



Paper Type: Original Article

Structural Design of Submarine Pressure Hull Based on Uncertainty and Reliability Methods

Javad Sheikh Hafeshjani¹ , Mohammad Saber Fallah Nejad^{1,*} , Mohammad Bagher Fakhrzad¹ , Hassan Hosseini Nasab¹ 

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran; jsheikh@stu.yazd.ac.ir; fallahnezhad@yazd.ac.ir; mfakhrzad@yazd.ac.ir; hhn@yazd.ac.ir.

Citation:

Received: 12 September 2023
Revised: 03 December 2023
Accepted: 01 February 2024

Sheikh Hafeshjani, J., Fallah Nejad, M. S., Fakhrzad, M. B., & Hosseini Nasab, H. (2024). Structural design of submarine pressure hull based on uncertainty and reliability methods. *Journal of Quality Engineering and Management*, 14(1), 79-90.

Abstract

Purpose: The goal of this research is to establish a design framework based on reliability for submarine pressure hulls, with the aim of attaining an ideal equilibrium between structural integrity and reliability.

Methodology: Initially, a mechanical Finite Element Model (FEM) was created and verified by comparing it to experimental data. Following that, various alternative models created through weight optimization algorithms were formulated. Uncertainties were represented using random variables, and reliability assessments were performed for each design.

Findings: The findings suggest that optimized models, even with reduced weights, can provide satisfactory failure probabilities. The prioritization derived from the reliability analysis offers a clear view for choosing the final design.

Originality/Value: The uniqueness of this study stems from its combined application of finite element analysis, uncertainty modeling, and optimization methods in reliability-based pressure hull design a strategy that is seldom utilized in marine structural design.

Keywords: ABAQUS, Reliability methods, Pressure hull, Probabilistic models, Uncertainty.



طراحی سازه بدنه فشار زیردریایی بر مبنای عدم قطعیت و روش‌های قابلیت اطمینان

جواد شیخ هفشجانی^۱، محمد صابر فلاح نژاد^{۱*}، محمد باقر فخرزاد^۱، حسن حسینی نسب^۱
^۱گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

چکیده

هدف: هدف این پژوهش ایجاد یک چارچوب طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای پوسته‌های فشاری زیردریایی است، با هدف دستیابی به تعادلی ایده‌آل میان یکپارچگی سازه‌ای و قابلیت اطمینان.

روش‌شناسی پژوهش: در ابتدا، یک مدل مکانیکی المان محدود^۱ ساخته شد و با مقایسه با داده‌های تجربی، مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. پس از آن مدل‌های جایگزین مختلفی از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی وزنی طراحی شدند. عدم قطعیت‌ها به صورت متغیرهای تصادفی مدل‌سازی شده و ارزیابی‌های قابلیت اطمینان برای هر طراحی انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های بهینه‌شده حتی با وزن کاهش یافته می‌توانند احتمال خرابی قابل قبولی را فراهم کنند. اولویت‌بندی حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان، دید روشنی برای انتخاب طراحی نهایی ارائه می‌دهد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نوآوری این مطالعه در کاربرد ترکیبی تحلیل اجزای محدود، مدل‌سازی عدم قطعیت و روش‌های بهینه‌سازی در طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان پوسته‌های فشاری نهفته است — راهبردی که به ندرت در طراحی سازه‌های دریایی به کار گرفته می‌شود.

کلیدواژه‌ها: *ABAQUS*، روش‌های قابلیت اطمینان، بدنه فشار، مدل‌های احتمالی، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

زیردریایی‌ها می‌توانند در مقاصد تجاری اعم از جمع‌آوری اطلاعات موقعیت جغرافیایی از زیردریا، بازرسی و تعمیر کابل‌ها، خط‌های لوله و بقیه تجهیزات، حمل‌کردن مواد، تعمیر و بازرسی مخازن و وسایل در اعماق فرورفته اشاره کرد. همچنین می‌توان از زیردریایی‌ها در مقاصد نظامی استفاده کرد؛ زیرا رادارها توانایی کار در زیر آب را ندارند و همچنین موشک‌هایی که در جست‌وجوی حرارت هستند نمی‌توانند در زیر آب استفاده شوند و با توجه به خصوصیت مهم اختفا، زیردریایی‌ها برای شناسایی منطقه و حملات نظامی بسیار با اهمیت هستند. اهمیت مخازن تحت فشار برمی‌گردد

^۱ Finite Element Model (FEM)

به نیاز نیروهای نظامی برای رفتن به عمق‌های بیشتر برای جلوگیری از شناسایی و همچنین برای نیروهای هوایی برای رفتن به ارتفاعات بالاتر که این‌ها همه به طراحی و ساخت مخازن تحت فشار نیازمند هستند.

نقش تجزیه و تحلیل تصمیم در طراحی مهندسی بسیار مهم است. طراحی مهندسی، فرآیند به‌کارگیری تکنیک‌ها و اصول علمی مختلف برای تعریف یک دستگاه یا یک سیستم است که یک نیاز معین را برآورده می‌کند. یک طراح باید یک سیستم یا فرآیند را با جزئیات کافی تعریف کند تا امکان تحقق آن فراهم شود [1].

فرآیند طراحی شامل مراحل زیر است:

۱. شناسایی نیاز
۲. بیان هدف و مشخصات ویژگی‌های برنامه‌ریزی محصول و عملکرد
۳. ایده‌پردازی و اختراع مفاهیم جایگزین
۴. تجزیه و تحلیل و ارزیابی این مفاهیم
۵. انتخاب یک یا چند مفهوم

برای طراحی بدنه فشار نیاز به یک سری ضریب اطمینان جهت موارد زیر داریم:

۱. اتفاقات احتمالی در صورت رفتن زیر دریایی به عمقی بیشتر از عمق طراحی
۲. عدم قطعیت در مشخصات متریال
۳. عیوب و نواقص حاصل از ساخت
۴. ندانستن مقدار و چگونگی توزیع تنش‌ها
۵. اهمیت بدنه فشار به دلیل شامل شدن همه تجهیزات و این‌که در صورت فروپاشی آن، همه تجهیزات از بین می‌روند که باعث می‌شود مخزن فشار از یک ضریب اطمینان بزرگ‌تر از بقیه موارد پیروی کند.
۶.

موارد توضیح داده شده در بالا به ۳ دسته کلی تقسیم می‌شوند:

عملکرد

اگر اپراتور زیردریایی به‌عنوان مثال در حملات نظامی صلاح ببیند برای جلوگیری از شناسایی و یا جلوگیری از تخریب باید به عمقی بیشتر از عمق طراحی حرکت کند، باعث رخداد اتفاقات احتمالی می‌شود.

طراحی و ساخت

استفاده از متدهایی برای پیش‌بینی فشار متلاشی شدن مخزن تحت فشار که به چهار عامل زیر بستگی دارد:

۱. کماتش پوسته در بین حلقه‌ها یا چارچوب‌ها
۲. ناپایداری کلی
۳. چرخش حول تکیه‌گاه و حرکت حلقه‌ها
۴. کماتش محلی در چارچوب حلقه‌ها

عوامل بالا باعث می‌شود طراحی زیردریایی چهار حالت بالا را مدنظر قرار دهد [2]. در حالت اول که با توجه به پراکندگی خصوصیات مواد و همچنین محاسبه تنش‌های محیطی و طولی مواد شده است و عدم ورود موارد واقعی اطلاعات کافی برای پیش‌بینی رفتار زیردریایی نداریم. برای ۳

حالت بعد مانند حالت اول اطلاعات و بررسی‌ها به‌طور دقیق نیستند و باعث بروز خطاهایی در پیش‌بینی رفتار مخزن تحت فشار می‌شوند. همچنین نواقص اولیه و خروج از گردی و دیگر نواقص موجود به‌هنگام ساخت بدنه از دیگر عوامل بروز خطا می‌شود.

عوامل محیطی

به‌دلیل حرکت زیردریایی‌ها در اعماق زیاد و نداشتن اطلاعات کافی از اعماق دریاها نمی‌توان به‌صورت قطعی، شرایط مرزی و محیطی را مدنظر قرار داد. همه موارد ذکرشده به‌صورت ضرایب اطمینان گفته‌شده در استانداردها، در فرآیند طراحی اعمال می‌شوند که در واقع ورودی‌های مساله به‌صورت واقعی و شفاف مدل نمی‌شوند. این موضوع باعث ایجاد تبعات زیادی مانند طراحی سازه با وزن بسیار بالا که منجر به کاهش کارایی و مانورپذیری، افزایش هزینه و در کل کاهش اثربخشی سامانه می‌گردد و نیز با عدم شناخت پارامترهای موثر طراحی در صورت تغییر کوچکی در این پارامترها سازه دچار شکست می‌شود. مدل ارایه‌شده می‌تواند با در نظرگیری شرایط واقعی در فضای عدم قطعیت، خروجی را بر اساس منحنی ریسک، بر اساس احتمال خرابی و وزن بیان نماید تا بتوان در فضای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی بهترین انتخاب را انجام داد و بر اساس آن مشکل بیان‌شده را برطرف نمود. به‌نظر می‌رسد که توسعه مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان با فورسل [3] که بهینه‌سازی را بر مبنای کمینه‌کردن هزینه کل فرمول‌بندی کرد، آغاز شده است. هزینه کل شامل هزینه‌های اولیه و هزینه‌های مورد انتظار است. معیار هزینه کل در دهه ۵۰ میلادی عمده مطالعات در این زمینه را به خود اختصاص داده است [6]–[4]. پس از آن، در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، نظریه تصمیم‌بیزن^۱ مبنای تحقیقات در این زمینه بود و برخی از مدل‌ها و الگوریتم‌های احتمالی برای ترکیب اطلاعات اولیه و توزیع پارامترهای غیرقطعی پس از حل بر مبنای این روش ارایه شدند [10]–[7]. در همان دهه‌ها نیاز به کاهش وزن سازه بدون به خطر انداختن قابلیت اطمینان سازه، به‌خصوص در کاربردهای هوافضایی، شناسایی شد و اولین تلاش‌ها به این منظور صورت گرفت [11]، [12].

در دهه‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان ادامه یافت. تا این زمان فرآیند بهینه‌سازی، انتخاب یکی از چند حالت در دسترس به‌نحوی بود که با در نظرگرفتن همه فاکتورهای مختلف (از جمله ملزومات کارکردی، تئوری‌های علمی، فاکتورهای اقتصادی، ملاحظات اجتماعی و...)، بهترین کارایی را از خود نشان دهد. از این‌رو تا این زمان بهینه‌سازی سازه‌ای یک فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شد. از این زمان تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان از یک "دیدگاه تصمیم‌گیری" به یک "دیدگاه مهندسی-محور" منتقل شد و عبارت بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای تاکید بر جنبه طراحی مساله ابداع شد.

چندین روش و الگوریتم در این دوره برای حل مساله *RBDO* از جمله روش بهینه‌سازی متوالی و ارزیابی قابلیت اعتماد^۲ [13]، روش مقدار میانگین ترکیبی^۳ [14]، رویکرد اندازه عملکرد^۴ [15] و روش قابلیت اطمینان مرتبه اول [16] پیشنهاد شدند. همچنین به‌منظور ادغام تحلیل "قابلیت اعتماد" و "بهینه‌سازی طراحی" (که نیازمند ارزیابی کارآمد و دقیق محدودیت‌های احتمالاتی و حساسیت‌های آن‌ها است) چندین تکنیک از جمله رویکردهای جداسده^۵ [17]، تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای^۶ [18] و دوسطحی^۷ [19] توسعه داده شدند. از طرفی چندین مطالعه برای مقایسه و بهبود عملکرد روش‌های مختلف *RBDO* انجام و روش‌های جدیدی پیشنهاد شد که می‌توانند برای حل مسایل *RBDO* که بزرگ-مقیاس، غیرخطی و غیرمحدب هستند به‌کار روند.

از دهه ۲۰۰۰ به بعد، تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان با تمرکز بر بهبود الگوریتم‌های موجود و گسترش کاربردهای آن ادامه یافته است. یکی از موضوعات و گرایش‌های اصلی در این دوره عمومی‌سازی و توسعه چارچوب *RBDO* بوده است که شامل در نظرگرفتن انواع مختلف عدم قطعیت‌ها، اهداف، محدودیت‌ها و متغیرها می‌شود. از دیگر زمینه‌های تحقیقاتی این دوره می‌توان به تعمیم و سازگارکردن روش‌های *RBDO* به رشته‌های مهندسی مختلف مانند مهندسی مکانیک، عمران، هوافضا، اتومبیل، پزشکی و بررسی کاربردهای آن در زمینه‌های جدید اشاره

¹ Bayesian decision theory

² Sequential Optimization and Reliability Assessment (SORA)

³ Hybrid Mean Value (HMV)

⁴ Performance Measure Approach (PMA)

⁵ Decoupled approach

⁶ Single-loop and double-loop approaches

⁷ Bi-level approach

کرد. به عنوان چند نمونه از کاربردهای این روش در رشته‌های مختلف می‌توان استفاده از آن را در سازه‌های تقویتی توربین‌های بادی دریایی، سازه‌های کامپوزیتی، ایمنی تصادف خودرو و کاربردهای آن در ساخت دستگاه‌های پزشکی نام برد.

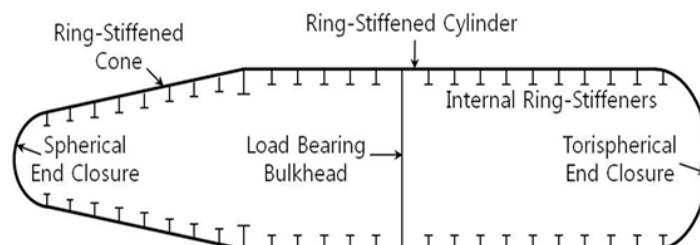
همچنین ادغام و توسعه تکنیک‌ها و ابزارهای جدید برای توسعه *RBDO* مانند یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، متا-الگوریتم‌ها و محاسبات با کارایی بالا نیز جز تلاش‌ها در این دوره بوده است. برخی از مثال‌ها در این زمینه عبارتند از استفاده از شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های ژنتیک و محاسبات موازی برای *RBDO*.

توسعه و پیشرفت روش‌های *RBDO* و *RBO* هم‌چنان ادامه دارد و هنوز چالش‌ها و فرصت‌های زیادی برای تحقیقات و توسعه بیشتر در این زمینه وجود دارد. برخی از روندهای فعلی و آینده برای تحقیقات در *RBDO* عبارتند از ۱- بهبود و اعتبارسنجی روش‌های *RBDO* که نیاز به تجزیه و تحلیل نظری دقیق‌تر، آزمایش‌های عددی جامع‌تر و مطالعات موردی واقع‌گراتر دارند. برخی از مسائلی که باید مورد توجه قرار گیرد شامل هم‌گرایی، دقت، استحکام و قابلیت مقیاس روش‌های *RBDO* هستند و ۲- ادغام روش‌های *RBDO* با رشته‌ها و حوزه‌های دیگر مانند مهندسی سیستم، اندازه‌گیری عدم قطعیت، علم داده و ... برخی از مزایایی که با این ادغام می‌توان به دست آورد عبارتند از ارتقا، نوآوری و تحول فرآیند و روش طراحی مهندسی.

۲- مدل‌های احتمالی^۱

۲-۱- هندسه مدل^۲

بدنه تحت فشار از یک استوانه، یک مخروطی، دو عدسی در قسمت جلو و عقب و تعدادی رینگ تقویتی *T* شکل در داخل بدنه تحت فشار (برای زیردریایی‌های تک‌پوسته) تشکیل شده است.



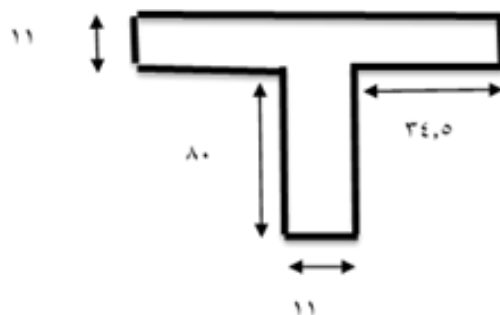
شکل ۱- ساختار بدنه فشار [20].

Figure 1- Pressure body structure [20].

مدل پایه در نظر گرفته شده در این مقاله بدنه فشار استوانه‌ای شکل با شعاع خارجی ۱۰۰۰ میلی‌متر و طول بدنه ۸۸۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که جنس بدنه از فولاد *A516 grade 70* است. بدنه فشار در معرض فشار ۷bar قرار دارد و برای تقویت بدنه از تقویت‌کننده‌های *T* شکل با فاصله ۴۰۰ بین تقویت‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است. هندسه تقویت‌کننده در شکل مشخص است.

¹ Probabilistic models

² Models geometry



شکل ۲- هندسه تقویت کننده.

Figure 2- Amplifier geometry.

شش مدل دیگر با قطر و طول ثابت و با تغییر متغیرهای تصمیم مانند فاصله و تعداد رینگ‌ها و ضخامت ورق در پوسته و رینگ‌ها که همگی با شاخص وزن قابل مقایسه هستند مشخص می‌شوند. این مدل‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و با تابع هدف کمترین وزن به‌وجود آمده‌اند که در مقاله دیگر به بیان نحوه بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. جدول ۱ مشخصات مدل‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مدل‌ها.

Table 1- Model specifications.

مدل پایه	1	2	3	4	5	6
ضخامت بدنه	11	6.8885	6.7503	6.1277	7.564	7.6
فاصله بین ابعاد تقویت کننده	400	367.8391	352.4014	387.1341	468.2151	480.0212
ارتفاع جان تقویت T شکل	80	79.1633	77.2956	77.9068	72.8470	80.3558
ضخامت جان تقویت T شکل	11	4.0170	3.8884	3.9261	3.6424	4.1048
عرض بال تقویت T شکل	80	26.8077	25.6136	22.1634	23.8863	20.8351
ضخامت بال تقویت T شکل	11	8.1262	8.5607	10.3887	11.0588	11.3925
وزن کل (تن)	63	51.3	49.7	50.7	51.4	47

۱-۱-۲- مشخصات مواد^۱

متریال در نظر گرفته شده جهت طراحی پوسته و رینگ‌های بدنه فشار زیردریایی، فولاد *A516 grade 70* است. جدول ۲ خواص مکانیکی این فولاد را نشان می‌دهد.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد *A516 grade 70*.

Table 2- Mechanical properties of A516 grade 70 steel.

تنش تسلیم	f_y	260[Mpa]
تنش کشش نهایی	f_u	485[Mpa]
مدول الاستیک	E	206[GPA]

¹ Material properties

۲-۱-۲- عدم قطعیت ها^۱

این مقاله برای عدم قطعیت در خواص مواد و فشار بر روی بدنه توضیح می دهد. عدم قطعیت در خواص مواد با سه متغیر تصادفی زیر توصیف می شود: ۱- استحکام تسلیم، ۲- استحکام نهایی و ۳- مدول الاستیک فولاد مورد استفاده در پوسته و رینگ های تقویتی که به ترتیب با f_y ، f_u و E نشان داده می شوند. عدم قطعیت در ابعاد اعضا نسبتا کوچک است و از این رو نادیده گرفته می شود، یعنی ابعاد به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می شوند. در نهایت، عدم قطعیت در فشار اعمال شده بر روی بدنه بر سیستم توسط متغیر تصادفی دیگری توصیف می شود. به طور خلاصه، سه متغیر تصادفی ذکر شده در بالا در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان بعدی سیستم استفاده می شوند. توزیع احتمال این متغیرهای تصادفی در جدول ۳ از رگرسیون نتایج تست متریال تولیدی و سیکل های تحت فشار بدنه در زمان در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- توزیع احتمال متغیرهای تصادفی.

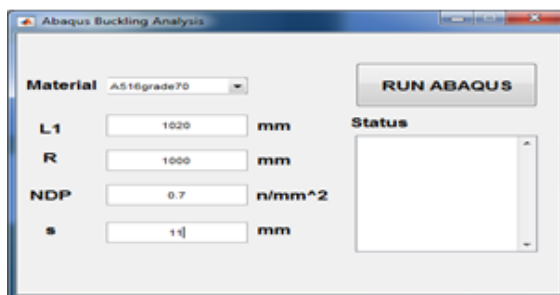
Table 3- Probability distribution of random variables.

وارپانس	میانگین	مدل توزیع	متغیر تصادفی
7	260[Mpa]	Lognormal	تنش تسلیم
4	485[Mpa]	Lognormal	تنش نهایی
4	206[GPa]	Lognormal	مدول الاستیسیته
10	7	normal	فشار

FEM-۲-۲

برای FEM از نرم افزار تحلیلی *Abaqus* استفاده شده است. نرم افزار آباکوس، یکی از شناخته شده ترین نرم افزارهای مهندسی به کمک کامپیوتر و از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل FEM است. این نرم افزار، معمولا به منظور تحلیل غیرخطی مواد تحت شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیک مورد استفاده قرار می گیرد. *Abaqus* معمولا در کارهای پژوهشی و در صنایعی نظیر هوافضا، سازه های دریایی، اتومبیل سازی، ساخت تجهیزات صنعتی و عمران (سازه، ژئوتکنیک و راه) کاربرد دارد. این مدل می تواند برای محاسبات مربوط به پاسخ، مدل تحت بارهای وارده را در هر مرحله از چرخه محاسبات تولید کند [21]. در این مدل برای تحلیل از کانتور تنش فون میزز و حل گر کمانش آباکوس استفاده شده است.

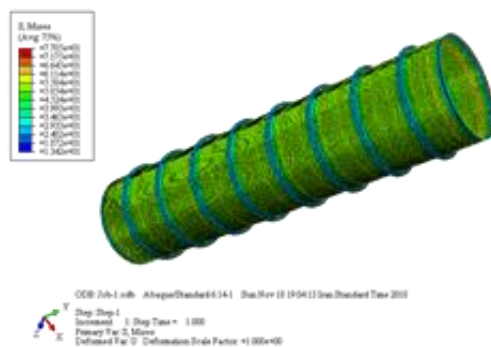
پارامترهای وارده برای تحلیل کمانش در شکل ۳ آورده شده است.



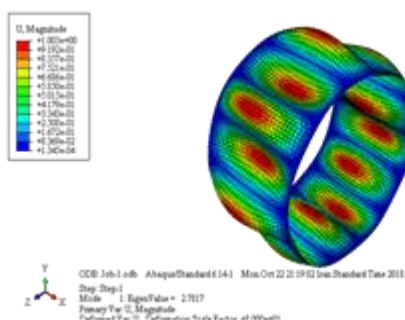
شکل ۳- پارامترهای وارده برای تحلیل کمانش در آباکوس.

Figure 3- Parameters entered for buckling analysis in Abaqus.

¹ Uncertainties



شکل ۴- کانتور تنش فون میزز برای بدنه فشار مدل شده با المان C3D20R با مش ریزتر.
 Figure 4- Von Mises stress contour for a pressure body modeled with a C3D20R element with a finer mesh.

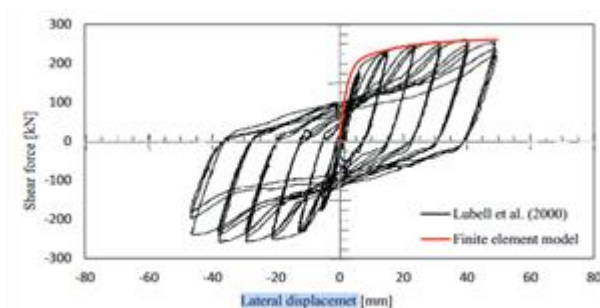


شکل ۵- نمایش فشار کمانش و مد کمانش تحلیل شده توسط حل گر کمانش آباکوس.
 Figure 5- Display of buckling pressure and buckling mode analyzed by the Abaqus buckling solver.

۳- صحنه گذاری^۱

تحلیل‌های قابلیت اطمینان انجام شده در این مطالعه از تحلیل‌های فشار اور افزایشی استفاده می‌کنند. از این رو، اعتبارسنجی منحنی فشار آور عددی به دست آمده از مدل اجزای محدود توسعه یافته در *ABAQUS* کافی است. برای این منظور، منحنی فشاری حاصل در شکل ۶ با پوشش نمودار هیستریزس از یک مطالعه تجربی توسط لوبل و همکاران [22] مقایسه شده است، بر روی یک نمونه آزمایشگاهی مشابه با نمونه‌ای که در این جا مدل شده است. به عبارت دیگر، شکل ۵ نیروی برشی در مقابل جابه‌جایی جانبی به دست آمده از تحلیل فشار بر روی مدل اجزای محدود را همراه با منحنی‌های پسماند از مطالعه تجربی نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده یک توافق رضایت‌بخش بین پوشش منحنی‌های پسماند تجربی و منحنی فشار آور عددی از مدل *FEM* توسعه یافته است.

^۱ Validation



شکل ۶- مقایسه منحنی تنش مدل با نمودار هیستریزیس.

Figure 6- Comparison of the model stress curve with the hysteresis diagram.

۴- تحلیل قابلیت اطمینان^۱

۴-۱- تابع حالت حدی^۲

در پوسته‌ها سختی غشایی عموماً چندین برابر از سختی خمشی بیشتر است. از این رو پوسته‌های نازک توانایی دارند که حجم وسیعی از انرژی کرنشی غشایی را تحمل نمایند بدون آن که تغییر شکل زیادی پیدا کنند. در مقابل، اگر انرژی کرنشی خمشی به آن‌ها اعمال گردد در مقایسه با وقتی که همان مقدار انرژی کرنشی غشایی را جذب کنند، تغییر شکل زیادتری خواهند داشت.

اگر یک پوسته به طریقی بارگذاری شود که بیشتر انرژی کرنشی که در آن ذخیره می‌شود از نوع غشایی باشد و از طرفی به گونه‌ای این انرژی بتواند به انرژی کرنشی خمشی تبدیل شود، پوسته در این حین تغییر شکل زیادی خواهد نمود که به این نوع تغییر شکل، کمانش گویند [23]. بیشترین عامل شکست در بدنه فشار کمانش بین رینگی در پوسته می‌باشد. در تابع حالت حدی این مقدار در نظر گرفته می‌شود. مقدار مجاز اندازه جابه‌جایی این کمانش مطابق با محاسبات داده شده در استاندارد GI و ابعاد بدنه فشار برای فشار فروپاشی در کمانش برابر 0.8 سانتی متر می‌باشد.

به این ترتیب، این نسبت کمانش در این جا به عنوان آستانه شکست استفاده می‌شود. این منجر به تابع حالت حد زیر می‌شود.

$$g(x) = 0.8 - \Delta(x), \quad (1)$$

که در آن Δ نسبت کمانش بدنه و x بردار متغیرهای تصادفی است، به عنوان مثال، $x = \{fy, fu, t, P\}$.

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان با این تابع حالت حدی منجر به این احتمال می‌شود که g مقادیر منفی به خود بگیرد، یعنی نسبت کمانش از مقدار تعیین شده بیشتر شود. خاطرنشان می‌شود که یک طراح سازه می‌تواند از تحلیل مکانیکی دقیق‌تری نسبت به آنچه در این مقاله ارائه شده است استفاده کند. به عنوان مثال، یک تحلیل چند تابعی برای محاسبه نسبت کمانش که در آن رفتار خستگی بدنه نیز محاسبه می‌شود. در این حالت طراح با مشکل تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت مواجه می‌شود که چارچوب پیشنهادی پاسخ بهینه‌ای را برای آن ارائه می‌دهد.

¹ Reliability analysis

² Limit-state function

۲-۴- روش تحلیل^۱

هر یک از مدل بدنه بر اساس ضخامت و وزن مختلف تحت تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان Rt (یک برنامه کامپیوتری برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و بهینه سازی [24]) قرار می گیرند. Rt به صورت رایگان در سایت Rtx قابل دانلود است^۲. Rt قادر است با چندین برنامه تحلیل FEM از جمله $ABAQUS$ ارتباط برقرار کند. نمونه گیری مونت کارلو [25] به عنوان الگوریتم تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می شود، همان طور که قبلاً ذکر شد، روش های قابلیت اطمینان ساختاری احتمال این که تابع حالت حدی مقادیر منفی به خود بگیرد، یعنی $p_f = P(g \leq 0)$ محاسبه می کنند. این روش ها p_f را با ارزیابی عددی انتگرال چند برابر زیر محاسبه می کنند:

هدف اساسی تحلیل قابلیت اطمینان محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از انتگرال احتمالی زیر است.

$$r = Pr\{g(x) \geq 0\} = \int_{g(x) \geq 0} f_X(x) dx. \quad (2)$$

بنابراین احتمال خرابی با انتگرال n -گانه زیر به دست می آید.

$$P_f = 1 - r = Pr\{g(x) < 0\} = \int_{g(x) < 0} f_X(x) dx, \quad (3)$$

که در این روابط $X = [X_1, \dots, X_n]^T$ بردار متغیرهای ورودی تصادفی، $f_X(x)$ تابع چگالی احتمالی^۳ اشتراکی X و $g(x)$ تابع حالت حدی است. وضعیت حالت حدی با رابطه $g(x) = 0$ تعریف می شود و ناحیه خرابی با $g(x) < 0$ مشخص می شود که گاهی برای نشان دادن این ناحیه از Ω استفاده می شود. در نمونه گیری مونت کارلو، انتگرال چند برابری معادله (۲) با معرفی یک تابع نشانگر، $\psi(x)$ ، به صورت زیر محاسبه می شود.

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \cdot f_X(x) dx, \quad (4)$$

که در آن $\psi(x) = 1$ تابع گام است که برابر با واحد است، زمانی که $g(x) \leq 0$ و در غیر این صورت صفر است.

$$p_f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \psi(x_k), \quad (5)$$

که در آن $K =$ تعداد نمونه ها و $x_k =$ بردار تحقق x در k th نمونه.

همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در هر نمونه از تجزیه و تحلیل، Rt مجموعه ای از تحقق های تصادفی را برای متغیرهای تصادفی x ایجاد می کند. این تحقق ها به عنوان ورودی FEM در $ABAQUS$ عمل می کنند. Rt مدل را در $ABAQUS$ با استفاده از این تحقق ها اجرا می کند که به نوبه خود تحلیل استاتیکی غیرخطی را انجام می دهد و نسبت کمانش حاصل را محاسبه می کند. سپس Rt نسبت جابه جایی محاسبه شده پوسته سازه، $\Delta(x)$ را برای محاسبه تابع حالت حد دریافت می کند. با استفاده از $\Delta(x)$ ، تابع حالت حدی $g(x)$ از رابطه (۱) و تابع نشانگر $\psi(x)$ محاسبه می شود. احتمال بیش از حد، p_f ، متعاقباً مطابق با معادله (۴) به روز می شود. مطابق با این معادله، p_f برابر است با تعداد نمونه هایی که در آن ها $\Delta(x)$ از مقدار تعیین شده جابه جایی در اثر کمانش (0.8 سانتی متر) بیشتر شده است تقسیم بر تعداد کل نمونه ها. تولید تصادفی نمونه ها تا زمانی که تخمین کافی دقیق از p_f به دست آید ادامه می یابد. ضریب تغییرات p_f (CoV) اندازه گیری دقت احتمال محاسبه شده است. طبق رابطه (۵)، p_f میانگین تحقق های $\psi(x)$ است. واریانس این میانگین توسط معادله (۶) داده شده است.

¹ Analysis method

² <http://rtx.civil.sharif.edu>

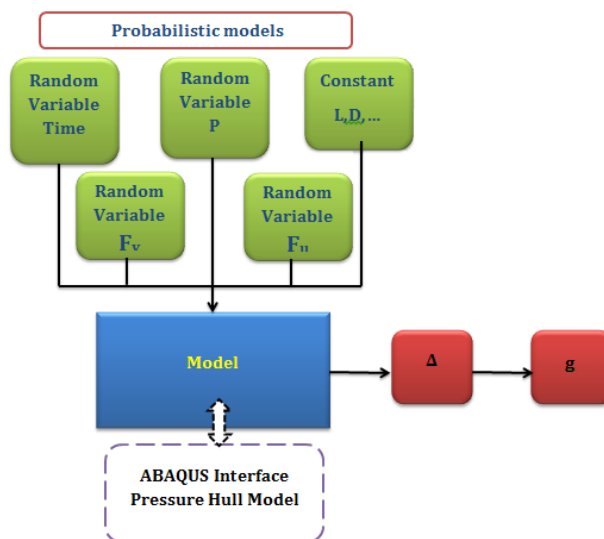
³ Probability Density Function (PDF)

$$\text{Var}[p_f] = \frac{1}{K} \text{Var}[\psi x] = \frac{1}{K-1} p_f (1 - p_f). \quad (6)$$

این منجر به CoV زیر برای pf محاسبه شده می شود:

$$\text{CoV}[p_f] = \frac{\sqrt{\text{Var}[p_f]}}{p_f} = \sqrt{\frac{1-p_f}{K-1} p_f}. \quad (7)$$

هنگام انجام یک تجزیه و تحلیل نمونه، یک CoV هدف معمولاً کمتر از ۲٪ مشخص می شود، به طور مستقیم تعداد نمونه های مورد نیاز، K ، برای دستیابی به دقت مطلوب تاثیر می گذارد [26].



شکل ۷- مدل تحلیل.

Figure 7- Analysis model.

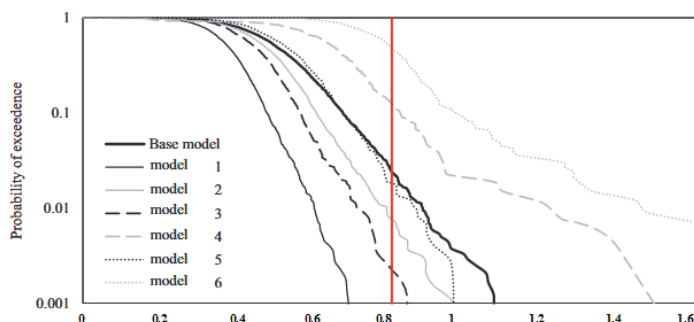
نمونه گیری مونت کارلو یک رویکرد مستقیم است که کل توزیع احتمال جابه جایی در اثر کماتش را محاسبه می کند. این به دلیل این واقعیت است که $\Delta(x)$ حاصل از هر نمونه تصادفی به جای 0.8cm وارد تعداد زیادی از توابع حالت حدی با آستانه های مختلف می شود. از این رو، احتمالات فراگذشت در آستانه های بسیاری در پایان یک تحلیل محاسبه می شود که منجر به کل تابع توزیع تجمعی مکمل^۱ جابه جایی در اثر کماتش می شود. $CCDF$ مرتبط با جابه جایی 0.8cm احتمال شکست تابع حالت حدی در معادله (۱) است.

۵- تحلیل نتایج خروجی

شکل ۸ منحنی های احتمال فراگذشت را برای جابه جایی در اثر کماتش هفت مدل سازه در نظر گرفته شده در این مطالعه نشان می دهد. خط قرمز عمودی احتمال این که جابه جایی از 0.8cm برای هر مدل بیشتر شود را مشخص می کند. شکل ۸ نشان می دهد که آرایش ۱، یعنی مدل سازه با کاهش ضخامت پوسته و کاهش فاصله بین رینگ های تقویتی، در مقایسه با مدل پایه، عملکرد بهتری را نشان می دهد. این مشاهدات حتی برای آرایش ۲، ۳ و ۵ که در آن رینگ های تقویتی فاصله کمتری با یکدیگر دارند صادق است. این نشان می دهد که کاهش فاصله بین رینگ های تقویتی تاثیر بیشتر نسبت به افزایش ضخامت پوسته بر عملکرد سازه در مقابل با کماتش دارد. همان طور که انتظار می رفت، ترتیب ۶، با کاهش ضخامت

¹ Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)

پوسته و افزایش فاصله رینگ‌های تقویتی نسبت به دیگر مدل‌ها، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین همه مدل‌ها نشان می‌دهد. جدول ۴ انواع را از بهترین عملکرد تا ضعیف‌ترین رتبه‌بندی می‌کند. همچنین میانگین حاصل و CoV جابه‌جایی بر اثر کمانش و همچنین احتمال شکست را برای هر یک از هفت مدل ارائه می‌کند.



شکل ۸- منحنی‌های احتمال فراگذشت برای جابه‌جایی در اثر کمانش مدل‌ها.
Figure 8- Transition probability curves for displacement due to buckling of the models.

جدول ۴- رتبه‌بندی مدل‌ها.

Table 4- Ranking of models.

Rank	Model	Mean of Δ	Cov of Δ	Failure probability
1	1	0.37	0.233	0.0002
2	3	0.44	0.227	0.0022
3	2	0.46	0.273	0.0076
4	5	0.53	0.239	0.0182
5	پایه	0.51	0.258	0.0237
6	4	0.64	0.387	0.1222
7	6	0.79	0.200	0.4735

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل مبتنی بر قابلیت اطمینان را برای طراحی بدنه فشار ارایه می‌کند. برای این منظور، ابتدا یک FEM مکانیکی از چنین مدل‌های توسعه‌یافته و با مطالعات تجربی موجود تأیید شده است. در مرحله بعد، مجموعه‌ای از شش مدل جایگزین تولید شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر اساس تابع هدف کمینه‌کردن وزن کل (در مقاله دیگری به صورت مفصل توضیح داده شده است) با FEM طراحی و مدل‌سازی می‌شوند. سپس، عدم قطعیت‌های غالب در مدل‌ها با متغیرهای تصادفی مشخص می‌شوند و شکست مدل‌ها با توابع حالت حد توصیف می‌شود. پس از آن، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان برای محاسبه احتمال شکست هر مدل انجام می‌شود و بر اساس آن مدل رتبه‌بندی می‌شوند.

منابع

- [1] Norton, R. (1999). *Design of machinery an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*. McGraw-Hill New York. <https://B2n.ir/jr9783>
- [2] Morandi, A. C., Faulkner, D., & Das, P. K. (1996). Frame tripping in ring stiffened externally pressurised cylinders. *Marine structures*, 9(6), 585–608. [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0951-8339(95)00020-8)
- [3] Forsell, C. (1924). Economy and construction. *Sunt förnuft*, 4, 74–77.
- [4] Johnson, A. I. (1953). *Strength, safety and economical dimensions of structures*.
- [5] Freudenthal, A. M. (1956). Safety and the probability of structural failure. *Transactions of the american society of civil engineers*, 121(1), 1337–1375. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007306>
- [6] Torroja, E., & Paez, A. (1949). *La determinacion del coeficiente de seguridad en las distintas obras*. Instituto Tecnico de la Construccion e del Cemento.
- [7] Krohn, C. A., Nelson, A. C., & Thompson, W. J. (1966). *Development of reliability methodology for systems engineering. Volume I-Methodology-Analysis techniques and procedures Final report*.

- [8] Guild, R. D. (1968). *Reliability Testing and Equipment Design Using Bayesian Models*. Northwestern University.
- [9] Shinozuka, M., & Yang, J. N. (1969). *Optimum structural design based on reliability and proof-load test*.
- [10] CORNELL, C. A. (1972). Bayesian statistical decision theory and reliability-based design. *International conference on structural safety and reliability* (pp. 47–68). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-016566-0.50006-2>
- [11] Hilton, H. H., & Feigen, M. (1960). Minimum weight analysis based on structural reliability. *Journal of the aerospace sciences*, 27(9), 641–652. <https://doi.org/10.2514/8.8702>
- [12] Kalaba, R. (1962). Design of minimal-weight structures for given reliability and cost. *Journal of the aerospace sciences*, 29(3), 355–356. <https://doi.org/10.2514/8.9434>
- [13] Loh, H. T., & Papalambros, P. Y. (1990). A sequential linearization approach for solving mixed-discrete nonlinear design optimization problems. *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference* (pp. 1–10). American society of mechanical engineers. <https://doi.org/10.1115/DETC1990-0043>
- [14] Youn, B. D., Choi, K. K., & Park, Y. H. (2003). Hybrid analysis method for reliability-based design optimization. *Journal of mechanical design*, 125(2), 221–232. <https://doi.org/10.1115/1.1561042>
- [15] Tu, J., Choi, K. K., & Park, Y. H. (1999). A new study on reliability-based design optimization. *Journal of mechanical design*, 121(4), 557–564. <https://doi.org/10.1115/1.2829499>
- [16] Maier, H. R., Lence, B. J., Tolson, B. A., & Foschi, R. O. (2001). First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Water resources research*, 37(3), 779–790. <https://doi.org/10.1029/2000WR900329>
- [17] Zou, T., & Mahadevan, S. (2006). A direct decoupling approach for efficient reliability-based design optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 31(3), 190–200. <https://doi.org/10.1007/s00158-005-0572-7>
- [18] Chen, X., Hasselman, T., Neill, D., Chen, X., Hasselman, T., & Neill, D. (1997). Reliability based structural design optimization for practical applications. *38th structures, structural dynamics, and materials conference* (pp. 1403). American institute of aeronautics and astronautics, Inc. <https://doi.org/10.2514/6.1997-1403>
- [19] Kim, S. H., & Wen, Y. K. (1990). Optimization of structures under stochastic loads. *Structural safety*, 7(2), 177–190. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(90\)90067-Y](https://doi.org/10.1016/0167-4730(90)90067-Y)
- [20] Kim, H. Y., Shin, Y. K., Kim, S. Y., Shin, S. C., Chung, B. Y., Jo, J. H., & Kim, H. S. (2012). Structural design of small submarine pressure hull. *Journal of the society of naval architects of korea*, 49(2), 116–123. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2012.49.2.116>
- [21] Yan, K. (2017). *The abaqus/cae plug-in for premium threaded connection 3d parameter finite element model*. [Thesis]. <http://hdl.handle.net/10919/78245>
- [22] Lubell, A. S., Prion, H. G. L., Ventura, C. E., & Rezai, M. (2000). Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading. *Journal of structural engineering*, 126(4), 453–460. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:4\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:4(453))
- [23] Kabiri Attabadi, A. (4879). *Buckling of a submarine structural model: modeling and linear elastic buckling analysis under hydrostatic pressure*. [Thesis]. <https://b2n.ir/bk4155>
- [24] Mahsuli, M., & Haukaas, T. (2013). Computer program for multimodel reliability and optimization analysis. *Journal of computing in civil engineering*, 27(1), 87–98. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000204](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000204)
- [25] Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2012). *Reliability of structures*. CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b12913>
- [26] Ditlevsen, O., & Madsen, H. O. (1996). *Structural Reliability Methods*. Wiley. <https://www.researchgate.net/publication/263047733>