیت‌های متفاوت و بدون گشودگی.

۵- ضریب تصحیح برای بار کمانش پوسته‌های

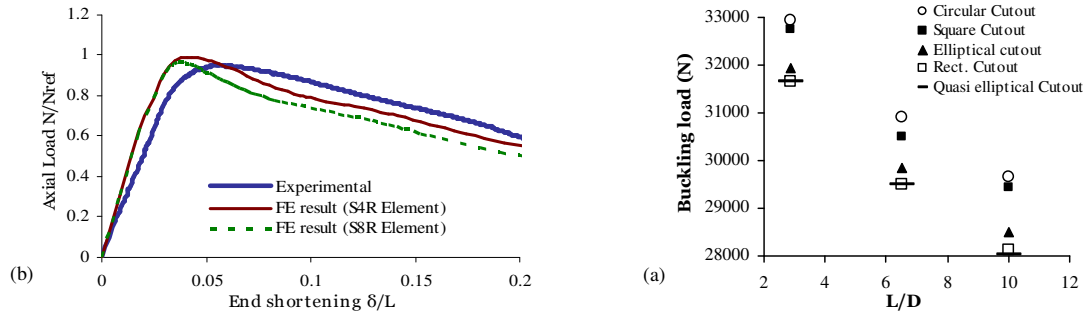
استوانه‌ای با گشودگی شبه بیضوی

در این قسمت با استفاده از نتایج تحلیل عددی با المانهای غیر خطی که در جدول (۱) آمده، رابطه‌ای برای تصحیح بار کمانش پوسته‌های بدون گشودگی ارائه شده است، تا بتوان بار کمانش پوسته‌های دارای گشودگی شبه بیضوی با هندسه و ماده مشابه را پیش بینی کرد. می‌توان ضریب K_{cutout} را به صورت رابطه (۳) تعریف کرد:

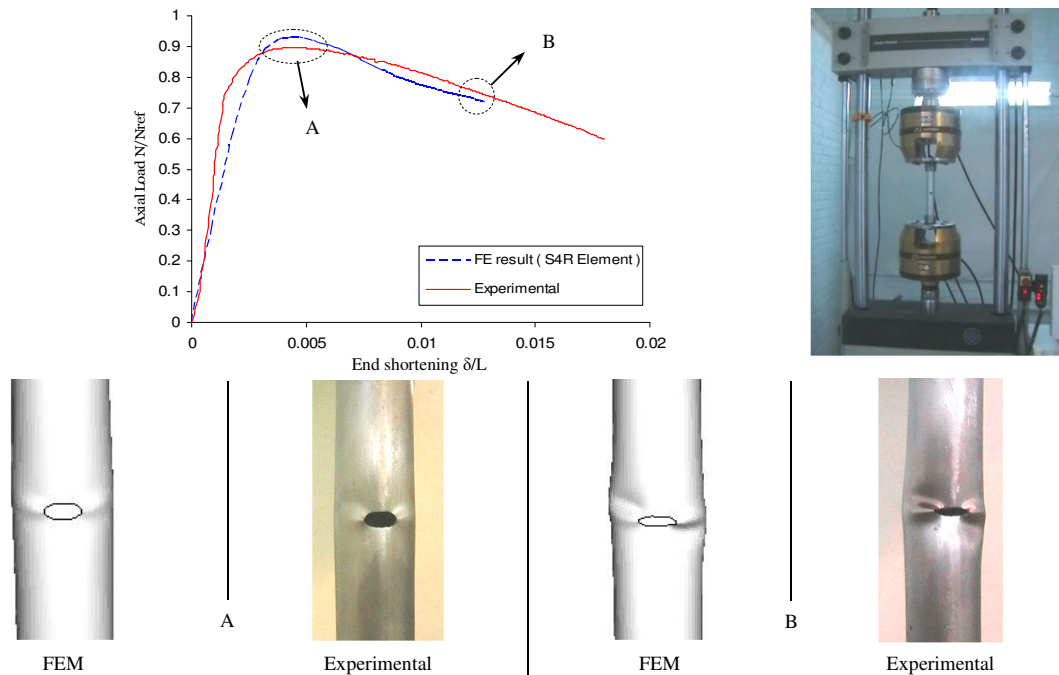
$$K_{cutout} = \frac{N_{cutout}}{N_{perfect}} \quad (۳)$$

$N_{perfect}$ ، بار کمانش بر واحد محیط مقطع برای پوسته‌های بدون گشودگی، N_{cutout} و K_{cutout} ، به ترتیب بار کمانش بر واحد محیط مقطع و ضریب تصحیح برای پوسته‌های دارای

بر حسب بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، با استفاده از چند جمله‌ای‌های لاگرانژ، بدست آمد.



شکل (۸): a- بار کمانش انواع گشودگی‌ها در میانه پوسته، b- منحنی‌های عددی و تجربی برای نمونه L420-L0210-a15/5-b7/5



شکل (۹): مقایسه نتایج عددی و تجربی برای نمونه L420-L0210-a9-b15

۷- مراجع

- Tafreshi, A.; "Buckling and post buckling analysis of composite cylindrical shells with cutout subjected to internal pressure and axial compression load" Int. J. Pressure Vessel Piping, Vol. 79, p.p. 351-9, 2002. [۷]
- Han, H.; 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 Structure, Vol. 44, p.p. 254-270, 2006. [۸]
- Shariati, M.; Mahdizadeh R., M.; "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression" Thin Walled Structure, Vol. 46, p.p. 1251- 1261, 2008. [۹]
- ABAQUS 6.4 PR11 user's manual. [۱۰]
- Gerald, C. F.; Wheatley, P. O.; Applied Numerical Analysis, Addison Wesley, 1999. [۱۱]
- Arbocz, J.; Hol JMAM; "Collapse of axially compressed cylindrical shells with random imperfections", AIAA J., Vol. 29, p.p. 2247-56, 1991. [۱]
- Jullien, JF.; Limam, A.; "Effect of openings on the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression" Thin Walled Structure, Vol. 31, p.p. 187-202, 1998. [۲]
- Timoshenko, SP.; Gere, JM.; Theory of elastic stability, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1961. [۳]
- Ugural, AC.; Stresses in plates and shells, McGraw-Hill, 1981. [۴]
- Yeh, MK.; Lin, MC.; Wu, WT.; "Bending buckling of an elastoplastic cylindrical shell with a cutout" Eng. Structure, Vol. 21, p.p. 996-1005, 1999. [۵]
- Hilburger, MW.; Vicki, OB.; Michael, PN.; "Buckling behavior of compression-loaded quasi-isotropic curved panels with a circular cutout" Int. J. Solids Structure, Vol. 38, p.p. 1495-522, 2001. [۶]