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

محمود شريعتى^{ن*}؛ مسعود مهدى زاده رخىⁱⁱ

چکیدہ

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.

كلمات كليدى: كمانش، پوسته هاى استوانهاى، كشودكى شبه بيضوى، روش اجزاى محدود، روش تجربى.

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.

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

/ امیرکبیر/ مهندسی مکانیک / سال چهل و دو / شماره ۱ / تابستان ۱۳۸۹

تاریخ دریافت مقاله://۵/۷

تاريخ اصلاحات مقاله: ١٣٨٧/١٠/٢١

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

۱– مقدمه

پوستههای استوانهای اغلب در سازههای مهندسی مانند هواپیما، موشکها، مخازن، خطوط لوله، اتومبیلها و بعضی از سازههای زیردریایی به کار می روند. 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 نا پیوستگیهایی مانند گشودگیها دارند که این ناپیوستگیها می توانند 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 كمانش در محدوده الاستيك خطى متمركز شده بودند، اما به سىرعت دريافتند كه بار كمانش بدست آمده، از يافتههاى تجربی بیشتر است. تحقیقات تجربی [۱] و [۲] ثابت کرد که ظرفیت کمانش پوسته های استوانه ای 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]:

$$N_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - v^2)}} (\frac{t^2}{R})$$
(1)

که در آن E مدول یانگ، ۷ نسبت پواسون، t ضخامت پوسته و R شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله جواب مناسبی برای پوسته های نازک بدون گشودگی با نسبت ۵≥L/R میدهد [۴]. این معادله برای پوسته های با ضخامت متوسط (۵۰ > R/t) 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 پوسته هایی 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 یه [۵] و همکارانش تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی روی خمش و کمانش پوستههای استوانهای با ضخامت متوسط دارای گشودگی انجام دادند. هیلبورگر [۶] و همکارانش رفتار کمانش پوستههای استوانهای کامپوزیتی نازک با گشودگی مربعی شکل را بررسی کردند. در این تحقیق، نرم افزار اجزای محدود

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 [٨] 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. شریعتی و مهدی زاده [۹] به طور مشابه تاثیر گشودگیهای بیضوی شکل را روی بار کمانش پوسته های استوانه ای با ابعاد مختلف، مطالعه کردند.

با توجه به اینکه تا کنون گشودگیهای شبه بیضوی 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 بیضوی روی رفتار کمانش و پس کمانش پوستههای استوانهای با نسبتهای ۵٬۰۱۹ ،۸۸۵ = L/D و ۳۵ = D/t 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 *ر*وش 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= ۴۲mm و طولهای ۴۲۰ ۳۲۰، ۲۷۳، ۲۷۳ هستند. ضخامت پوستهها ۲/۲mm میباشد. گشودگیهای ایجاد شده به صورت شبه بیضوی هستند. بعد a در جهت محور استوانه و بعد d عمود بر محور استوانه در نظر گرفته

شده است. فاصله بین مرکز گشودگی تا لبه پایینی استوانه، L₀ در نظر گرفته شده است.

نام گذاری نمونهها به عنوان مثال، به صورت L نام گذاری نمونهها به عنوان مثال، به صورت $L420-L_0110-a5-b15$ طول نمونه، عدد بعد از L_0 بیانگر فاصله مرکز گشودگی تا لبه پایینی نمونه و اعداد بعد از a و d 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=۱۸۷GPa بدست می آید. همچنین مقدار نسبت پواسون ۳/۳=۷ در نظر گرفته شده است. منحنیهای تنش – کرنش در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر کرنش های پلاستیک و تنشهای وابسته نیز همان مقادیر ارائه شده در شکل (۲) از مرجع [۹] می باشند.

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.



۲–۳– المان بندی نمونهها

برای المان بندی نمونه ها 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 می شود.



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

۲-٤- فرايند تحليل

تحلیلهای اجزای محدود خطی، بخصوص برای پوستههای ضخیم، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی میکند. 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 کمانش در این شکل مدها اتفاق میافتد. جابجاییهای مربوط به این شکل مدها در فایلی ذخیره می-شوند و در تحلیل بعدی (استاتیک-ریکس) به عنوان نقص اولیه مورد استفاده قرار میگیرند تا تاثیر شکل مدها در تحلیل اختیاری مد کمانش را انتخاب میکند که این معمولا 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 قیدهای 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 ۵۱۶ – ۵۷ – ۹۵ – ۱۰۹۸۷ نشان داده شده است.

بعد از انجام تحلیل باکل یک تحلیل غیر خطی انجام می شود تا منحنی بار – جابجایی بدست آید. مقدار ماکزیمم این منحنی بار کمانش است. این مرحله استاتیک–ریکس نام دارد و از روش طول–کمان برای تحلیل پس کمانش استفاده می کند.

> امیر کبیر / مهندسی مکانیک / سال چهل و دو / شماره ۱ / تابستان ۱۳۸۹ www.SID.ir



شکل (۴): مدهای کمانش نمونه ۵۱۶ – ۵۷ – L،۸۳/۷۹ – L،۸۳/۷۹ (۱) مد اول (۲) مد دوم (۳) مد سوم

۲–۵– 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:

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

که N_{ref} مقدار بار لازم برای تسلیم پوسته استوانهای بر واحد محیط مقطع استوانه، $\sigma_{\rm Y}$ مقاومت تسلیم ماده و t ضخامت پوسته است. در نتایج ارائه شده، تمام بارهای کمانش با این بار مرجع بی بعد شدهاند. همچنین مقدار تغییر شکل فشاری پوسته با طول پوسته استوانهای بی بعد 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 می دهد. دراین 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 b۱۶ – ۵۷ – L۲۷۳ – L۲۷۳ در شکل (۵) نشان

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 كمانش شود (قسمت خطی منحنی شكل (۵))، نواحی اطراف گشودگی در جهت جانبی تسلیم شده و لبههای گشودگی دچار خمش موضعی میشوند که این پدیده به علت پایین بودن تنش تسليم ماده رخ مىدهد. با افزايش بار، وسعت اين نواحى 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 می-کند. دیده می شود 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 می شود. همچنین دیده می شود 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 می شوند. 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 یوسته استوانهای شبیه کمانش ستون اویلری است [۸].



شکل (۵): منحنی بار – فشردگی انتهایی، کانتورهای تنش ون میزز، کانتورهای کرنش پلاستیک معادل، برای نمونهی L ۲۷۳ – L₀۱۹۱ – aV – b۱۶.

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 می گذارد. 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، ۱۰= L/D با تغییر موقعیت گشودگی، از میانه پوسته به فاصله ۹۰ درصدی طول پوسته، بار کمانش نزدیک به ۱۰ درصد افزایش مییابد، در جالی که برای پوستههای با نسبت، ۲/۸۵ = L/D این افزایش در پوستههای با نمبت، ۵۸٪ این این افزایش در

امیرکبیر / مهندسی مکانیک / سال چهل و دو / شماره ۱ / تابستان ۱۳۸۹ www.SID.ir

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



میلیمتر در میانه پوسته، بار کمانش برای پوسته های بلند (L/D=۲/A)، متوسط (L/D=۶/A) و کوتاه (L/D=۲/A)، به ترتیب نزدیک به ۲۶ درصد، ۲۳ درصد و ۱۵ درصد کاهش مییابد. دیده میشود که تمام منحنیهای شکل (۲) بعد از رسیدن به بار ماکزیمم و در ناحیه پس کمانش یک نقطه تلاقی دارند. قبل از نقطه تلاقی، منحنیهای مربوط به پوستههای با نسبت L $_0$ /L بزرگتر، بالاتر از سایر منحنیها قرار دارند، اما بعد از نقطه تلاقی این منحنیها پایین تر از منحنیهای با نسبت L $_0$ /L بند. کوچکتر قرار میگیرند. دلیل این پدیده را میتوان ایجاد تغییر شکلها و نواحی پلاستیک شده بزرگتر در اطراف گشودگی در اثر اعمال بار بیشتر بر پوستههای با نسبت L $_0$ /L بزرگتر دانست. توجه کنید که شیب تمامی منحنیها قبل از کمانش (ناحیه خطی) بدون توجه به موقعیت گشودگی، یکسان است.

٤– 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

Archive of SID

استوانه شیاردار از جنس فولاد ابزار برای مقید کردن نمونهها استفاده شد. نتایج بدست آمده در جدول (۲) ارائه شده است. منحنیهای بار – جابجایی حاصل از روش عددی و تجربی برای دو نمونه در شکلهای (۸) و (۹) مقایسه شدهاند.

با مقایسه نتایج عددی و تجربی دیده می شود که بار کمانش بدست آمده از المانهای غیر خطی S8R، با مقدار تجربی مربوطه، برابری بسیار زیادی دارد و مقدار خطای حاصل شده برای اکثر نمونهها کمتر از ۱درصد است. همچنین ملاحظه می شود که المانهای خطی S4R، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی میکنند. با این وجود خطای حاصل از تحلیل انجام شده با این المانها، برای اکثر نمونهها کمتر از ۴ درصد است. نتایج عددی ارائه شده در شکل (۸۵) تاثیر انواع گشودگیها را روی بار کمانش پوستههای استوانهای نشان می دهد.

مقایسه منحنیهای شکل (۸۵) میرساند که المانهای خطی نسبت به المانهای غیر خطی، رفتار پس کمانش پوستههای استوانهای با گشودگی شبه بیضوی، ساخته شده از آلیاژ فولادی مشابه، را دقیقتر پیشبینی میکنند. این تفاوت ناشی از تفاوت در تابع شکل، فرمول بندی و خواص المانها است.

		• • • •	••••	• • • • • • •	
بار کمان <i>ش</i> بی ب ع د (<i>N</i> / <i>N_{ref})</i>		موقعیت گشودگی	ابعاد گشودگی a×b	طول استوانه	عنوان نمونه
المان S8R	المان S4R	(L_o/L)	$(mm \times mm)$	(mm)	
١/١٧٢٨	1/71/4			47.	Ltr. – Perfect
۰/۸۶۳V	·/٩١٧۴	۰/۵	٧×١۶	47.	L f f $\cdot - L_o$ f $\cdot - a$ f $- b$ is
۰/ ۸۶۹۶	·/974A	۰/۶	٧ _× ١۶	47.	L f y $\cdot - L_o$ y a y $- a$ y $- b$ y s
٠/٨٩١٠	·/945A	• /V	٧ _× ١۶	47.	L f f $\cdot - L_o$ f 9 f $- aV - b$ 18
·/97V·	·/٩٨٢·	• /A	٧ _× ١۶	47.	L ft · $-L_o$ tt f - aV - b 1 f
•/9047	۱/۰۰۵۵	٠/٩	٧ _× ١۶	47.	L ft $\cdot - L_o$ ty $- a$ $V - b$ \cdot F
1/1005	1/779.			777	LYVY – Perfect
٠/٩٠٩۵	·/9۶·۲	- /۵	٧ _× ١۶	۲۷۳	Length $L_{\rm o}$ in F/D $-$ and $-$ b if
·/٩١١٨	۰/٩ <i>۶۶</i> ٨	• /۶	٧ _× ١۶	۲۷۳	$L \mathrm{Y} \mathrm{Y} \mathrm{Y} - \mathrm{L}_{\mathrm{o}} \mathrm{V} \mathrm{F} \mathrm{Y} / \mathrm{A} - \mathrm{a} \mathrm{V} - \mathrm{b} \mathrm{V} \mathrm{F}$
·/9٣١٧	•/٩٨٣٣	• /V	٧ _× ١۶	۲۷۳	L YVY $- L_o$ 191 $- a$ V $- b$ 18
·/90/7	١/٠١٠٩	• /٨	٧ _× ١۶	۲۷۳	$L Y Y Y - L_{o} Y I A / F - a Y - b I F$
۰/٩٨٧۶	1/0888	٠/٩	٧ _× ١۶	۲۷۳	$L{\bf Y}{\bf V}{\bf Y}-L_{\rm o}{\bf Y}{\bf f}{\bf d}/{\bf V}-{\bf a}{\bf V}-{\bf b}{\bf 1}{\bf F}$
1/18.2	۱/۲ · ۳۷			119/V	LINA/V – Perfect
·/9VD4	1/.704	۰/۵	٧ _× ١۶	119/V	L i i 1/V - L_o 21/AD - aV - b 1/2
۰/۹۷۵۵	۱/۰ ۲۶۵	• /۶	٧ _× ١۶	119/V	L))) / V - L_0 V) / A Y - aV - b) β
۰/۹ ۸۳۶	1/	• /V	٧ _× ١۶	119/V	L))) / V - L_o^{Λ}) / V 9 - aV - b) r
·/٩٩۵۶	1/• 474	• /A	٧ _× ١۶	119/V	L 1 19/V - L_o 9 Δ /V \hat{r} - aV - b 1 \hat{r}
۱/۰۰۶۲	1/088	•/٩	٧ _× ١۶	119/V	L))) $V - L_o$) · $V/V - aV - b$) r

جدول (۱): نتایج تحلیل اجزای محدود پوستههای استوانهای با گشودگی شبه بیضوی تاثیر موقعیت گشودگی روی بار کمانش پوستههای استوانهای با طولهای مختلف

	بار کمانش ہی بعد (N/N _{ref})			موقعیت گش <i>نودگی</i>	ابعاد گشودگی a×b	طول استوانه	عنوان نمونه
	آزمایش	المانS8R	المانS4R	$\left(L_{o}/L\right)$	$(mm \times mm)$	(<i>mm</i>)	
_	۱/• VV	1/1777	١/٢١٨۴			47.	L47. – Perfect
	•/٨٩۶۵	۰/۸۸۳۴	•/٩٢٨۴	۰/۵	٩×١٥	47.	L f t $\cdot - L_o$ t $\cdot - a$ 4 $- b$ 1 \circ
	•/9579	•/9849	•/٩٩١٩	۰/۵	$\Delta \Delta = 1000000000000000000000000000000000$	47.	$L\texttt{ft}-L_{o}\texttt{ti}-a\texttt{id/d}-b\texttt{V/d}$
	۰/۹۸۵V	۰/۹۸۵۲	1/.184	۰/۷۴	۱۵ _× ۸	47.	Let $\cdot - L_0$ $\cdot \cdot - a$ $\cdot a - b$
	·/٩٢٩·	·/٩١٨٢	·/٩V··	۰/۷۴	$V/\Delta_{X} \Delta/\Delta$	47.	$L\texttt{ft} - L_{\texttt{o}}\texttt{ti} - \texttt{av/a} - \texttt{bia/a}$
	•/٩٨۵٩	•/٩٩٨٢	1/. 37.	۰/۸۸	۱۵×۹/۵	47.	Lft $\cdot - L_{o}$ t $\cdot - a$ 10- b9/0
	۱/۲۰۸۵	1/17/7	1/229.			۲۷۳	LYVY – Perfect
	1/0747	•/٩٩٩١	1/0377	۰/۷۴	11×11	۲۷۳	L tvy $-L_{o}$ t·t $-a$ it $-b$ ii
	١/٠٣٣٠	۱/۰۳۰۶	1/•۶۲۹	۰/۵	$\Delta_X A/\Delta$	\) ٩/٧	$L \inf {\rm ing} - L_0 {\rm dg} {\rm dg} - {\rm dg} - {\rm dg} - {\rm dg} {\rm dg}$
	1/0400	 /٩٨٧٢ 	1/0889	- /۵	V/a×1a/a	\\ \/V	L119/V – $L_o \Delta 9/A \Delta - a V/\Delta - b 1 \Delta/\Delta$

Archive of SID جدول (۲): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی برای پوستههای استوانهای با کشودگی شبه بیضوی



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 با*ر* 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:

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

N_{perfect} ، بار کمانش بر واحد محیط مقطع بـرای پوسـتههـای بدون گشودگی، N_{cutout} و K_{cutout} ، به ترتیب بـار کمـانش بـر واحد محیط مقطع و ضریب تصحیح برای پوستههای دارای

گشودگی شبه بیضوی است. با استفاده از روش چند جملـهای-های لاگرانژ [۱۱]، K_{cutout} به صورت رابطه (۴) بدست آمد: K_{cutout} = -9.902λ⁴ +26.533λ³ +0.899γ-26.258λ²

+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 $-0.085\gamma^{2}$

رابطه (۴) ضریب تصحیح بار کمانش برای پوستههای استوانه-ای با طولهای متفاوت، دارای گشودگی شبه بیضوی با ابعاد ثابت (۷mm × ۱۶mm)، و درموقعیتهای متفاوت را ارائه می-دهد. در این رابطه، $\gamma = L/D$ و $\lambda = L_o/L$ 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 (Vmm × ۱۶mس)، در موقعیتهای مختلف Archive of SID

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



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



[V]

- 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.
- 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. $[\Lambda]$
- 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.

Gerald, C. F.; Wheatley, P. O.; Applied Numerical [11] Analysis, Addison Wesley, 1999.

- Arbocz, J.; Hol JMAM; "Collapse of axially [v] compressed cylindrical shells with random imperfections", AIAA J., Vol. 29, p.p. 2247–56, 1991.
- 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.
- Timoshenko, SP.; Gere, JM.; Theory of elastic stability, [7] 2nd Edition, McGraw-Hill, 1961.
- Ugural, AC.; Stresses in plates and shells, McGraw- [¥] Hill, 1981.
- 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.
- 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.

γ– مراجع