پایداری پوسته های استوانه ای کامپوزیتی با تقویت محیطی تحت اثر بارهای ترکیبی

داود پورویس دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی امیرکبیر محمد زمان کبیر دانشیار دانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی امیر کبیر (تاریخ دریافت ۸۳/۹/۱۴، تاریخ تصویب ۸۴/۳/۲۱)

چکیدہ

کاربرد پوسته های استوانه ای کامپوزیتی در سازه های هوا فضا و دریایی رشد قابل توجهی داشته است. مقاله حاضر پایداری پوسته های استوانه ای با تقویت های حلقوی را مورد بررسی قرار می دهد. بار کمانش با کمک تحلیل غیر خطی هندسی و با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل های خمشی قبل از کمانش محاسبه می شود. فشار خارجی وارده به استوانه به دو صورت مرده با راستای ثابت و زنده (وابسته به تغییر شکل های خمشی قبل از کمانش محاسبه می شود. فشار خارجی وارده به استوانه به دو صورت مرده با راستای ثابت و زنده (وابسته به تغییر شکل های خمشی قبل از کمانش محاسبه می شود. فشار خارجی وارده به استوانه به دو صورت مرده با راستای ثابت و زنده (وابسته به تغییر شکل های خمشی قبل از کمانش محاسبه می شود. فشار خارجی وارده به استوانه به دو صورت مرده با راستای ثابت و زنده (وابسته به تغییر شکل های خمشی قبل از کمانش محاسبه می شود. مثار خارجی وارده به استوانه به دو صورت مرده با راستای ثابت و زنده (وابسته به تغییر شکل) در نظر گرفته می شود. روابط سینماتیکی بر اساس تئوری غیر خطی ساندرز^۱ به همراه تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول^۲ استوار می باشد. تغییر مکان ها و دوران های استوانه و تقویت های محیطی^۲ با کمک سری های فوریه مناسب بیان میشوند. پوسته تحت اثر همزمان فشار محوری و فشار جانبی خارجی قرار دارد. استخراج معادلات حاکم بر مبنای روش ریتز^۲ استوار بوده و معادلات خطی شده با کمک ترکیب مورش های نیوتن- رافسون و طول قوس^۵ حل می شوند. نتایج بصورت بار کمانش و منحنی های پس از کمانش برای لایه بندی های مختلف^۶ ارائه می گردد. همچنین تغییرات نیروهای اندرکنشی بین پوسته و تقویت کننده با تغییر بارهای وارده بررسی می شود.

واژه های کلیدی : پایداری، تقویت شده، کامپوزیت، تحلیل غیر خطی، ساندرز

مقدمه

پوسته استوانه ای تقویت شده به عنوان عنصر سازه ای در صنایع هوا فضا و دریایی شناخته شده می باشد. بدلیل اینکه این گونه سازه ها در محدوده سازه های جدار نازک قرار می گیرند، تحلیل کمانشی آنها یکی از معیارهای مهم طراحی محسوب می شود. گسیختگی پوسته های ساخته شده از مصالح پلاستیکی تقویت شده با مقاومت بالا معمولاً در محدوده کمانش الاستیک رخ می دهد.

تحقیقات گسترده ای در ارتباط با پایداری استوانه های تقویت شده انجام شده که می توان به موارد زیر اشاره کرد. Sridharan و همکاران [۱] کمانش و پس از کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی تقویت شده با تقویت های طولی را بررسی کردند. پانل فرض شده به اندازه کافی طویل انتخاب شده تا تاثیر شرایط انتهایی نادیده گرفته شود. در کاری مشابه Dawe و Wang [۲] پس از کمانش پوسته های کامپوزیتی را با روش نوار محدود^۲

برای مدل کردن سخت کننده های طولی مورد استفاده قرار گرفت. Arbocz و Hol [۳] تاثیر غیر خطی تغییر شکل های قبل از کمانش بر پیش بینی قابل اعتماد فشار کمانشی را بررسی کردند. Ley و همکاران [۴] کمانش پوسته های استوانه ای تقویت شده غیر ایزوتوپ دارای نقص اوليه^ را مطالعه كردند. المان هاي پوسته اي براي مدل کردن حلقه های تقویتی مورد استفاده قرار گرفت و اثر تغییر شکل های قبل از کمانش با کمک تحلیل غیر خطی جهت محاسبه بار بحرانی بکار رفت. Sridharan و Alberts [۵] کمانش پوسته های ارتوتروپ با تقویت های محیطی تحت اثر فشار هیدرواستاتیک را مورد ارزیابی قرار دادند. تمركز تحقيق آنها روى ميزان تاثير تغيير شكل های قبل از کمانش و مدل سازه ای بکار رفته ، روی فشار بحرانی بود. اغلب کارهای گزارش شده و تحقیقات انجام شده در ارتباط با کمانش و پس از کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی تقویت شده محدوده به روش اجزا محدود و استفاده از المان پوسته بوده است. در مطالعه ϕ_0 روی شکل معلومند. در همین شکل ، فشار جانبی p ، نیروی محوری P ، طول L ، ضخامت h و شعاع انحنای سطح میانی پوسته ، R ، مشخص شده اند. Ψ زاویه بین محور شماره ۱ مصالح و محور x پوسته می باشد. همچنین انحراف از راستای الیاف در تقویت کننده محیطی نسبت به محور محیطی سنجیده می شود. مقطع عرضی حلقه در شکل (۲) نشان داده شده و مرکز مختصات آن در مرکز ثقل مقطع عرضی قرار دارد و R_0





تغییر مکان ها و دوران ها تغییر مکان ها در نقطه دلخواهی از پوسته استوانه ای بصورت زیر بیان می شود. $\overline{U}(x, \theta, z) = U(x, \theta) + z\phi_x(x, \theta)$ $\overline{V}(x, \theta, z) = V(x, \theta) + z\phi_\theta(x, \theta)$ $\overline{W}(x, \theta, z) = W(x, \theta)$

حاضر ، از روش نیمه تحلیلی با بکارگیری المان تیر ّ برای مدل کردن تقویت کننده محیطی استفاده می گردد. مقاله حاضر به تحليل پايدارى پوسته هاى استوانه اى كامپوزيتى با تقويت محيطى تحت اثر بارهاى تركيبى (فشار محوری و فشار جانبی خارجی) میپردازد. شرایط مرزی بصورت تکیه گاه کلاسیک ساده (SS3) فرض میشود. باربحرانی با کنترل علامت دترمینان ماتریس سختی مماسی^{۱۰} قابل محاسبه است. یکی از اهداف این تحقیق مقایسه نیروهای اندرکنش بین پوسته و سخت کننده در محل تماس و قبل و بعد از کمانش برای لایه بندی های متفاوت پوسته و تقویت کننده می باشد. پیش بینی چنین نیروهایی در عناصر تقویت شده کامپوزیتی دارای اهمیت می باشد، چون در مقادیر بالای این تنش های تماسی ، جدایی لایه ها و جدایی سخت کننده از جدار پوسته اتفاق می افتد. در این تحقیق ، تغییرات بار کمانش و مسیرهای پس از کمانش برای ترکیب های متفاوت لایه بندی پوسته و تقویت کننده رسم می شود. تئوري تغيير شكل برشي مرتبه اول هم براي پوسته و هم برای تقویت کننده در نظر گرفته شده و تئوری غیر خطی ساندرز برای روابط کرنش _ تغییر مکان استفاده شده و نقص اولیه به شکل ضریبی از مد کمانش در نظر گرفته می شود.

تئورى

تغییر مکان ها ، دوران ها و نیروهای اندرکنشی بصورت بسط هایی از سری های فوریه در نظر گرفته می شوند. شرایط پیوستگی تغییر مکان ها در محل تماس پوسته و تقویت کننده با کمک ضرایب لاگرانژ Lagrange پوسته و تقویت کننده با کمک ضرایب لاگرانژ Lagrange روش ریتز بدست آمده و فرم خطی شده معادلات با کمک روش روش های نیوتن-رافسون و طول قوس حل می گردند.

هندسه پوسته و تقویت کننده

پوسته استوانه ای با مختصات کلی آن در شکل (۱) ، نشان داده شده است . راستاهای اصلی مصالح با ۱ و ۲ مشخص می باشند و مولفه های x ، θ و z از مختصات اصلی ، تغییر مکان های V ، V و دوران های ϕ_x و

$$\begin{split} & \begin{bmatrix} [A] & [B] & 0 & 0 \\ B & [D] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{55} \end{bmatrix} \end{split} \tag{Y}$$

که در آن $W(x,\theta) \cdot V(x,\theta)$ و $W(x,\theta)$ بترتیب تغییر مکان های سطح میانی پوسته در راستاهای طولی ، محیطی و شعاعی x \cdot θ و z در نقطه دلخواهی از تقویت کننده محیطی بصورت زیر تعریف می شوند [8].

$$\begin{split} \overline{U}_{r}(\theta, z) &= U_{r}(\theta) + z\phi_{\theta r}(\theta) \\ \overline{V}_{r}(x, \theta, z) &= V_{r}(\theta) + z\phi_{xr}(\theta) + x\phi_{zr}(\theta) - \omega(x, z)\tau_{r}(\theta) \\ \overline{W}_{r}(x, \theta) &= W_{r}(\theta) - x\phi_{\theta r}(\theta) \end{split}$$

 V_r ، U_r و W_r تغییر مکان های مرکز ثقل تقویت کننده و V_r ، Φ_{xr} و v_{zr} بترتیب دوران ها حول محورهای ذکر شده می باشند. (x,z) تابع تابیدگی (warping) مقطع سخت کننده و τ ضریب مجهول تابیدگی می باشد. با صرف نظر کردن از کرنش برشی ناشی از تابیدگی ، τ_r برابر است با : $\tau_r = \frac{1}{R_o} (\frac{\partial \phi_{\theta r}}{\partial \theta} + \phi_{zr})$

(۳)

(٢)

$$\{\sigma\} = [N_x, N_{\theta}, N_{x\theta}, M_x, M_{\theta}, M_{x\theta}, Q_x, Q_{\theta}]^T$$
 (Δ)

M · N و Q بترتیب نیروهای صفحه میانی ، لنگرها و مولفه های برشی خارج از صفحه می باشند. بردار کرنش تعمیم یافته {ع} نیز دارای فرم زیر است .

$$\{ \boldsymbol{\varepsilon} \} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{x}, \boldsymbol{\varepsilon}_{\theta}, \boldsymbol{\gamma}_{x\theta}, \boldsymbol{\kappa}_{x}, \boldsymbol{\kappa}_{\theta}, \boldsymbol{\kappa}_{x\theta}, \boldsymbol{\gamma}_{xz}, \boldsymbol{\gamma}_{\theta z} \end{bmatrix}^{T} \\ (\boldsymbol{\varepsilon} \} \\ \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\varepsilon}$$

که در آن $\frac{m\pi}{L}$ و M و M حد بالایی اعداد صحیح ، W_{mn} ، V_{mn} ، U_{mn} می باشند. ضرایب مجهول مmو ϕ_{0mn} در هر گام افزایشی محاسبه می شوند. ϕ_{mn} بطور مشابه تغییر مکان ها و دوران های مرکز ثقل تقویت کننده بصورت زیر تقریب زده می شوند :

(17)

$$U_{r}(\theta) = \sum_{n=0}^{N} U_{rn} \quad Cos(n\theta)$$

$$V_{r}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} V_{rn} \quad Sin(n\theta)$$

$$W_{r}(\theta) = \sum_{n=0}^{N} W_{rn} \quad Cos(n\theta)$$

$$\phi_{xr}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} \phi_{xrn} \quad Sin(n\theta)$$

$$\phi_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=0}^{N} \phi_{\theta rn} \quad Cos(n\theta)$$

$$\phi_{zr}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} \phi_{zrn} \quad Sin(n\theta)$$



شکل ۳: نیروهای اندر کنش بین پوسته و تقویت کننده.

بر اساس شرایط پیوستگی ، ضرایب مجهول در روابط (۱۳) به ضرایب مجهول پوسته مربوط می شوند. در شکل (۳) ، نیروهای اندرکنشی در سطح تماس پوسته و حلقه

$$\begin{split} \kappa_{x} &= \frac{\partial \phi_{x}}{\partial x} \\ \kappa_{\theta} &= \frac{1}{R} \frac{\partial \phi_{\theta}}{\partial \theta} \\ \kappa_{x\theta} &= \frac{1}{R} \frac{\partial \phi_{x}}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi_{\theta}}{\partial x} \\ \gamma_{xz} &= \phi_{x} + \frac{\partial W}{\partial x} \\ \gamma_{\theta z} &= \phi_{\theta} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial W}{\partial \theta} - cV \right) \end{split}$$
(10)

تغيير برایc=1 روابط کرنش – تغییر مکان ساندرز حاصل می شود. بطور مشابه برای تقویت کننده، کرنش های غیر صفر برابرند با :

$$e_{\theta} = \frac{1}{(R_{0} + z)} \left(\frac{\partial V_{r}}{\partial \theta} + \overline{W}_{r} \right) + \frac{1}{2R_{0}^{2}} (V_{r} - \frac{\partial W_{r}}{\partial \theta})^{2} + \frac{1}{R_{0}^{2}} \left(\frac{\partial \widetilde{W}}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial W_{r}}{\partial \theta} - V_{r} \right) + \frac{1}{2R_{0}^{2}} \left(\frac{\partial U_{r}}{\partial \theta} \right)^{2} \gamma_{x\theta} = \frac{\partial \overline{V}_{r}}{\partial x} + \frac{1}{(R_{0} + z)} \frac{\partial \overline{U}_{r}}{\partial \theta} \gamma_{z\theta} = \frac{\partial \overline{V}_{r}}{\partial z} + \frac{1}{(R_{0} + z)} \left(\frac{\partial \overline{W}_{r}}{\partial \theta} - \overline{V}_{r} \right)$$
(11)

در این روابط ، R_0 فاصله مرکز ثقل تقویت کننده تا مرکز استوانه می باشد. با فرض دوران های کوچک تقویت کننده ، فقط مولفه های تغییر مکانی در روابط غیر خطی کرنش حفظ شده اند. با استفاده از روابط (۲) ، کرنش ها بصورت جملاتی از تغییر مکان ها و دوران های مرکز ثقل تقویت کننده قابل بیان می باشند.

تقريبات فوريه

برای شرایط تکیه گاهی ساده ، سری های فوریه دوگانه تغییر مکان ها و دوران های پوسته بصورت زیر می باشد[۹]:

$$U(x,\theta) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=0}^{N} U_{mn} \quad Cos(\alpha_m x) \quad Cos(n\theta)$$
$$V(x,\theta) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=0}^{N} V_{mn} \quad Sin(\alpha_m x) \quad Sin(n\theta)$$

$$W(x,\theta) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=0}^{N} W_{mn} \quad Sin(\alpha_m x) \quad Cos(n\theta)$$

)

(14)

نشان داده شده اند. این نیروها و لنگرها در واقع برآیند تنش های موجود در سطح تماس پوسته و تقویت می باشند و تقریبات فوریه آنها نیز به فرم زیر بیان می گردد:

$$\lambda_{xr}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} \lambda_{xrn} \cos(n\theta)$$
$$\lambda_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} \lambda_{\theta rn} \sin(n\theta)$$
$$\lambda_{zr}(\theta) = \sum_{n=0}^{N} \lambda_{zrn} \cos(n\theta)$$
$$\Lambda_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=0}^{N} \Lambda_{\theta rn} \cos(n\theta)$$
$$\Lambda_{zr}(\theta) = \sum_{n=1}^{N} \Lambda_{zrn} \sin(n\theta)$$

$$g_{xrl} = U(x_1, \theta) - \frac{h}{2}\phi_x(x_1, \theta)$$
$$-[U_{rl}(\theta) + e_{rl}\phi_{\theta rl}(\theta)] = 0$$

$$g_{\theta rl} = V(x_1, \theta) - \frac{h}{2} \phi_{\theta}(x_1, \theta)$$
$$- [V_{rl}(\theta) + e_{rl} \phi_{xrl}(\theta) - \omega_{ol} \tau_{rl}(\theta)] = 0$$

$$g_{zrl} = W(x_{1}, \theta) - W_{rl}(\theta) = 0$$

$$G_{\theta rl} = \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=xl} + \phi_{\theta rl}(\theta) = 0$$

$$G_{zrl} = \left[\frac{\partial V}{\partial x}\right]_{x=xl} - \frac{h}{2} \frac{\partial \phi_{\theta}}{\partial x} \Big|_{x=xl}]$$

$$- \left[\phi_{zrl}(\theta) - \omega_{1l}\tau_{rl}(\theta)\right] = 0$$

زیرنویس ا بیانگر ا امین سخت کننده بوده و 000 و 010 خرایب تابیدگی تابع (x, θ) مربوط به بالی است که در تماس با جدار پوسته است. همچنین e_{rl} فاصله میان مرکز ثقل حلقه ا ام تا سطح تماس می باشد. تغییرات θ بدلیل بسته بودن پوسته و تقویت کننده در محدوده $[0,2\pi]$

تحلیل غیر خطی معـادلات تعادل کل سیـستم از ترکیب کار مجازی

داخلی پوسته و تقویت کننده ، کار مجازی ناشی از بارهای
وارده و کار مجازی نیروهای اندرکنشی بدست می آید.
معادلات غیر خطی بدست آمده با کمک روش
نیوتن_رافسون حل می گردد[۱۰]. کار مجازی داخلی
پوسته استوانه ای برابر است با :

$$\delta W_{int}^{sh} = \iiint_{V} [\sigma_x \delta e_x + \sigma_\theta \delta e_\theta + \sigma_{x\theta} \delta e_{x\theta} + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz} + \sigma_{\theta z} \delta \gamma_{\theta z}] dV$$

(۱۶)
 (16)
 $\delta W_{int}^{r} = \iiint_{V} [\sigma_0 \delta e_\theta + \sigma_{x\theta} \delta \gamma_{x\theta} + \sigma_{z\theta} \delta \gamma_{z\theta}] f(r)$
 $\delta W_{int}^{r} = \iiint_{V} [\sigma_\theta \delta e_\theta + \sigma_{x\theta} \delta \gamma_{x\theta} + \sigma_{z\theta} \delta \gamma_{z\theta}] dV$
 (17)
 $\delta W_{int}^{sh} = -P \int_{0}^{2\pi} [\delta U(1, \theta) - \delta U(0, \theta)] Rd\theta$
 $-q P \int_{S}^{2\pi} \delta W dS$
 (14)

که در آن P نیروی محوری فشاری بر واحد طول محیط استوانه و ^D فشار شعاعی خارجی می باشد. برای فشار هیدرواستاتیک (حالتی که تمام استوانه تحت فشار ثابت خارجی قرار دارد)، P به ^D مرتبط بوده (2/ P = Rq^D). خارجی قرار دارد)، P به ^D مرتبط بوده (2/ P = Rq). در حالت فشار خارجی زنده که وابسته به تغییر مکان در حالت فشار خارجی زنده که وابسته به تغییر مکان است [11] ، جمله دوم رابطه (۱۸) بصورت زیر اصلاح می شود : $-q^{L}_{S} [\delta W + \frac{1}{R} (V \delta V + W \delta W) + \delta W (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta})$ $+ W (\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial \delta V}{\partial \theta}) + \delta W (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta})$ $+ W (\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial \delta V}{\partial \theta}) + \delta W (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial \theta})$ $+ W (\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial \delta V}{\partial \theta}) + \delta W (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial \theta})$ $+ W (\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial \delta V}{\partial \theta}) + \delta W (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial \theta})$ $+ W (\frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial \delta V}{\partial \theta}) + \delta W (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial \theta})$

با نوجه به روابط پیوستگی (۱۵) برابر است با :

$$\delta W_{\lambda} = \frac{1}{2} \sum_{l} \int_{0}^{2\pi} \delta [\lambda_{\theta r l} g_{\theta r l} + \lambda_{xr l} g_{xr l} + \lambda_{zr l} g_{zr l} + \Lambda_{zr l} G_{zr l} + \Lambda_{\theta r l} G_{\theta r l}] (R - \frac{h}{2}) d\theta$$
(۲۰)
(۲۰)

و در نهایت کار مجازی کل سیستم بصورت خطی شده خواهد شد : (1Δ)

$$D(\delta W_{int}^{sh} + \delta W_{int}^{r} + \delta W_{\lambda} - \delta W_{ext}^{sh}) = 0 \eqno(71)$$

رابطه (۲۱) برای تحلیل غیر خطی رابطه اساسی بوده و با کمک ترکیب روش های نیوتن- رافسون و طول قوس [۱۲] قابل حل می باشد.

تحليل عددى

بر مبنای تحلیل توصیف شده برنامه کامپیوتری ایجاد شده است و نتایج این برنامه برای مثال های متنوع که شامل تحلیل غیر خطی هندسی پوسته های تقویت شده در راستای محیطی تحت اثر بارهای ترکیبی فشار محوری و فشار جانبی (مرده و زنده) بوده ، ارائه می شود. سه پوسته تقویت شده ، تولید شده از مصالح ایزوتروپ و ارتوتروپ مورد بررسی قرار می گیرند. دو تا از این پوسته ها توسط محققان دیگر مورد بررسی قرار گرفته اند [۵،۱۳] و بنابراین می توانند مبنای کنترل نتایج تحقیق حاضر باشند. سومین پوسته تقویت شده به گونه ای طراحی شده تا بتوان فشار کمانشی و منحنی های پس از کمانش را برای ترکیب های مختلف لایه بندی مقایسه

پوسته ايزوتروپ تقويت شده

استوانه مورد نظر ایزوتروپ بوده و با ۶ حلقه تقویت شده است. شکل (۴) مقطع طولی از استوانه را نشان می دهد. مشخصات هندسی بشرح زیر می باشد: L=60.452mm ، R=101.31mm ، h=0.5842 mm، (تعداد حلقه ها) h=0.3318mm ، Ns = 6 و



شکل ۴: مقطع طولی پوسته تقویت شده.

: مشخصات مصالح نیز عبارتند از . $S_P = 8.636mm$ E=71705.5 Mpa و v =0.3. پوسته تحت اثر فشار هیدرواستاتیک با راستای شعاعی (فشار مرده) قرار دارد. جدول (۱) بار کمانش بدست آمده توسط مدل ها و المان های مختلف را نشان می دهد.تحلیل حاضر بر پایه تئوري هاي غير خطي يوسته ساندرز و دانل استوار مي باشد. برای همه حالات کمانش با ۷ موج در راستای محیطی رخ می دهد $(n_{cr} = 7)$. در تحلیل حاضر ضریب نقص اولیه بسیار کوچک فرض می گردد تا تاثیری بر فشار $(\max(\hat{W}/h) = 10^{-8})$. بحرانی بدست آمده نداشته باشد (\hat{W}/h جدول (۱) نشان می دهد که تحلیل غیر خطی هندسی حاضر که با بکارگیری ۵۵ هارمونیک غیر صفر در راستای طولى بدست آمده قابل مقايسه با نتايج بدست آمده توسط تحلیل های دو شاخگی^۳ خطی و غیر خطی می باشد. بار بحرانی بدست آمده توسط تئوری های دانل و ساندرز تفاوت محسوسی نمی کنند و دلیل عمده آن کم عمق بودن^{۱۴} پوسته مورد مطالعه می باشد. اختلاف در نتایج تحقیق حاضر و سایر نتایج عمدتاً ناشی از بکارگیری المان هاى مختلف براى مدل كردن تقويت كننده (المان تير در تحليل جارى و المان پوسته در ساير موارد) و متفاوت بودن نحوه اتصال و پيوستگي تقويت كننده به جدار پوسته می باشد. در مدل های LIN2D و NONLIN2D اتصال فقط در یک نقطه و در سطح میانی پوسته وجود دارد (برای یک مقطع طولی پوسته)، در صورتیکه در مدل تحقیق حاضر اتصال تقویت کننده در سطح داخلی پوسته و تماس در یک خط وجود دارد.

Analysis program	Linear bifurcation ^c	Non-Linear ^c bifurcation	Geometrical ^c Non-Linear
ABAQUS(C3D20) ^b	2.117	1.889	-
LIN2D ^b	2.075	-	-
NONLIN2D ^b	-	1.827	-
Current analysis (Donnell)	-	-	1.970
Current analysis (Sanders)	-	-	1.985

جدول ۱: مقايسه نتايج كمانش موضعى پوسته ايزوتروپ تقويت شده "(Moradi-Parson Cylinder).

^a Moradi & Parsons (1991)

^b Sridharan & Alberts (1997)

^c Buckling pressure (Mpa)

Analysis program	Dead pressure $(n_{cr=3})^{b}$	Live pressure $(n_{cr=3})^b$					
NONLIN2D ^a	2.2687	2.0975					
LIN2D ^a	2.2530	2.0626					
INSTACC ^a	2.1016	1.9470					
Current analysis (Donnell)	2.0430	1.9920					
Current analysis (Sanders)	2.3287	2.2165					
(

جدول ۲: مقایسه نتایج کمانش کلی پوسته ارتوتروپ تقویت شده.

^a Sridharan & Alberts (1997)

^b Pressure= $(q_{cr}/E_{11})*10^{5}$



${\rm E}_{11}=110316 MPa$, ${\rm E}_{22}$ / ${\rm E}_{11}=0.0925$.

 $G_{12} / E_{11} = G_{13} / E_{11} = 0.0475$ و $v_{12} = 0.33$. تحلیل حاضر هم فشار مرده⁹ و هم فشار زنده^{۷۰} را در نظر می گیرد. در این مسئله ، نتایج مربوط به تئوری های ساندرز و دانل برای بار مرده و بار زنده اختلاف قابل ملاحظه ای دارند. علت عمده این اختلاف حاکم بودن مد کمانشی کلی^{۱۰} با $E = n_{cr}$ بوده که خود ناشی از هندسه و مشخصات پوسته و تقویت کننده ها می باشد. نتایج

پوسته ار توتروپ تقویت شده

[90/0] این استوانه متشکل از ۲۰ واحد لامینه^{۱۵} [90/0] می باشد. تقویت کننده ها با فواصل مساوی قرار گرفته اند و نسبت به محور ((x=L/2) متقارن می باشند. هندسه پوسته تقویت شده با توجه به شکل (۴) بصورت زیر N_S = 10 ، R/h=100، L/h=262 ، N_S = 10 ، R/h=232 و t_S / h = 2 ، S_P / h = 232 مصالح از این قرارند:

بدست آمده مربوط به تقریب زدن مولفه های تغییر مکانی و دورانی پوسته با ۴۶ هارمونیک غیر صفر در راستای طولی می باشد. نتایج این تحلیل و تحلیل مربوط به مدل های LIN2D (مدل ۲ بعدی پوسته تقویت شده به همراه تحلیل خطی مقدار ویژه) و NONLIN2D (مدل ۲ بعدی و تحلیل غیر خطی مقدار ویژه) ، در جدول (۲) مشخص می باشند. در این حالت نیز همانند پوسته ایزوتروپ ، مدل های متفاوت تقویت کننده و نحوه اتصال تقویت کننده به جدار پوسته و روش های متفاوت تحلیل (تحلیل غیر خطی هندسی برای تحقیق حاضر و تحلیل های خطی و غیر خطی مقدار ویژه برای سایر موارد)، دلائل اختلاف در نتایج می باشند.

اثر لایه بندی های متفاوت بر پایداری پوسته

در این حالت، چهار تقویت کننده حلقوی با مقطع ناودانی با فواصل مساوی قرار دارند. هندسه سخت کننده در شکل (۵) نشان داده شده است و مشخصات مصالح بصورت زیر میباشند:

.Е₁₁= 155000 Мра

 $G_{13}=G_{23}=4400~\text{Mpa}$, $E_{22}{=}12100~\text{Mpa}$, $t_{\text{ply}}{=}0.125~\text{mm}_{9}\nu_{12}=0.248$, $G_{23}{=}3200~\text{Mpa}$

جدول (۳) ، شش لایه بندی متفاوت از A تا F را برای پوسته و تقویت کننده نشان می دهد. ترکیب این لایه بندی ها برای پوسته و حلقه ها حالات متنوعی را تولید می کند که در جدول (۴) نشان داده شده اند. برای مثال ، حالت AB بیانگر پوسته با لایه بندی A و تقویت کننده با لايه بندى B مى باشد. فشار هيدرواستاتيک بحرانى و عدد موج مربوط به آن، n_{cr} ، برای ۲۴ حالت مورد بحث (۱۸ حالت برای پوسته تقویت شده و ۶ حالت پوسته بدون تقویت) در جدول (۴) مشخص می باشند. علیرغم اینکه پوسته بدون تقویت با الیاف در راستای محور طولی، حالت A، در بین سایر لایه بندی ها، A تا F، کمترین بار کمانش را دارد ولی برای پوسته تقویت شده حداکثر فشار کمانشی مربوط به حالت AA می باشد که بیانگر پوسته با راستای الیاف طولی و حلقه با راستای الیاف محیطی می باشد. نتایج نشان می دهند که لایه بندی پوسته تاثیر بیشتری در مورد کمانش و عدد موج مربوطه، n_{cr} ، نسبت به لایه بندی حلقه دارد. تغییرات

کوتاه شدگی یکنواخت انتهایی و تغییر مکان شعاعی در(x=L/2) ، در مقابل فشار هیدوراستاتیک برای سه حالت CC ، AA و FF در دیاگرام های (۶) و (۷) رسم شده اند. این دیاگرامها نشان میدهند که سختی پس از کمانش را می توان با تغییر لایه بندی افزایش داد.



شکل ۶: منحنی بار-کوتاه شدگی انتهایی برای لایه بندی های مختلف پوسته و تقویت کننده.



شکل ۷: تأثیر لایه بندی های مختلف روی تغییر مکان شعاعی پوسته.

برای مثال حالت CC از لحاظ شیب منحنی بار _ تغییر شکل دارای پایداری بیشتری می باشد ، بطور مشابه، λ_{zr} شکل دارای پایداری بیشتری می باشد ، بطور مشابه، λ_{zr} شکل های (Λ) و (Λ) و (Λ) تغییرات نیروهای اندرکنشی معای را شان می دهند. اگرچه، نیروی اندرکنشی شعاعی، λ_{0r} ، λ_{0r} ، λ_{0r} ، λ_{0r} ، اشان می دهند. اگرچه، نیروی اندرکنشی شعاعی نیروی با شروع بارگذاری مقدار غیر صفر داشته ولی نیروی اندرکنشی مقدار غیر صفر داشته ولی نیروی فشار هیدرواستاتیک را فشان می دهند. اگرچه، نیروی اندرکنشی شعاعی معای ، بروی اندرکنشی شعاعی مقدار با شروع بارگذاری مقدار غیر صفر داشته ولی نیروی فشار هیدرواستاتیک نشان می دهد که پاسخ پس از فشار هیدرواستاتیک نشان می دهد که پاسخ پس از کمانش در حالت CC پایداری بیشتری نسبت به ۲ حالت دیگر (FF, AA) دارد. تغییرات λ_{zr} از فشار به کشش در

جدول ۳: ارایش های متفاوت لایه های پوسته و تفویت کننده.								
Case	Α	В	С	D	Е	F		
Lay-up	(0)8	(90)8	(0/90/0/90) _s	(30/-30/30/-30) _{2T}	(45/-45/45/- 45) _{2T}	(60/-60/60/-60) _{2T}		

.

Cas e	q _{cr} (Mpa)	n _{cr}	Case	q _{cr} (Mpa)	n _{cr}	Case	q _{cr} (Mpa)	n _{cr}	Case	q _{cr} (Mpa)	n _{cr}
AA	5.837	4	BA	1.675	10	CD	4.430	18	Α	0.149	9
AB	2.143	4	BB	1.696	10	CE	4.256	19	В	0.553	6
AC	4.824	4	BC	1.680	10	CF	4.083	19	С	0.368	7
AD	5.503	3	CA	4.505	18	DD	4.175	20	D	0.334	10
AE	4.262	3	CB	3.933	19	EE	3.099	15	Е	0.477	8
AF	2.933	4	CC	4.339	19	FF	3.375	11	F	0.570	7

جدول ۴: تأثیر لایه بندی های مختلف روی بار کمانش پوسته تقویت شده.

- حالت CC با توجه به مشارکت سهم های متقارن محوری و غیر متقارن محوری در نیروی λ_{zr} قابل توجیه
 - می باشد.



شکل ۸: تأثیر لایه بندی های مختلف روی نیروی اندرکنش شعاعی.



شکل ۹: نیروی اندرکنش محیطی برای لایه بندی های متفاوت پوسته و تقویت کننده.

نتيجه گيري

در این مقاله فشار بحرانی هیدوراستاتیک به فرم مرده (شعاعی) و زنده (وابسته به تغییر شکل) توسط روش تحليل غير خطى هندسي براي يوسته تقويت شده محاسبه می شود. نتایج این تحقیق با نتایج تحلیل های مقدار ویژه خطی و غیر خطی مقایسه شده و با توجه به تفاوت هایی در مدل سازی تقویت کننده ها و نحوه اتصال تقویت کننده به جدار پوسته، تطابق خوبی دارند. مقایسه نتایج تحلیل ها بر اساس تئوری های غیر خطی ساندرز و دانل نشان می دهند که برای پوسته های غیر کم عمق 🐂 و در حالت کمانش کلی با عدد موج ($n_{
m cr}$) کوچک، اختلاف ها تقویت می شوند. علیرغم اینکه تئوری ساندرز بار کمانش بزرگتری نسبت به تئوری دانل میدهد ولی نتیجه تئوری ساندرز قابل اعتمادتر بوده، چون در فرمولاسیون دانل ساده سازیهای بیشتری نسبت به تئوری ساندرز صورت گرفته است. با مقایسه تاثیر لایه بندی های متفاوت روی پاسخ پوسته تقویت شده کامپوزیتی، نقش این لایه بندی ها در رفتار پس از کمانش مشخص گردیده و بنابراین برای داشتن پوسته تقویت شده اقتصادی می بایست رفتار پس از کمانش بنحوی در طراحی این پوسته ها مد نظر قرار گیرد. عامل دیگری که می تواند در یاسخ پس از کمانش نقش عمده ای داشته باشد توزیع تقویت کنندہ ها در طول استوانه می باشد که می تواند مبنای تحقیق بعدی قرار گیرد.

- Sridharan, S., Zeggane, M. and Stranes, J. Jr. (1992). "Post buckling response of stiffened composite cylindrical shells." *AIAA Journal*, Vol. 30, No.12, PP. 2897-2905.
- 2 Dawe, D. J. and Wang, S. (2000). "Post buckling analysis of composite laminated panels." *AIAA Journal*, Vol. 38, No.11, PP. 2160-2170.
- 3 Arbocz, J. and Hol, J. M. A. M. (1994). "On the reliability of buckling load predictions." *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 35th Structure, Structural Dynamics, and Material Conference* (Hilton Head, SC), AIAA, Washington, DC, PP. 514-521.
- 4 Ley, R. P., Johnson, E. R. and Gurdal, Z. (1994). "Buckling of imperfect, anisotropic, ring-stiffened cylinders under combined loads." *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 6, PP. 1302-1309.
- 5 Sridharan, S. and Alberts, J. (1997). "Numerical modeling of ring-stiffened cylinders." *AIAA Journal*, Vol. 35, No.1, PP. 187-195.
- 6 Rastogi, N. (1995). "Load transfer in the stiffener-to-skin joints of a pressurized fuselage." *Doctoral dissertation*, Department of Aerospace and Ocean Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg. Virginia.
- 7 Jones, R. M. (1975). Mechanics of composite material. Hemisphere, Washington, D. C.
- 8 Brush, D. O. and Almorth, B. O. (1975). Buckling of bars, plates and shells. McGraw-Hill, New York.
- 9 Rao, K. M. and Piening, H. R. M. (1986). "Critical shear loading of curved sandwich panels faced with fiberreinforced plastic." *AIAA Journal*, Vol. 24, No.9, PP. 1531-1536.
- 10 Bonet, J. and Wood, R. D. (1997). Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- 11 Schweizerhof, K. and Ramm, E. (1984). "Displacement dependent pressure load in nonlinear finite element analysis." *Computers and Structures*, Vol. 18, No.6, PP. 1099-1114.
- 12 Crisfield, M. A. (1991). Non-Linear Finite Element Analysis of Solid and Structures. Vol. 1, John Wiley, Chichester, Sussex.
- 13 Moradi, B. and Parsons, I. O. (1991). "A comparison of modeling techniques for the buckling of stiffened shells." ASCE Engineering Mechanics Specialty Conference, (Columbus, OH), American Society of Civil Engineers, New York, PP. 856-860.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 Sanders
- 5 Arc-Length9 Beam Element
- 12 Donnell
- 16 Radial
- 2 FOSD 6 - Lay-Up
- 10 Tangent Stiffness Matrix
- 13 Bifurcation
- 17 Fluid

3 - Ring 4 - Ritz 7 - Finite Strip 8 - Imperfection 11 - Transformed Reduced Stiffness 15 -Laminate 14- Shallowness 18 - Overall 19-Non-Shallow Shell

344