

تحلیل نظری نیروهای تعاملی در پوسته‌های استوانه‌ای با تقویت کننده‌های متعامد نامتقارن

حسین لطفی جندقی
دانشجوی دکتری

غلامحسین رحیمی
استادیار

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

هدف از مقاله حاضر آنالیز نیروهای تعاملی در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده کامپوزیت است. این پوسته‌ها توسط تقویت کننده‌های طولی^۱ و تقویت کننده‌های محیطی^۲ که در فواصل یکسان در محیط و در طول استوانه قرار دارند، مسلح شده‌اند و پوسته تحت تأثیر بار مرکب نیروی محوری همراه با فشار داخلی قرار دارد. در این مقاله چگونگی تعیین مقدار و نحوه توزیع نیروهای تعاملی، اثر این نیروها بر اتصالات، نیروها و ممان‌های داخلی، محاسبه توزیع تغییر شکل‌ها و کرنش‌ها در پوسته، رینگ و استرینگر، مورد بحث و بررسی است. همچنین نیروی تعاملی بحرانی که تابع شعاع و ضخامت هستند و در طراحی نحوه اتصال تقویت کننده‌ها به پوسته کاربرد دارد، تعیین می‌شوند. علاوه بر آن اثر فواصل رینگ و استرینگر بر نیروهای تعاملی تعیین می‌شود و مکانیزم جدایش احتمالی پوسته از تقویت کننده‌ها در این مقاله بررسی می‌گردد. در پایان نتایج بدست آمده بابرخی از نتایج در دسترس مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی

پوسته‌های استوانه‌ای، کامپوزیت، تقویت کننده‌های متعامد با مقطع نامتقارن

Theoretical Analysis of Interacting Loads in Orthogonally Asymmetrically Stiffened Cylindrical Shells

GH. Rahimi
Assistant Professor

H. Lotfi Jandaghi
Ph. D Student

Mechanical Engineering Department,
University Tarbiat modarres

Abstracts

The purpose of this paper is to analyze the interacting forces acting upon reinforced cylindrical composite shells. The shells are reinforced by stringer and circumferential stiffener (ring or frames) each located at equal intervals along the length and circumference. The stiffened shell is subjected to combined axial loads and internal pressure.

The effects of the interacting forces on connections, and internal moments are considered, and the displacement distributions and strains on the shell, ring, and stringer are also evaluated.

The article also highlights the calculations of the critical interacting force which is a function of radius and thickness with the aim of designing the connections between the stiffeners and the shell. Furthermore, the effects of interval between rings and stringers on interacting forces are calculated and the probable separation mechanism of stiffeners from the shell is discussed.

The article concludes with the comparison of obtained results and the corresponding available data.

Keywords

Cylindrical shells, composite shells, orthogonally asymmetrically stiffeners. C:/DR/4

نیروهای تعاملی بر مکانیزم جدایش اتصالات انجام می شود و در نهایت برای حالات مختلف، مقدار ماکزیمم این نیروها و توزیع آن تعیین می گردد تا در طراحی اتصالات مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدل هندسی و نماد گذاری

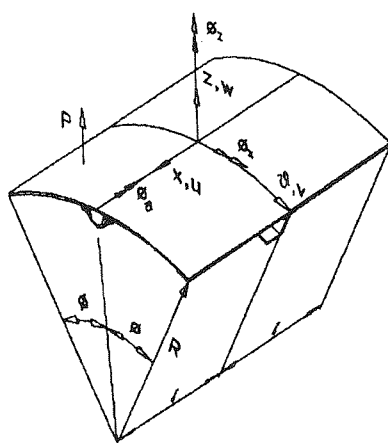
چون بارگذاری پوسته متقارن محوری است و فواصل رینگ و استرینگر در کل پوسته یکسان فرض می شوند می توان بجای تحلیل کل پوسته از تحلیل یک بخش از پوسته که واحد تکرار^۳ نامیده می شود استفاده نمود.

در شکل (۱) طول واحد تکرار $2l$ و طول کمان واحد تکرار برابر $b = 2R\Phi$ خواهد بود. 2Φ زاویه مرکزی کمان برحسب رادیان و R شعاع تار میانی پوسته است. شکل مقطع رینگ و استرینگر که در ساخت سازه هواپیماهای بزرگ و موشک ها بطور مشابه مورد استفاده قرار می گیرند، به اشکال مختلفی چون I, U, H, Z, Y وجود دارند. انتخاب شکل آنها بستگی به نوع بار گذاری دارد و با توجه به شرایط حداقل وزن و نوع باری که باید تحمل کنند و حداکثر سختی کششی، خمشی و پیچشی که باید داشته باشند انتخاب می شوند. اشکال انتخابی در این مقاله یک نمونه کاربردی در صنعت هوا فضا است. نیروها و ممان های تعاملی روی پوسته عبارتند از: P_{xs}, P_{zs} به ترتیب نیروهای برشی و قائم تعاملی بین پوسته و استرینگر، همچنین P_{xr}, P_{yr} نیروهای برشی تعاملی و P_{rr} نیروی قائم تعاملی بین پوسته و رینگ، m_{rr} ممان خمشی تعاملی خارج از صفحه رینگ و $m_{\theta r}$ ممان پیچشی تعاملی بین پوسته و رینگ هستند. همه جهات نشان داده شده در شکل (۱) مثبت فرض می شود. در شکل (۲) چگونگی انتخاب محورهای مختصات را که در محل تقاطع رینگ و استرینگر

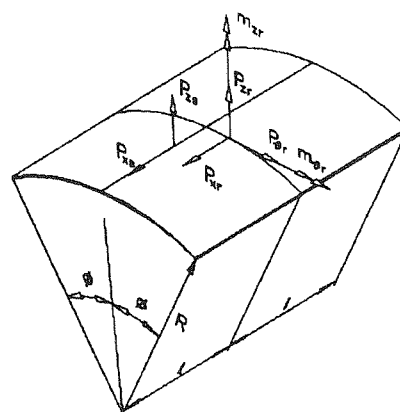
پوسته های تقویت شده در صنایع هوا فضا کاربردهای متعددی دارند. اغلب از مواد ایزوتروپیک در ساختن بدنه موشک ها و از مواد کامپوزیت در ساخت بدنه هواپیماهای بزرگ استفاده می گردد. با توجه به اهمیت زیاد و کاربرد متعدد آنها از اوائل قرن بیستم کار بر روی این پوسته ها آغاز شده و هم چنان ادامه دارد. بخشی از زمینه های کار شده عبارتند از تحلیل و طراحی پوسته های ساده «مخازن تحت فشار»، پوسته های تقویت شده تحت تأثیر نیروهای مختلف محوری، «پیچشی و بارهای عرضی»، فشار (داخل و خارج)، «کمانش در آنها»، «بهینه سازی وزنی پوسته های تقویت شده» تحلیل خطی و غیر خطی پوسته ها موارد انجام شده هستند.

در سال های اخیر محاسبه نیروهای تعاملی در پوسته ها انجام شده است. (نیروها و ممان های داخلی که بین پوسته با رینگ و استرینگر بوجود می آیند، نیروهای تعاملی نامیده می شوند.) در این زمینه اولین بار (Ting & Wang) [1] اقدام به چاپ نتایج کار خود در این زمینه نموده اند. روش کار آنها بر مبنای جداسازی پوسته از رینگ و استرینگر، اعمال نیروهای تعاملی بر آنها، بدست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم برای هر کدام از اجزا و حل آنها با استفاده از سری فوریه بوده است. آنها در مقاله دیگری اثر تغییرات دما را نیز منظور نمودند. بعد از آنها (Rastogi & Johnson) [2] نیز کار Wang را با استفاده از روش کار مجازی برای پوسته های کامپوزیت ادامه دادند که در آنالیز آنها، استرینگر دارای مقطع متقارن و رینگ دارای مقطع متقارن و نامتقارن بودند.

مقاله حاضر که از یک نظر می تواند در ادامه کار Johnson تلقی شود، از رینگ با مقطع نامتقارن استفاده شده است و علاوه بر محاسبه نیروهای تعاملی که از دقت بیشتری نسبت به مقاله (Johnson) برخوردار است، تحلیلی نیز روی اثر



شکل (۲) نمایش تغییر مکان ها و دوران ها در پوسته.



شکل (۱) نمایش نیروها و ممان های تعاملی در پوسته.

قرار می گیرند و نیز امتداد مثبت تغییر شکل ها و دوران ها در پوسته، نشان داده شده است.

۳-۱- معادلات حاکم بر پوسته های استوانه ای

۳-۱-۱ روابط کرنش- تغییر مکان در پوسته

با در نظر گرفتن تئوری الاستیک خطی (در تغییر شکل های کوچک) و با توجه به فرضیات کیرشهوف [2] تغییر شکل های یک نقطه اختیاری از پوسته استوانه ای بصورت زیر تعریف می شوند (کرنش در تار میانی صفر و در هر نقطه اختیاری بصورت خطی تغییر می کند):

$$U(x, \theta, z) = u(x, \theta) + z\phi_x(x, \theta) \quad (1)$$

$$V(x, \theta, z) = v(x, \theta) + z\phi_\theta(x, \theta) \quad (2)$$

$$W(x, \theta, z) = w(x, \theta) \quad (3)$$

$$\phi_x(x, \theta) = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad (4)$$

$$\phi_\theta(x, \theta) = \frac{v}{R} - \frac{\partial w}{R\partial\theta} \quad (5)$$

در تحلیل پوسته های نازک از اثر کرنش در امتداد عمود بر پوسته و از تنش عمود بر صفحه در مقایسه با تنش طولی و محیطی صرف نظر می شود. پس مسئله بصورت کرنش صفحه ای و با صرف نظر کردن از کرنش های برشی - عرضی، یعنی پذیرش فرضیات تئوری کلاسیک پوسته ها، می توان روابط کرنش تغییر مکان را بشکل زیر نوشت:

$$e_{xx} = \epsilon_{xx} + zk_{xx} \quad k_{xx} = \frac{\partial\phi_x}{\partial x} \quad (6)$$

$$e_{\theta\theta} = \frac{\epsilon_{\theta\theta} + zk_{\theta\theta}}{1 + \frac{z}{R}} \quad k_{xx} = \frac{1}{R} \frac{\partial\phi_\theta}{\partial\theta} \quad (7)$$

$$e_{x\theta} = \frac{\gamma_{x\theta} + z(1 + \frac{z}{R})k_{x\theta}}{(1 + \frac{z}{R})} \quad (8)$$

$$e_{x\theta} = \frac{\gamma_{x\theta}(1 + \frac{z}{2R} + \frac{z^2}{4R^2}) + z(1 + \frac{z}{2R})K_{x\theta}^s}{(1 + \frac{z}{R})} \quad (9)$$

$$K_{x\theta}^s = \frac{\partial\phi_\theta}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial\phi_x}{\partial\theta} + \frac{1}{R} \theta_z$$

$$\phi_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial\theta} \right) \quad (10)$$

رابطه (۱۰) تعریف انحنا از تئوری (Sanders) [2] را می دهد و معادله (۹) را بسهولت می توان از معادله (۸) بدست آورد.

۳-۲- روابط کار مجازی در پوسته

رابطه تغییرات کار مجازی با توجه به فرضیه کرنش صفحه ای بشکل زیر ارائه می گردد [3]

$$\delta W_{int}^{shell} = \iint \left[N_{xx} \delta\epsilon_{xx} + N_{\theta\theta} \delta\epsilon_{\theta\theta} + N_{x\theta}^s \delta\epsilon_{x\theta} + M_{xx} \delta K_{xx} + M_{\theta\theta} \delta K_{\theta\theta} + M_{x\theta}^s \delta K_{x\theta}^s \right] ds \quad (11)$$

جهت تعیین روابط کرنش و تغییر شکل ها در پوسته های استوانه ای به مرجع [4] مراجعه شود.

$$N_{x\theta}^s = \frac{1}{2} (N_{\theta x} + N_{x\theta}) \quad (12)$$

$$M_{x\theta}^s = \frac{1}{2} (M_{\theta x} + M_{x\theta}) \quad (13)$$

در رابطه فوق $N_{x\theta}^s$ و $M_{x\theta}^s$ مولفه های نیروی کششی و ممان پیچشی Sanders و $N_{\theta x}$ ، $N_{x\theta}$ ، $N_{\theta\theta}$ ، N_{xx} بر واحد طول لبه های المان پوسته و $M_{\theta x}$ ، $M_{x\theta}$ ، $M_{\theta\theta}$ ، M_{xx} گشتاورهای وارد بر واحد طول لبه های المان پوسته هستند. روابط تنش کرنش در پوسته های کامپوزیت بشکل زیر است:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{\theta\theta} \\ N_{x\theta}^s \\ M_{xx} \\ M_{\theta\theta} \\ M_{x\theta}^s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{x\theta} \\ K_{xx} \\ K_{\theta\theta} \\ K_{x\theta}^s \end{Bmatrix} \quad (14)$$

جهت تعریف عناصر ماتریس [A] و [B] و [D] به مرجع [5] مراجعه شود.

۳-۳- کار مجازی نیروهای خارجی

کار مجازی خارجی حاصل ضرب نیرو درجابجائی

مجازی است:

$$\delta W_{ext}^{shell} = \iint p \delta w ds + p \int_{-\phi}^{\phi} \frac{R^2}{2} [\delta u(l, \theta) - \delta u(-l, \theta)] d\theta \quad (15)$$

جمله اول از رابطه فوق نشان دهنده کار انبساطی استوانه در امتداد شعاع و جمله دوم کار انبساطی استوانه در امتداد طول استوانه است. p نشان دهنده فشار داخل می باشد. رابطه اصل کار مجازی کلی را بشکل زیر نیز می توان نوشت:

$$\delta W = \delta W_{int}^{shell} - \delta W_{ext}^{shell} = 0 \quad (16)$$

با گرفتن اولین تغییرات یا وردش از تابع W و با صفر قرار دادن ضرایب δu و δv و δW و $\delta \Phi_x$ و $\delta \Phi_\theta$ پنج معادله تعادل پوسته که در مرجع [2] داده شده و ده شرط مرزی بشکل زیر بدست می آید. (تئوری تغییر شکل های برشی عرضی)، پنج معادله از شرط مرزی در محدوده $\Phi \leq \theta \leq \Phi$ قرار دارند:

$$N_{x\theta}(L, \theta) = N_{x\theta}(-L, \theta) \quad (17)$$

$$Q_x(L, \theta) = Q_x(-L, \theta) \quad (18)$$

$$M_{xx}(L, \theta) = M_{xx}(-L, \theta) \quad (19)$$

$$M_{x\theta}(L, \theta) = M_{x\theta}(-L, \theta) \quad (20)$$

$$N_{xx}(L, \theta) = \frac{pR}{2} \quad N_{xx}(-L, \theta) = \frac{pR}{2} \quad (21)$$

پنج شرط مرزی دیگر در محدوده $-L \leq x \leq L$ می باشند

$$N_{\theta x}(x, \phi) = N_{\theta x}(x, -\phi) \quad (22)$$

$$N_{\theta\theta}(x, \phi) = N_{\theta\theta}(x, -\phi) \quad (23)$$

$$Q_\theta(x, \phi) = Q_\theta(x, -\phi) \quad (24)$$

$$M_{\theta\theta}(x, \phi) = M_{\theta\theta}(x, -\phi) \quad (25)$$

$$M_{\theta x}(x, \phi) = M_{\theta x}(x, -\phi) \quad (26)$$

استرینگر بعنوان یک تیرنازک مستقیم با سطح مقطع اختیاری در نظر گرفته می شود و تغییرات کرنش در یک نقطه اختیاری از مقطع که بصورت تیر اولری فرض می شود. با فرض خطی بودن تغییر شکل ها داریم:

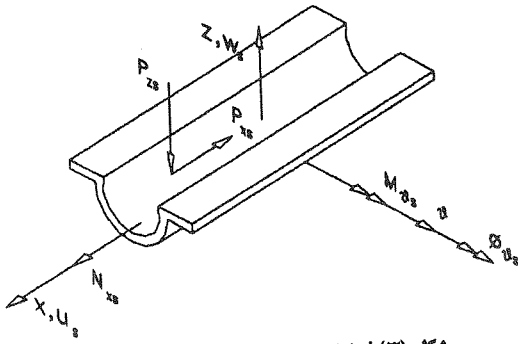
$$e_{zz}^s = 0 \quad (27)$$

$$e_{xz}^s = \gamma_{xz}^s = 0 \quad (28)$$

$$e_{xx}^s = \epsilon_{xx} + z k_{\theta s} \quad (29)$$

$$k_{\theta s} = - \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \quad (30)$$

محورهای مختصات همراه با جهات فرضی تغییر شکل ها و شکل فرضی مقطع استرینگر در (شکل ۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) نمایش مقطع، تغییر مکان هادوران ها، نیروها و ممان های داخلی در استرینگر.

روابط تغییر شکل در استرینگر عبارتند از:

$$U_s(x, z) = U_s(x) + z\phi_{\theta s}(x) \quad (31)$$

$$W_s(x, z) = w_s(x) \quad (32)$$

و روابط کرنش تغییر شکل در تار خنثی عبارتند از

$$\epsilon_{xx}^s = \frac{\partial U_s}{\partial x} \quad (33)$$

$$\phi_{\theta s} = - \frac{\partial W_s}{\partial x} \quad (34)$$

۴-۲- رابطه کار مجازی در استرینگر

از رابطه کار مجازی در تیرها داریم:

۴-۱- معادلات حاکم براسترینگر کرنش و تغییر شکل در استرینگر

روابط تنش کرنش در رینگ عبارتند از:

$$N_{\theta r} = (EA)_r \varepsilon_{\theta} \quad (43)$$

$$M_{xr} = EI_{xx} k_{xr} - EI_{zx} k_{zr} - \frac{1}{R_0} EI_{\omega x} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \quad (44)$$

$$M_{zr} = -EI_{zx} k_{xr} + EI_{zz} k_{zr} + \frac{1}{R_0} EI_{\omega z} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \quad (45)$$

$$M_{\omega r} = -EI_{\omega x} k_{xr} - EI_{\omega z} k_{zr} - \frac{1}{R_0} EI_{\omega \omega} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \quad (46)$$

$$M_{\sigma r} = GJ \tau_r \quad (47)$$

R_0 شعاع مرکز سطحی مقطع رینگ و τ_r شدت تغییرات زاویه پیچش مقطع هستند. جملات رابطه فوق بشکل زیر تعریف می شوند رابطه (۴۳) نشان دهنده نیروی مجوری و رابطه (۴۴) ممان خمشی را حول محور X ها نشان می دهد که از سه جمله تشکیل شده است. جمله اول در اثر تغییرات انحنا حول محور X ها و جمله دوم اثر انحنا انتی کلاستیک^۱ و جمله سوم اثر شدت تغییرات زاویه پیچش (bimoment) است. همین جمله ها در معادلات (۴۵) و (۴۶) نیز دیده می شوند. معادله (۴۷) پیچش در مقطع رینگ، معادله سنت ونانت (Saint Venent) [6]، را نشان می دهد. علامت منفی در روابط فوق با توجه به جهت دوران ها بدست می آید. Woodson در مقاله [7] با معادل سازی اقدام به تبدیل پوسته مرکب به پوسته ساده نموده که مشروح روابطه فوق را در مقاله Bauld [8] می توان دید.

باتوجه به [4] روابط کرنش در رینگ عبارت است از:

$$\varepsilon_{\theta r} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial v_r}{\partial \theta} + w_r \right) \quad (48)$$

$$k_{xr} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial \phi_{xr}}{\partial \theta} \right) \quad (49)$$

$$k_{zr} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial \phi_{zr}}{\partial \theta} - \phi_{\theta r} \right) \quad (50)$$

$$\tau_r = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial \phi_{\theta r}}{\partial \theta} + \phi_{zr} \right) \quad (51)$$

$$\delta W_{int}^{stringer} = \int_{-l}^l [N_{xs} \delta \varepsilon_{xx}^s + M_{\theta s} \delta K_{\theta s}] dx \quad (25)$$

که در رابطه فوق $M_{\theta s}$ ، N_{xs} نیروی محوری و ممان خمشی در المان استرینگر است:

$$N_{xs} = (EA)_s \varepsilon_{xx}^s \quad (26)$$

$$M_{\theta s} = (EI)_s K_{\theta s} \quad (27)$$

۵. معادلات حاکم بر رینگ

۵-۱. روابط کرنش و تغییر شکل در رینگ

با توجه به اینکه شعاع رینگ نسبت به ابعاد مقطع آن بسیار بزرگ است لذا شرایط تیر خمیده برای آن صادق نیست. پس رینگ را تیر اولری در نظر می گیریم. با در نظر گرفتن تغییر شکل های خطی و اینکه مقطع تیر می تواند نامتقارن باشد رابطه تغییر شکل ها بصورت زیر تعریف می گردند:

$$U_r(x, \theta, z) = u_r(\theta) + z \phi_{\theta r}(\theta) \quad (38)$$

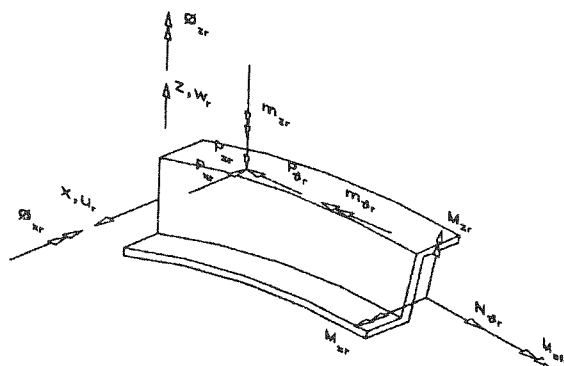
$$V_r(x, \theta, z) = v_r(\theta) + z \phi_{xr}(\theta) - x \phi_{zr}(\theta) \quad (39)$$

$$W_r(x, \theta, z) = w_r(\theta) - x \phi_{\theta r}(\theta) \quad (40)$$

$$\phi_{xr} = \frac{1}{R_0} \left(v_r - \frac{\partial w_r}{\partial \theta} \right) \quad (41)$$

$$\phi_{zr} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \quad (42)$$

در شکل (۴)، مقطع انتخابی رینگ و محورهای مختصات و جهات تغییر شکل ها همراه با جهات دوران ها نشان داده شده است.



شکل (۴) نمایش مقطع، تغییر مکان ها، دوران ها، نیروها و ممان های داخلی در رینگ.

۵.۲ روابط کار مجازی در رینگ

با توجه به نیروها و ممان های اعمال شده بر المان رینگ کار مجازی را بشکل زیر داریم [۱۳]

$$\delta W_{int}^{ring} = \int_{-\phi}^{\phi} \left[N_{\theta r} \delta \varepsilon_{\theta r} + M_{x r} \delta K_{x r} + M_{z r} \delta K_{z r} + M_{s t} \delta \tau_r + \frac{M_{\omega r}}{R_0} \delta \left(\frac{\partial \tau_r}{\partial \theta} \right) \right] R_0^{d\theta} \quad (52)$$

۶- معادلات قیدها

چون پوسته و استرینگر بهم چسبیده اند و نباید نسبت بهم حرکت داشته باشند لذا باید معادله های (۵۳) و (۵۴) زیر ارضا شوند که e_s فاصله تار خنثی استرینگر تا تار خنثی پوسته است.

$$C_{xs} = \left[u(x,0) - \frac{t}{2} \phi_x(x,0) \right] - [u_s(x) + e_s \phi_{\theta s}(x)] = 0 \quad (53)$$

دو جمله اول از معادله (۵۳) تغییر شکل پوسته و جمله های سوم و چهارم تغییر شکل استرینگر در جهت محور z ها را نشان می دهند.

$$C_{zs} = [w(x,0) - w_s(x)] = 0 \quad (54)$$

جمله اول معادله (۵۴) تغییر شکل پوسته و جمله دوم تغییر شکل استرینگر در جهت محور z ها است. چون پوسته و رینگ بهم چسبیده اند و نباید از هم جدا شوند، لذا معادله های (۵۵) و (۵۶) عدم حرکت لغزشی و جدایش را بین پوسته و رینگ توصیف می کنند:

$$C_{\theta r} = \left[v(0,\theta) - \frac{t}{2} \phi_{\theta}(0,\theta) \right] - [V_r(\theta) + e_r \phi_{x r}(\theta) - \omega_0 \tau_r(\theta)] = 0 \quad (55)$$

$$C_{zr} = [w(0,\theta) - w_r(\theta)] = 0 \quad (56)$$

معادله زیر عدم دوران حول محور z ها یا عدم پیچش نسبی بین پوسته و رینگ را توصیف می کند.

$$C_{\pi} = \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{t}{2} \frac{\partial \phi_{\theta}}{\partial x} \right]_{x=0} - [\phi_{\pi}(\theta) - \omega_1 \tau_r(\theta)] = 0 \quad (57)$$

و ω_1 ضریب اعوجاج که برای توضیح آن به مرجع [1] مراجعه شود.

معادله (۵۸) عدم دوران حول محور θ یا عدم پیچش نسبی بین پوسته و رینگ که بصورت زیر است:

$$C_{\pi} = \left[\frac{\partial w}{\partial x} \right]_{x=0} - [-\phi_{\theta r}(\theta)] = 0 \quad (58)$$

چنانچه برای پوسته در پوش نیز در نظر گرفته شود نیروهای محوری باعث انبساط پوسته و استرینگر می شوند که باید انبساط آنها یکسان باشد. یعنی:

$$C_{ls} = [u(l,0) - u(-l,0)] - [u_s(l) - u_s(-l)] = 0 \quad (59)$$

چنانچه هفت معادله قیدی (از ۵۳ تا ۵۹) فوق را در تغییرات^۱ نیروها و ممان های مربوطه ضرب کنیم، تغییرات کار مجازی نیروهای تعاملی بدست می آید.

۷- روش حل تقریبی

۷.۱- معادلات تقریبی تغییر مکان

با توجه به معادلات شرایط مرزی (۱۷ تا ۲۶) و معادلات تعادل پوسته، مؤلفه های تغییر مکان بصورت مجموعه ای از سری فوریه انتخاب می شوند. در مجموعه سری فوریه هم از جملات سینوسی و هم کسینوسی استفاده می شود. بدین ترتیب تغییر شکل های دورانی را می توان از همین مجموعه بدست آورد.

$$U(x,\theta) = \frac{q_0 \cdot x}{2l} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N u_{1mn} \sin(\alpha_m \cdot x) \cos(\beta_n \theta) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u_{2mn} \cos(\alpha_m \cdot x) \cos(\beta_n \theta) \quad (60)$$

$$V(x,\theta) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N v_{1m} \cos(\alpha_m \cdot x) \sin(\beta_n \theta) +$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N v_{2mn} \sin(\alpha_m \cdot x) \sin(\beta_n \theta) \quad (61)$$

$$W(x,\theta) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N w_{1mn} \cos(\alpha_m \cdot x) \cos(\beta_n \theta) +$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{2mn} \sin(\alpha_m \cdot x) \cos(\beta_n \theta) \quad (62)$$

و نیروها و ممان های تعاملی بین پوسته و رینگ از معادلات تغییر شکل رینگ بدست می آید.

$$P_{xr}(\theta) = \sum_{n=1}^N P_{xrn} \cos(\beta_n \theta) \quad (72)$$

$$P_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=1}^N P_{\theta rn} \sin(\beta_n \theta) \quad (73)$$

$$P_{zr}(\theta) = \sum_{n=0}^N P_{zrn} \cos(\beta_n \theta) \quad (74)$$

$$m_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=1}^N m_{\theta rn} \cos(\beta_n \theta) \quad (75)$$

$$m_{zr}(\theta) = \sum_{n=1}^N m_{zrn} \cos(\beta_n \theta) \quad (76)$$

۸. استخراج معادلات جبری و ماتریس های سختی پوسته، استرینگر و رینگ

با قرار دادن جملات معادله (۱۴) در معادله (۱۱) و هم چنین قرار دادن معادلات (۳۳) و (۳۴) در معادلات (۳۶) و (۳۷) و سپس جایگذاری آنها در معادله (۳۵) و به همین صورت با قرار دادن معادلات (۴۸) تا (۵۱) در معادلات (۴۳) تا (۴۷) و سپس جایگذاری آنها در معادله (۵۲)، روابط کار مجازی برای پوسته، رینگ و استرینگر برحسب تغییر شکل ها ایجاد و سپس با استفاده از روش Ritz و در نهایت دستگاه معادلات جبری برحسب ضرایب مجهول سری فوریه بدست می آیند. شکل نمادین این معادلات به صورت روابط ماتریسی، معادله (۷۷) است. ماتریس سختی دارای زیر ماتریس هایی است که عبارتند از K_{11} ماتریس سختی پوسته، K_{22} ماتریس سختی استرینگر، K_{33} ماتریس سختی رینگ، B_{11} و B_{12} و B_{13} عناصر ماتریس قیود بین پوسته با استرینگر و پوسته با رینگ و پوسته با نیروی محوری در پوش است، B_{23} ، B_{12} عناصر ماتریس قیود بین استرینگر و رینگ و استرینگر با نیروی محوری و B_{32} قید بین رینگ و نیروی تعاملی است

$$\begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} \\ B_{11}^T & B_{21}^T & 0 \\ B_{12}^T & 0 & B_{32}^T \\ B_{13}^T & B_{23}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & 0 & B_{23} \\ 0 & B_{32} & 0 \\ [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_{shell} \\ \vec{U}_{stringer} \\ \vec{U}_{ring} \\ \vec{P}_{stringer} \\ \vec{P}_{ring} \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$\alpha_m = \frac{m\pi}{l}, \quad \beta_n = \frac{n\pi}{\Phi} \quad (62)$$

جمله اول معادله (۶۰) کشش طولی استوانه در اثر نیروی محوری است
با توجه به معادلات پوسته می توان معادلات تقریبی استرینگر را بصورت زیر بدست آورد.

$$U_S(x, \theta) = \frac{q_l \cdot x}{2l} + \sum_{m=1}^M u_{s1m} \sin(\alpha_m \cdot x) + \sum_{m=1}^M u_{s2m} \cos(\alpha_m \cdot x) \quad (64)$$

$$W_S(x, \theta) = \sum_{m=1}^M w_{s1m} \sin(\alpha_m \cdot x) + \sum_{m=1}^M w_{s2m} \cos(\alpha_m \cdot x) \quad (65)$$

معادلات مربوط به رینگ نیز از معادلات پوسته بدست می آید که عبارتند از

$$U_r(\theta) = \sum_{n=1}^N u_{rn} \cos(\beta_n \theta) \quad (66)$$

$$V_r(\theta) = \sum_{n=1}^N v_{rn} \sin(\beta_n \theta) \quad (67)$$

$$W_r(\theta) = \sum_{n=0}^N w_{rn} \cos(\beta_n \theta) \quad (68)$$

$$\phi_{\theta r}(\theta) = \sum_{n=0}^N \phi_{\theta rn} \cos(\beta_n \theta) \quad (69)$$

در روابط فوق کلیه ضرایب سری فوریه مجهولات مسئله هستند که باید محاسبه شوند.

۷-۲. معادلات تقریبی نیروها و ممان های تعاملی

چون عامل اساسی در تغییر شکل، نیروهای تعاملی هستند لذا با توجه به روابط تغییر مکان ها و معادلات تقریبی نیروهای تعاملی بین پوسته و استرینگر بشکل زیر فرض می شوند:

$$P_{xs}(x) = \sum_{m=1}^m P_{xs1m} \sin(\alpha_m \cdot x) + \sum_{m=1}^m P_{xs2m} \cos(\alpha_m \cdot x) \quad (70)$$

$$P_{zs}(x) = \sum_{n=1}^N P_{zs2m} \cos(\alpha_m \cdot x) + \sum_{m=1}^m P_{xs2m} \sin(\alpha_m \cdot x) \quad (71)$$

۱-۱-۱. ارائه نتایج و بحث پیرامون آنها

۱-۱-۱-۱. بررسی خیز در پوسته

شکل (۵) تغییرات شعاعی پوسته را در چهار مقطع، $1, \frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 0$ نشان می‌دهد. در $X1=0$ مقادیر خیز متغییر است چون در آن مقطع خود رینگ نیز تغییر شکل دارد حداکثر خیز در پوسته با توجه به حل تئوری غشائی برابر $w=5.1054$ میلی‌متر است، که مقدار تغییر شکل از برنامه $w=4.824$ میلی‌متر می‌باشد.

شکل (۶) تغییر مکان شعاعی پوسته را در چهار مقطع، $1, \frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 0$ نشان می‌دهد در $X1=0$ مقادیر خیز متغییر است چون در آن مقطع خود استرینگر نیز تغییر شکل دارد. حداکثر خیز $w=4.824$ میلی‌متر است.

از طرفی مقدار خیز در دو منحنی فوق و در مختصات $X1=1$ و $\Theta_1=1$ یکسان است با توجه باینکه معادلات کاملاً مستقل از هم هستند و فقط تابع ضرایب سری فوریه می‌باشند تغییر شکل یکسان در گوشه واحد تکرار دلیل بر صحت عملیات می‌باشد.

جهت بررسی دقت محاسبات انجام شده در فوق یک مخزن فولادی به ابعاد $l = 490 \text{ mm}$ و $R = 440 \text{ mm}$ ، $t=1.5 \text{ mm}$ را در نظر می‌گیریم و جواب‌های برنامه را با آنالیز غشائی پوسته مقایسه می‌نمائیم. تغییر شکل شعاعی مخزن با در پوش کروی از حل تئوری $w=0.3128 \text{ mm}$ و مقدار آن از برنامه $w=0.3114 \text{ mm}$ بدست می‌آید. منحنی تغییر شکل آن در جهت محور X ها دوشکل (۷) و منحنی تغییر شکل آن در جهت محور θ ها در شکل (۸) نشان داده شده است.

۱-۱-۲. بررسی نیروهای تعاملی و کرنش‌ها

شکل (۹) تغییرات نیروی تعاملی برشی بین پوسته و استرینگر را در امتداد محور X ها نشان می‌دهد (P_{xx}). مقدار این نیرو در $X1=0$ صفر است و سپس قدر مطلق آن تا 25 N/mm در $X1=0.15$ افزایش می‌یابد و سپس مقدار آن تا $X1=1$ کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد.

شکل (۱۰) تغییرات نیروی کششی، پوسته و استرینگر را در امتداد محور Z ها نشان می‌دهد (P_{zz}). مقدار این نیرو در $X1=0$ برابر $(0/28) \text{ N/mm}$ و کششی است، سپس قدر مطلق آن تا $(10) \text{ N/mm}$ فشاری در $X1=0.15$ کاهش می‌یابد و سپس مقدار آن در $X1=1$ به صفر می‌رسد.

شکل (۱۱) تغییرات نیروی تعاملی شعاعی بین پوسته و رینگ را در امتداد محور Z ها نشان می‌دهد (P_{rr}). قدر مطلق این نیرو در $\Theta_1=0$ برابر (60) نیوتن بر میلی‌متر کششی است و سپس مقدار آن تا $(10) \text{ N/mm}$ فشاری در $\Theta_1=1$ کاهش می‌یابد و در طول پوسته مقدار آن بسمت صفر میل می‌کند.

مشخص کننده تغییر مکان‌های ایجاد شده در پوسته بصورت توابعی از ضرایب سری فوریه ظاهر می‌شوند و تعداد جمله‌های آن برحسب مقدار M و N انتخابی (تعداد جملات سری فوریه) بدست می‌آیند. ابعاد ماتریس مربعی برابر است با $(6MN+2M+2N+2)$ ، تغییر مکان‌های ایجاد شده در استرینگر است و ابعاد ماتریس مربعی آن $(4M+1)$ و تغییر مکان‌های ایجاد شده در رینگ است که ابعاد ماتریس مربعی آن $(4N+1)$ می‌باشد، بنابراین تعداد کل سطرها یا ستون‌ها برابر $(6MN+6M+6N+4)$ خواهد بود. چنانچه $(M=N=1)$ باشد ماتریس $K[22,22]$ خواهد بود و چنانچه $(M=N=10)$ باشد $K[724,724]$ ، از طرف دیگر در ماتریس قیود بین پوسته و استرینگر $(4M)$ و ماتریس قیود بین پوسته و رینگ $(5N+1)$ سطر یا ستون دارند. بنابراین تعداد کل سطرها یا ستون‌ها $(6MN+10M+10N+5)$ است ابعاد ماتریس کلی برای $(M=N=1)$ تبدیل به $K[32,32]$ و برای $(M=N=10)$ ، $K[775,775]$ خواهد شد.

عناصر ماتریس‌های قیود B_{11} و B_{21} از رابط $(54,52)$ و عناصر B_{12} و B_{32} از معادلات $(56,55)$ و عناصر B_{13} و B_{23} از معادلات $(58,57)$ محاسبه می‌گردند. جهت محاسبه ضرایب ماتریس‌ها با استفاده از روش Ritz به دو طریق می‌توان عمل نمود. روش اول حل دستی معادلات فوق است که بسیار وقت گیر و طولانی و پراشتباه خواهد بود و روش دوم استفاده از یک نرم افزار حل تحلیلی مثل Maple که با برنامه نویسی می‌توان ضرایب را بدست آورد که در این مقاله جهت کنترل محاسبات از هر دو طریق استفاده شده است.

۹- حل دستگاه معادلات

با استفاده از روابط کار مجازی و کاربرد روش Ritz [9] و برنامه‌ای که در Maple تهیه شده کلیه ضرایب ماتریس‌های سختی محاسبه شده است. سپس با فرض $(M=N=1)$ اقدام به تهیه زیر برنامه‌های K_{11}, K_{22}, K_{33} و همچنین $B_{13}, B_{12}, B_{32}, B_{21}, B_{23}$ و معکوس آنها نموده و با اجرای هر بخش، نتایج را از نظر وجود عناصر کنترل نموده سپس با ادغام عناصر ماتریس سختی ساده $(M=N=3)$ مجدداً کنترل گردیده جهت کلی کردن، اصلاحاتی اساسی در برنامه داده شده و در این مرحله $(M=N=3)$ در نظر گرفته شده است. بعد از اطمینان از درست عمل کردن برنامه برای $(M=N=11)$ اجرا و نتایج آن بشرح ذیل استخراج شده اند که به بررسی آنها می‌پردازیم در ضمن در نمودارهایی که داده شده است محور افقی به یکی از دو صورت $X1=x/1$ و $\Theta_1=\theta/\Phi$ ظاهر می‌شوند.

شکل (۱۲) که منحنی آن تغییرات نیروهای داخلی محوری را در داخل استرینگر نشان می دهد عوامل بوجود آورنده آن (N_{xx}) از نیروهای محوری در پوسته و دیگری نیروهای تعاملی (P_{xx}) است مقدار این نیرو در محل $X1=0$ برابر (۱۲۲۵۰) نیوتن و در لبه واحد تکرار $x1=1$ برابر (۹۶۵۰) نیوتن خواهد بود. کل نیروی اعمالی بر لبه واحد تکرار که شامل نیروی وارد بر استرینگر و پوسته است با توجه به حل تئوری غشائی برابر (۴۱۱۷۵) نیوتن است که مقدار نیروی وارد بر استرینگر قابل توجه است.

شکل (۱۲) منحنی تغییرات نیروهای داخلی محیطی را در داخل رینگ نشان می دهد (N_{θ}). عوامل بوجود آورنده آن یکی فشار داخلی در مخزن و دیگری نیروهای تعاملی (P_{θ}) است، مقدار این نیرو در محل $\Theta_1=0$ برابر (۱۹۷۲۰) نیوتن و در لبه واحد تکرار $\Theta_1=1$ برابر (۱۹۲۸۰) نیوتن خواهد بود. کل نیروی اعمالی بر لبه واحد تکرار که شامل نیروی وارد بر رینگ و نیروی وارد بر پوسته می شود با توجه به حل تئوری غشائی برای پوسته ساده برابر (۵۷۰۷۰) نیوتن است که مقدار بدست آمده برای پوسته قابل قبول و منطقی است. از طرفی در حل تئوری غشائی داریم که تنش محیطی دو برابر تنش طولی در مخازن تحت فشار است. در اینجا نیروی محیطی بر واحد طول، (۹۹/۴) نیوتن بر میلیمتر و نیروی طولی بر واحد طول برابر (۵۴/۴) نیوتن بر میلیمتر است که صحت عملیات را تأیید می کند. توجه شود که به خاطر وجود رینگ و استرینگر با خواص سطحی مختلف نباید تنش محیطی دقیقاً دو برابر تنش طولی باشد.

شکل (۱۴) منحنی تغییرات ممان خمشی داخل صفحه را حول محور X ها در داخل رینگ نشان می دهد (M_{xx}). مقدار این ممان در محل $\Theta_1=0$ برابر (۰/۵) نیوتن میلیمتر و در لبه واحد تکرار $\Theta_1=1$ به صفر کاهش خواهد یافت.

شکل (۱۵) تغییرات ممان خمشی خارج از صفحه (M_{zz}) را حول محور Z ها در داخل رینگ نشان می دهد. مقدار این ممان در محل $\Theta_1=0$ برابر (۰/۳۳) نیوتن در میلیمتر و در لبه واحد تکرار $\Theta_1=1$ برابر (۰/۰۲۸) نیوتن میلیمتر خواهد بود مقدار این ممان نسبت به ممان خمشی رینگ در قسمت بالا کوچک است و این مقدار منطقی بنظر می رسد.

شکل (۱۶) منحنی تغییرات ممان اعوجاجی (Bimoment) را در داخل رینگ نشان می دهد (M_{ω}). مقدار این ممان در محل $\Phi=0$ برابر (۰/۰۰۰۵) نیوتن میلیمتر مربع در لبه واحد تکرار $\Theta_1=1$ برابر صفر خواهد بود. مقدار این ممان نسبت به ممان خمشی رینگ در قسمت بالا بسیار کوچک است.

شکل (۱۷) منحنی تغییرات کرنش تار میانی در پوسته را در امتداد محور X ها نشان می دهد. مقدار کرنش هر چه از

محل در گیری با رینگ دورتر می شویم کمتر می شود.

در شکل (۱۸) منحنی تغییرات کرنش محیطی تار میانی در پوسته، در امتداد محور θ نشان داده شده است. مقدار کرنش در طول کمان واحد تکرار تغییر می کند.

حال چنانچه نتایج بدست آمده را با نتایج مقالات [11] و [12] مقایسه نمائیم با توجه به عدم یکنواختی سیستم واحدها و تفاوت ناچیزی که در شعاع و ضخامت پوسته ها وجود دارد، نتایج بسیار بهم نزدیک هستند و بسهولت دقت بالای نتایج در این مقاله مشهود است.

۱-۱- بررسی اثر تغییر فواصل رینگ و استرینگر بر نیروهای تعاملی

تحلیل بارهای تعاملی روی پوسته در دو حالت بررسی می شود. اول فرض ثابت بودن طول و عرض واحد تکرار و تغییر شعاع و ضخامت پوسته است. در شکل (۱۹) تغییرات نیروی تعاملی P_{xx} و P_{θ} مشاهده می شود. نیروی P_{xx} که مقدار آن تابعی از r است، مشابه تنش طولی در استوانه بصورت خطی کاهش می یابد. این تنش به سه قسمت تقسیم می شود $\sigma_x = \sigma_{sh} + \sigma_{zs} + \sigma_{xr}$ و چون مشخصات رینگ و استرینگر و زاویه مرکزی Φ ثابت است، بنابراین تغییرات خطی تنش کلی روی هر جمله فوق اثر خطی می گذارد و افزایش t مقدار P_{xx} را به مقدار ناچیزی افزایش می دهد. از طرفی P_{θ} نیز در محدوده $500 \leq r \leq 1200$ بصورت خطی افزایش می یابد و در $1200 \leq r$ در اثر افزایش شعاع پوسته Φ کاهش می یابد که باعث کاهش P_{θ} می شود. (این برنامه در پوسته های نیمه عمیق صادق است).

شکل (۲۰) منحنی تغییرات نیروی های P_{zz} و P_{ω} را نشان می دهد که مشابه تنش های طولی و محیطی خطی افزایش می یابند. از طرفی افزایش مقدار t باعث تغییرات ناچیزی می شود (هر کدام از منحنی ها نشان دهنده سه منحنی با t های مختلف است که بر هم منطبق هستند). در شکل (۲۱) تغییرات P_{zz} و P_{ω} دیده می شود مقدار P_{zz} ، برآیند دو نیروی برشی P_{xx} و P_{θ} است. این منحنی بر اهمیت P_{zz} نسبت به P_{ω} تأکید دارد.

در شکل (۲۲) با بررسی هر چهار نیروی تعاملی برای حالتی که $L=280$ میلیمتر و $b=190$ میلیمتر مقدار تنش برشی در رینگ P_{zz} بار بحرانی است و مکانیزم جدایش، کنده شدن پرچها در جهت شعاعی از رینگ خواهد بود و مقدار این نیرو برای هر r دلخواه از منحنی مربوطه بدست می آید و تغییرات ضخامت پوسته در محدوده $1 \leq t \leq 2$ mm در آن بی تأثیر است.

حالت دوم بر تحلیل بارهای تعاملی بر مبنای تغییرات طول

(1) و زاویه مرکزی پوسته Φ استوار است. با فرض ثابت نگهداشتن $t=1.56 \text{ mm}$ و $r=3098 \text{ mm}$ یعنی تغییر فواصل رینگ و استرینگر مورد نظر است. با توجه به منحنی های شکل (۲۲) تغییرات P_{xs} ، ملاحظه می شود که مقدار $F_x=(p \Phi r) r$ است. چون Φ متغیر است با افزایش آن طول کمان پوسته $b=2(r\Phi)$ و نیز تغییر شکل های آن افزایش یافته و فشار سه مؤلفه ای می شود. در نتیجه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. از طرف دیگر افزایش طول نیز باعث افزایش P_{xs} می شود.

در شکل (۲۴) نیروی تعاملی P_{zs} نیز همان استدلال را دارد، اما افزایش طول باعث کاهش P_{xs} می گردد و از طرفی رابطه $F_z=2\sin(\Phi)(rp)$ سینوسی بودن P_{zs} را نشان می دهد و وقتی مقدار Φ افزایش می یابد تغییر شکل ها در پوسته زیاد شده و مؤلفه های فشار در سه جهت نسبت به حالت اولیه کاهش می یابد و منحنی از شکل سینوسی خارج می شود.

در شکل (۲۵) توزیع نیروهای تعاملی در رینگ P_{zz} مورد بررسی قرار می گیرد نیروی تعاملی P_{zz} مشابه نیروی $F_z=2(p.r.\sin(\Phi))$ است که باید بر طول $b=2(r.\Phi)$ تقسیم شود که یک تابع نزولی بر حسب Φ بصورت $[\sin(\Phi)/\Phi]$ است از طرفی مؤلفه های نیروی محیطی $(N_\theta \sin(\Phi))$ در پوسته در اثر افزایش Φ افزایش می یابد که مقدار اثر فشار را کاهش می دهد.

در شکل (۲۶) چهار نیروی تعاملی روی رینگ و استرینگر برای پوسته تعریف شده نشان داده شده است. مشابه حالت قبل ملاحظه می شود که اثر نیروی برشی ناچیز است و در دیاگرام نیامده و در عوض نیروهای تعاملی شعاعی باعث جدایش در اتصالات می شود. چنانچه $l=100 \text{ mm}$ و $\Phi < 0.1$ رادیان رینگ جدا می شود و $\Phi > 0.1$ رادیان هر کدام از رینگ و استرینگر امکان جدایش دارند و در $l=250 \text{ mm}$ و مقدار $\Phi < 0.08$ رادیان پوسته از رینگ جدا می شود.

$\Phi > 0.08$ استرینگر جدا می شود و در $l=100 \text{ mm}$ و $\Phi < 0.03$ رادیان رینگ جدا می شود و در $\Phi > 0.03$ رادیان استرینگر جدا می شود و مقدار نیروی هر کدام از حالات از دیاگرام و برنامه بدست می آید.

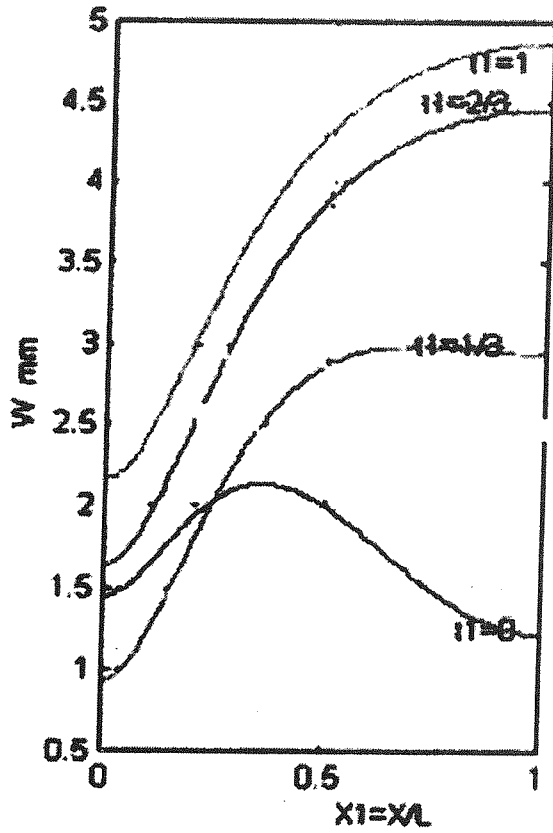
فهرست علائم

C_{is} قید تغییر شکل لبه ای بین پوسته و استرینگر در امتداد x
 C_{xs}, C_{zs} قیود انتقالی بین پوسته و استرینگر در امتداد x و z
 $C_{xt}, C_{zt}, C_{\theta}$ قیود انتقال بین پوسته و رینگ در امتداد x و θ و z
 C_{rt}, C_{θ} قیود دورانی بین پوسته و رینگ در امتداد θ و z
 e_r فاصله تار خنثی رینگ تا تار خنثی پوسته
 e_x فاصله تار خنثی استرینگر تا تار خنثی پوسته

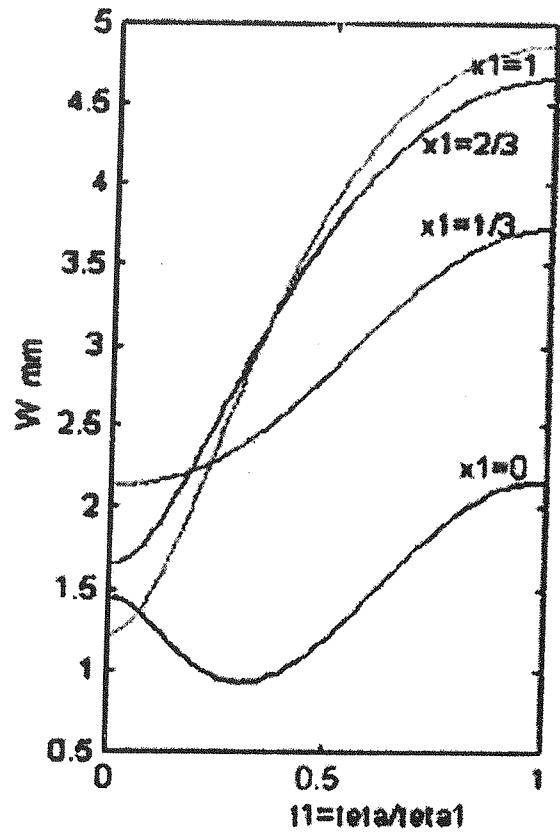
$e_{xx}, e_{\theta\theta}, e_{x\theta}$ کرنش در یک نقطه اختیاری از پوسته
 $(EA)_\theta, (EI)_s$ صلبیت کششی و خمشی در استرینگر
 $(EI_{xx})_r, (EI_{zz})_r, (EI_{xz})_r$ صلبیت خمشی و پیچشی در رینگ
 $(EI_{\theta\theta})_r, (EI_{\theta x})_r$ صلبیت اعوجاجی در رینگ
 F_1 نیروی خارجی عمل شده بر لبه ها
 GJ صلبیت پیچشی در رینگ
 $K_{xx}, K_{\theta\theta}, K_{x\theta}$ انحنا در پوسته
 K_{xs} انحنا در استرینگر
 $K_{\theta r}, K_{zr}$ انحنا در رینگ
 $m_{zr}, m_{\theta r}$ ممان های تعاملی بین پوسته و رینگ
 $M_{xx}, M_{\theta\theta}, M_{x\theta}$ ممان های وارد بر لبه های المان پوسته
 $M_{\theta s}$ ممان های وارد بر لبه های استرینگر در واحد تکرار
 $M_{xr}, M_{zr}, M_{\theta r}$ ممان های وارد بر لبه های رینگ در واحد تکرار
 $N_{xx}, N_{\theta\theta}, N_{x\theta}$ نیروهای وارد بر لبه های پوسته در واحد تکرار
 N_{xs} نیروهای وارد بر لبه های استرینگر در واحد تکرار
 $N_{\theta r}$ نیروهای وارد بر لبه های رینگ در واحد تکرار
 p فشار داخلی
 P_{zs} و P_{xs} نیروهای تعاملی بین پوسته و استرینگر
 $P_{zr}, P_{\theta r}, P_{xr}$ نیروهای تعاملی بین پوسته و رینگ
 Q بخشی از نیروی محوری در پوش ها که به استرینگر وارد میشود
 Q_x, Q_θ نیروی برشی عرضی وارد بر پوسته
 q_0, q_1 شدت تغییر شکل در پوسته و استرینگر در اثر نیروی محوری
 R, R_0 شعاع تار میانی در پوسته و رینگ
 U, V, W تغییر شکل های در یک نقطه اختیاری از پوسته
 Us, Ws تغییر شکل های در یک نقطه اختیاری از استرینگر
 U_r, V_r, W_r تغییر شکل های در یک نقطه اختیاری از رینگ
 u, v, w تغییر شکل های در یک نقطه تار میانی از پوسته
 u_s, w_s تغییر شکل های در یک نقطه تار میانی از استرینگر
 u_r, v_r, w_r تغییر شکل های در یک نقطه تار میانی از رینگ

فهرست علائم یونانی

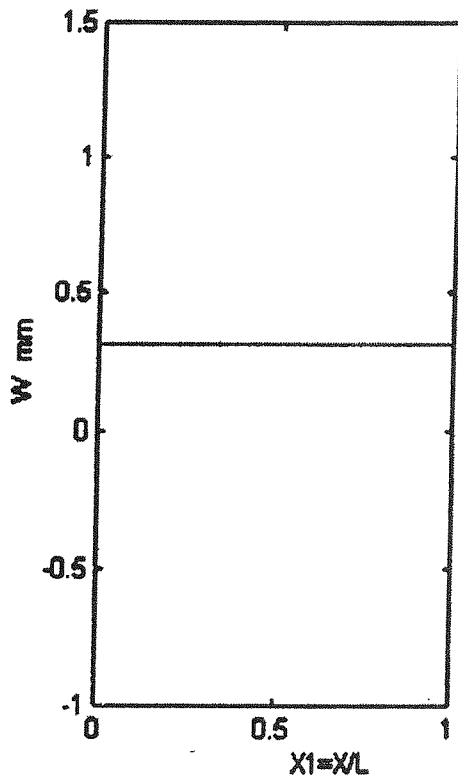
α_m پریود تغییر شکل طولی
 b_m پریود تغییر شکل محیطی
 Φ زاویه کمان واحد تکرار
 Φ_x, Φ_θ زوایای پیچش پوسته حول محور θ
 $\Phi_{\theta s}$ زاویه پیچش استرینگر حول محور θ
 $\Phi_{xr}, \Phi_{\theta r}, \Phi_{zr}$ زوایای پیچش رینگ حول محور x و θ و z
 ω_0, ω_1 ضرایب اعوجاج
 τ_r شدت تغییرات زاویه پیچش



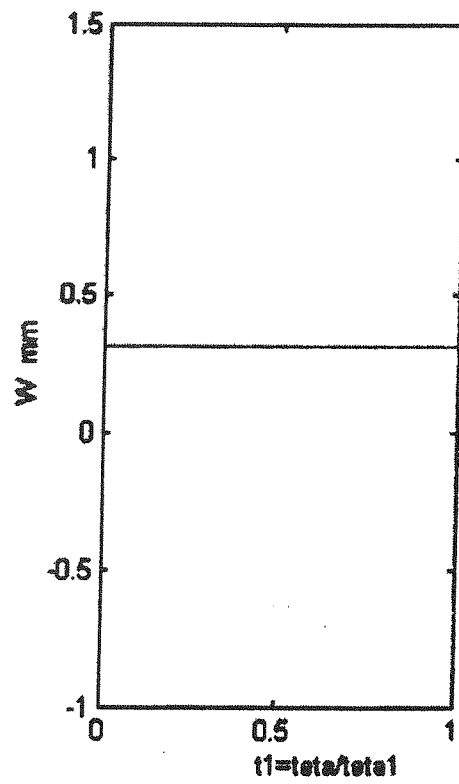
شکل (۵) تغییر مکان شعاعی در پوسته در امتداد محیطی.



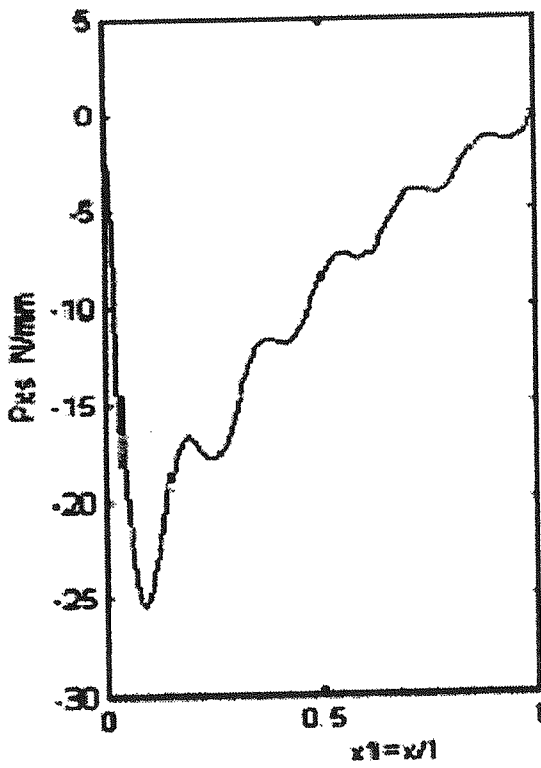
شکل (۶) تغییر مکان شعاعی در پوسته در امتداد طولی.



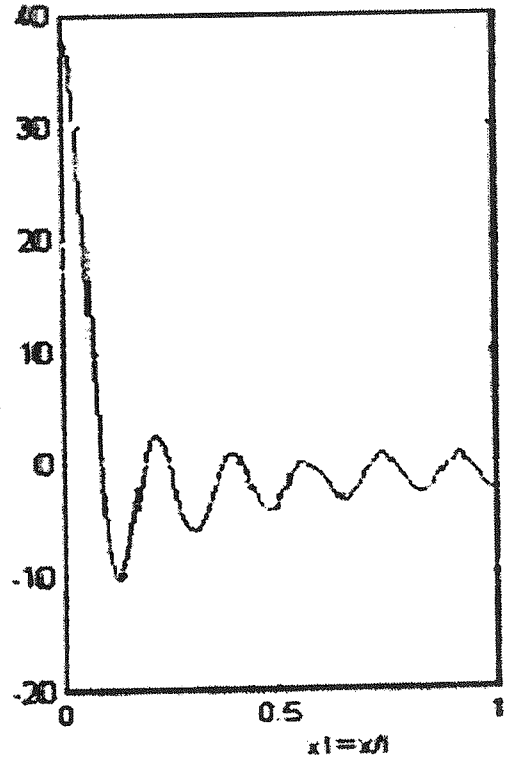
شکل (۷) تغییر مکان شعاعی در پوسته در امتداد محیطی.



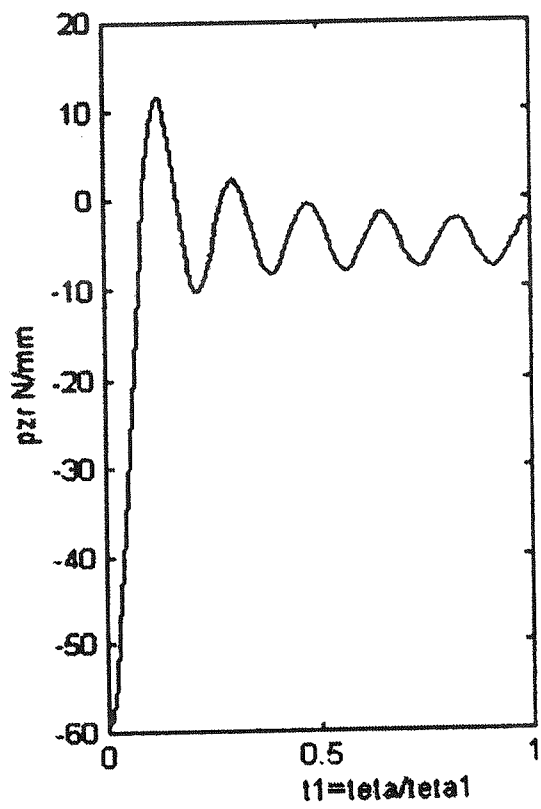
شکل (۸) تغییر مکان شعاعی در پوسته در امتداد طولی.



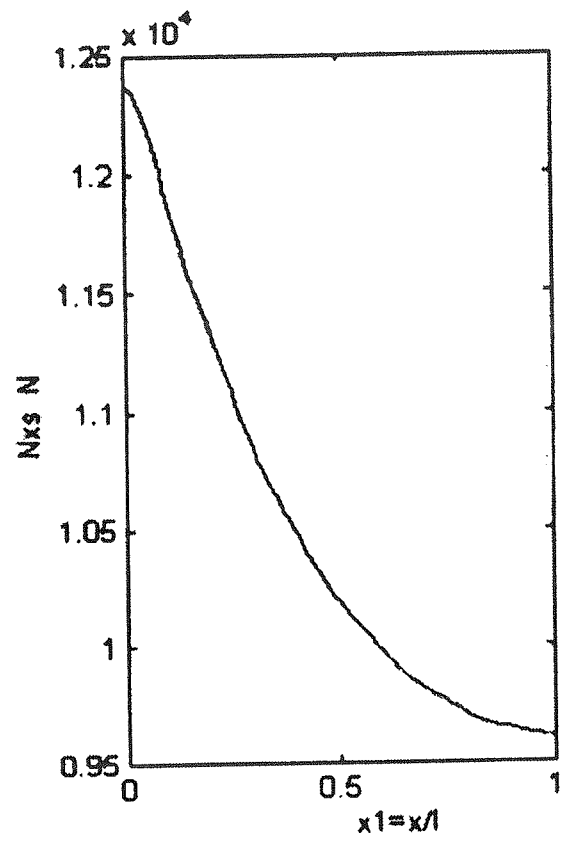
شکل (۹) توزیع نیروهای تعاملی برشی بین پوسته و استرینگر.



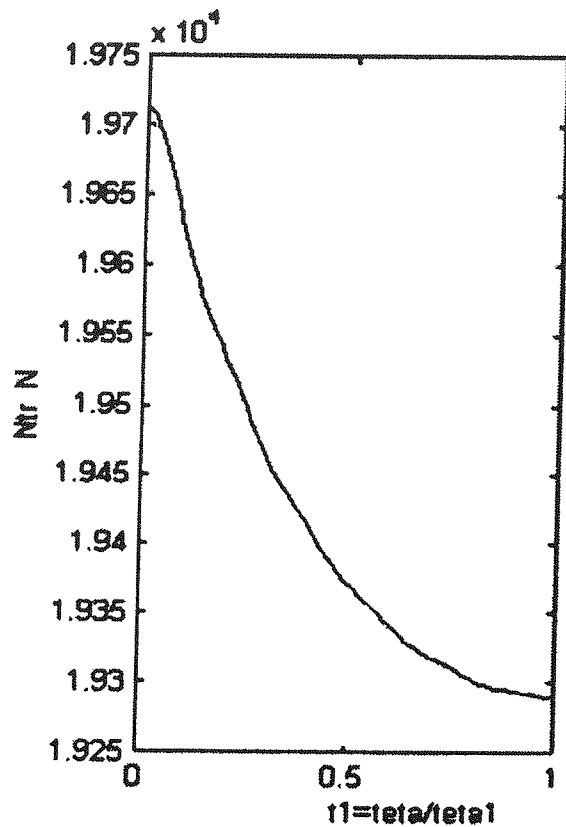
شکل (۱۰) توزیع نیروهای تعاملی شعاعی بین پوسته و استرینگر.



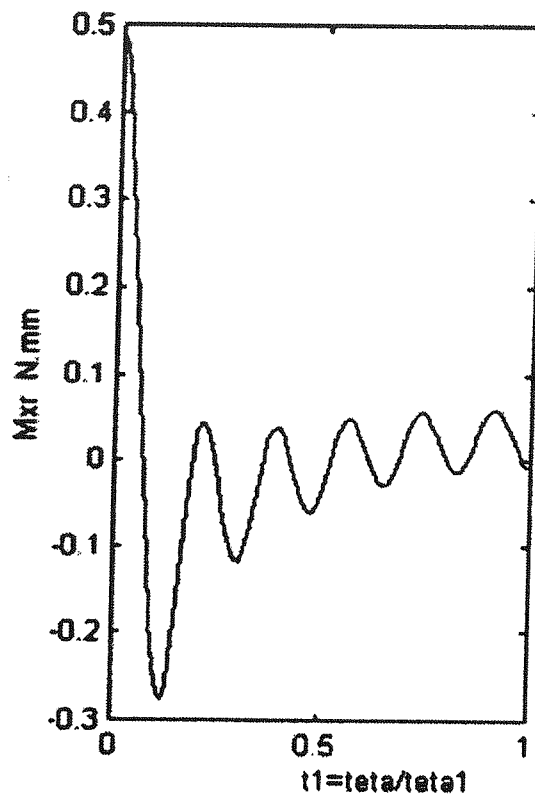
شکل (۱۱) توزیع نیروهای تعاملی شعاعی بین پوسته و رینگ.



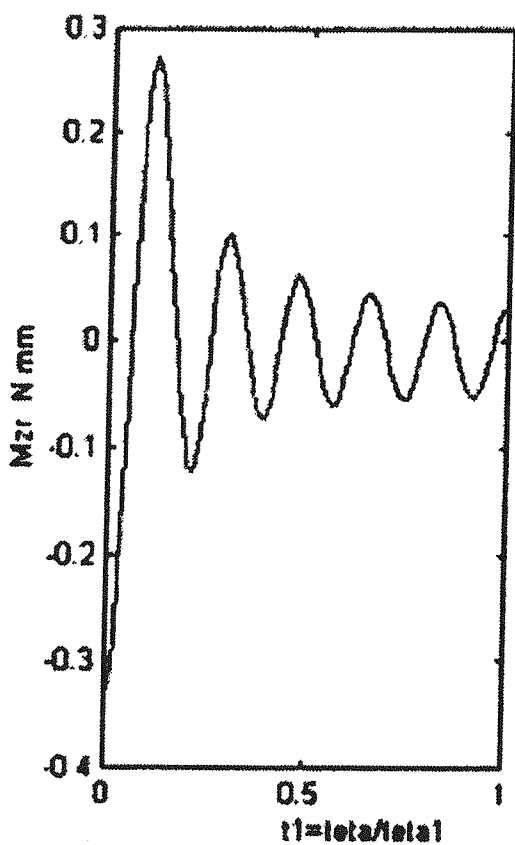
شکل (۱۲) توزیع نیروهای داخلی در استرینگر.



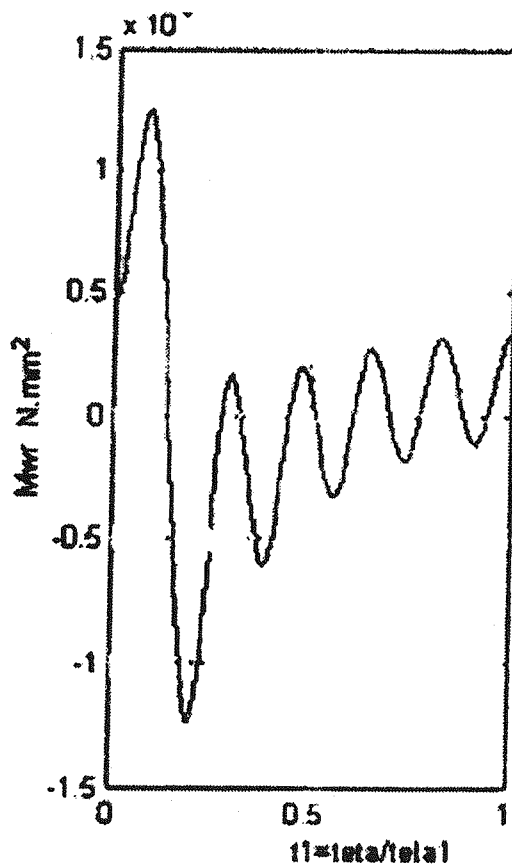
شکل (۱۳) توزیع نیروهای داخلی در رینگ.



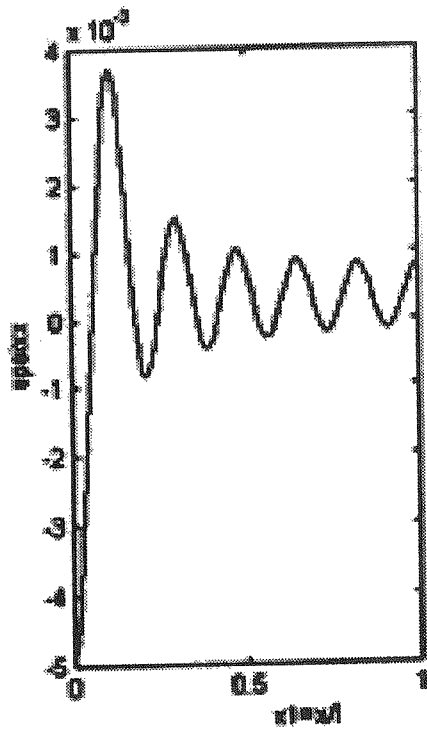
شکل (۱۴) توزیع ممات خمشی داخلی در رینگ حول محور x.



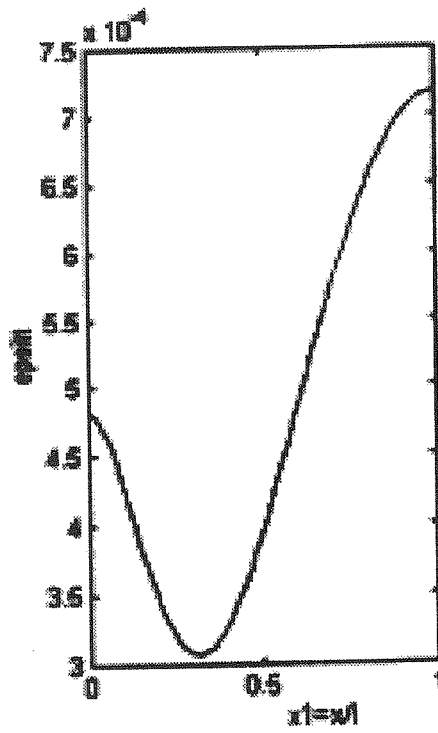
شکل (۱۵) توزیع ممات های خمشی داخلی در رینگ حول z.



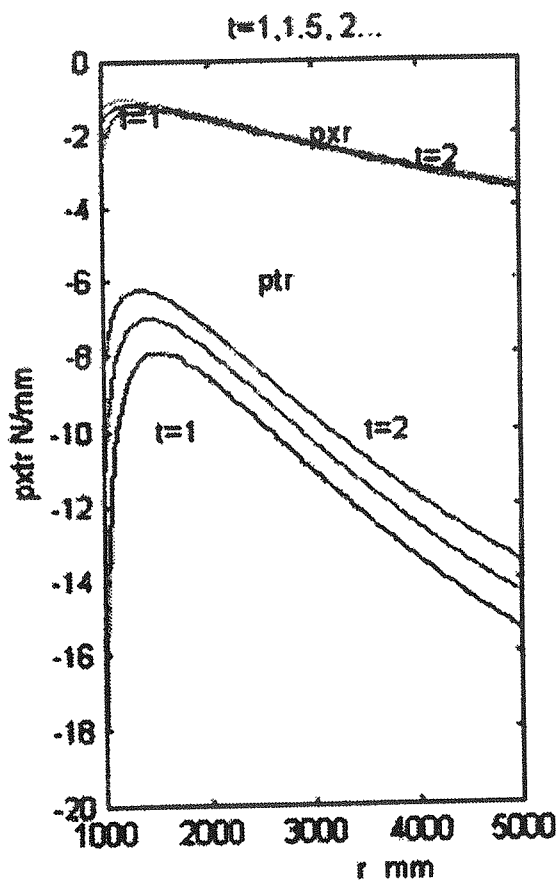
شکل (۱۶) توزیع ممات های اعوجاجی در رینگ.



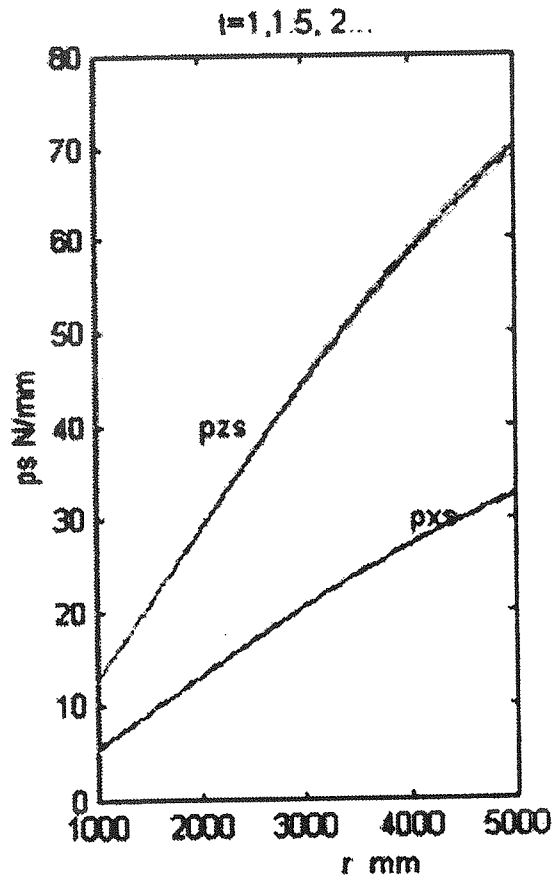
شکل (۱۷) توزیع کرنش طولی در پوسته.



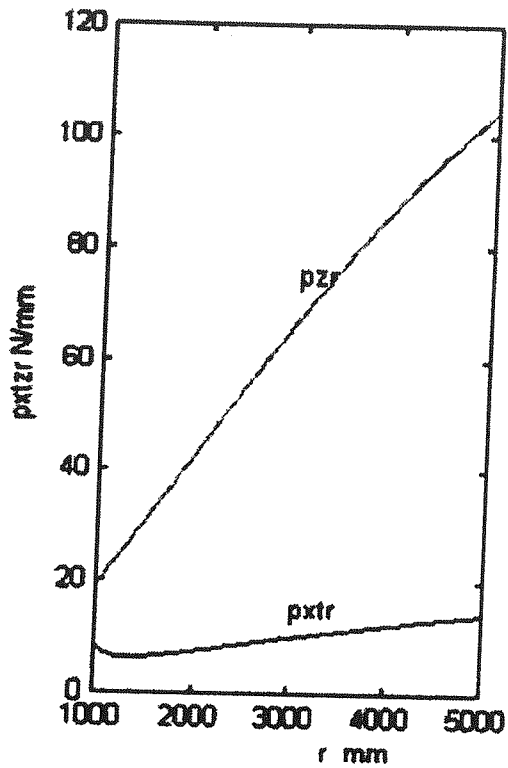
شکل (۱۸) توزیع کرنش محیطی در پوسته.



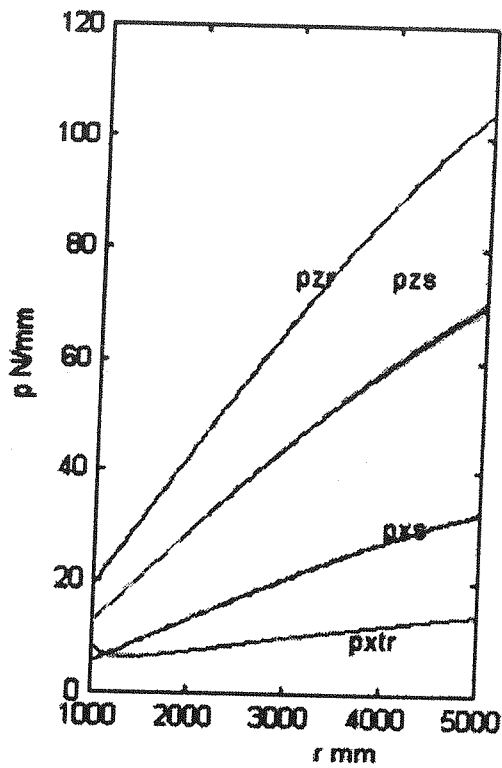
شکل (۱۹) نیروهای تعاملی برشی در رینگ (r).



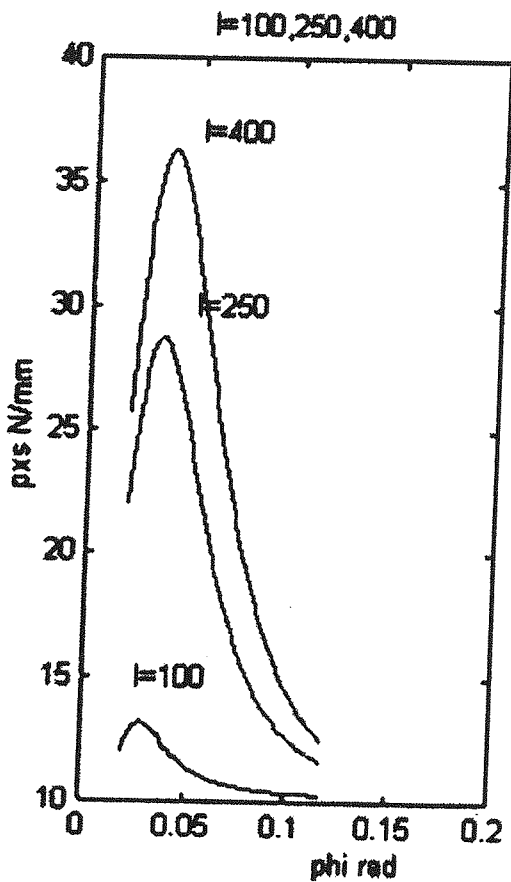
شکل (۲۰) نیروهای تعاملی برشی و عمودی در استرینگر (r).



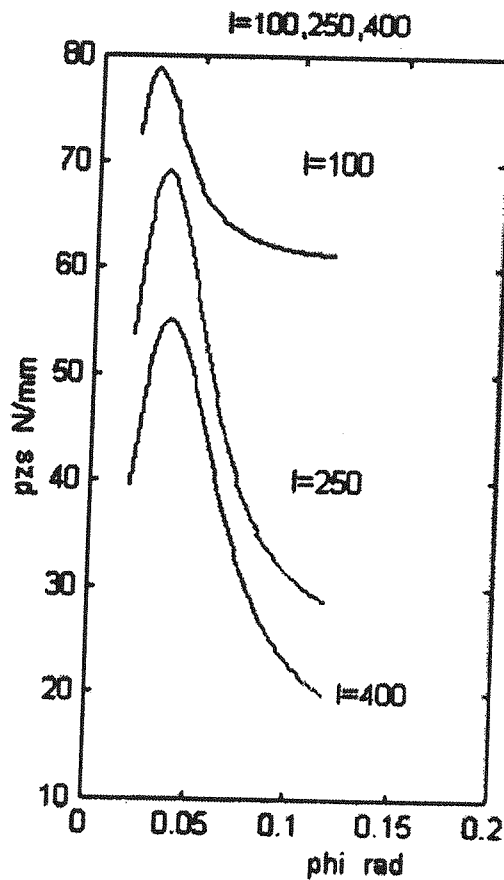
شکل (۲۱) نیروهای تعاملی برشی و عمودی در رینگ (r).



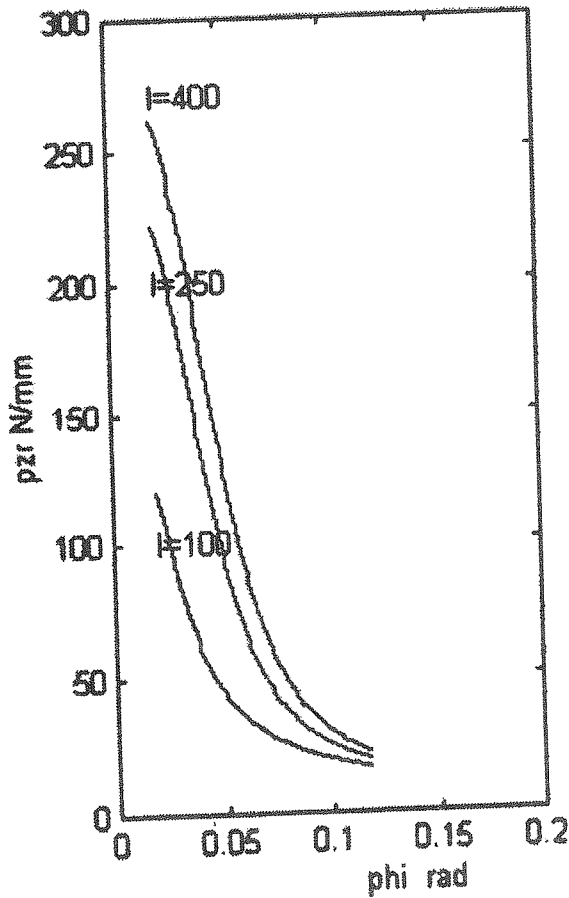
شکل (۲۲) مقایسه نیروهای تعاملی در رینگ و استرینگر (r).



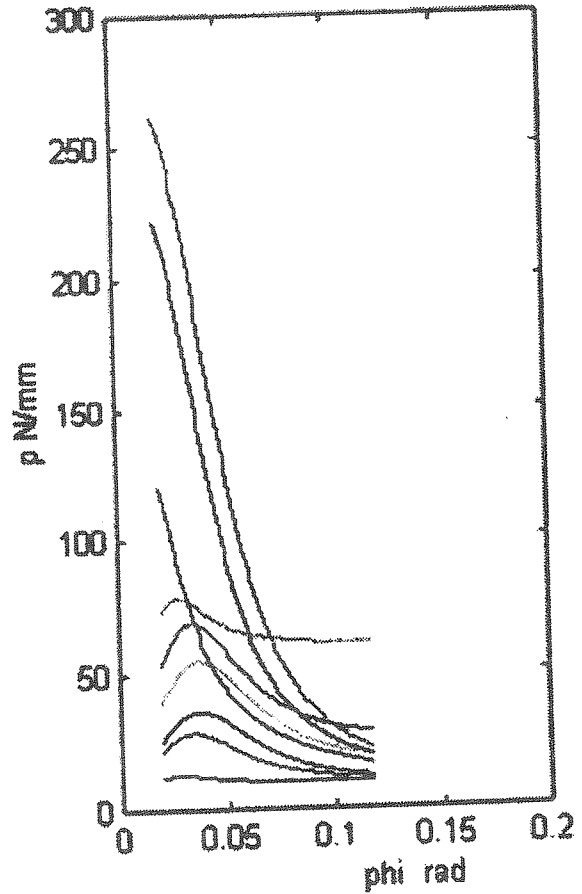
شکل (۲۳) نیروهای تعاملی برشی در استرینگر (phi).



شکل (۲۴) نیروهای تعاملی شعاعی در استرینگر (phi).



شکل (۲۵) نیروهای شعاعی در رینگ (φ).



شکل (۲۶) مقایسه نیروهای شعاعی در رینگ و استرینگر (φ).

زیرنویس ها

- 1.stringer
2. ring or frame
- 3.(unit cell)

- 4.Anticlastic Curvature
5. Variational

مراجع

- [1] James Ting, Shun Wang "Discrete Analysis of Stiffened Composite Cylindrical Shells", -AIAA-Vo23, NO 11, pp. 455-460, March 1985.
- [2] Eric. R. Johnson, Naveen Restogi "Intracting load in an Orthogonally stiffened Composit Cylindrical Shell" AIAA - Journal - Vol 33, No7, pp. 1319-1326, July 1995.
- [3] Clive L Dym, Irving H Shames "Solid Mechanics, A Variational Approach" p, 110, Library Congress Cataloging Data, 1973.
- [4] Don O. Brush, Bo O Almoth "Buckling Of Bars, Plates, and Shell", p. 142, Library of Congress Cataloging in Publication Data 1975.
- [5] W Tsai "Introduction to composite materials", P. 226, Technomatic publishing co 1980.
- [6] Noel W. murray "Introduction to the Theory of Thin Walled Structures" p. 74, Clarendon Press Oxford 1986.
- [7] Woodson.M.B "Optimal Design of Composite fuselage frame for Crashworthiness" Dissertation Departemant of Aerospace and Ocean Enging. Virginia Polytechinc Institue and State University Blacksburg. Virginia pp. 17-71 December 1994.
- [8] Bauld.N.R.Jr.and Tzeng. L A Valasov "Theory for Fiber-Reinforced Beams with Thin-Walled Open Cross-Sections"; International Journal of Solids and Structures; Vol. No. 3. pp. 227-297, 1984.
- [9] C.M.Wang "Ritz method for vaibration analysis of cylindrical shells with ring stiffeners" journal of engineering mechanics, pp. 134-142 february 1997.