

مطالعه پارامتری استحکام پلاستیک پوسته های استوانه ای باگشودگی تحت بار محوری و ممان خمشی

غلامحسین رحیمی^۱ و اسماعیل پورسعیدی^۲

در این مقاله استحکام پلاستیک پوسته های استوانه ای با انواع گشودگیها تحت بارهای محوری فشاری ، خمشی و ترکیبی از آنها مورد بررسی قرار می گیرد. تحقیق حاضر ، ادامه بررسی هایی است که در زمینه کمانش الاستیک اینگونه پوسته ها صورت گرفته است . از روش المانهای محدود با بکارگیری نرم افزارهای PATRAN و ABAQUS جهت تجزیه و تحلیل استفاده شده است. جهت اطمینان از دقت مدل ارائه شده، پوسته استوانه ای کامل تحت بارگذاریهای مختلف قرار گرفته و توافق خوبی را با نتایج روابط تحلیلی نشان می دهند.

پارامترهای مختلف از قبیل شکل، تعداد و اندازه گشودگی و همچنین تاثیر فاصله گشودگی از انتهای پوسته و تاثیر تقویت اطراف گشودگی بررسی شده است. علاوه بر این، تاثیر تمام پارامترهای فوق در آنالیز پلاستیک با کمانش الاستیک پوسته متناظر مقایسه گردیده است .

واژه های راهنما : پوسته های استوانه ای ، آنالیز پلاستیک ، گشودگی ، بارگذاری محوری و خمشی

۱- مقدمه

پوسته های استوانه ای عموماً در سازه های مهندسی نظیر هواپیماها ، موشکها ، خطوط لوله و مخازن مورد استفاده قرار می گیرند و در طول کارکرد این سازه ها تحت بارگذاریهای مختلف قرار دارند. در گذشته

۱ - دانشیار بخش مهندسی مکانیک ، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲ - دانشجوی دکتری دانشیار بخش مهندسی مکانیک ، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

بررسیهایی روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری خمشی و محوری در حالت الاستیک صورت گرفته است. Weingarten and Seide [۱] معادله اصلاح یافته دائل و روش گالرکین را برای بدست آوردن تنش کمانش ماکزیمم الاستیک بکار برده و نتیجه گیری کردند که تنش فوق برابر با تنش کمانش یک پوسته استوانه ای الاستیک تحت بارگذاری فشاری محوری می باشد. پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری خمشی و محوری در حالت پلاستیک نیز مورد بررسی قرار گرفته اند. Sherman [۲] کمانش خمشی لوله های مدور با نسبت قطر به ضخامت در دامنه ۱۰۲-۱۸ را مورد آزمایش قرار داد. Reddy [۳] حضور ریبلهای موجی شکل در سمت فشاری لوله های تحت خمش را قبل از اینکه گسیخته شوند مشاهده نمود. Gellin [۴] کمانش خمشی پلاستیک پوسته های استوانه ای با طول نامحدود را مورد بررسی قرار داد. Bushnell [۵] از برنامه کامپیوتری BOSOR5 برای تعیین کمانش خمشی لوله های مستقیم و انحناء دار استفاده نمود. Ju و Kyriakides [۶] ناپایداری پوسته های استوانه ای آلومینیومی تحت بارگذاری خمشی با نسبت قطر به ضخامت در دامنه ۶۰/۵-۱۹ و نسبت طول به قطر در دامنه ۳۰/۱-۱۸/۱ را مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که ریبلهای موجی شکل در قسمت فشاری لوله های تحت خمش قبل از گسیختگی بوجود می آیند. Sobel و Newman [۷]، کمانش پلاستیک پوسته های استوانه ای تحت بار محوری فشاری را با استفاده از برنامه کامپیوتری STAGS و فرمولهای ارائه شده برای کمانش در حالت پلاستیک مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. Mohareb [۸] یک سطح تسلیم برای لوله های تحت بارهای مرکب ارائه نمود که در آن رفتار ماده پلاستیک کامل در نظر گرفته شد و با بیشینه نمودن آنالیز حد پائین و بدست آوردن سطح تسلیم، تحلیل صورت گرفته است. Elchalakani [۹] لوله های مدور با نسبت D/t های متفاوت را تحت بارگذاری ممان خمشی قرار داد و جهت تحلیل آن یک مدل سینماتیکی ارائه نمود که در آن اثر بیضوی شدن در طول لوله در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج تئوری و تجربی، توافق خوبی را نشان دادند.

همچنین اثرات نواقص اولیه در پوسته ها و مسئله مهم اثر شرایط مرزی بار کمانش از موضوعاتی بود که تحقیقات گسترده ای روی آنها انجام گرفته است. یکی از انواع نواقص هندسی اولیه، وجود ترکها و گشودگیها در پوسته های استوانه ای می باشد که مسئله گشودگی موضوع بحث حاضر است. Van Dyke [۱۰] توزیع تنش را حول یک سوراخ برای یک پوسته استوانه ای با گشودگی تحت بارگذاری محوری، پیچشی و فشار داخلی بدست آورد. Tennyson [۱۱] نتایج تجربی بارکمانش پوسته ها با گشودگی دایروی را با نتایج تحلیلی Van Dyke مقایسه نمود و از جمله مقالاتی است که آزمایشات عملی روی استوانه های با گشودگی انجام داده است Brogan و Almoth [۱۲، ۱۳] تاثیر گشودگیهای مستطیلی تقویت شده روی بار کمانش پوسته ها را بررسی نموده و ضمناً نتایج تجربی روی پوسته های گشودگی با و بدون تقویت را با نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری STAGS مورد مقایسه قرار دادند. Starnes [۱۴] نتایج تجربی را برای پوسته های با گشودگی مدور در اندازه های مختلف بدست آورده و ارائه نمود. Mang-Kao Yeh [۱۵]، کمانش خمشی پلاستیک پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور را با روش تحلیلی و تجربی مورد بررسی و نتایج را مورد مقایسه قرار دادند. Shu [۱۶] بارحدی پلاستیک را برای لوله های جدارنازک با ترکهای محیطی سطحی، داخلی و در رو تحت بار محوری کششی، فشار داخلی و ممان خمشی نامتقارن

بدست آورد و همچنین فرمولهایی برای ترکیبی از بارهای فوق ارائه نمود. رحیمی و نوبهاری [۱۷] مطالعه پارامتری کمانش الاستیک پوسته های استوانه ای با انواع گشودگی تحت بارمحوری را انجام داده و به نتایج خوبی دست یافته اند. مقاله حاضر در حقیقت تعمیم مقاله [۱۷] و رفتار پلاستیک سازه مورد نظر و تنوع دادن به نوع بارگذاری است. با توجه به اینکه در مجموعه مقالات بررسی شده، رفتار پلاستیک پوسته استوانه ای با گشودگی تحت بار مرکب چندان بررسی نگردیده است موضوع مقاله حاضر قابل توجه و مورد استفاده می باشد. نکته جالب توجه آن است که چنانچه تغییرات مقاومت الاستیک اینگونه سازه ها در اثر تغییر نواقص هندسی مانند گشودگی که در مرجع [۱۷] بررسی شد، با مقاومت پلاستیک متناظر که در این مقاله بررسی می گردد مقایسه شود، نکات مهمی که در طراحی کاربرد دارد بدست می آید. اصولاً آنالیز پلاستیک سازه های پوسته ای از دو پیچیدگی روابط حاکم بر پوسته ها و روابط غیر خطی حاکم بر رفتار ماده برخوردار هستند. به همین دلیل بررسی رفتار پلاستیک در مقایسه با رفتار الاستیک کمتر مورد توجه واقع شده است. بویژه آنکه سازه پوسته ای از یکنواختی هندسی برخوردار نباشد و ضمناً بارگذاری به یک حالت مشخص محدود نگردد، پیچیدگی مسئله بیشتر می شود. لذا با توجه به هدف مقاله روش انتخاب شده جهت تجزیه و تحلیل، روش المان محدود است.

در مقاله حاضر، رفتار ماده الاستیک - پلاستیک کامل در نظر گرفته می شود و با استفاده از نرم افزار PATRAN شبکه بندی و نرم افزار ABAQUS آنالیز پلاستیک پوسته های استوانه ای تحت بارگذاریهای محوری و ممان خمشی مورد بررسی قرار می گیرد (شکل ۱). شکل گشودگیها مدور و مربع مستطیل است. اثر اندازه و موقعیت گشودگی روی بارحدی پلاستیک پوسته استوانه ای بررسی می شود. در این پژوهش روابط تحلیلی (تحلیلی - تقریبی) برای پوسته های استوانه ای با گشودگی و بدون گشودگی در صورت موجود ارائه می شود و روابط تحلیلی موجود برای پوسته های استوانه ای کامل و ترکدار جهت استفاده برای پوسته های با گشودگی از روی نتایج آنالیز عددی بسط داده می شوند.

۲- بررسی روابط تحلیلی موجود جهت آنالیز پلاستیک پوسته های استوانه ای کامل و با گشودگی

آنالیز پلاستیک روشی است که رفتار سازه تحت بارگذاری معلوم را با در نظر گرفتن مشخصه های پلاستیسیته مواد، شامل سخت شوندگی کرنشی و توزیع مجدد تنشها محاسبه می کند (نرخ کرنش در بارگذاریهای دینامیکی و ضربه ای خیلی مهم است). آنالیز حد، یک حالت ویژه در آنالیز پلاستیک است که در آن خواص ماده پلاستیک کامل در نظر گرفته می شود و روشهای آنالیز حد برای محاسبه ماگزیمم باری که یک سازه با رفتار پلاستیک کامل می تواند تحمل نماید، بکار میرود. سازه تحت بار فوق بیش از حد تغییر شکل می دهد و گسیخته می شود، بار فوق بارحدی پلاستیک نامیده می شود [۱۸].

هرگاه یک تیر تحت بار محوری، ممان خمشی و یا ترکیبی از آنها قرار گیرد توزیع تنش در تیر در حالت الاستیک قابل محاسبه خواهد بود.

اگر تیر لوله جدار نازک و مدور فرض شود و نسبت D/t خیلی بزرگ باشد، آنگاه سازه دچار کمناش الاستیک می گردد و معیار مقایسه، تنش بحرانی است که بصورت زیر تعریف می شود [۱۹].

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{[3(1-\nu)^2]^{1/2}} \frac{t}{R} \quad (۱)$$

در این پژوهش مقدار D/t در دامنه بین ۱۰ تا ۵۰ مورد بررسی قرار می گیرد، که استوانه جدار نازک محسوب می شود و کمناش پلاستیک موضعی در آنها روی نمی دهد و سازه توانایی ظرفیت کامل تحمل بار پلاستیک را دارد [۸]. البته لازم است اشاره شود که محدوده در نظر گرفته شده به بارهای اعمالی نظیر فشار داخلی و خواص مکانیکی لوله ارتباط دارد و مؤسساتی نظیر انستیتو سازه های فولادی امریکا حدود زیر را به ترتیب تحت بارگذاری فشاری محوری و ممان خمشی خالص بکار میبرند که با ارضاء آنها در سازه های فولادی کمناش پلاستیک موضعی رخ نمی دهد [۸].

$$\frac{D}{t} \leq \frac{23000}{\sigma_y} \quad (۲)$$

$$\frac{D}{t} \leq \frac{18000}{\sigma_y} \quad (۳)$$

مقدار ممان خمشی لازم برای تسلیم پوسته استوانه ای مدور عبارتست از :

$$M_y = \pi R^2 t \sigma_y \quad (۴)$$

هرگاه رفتار ماده الاستیک - پلاستیک کامل در نظر گرفته شود، در آنصورت با افزایش ممان خمشی، پوسته از جدار خارجی شروع به تسلیم نموده و نهایتاً کل مقطع پوسته تسلیم می گردد. در اینحالت مقدار ممان پلاستیک پوسته بوسیله فرمول زیر محاسبه می شود.

$$M_p = 4R^2 t \sigma_y \quad (۵)$$

مقدار بار محوری لازم جهت تسلیم پوسته نیز از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$F_p = 2\pi R t \sigma_y \quad (۶)$$

در حالت الاستیک ترکیب بار محوری و ممان خمشی خطی است ولی در حالت پلاستیک ترکیب آنها برای پوسته های استوانه ای کامل غیر خطی بوده و توسط رابطه زیر ارایه شده است [۸ و ۹].

$$M_r^2 = \text{Cos}^2\left(\pi \frac{F_r}{2}\right) \quad (۷)$$

که در آن $F_r = \frac{F}{F_p}$ ، $M_r = \frac{M}{M_p}$ می باشد.

ساده ترین و کاربردی ترین روش مورد استفاده برای بررسی رفتار پوسته استوانه ای ترکدار، آنالیز حد است. این روش آنالیز گسیختگی مقطع خالص نیز نامیده می شود. هرگاه θ زاویه کل ترک در پیرامون استوانه باشد (شکل ۲) در آنصورت ممان خمشی حدی پوسته استوانه ای ترکدار از رابطه زیر بدست می آید [۲۰، ۲۱ و ۲۲].

$$M_L = 4R^2t(\cos\theta/4 - 1/2\sin\theta/2)\sigma_y \quad (8)$$

رابطه فوق در کد انگلیسی R6 [۲۱] برای محاسبه ممان حدی پوسته های استوانه ای با ترک در زردار محیطی بکار میرود. بار حدی محوری نیز از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۲].

$$F_L = 2Rt\sigma_y\{\pi - \theta/2 - 2\sin^{-1}(1/2\sin\theta/2)\} \quad (9)$$

ترکیب بارمحوری و ممان خمشی در حالت پلاستیک غیر خطی بوده و با رابطه زیر ارائه شده است [۲۱].

$$\left(\frac{F}{F_{OR}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{OR}}\right) = 1$$

$$\gamma = 0.82 + 0.75\left(\frac{\theta}{2\pi}\right) + 0.42\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2 \quad (10)$$

$$M_{OR} = \gamma M_L, F_{OR} = \gamma F_L$$

واماندگی سازه ترکدار از طریق دو نوع مکانیزم امکانپذیر است. یکی رشد ترک ترد در اینحالت رفتار ماده الاستیک خطی در نظر گرفته می شود. مکانیزم دیگر واماندگی گسیختگی پلاستیکی سازه می باشد. فرمولهای ارائه شده در این مقاله بر مبنای رفتار پلاستیکی مواد نرم بوده و از طریق آنها بار حدی محاسبه می گردد.

۳- مدلسازی پوسته استوانه ای و اعتبار سنجی مدل

با توجه به هدف مقاله که تجزیه و تحلیل پارامتری پوسته های استوانه ای با انواع گشودگی می باشد، از نرم افزار ABAQUS که در زمینه آنالیز غیر خطی مناسب است استفاده گردید. برای مدلسازی پوسته، المان S8R5 که در شبکه بندی پوسته ها کاربرد زیادی دارد بکار گرفته شد. تعداد المانها در پوسته های استوانه ای با توجه به شکل و ابعاد گشودگی متفاوت می باشد. المانها طوری در نظر گرفته شده که در اطراف گشودگی نیز شکل منظم دارند (شکل ۳).

مطابق شکل ۱، یک طرف استوانه کاملا مقید شده و یک سر آن تحت بارگذاری خمشی، فشاری محوری و یا ترکیبی از آنها قرار می گیرد. نرم افزار ABAQUS مجهز به MPC (Multipoint Constraints) می باشد. بدین ترتیب که یک گره کمکی در وسط صفحه بارگذاری تعریف شده و سپس کلیه گره های سطحی با استفاده از خاصیت فوق به گره کمکی متصل می گردند. در این حالت مقطع آزاد پوسته به مشابه یک فلانچ صلب عمل می کند. توصیف ریاضی این اتصال صلب گره کمکی به گره ههای سطحی استوانه با نوشتن یک برنامه فرعی صورت می گیرد.

در واقع بار محوری یا خمشی و یا ترکیبی از آنها به گره کمکی وارد می شود و از طریق آن به کلیه گره های سطحی وارد می شود. سه درجه آزادی گره ها در بارگذاری خمشی و محوری با درجات آزادی گره کمکی مرتبط بوده و سه درجه دیگر آنها ثابت می گردند. در بارگذاری محوری فقط یک درجه آزادی آنها با گره کمکی مرتبط بوده و بقیه درجات آنها مقید می شوند. تمام درجات آزادی گره های سمت گیردار استوانه ثابت می گردند.

مشخصات پوسته استوانه ای عبارتند از :

$$\begin{aligned} R &= 200 \text{ mm} & E &= 193 \text{E}3 \text{ MPa} \\ t &= 8 \text{ mm} & \nu &= 0.2642 \\ L &= 800 \text{ mm} & \sigma_y &= 271.93 \text{ MPa} \end{aligned}$$

برای سنجش دقت نرم افزار و مدل در نظر گرفته شده ، یک پوسته استوانه ای کامل با مشخصات ذکر شده شبکه بندی و تحت بارگذاریهای مختلف قرار گرفت و نتایج آن همراه با نتایج روابط تحلیلی در جدول (۱) ارائه و مقایسه گردیده است. به عنوان مثال پوسته استوانه ای در دو مرحله ، تحت بار محوری برابر 0.67 بار محوری پلاستیک و ممان خمشی برابر 0.5 ممان خمشی پلاستیک قرار گرفته و گسیخته شده است . با مقایسه نتایج عددی فوق و نتایج تحلیلی رابطه (۷) دیده می شود اختلاف در حد ناچیز و حدودا 0.57 درصد می باشد.

محاسبه بار حدی با استفاده از روش المان محدود در این پژوهش صورت می گیرد. برای این منظور پوسته های استوانه ای با انواع گشودگی تحت ممان خمشی و بار محوری و ترکیبی از آنها بطور جداگانه با در نظر گرفتن رفتار ماده الاستیک - پلاستیک کامل قرار می گیرند. در مقادیر بارگذاری کمتر رابطه بار اعمالی و تغییر مکان و یا زاویه چرخش خطی بوده و با افزایش بار رابطه فوق غیر خطی گشته و سپس بار ثابت مانده و این تغییر شکل ممتد در قطعه تحت بار فوق روی داده و سازه گسیخته می شود (شکل ۴). سپس بار حدی محاسبه شده از طریق اجزا محدود بر بار حدی محاسبه شده از طریق تحلیلی (فرمولهای ۵، ۶ و ۷) تقسیم گردیده و نتایج کارهای انجام شده بصورت بی بعد در شکلهای ۵ الی ۱۶ ارائه شده است. اکنون با استفاده از مدل المان بندی گزیده شده به مطالعه پارامتری استحکام پوسته های استوانه ای با گشودگی پرداخته می شود.

۴- مطالعه پارامتری بار حدی پلاستیک پوسته های استوانه ای

در این بخش مهمترین عوامل موثر در بار حدی پلاستیک پوسته های استوانه ای مورد مطالعه قرار می گیرد. نخست تاثیرات گشودگیهای مدور و مربع مستطیل که طول محیطی گشودگی از صفر تا نصف قطر استوانه تغییر می کند، بررسی می گردند. سپس برای گشودگی مدور اثر افزایش تعداد سوراخها مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و نتایج تجربی و تئوری تا حدی که موجود است با نتایج بدست آمده مقایسه می گردد. ضمناً تغییرات نتایج کمانش الاستیک داده شده در مرجع [۱۷] با نتایج آنالیز پلاستیک مورد مقایسه قرار می گیرد

۴-۱- عوامل موثر

۴-۱-۱- **گشودگی مدور:** برای بررسی اثر گشودگی مدور از استوانه ای با مشخصات ذکر شده استفاده گردیده است. سپس گشودگیهایی با نسبت r/R از صفر تا $0/5$ در پوسته های استوانه ای ایجاد شد و تحت بارگذاری محوری و خمشی قرار گرفت. نتایج آن در شکل های ۵ و ۶ برای بارگذاری خمشی و محوری نشان داده شده است.

جمله اول معادله ۸ و جملات اول و دوم معادله ۹ در واقع نشاندهنده مقدار باری است که سطح مقطع باقیمانده پوسته با کم کردن طول ترک تحمل می نماید و در حالتی که ترک در پوسته ایجاد شود تنشهای دیگری غیر از تنش محوری بوجود می آیند که اثر خود را در $4-1$ - تاثیر شکل، ابعاد و تعداد گشودگی آخرین جملات معادلات فوق نشان می دهند. لذا با عنایت به معادلات ۸ و ۹ در این مقاله سعی گردید با استفاده از نتایج المان محدود معادلاتی مشابه برای پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور و مربع مستطیل ارائه گردند. بنابراین در این مقاله فرض شد جملات اول برای پوسته های باگشودگی نیز همانند پوسته های استوانه ای ترکدار ثابت باشند و فقط ضریب جمله آخر آنها تغییر کند که برای هر کدام از داده ها یک عدد از نتایج المان محدود بدست آمد و سپس از نتایج فوق معادلات درجه n گذرانده شد و برابر $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ قرار داده شدند و در نهایت روابط مربوط به ممان حدی و بارحدی حاصل از شکل های ۵ و ۶ بصورت ذیل استخراج گردیدند.

$$M_r = \text{Cos}\theta/4 - \alpha_1 \text{Sin}\theta/2 \quad (11)$$

$$\alpha_1 = -4 \times 10^{-8} \beta^6 + 4 \times 10^{-6} \beta^5 - 2 \times 10^{-4} \beta^4 + 3 \times 10^{-3} \beta^3 - 309 \times 10^{-4} \beta^2 + 0.1679 \beta \quad (12)$$

$$F_r = \pi - \theta/2 - \alpha_2 \text{Sin}^{-1}(0.5 \text{Sin}\theta/2) \quad (13)$$

$$\alpha_2 = -6 \times 10^{-8} \beta^5 + 9 \times 10^{-6} \beta^4 - 0.0004 \beta^3 \quad (14)$$

در روابط ۱۲ و ۱۴، $\beta = \theta/2$ بوده و برحسب درجه می باشد. همین طور تعداد ۲، ۳ و ۴ عدد گشودگی در استوانه های به نسبت $0/25$ ، $0/1$ در r/R نظر گرفته شد و تحت بارگذاری خمشی و محوری قرار گرفتند. نتایج آنالیز آنها در شکل های ۷ و ۸ ارائه شده است.

۴-۱-۲- **گشودگی مربع مستطیل:** ابتدا گشودگیهای مستطیلی با طول متغیر b در جهت طول استوانه از

۴۰ تا ۲۰۰ میلی متر و با عرض ثابت a مساوی ۱۰۰ میلی متر در جهت پیرامون استوانه ایجاد (شکل ۱) و تحت بارگذاریهای خمشی و محوری قرار گرفته و نتایج آنها در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که تغییرات طول گشودگی در جهت طول استوانه تاثیر خیلی جزئی روی استحکام خمشی و محوری استوانه ها دارد.

در مجموعه دوم گشودگیهای با عرض متغیر a ، ۴۰ تا ۲۰۰ میلی متر در جهت پیرامون استوانه و طول ثابت b برابر ۱۰۰ میلی متر در جهت طول استوانه ایجاد شد. استوانه های فوق تحت بارگذاریهای خمشی و محوری قرار گرفتند و نتایج آنها در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. معادلات منحنیهای حاصل از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشابه معادلات ۱۱ و ۱۳ با توجه به معادلات ۸ و ۹ بصورت زیر استخراج گردیده است [۲۰، ۲۱ و ۲۲].

$$M_r = \cos\theta/4 - 0.5\sin\theta/2 \quad (۱۵)$$

$$F_r = \pi - \theta/2 - \alpha_3 \sin^{-1}(0.5\sin\theta/2) \quad (۱۶)$$

$$\alpha_3 = -4 \times 10^{-6} \beta^4 + 0.0003\beta^3 - 0.01\beta^2 + 0.13\beta \quad (۱۷)$$

۴-۱-۳- مقایسه اثر شکل گشودگی: مقایسه اثرات گشودگی مربع مستطیلی و دایروی حاصل از نتایج عددی نشان می دهند که بارحدی پلاستیک برای گشودگیهای مدور و مستطیلی با طول متغیر a مشابه هم کاهش می یابند. افزایش طول گشودگی مستطیلی در جهت طول استوانه تاثیر قابل توجهی روی استحکام استوانه ندارد.

با مقایسه روابط ۱۱ و ۱۵ با رابطه ۸ دیده می شود که ممان حدی پلاستیک پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مربع مستطیلی ($a > b$) مشابه پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور (رابطه ۱۱) همواره بزرگتر از ممان حدی استوانه های ترکدار با طول $2t$ می باشد، البته لازم بذکر است این اختلاف برای گشودگیهای مدور کوچک بیشتر بوده ولی موقعی که شعاع گشودگی به نصف شعاع استوانه میل می کند، در آنصورت ممان حدی پوسته با گشودگی مدور به سمت ممان حدی پوسته ترکدار و پوسته با گشودگی مستطیلی میل می کند. همینطور با مقایسه روابط ۱۳ و ۱۶ با رابطه ۹ دیده می شود مقدار بارحدی برای پوسته های با گشودگی با افزایش طول گشودگی کاهش یافته ولی همواره بزرگتر از پوسته ترکدار می باشد.

بار ممان خمشی پلاستیک با افزایش تعداد سوراخها با ابعاد کوچکتر تغییرات کمی را نشان می دهد ولی برای گشودگیهای بزرگتر با افزایش تعداد گشودگی از ۱ به ۲ کاهش قابل توجهی را نشان داده و برای استوانه های با تعداد گشودگی ۳ و ۴ این تغییرات ناچیز می باشد. بار محوری حدی پلاستیک با افزایش تعداد سوراخها برای گشودگی های کوچک تغییرات ناچیزی را نشان می دهد ولی بار محوری حدی پلاستیک با افزایش تعداد سوراخها با گشودگیهای بزرگ بطور قابل توجهی کاهش می یابد که علت آن بخاطر کاهش سطح مقطع تحمل بار می باشد.

پوسته استوانه ای دارای دو گشودگی مدور با شعاع ۵۰ میلی متر تحت بارگذاریهای ممان خمشی خالص، محوری خالص و ترکیبی از بارهای محوری و ممان خمشی قرار داده شد. در بارگذاری مرکب در گام

اول، بار محوری برابر $N 6/683434$ اعمال گردید و در گام دوم بارگذاری ممان خمشی صورت گرفت و مقدار آن تا پلاستیک شدن سازه برابر $N.m 242600$ بدست آمد. سپس مقادیر فوق در رابطه ۱۰ قرار داده شد و مقدار حاصل برابر $1/01$ بدست آمد که حدود 1% اختلاف با رابطه تحلیلی فوق دارد لذا با عنایت به نتایج بدست آمده می توان از رابطه فوق برای بارگذاریهای مرکب استفاده نمود.

بارکمانش الاستیک برای گشودگیهای مربع و مستطیل مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه گیری شده که عرض گشودگی در جهت پیرامون استوانه کمانش الاستیک را تحت تاثیر قرار می دهد و ارتفاع آن در جهت طول استوانه تقریباً بی تاثیر است [۱۷]. همانطوریکه قبلاً توضیح داده شد، در آنالیز پلاستیک نیز همین نتیجه بدست آمد. در شکلهای ۳ و ۴ مرجع فوق بار کمانش برحسب تعداد گشودگیها رسم گردیده و نتیجه گیری شده است که برای یک گشودگی استحکام سازه بطور قابل توجهی کاهش یافته و به مقدار کمتر از $0/2$ بار کمانش رسیده است. برای دو عدد گشودگی متقارن اندکی افزایش یافته ولی با افزایش تعداد گشودگیها، استحکام سازه به حد بار کمانش پوسته با یک گشودگی میل کرده است. نتایج استحکام پلاستیک برای دو استوانه با طول گشودگی 20 و 50 میلی متر با تعداد گشودگیهای ۱ تا ۴ برای دو نوع بارگذاری محوری و خمشی در شکلهای ۷ و ۸ ارائه شده است. همانطوریکه از قبل هم پیش بینی می شد کاهش استحکام سازه در حالت پلاستیک نسبت به حالت کمانش الاستیک خیلی اندک بوده و با افزایش تعداد گشودگیها استحکام تقریباً بصورت خطی کاهش می یابد و رفتار سازه ها در دو حالت فوق با هم متفاوت می باشد.

۴-۲- تاثیر طول استوانه و شرایط مرزی بر بارحدی

نتایج نشان می دهند که بار حدی پلاستیک پوسته های استوانه ای با طول کوتاه تحت تاثیر شرایط مرزی قرار می گیرند. در این راستا استوانه های با طولهای متغیر (که در آن فاصله گشودگی تا انتهای محل بارگذاری پوسته برابر نصف طول استوانه 400 mm بوده و مقدار آن ثابت می باشد ولی فاصله گشودگی تا انتهای گیردار استوانه از $0/1$ تا $0/8$ طول استوانه یعنی از 80 mm تا 800 mm متغیر می باشد که این فاصله در اینجا مدنظر می باشد) تحت تاثیر بارگذاری خمشی و محوری قرار گرفته و نتایج آنها در شکلهای ۱۱ و ۱۲ ارائه گردیده است. همانطوریکه از شکلهای فوق مشخص است با کاهش فاصله گشودگی از انتهای گیردار استوانه، بارحدی پلاستیک خمشی و محوری افزایش یافته و با افزایش فاصله، مقدار آن کاهش می یابد. موقعی که فاصله به نصف طول استوانه می رسد و در وسط قرار می گیرد مقدار بار حدی پلاستیک لازم ثابت می ماند و برای طولهای بلند تغییر نمی کند. در مرجع [۱۷] نتیجه گیری شده است که برای استوانه های کوتاه با تکیه گاه گیردار بار کمانش افزایش می یابد و با تغییر موقعیت گشودگی در طول استوانه از یک فاصله مشخص به بعد تاثیری در بار کمانش ایجاد نمی شود. همین نتایج از شکل ۱۲ برای

آنالیز پلاستیک نیز بدست آمده است. بطوریکه با نزدیک شدن فاصله گشودگی به تکیه گاه گیردار، بارحدی پلاستیک محوری و خمشی افزایش یافته و با افزایش فاصله به یک مقدار ثابت میل می نمایند.

۴-۳- تاثیر موقعیت گشودگی در پیرامون استوانه

در اینحالت گشودگیهای مدور در موقعیت های مختلف پیرامونی در زوایای صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ نسبت به موقعیت اعمال بارخمشی ایجاد گردیده و سپس تحت بارگذاریهای خمشی ومحوری قرار گرفتند. موقعی که گشودگی در سمت فشار قرار می گیرد، بارحدی پلاستیک خمشی لازم دارای مینیمم مقدار است و با قرار گرفتن گشودگی درموقعیت های ۳۰ و ۶۰ درجه مقدار بار حدی پلاستیک افزایش می یابد و در ۹۰ درجه که حدودا گشودگی در روی خط خنثی قرار می گیرد، مقدار بار حدی پلاستیک به مقدار ماکزیمم افزایش یافته و به حد مقدار ممان لازم برای بارحدی پلاستیک خمشی یک پوسته استوانه ای بدون گشودگی میل می نماید. سپس با قرار دادن گشودگی در موقعیت های ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه باز هم مقدار ممان پلاستیک کاهش می یابد و حالت تقارن با موقعیت های صفر تا ۹۰ درجه دارد (شکل ۱۳). البته لازم بذکر است که اگر رفتار ماده با سخت شوندهگی کرنشی در نظر گرفته شود، در سمت فشار دارای مینیمم مقدار است و در سمت کشش استحکام سازه بیشتر از سمت فشار می باشد. همینطور گشودگیهای مدور در پیرامون پوسته استوانه ای ایجاد شده و سپس تحت بار محوری قرار گرفتند، مقدار بار پلاستیک محوری برای تمام موارد تقریبا یکسان است (شکل ۱۴). این مسئله از قبل هم قابل پیش بینی بود، چون بار گذاری در جهت محوری بوده و در همه حالات یک مقدار سطح مساوی بعنوان گشودگی وجود دارد و لذا باید اثر یکسان نیز داشته باشند.

۴-۴- پوسته استوانه ای با گشودگی مسلح شده

برای بالابردن مقاومت پوسته با گشودگی در برابر نیروی فشار محوری، می توان اطراف گشودگی را با رینگ واسترینگر ممتد یا مقطع تقویت کرد. نتایج آزمایشات نشان می دهند که برای گشودگی های بزرگ، اثر تقویت کننده کمتر از اثر آن برای گشودگیهای کوچک می باشد. بعنوان مثال، آزمایش پوسته ها با گشودگیهای دایروی نشان می دهند که تقویت ممکن است ظرفیت تحمل بار پوسته را تا حد پوسته کامل بالا ببرد، مشروط برآنکه قطر سوراخ از ۲۰ درصد قطر استوانه بزرگتر نباشد [۲۳].

دراینجا تقویت کننده های از نوع ورقی انتخاب شده که در اطراف گشودگی اعمال شده است. برای مدل کردن این نوع تقویت کننده ها یک ورق هم مساحت با مساحت گشودگی اطراف آن تعبیه می گردد. خواص مکانیکی ورق همانند پوسته انتخاب می گردد. در اینجا ضخامت المان پوسته در اطراف گشودگی برای ضخامتهای بالا حدودا ۲ برابر انتخاب می شود. شکل ۱ نمای شماتیک پوسته و منطقه تقویت شده اطراف

گشودگی را نشان می دهد. در پوسته های استوانه ای با مشخصات ذکر شده المانهای اطراف گشودگی با ضخامتی دو برابر ضخامت پوسته برای دو نوع گشودگی با شعاع ۲۰ و ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده و تحت بار محوری قرار گرفتند. نتایج آنها در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ برای هر دو حالت تقویت شده و تقویت نشده نشان داده شده است. همانطوریکه از شکلها مشخص است و قبلا نیز در منابع دیگر اشاره شده بود، برای گشودگیهای با شعاع کوچکتر از ۲۰ درصد شعاع استوانه، با انجام تقویتی در اطراف گشودگی استحکام آنها افزایش یافته و به حد استحکام پوسته های بدون گشودگی میل می کنند. برای گشودگیهای با شعاع حدودا بزرگتر از ۲۰ درصد شعاع استوانه، نیز با انجام تقویتی استحکام آنها افزایش می یابد ولی مشابه گشودگیهای کوچکترینست. همانطوریکه ذکر گردید در پوسته های استوانه ای با گشودگی با نسبت ضخامت به شعاع خیلی کوچک، کماتش الاستیک در سازه ها رخ می دهد و استحکام آنها بشدت افت می کند که با انجام تقویت در اطراف سوراخ استحکام سازه ها بطور قابل توجهی افزایش می یابد [۱۷]. این مسئله در مرجع فوق بررسی شده و نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

۵- نتیجه گیری

با مقایسه نتایج حاصل از مرجع [۱۷] برای حالت کماتش الاستیک و نتایج حاصل از شکل‌های ۱۵ و ۱۶ دیده می شود که تاثیر تقویت در سازه هایی که در آنها کماتش الاستیک روی می دهد، خیلی بیشتر از تاثیر تقویتی برای سازه های جدار ضخیم که تغییر شکل پلاستیک در آنها رخ می دهد، می باشد. بطوریکه در سازه های با جدار نازک با انجام تقویت می توان استحکام آنها را تا ۴ برابر افزایش داد ولی این افزایش استحکام برای سازه های جدار ضخیم ماگزیمم ۱۰٪ می باشد. بنابر این می توان از این نکته بخوبی در کاربردهای صنعتی استفاده کرد.

آنالیز پلاستیک پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور و مربع مستطیل در اندازه های مختلف تحت بارگذاری ممان خمشی، بار محوری و ترکیبی از آنها مورد بررسی قرار گرفت، با توجه به بررسی های انجام شده نتایج زیر بدست آمده است.

- وجود گشودگی باعث کاهش استحکام خمشی و بار محوری پوسته استوانه ای می شود. افزایش طول گشودگی مستطیلی در جهت طول استوانه تاثیر خیلی کمی در کاهش استحکام سازه دارد ولی با افزایش شعاع گشودگی مدور و عرض گشودگی مستطیلی در جهت پیرامون، کاهش استحکام استوانه قابل توجه می باشد و تاثیر گشودگی مستطیلی اندکی نیز بیشتر از گشودگی مدور است.

- ممان خمشی حدی پوسته استوانه ای با یک گشودگی در حالتی که گشودگی در سمت فشار یا کش قرار دارد، دارای مینیمم مقدار است و با تغییر موقعیت گشودگی به سمت محور خنثی، به مقدار ماگزیمم می رسد.

- ممان خمشی و محوری حدی یک پوسته استوانه ای با یک گشودگی بانزدیکی گشودگی به سمت انتهای گیردار استوانه (یعنی تغییر موقعیت گشودگی در طول استوانه) افزایش می یابد. ممان خمشی حدی موقعی که فاصله گشودگی به بیش از دو برابر قطراستوانه میل می کند ثابت می ماند و در بارحدی محوری این فاصله حدودا $0/6$ قطر استوانه لوله هست و این وضعیت مشابه تغییرات کمانش الاستیک پوسته های استوانه ای با گشودگی می باشد.

- در پوسته های استوانه ای جدار نازک که کمانش الاستیک در آنها روی می دهد، با انجام تقویت استحکام آنها بشدت افزایش می یابد، در حالی که برای پوسته های جدارضخیم این افزایش اندک می باشد. - کاهش استحکام سازه ها در حالت پلاستیک نسبت به حالت کمانش الاستیک اندک بوده و با افزایش تعداد گشودگیها ، استحکام تقریبا بصورت خطی کاهش می یابد.

- از نتایج حاصل از مطالعه پارامتری استحکام پلاستیک پوسته ها، روابطی ارائه گردید، که در موارد عملی براحتی می توان از روابط فوق برای پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مربع مستطیل و مدور استفاده نمود.

۶- مراجع :

- [1] Seide, P., and Weingarten V.I., On the Buckling of Circular Cylindrical Shells under Pure Bending. ASME J. Appl. Mech., Vol. 28. pp. 112-116, (1961)
- [2] Sherman, D.R., Tests of Circular Steel Tubes in Bending, ASCE J. Struct., Vol. 102. pp. 2181-2192, (1976).
- [3] Reddy, B.D., An Experimental Study of the Plastic Buckling of Circular Cylinders in Pure Bending, Int. J. Solids Struct., Vol. 15. pp. 669-683, (1979).
- [4] Gellin, S., The Plastic Buckling of Long Cylindrical Shell under Pure Bending, Int. J. Solids Struct., Vol. 16. pp. 397-407, (1980).
- [5] Bushnell, D., Elastic-Plastic Bending and Buckling of Pipes and Elbows, Comput Struct., Vol. 13, pp. 241-248, (1981).
- [6] Ju, G.T., and Kyriakides, S., Bifurcation and Localization Instabilities in Cylindrical Shells under Bending, II. Predictions, Int. J. Solids Struct, Vol. 29 ,p p. 1117-1142, (1992).
- [7] Sobel, L.H., and Newman, S.Z., Plastic Buckling of Cylindrical Shells under Axial Compression, J. Pressure Vessel Technology, Vol. 2, pp. 40-44, (1980).

[8] Magdi Mohareb, Exact Yield Hyper-Surface for Thin Pipes, Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 507-514, (2001).

[9] Elchalakani, M., and Zhao, X.L., Plastic Mechanism Analysis of Circular Tubes Under Pure Bending, Int. J. Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 1117-1143, (2002).

[10] Van Dyke P., Stresses About a Circular Hole in a Cylindrical Shells, AIAA J., Vol. 3 3, No. 9, pp. 1733-1742, (1965).

[11] Tennyson, R.C., The Effects of Unreinforced Circular Cutouts on the Buckling of Circular Cylindrical Shells under Axial Compression. J. Eng. for Industry, ASME , Vol. 90. pp. 541-546, (1968).

[12] Brogan, F.A., and Almorh, B.O., Buckling of Cylindrical Shells with Cutouts. AIAA J., Vol. 8. No. 2. pp. 236-240, (1970).

[13] Almorh, B.O., and Holmes, A.M.C., Buckling of Shells with Cutouts, Experiment and Analysis. Int.J. Solids and Structures No . 8. pp. 1057-1071, (1972).

[14] Starnes, J.H., Effect of Circular Hole on the Buckling of Cylindrical Shells Loaded by Axial Compression. AIAA J., Vol. 10. No. 8. pp. 1466-1472, (1972).

[15] Meng-Kao Yeh., and Ming-Chyuan Lin., and Wen-Tsang Wu., Bending Buckling of an Elastoplastic Cylindrical Shell with a Cutout. Eng. Struct., Vol. 21. pp. 996-1005, (1999.)

[16] Shu Hengmu., The Plastic Limit Load of Circumferentially Cracked Thin Walled Pipes under Axial Force. Internal Pressure and Asymmetrical Bending. Vol. 79. pp. 377-382, (2002.)

[۱۷] رحیمی ، غلامحسین. و نوبهاری ، غلامرضا. مطالعه پارامتریک کمانش الاستیک پوسته های استوانه ای با انواع گشودگی تحت بار محوری. مجله مهندسی مکانیک. انجمن مهندسان مکانیک ایران. سال چهارم. شماره یکم. تیر ماه ۱۳۸۱ .

[18] ASME Boiler and Pressure Vessel Code ., Ses. 8. Div II. New york, (1998).

[19] Brush, D.O., and Almroth, B.O., Buckling of Bars, Plates, and Shells, McGraw-Hill, Inc. (1975).

[20] Soren Hauch, and Yong Bai., Bending Moment Capacity of Pipes. Offshore Mechanical and Arctic Engineering Conference., July. 11-16, (1999).

[21] R6 CODE., USER GUIDE., Vol. 1.3X, (1995).

[22] Yun Jae, Kim., and Jin-Su, Kim., Engineering C-integral Estimates for Generalized Creep Behavior and Finite Element Validation. Int. J. Pressure Vessels and Piping. Vol. 79. pp. 427-443, (2002).

[23] Gupta, N.K., and Gupta, S.K., Effect of Annealing Size and Cutouts on Axial Collapse Behavior of Circular Tubes. Int. J. Mech. Sci., Vol. 35. No. 7. pp. 597-613, (1993).

فهرست علائم انگلیسی

:A	سطح مقطع استوانه، mm^2	:L	طول استوانه، mm
:a	طول گشودگی در جهت طول استوانه، mm	:M	ممان خمشی، N.m
:b	عرض گشودگی در جهت محیطی استوانه، mm	: M_{Cutout}	ممان خمشی حدی پوسته با گشودگی، N.m
:D	قطر استوانه، mm	: M_L	ممان خمشی حدی پوسته ترکدار، N.m
:E	مدول یانگ، MPa	: M_{or}	ممان خمشی بهینه شده پوسته ترکدار، N.m
:F	نیروی محوری، N	: M_p	ممان خمشی حدی پلاستیک، N.m
: F_{Cutout}	بار حدی محوری پوسته با گشودگی، N	: M_y	ممان خمشی تسلیم، N.m
: F_L	بار حدی محوری پوسته ترکدار، N	:R	شعاع استوانه، mm
: F_{or}	بار حدی بهینه شده پوسته ترکدار، N	:r	شعاع گشودگی، mm
: F_p	بار حدی پلاستیک، N	:t	ضخامت استوانه، mm
: F_L	بار حدی محوری پوسته ترکدار، N	:y	ضخامت، mm

فهرست علائم یونانی

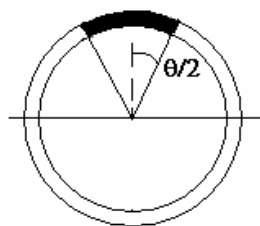
: $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$	ضرایب مربوط به بار حدی
: θ	مقدار زاویه طول ترک
: β	$\beta = \theta/2$

: γ	ضریب بهینه کننده بارحدی
: σ	تنش ، MPa
: σ_{cr}	تنش بحرانی ، Mpa
: σ_y	تنش تسلیم ، MPa
: ν	نسبت پواسون

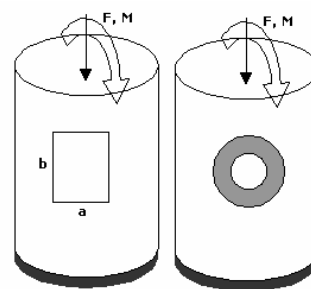
جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از آنالیز عددی و تحلیلی پوسته استوانه ای کامل تحت بارگذاریهای متفاوت

نوع بارگذاری	نتایج روابط تحلیلی		نتایج اجزاء محدود	اختلاف نتایج تئوری و عددی (%)
بارمحوری - کمانش الاستیک	رابطه ۲	۱۱۶۱۵۹/۶ N	۱۱۷۱۰۰ N	۰/۸
بارمحوری - پلاستیک	رابطه ۷	۲۷۳۳۷۳۸/۵ N	۲۷۳۳۷۳۸/۵ N	۰
بارمان خمشی - پلاستیک	رابطه ۶	۳۴۸۰۷۰/۴ N-m	۳۴۷۱۰۰ N-m	۰/۲۸
ترکیب بارمحوری ، خمشی - پلاستیک	رابطه ۸	F=۱۸۲۲۴۹۲/۳ N M=۱۷۴۰۳۵/۲ N-m	F=۱۸۲۲۴۹۲/۳ N M=۱۷۵۳۰۰ N-m	۰/۵۷

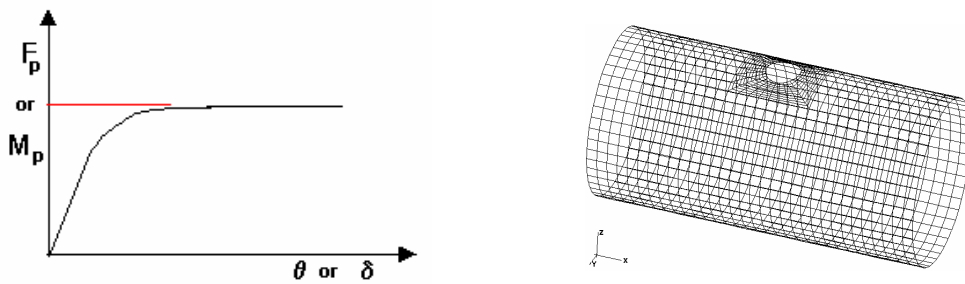
شکلها



شکل ۲- طول ترک در مقطع استوانه به اندازه زاویه θ



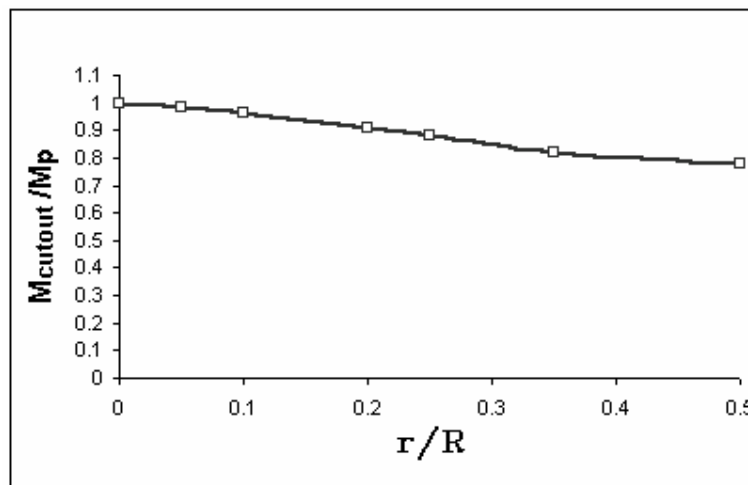
شکل ۱- پوسته استوانه ای با گشودگی مدور ومستطیلی تحت بار محوری وخمشی



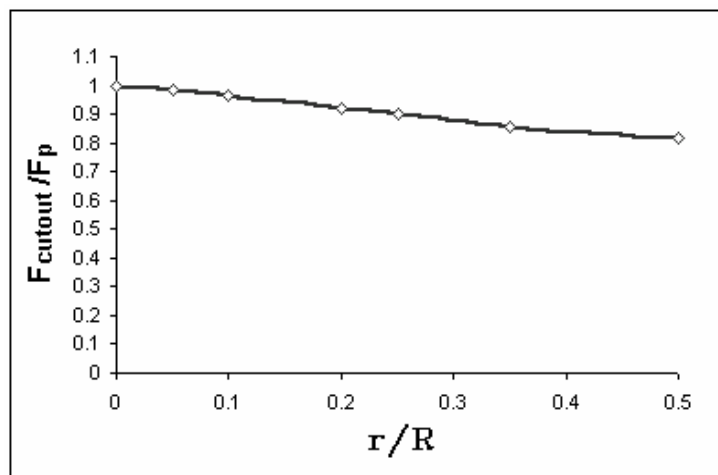
شکل ۳- مدل شبکه بندی شده پوسته

شکل ۴ - بار حدی بر حسب جابجایی

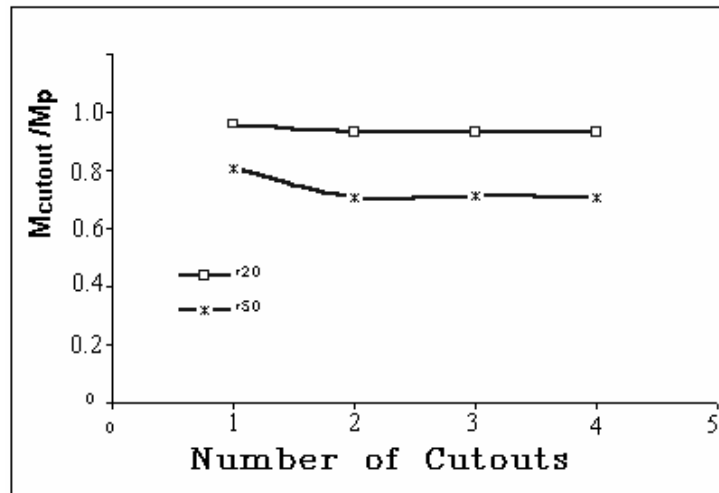
استوانه ای با گشودگی



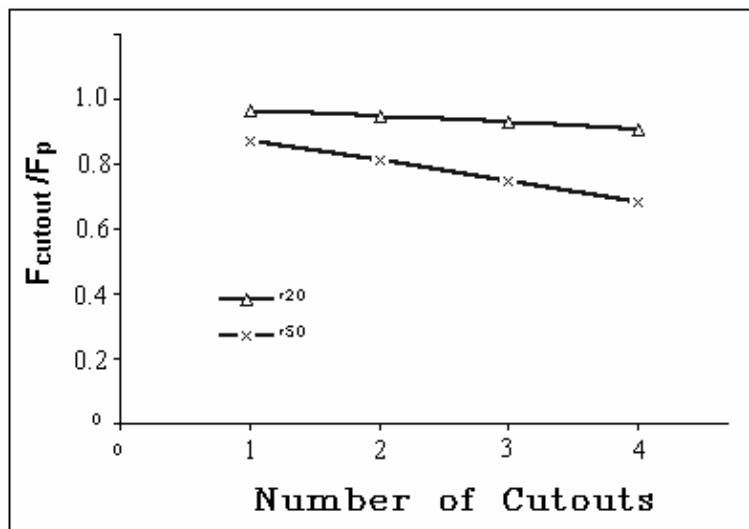
شکل ۵ - ممان خمشی حدی پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مدور باشعاعهای متغیر



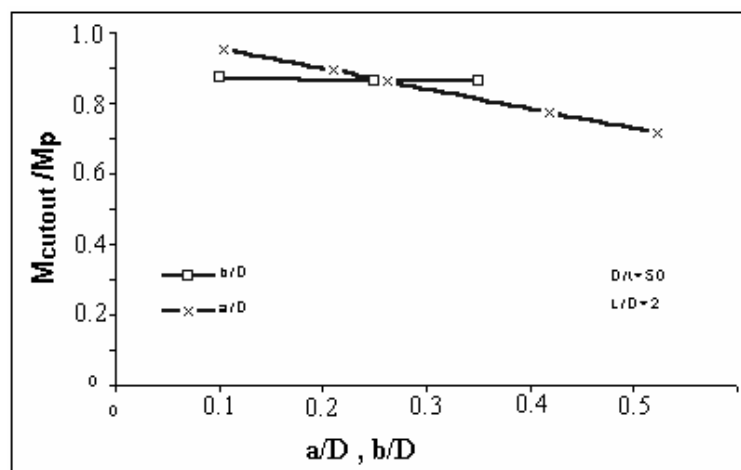
شکل ۶ - بار محوری حدی پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مدور باشعاعهای متغیر



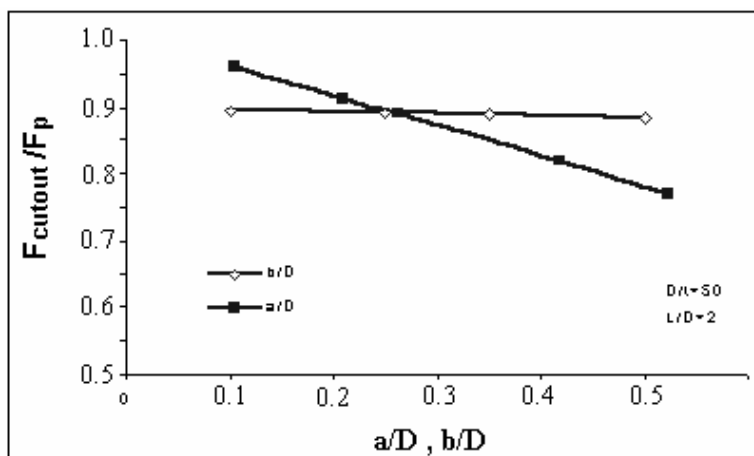
شکل ۷: مقایسه ممان خمشی حدی پوسته های استوانه ای با تعداد گشودگیهای متفاوت



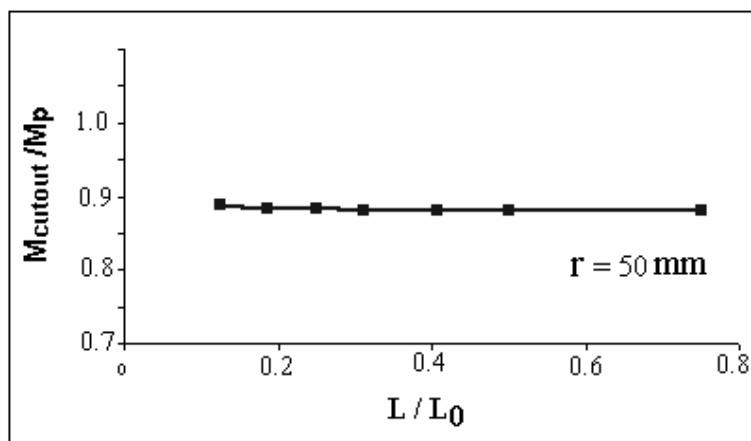
شکل ۸ - مقایسه بار محوری حدی پوسته های استوانه ای با تعداد گشودگیهای متفاوت



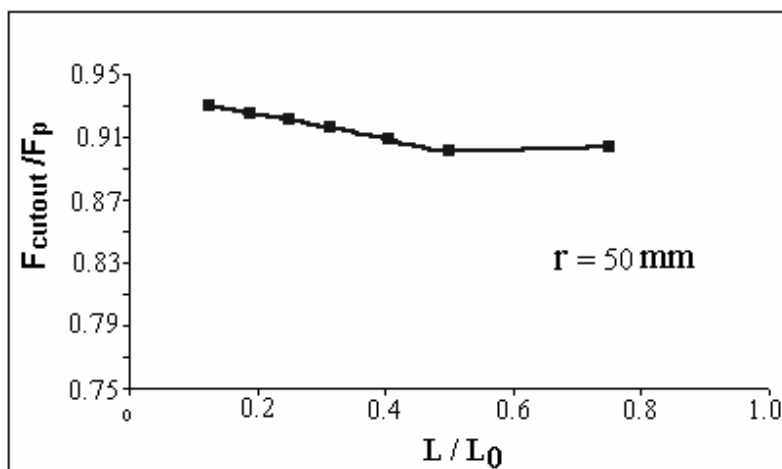
شکل ۹ - ممان خمشی حدی پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مستطیلی



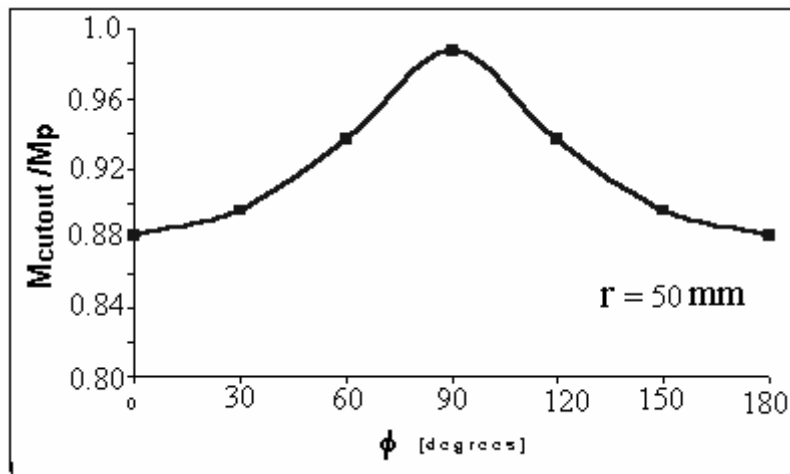
شکل ۱۰ - بار محوری حدی پوسته های استوانه ای با گشودگیهای مستطیلی



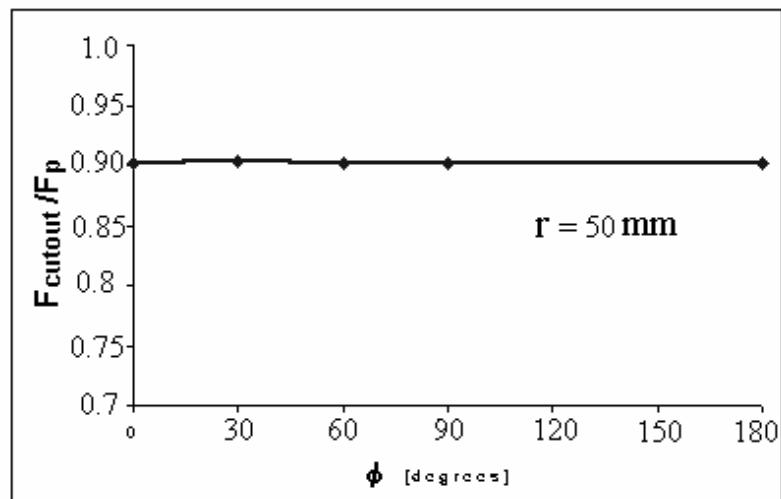
شکل ۱۱ - ممان خمشی حدی پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور با فواصل متغیر از انتهای پوسته



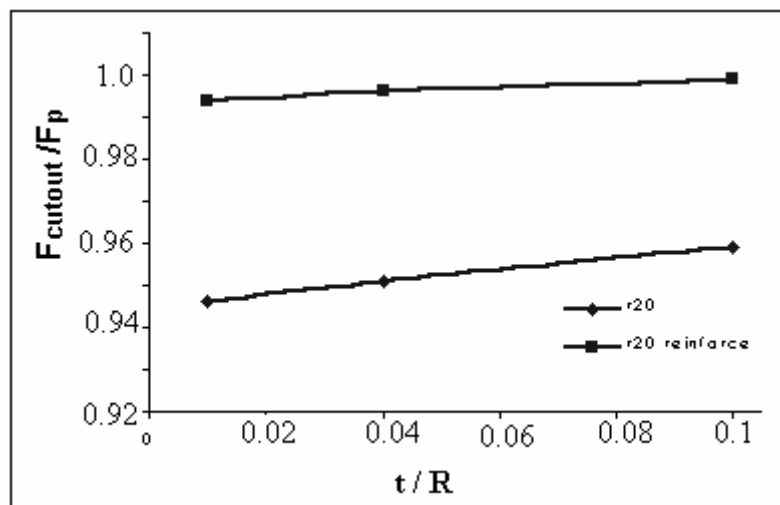
شکل ۱۲ - بار محوری حدی پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور با فواصل متغیر از انتهای پوسته



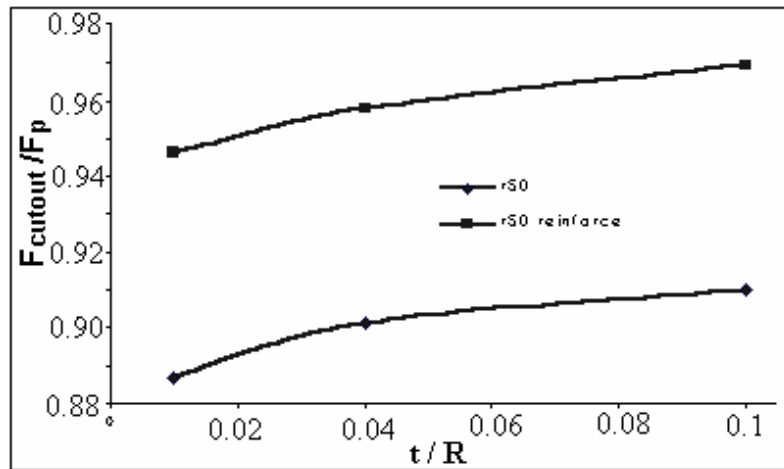
شکل ۱۳ - ممان خمشی حدى پوسته های استوانه ای با گشودگی مدوردر موقعیتهای متغیر پیرامونی



شکل ۱۴ - بار محوری حدى پوسته های استوانه ای با گشودگی مدوردر موقعیتهای متغیر پیرامونی



شکل ۱۵ - بار محوری حدى پوسته های استوانه ای با گشودگی مدوربا ضخامت های متغیر



شکل ۱۶ - بار محوری حدی پوسته های استوانه ای با گشودگی مدور با ضخامتهای متغیر

Abstract

The plastic strength of cylindrical shells with different cutouts under axial compressive load and bending moment and their combinations are investigated. For analysis, finite element Softwares, PATRAN and ABAQUS are used. To check the accuracy of the FEM model, a perfect cylindrical shell under different types of loads is modeled and solved and their results are compared with the analytical solutions. The influence of different geometric parameters such as shape, size, number, location of cutout and reinforcing of cutout is discussed. The influence of all above parameters in plastic analysis was compared with influence of corresponding results of elastic buckling.