

طراحی بدنه فشار کروی تحت فشار هیدرواستاتیک برای عمق ۲۰۰۰ متر با استفاده از استاندارد ABS و نرم افزار آباکوس

اسماعیل شفیع زاده^۱، حمید رضا غفاری^۲

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار؛ shafizadeh@cmu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی کشتی سازی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار
hamidghafari230@yahoo.com؛

چکیده

در این مقاله کمانش خطی و غیر خطی پوسته کروی شکل تحت تاثیر نیروی فشار هیدرو استاتیک اعماق دریا مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای محاسبات از استاندارد ABS استفاده و ویژگی های ماده به کار برده شده از استاندارد ASME(part2 section D) استخراج شده است. قطر پوسته کروی شکل ۲ متر می باشد و این پوسته برای عمق عملیاتی ۲۰۰۰ متر طراحی شده است. ضخامت پوسته کروی شکل با حل معادلات حاکم بدست آمده و برای حل مدل بدنه فشار کروی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. نمودار مربوط به کمانش غیر خطی با استفاده از نتایج نرم افزار رسم و با تعیین نقطه بحرانی کمانش غیر خطی عدد حاصله از آن با استاندارد ABS مقایسه شد و که هر دو عدد تقریباً برابر شدند و ضخامت مناسب برای فولاد بدست آمد.

کلیدواژه: بدنه فشار کروی، کمانش خطی، کمانش غیر خطی

^۱ نویسنده مسئول: اسماعیل شفیع زاده shafizadeh@cmu.ac.ir

۱. مقدمه

استفاده از بدنه فشارهای کروی برای زیردریایی به دهه های قبل باز می گردد. به عنوان مثال می توان از زیردریایی تریست نام برد که توانست به عمق گودال ماریانا عمیق ترین نقطه اقیانوس دست یابد (Hardy & Rosenthal, 2009). ساختارهای جدار نازک کروی در مهندسی دریا استفاده های زیادی از قبیل بدنه فشار زیردریایی، بویه ها و سیستم های حمل و نقل گاز مایع می شود (Binbin & Weicheng, 2010). زیردریایی یکی از وسایل پیشرفته تحقیقاتی هر کشور در اعماق آب می باشد. برای استفاده از این وسیله باید بعضی از ویژگی های آن از قبیل عمق عملیاتی، عمقی که در آن بدنه زیردریایی کمانش می کند باید مشخص شود (George H. & Sather, 1980). در صورتی که بدنه زیردریایی کمانش کند، ظرفیت بویانسی خود را از دست می دهد و دیگر نمی تواند به سطح آب برگردد و زیردریایی از بین می رود و علاوه بر هزینه هایی که از دست رفتن زیردریایی دارد هزینه بسیار زیادی نیز باید برای نجات افراد داخل آن پرداخت شود. منابع و صنایع دریایی نقش و تأثیر مهمی در زندگی انسان ها دارند. به همین دلیل مطالعه و بررسی بسیاری از مسائل مهندسی، زیست شناسی، تجاری و نظامی مرتبط با دریا، همواره مورد توجه محققان بوده است. با توسعه و گسترش صنایع دریایی و علوم مرتبط با دریا، امروزه برای انجام بسیاری از کاربردهای کشف و استخراج منابع زیرآبی، بازرسی و جمع آوری اطلاعات زیست محیطی و تحقیقاتی و نیز نصب، تعمیر و نگهداری سازه های ساحلی و دریایی، به کارگیری تکنولوژی خاص و جدیدی برای پاسخ گویی به نیازهای روزافزون پیش آمده، ضروری می نماید. استفاده از وسائل و ابزار آلات مهندسی که قابلیت به کارگیری در اعماق آب را دارند و کاربری های متنوع در فضا و بستر دریا را ممکن می سازند، چنان در سال های اخیر توسعه و گسترش یافته که توانایی بشر را در بررسی، تحقیق و کار در اعماق دریا، به شدت متحول نموده است (Liu, 2007). از آنجا که ایران کشوری با مرز آبی زیاد در سواحل دریای مازندران و سواحل خلیج فارس و دریای عمان است، دستیابی به اعماق آب امری حیاتی و ضروری است. اما رسیدن به این هدف مستلزم همتی بلند و برنامه ریزی و مهندسی دقیق است. زیر دریایی ژرفا ۲۰۰۰ یک زیر دریایی با محفظه کروی شکل است که توانایی غوص در عمق ۲۰۰۰ متری اعماق دریا را دارد. از بین اشکال مختلف بدنه زیردریایی استوانه و کره مقاومت بالاتری نسبت به دیگر اشکال هندسی را دارند (Merz, Oberst, Dylejko, Kessissoglou, Tso, & Marburg, 2007). استوانه هایی با در پوش های نیم کروی، هندسه ای ایده آل برای ساخت زیردریایی به شمار می رود که هم تحمل فشار بالا را دارد و هم فضای زیادی را برای جانمایی خدمه و تجهیزات مورد استفاده در زیر دریایی را فراهم می کند. دستیابی به اعماق زیاد صرفاً جهت تحقیقات زیر آبی است. پس کاهش فضای داخلی در عوض

تحمل فشار بالاتر امری منطقی به نظر می‌رسد. برای تحقق این مسئله بجای استفاده از محفظه استوانه‌ای از محفظه کروی استفاده کرده که ایده‌آل‌ترین شکل ممکن است. از لحاظ تئوری هندسه‌ی شکل به دلیل تقارنی که دارد فشار را به صورت یکنواخت پخش می‌کند و این امر سبب می‌شود تا اشکال کروی ۲ برابر فشار مخزن استوانه‌ای با همان ضخامت را تحمل کنند (Hearn, 1997).

۲. مواد استفاده شده در طراحی و مشخصات آن

فولاد ASTM-A516 که در بازار به صورت ورق موجود می‌باشد، در طراحی استفاده شده است. مشخصات این فولاد در جدول ۱ آورده شده است (ASME, 2010).

جدول ۱: مشخصات اسمی فولاد

Nominal Composition	Product Form	Spec No	Type/Grade
Carbon steel	Plate	SA-516	70

مشخصات مکانیکی این فولاد را از استاندارد ASME section 2 part D استخراج شده که در جدول ۲ نمایش داده شده است (ASME, 2010).

جدول ۲: ویژگی های فولاد

مقادیر	علائم	پارامتر	ردیف
$200 \times 10^3 \text{MPa}$	E	مدول الاستیسیته	۱
0.30	N	ضریب پواسون	۲
260Mpa	σ_y	تنش تسلیم	۳

۳. مدل سازی، حل تئوری و عددی

در این مقاله پوسته کروی با قطر ۲ متر برای عمق عملیاتی ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. پارامترهای فیزیکی مسئله مطابق جدول زیر است.

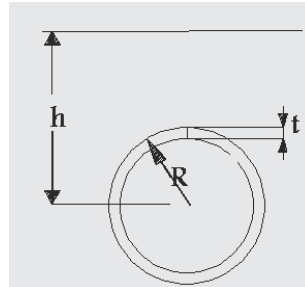
جدول ۳: مشخصات و پارامتر های فیزیکی مسئله

مقادیر	علائم	پارامتر	ردیف
۱ m	R	شعاع کره	۱
۲۰۰۰ m	h	عمق عملیاتی	۲
9.81 m/s^2	g	شتاب جاذبه زمین	۳

طراحی بدنه فشار کروی تحت فشار هیدرواستاتیک برای عمق ۲۰۰۰ متر با استفاده از استاندارد ABS و نرم افزار آباکوس

۴	چگالی آب دریا	ρ	1025 kg/m^3
---	---------------	--------	-----------------------

شکل ۱ بیانگر این نکته است که قطر مورد استفاده در محاسبات قطر بیرونی مدل می‌باشد و همچنین ضخامت پوسته کروی به همراه عمق عملیاتی نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک از پوسته کروی در اعماق آب

برای بدست آوردن ضخامت مورد نظر از روابط مربوط به کره تحت فشار در استاندارد ABS استفاده شده است که این روابط عینا به صورت زیر می باشد (ABS, 2010).

$$\frac{P_{cs}}{P_{ys}} = 0.739 \left[1 + (P_{ys}/(0.3P_{es}))^2 \right]^{-1/2} \quad \text{for } P_{es}/P_{ys} > 1 \quad (1)$$

$$\frac{P_{cs}}{P_{ys}} = 0.2124 P_{es}/P_{ys} \quad \text{for } P_{es}/P_{ys} \leq 1 \quad (2)$$

$$P_{ys} = 2 \sigma_y t / R_o \quad (3)$$

$$P_{es} = \left(2 / \sqrt{3(1 - \nu^2)} \right) E (t/R_o)^2 \quad (4)$$

$$P_a = P_{cs} \eta \quad \eta = 0.67 \quad (5)$$

با حل معادلات فوق و بررسی شرایط فرمول های (۱) و (۲) مقادیر زیر بدست خواهد آمد.

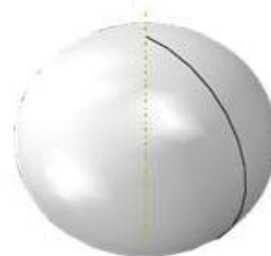
جدول ۴: مقادیر بدست آمده از فرمول های بال

ردیف	علائم	مقادیر
۱	P_a	۲۰,۱۱۰۵ Mpa
۲	P_{cs}	۳۰,۰۱۵ Mpa
۳	P_{js}	۴۰,۵۶ Mpa
۴	P_{es}	۱,۴۷ GPa
۵	t	۰,۰۷۸ M

بعد از بدست آوردن ضخامت مورد نظر بدنه را در نرم افزار ABAQUS مدل سازی و مورد تحلیل قرار داده شد. این کره دارای قطر ۲ متر و همچنین ضخامت ۰,۰۷۸ متر است. بدنه مدل شده در شکل های ۲ و ۳ آورده شده است.



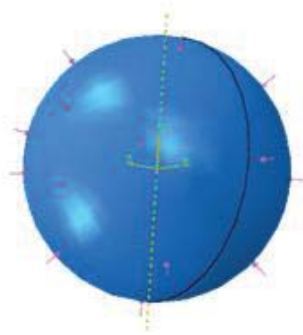
شکل ۳: مدل برش خورده کره



شکل ۲: مدل کامل پوسته کروی

در شکل ۴ نحوه مش بندی مدل و در شکل ۵ نحوه اعمال فشار که به صورت عمود بر سطح بیرونی کره است، نشان داده شده است.

طراحی بدنه فشار کروی تحت فشار هیدرواستاتیک برای عمق ۲۰۰۰ متر با استفاده از استاندارد ABS و نرم افزار آباکوس



شکل ۵: نحوه اعمال فشار

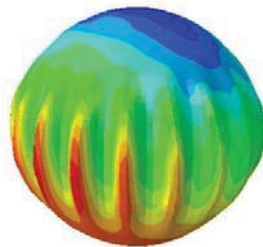


شکل ۴: مش بندی مدل

این مدل ابتدا به صورت کمانش خطی تحلیل و برای اینکه مسئله به طور دقیق حل شود، جواب تحلیل خطی در تحلیل غیر خطی به کار گرفته شده تا با ایجاد کمک به همگرایی در نرم افزار مسئله به طور کامل تحلیل شود (Kao, 1980).

۴. نتایج

بدنه فشار برای دستیابی به عمق ۲۰۰۰ متر با هندسه پوسته کروی که از فولاد A516 Grad 70 ساخته شده، باید دارای ضخامت ۰,۰۷۸ متر باشد تا تحمل کمانش تحت تاثیر فشار هیدرو استاتیکی وارد بر سطح بیرونی آن را داشته باشد. در واقع این ضخامت بر اساس کمانش غیر خطی بدست آمده تا حداکثر اطمینان لازم را تضمین نماید. شکل ۶ کمانش پوسته کروی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: کمانش پوسته کروی

نتایج بدست آمده از نرم افزار با مقدار تئوری حاصل از محاسبات در فرمول های استاندارد ABS مقایسه و در جدول ۵ آورده شده است.

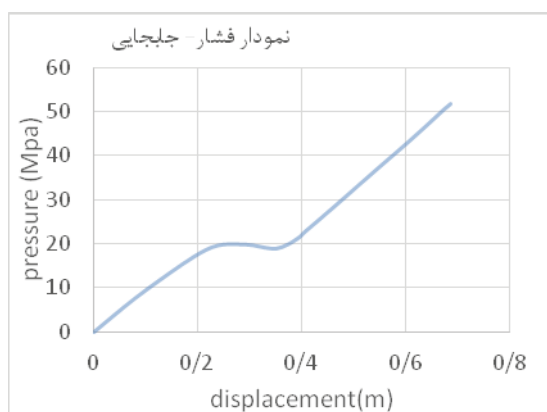
جدول ۵: مقایسه حل تئوری و نرم افزاری کماتش خطی

Mpa	کمانش خطی	ردیف
۳۰,۰۱۵	جواب تئوری	۱
۲۹,۲۰۴	جواب عددی	۲

درصد خطای حاصل از حل تئوری و حل نرم افزار (خطی) به صورت زیر می باشد:

$$\text{درصد خطا (کمانش خطی)} = \left(\frac{p_{\text{تئوری}} - p_{\text{عددی}}}{p_{\text{تئوری}}} \right) \times 100 = 2.7\% \quad (7)$$

نمودار فشار بر حسب جابه جایی برای مدل غیرخطی در شکل ۷ نشان داده شده است. فشار بحرانی کماتش ۲۰,۰۰۶۹ مگا پاسکال می باشد.



شکل ۷: نمودار فشار بر حسب جابه جایی مدل غیرخطی

جواب تحلیل های تئوری و عددی کماتش غیر خطی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: مقایسه حل تئوری و نرم افزاری کمانش غیر خطی

Mpa	کمانش غیر خطی	ردیف
۲۰,۱۱	جواب تئوری	۱
۲۰,۰۰۶۹	جواب عددی	۲

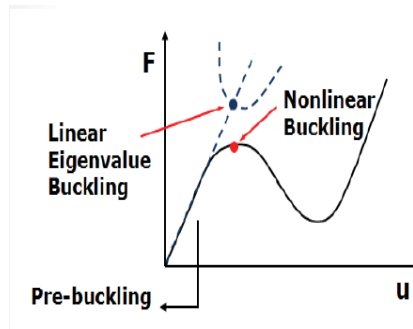
درصد خطای حاصل از کمانش غیر خطی در دو حالت حل تئوری و نرم افزاری در زیر آورده شده است

$$(۸) \quad 0.51\% = 100 \times \left(\frac{p_{\text{تئوری}} - p_{\text{عددی}}}{p_{\text{تئوری}}} \right) = \text{درصد خطا (کمانش غیر خطی)}$$

این مطلب بیانگر خطای اندک و ناچیز در محاسبات است.

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

در تحلیل خطی و غیر خطی کمانش این نکته حائز اهمیت است که مقادیر بدست آمده در تحلیل خطی تفاوت زیادی با تحلیل غیر خطی دارد و این بخاطر رفتار الاستیک ماده در فشارهای بالاست. در واقع همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده، با افزایش بار وارده بر پوسته، ماده ابتدا رفتار خطی و در ادامه رفتار غیر خطی از خود نشان می دهد. پس برای بدست آوردن ضخامت مورد اطمینان باید رفتار غیر خطی ماده را ملاک قرار داد. کمانش این کره با توجه به تقارن به صورت موج دار در سطح کره اتفاق می افتد.



شکل ۸: کمانش خطی و غیر خطی

البته باید این نکته را در نظر گرفت که در هنگام ساخت مدل واقعی ممکن است بدنه دچار فرو رفتگی های ناشی از بی دقتی در ساخت و یا مشکلاتی نظیر عدم دقت بالا در جوشکاری شود که این عامل موجب کاهش نقطه بحرانی کمانش شود.

فهرست علائم

E	مدول الاستیسیته، N/m^2
R_s	شعاع کره، m
t	ضخامت، m
P_{ys}	فشار تسلیم کره N/m^2
P_{es}	فشار کمانش خطی کره N/m^2
P	فشار خارجی اعمالی به کره N/m^2
P_a	بیشترین فشار مجاز برای هر نوع مود تخریب N/m^2
P_{cs}	محدودیت فشار برای کره N/m^2
ρ	چگالی، kg/m^3
v	ضریب پواسون
σ_y	مقاومت تسلیم N/m^2
η	ضریب استفاده

منابع:

- ABS. (2010). *UNDERWATER VEHICLES, SYSTEMS AND HYPERBARIC FACILITIES*.
ASME . (2010). *Boiler and Pressure Vessel Code* .
Binbin, P., & Weicheng, C. (2010). An overview of buckling and ultimate strength of spherical pressure hull under external pressure. *Marine Structures* , 227–240.
George H., K., & Sather, D. (1980). Buckled states of a spherical shell under uniform external pressure. *Archive for Rational Mechanics and Analysis* , 72 (4), 315-380.
Hardy, K., & Rosenthal, B. (2009). Into the trench: celebrating the golden anniversary of man's deepest dive. *Marine Technology Society Journal* , 43.
Hearn, E. (1997). *Mechanics of Materials 2* (3 ed.).
Kao, R. (1980). Nonlinear dynamic buckling of spherical caps with initial imperfections. *Computers & Structures* , 12 (1), 49–63.
Liu Ren, H., Li, D., Nie Guo, H., & Cheng Zheng, Q. (1991). Non-linear buckling of squarely-latticed shallow spherical shells. *Applied Mathematics and Mechanics* , 26 (5), 547–565.
Liu, T. (2007). Research on the design of spherical pressure hull in manned deep-sea submersible. *Journal of Ship Mechanics* .
Merz, S., Oberst, S., Dylejko, P., Kessissoglou, N., Tso, Y., & Marburg, S. (2007). Development of coupled FE/BE models to investigate the structural and acoustic responses of a submerged vessel. *Journal Comput Acoust* .

The design of spherical pressure hull under hydrostatic pressure to a depth of 2000 m using ABS rule and ABAQUS software

Esmail Shafizadeh¹, Hamid Reza Ghafari²

1- Faculty of marine engineering, Chabahar Maritime University, IRAN; shafizadeh@cmu.ac.ir

2- Naval Architecture & Marine Engineering student, Chabahar Maritime University, IRAN;
hamidghafari230@yahoo.com

In this paper, linear and nonlinear buckling of spherical shells under the influence of the hydrostatic pressure of the deep sea has been investigated. ABS rule is used For buckling strength calculation and specific of material extracted from ASME part2 section D. Diameter of spherical shell is 2 meter and final depth for failure is 2000 meter. Spherical shell thickness obtained by solving equations and model of Spherical shell solved with ABAQUS software. The non linear graph from software result was plotted and the critical point of nonlinear buckling calculated from graph, compared with ABS rule, and spherical shell thickness was obtained.

Keyword: spherical shell, nonlinear buckling, linear buckling