

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. ایـن امـر، نـشان دهنده لزوم استفاده از نظریههای غیرخطی و درنظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر کمانش مانند نقص شکل و جوش در تحلیل کمـانش اسـت. 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 اجـزای محـدود ADINA ، ADINA و حف Marc و با توجه به تواناییهای خاص هر یک بررسی شده است. نتایج نشان میدهند با درنظر گرفتن غیر خطیهای هندسی و مـادهای و نیـز وارد کردن اثر نقص شکلها می توان به تقریب قابل قبولی از بار کمانش واقعی دست یافت. با توجه به نتایج حاصله، بدنه فشار یک زیردریـایی نمونه نیز تحلیل شده است.

واژگان کلیدی: کمانش – فرور یختگی – نقص شکل – آزمون – روش اجزای محدود

* - دانشجوي دکتري

** – استاديار

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.

<u> </u>	10-1-		
а	شعاع متوسط پوسته	n	تعداد بر آمدگیهای محیطی در کمانش
E	مدول يانگ	P _c	فشار فروريختكي استوانه
h	ضخامت پوسته	P _{cr}	فشار کمانش کلاسیک
Ic	ممان دوم سطح مقطع مؤثر تقويت حول محور خنثي	P _m	فشار كمانش كلاسيك استوانه
L	طول پوسته مابين تقويتها	P _n	فشار كمانش كلاسيك استوانه تقويت شده
L_{f}	فاصله مراكز تقويتها	Py	فشار تسليم محيطي استوانه
L _b	طول كلى مؤثر پوسته	μ	ضريب پواسون

۱ – مقدمه

فمرست علائم

تحلیل ناپایداری ^۱ سازه ها قدمت چند صد ساله دارد. کمانش ستون تحت فشار محوری پدیده ای است که تقریباً تمام دانشجویان مهندسی مکانیک و عمران با آن آشنا هستند و برای نخستین بار توسط لئونارد اویلر در حدود ۲۰۰ سال پیش به شکل ریاضی تدوین شد [۱].برای انواع مودهای کمانش در پوسته های مختلف اعم از استوانه ای، مخروطی و کروی تحلیلهای کمانش متنوعی برای کمانشهای خطی و غیرخطی صورت گرفته است. مقایسه نتایجی که به عنوان مثال توسط فون میز، نایردسون و برایانت برای کمانش کلاسیک پوسته های

استوانهای، مخروطی و کمانش کلی^۲ به دست آمـده [۲] بـا نتـایج نرمافزار اختلاف محدود BOSOR حکایت از صحت این روابـط در تخمین کمانش کلاسیک مخازن تحت فشار خارجی دارد [۳].

تنوع عوامل مؤثر بر کمانش به خصوص عوامل بسیار مهمی مانند وجود نقص شکل^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

برنامههای اجزای محدود برای تحلیل کمانش خطی و غیرخطی ح 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 می شود ساخته شده و سپس آزمون کمانش شدهاند [٦] ، پس از آن سعی شده است به کمک نرمافزارهای اجزای محدود محدود ANSYS ، ADINA و با توجه به قابلیتهای ویژهای که هرکدام از آنها دارند تحلیل دقیقی از فروریختگی³ مدلها به دست آید. نتایج حاصله نشان می دهند می توان با وارد کردن اثرات غیرخطی شامل تغییر شکلهای بزرگ⁶، تغییر شکلهای پلاستیک^۲، انحرافات هندسی، اثرات نورد و اثرات مناسبی از آن به دست آورد و بنابراین سازه های پیچیده تری 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 ا 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 می توان به صورت الاستوپلاستیک کامل^۷ درنظر گرفت. خواص

استقلال، سال ۲۵، شمارهٔ ۱، شهریور ۱۳۸۵

حاصله به این صورتاند:

مدول الاستيک
ضريب پواسون
استحكام تسليم
مدول كارسختي
استحكام نهايي

۳- کمانش کلاسیک مدل

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

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

همچنین فشار کمانش کلی را نیز می توان از معادلـه زیـر بـه دست آورد:

$$P_{n} = (Eh / a)\lambda^{4} / (n^{2} - 1 + \lambda^{2} / 2)(n^{2} + \lambda^{2})^{2} + (n^{2} - 1)EI_{c} / a^{3}L_{f}$$
(Y)
$$\lambda = \frac{\pi a}{L_{c}}$$

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

روش دوم (Mpa)	روش اول (Mpa)	شماره مود
٦/٤٢e−٥	•/٦٤٥٨	١
۳/۷٤е–٦	0/27e-V	۲
10/177	۲۳/۰۲٥	٣
۲۳/٦٤٦	۳۰/01۲	٤
18/972	17/222	٥
٨/٤٣٣	९/९٦९	٦
७/•९९	٧/١٧٦	٧
0/027	٦/٣٥٩	٨
٦/٤٧٤	٧/• ٢٨	١٠
٧/٤١٦	٧/٩٠٢	11
٨/٦٥٣	٨/٩٨٩	١٢
९/८९९	۱۰/۳٦٤	١٣

جدول ۱- دو روش تحلیل مدل در COSMOS

ما مودهای در نرمافزارهایی مانند ADINA است که تقویتها به کمک رمافزار برای المانهای تیر مدل می شوند. در روش دوم تقویتها با استفاده از ه ازای مدل المانهای صفحهای متقارن محوری مدل شدهاند، در این روش رن را نتیجه به دلیل آنکه اتصال تقویت با پوسته به صورت لولایی اند نتایج .ه شدهاند، حاصله با نتایج روابط نظری ویندنبرگ و برایانت قابل مقایسه .ا دارند. در است. در این جدول دو سطر اول مودهای صلب اند. در نتایج می پذیرد، هرکدام از روشها دو افت موضعی دیده می شود: افت اول در ک الاستیک سطر سوم مربوط به مود کمانش کلی پوسته و 2=n است و مصفی وارد افت دوم در سطر هشتم مربوط به مود کمانش موضعی پوسته ، علی رغم و 7=n است.

در جـانول (۱) نسایج ماصل از نظریه مقایسه شده است. COSMOS با نتایج حاصل از نظریه مقایسه شده است. شماره های داخل پرانتز شماره مود کمانش اند. مشخص است که مود بحرانی کمانش مود موضعی آن است. از تحلیل کمانش کلاسیک مـدل در نـرمافزار ADINA فـشار کمانش ۲/٦٤ مگاپاسکال و 7=n 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 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 می پذیرد، استفاده می شود بنابراین تنها اثرات غشایی و خمشی وارد می شوند و این المان برش را درنظر نمی گیرد، علی رغم مدلسازی دو بعدی شکل کمانش را می توان به صورت سه بعدی مشاهده نمود، به خصوص در این نرم افزار برای مسائلی که در تعادل استاتیکی اند نیازی به مقید کردن سازه مسائلی که در تعادل استاتیکی اند نیازی به مقید کردن سازه

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 سهبعدی مدل



شکل ۲- مود کمانش کلاسیک مدل در ADINA



شکل ۳– مدل فروریخته پس از آزمون

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

	-	C
كمانش موضعي	كمانش كلى	روش تحليل
٥/٣ (٧)	12/17 (1)	نظری (BS)
0/0£ (V)	10/18 (1)	COSMOS

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

٤- بررسی عوامل مختلف مؤثر بر کمانش ٤-۱- اثر غیرخطیهای هندسی^۹

مرحله دوم از تحلیل درنظر گرفتن اثر تغییر شکلهای بزرگ در کمانش مدل است. برای این منظور اگرچه می توان از تحلیل مرحله به مرحله '' 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 ایس کار در پای منظور کردن جابه جاییهای بزرگ فعال کرد، با ایس کار در تحلیل از تانسور کرنش گرین لاگرانژ و تانسور تنش دوم پایولا - کرشهف استفاده می شود. بنابراین در تحلیل کمانش تا حد زیادی اثر تغییر شکلهای بزرگ منظور می شود و می توان کلاسیک که در غیاب فعال کردن این گزینه به دست می آید میزان حساسیت سازه نسبت به غیر خطیهای هندسی را مشخص کرد. تحلیلها نشان می دهند ایس روش مشابه استفاده از روش

استقلال، سال ۲۵، شمارهٔ ۱، شهریور ۱۳۸۵

سکانت در تحلیل کمانش خطی در نرمافزار ADINA است. با استفاده از روش سکانت در ADINA مقدار بار کمانش ۲/۶۳ مگاپاسکال به دست می آید که در مقایسه با مقدار کلاسیک ۲/۱۶ نشان می دهد تغییر شکلهای بزرگ اثر چندانی در کاهش بار کمانش مدلها نداشتهاند.

۲-۲- اثر غیرخطیهای مادهای ۱

در مرحله سوم از تحلیل، اثر غیرخطیه ای ماده ای بررسی می شود. یعنی برروی مدل بدون نقص شکل، تحلیل فروریختگی غیرخطی با درنظر گرفتن ماده الاستوپلاستیک دوخطی صورت خواهد گرفت. این نوع کمانش برحسب رسم منحنی بار-تغییر شکل و به دست آوردن نقطه شروع تغییر شکلهای بزرگ در آن است. برای مدل مورد آزمایش این منحنی در شکل (٤) رسم شده است. مطابق این منحنی فشار فروریختگی حدود ۱/۲۱ مگاپاسکال به دست می آید. با استفاده از مدل متقارن محوری مقدار بار فروریختگی ۱/۱۷ مگاپاسکال به دست آمده



شکل ٤- نمودار بار-تغییرشکل فروریختگی متقارن محوری مدل

جدول ۳- مقایسه نتایج فروریختگی متقارن محوری مدل

بار فروریختگی (Mpa)	نوع تحليل
1/17	مدل متقارن محوري
1/71	مدل سەبعدى
1/12	منحنی متوسط BS

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

$$P_{c} / P_{y} = \begin{cases} 1 - P_{y} / 2P_{m} & P_{m} / P_{y} \ge 1 \\ P_{m} / 2P_{y} & P_{m} / P_{y} \le 1 \end{cases} \tag{(*)}$$

جهت محیطی و P_c فشار فروریختگی پوستهاند.

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

۲-۴ اثر نقص شکلها مرحله نهایی در تحلیل، تحلیل فروریختگی غیرخطـی بـا

درنظر گرفتن غیرخطیهای هندسی و ماده ای و منظور کردن اثر نقص شکل است. برای اندازه گیری انحرافات می توان از شابلون و یا بستن مدل روی دستگاه تراش و اندازه گیری به کمک ساعت اندیکاتوری استفاده کرد. در این تحقیق از روش دوم استفاده کرده ایم. مطابق استاندارد BS برای مدلهایی که به این نحو اندازه گیری شده اند، تصحیح اندازه گیریهای 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 ۲۲ نقطه محیطی می گذرد و سپس تعیین انحرافات نقاط نسبت به آن مستقل از سایر مقاطع است[۷].

حداکثر انحراف در مدل اول ۰/۳٤ میلیمتر و در مـدل دوم حدود ۰/۳۳ میلیمتر بوده است که در محدوده انحرافات مجاز BS (۰۰۰۰ شعاع) است.

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



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



شکل ٦- مقطع عمودی بدنه فشار زیردریایی

جدول ٤- مقایسه نتایج تحلیلهای عددی غیرخطی مدل و نتایج حاصل از تست (Mpa)

آزمون	فروریختگی غیرخطی مدل با اثر نقص شکل ANSYS	فروریختگی غیرخطی مدل با اثر نقص شکل ADINA	شماره مدل
•/٧٩ (٦)	۱/۰۹ (موضعی)	•/9A (V)	١
• /٧٢ (٦)	۱/۱۱ (موضعی)	•/9A (V)	۲

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

٥- تحليل كمانش بدنه فشار زيردريايي ^{١٢}

در شکل (٦) مقطع طولی از بدنه فشار یک زیردریایی نمونه نشان داده شده است. مطالعات اولیه برروی کمانش کلاسیک چنین پوستهای توسط نرمافزار COSMOS نشان داده است نرمافزار ADINA که امکان چنین تحلیلی را دارد، برروی پوسته نقص شکلی به صورت مود کمانش کلاسیک (نظیر n=7) اعمال و برروی آن تحلیل فروریختگی الاستوپلاستیک صورت می گیرد. در شکل (٥) منحنی بار-تغییر شکل چنین تحلیلی نشان داده شده است.

در جدول (٤) برای دو مدل مورد استفاده نتایج حاصل از تحلیلهای غیرخطی و آزمون مقایسه شدهاند. 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 شدهاند. مطابق این جدول تا این مرحله از تحلیل بهترین نتایج از نرمافزار ADINA

استقلال، سال ۲۵، شمارهٔ ۱، شهریور ۱۳۸۵





شکل ۹- نمودارهای بار-تغییرشکل بازای انحرافهای مختلف

بحرانی ترین موضع از لحاظ کمانش، دیـوارهها^۳ هـستند لـذا تحلیلهای دقیقتر را برروی 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 درنظر 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 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 تغییر شکلهای بزرگ اثر قابل توجهی در بار کمانش دارد. با توجه به عمق کم دیـواره این رفتار مورد انتظار بود.



شکل ۸- مود کمانش کلاسیک دیواره



ج) تحلیل فروریختگی الاستوپلاستیک متقارن محوری با درنظر گرفتن غیرخطیهای هندسی و مادهای. منحنی حاصل از این تحلیل مطابق شکل (۹) (۹) (Wo/t=0) و بار کمانش حاصله ۱۰/۰۱۸ است. مقایسه این نتیجه با بند (ب) نشان میدهد تغییرشکلهای پلاستیک اثر زیادی نداشتهاند. این مقدار بازای فروریختگی مدل متقارن محوری ۱۰۰۰ به دست آمده که حاکی از دقت مدل سهبعدی است.

د) تحلیل فروریختگی غیرخطی مطابق بند (ج) با منظور کرد نقص شکلها. 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)، p فشار فروریختگی، Pcr فشار کمانش کلاسیک مدل، W تغییر شکل و t ضخامت پوستهاند. از این شکل مقدار فسار کمانش Pcr

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

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

٦- نتايج

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، نقص شکل در پوسته و یا تقویت، انحرافاتی که در اثر جوش پوسته و تقویتها در شکل هندسی پوسته و میدان تنش آن ایجاد می شود.و در آخر اثراتی است که نورد سرد یا گرم پوسته برروی خواص آن می گذارد.

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

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

واژه نامه

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

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

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

قدردانی

با توجه به عدم وجود تجرب در زمینه تحلیل فروریزش غیرخطی بدنه فشار زیردریاییها با در نظرگرفتن اثر نقص شکل در آن و از طرفی نیاز به کسب تخصص در این زمینه، این پروژه در سال ۱۳۷۹ بنابه درخواست پژوه شکده زیرسطحی شاهین شهر 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.

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

- 1. Guran, A., Robotik, and A., Lebedev, L. P., "Basic Concepts in the Stability Theory of Thin-Walled Structures", Internet Source, January 11, 2003.
- Gill, S. S., The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components, Pergamon Press, Oxford, 1970.
- 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.
- 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.
- ۲. 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.

مراجع

- ۷. صفری، ۱.، ر.، پایان نامه کارشناسی ارشد، تحلیل تئوری و تجربی فروریختگی پوسته های تقویت شده و استفاده از نتایج برای سازه زیردریایی به کمک نرمافزار های اجزای محدود، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
- 8. BS 5500, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, British Standard Institution, London, 1994.