

بررسی پارامترهای موثر بر کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت بار محوری

در این تحقیق، به بررسی برخی پارامترهای موثر بر بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده پرداخته شده است. این پارامترها شامل نوع اتصال تقویتی‌ها به پوسته، تعداد، ضخامت و شکل سطح مقطع تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی، ضخامت پوسته، شکل، نسبت نقص و اندازه حفره ایجاد شده در پوسته می‌باشد. بدین منظور از دو روش تحلیلی و عددی استفاده شده است. در روش تحلیلی، از روش انرژی و در روش عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در این پژوهش افزون بر کارهای گذشته، نحوه اتصال تقویتی‌ها به پوسته، اثر پارامتر نسبت نقص دو شکل حفره بیضی و مستطیل و نیز اثر برخی پارامترهای مربوط به تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی مانند اثر شکل سطح مقطع و اثر تعداد آن‌ها بر بار کمانش به طور مجزا بررسی شده است.

محمد سالاری^۱

استادیار

حسین مهین آباد^۲

کارشناسی

واژه‌های راهنما: کمانش، پوسته استوانه‌ای تقویت شده، روش انرژی، حفره، تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده در زمینه‌های مختلفی در صنعت از جمله صنایع هوایی و دریایی مانند هواپیما، زیردریایی و ... کاربرد دارند. این سازه‌ها بایستی در مقابل تغییر شکل‌های ناگهانی مانند کمانش مقاومت کرده و پایداری خود را حفظ کنند. از جمله پارامترهای موثر بر مقاومت کمانشی این سازه‌ها، شکل سطح مقطع، ضخامت و تعداد تقویت‌کننده‌های طولی^۳ و محیطی^۴ می‌باشد. از طرف دیگر در بسیاری از موارد جهت کاهش وزن سازه و یا دسترسی به قسمت‌های داخلی، حفره‌هایی^۵ در پوسته در نظر گرفته می‌شود که وجود این حفره‌ها بر استحکام کمانشی سازه موثر می‌باشند. لذا بررسی تأثیر پارامترهای موثر بر مقاومت کمانشی سازه‌های دارای حفره از جمله اندازه حفره، شکل حفره و ... اهمیت بسیاری دارد.

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم، قم m.salari@qom.ac.ir

^۲ کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم، قم h.mahinabad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰

^۳ Stringer

^۴ Ring

^۵ Cutout

تحقیقات متعددی درباره تحلیل سازه‌های پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. جی. سینگر و همکاران [۱]، پایداری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده، تحت بار محوری با دو نوع شرط مرزی تکیه‌گاه ساده و گیردار را مورد بررسی و اثر گریز از مرکز تقویتی‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نجف‌زاده و همکاران [۲]، پایداری مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای مدرج تابعی تقویت شده توسط رینگ و استرینگر را مورد بررسی قرار داده و نتایج روش تحلیلی و روش عددی را برای پوسته‌های تقویت شده و تقویت نشده در حالی که اختلاف آن‌ها بسیار پایین بود، مقایسه نموده‌اند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که با افزایش ضخامت پوسته و کاهش پارامترهای غیرهمگن، مقادیر بارهای بحرانی افزایش می‌یابد.

شهبوز یوسف‌زاده و همکاران [۳]، رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار ضخیم تابعی تقویت شده با رینگ تقویتی تحت بارهای محوری و جانبی یکنواخت را با استفاده از تئوری مرتبه سوم برشی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه دست یافتند که افزایش کسر حجمی ماده مدرج تابعی در ساختار پوسته منجر به افزایش بار بحرانی کمانش خواهد شد و محل نصب رینگ تقویتی تأثیر قابل توجهی در مقدار بار کمانش خواهد داشت.

داود شاه‌قلیان و همکاران [۴]، رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی را با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش وی سی تی روش مناسبی برای پیش بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های کامپوزیتی ساده می‌باشد. نوبخت نامین [۵]، کمانش متقارن پوسته استوانه‌ای تقویت شده توسط رینگ و استرینگر تحت بار محوری را با نرم‌افزار انسیس انجام داده و اثر پارامترهای مختلف همانند تعداد، موقعیت، استرینگرهای افقی و قائم بر بار کمانش را بررسی کرده است. پینگ جیاو و همکاران [۶]، تأثیر رینگ تقویتی در رفتار کمانش پوسته استوانه‌ای تحت بار محوری با وجود یک حفره در پوسته استوانه‌ای در دو حالت تقویت شده و تقویت نشده را مورد ارزیابی قرار داده و نتایج تجربی و عددی را مقایسه کرده‌اند. ون چن و همکاران [۷]، تحلیل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده با رینگ را با استفاده از ترکیب روش‌های المان محدود و نوار محدود مورد ارزیابی قرار داده و این روش را کارآمد یافتند.

جی. تیان و همکاران [۸]، کمانش و پس‌کمانش غیرخطی پوسته استوانه‌ای مدرج تابعی تقویت شده با رینگ و استرینگر تحت فشار خارجی را در حالت بیرونی و داخلی بودن تقویتی‌ها و همچنین تقویت شده و تقویت نشده را تحلیل کردند. قاسمی توتشامی و جعفری [۹]، رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی را با استفاده از روش انرژی تحلیل کرده و اثر تعداد رینگ‌ها و استرینگرها، توزیع رینگ‌ها در طول استوانه، نوع تئوری پوسته‌ها (کلاسیک و مرتبه اول تغییر شکل برشی) و خارج یا داخل بودن تقویت‌کننده‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. شاهانی و همکاران [۱۰]، خستگی یک پوسته استوانه‌ای تقویت شده تحت بارگذاری چند محوری را مورد مطالعه قرار داده و در اتصال تقویتی‌ها از مدلسازی پرچ با استفاده از المان بوشینگ^۱ استفاده کردند. طالع زاده لاری و رحیمی [۱۱]، کمانش پوسته‌های کامپوزیتی دارای گشودگی را از طریق روش مربعات تفاضلی تعمیم یافته و با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی تحلیل نموده و به این نتایج رسیدند که لایه‌چینی پوسته‌های کامل و دارای گشودگی تأثیر بسزایی در مقدار بار کمانش خواهد داشت و تأثیر افزایش اندازه گشودگی برای لایه‌چینی‌های مختلف یکسان نیست اما برای یک لایه‌چینی یکسان، رفتار پوسته‌ها در برابر تغییر اندازه گشودگی مستقل از جنس می‌باشد. همچنین در مراجع [۱۷-۱۲] تحلیل ارتعاشات آزاد مواد مدرج تابعی در

¹ Bushing element

پوسته‌های استوانه‌ای و کاربرد تئوری مرتبه سوم برشی در مخارن استوانه‌ای جدار نازک و ضخیم، تحت بارهای مکانیکی و حرارتی و الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلف بر کمانش پوسته، شامل نوع اتصال (جوش یا چسب و پرچ)، ضخامت، شکل سطح مقطع و تعداد تقویتی‌ها، ضخامت پوسته، شکل و اندازه حفره‌ها به کمک دو روش تحلیلی انرژی و روش عددی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس بررسی شده است. بدین منظور، تحلیل کمانش در دو حالت اتصال تقویتی‌ها به پوسته با استفاده از جوش (یا چسب) و پرچ انجام شده و نتایج مقایسه شده‌اند. همچنین در این مقاله تأثیر تعداد، ضخامت و شکل سطح مقطع تقویتی‌ها بر روی رفتار کمانش سازه بررسی شده است. در نهایت نیز اثر برخی پارامترهای مربوط به حفره از جمله شکل حفره (دایره، مربع و مثلث)، نسبت نقص در دو شکل حفره بیضی و مستطیل و همچنین اندازه حفره مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نوآوری این مقاله نسبت به پژوهش‌های دیگر این است که در پژوهش‌های پیشین برای اتصال تقویتی‌ها به پوسته تنها اتصال از نوع جوش (یا چسب) مورد بررسی قرار گرفته است اما در این تحقیق علاوه بر اتصال از نوع جوش (یا چسب)، اتصال از نوع پرچ که در نرم افزار آباکوس با استفاده از تکنیک بست^۱ و المان‌های بوشینگ مدل‌سازی شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق، افزون بر کارهای گذشته، اثر برخی پارامترهای مربوط به تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی مانند اثر شکل سطح مقطع و اثر تعداد آن‌ها بر بار کمانش به طور مجزا بررسی شده است. بعلاوه اثر پارامتر نسبت نقص^۲ دو شکل حفره بیضی و مستطیل که پارامتر مرتبط با بهینه‌سازی شکل حفره می‌باشد بر بار بحرانی کمانش پوسته استوانه‌ای تقویت شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است که انجام این بررسی‌ها در پژوهش‌های گذشته مشاهده نمی‌شود.

۲- مدل‌سازی مسئله

شکل (۱) شماتیک مسئله که تقویتی‌ها به پوسته متصل شده‌اند را نشان می‌دهد، مختصات استوانه‌ای (X, θ, Z) در صفحه میانی پوسته نهاده شده است و تغییر مکان پوسته در راستاهای مختصات اصلی به ترتیب (u, v, w) می‌باشد.

همچنین تغییر مکان‌های صفحه میانی پوسته در مختصات اصلی تعیین شده به ترتیب (u_{ms}, v_{ms}, w_{ms}) نام‌گذاری شده است، بنابراین، طبق تئوری کلاسیک پوسته‌ها، تغییر مکان در هر نقطه از پوسته استوانه‌ای از طریق معادلات (۱) حاصل می‌شود [۱۸].

$$u(X, \theta, Z) = u_{ms}(X, \theta) + Z \left(-\frac{\partial w_{ms}(X, \theta)}{\partial X} \right)$$

$$v(X, \theta, Z) = v_{ms}(X, \theta) + Z \left(-\frac{\partial w_{ms}(X, \theta)}{R \partial \theta} + \frac{v_{ms}(X, \theta)}{R} \right)$$

$$w(X, \theta, Z) = w_{ms}(R, \theta) \quad (1)$$

¹ Fastener method

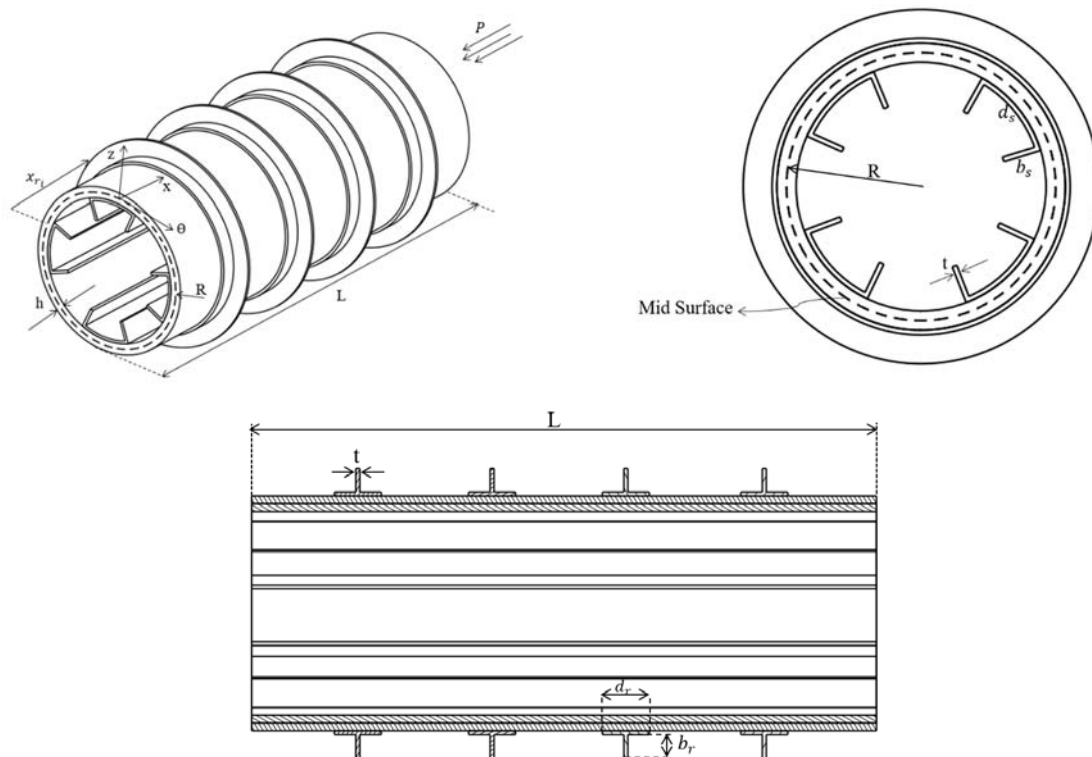
² Imperfection ratio

روابط کرنش - جابجایی طبق تئوری پوسته‌های نازک لاو، همانند روابط (۲) بیان می‌شوند [۱۸]؛

$$\varepsilon = \varepsilon^0 + \eta k$$

$$\varepsilon^0 = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{XX}^{(0)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(0)} \\ \gamma_{X\theta}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_{ms}}{\partial X} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial v_{ms}}{\partial \theta} + \frac{w_{ms}}{R} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial u_{ms}}{\partial \theta} + \frac{\partial v_{ms}}{\partial X} \end{Bmatrix}$$

$$\eta = \begin{Bmatrix} \eta_{XX} \\ \eta_{\theta\theta} \\ \eta_{X\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_{ms}}{\partial X^2} \\ -\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 w_{ms}}{\partial \theta^2} - \frac{\partial v_{ms}}{\partial \theta} \right) \\ -\frac{1}{R} \left(2 \frac{\partial^2 w_{ms}}{\partial X \partial \theta} - \frac{\partial v_{ms}}{\partial X} \right) \end{Bmatrix} \quad (2)$$



شکل ۱- شماتیک مسئله در حالت کلی

۳- شرایط مرزی حاکم بر مسئله

معادله‌ای می‌تواند بیانگر میدان جابجایی سطح میانی پوسته باشد که تغییر مکان در راستای طولی و محیطی را ارضا نماید، لذا طبق پژوهش‌های پیشین در زمینه کماتش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده همانند مرجع [۱۹]، معادلات (۳) برای میدان جابجایی سطح میانی پوسته، متناسب با ضرب توابع طولی در محیطی

در نظر گرفته شده است و در ادامه توابع طولی و محیطی با توجه به شرایط مرزی که در این پژوهش یک سر گیردار در نظر گرفته شده است با استفاده از مرجع [۱۹] به صورت توابع رابطه (۴) در نظر گرفته شده است. مولفه‌های تغییر مکان در صفحه میانی پوسته، در مختصات اصلی به صورت توابع (۳) فرض می‌شوند [۱۹].

$$\begin{aligned} u_{ms} &= A \frac{\partial \psi(X)}{\partial X} \zeta_u(\theta) \\ v_{ms} &= B \psi(X) \zeta_v(\theta) \\ w_{ms} &= C \psi(X) \zeta_w(\theta) \end{aligned} \quad (۳)$$

که در معادلات (۳)، ضرایب A ، B و C حداکثر دامنه توابع تغییر مکان صفحه میانی پوسته تقویت شده می‌باشند، همچنین $\psi(X)$ و $\zeta(\theta)$ به ترتیب توابع طولی و محیطی می‌باشند که به شکل معادلات (۴) فرض می‌شوند.

$$\begin{aligned} \psi(X) &= \alpha_1 \cosh\left(\frac{\lambda_m X}{L}\right) + \alpha_2 \cos\left(\frac{\lambda_m X}{L}\right) - \sigma_m \left[\alpha_3 \sinh\left(\frac{\lambda_m X}{L}\right) - \alpha_4 \sin\left(\frac{\lambda_m X}{L}\right) \right] \\ \zeta_u(\theta) &= \cos(n\theta) \\ \zeta_v(\theta) &= \sin(n\theta) \\ \zeta_w(\theta) &= \cos(n\theta) \end{aligned} \quad (۴)$$

ضرایب ثابت σ_m ، α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) و λ_m با توجه به شرایط مرزی تعیین می‌شوند، n نیز تعداد موج‌های محیطی را مشخص می‌کند. چنانکه ذکر شد، شرایط مرزی پوسته، به صورت یک سرگیردار در $X = 0$ و نیروی محوری اعمالی در $X = L$ به پوسته وارد می‌شود، پس برای اعمال شرایط مرزی و تعیین ضرایب می‌بایست معادلات (۵) و (۶) ارضا شوند [۱۹]؛

اعمال شرط مرزی گیردار در $X = 0$

$$\psi(X) = \frac{\partial \psi(X)}{\partial X} = 0 ; X = 0 \quad (۵)$$

اعمال شرط مرزی آزاد در $X = L$

$$\frac{\partial^2 \psi(X)}{\partial X^2} = \frac{\partial^3 \psi(X)}{\partial X^3} = 0 ; X = L \quad (۶)$$

همچنین برای اعمال شرایط مرزی یک سرگیردار، ضرایب σ_m و λ_m با استفاده از معادلات (۷) و (۸) بدست خواهند آمد [۲۰]؛

$$\cosh(\lambda_m) \cos(\lambda_m) = -1 \quad (۷)$$

$$\sigma_m = \frac{\sinh(\lambda_m) - \sin(\lambda_m)}{\cosh(\lambda_m) + \cos(\lambda_m)} \quad (۸)$$

پس از ارضای معادلات، ضرایب α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) به شکل معادلات (۹) بدست خواهند آمد؛

$$\alpha_1 = 1 , \quad \alpha_2 = -1 , \quad \alpha_3 = 1 , \quad \alpha_4 = 1 \quad (۹)$$

۴- استخراج معادلات حاکم

انرژی کرنشی پوسته استوانه‌ای بر حسب کرنش‌های ذکر شده در معادلات (۲) طبق رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$U_{Shell} = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E_{shell}}{(1-\nu^2)} [\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + 2\nu\varepsilon_{xx}\varepsilon_{\theta\theta}] + \frac{E_{shell}}{2(1+\nu)} [\gamma_{x\theta}^2] \} R dZ d\theta dX \quad (10)$$

برای بدست آوردن انرژی کرنشی تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی، آن‌ها به صورت المان‌هایی مجزا از پوسته و مجزا از المان‌های یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند و برای بدست آوردن انرژی پتانسیل مجموع سازه، از پیوستگی (اتصال جوش یا چسب و پرچ) میان آن‌ها استفاده می‌شود.

انرژی کرنشی تقویت‌کننده‌های محیطی با قرارگیری در مکان x_{r_i} توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$U_{Rings} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left[\frac{E_r A_r}{R+c_r} \left(\frac{\partial v_{r_i}}{\partial \theta} + w_{r_i} \right)^2 + \frac{E_r I_x^{(r)}}{(R+c_r)^3} \left(\frac{\partial^2 w_{r_i}}{\partial \theta^2} + w_{r_i} \right)^2 + \frac{E_r I_z^{(r)}}{(R+c_r)} \left(\frac{\partial w_{r_i}}{\partial X} - \frac{1}{(R+c_r)} \frac{\partial^2 u_{r_i}}{\partial \theta^2} \right)^2 + \frac{G_r J_r}{(R+c_r)} \left(\frac{\partial^2 w_{r_i}}{\partial X \partial \theta} - \frac{1}{(R+c_r)} \frac{\partial u_{r_i}}{\partial \theta} \right)^2 \right] \Big|_{X=x_{r_i}} d\theta \quad (11)$$

که در آن $(u_{r_i}, v_{r_i}, w_{r_i})$ مولفه‌های تغییر مکان مرکز سطح مقطع تقویت‌کننده‌های محیطی می‌باشند که می‌توان آن‌ها را بر حسب مولفه‌های تغییر مکان صفحه میانی پوسته به شکل رابطه (۱۲) نوشت [۱۸]؛

$$\begin{aligned} u_{r_j} &= u_{ms} + c_r \left(-\frac{\partial w_{r_j}}{\partial X} \right) \\ v_{r_j} &= v_{ms} \left(1 + \frac{c_r}{R} \right) + c_r \left(-\frac{\partial w_{r_j}}{R \partial \theta} + \frac{v_{ms}}{R} \right) \\ w_{r_j} &= w_{ms} \end{aligned} \quad (12)$$

همچنین انرژی کرنشی تقویت‌کننده‌های طولی با قرارگیری در مکان s_j توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۲۱]؛

$$U_{Stringers} = \frac{J_s G_s}{2} \int_0^L \left[\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w_{s_j}}{\partial \theta \partial X} \right]^2 \Big|_{\theta=\theta_{s_j}} dx + \frac{E_s}{2} \int_0^L \left\{ A_s \left[\frac{\partial u_{s_j}}{\partial X} + c_s \frac{\partial^2 w_{s_j}}{\partial X^2} - e_s \frac{\partial^2 v_{s_j}}{\partial X^2} \right]^2 + I_z^{(s)} \left[\frac{\partial^2 v_{s_j}}{\partial X^2} + \frac{c_s}{R} \frac{\partial^3 w_{s_j}}{\partial X^2 \partial \theta} \right]^2 + I_\theta^{(s)} \left[\frac{\partial^2 w_{s_j}}{\partial X^2} + \frac{e_s}{R} \frac{\partial^3 w_{s_j}}{\partial X^2 \partial \theta} \right]^2 \right\}$$

$$+2I_{\theta Z}^{(s)} \left[\frac{\partial^2 v_{s_j}}{\partial X^2} + \frac{c_s}{R} \frac{\partial^3 w_{s_j}}{\partial X^2 \partial \theta} \right] \left[\frac{\partial^2 w_{s_j}}{\partial X^2} + \frac{e_s}{R} \frac{\partial^3 w_{s_j}}{\partial X^2 \partial \theta} \right] \Big|_{\theta=\theta_{s_j}} dx \quad (13)$$

که در آن $(u_{s_j}, v_{s_j}, w_{s_j})$ مولفه‌های تغییر مکان مرکز سطح مقطع تقویت‌کننده‌های طولی می‌باشند که می‌توان آن‌ها را بر حسب مولفه‌های تغییر مکان صفحه میانی پوسته به شکل رابطه (۱۴) نوشت.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s_j} &= \mathbf{u}_{ms} + \mathbf{c}_s \left(-\frac{\partial \mathbf{w}_{s_j}}{\partial X} \right) \\ v_{s_j} &= v_{ms} \left(1 + \frac{c_s}{R} \right) + c_s \left(-\frac{\partial w_{s_j}}{R \partial \theta} + \frac{v_{ms}}{R} \right) \\ w_{s_j} &= w_{ms} \end{aligned} \quad (14)$$

کار انجام شده توسط نیروی محوری وارد شده بر پوسته در حین کمانش برابر است با [۱۸]؛

$$V_P = - \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{PR}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u_{ms}}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_{ms}}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_{ms}}{\partial X} \right)^2 \right\} d\theta dX \quad (15)$$

اکنون می‌توان انرژی پتانسیل کل را طبق رابطه (۱۶) بدست آورد.

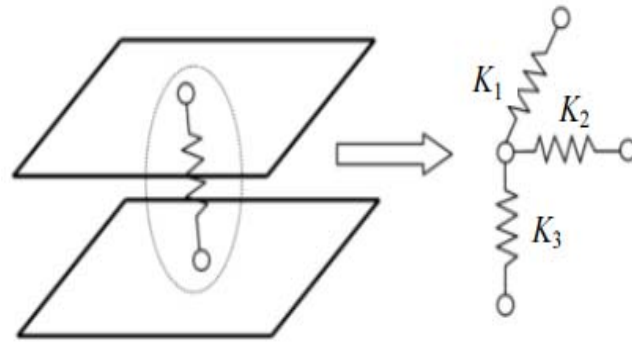
$$U_{Total} = U_{Shell} + \sum_{i=1}^{N_r} U_{Rings} + \sum_{j=1}^{N_s} U_{Stringers} + V_P \quad (16)$$

حال با استفاده از روش ریتز^۱ و مینیمم‌سازی تابع انرژی پتانسیل بر حسب ضرایب A ، B و C معادلات تعادل بدست خواهد آمد که در رابطه (۱۷) مشخص شده است؛

$$\delta U_{Total} = 0 \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial U_{Total}}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial U_{Total}}{\partial B} = 0 \\ \frac{\partial U_{Total}}{\partial C} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

معادلات رابطه (۱۷) را می‌توان به شکل رابطه $[K] \times \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = 0$ نوشت؛ که در آن ماتریس K ماتریسی بر حسب بار کمانش مجهول (که تابع تعداد موج‌های محیطی n) است) می‌باشد، برای حل چنین معادله‌ای، جواب بدیهی و جواب غیر بدیهی وجود دارد. جواب غیر بدیهی وقتی حاصل می‌شود که $|K| = 0$ ، با حل این معادله توسط نرم‌افزار متلب مقادیر ویژه بدست خواهند آمد، که همان بارهای بحرانی کمانش پوسته می‌باشند.

¹ Ritz method



شکل ۲- المان فنری و سه بعدی پرچ

۵- تحلیل اجزاء محدود

در اتصال از نوع جوش (یا چسب)، تقویت کننده‌ها به صورت اتصال پیوسته که در نرم افزار آباکوس در حالت قید گره^۱ شبیه‌سازی شده، به پوسته متصل شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در اتصال از نوع پرچ، تقویتی‌ها به صورت موضعی به پوسته متصل شده‌اند که در نرم افزار آباکوس با استفاده از تکنیک بست مدل شده‌اند، در این روش، پرچ‌ها به صورت فنر سه بعدی و با المان پوشینگ مدل‌سازی می‌شوند که در شکل (۲) نمایشی از المان پرچ نمایش داده شده است [۱۰]، برای المان‌های پوشینگ می‌بایست ضرایب فنریت خطی را در سه جهت تعریف نمود که این ضرایب با توجه به خواص پرچ‌های اتصال دهنده، پوسته و تقویتی‌ها تعیین می‌شوند، برای تعیین این ضرایب از روابط نیمه تجربی سوئیفت^۲ (۱۸) استفاده شده است که تابعی از خواص المان پرچ، پوسته، تقویت کننده‌های طولی و تقویت کننده‌های محیطی می‌باشند.

$$K_1 = \frac{E_{shell} D}{\left[\beta + \Gamma \left(\frac{D}{h} + \frac{D}{t} \right) \right]}$$

$$K_2 = \frac{E_{shell} D}{\left[\beta + \Gamma \left(\frac{D}{h} + \frac{D}{t} \right) \right]}$$

$$K_3 = \frac{E_f D^2 \pi}{2(h+t)} \quad (18)$$

که در رابطه (۱۸)، E_{shell} مدول یانگ پوسته، E_f مدول یانگ پرچ، D قطر پرچ، h و t ضخامت پوسته و تقویتی‌ها، β و Γ ثوابتی با توجه به جنس پرچ می‌باشند که برای پرچ آلومینیومی برابر $\beta = 5$ و $\Gamma = 0.8$ می‌باشند [۲۲]. در این پژوهش برای بررسی‌های انجام شده E_f برابر با $71/71 \text{ GPa}$ و همچنین جرم و قطر هر پرچ به ترتیب 1 g و $2/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده‌اند. با جایگذاری پارامترهای روابط (۱۸)، ضرایب K_1 و K_2 و K_3 بدست می‌آیند که نتایج آن در جدول (۱) آمده است؛

¹ Tie Constraint

² Swift

جدول ۱- ضرائب سوئیت برای اتصال پرچ

مقادیر	ضرائب
۴۷۱۹۱۸۸۲	K_1
۴۷۱۹۱۸۸۲	K_2
۴۶۹۳۴۰۸۵۲	K_3

همچنین مشخصات مکانیکی مدل‌های بررسی شده در این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مدل‌های بررسی شده

استحکام نهایی (MPa)	نسبت پواسون	(GPa) مدول یانگ	جنس	جزء
۲۱۰	۰/۳۳	۷۳/۰۸	AL2024-T3	Shell
۲۸۰	۰/۳۳	۷۱/۷۱	AL7075-T6	Rings & Stringers

۶- بررسی اثر نوع اتصال بر بار کمانش

در ابتدا، نتایج روش تحلیلی و عددی در حالت استفاده از جوش (یا چسب) برای اتصال تقویتی‌ها به پوسته، مقایسه شده و راستی آزمایشی صورت گرفته است، بعد از حصول اطمینان از نتایج، مقادیر بار بحرانی کمانش در دو نوع اتصال جوش (یا چسب) و پرچ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

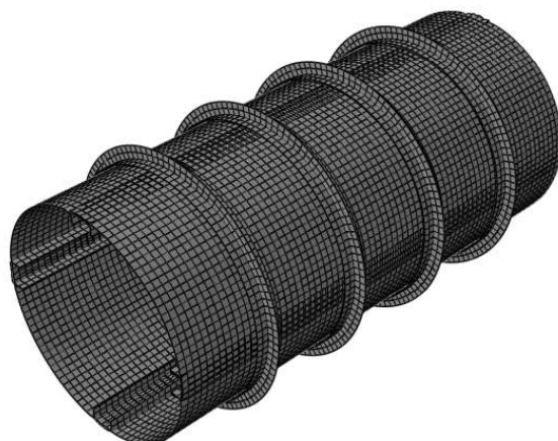
۶-۱- اتصال از نوع جوش (یا چسب) - اعتبارسنجی نتایج روش عددی

در اتصال از نوع جوش (یا چسب)، محاسبات روش تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی متلب انجام شده است، و همچنین در روش عددی، شبیه‌سازی مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. با انجام آزمون همگرایی مش، تعداد گره و المان و نوع المان مناسب برای مدل بررسی شده شکل (۳) در اتصال از نوع جوش (یا چسب)، به ترتیب ۱۱۲۴۷ و ۱۰۴۵۶ و S4R در نظر گرفته شده و نتایج نهایی روش‌های تحلیلی و عددی در جدول (۳) آمده است. با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و عددی مشاهده می‌گردد که دقت نتایج روش عددی قابل قبول می‌باشد. شکلهای (۴) و (۵) مود اول و دوم کمانش را برای مدل بررسی شده با اتصال از نوع جوش (یا چسب) نشان می‌دهند.

مشخصات هندسی پوسته و تقویتی‌ها در بررسی تأثیر نوع اتصال بر رفتار کمانش طبق رابطه (۱۹) در نظر گرفته شده است.

$$\frac{R}{h} = 60.500, \frac{R}{L} = 0.227, \frac{R_r}{t} = 73.900, \frac{d_r}{b_r} = 0.500$$

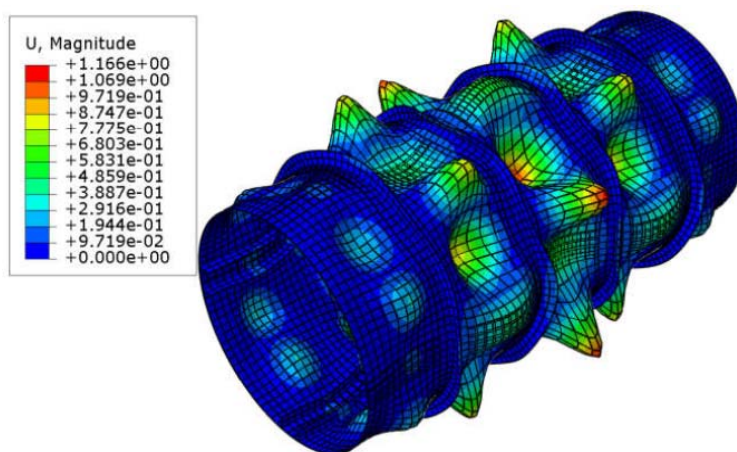
$$\frac{L_s}{t} = 320, \frac{d_s}{b_s} = 0.500 \quad (19)$$



شکل ۳- نمایی از پوسته تقویت شده مش زده شده در اتصال از نوع جوش ($N_r = 4, N_s = 4$)

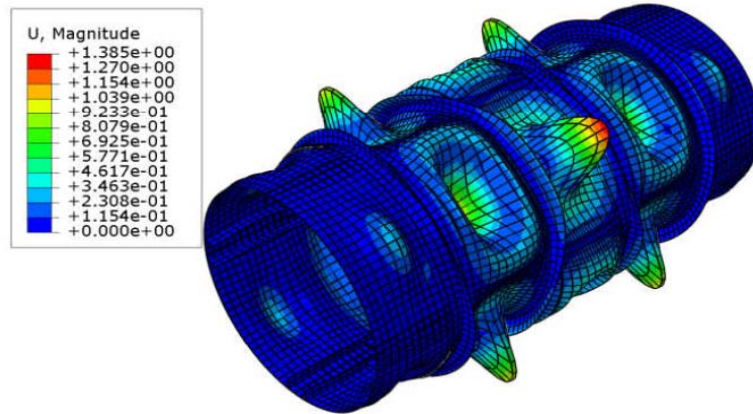
جدول ۳- مقایسه بار کمانش در حالت اتصال از نوع جوش (یا چسب) - اعتبارسنجی نتایج روش عددی

شماره مود	$P (\times 10^6 N)$		مقدار خطا (%)
	روش تحلیلی	روش عددی	
اول	۴/۵۸۷۶	۴/۶۷۲۸	۱/۸۶
دوم	۴/۷۹۹۳	۴/۶۸۰۸	۲/۶۷



شکل ۴- مود اول کمانش با اتصال از نوع جوش (یا چسب) ($P = 4/6728 \times 10^6 N$)

همانطور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، کمانش به صورت موضعی و بیشترین تغییر مکان، بین تقویتی‌ها می‌باشد.



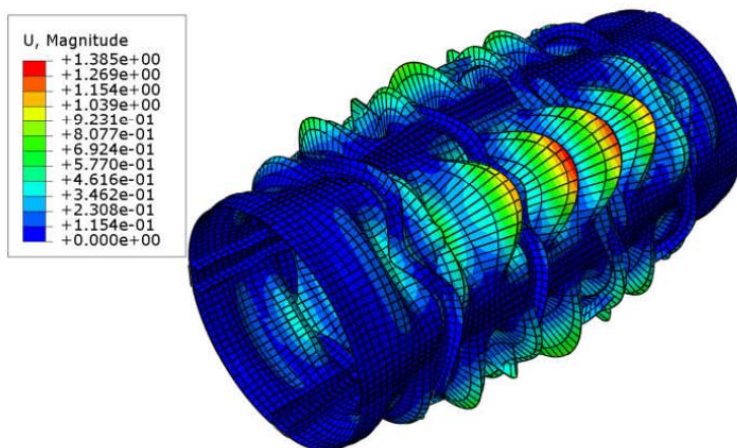
شکل ۵- مود دوم کمانش با اتصال از نوع جوش (یا چسب) ($P = 4/68.08 \times 10^6 N$)

۶-۲- اتصال از نوع پرچ

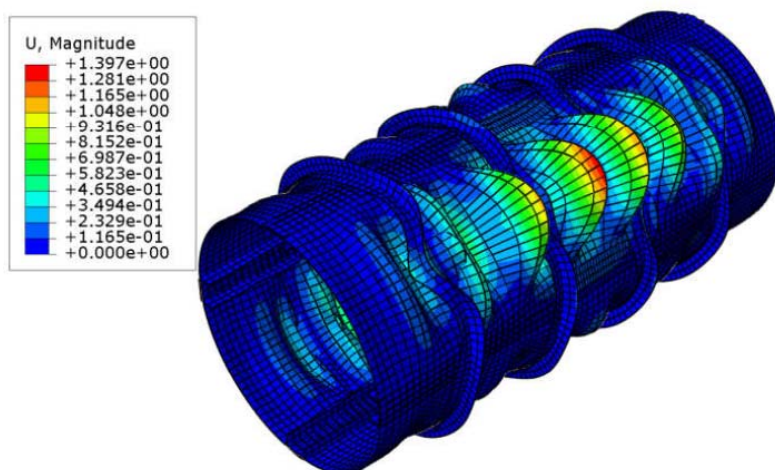
در این مرحله، رفتار کمانش پوسته تقویت شده در حالت اتصال پرچ، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و مقادیر بار کمانش از طریق تحلیل المان محدود بدست آمده است. با انجام آزمون همگرایی مش، تعداد گره و المان و نوع المان مناسب برای پوسته و تقویتی‌ها در اتصال از نوع پرچ به ترتیب ۱۳۳۶۰ و ۱۲۵۸۰ و S4R در نظر گرفته شده است. تعداد پرچ‌های استفاده شده برای اتصال در مدل بررسی شده برای هر تقویت‌کننده طولی به طور مجزا ۵ عدد، برای هر تقویت‌کننده محیطی به طور مجزا ۸ عدد و برای سطوح مشترک بین هر تقویت‌کننده طولی با تقویت‌کننده‌های محیطی ۴ عدد در نظر گرفته شده است که در مجموع ۶۸ عدد پرچ برای اتصال تقویت‌کننده‌ها به پوسته در نظر گرفته شده است. شکل (۶) و (۷) به ترتیب مود اول و دوم کمانش را در اتصال از نوع پرچ نشان می‌دهد. همچنین مقدار بار بحرانی کمانش با اتصال از نوع پرچ در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر بار بحرانی کمانش برای اتصال از نوع پرچ

شماره مود	$P(\times 10^6 N)$
اول	۴/۲۶۰۴
دوم	۴/۲۶۲۱



شکل ۶- مود اول کمانش با اتصال از نوع پرچ ($P = ۴/۲۶۰۴ \times ۱۰^۶ N$)



شکل ۷- مود دوم کمانش با اتصال از نوع پرچ ($P = ۴/۲۶۲۱ \times ۱۰^۶ N$)

همانند نتایج بدست آمده در اتصال از نوع جوش، رفتار کمانش در شکل‌های (۶) و (۷) به صورت موضعی و بیشترین تغییر مکان، بین تقویتی‌ها می‌باشد.

۳-۶- مقایسه بار کمانش با تغییر نوع اتصال

در این بخش بار کمانش پوسته تقویت شده با تغییر نوع اتصال تقویت‌کننده‌ها به پوسته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بار کمانش برای دو نوع اتصال جوش (یا چسب) و پرچ در جدول (۵) با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ همانطور که در نتایج جدول (۵) مشاهده می‌شود بار کمانش پوسته تقویت شده با اتصال از نوع جوش (یا چسب) در حدود ۹٪ بیشتر از اتصال از نوع پرچ، می‌باشد. دلیل این موضوع آن است که در اتصال از نوع جوش (یا چسب)، اتصال بین تقویت‌کننده‌ها و پوسته به طور پیوسته و کامل، اما در اتصال از نوع پرچ، اتصال بین تقویت‌کننده‌ها و پوسته به طور موضعی و ناقص می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه بار کمانش در دو نوع اتصال جوش (یا چسب) و پرچ

مود	$P(\times 10^6 N)$		اختلاف(%)
	جوش (یا چسب)	پرچ	
اول	۴/۶۷۲۸	۴/۲۶۰۴	۸/۸۳
دوم	۴/۶۸۰۸	۴/۲۶۲۱	۸/۹۵
سوم	۴/۶۸۵۴	۴/۲۶۲۸	۹/۰۱
چهارم	۴/۶۸۷۰	۴/۲۶۴۲	۹/۰۲
پنجم	۴/۶۹۵۲	۴/۲۶۵۰	۹/۱۶

۷- اثر تعداد تقویت کننده‌های طولی و محیطی بر بار کمانش

برای بررسی تأثیر تعداد تقویت کننده‌های طولی و محیطی در ابتدا تعداد تقویت کننده‌های محیطی با اتصال از نوع جوش، ثابت در نظر گرفته شده و تعداد تقویت کننده‌های طولی تغییر داده شده و سپس با ثابت در نظر گرفتن تعداد تقویت کننده‌های طولی، تعداد تقویت کننده‌های محیطی تغییر داده شده است تا اثر هر یک از انواع تقویتی بر مقدار بار کمانش مشخص شود. با انجام آزمون همگرایی مش تعداد گره و المان و نوع المان مناسب برای پوسته و تقویتی‌ها در این مدل شکل (۸) در اتصال از نوع جوش (یا چسب) به ترتیب ۳۴۱۴۵ و S4R و ۳۱۴۴۸ در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. مشخصات هندسی پوسته و تقویتی‌ها در بررسی تأثیر نوع اتصال بر رفتار کمانش طبق رابطه (۲۰) در نظر گرفته شده است.

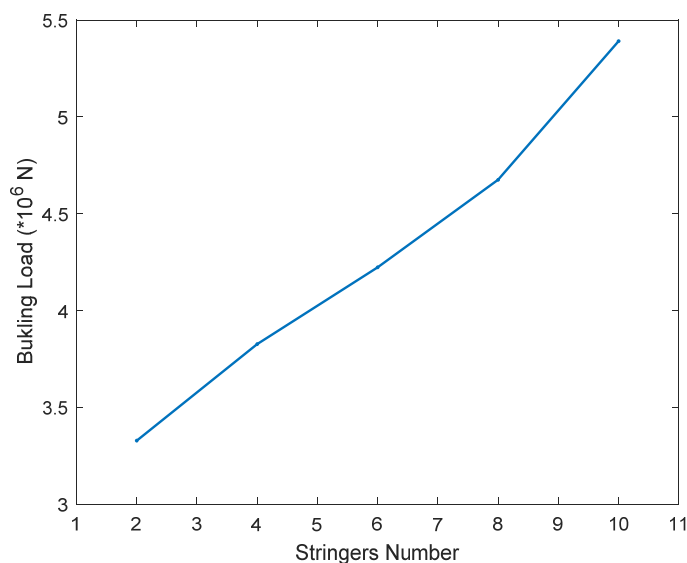
$$\frac{R}{h} = 83.833, \frac{R}{L} = 0.251, \frac{R_r}{t} = 84.333, \frac{d_r}{b_r} = 0.500$$

$$\frac{L_s}{t} = 333.333, \frac{d_s}{b_s} = 0.750 \quad (20)$$

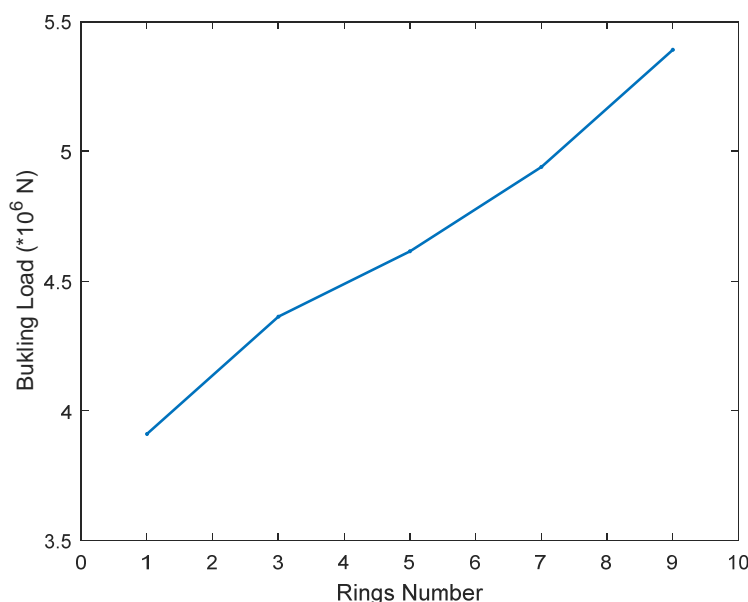


شکل ۸- نمایی از پوسته تقویت شده مش زده شده در اتصال از نوع جوش

$$(N_r = 9, N_s = 10)$$



شکل ۹- اثر تعداد تقویت کننده‌های طولی بر بار کمانش



شکل ۱۰- اثر تعداد تقویت کننده‌های محیطی بر بار کمانش

همانطور که در نمودارهای شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، هنگامی که با ثابت ماندن تعداد تقویت کننده‌های محیطی، تعداد تقویت کننده‌های طولی افزایش یابد، بار کمانش نیز افزایش می‌یابد به طوری که به ازای افزودن ۲ عدد تقویت کننده طولی، بار کمانش به طور میانگین ۱۱/۳۴٪ افزایش می‌یابد. همچنین در شرایطی که با ثابت ماندن تعداد تقویت کننده‌های طولی، تعداد تقویت کننده‌های محیطی افزایش یابد، بار کمانش نیز افزایش می‌یابد به طوری که در قبال افزودن ۲ عدد تقویت کننده محیطی، بار کمانش به طور میانگین ۷/۶۹٪ افزایش می‌یابد. علت اینکه بار کمانش به ازای افزودن تعداد تقویت کننده طولی افزایش بیشتری نسبت به حالتی که تعداد تقویت کننده محیطی افزایش می‌یابد، دارد، آن است که هنگامی که نیروی اعمالی

به پوسته تقویت شده، محوری باشد، تقویت کننده‌های طولی اثر بیشتری در جلوگیری از کمانش و تغییر شکل پوسته ایجاد می‌کنند و به بیانی دیگر در حالتی که نیروی اعمالی به پوسته تقویت شده، محوری باشد، اتصال تقویت کننده‌های طولی، بیشتر و مستحکم‌تر از اتصال تقویت کننده‌های محیطی در راستای محور (طول) استوانه می‌باشد، به همین دلیل، تقویت کننده‌های طولی اثر بیشتری در افزایش بار کمانش در این حالت دارند.

۸- بررسی اثر ضخامت و شکل سطح مقطع تقویتی‌ها بر بار کمانش

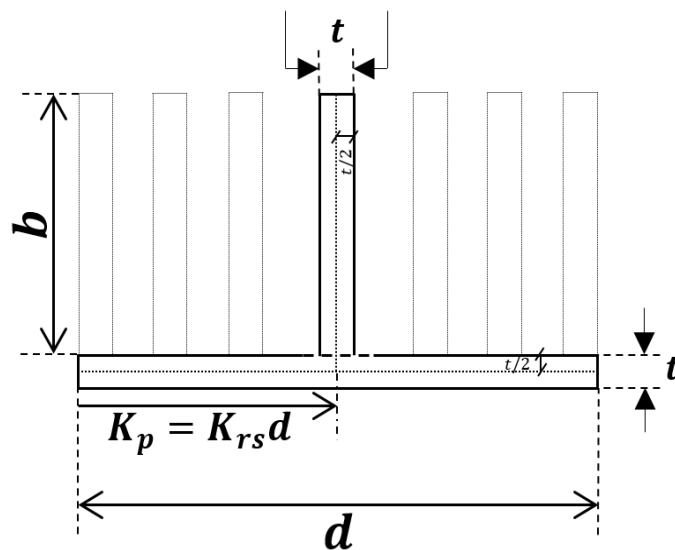
در این قسمت اثر تغییر ضخامت و شکل سطح مقطع تقویت کننده‌ها بر بار کمانش بررسی می‌شود، برای این منظور ضخامت تقویت کننده‌های طولی و محیطی را در هر یک از شکل‌های سطح مقطع که طبق پارامتر K_{rs} ایجاد می‌شوند شکل (۱۱)، تغییر داده تا اثر ضخامت و شکل سطح مقطع بر بار کمانش مشخص شود. نمودار شکل (۱۲) نتایج بدست آمده از تحلیل را نمایش می‌دهد.

با در نظر گرفتن $d = 40 \text{ mm}$ ، مقادیر K_p و K_{rs} طبق رابطه (۲۱) در نظر گرفته می‌شوند؛

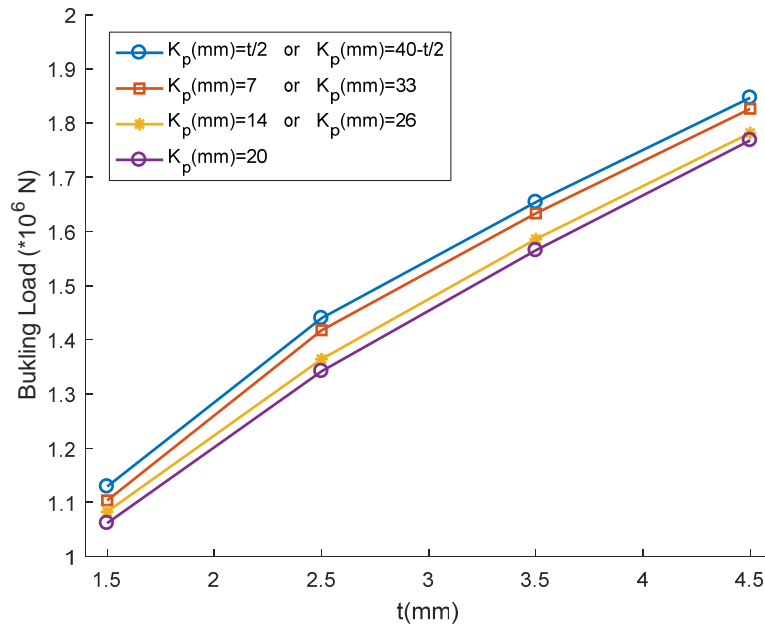
$$K_{rs} = \frac{1}{40} \left[\frac{t}{2} \quad 7 \quad 14 \quad 20 \quad 26 \quad 33 \quad 40 - \frac{t}{2} \right]$$

$$K_p = \left[\frac{t}{2} \quad 7 \quad 14 \quad 20 \quad 26 \quad 33 \quad 40 - \frac{t}{2} \right] \quad (21)$$

همانطور که در نمودار شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت تقویتی‌ها، بار کمانش نیز افزایش می‌یابد به طوری که می‌توان با افزایش ۴۰ درصدی ضخامت تقویتی‌ها، بار کمانش را به اندازه ۲۸/۰۴ درصد افزایش داد. همچنین طبق نتایج بدست آمده، بیشترین بار کمانش هنگامی حاصل می‌شود که پارامتر K_{rs} برابر با $\frac{t}{d}$ باشد که در واقع بیانگر سطح مقطع L می‌باشد.



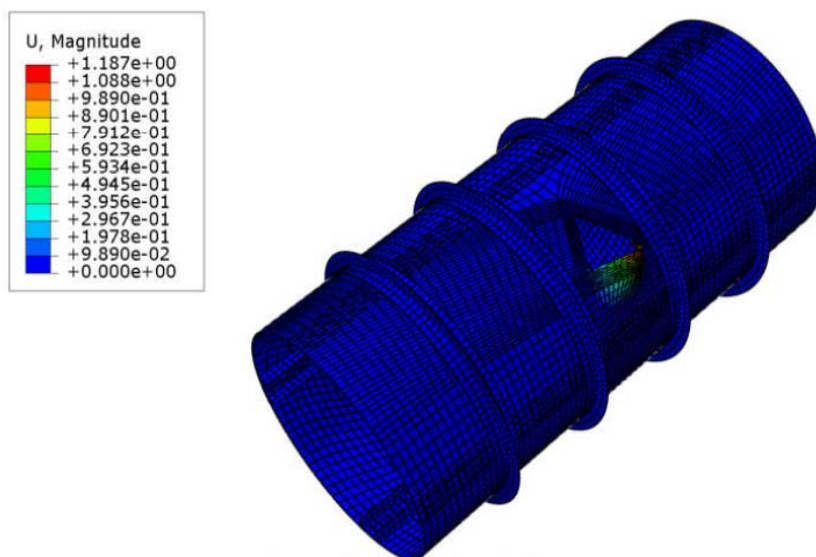
شکل ۱۱- نحوه ایجاد شکل‌های سطح مقطع تقویتی‌ها با تغییر پارامتر K_{rs}



شکل ۱۲- نمودار اثر ضخامت و شکل سطح مقطع تقویتی‌ها بر بار کمانش

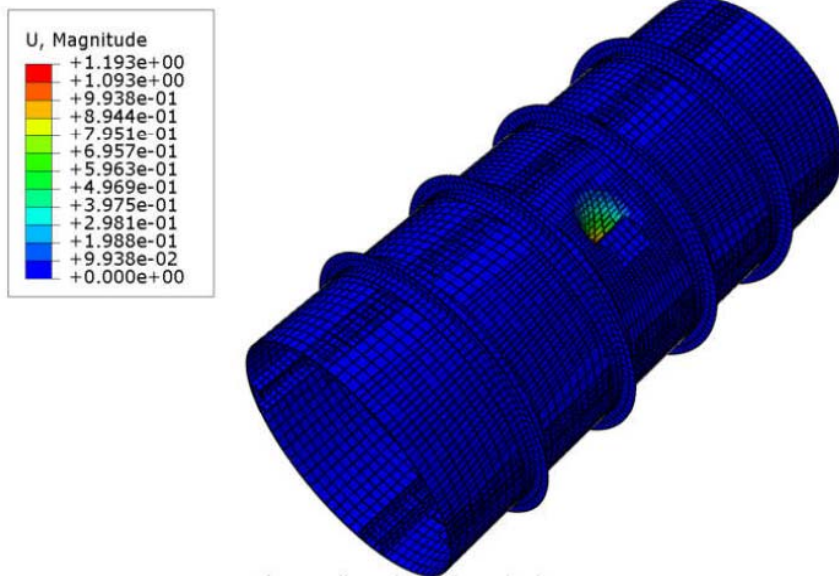
۹- اثر ضخامت پوسته و شکل حفره در بار کمانش

بر خلاف پوسته‌های استوانه‌ای کامل (بدون حفره) که تحقیقات بسیاری در مورد آن‌ها انجام شده است و تئوری‌های مختلفی برای آنالیز آن‌ها وجود دارد، پوسته‌های دارای حفره به دلیل پیچیدگی‌هایی که دارند کمتر به صورت تحلیلی و حتی نیمه تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و بیشتر تحقیقات صورت گرفته با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. بنابراین در این قسمت از حل عددی به کمک نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

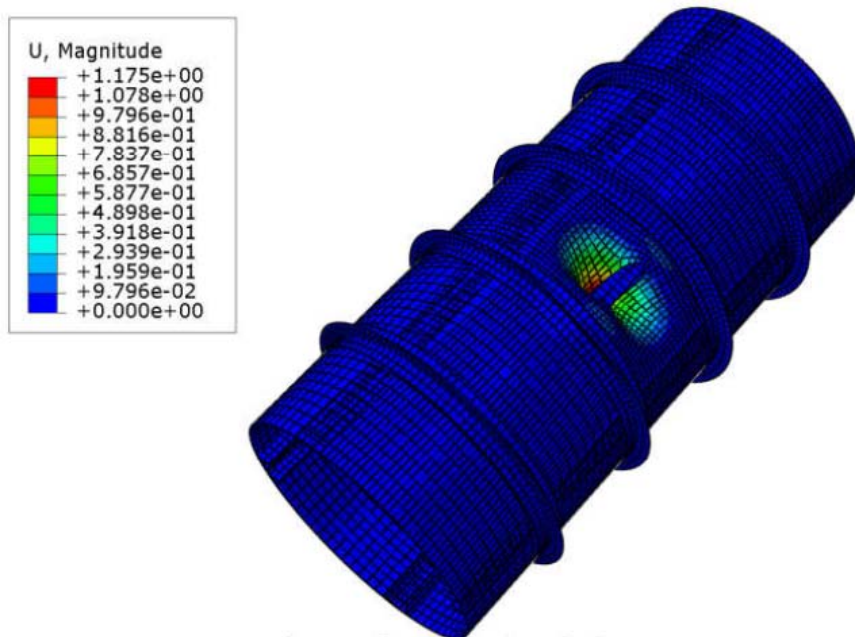


شکل ۱۳- مود اول کمانش پوسته تقویت شده با حفره مثلثی و $h = 4/5 \text{ mm}$

$$(P = 2/640.4 \times 10^6 \text{ N})$$



شکل ۱۴- مود اول کمانش پوسته تقویت شده با حفره مربعی و $h = 4/5 \text{ mm}$
 $(P = 3/5516 \times 10^6 \text{ N})$



شکل ۱۵- مود اول کمانش پوسته تقویت شده با حفره دایره‌ای و $h = 4/5 \text{ mm}$
 $(P = 3/8626 \times 10^6 \text{ N})$

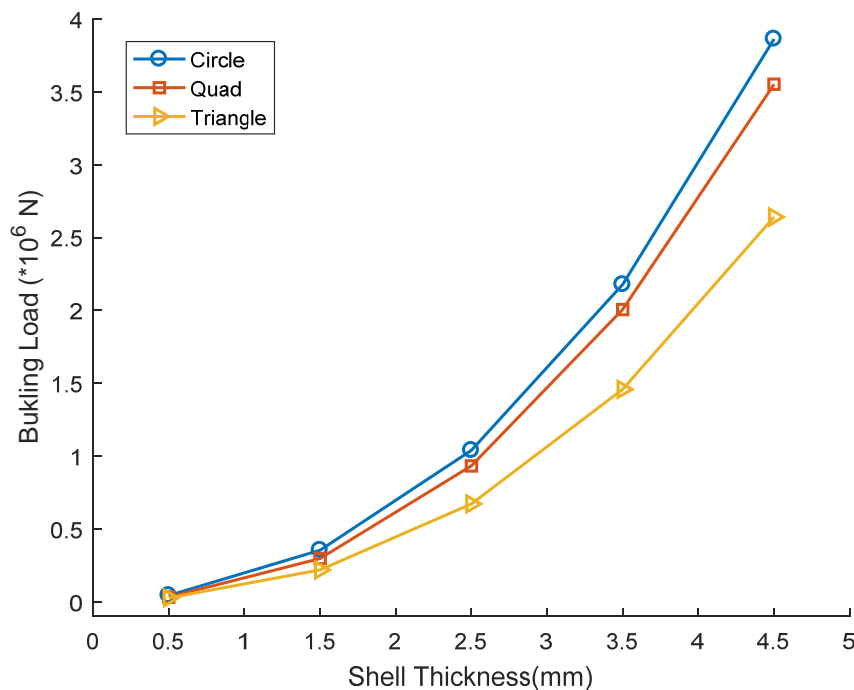
لازم به ذکر است که در این پژوهش روابط تحلیلی در حالت پوسته استوانه‌ای تقویت شده استخراج شده است و با نتایج عددی مستخرج از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است که نشان دهنده دقت قابل قبول می‌باشد. لذا با توجه به اینکه شرایط مرزی، بارگذاری و نوع و اندازه المان در حالت حفره‌دار نیز مانند بدون حفره در نظر گرفته شده است، می‌توان با اطمینان، صحت نتایج عددی بدست آمده در حالت حفره‌دار را تأیید نمود.

در این بخش در مرکز ارتفاع پوسته تقویت شده با اتصال از نوع جوش، یک حفره با شکل‌های مختلف دایره، مربع و مثلث با گوشه‌های گرد شده با مساحت رویه یکسان ایجاد شده و مقادیر بار کمانش آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. شکل‌های (۱۳-۱۵) مود اول کمانش را برای پوسته تقویت شده با اشکال مختلف حفره نشان می‌دهد. مقادیر بار بحرانی کمانش برای اشکال مختلف حفره (دایره، مثلث، مربع) برای ضخامت‌های مختلف پوسته در جدول (۶) آورده شده و مقایسه بین آن‌ها در نمودار شکل (۱۶) انجام شده است.

جدول ۶- مقادیر بار بحرانی کمانش مود اول پوسته تقویت شده

با اتصال از نوع پرچ با شکل حفره‌های دایره، مثلث، مربع

h(mm)	$P(\times 10^6 N)$		
	دایره	مثلث	مربع
۰/۵	۰/۰۴۳۳	۰/۰۲۶۴	۰/۰۳۲۱
۱/۵	۰/۳۵۴۴	۰/۲۱۸۵	۰/۲۹۷۰
۲/۵	۱/۰۳۹۰	۰/۶۷۱۷	۰/۹۳۲۶
۳/۵	۲/۱۷۷۱	۱/۴۵۸۰	۲/۰۰۵۵
۴/۵	۳/۸۶۲۶	۲/۶۴۰۴	۳/۵۵۱۶



شکل ۱۶- نمودار اثر ضخامت پوسته و نوع شکل حفره بر بار کمانش

همانطور که در نتایج جدول (۶) و نمودار شکل (۱۶) مشاهده می‌شود بیشترین بار بحرانی کماتش در ضخامت‌های مختلف پوسته، مربوط به حفره با شکل دایره می‌باشد، همچنین با افزایش ضخامت پوسته، بار بحرانی کماتش در پوسته‌های تقویت شده با حفره‌های مختلف افزایش می‌یابد. بعلاوه اختلاف بین بار کماتش حفره‌های مختلف با افزایش ضخامت پوسته، افزایش می‌یابد.

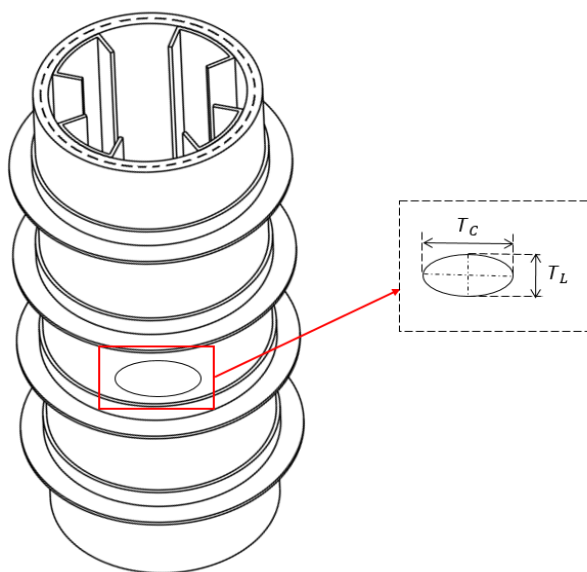
۱۰- بررسی اثر نسبت نقص بر بار کماتش

در این قسمت تأثیر نسبت نقص بر مقدار بار کماتش برای دو شکل بیضی و مستطیل بررسی شده است که در هر شکل حفره، مقدار مساحت رویه حفره ثابت مانده و با تغییر نسبت نقص، مقادیر بار کماتش مقایسه شده‌اند. شکل (۱۷) و (۱۸) به ترتیب نمایی از پوسته تقویت شده با شکل حفره بیضی و مستطیل را نشان می‌دهد. همچنین روابط و مشخصات هندسی هر دو حفره بیضی و مستطیل متناسب با هر نسبت نقص، در ضمیمه مقاله آمده است.

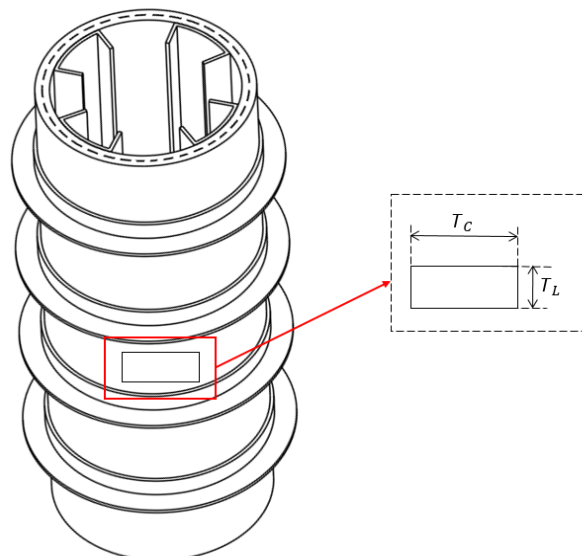
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نسبت نقص حفره‌های بیضی و مستطیل طبق رابطه (۲۰)، نسبت بیشترین اندازه حفره در راستای محیطی به بیشترین اندازه حفره در راستای طولی تعریف می‌شود؛

$$r_{Cutout} = \frac{T_C}{T_L} \quad (22)$$

برای این کار، در پوسته تقویت شده برای هر شکل حفره، ۸ نسبت نقص طبق جدول (۷)، با ثابت نگه داشتن مساحت رویه حفره (مساحت رویه جدا شده از پوسته تقویت شده، همانند شکل (۱۷) و (۱۸)، در نظر گرفته شده و مقدار بار کماتش در هر مورد بدست آمده است. نتایج بررسی و مقایسه در جدول (۷) و نمودار شکل (۱۹) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۷- شماتیک پوسته تقویت شده به همراه حفره بیضی شکل



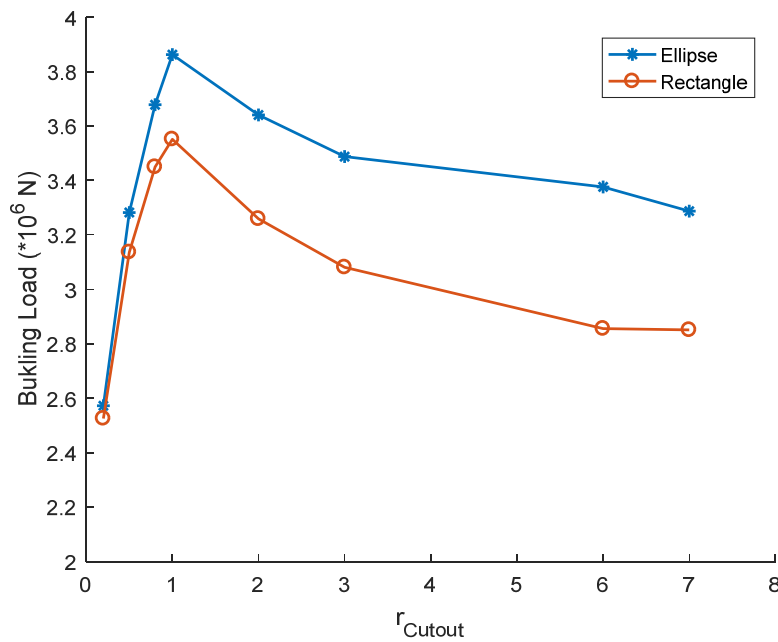
شکل ۱۸- شماتیک پوسته تقویت شده به همراه حفره مستطیل شکل

جدول ۷- تأثیر نسبت نقص بر مقدار بار بحرانی کمانش

مود اول برای دو حفره بیضی و مستطیل شکل

r_{Cutout}	$P(\times 10^6 N)$	
	بیضی	مستطیل
۰/۲	۲/۵۷۲۶	۲/۵۲۵۴
۰/۵	۳/۲۸۲۴	۳/۱۳۶۵
۰/۸	۳/۶۷۸۴	۳/۴۴۹۶
۱	۳/۸۶۲۶	۳/۵۵۱۶
۲	۳/۶۴۰۸	۳/۲۵۹۱
۳	۳/۴۸۸۰	۳/۰۸۱۰
۶	۳/۳۷۶۵	۲/۸۵۵۷
۷	۳/۲۸۷۵	۲/۸۵۱۰

همانطور که در جدول (۷) و نمودار شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، تا قبل از نسبت نقص $r_{Cutout} = 1$ با افزایش نسبت نقص، بار کمانش، افزایش و بعد از نسبت نقص $r_{Cutout} = 1$ با افزایش نسبت نقص بار کمانش، کاهش می‌یابد. علت این موضوع آن است که تا قبل از نسبت نقص $r_{Cutout} = 1$ با افزایش نسبت نقص، مساحت جانبی حفره کاهش و بار کمانش افزایش می‌یابد تا در نسبت نقص $r_{Cutout} = 1$ مساحت جانبی به حداقل مقدار خود می‌رسد و بیشترین بار کمانش حاصل می‌شود و بعد از نسبت نقص $r_{Cutout} = 1$ با افزایش نسبت نقص، مساحت جانبی حفره افزایش و بار کمانش کاهش می‌یابد. روند تغییر مساحت جانبی حفره‌های بیضی و مستطیل به ترتیب در جدول‌های (۹) و (۱۰) در ضمیمه آورده شده است.



شکل ۱۹- نمودار اثر نسبت نقص حفره بر بار کمانش مود اول پوسته تقویت شده

همچنین بیشترین بار کمانش هنگامی در پوسته تقویت شده حاصل می‌شود که نسبت نقص برابر با $r_{Cutout} = 1$ و شکل حفره دایره و یا مربع باشد که از بین شکل حفره دایره و مربع، بیشترین بار کمانش همانند قسمت قبل متعلق به حفره با شکل دایره می‌باشد.

۱۱- بررسی اثر اندازه حفره بر بار کمانش

در این بخش با تغییر اندازه حفره در سه شکل دایره، مربع، مثلث، الگوی تغییرات بار کمانش ارزیابی و مقایسه شده است. اندازه مساحت حفره در نمونه اول برابر با $A_{Cutout}^1 = 38/485 \text{ Cm}^2$ و در نمونه دوم با کاهش $26/53$ درصدی برابر با $A_{Cutout}^2 = 28/274 \text{ Cm}^2$ می‌باشد. نتایج بار کمانش برای این دو نمونه در جدول (۸) آمده است. همانطور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود با کاهش $26/51$ درصدی اندازه حفره، بار کمانش به طور میانگین $13/56$ درصد افزایش می‌یابد. بدیهی است با کاهش اندازه حفره، بار کمانش افزایش می‌یابد.

جدول ۸- اثر اندازه حفره (دایره، مثلث، مربع) بر بار کمانش

$A_{Cutout} (\text{Cm}^2)$	$P (\times 10^6 N)$		
	دایره	مثلث	مربع
38/485	3/370.2	2/250.1	3/0845
28/274	3/8626	2/640.4	3/5516
اختلاف بار کمانش (%)	12/75	14/78	13/15

۱۲- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده مورد بررسی قرار گرفته و اثر برخی پارامترهای مؤثر بر رفتار کمانش این گونه سازه‌ها از جمله نوع اتصال تقویت کننده‌ها به پوسته (جوش یا چسب و پرچ)، تعداد، ضخامت و شکل سطح مقطع تقویت کننده‌های طولی و محیطی، ضخامت پوسته، شکل و اندازه حفره ایجاد شده در پوسته و نسبت نقص حفره ارزیابی شده است. برخی از نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- با انجام مقایسه بین نتایج روش تحلیلی و روش المان محدود می‌توان نتیجه گرفت که نتایج المان محدود برای تحلیل و بررسی رفتار کمانش این گونه سازه‌ها قابل اعتماد هستند و درصد خطا در محدوده مجاز قرار دارد.

۲- طبق بررسی انجام شده، نحوه اتصال تقویتی‌ها به پوسته، تأثیر بسزایی در مقدار بار بحرانی کمانش خواهد داشت، بطوریکه در مدل بررسی شده بار کمانش اتصال از نوع جوش (یا چسب) حدود ۹٪ از بار کمانش اتصال از نوع پرچ بیشتر بوده و برای دلیل این رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده می‌توان به نحوه اتصال کامل تر بین پوسته و تقویتی‌ها در حالت اتصال جوش اشاره کرد.

۳- با افزایش تعداد تقویت کننده‌های طولی و محیطی بار کمانش افزایش می‌یابد. بطوریکه با افزودن ۲ عدد تقویت کننده طولی بار کمانش حدود ۱۱/۳۴٪ و با افزودن ۲ عدد تقویت کننده محیطی بار کمانش حدود ۷/۶۹٪ افزایش می‌یابد.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که بار محوری به پوسته وارد شود اثر تقویت کننده‌های طولی در افزایش بار کمانش بیشتر از اثر تقویت کننده‌های محیطی می‌باشد.

۴- در نتایج بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که با افزایش ۴۰ درصدی ضخامت تقویتی‌ها بار کمانش می‌تواند تا ۲۸/۰۴ درصد افزایش یابد. همچنین با تغییر مکان ارتفاع تقویت کننده‌ها بر روی عرض آن‌ها شکل (۱۱) بار کمانش وقتی به بیشترین حالت می‌رسد که پارامتر K_p برابر با $t/2$ یا $d - t/2$ باشد و به بیان دیگر، شکل سطح مقطع تقویتی‌ها L باشد.

۵- هنگامی که در پوسته استوانه‌ای تقویت شده، اشکال مختلف حفره (دایره، مربع، مثلث) ایجاد شود، بیشترین بار کمانش در ضخامت‌های مختلف پوسته، مربوط به حفره با شکل دایره می‌باشد، دلیل این موضوع آن است که اولاً هنگامی که شکل حفره ایجاد شده در پوسته تقویت شده، دایره‌ای باشد، مساحت جانبی ($Scutout$) آن کمتر از حفره با شکل‌های مربع و مثلث می‌باشد و به همین دلیل مساحت سطح مقطع پوسته در اطراف حفره دایره‌ای بیشتر از حفره‌های مربع و مثلث می‌باشد و در نتیجه بار کمانش بیشینه می‌شود و دوماً در حفره‌های مربعی و مثلثی به دلیل وجود تمرکز تنش بیشتر نسبت به حفره دایره‌ای، تغییر مکان بیشتری را به ازای نیروی اعمالی به وجود می‌آورد. همچنین با افزایش ضخامت پوسته، بار بحرانی کمانش در پوسته‌های تقویت شده با شکل حفره‌های مختلف افزایش می‌یابد، بعلاوه اختلاف بین بار کمانش حفره‌های مختلف با افزایش ضخامت پوسته، افزایش می‌یابد.

۶- پوسته‌های تقویت شده‌ای که دارای شکل حفره بیضی و یا مستطیل هستند، در صورتی دارای بیشترین بار کمانش می‌شوند که نسبت نقص آن‌ها برابر با $r_{Cutout} = 1$ باشد که با این شرط شکل حفره دایره و مربع

دارای بیشترین بار کمانش خواهند بود که از بین دایره و مربع نیز طبق نتایج ذکر شده، شکل حفره دایره دارای بیشترین بار کمانش می‌باشد.

۷- با بررسی روی اثر اندازه حفره بر بار کمانش مشاهده گردید که با کاهش ۲۶/۵۱ درصدی اندازه حفره با سه شکل (دایره، مربع، مثلث) بار کمانش به طور میانگین ۱۳/۵۶ درصد افزایش می‌یابد.

ضمیمه:

روابط و مشخصات هندسی مربوط به حفره‌های بیضی و مستطیل بصورت زیر است.

روابط مربوط به شکل حفره بیضی:

$$A_{Cutout}^i = \pi \times T_C^i \times T_L^i, \quad r_{Cutout}^i = \frac{T_C^i}{T_L^i}$$

$$A_{Cutout}^j = \pi \times T_C^j \times T_L^j, \quad r_{Cutout}^j = \frac{T_C^j}{T_L^j}$$

$$A_{Cutout}^i = A_{Cutout}^j \rightarrow \begin{cases} T_C^j = \sqrt{\frac{r_{Cutout}^j}{r_{Cutout}^i}} \times T_C^i \\ T_L^j = \sqrt{\frac{r_{Cutout}^i}{r_{Cutout}^j}} \times T_L^i \end{cases}$$

$$P_{Cutout} = \frac{S_{Cutout}}{h} \quad (23)$$

جدول ۹- مشخصات هندسی شکل حفره بیضی

r_{Cutout}	T_C (Cm)	T_L (Cm)	P_{Cutout} (Cm)
۰/۲	۱/۳۴۱۶	۷۰۸۲/۶	۱۵/۱۹۷۰
۰/۵	۲/۱۲۱۳	۴/۲۴۲۶	۱۰/۵۳۷۱
۰/۸	۲/۶۸۳۳	۳/۳۵۴۱	۹/۵۴۱۹
۱	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۹/۴۲۴۸
۲	۴/۲۴۲۶	۲/۱۲۱۳	۱۰/۵۳۷۱
۳	۵/۱۹۶۲	۱/۷۳۲۱	۱۲/۱۶۷۵
۶	۷/۳۴۸۵	۱/۲۲۴۷	۱۶/۵۴۹۴
۷	۷/۹۳۷۳	۱۳۳۹/۱	۱۷/۸۱۱۳

روابط مربوط به شکل حفره مستطیل:

$$A_{Cutout}^i = T_C^i \times T_L^i, \quad r_{Cutout}^i = \frac{T_C^i}{T_L^i}$$

$$A_{Cutout}^j = T_C^j \times T_L^j, \quad r_{Cutout}^j = \frac{T_C^j}{T_L^j}$$

$$A_{Cutout}^i = A_{Cutout}^j \rightarrow \begin{cases} T_C^j = \sqrt{\frac{r_{Cutout}^j}{r_{Cutout}^i}} \times T_C^i \\ T_L^j = \sqrt{\frac{r_{Cutout}^i}{r_{Cutout}^j}} \times T_L^i \end{cases}$$

$$P_{Cutout} = \frac{S_{Cutout}}{h} \quad (24)$$

جدول ۱۰- مشخصات هندسی شکل حفره مستطیل

r_{Cutout}	T_C (Cm)	T_L (Cm)	P_{Cutout} (Cm)
۰/۲	۲/۳۷۸۰	۱۱/۸۹۰۰	۲۸/۵۳۶۰
۰/۵	۳/۷۵۹۹	۷/۵۱۹۹	۲۲/۵۵۹۶
۰/۸	۴/۷۵۶۰	۵/۹۴۵۰	۲۱/۴۰۲۰
۱	۵/۳۱۷۴	۵/۳۱۷۴	۲۱/۲۶۹۶
۲	۷/۵۱۹۹	۳/۷۵۹۹	۲۲/۵۵۹۶
۳	۹/۲۰۹۹	۳/۰۷۰۰	۲۴/۵۵۹۸
۶	۱۳/۰۲۴۸	۲/۱۷۰۸	۳۰/۳۹۱۲
۷	۱۴/۰۶۸۴	۲/۰۰۹۸	۳۲/۱۵۶۴

مراجع

- [1] Singer, J., Baruch, M., and Harari, O., "On the Stability of Eccentrically Stiffened Cylindrical Shells under Axial Compression", International Journal of Solids and Structures, Vol. 3, pp. 445-470, (1967).
- [2] Najafzadeh, M.M., Hasani, A., and Khazaeinejad, P., "Mechanical Stability of Functionally Graded Stiffened Cylindrical Shells", Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, pp. 1151-1157, (2009).

- [3] Yoosefzadeh, S., Isvandzibaei, M.R., and Gheysari, M., "Buckling of FGM Thick-walled Cylindrical Shell Supported with Third Order Shear Theory under Uniform Axial and Lateral Loads", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 373-385, (2017). (In Persian).
- [4] Shahgholian, D., Raafat, M.R., and Rahimi, G.H., "Prediction of the Critical Buckling Load of Composite Cylindrical Shells by using Vibration Correlation Technique", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, pp. 359-368, (2018).
- [5] Nobakht Namin, A., "Buckling of Stiffened Thin-walled Cylindrical Shells under Axial Compression with Symmetrical Imperfections", *Journal of Structural Engineering and Geotechniques*, Vol. 2, pp. 19-28, (2012).
- [6] Jiao, P., Chen, Z., Xu, F., Tang, X., and Su, W., "Effects of Ringed Stiffener on the Buckling Behavior of Cylindrical Shells with Cutout under Axial Compression: Experimental and Numerical Investigation", *Thin-Walled Structures*, Vol. 123, pp. 232-243, (2018).
- [7] Wen, C., Wen-Min, R., and Wei, Z., "Buckling Analysis of Ring-stiffened Cylindrical Shells with Cutouts by Mixed Method of Finite Strip and Finite Element", *Computers & Structures*, Vol. 53, pp. 811-816, (1994).
- [8] Tian, J., Wang, C., and Swaddiwudhipong, S., "Elastic Buckling Analysis of Ring-stiffened Cylindrical Shells under General Pressure Loading via the Ritz Method", *Thin-Walled Structures*, Vol. 35, pp. 1-24, (1999).
- [9] Ghasemi, B., and Jafari, A.A., "The Survey of the Effect of Stiffeners on Buckling Load of Composite Cylindrical Shell", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 19, pp. 139-149, (2008). (In Persian).
- [10] Shahani, A.R., Moayeri, H., and Salari, M., "Fatigue Analysis of a Reinforced Cylindrical Shell under Multi-axial Loading", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, pp. 15-29, (2014). (In Persian).
- [11] Talezadehlari, A., and Rahimi, G.H., "Buckling Analysis of Perforated Composite Cylindrical Shell using Generalized Differential Quadrature Method (GDQM)", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 385-396, (2018). (In Persian).
- [12] Arefi, M., Rahimi, G.H., and Khoshgoftar, M.J., "Exact Solution of a Thick Walled Functionally Graded Piezoelectric Cylinder under Mechanical, Thermal and Electrical Loads in the Magnetic Field", *Smart Structures and Systems*, Vol. 9, pp. 427-439, (2012).
- [13] Arefi, M., Rahimi, G.H., and Khoshgoftar, M.J., "Exact Solution of Functionally Graded Thick Cylinder with Finite Length under Longitudinally Non-uniform Pressure", *Mechanics Research Communications*, Vol. 51, pp. 61-66, (2013).
- [14] Loghman, A., Faegh, R.K., and Arefi, M., "The Effect of Axially Variable Thermal and Mechanical Loads on the 2D Thermoelastic Response of FG Cylindrical Shell", *Journal of Therm Stresses*, Vol. 39, pp. 1539-1559, (2016).

- [15] Abbasi, A.R., Arefi, M., and Vaziri Sereshk, M.R., "Two-dimensional Thermoelastic Analysis of FG Cylindrical Shell Resting on the Pasternak Foundation Subjected to Mechanical and Thermal Loads Based on FSDT Formulation", *Journal of Therm Stresses*, Vol. 39, pp. 554-570, (2016).
- [16] Arefi, M., Karroubi, R., and Irani-Rahaghi, M., "Free Vibration Analysis of Functionally Graded Laminated Sandwich Cylindrical Shells Integrated with Piezoelectric Layer", *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 37, pp. 821-834, (2016).
- [17] Arefi, M., Mohammadi, M., Tabatabaeian, A., Dimitri, R., and Tornabene, F., "Two-dimensional Thermo-elastic Analysis of FG-CNTRC Cylindrical Pressure Vessels", *Steel and Composite Structures*, Vol. 27, pp. 525-536, (2018).
- [18] Sadeghifar, M., Bagheri, M., and Jafari, A., "Multiobjective Optimization of Orthogonally Stiffened Cylindrical Shells for Minimum Weight and Maximum Axial Buckling Load", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 979-988, (2010).
- [19] Lam, K., and Loy, C., "Influence of Boundary Conditions and Fiber Orientation on the Natural Frequencies of Thin Orthotropic Laminated Cylindrical Shells", *Composite Structures*, Vol. 31, pp. 21-30, (1995).
- [20] Lam, K., and Loy, C., "Influence of Boundary Conditions for a Thin Laminated Rotating Cylindrical Shell", *Composite Structures*, Vol. 41, pp. 215-228, (1998).
- [21] Ghorbanpour Arani, A., Loghman, A., Mosallaie Barzoki, A., and Kolahchi, R., "Elastic Buckling Analysis of Ring and Stringer-stiffened Cylindrical Shells under General Pressure and Axial Compression via the Ritz Method", *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 2, pp. 332-347, (2010).
- [22] Swift, T., "Fracture Analysis of Stiffened Structure in Damage Tolerance of Metallic Structures: Analysis Methods and Applications", *ASTM International*, pp. 69-107, (1984).

فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت سطح حفره آم و زام	$A_{Cutout}^i, A_{Cutout}^j$
سطح مقطع تقویت کننده‌های محیطی و طولی	A_r, A_s
ارتفاع سطح مقطع تقویت کننده‌های محیطی و طولی (شکل (۱))	b_r, b_s
حداکثر دامنه توابع تغییر مکان صفحه میانی پوسته (ضرایب ریتز)	A, B, C
فاصله شعاعی بین صفحه میانی پوسته تا مرکز هندسی تقویت کننده‌های محیطی	c_r
خروج از مرکزیت‌های مرکز هندسی سطح مقطع تقویت کننده‌های طولی	c_s, e_s
عرض سطح مقطع تقویت کننده‌های محیطی و طولی (شکل (۱))	d_r, d_s
مدول یانگ پوسته، تقویت کننده‌های محیطی و طولی و پرچها (GPa)	E_{shell}, E_r, E_s, E_f

مدول برشی تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی	: G_r, G_s
ضخامت پوسته، تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی (شکل (۱))	: h, t
ممان اینرسی سطح مقطع تقویت‌کننده‌های محیطی حول محورهای (X, Z)	: $I_X^{(r)}, I_Z^{(r)}$
ممان اینرسی سطح مقطع تقویت‌کننده‌های طولی حول محورهای (θ, Z)	: $I_\theta^{(s)}, I_Z^{(s)}$
ممان اینرسی حاصل ضرب سطح مقطع تقویت‌کننده‌های طولی حول محورهای (θ, Z)	: $I_{\theta Z}^{(s)}$
ممان اینرسی قطبی سطح مقطع تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی	: J_r, J_s
طول پوسته و تقویت‌کننده‌های طولی	: L, L_s
تعداد موج‌های محیطی	n
تعداد تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی	: N_r, N_s
نیروی محوری وارد شده به پوسته تقویت شده	: P
شعاع دایره صفحه میانی پوسته و تقویت‌کننده‌های محیطی	: R, R_r
نسبت نقص حفره‌های بیضی و مستطیل	: r_{cutout}
مساحت و محیط جانبی حفره‌های بیضی و مستطیل	: S_{cutout}, P_{cutout}
بیشترین اندازه حفره در راستای طولی و محیطی (شکل (۱۷) و (۱۸))	: T_L, T_C
انرژی کرنشی پوسته، تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی	: $U_{shell}, U_{rings}, U_{stringers}$
تغییر مکان‌های پوسته در راستاهای مختصات اصلی (X, θ, Z)	: (u, v, w)
تغییر مکان صفحه میانی پوسته در راستاهای مختصات اصلی (X, θ, Z)	: (u_{ms}, v_{ms}, w_{ms})
انرژی پتانسیل ناشی از نیروی محوری P	: V_P
مختصات استوانه‌ای واقع در صفحه میانی پوسته	: (X, θ, Z)

نمادهای یونانی

مؤلفه‌های کرنش‌های عمودی و برشی در صفحه میانی پوسته	: $\varepsilon_{XX}^{(0)}, \varepsilon_{\theta\theta}^{(0)}, \gamma_{X\theta}^{(0)}$
تغییرات انحنای صفحه میانی پوسته	: $\eta_{XX}, \eta_{\theta\theta}$
پیچش صفحه میانی پوسته	: $\eta_{X\theta}$
نسبت پواسون پوسته و تقویتی‌ها	: ν
ضرایب ثابت وابسته به شرایط مرزی پوسته	: $\lambda_m, \sigma_m, \alpha_i$

Abstract

In this study, some parameters affecting the buckling load of stiffened cylindrical shells are investigated. These parameters include the type of connection stiffeners to the shell (welding or glue and rivet), the number, thickness and shape of the cross-sectional area of the longitudinal and circumferential stiffeners, the shell thickness, the shape and the imperfection ratio and size of the cutout created in the shell. For this purpose, both analytical and numerical methods have been used. In the analytical method, the energy method is used and in the numerical method, Abacus software is used. In this study, in addition to previous works, on how to attach stiffeners to the shell, the effect of imperfection ratio of elliptic and rectangular cutout and also the effect of some parameters related to longitudinal and circumferential stiffeners such as the effect of cross section shape and their number on the buckling load have been investigated separately.