

تحلیل فروریختگی پوسته‌های تقویت شده از طریق آزمون مدل، بررسی نتایج به کمک نرم‌افزارهای اجزای محدود و استفاده از آن برای بدنه فشار زیردریایی

احمد رضا صفری*، مصطفی غیور** و عبدالرضا کبیری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

پژوهشکده زیرسطحی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۸/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۵/۳)

چکیده - تجربه نشان داده است در عمل به دلیل تأثیر عوامل مختلف، رسیدن به فشار کمانش کلاسیک ناممکن است. این امر، نشان دهنده لزوم استفاده از نظریه‌های غیرخطی و در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر کمانش مانند نقص شکل و جوش در تحلیل کمانش است. آنچه که در این تحقیق صورت گرفته، ساخت مدلی است که تا حد امکان نزدیک به انحرافات استاندارد باشد، سپس کمانش مدلها تحت فشار هیدرواستاتیک هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود ADINA، ANSYS، COSMOS و MARC و با توجه به تواناییهای خاص هریک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند با در نظر گرفتن غیرخطیهای هندسی و ماده‌ای و نیز وارد کردن اثر نقص شکلها می‌توان به تقریب قابل قبولی از بار کمانش واقعی دست یافت. با توجه به نتایج حاصله، بدنه فشار یک زیردریایی نمونه نیز تحلیل شده است.

واژگان کلیدی: کمانش - فروریختگی - نقص شکل - آزمون - روش اجزای محدود

Theoretical and Experimental Collapse Analysis of Ring Stiffened Shells Using Finite Element Software Packages and Application of Results to a Submarine Pressure Hull

A. R. Safari, M. Ghayour, and A. Kabiri

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology
Isfahan Underwater Technology Research Center

Abstract: *It is empirically established that, due to a number of factors involved, a classical (linear) analysis of buckling pressure is impossible. Nonlinear theories of buckling are, therefore, required that involve effective factors such as imperfections and welding effects. In this study, models are developed which are as close to allowable standard deviations as possible. In the next stage, their buckling behavior is investigated both experimentally and numerically using finite element packages ADINA, ANSYS, COSMOS, and MARC based on specific capabilities of each. Results show that reasonable estimates of real buckling pressure will become possible when material and geometrical nonlinearities and initial imperfections are introduced into the analytical system. Finally, in the light of the results obtained, a submarine pressure hull is analyzed.*

Keywords: *Buckling, Collapse, Imperfection, Test, Finite element method.*

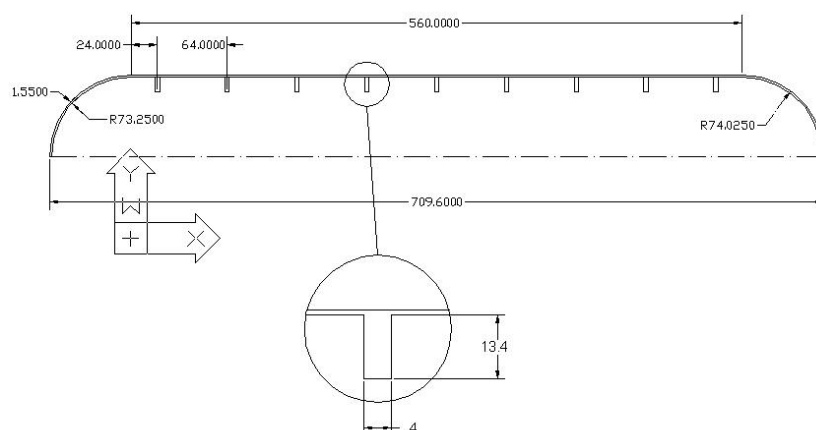
فهرست علائم

n	تعداد برآمدگیهای محیطی در کمانش	a	شعاع متوسط پوسته
P_c	فشار فروریختگی استوانه	E	مدول یانگ
P_{cr}	فشار کمانش کلاسیک	h	ضخامت پوسته
P_m	فشار کمانش کلاسیک استوانه	I_c	ممان دوم سطح مقطع مؤثر تقویت حول محور خشی
P_n	فشار کمانش کلاسیک استوانه تقویت شده	L	طول پوسته مابین تقویتها
P_y	فشار تسلیم محیطی استوانه	L_f	فاصله مراکز تقویتها
μ	ضریب پواسون	L_b	طول کلی مؤثر پوسته

۱- مقدمه

تحلیل ناپایداری^۱ سازه‌ها قدمت چند صد ساله دارد. کمانش ستون تحت فشار محوری پدیده‌ای است که تقریباً تمام دانشجویان مهندسی مکانیک و عمران با آن آشنا هستند و برای نخستین بار توسط لئونارد اویلر در حدود ۲۵۰ سال پیش به شکل ریاضی تدوین شد [۱]. برای انواع موده‌های کمانش در پوسته‌های مختلف اعم از استوانه‌ای، مخروطی و کروی تحلیل‌های کمانش متنوعی برای کمانش‌های خطی و غیرخطی صورت گرفته است. مقایسه نتایجی که به عنوان مثال توسط فون‌میز، نایرِدسون و برایانت برای کمانش کلاسیک پوسته‌های

استوانه‌ای، مخروطی و کمانش کلی^۲ به دست آمده [۲] با نتایج نرم‌افزار اختلاف محدود BOSOR حکایت از صحت این روابط در تخمین کمانش کلاسیک مخازن تحت فشار خارجی دارد [۳]. تنوع عوامل مؤثر بر کمانش به خصوص عوامل بسیار مهمی مانند وجود نقص‌شکل^۳ و جوش در سازه و از طرفی اثرات غیرخطی آنها سبب شده کمانش عملاً پدیده‌ای غیرخطی بوده و تفاوت زیادی بین نتایج نظری و عملی ایجاد شود. از این رو در سالهای اخیر عمدتاً گرایش به سمت تصحیح نتایج حاصل از نظریه‌های ساده فوق به کمک نتایج تجربی بوده است [۴]. به علاوه با گسترش روزافزون روشهای عددی استفاده از



شکل ۱- ابعاد و شکل مدل مورد استفاده

حاصله به این صورت‌اند:

$$E = 69 \times 10^3 \text{ Mpa}$$

مدول الاستیک

$$\mu = 0.33$$

ضریب پواسون

$$\sigma_y = 50 \text{ Mpa}$$

استحکام تسلیم

$$E_T = 166 \text{ Mpa}$$

مدول کارسختی

$$\sigma_u = 88 \text{ Mpa}$$

استحکام نهایی

۳- کمانش کلاسیک مدل

برای بررسی کمانش الاستیک خطی پوسته مابین تقویتها^۸ و کمانش کلی مدل می‌توان از معادلات ویندنبیگ و برایانت استفاده کرد. طبق این معادلات فشار کمانش کلاسیک پوسته استوانه‌ای مابین تقویتها برابر خواهد بود با [۷]:

$$P_m = \frac{2.42E}{(1-\mu^2)^{3/4}} \left[\frac{(h/2a)^{5/2}}{L/2a - 0.45(h/2a)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

همچنین فشار کمانش کلی را نیز می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

$$P_n = \frac{(Eh/a)\lambda^4}{(n^2 - 1 + \lambda^2/2)(n^2 + \lambda^2)^2} + \frac{(n^2 - 1)EI_c}{a^3 L_f} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\pi a}{L_b}$$

در این معادله بایستی P_n حداقل را برحسب n به دست آورد. در تحلیل کمانش خطی اگرچه مدل متقارن محوری بوده و

برنامه‌های اجزای محدود برای تحلیل کمانش خطی و غیرخطی سازه‌ها بسیار رایج شده است [۵].

در این تحقیق چند مدل بر حسب استاندارد BS و تا حد امکان طبق فرایندی که در طراحی بدنه فشار زیر دریایی دنبال می‌شود ساخته شده و سپس آزمون کمانش شده‌اند [۶]، پس از آن سعی شده است به کمک نرم‌افزارهای اجزای محدود ANSYS، ADINA، COSMOS و MARC و با توجه به قابلیت‌های ویژه‌ای که هرکدام از آنها دارند تحلیل دقیقی از فروریختگی^۴ مدل‌ها به دست آید. نتایج حاصله نشان می‌دهند می‌توان با وارد کردن اثرات غیرخطی شامل تغییرشکلهای بزرگ^۵، تغییرشکلهای پلاستیک^۶، انحرافات هندسی، اثرات نورد و اثرات جوش، علی‌رغم پیچیدگی و غیرخطی بودن کمانش، برآورد مناسبی از آن به دست آورد و بنابراین سازه‌های پیچیده‌تری مانند بدنه فشار زیردریایی را نیز به شکل مناسبی تحلیل کرد [۷].

۲- ساخت مدل

در شکل (۱) هندسه و ابعاد مدل ساخته شده نشان داده شده است. تقویتها از جنس آلیاژ A 1 6061 هستند همچنین پوسته استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیم آنیل شده گروه 1000 به دست آمده است. طبق نتایج حاصل از آزمونهای کشش نمونه‌هایی که مطابق استاندارد ASME ساخته شده‌اند، رفتار این آلیاژ را می‌توان به صورت الاستوپلاستیک کامل^۷ در نظر گرفت. خواص

جدول ۱- دو روش تحلیل مدل در COSMOS

شماره مود	روش اول (Mpa)	روش دوم (Mpa)
۱	۰/۶۴۵۸	۶/۴۲e-۵
۲	۵/۴۶e-۷	۳/۷۴e-۶
۳	۲۳/۰۲۵	۱۵/۱۲۶
۴	۳۰/۵۱۲	۲۳/۶۴۶
۵	۱۷/۲۲۸	۱۳/۹۶۲
۶	۹/۹۶۹	۸/۴۳۳
۷	۷/۱۷۶	۶/۰۹۹
۸	۶/۳۵۹	۵/۵۴۲
۱۰	۷/۰۲۸	۶/۴۷۴
۱۱	۷/۹۰۲	۷/۴۱۶
۱۲	۸/۹۸۹	۸/۶۵۳
۱۳	۱۰/۳۶۴	۹/۸۹۹

تحت بارگذاری متقارن محوری است ولی لزوماً مودهای کمانش آن تقارن محوری ندارند بنابراین بهترین نرم افزار برای تحلیل چنین سازه‌ای نرم افزاری است که بتواند به ازای مدل متقارن محوری مودهای کمانش متقارن و نامتقارن را نتیجه دهد. از بین نرم افزارهایی که در این تحقیق استفاده شده‌اند، برنامه‌های COSMOS و MARC این امکان را دارند. در نرم افزار COSMOS این کار بسیار ساده‌تر صورت می‌پذیرد، در این نرم افزار از المان دو گره‌ای جدار نازک الاستیک استفاده می‌شود بنابراین تنها اثرات غشایی و خمشی وارد می‌شوند و این المان برش را در نظر نمی‌گیرد، علی‌رغم مدلسازی دو بعدی شکل کمانش را می‌توان به صورت سه بعدی مشاهده نمود، به خصوص در این نرم افزار برای مسائلی که در تعادل استاتیکی اند نیازی به مقید کردن سازه نیست.

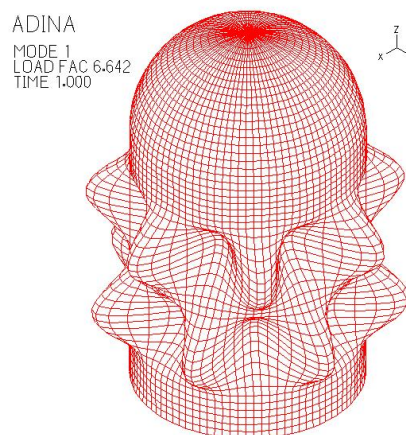
در جدول (۱) نتایج دو روش تحلیل مقایسه شده‌اند. در روش اول تقویتها با المانهای پوسته‌ای مدل شده‌اند، این روش به خصوص برای بررسی امکان کمانش در تقویتها مفید بوده و نتایج آن قابل مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل سه بعدی مدل

در نرم افزارهایی مانند ADINA است که تقویتها به کمک المانهای تیر مدل می‌شوند. در روش دوم تقویتها با استفاده از المانهای صفحه‌ای متقارن محوری مدل شده‌اند، در این روش به دلیل آنکه اتصال تقویت با پوسته به صورت لولایی اند نتایج حاصله با نتایج روابط نظری ویندنبگ و برایانت قابل مقایسه است. در این جدول دو سطر اول مودهای صلب‌اند. در نتایج هر کدام از روشها دو افت موضعی دیده می‌شود: افت اول در سطر سوم مربوط به مود کمانش کلی پوسته و $n=2$ است و افت دوم در سطر هشتم مربوط به مود کمانش موضعی پوسته و $n=7$ است.

در جدول (۲) نتایج حاصل از روش دوم تحلیل در COSMOS با نتایج حاصل از نظریه مقایسه شده است. شماره‌های داخل پرانتز شماره مود کمانش‌اند. مشخص است که مود بحرانی کمانش مود موضعی آن است. از تحلیل کمانش کلاسیک مدل در نرم افزار ADINA فشار کمانش $۶/۶۴$ مگاپاسکال و $n=7$ به دست آمده است که مشابه مقدار به دست آمده برای کمانش موضعی پوسته در سطر هشتم از روش اول جدول (۱) است. این مود کمانش در شکل (۲) نشان داده شده



شکل ۳- مدل فروریخته پس از آزمون



شکل ۲- مود کمانش کلاسیک مدل در ADINA

جدول ۲- نتایج کمانش کلاسیک مدل و نظری (Mpa)

روش تحلیل	کمانش کلی	کمانش موضعی
نظری (BS)	۱۴/۷۶ (۲)	۵/۳ (۷)
COSMOS	۱۵/۱۳ (۲)	۵/۵۴ (۷)

سکانت در تحلیل کمانش خطی در نرم افزار ADINA است. با استفاده از روش سکانت در ADINA مقدار بار کمانش $6/43$ مگاپاسکال به دست می آید که در مقایسه با مقدار کلاسیک $6/64$ نشان می دهد تغییرشکلهای بزرگ اثر چندانی در کاهش بار کمانش مدلها نداشته اند.

است. در شکل (۳) نیز مدل فروریخته پس از آزمون نشان داده شده است.

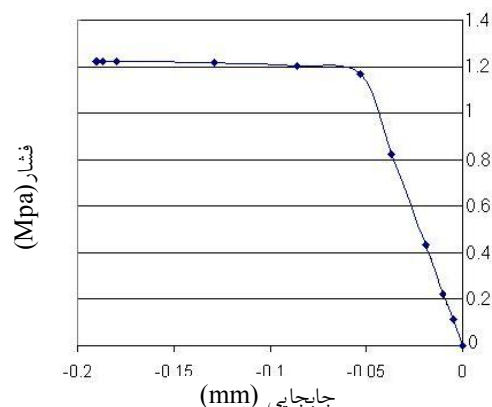
۴- بررسی عوامل مختلف مؤثر بر کمانش

۴-۱- اثر غیرخطیهای هندسی^۹

مرحله دوم از تحلیل در نظر گرفتن اثر تغییرشکلهای بزرگ در کمانش مدل است. برای این منظور اگرچه می توان از تحلیل مرحله به مرحله^{۱۰} الاستیک غیرخطی استفاده کرد ولی در نرم افزار MARC در تحلیل کمانش خطی می توان گزینه ای را برای منظور کردن جابه جاییهای بزرگ فعال کرد، با این کار در تحلیل از تانسور کرنش گرین-لاگرانژ و تانسور تنش دوم پایولا-کرشلف استفاده می شود. بنابراین در تحلیل کمانش تا حد زیادی اثر تغییرشکلهای بزرگ منظور می شود و می توان توسط آن و مقایسه نتایج با نتایج حاصل از تحلیل کمانش کلاسیک که در غیاب فعال کردن این گزینه به دست می آید میزان حساسیت سازه نسبت به غیرخطیهای هندسی را مشخص کرد. تحلیلها نشان می دهند این روش مشابه استفاده از روش

۴-۲- اثر غیرخطیهای ماده ای^{۱۱}

در مرحله سوم از تحلیل، اثر غیرخطیهای ماده ای بررسی می شود. یعنی بر روی مدل بدون نقص شکل، تحلیل فروریختگی غیرخطی با در نظر گرفتن ماده الاستوپلاستیک دوطبقه صورت خواهد گرفت. این نوع کمانش بر حسب رسم منحنی بار-تغییرشکل و به دست آوردن نقطه شروع تغییرشکلهای بزرگ در آن است. برای مدل مورد آزمایش این منحنی در شکل (۴) رسم شده است. مطابق این منحنی فشار فروریختگی حدود $1/21$ مگاپاسکال به دست می آید. با استفاده از مدل متقارن محوری مقدار بار فروریختگی $1/17$ مگاپاسکال به دست آمده که حکایت از دقت مدل سه بعدی برای تحلیل مرحله بعد دارد.



شکل ۴- نمودار بار-تغییر شکل فروریختگی متقارن محوری مدل

جدول ۳- مقایسه نتایج فروریختگی متقارن محوری مدل

نوع تحلیل	بار فروریختگی (Mpa)
مدل متقارن محوری	۱/۱۷
مدل سه بعدی	۱/۲۱
منحنی متوسط BS	۱/۱۴

در نظر گرفتن غیرخطیهای هندسی و ماده‌ای و منظور کردن اثر نقص شکل است. برای اندازه‌گیری انحرافات می‌توان از شابلون و یا بستن مدل روی دستگاه تراش و اندازه‌گیری به کمک ساعت اندیکاتوری استفاده کرد. در این تحقیق از روش دوم استفاده کرده‌ایم. مطابق استاندارد BS برای مدل‌هایی که به این نحو اندازه‌گیری شده‌اند، تصحیح اندازه‌گیریهای شعاعی به ازای شعاع متوسط و خطا در منطبق کردن محور استوانه با محور دستگاه است. در این روش، در هر مقطع تعیین دایره متوسطی که از ۲۴ نقطه محیطی می‌گذرد و سپس تعیین انحرافات نقاط نسبت به آن مستقل از سایر مقاطع است [۷].

حداکثر انحراف در مدل اول ۰/۳۴ میلی‌متر و در مدل دوم حدود ۰/۳۳ میلی‌متر بوده است که در محدوده انحرافات مجاز BS (۰/۰۰۵ شعاع) است.

از بهترین روشها برای مدل کردن انحرافات آن است که آن را به شکل مود کمانش بحرانی در نظر بگیریم. بنابراین برای در نظر گرفتن اثر انحرافات هندسی در فروریختگی مدل، در

این مقدار را می‌توان با نتیجه حاصل از استاندارد BS مقایسه کرد. این افت شدید فشار کمانش نسبت به مقدار کلاسیک نشان می‌دهد در این مدل اثر عمده بر روی بار کمانش ناشی از غیرخطیهای ماده‌ای و وارد شدن به ناحیه پلاستیک است. در استاندارد BS برای برآورد فشار کمانش پوسته استوانه‌ای از نتایج تجربی استفاده می‌شود [۸]. در این استاندارد نمودار حد پایینی نتایج تجربی را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

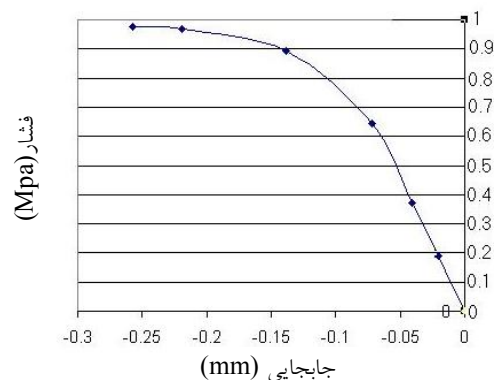
$$P_c / P_y = \begin{cases} 1 - P_y / 2P_m & P_m / P_y \geq 1 \\ P_m / 2P_y & P_m / P_y \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

P_m فشار کمانش کلاسیک، P_y فشار تسلیم پوسته در جهت محیطی و P_c فشار فروریختگی پوسته‌اند.

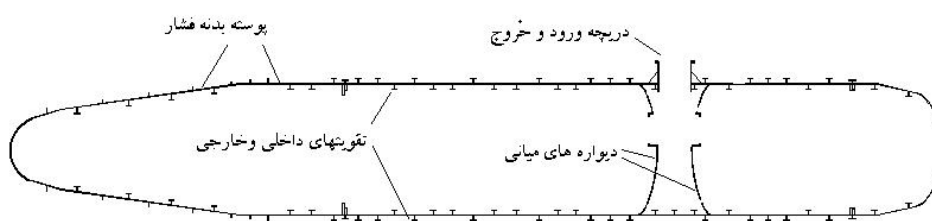
نمودار مقدار متوسط در شکل مربوطه حدود ۱۷٪ بالاتر واقع می‌شود. در جدول (۳) که نتایج مقایسه شده‌اند این مقدار تصحیح شده است بنابراین مقدار مربوط به BS مقدار متوسط است.

۴-۳- اثر نقص شکلهای

مرحله نهایی در تحلیل، تحلیل فروریختگی غیرخطی با



شکل ۵- نمودار بار-تغییر شکل حاصل از تحلیل مدل در ADINA



شکل ۶- مقطع عمودی بدنه فشار زیر دریایی

جدول ۴- مقایسه نتایج تحلیلهای عددی غیرخطی مدل و نتایج حاصل از تست (Mpa)

شماره مدل	فروریختگی غیرخطی مدل با اثر نقص شکل ADINA	فروریختگی غیرخطی مدل با اثر نقص شکل ANSYS	آزمون
۱	۰/۹۸ (۷)	۱/۰۹ (موضعی)	۰/۷۹ (۶)
۲	۰/۹۸ (۷)	۱/۱۱ (موضعی)	۰/۷۲ (۶)

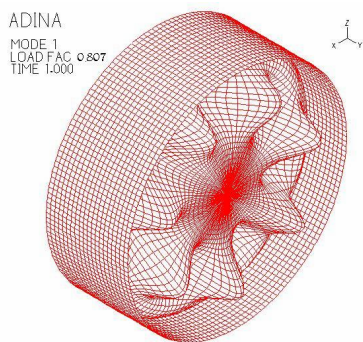
نرم افزار ADINA که امکان چنین تحلیلی را دارد، بر روی پوسته نقص شکلی به صورت مود کمانش کلاسیک (نظیر $n=7$) اعمال و بر روی آن تحلیل فروریختگی الاستوپلاستیک صورت می گیرد. در شکل (۵) منحنی بار-تغییر شکل چنین تحلیلی نشان داده شده است.

در جدول (۴) برای دو مدل مورد استفاده نتایج حاصل از تحلیلهای غیرخطی و آزمون مقایسه شده اند. اعداد داخل پرانتز شماره مود کمانش می باشند. در تحلیل به کمک ANSYS مدلها به همان شکلی که در اندازه گیریها به دست آمده و به همراه نقص شکلهای مربوطه شبیه سازی و تحلیل شده اند. مطابق این جدول تا این مرحله از تحلیل بهترین نتایج از نرم افزار ADINA

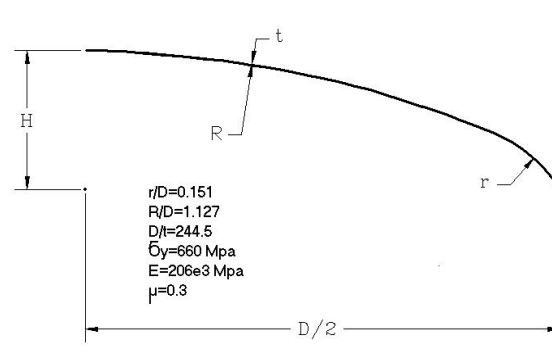
به دست آمده است که در مجموع در حدود ۳۰٪ خطا دارد. با توجه به اینکه چنین مقدار خطایی با توجه به اثرات جوشها منطقی است می توان مطمئن بود با در نظر گرفتن تنشهای ناشی از جوشها می توان به برآورد دقیقتری از بار کمانش واقعی دست یافت. در شکل (۳) تصویر مدل فروریخته پس از آزمون نشان داده شده است.

۵- تحلیل کمانش بدنه فشار زیر دریایی^{۱۲}

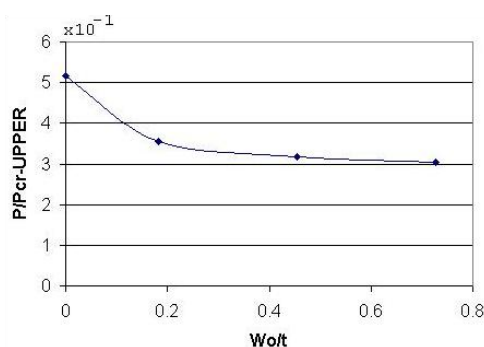
در شکل (۶) مقطع طولی از بدنه فشار یک زیر دریایی نمونه نشان داده شده است. مطالعات اولیه بر روی کمانش کلاسیک چنین پوسته ای توسط نرم افزار COSMOS نشان داده است



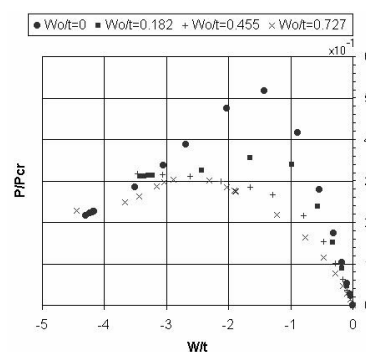
شکل ۸- مود کمانش کلاسیک دیواره



شکل ۷- ابعاد دیواره



شکل ۱۰- منحنی حساسیت به نقص شکل دیواره



شکل ۹- نمودارهای بار-تغییر شکل بازای انحرافهای مختلف

ج) تحلیل فروریختگی الاستوپلاستیک متقارن محوری با در نظر گرفتن غیرخطیهای هندسی و ماده‌ای. منحنی حاصل از این تحلیل مطابق شکل (۹) ($Wo/t=0$) و بار کمانش حاصله ۰/۵۱۸ است. مقایسه این نتیجه با بند (ب) نشان می‌دهد تغییرشکلهای پلاستیک اثر زیادی نداشته‌اند. این مقدار بازای فروریختگی مدل متقارن محوری ۰/۵۰۳ به دست آمده که حاکی از دقت مدل سه‌بعدی است.

د) تحلیل فروریختگی غیرخطی مطابق بند (ج) با منظور کرد نقص شکلهای. برای این منظور از نقص شکلی به صورت مود کمانش کلاسیک و با ارتفاعی به اندازه انحرافات هندسی دیواره استفاده شده است. منحنی بار-تغییر شکل در شکل (۹) و منحنی حساسیت به نقص شکل بر حسب پارامترهای بدون بعد در شکل (۱۰) ارایه شده‌اند. در شکل (۹)، فشار فروریختگی، P_{cr} فشار کمانش کلاسیک مدل، W تغییر شکل و t ضخامت پوسته‌اند. از این شکل مقدار فشار کمانش P_{cr}^{Lower} (نقطه

بحرانی ترین موضع از لحاظ کمانش، دیواره‌ها^{۱۳} هستند لذا تحلیل‌های دقیقتر را بر روی این بخش متمرکز خواهیم کرد. در شکل (۷) مدل بدون بعد دیواره نشان داده شده است. فشارهای کمانش و فروریختگی نیز نسبت به فشار کمانش کلاسیک کره بدون بعد شده‌اند. رفتار ماده مورد استفاده در دیواره، الاستوپلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. در بررسی کمانش دیواره نیز مطابق روشی که برای مدل‌های آزمون شده ارائه شد عمل خواهیم کرد. مراحل زیر در نرم‌افزار ADINA انجام شده‌اند:

الف) تحلیل کمانش کلاسیک: فشار کمانش حاصل از این تحلیل ۰/۸۰۷ و شکل مود آن مطابق شکل (۸) بوده است. ب) تحلیل کمانش به روش سکانت: این تحلیل منجر به فشار کمانش ۰/۵۸۲ شده که نشان می‌دهد تغییرشکلهای بزرگ اثر قابل توجهی در بار کمانش دارد. با توجه به عمق کم دیواره این رفتار مورد انتظار بود.

- تحلیل کمانش خطی با در نظر گرفتن اثر تغییرشکل‌های بزرگ به کمک MARC و یا ADINA.
- تحلیل فروریختگی غیرخطی با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و رفتار پلاستیک (غیرخطی‌های ماده‌ای). این مرحله معیاری از حساسیت پوسته به اثرات پلاستیک است.
- تحلیل فروریختگی مطابق بند (۳) با وارد کردن اثر نقص‌شکلها. به کمک نرم‌افزار ADINA.
- وارد کردن سایر انحرافات مانند اثر نورد پوسته و به خصوص جوشها..

با طی گامهای فوق می‌توان برآورد خوبی از مقدار بار کمانش به دست آورد.. این مراحل (به استثنای مرحله پنجم که معمولاً در طراحی وارد نمی‌شود) برای مدل‌های تست شده، انجام شد.

قدردانی

با توجه به عدم وجود تجربه در زمینه تحلیل فروریزش غیرخطی بدنه فشار زیردریاییها با در نظر گرفتن اثر نقص‌شکل در آن و از طرفی نیاز به کسب تخصص در این زمینه، این پروژه در سال ۱۳۷۹ بنابه درخواست پژوهشکده زیرسطحی شاهین‌شهر آغاز شد که به دلیل عدم دسترسی به مراکز تخصصی خاص، ساخت، آزمون و تحلیل مدلها در حدود دو سال به طول انجامید. در این فاصله افراد بسیاری در قسمتهای مختلف کار به ما یاری رساندند که در اینجا از همه آنها تشکر می‌شود.

پایینی نمودار بار-تغییرشکل پس از نقطه فروریختگی) حدود ۰/۲ مقدار کمانش کلاسیک کره به دست آمده است. این مقدار توسط تامسون به صورت معادله زیر به دست آمده که حدود ۰/۲۳۲ برابر مقدار فشار کمانش کلاسیک کره است [۷]:

$$P_{cr}^{Lower} = 0.283 E \frac{h^2}{a^2} \quad (۴)$$

در شکل (۱۰) نیز مشخص است که به ازای انحرافات بیش از ۰/۸ ضخامت، اثر آن تقریباً ثابت می‌شود و مقدار حد پایینی برای بار فروریختگی به دست می‌آید که حدود $0.3P_{cr}$ است. این رفتار کاملاً مشابه رفتار کلاهک کلپر است [۷].

۶- نتایج

در بین عوامل مختلف مؤثر بر بار کمانش پنج عامل از مهمترین آنها به حساب آورده شد که عبارت‌اند از: تغییرشکل‌های بزرگ (غیرخطی‌های هندسی)، تغییرشکل پلاستیک پوسته و یا تقویتها، نقص‌شکل در پوسته و یا تقویت، انحرافات که در اثر جوش پوسته و تقویتها در شکل هندسی پوسته و میدان تنش آن ایجاد می‌شود. و در آخر اثراتی است که نورد سرد یا گرم پوسته بر روی خواص آن می‌گذارد.

با وارد کردن پنج اثر فوق در روش اجزای محدود می‌توان تقریب مناسبی از بار کمانش واقعی به دست آورد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت گامهایی که برای رسیدن به پاسخی دقیق لازم است عبارت‌اند از:

- تحلیل کمانش کلاسیک برای برآورد مواضع بحرانی به کمک نرم‌افزاری مانند COSMOS.

واژه نامه

1. instability
2. overall buckling
3. imperfection
4. collapse
5. large displacement
6. plastic deformation
7. elastic perfectly plastic

8. inter stiffener buckling
9. geometrical nonlinearities
10. incremental
11. material nonlinearities
12. pressure hull
13. bulkheads

1. Guran, A., Robotik, and A., Lebedev, L. P., "Basic Concepts in the Stability Theory of Thin-Walled Structures", Internet Source, January 11, 2003.
2. Gill, S. S., *The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components*, Pergamon Press, Oxford, 1970.
3. Smith, C. S., and Clarke, J. D., *Advances in Marine Structures*, Elsevier Applied Science Publishers, U. K., 1986.
4. Ross, C. T. F., *Design of Submarines*, University of Portsmouth, U. K., April 28, 2003.
5. Cho-Chang Liang, Ching-Yu Hsu, and Huei-Rong Tsai, "Minimum Weight Design of Submersible Pressure Hull under Hydrostatic Pressure," *Computers & Structures*, Vol. 63, No. 2, pp. 187-201, 1997.
6. کبیری، ع.، پایان نامه کارشناسی ارشد، کمانش سازه زیردریایی، ساخت مدل و تحلیل کمانش الاستیک خطی آن تحت فشار هیدرواستاتیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
7. صفری، ا.، ر.، پایان نامه کارشناسی ارشد، تحلیل تئوری و تجربی فروریختگی پوسته‌های تقویت شده و استفاده از نتایج برای سازه زیردریایی به کمک نرم‌افزارهای اجزای محدود، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
8. BS 5500, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, British Standard Institution, London, 1994.