



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 17, Issue 2, No. 45, 2026



DOI: [10.22108/pom.2026.149494.1671](https://doi.org/10.22108/pom.2026.149494.1671)

(Research paper)

## A Reliability-Based Multi-Criteria Decision Framework for Submarine Pressure Hull Design

Javad Sheikh Hafshejani

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, [jsheikh@stu.yazd.ac.ir](mailto:jsheikh@stu.yazd.ac.ir)

Mohammad Saber Fallah Nezhad\*

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, [fallahnezhad@yazd.ac.ir](mailto:fallahnezhad@yazd.ac.ir)

Mohammad Bagher Fakhrzad

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, [mfakhrzad@yazd.ac.ir](mailto:mfakhrzad@yazd.ac.ir)

Hasan Hosseini Nasab

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, [hnn@yazd.ac.ir](mailto:hnn@yazd.ac.ir)

**Purpose:** The design of submarine pressure hulls inherently involves conflicting objectives: weight minimization, safety enhancement, cost reduction, and operational effectiveness. Traditional deterministic approaches rely on overly conservative safety factors, leading to 18–25% excess weight. Additionally, a significant gap exists between engineering simulations and multi-stakeholder, risk-informed design criteria. This research develops a novel probabilistic multi-criteria decision-making framework that integrates Reliability-Based Design Optimization (RBDO) with multi-criteria analysis to achieve an optimally balanced design for submarine pressure hulls, simultaneously addressing weight, reliability, cost, and operational effectiveness.

**Design/methodology/approach:** The framework comprises seven main stages. A baseline pressure hull was defined per marine standards (ABS, DNV) for 500 m depth. Design variables include six geometric parameters: shell thickness, stiffener spacing, web height and thickness, and flange width and thickness. The objective is weight minimization under probabilistic constraints for three failure modes (yield, buckling, collapse) with a target reliability index  $\beta \geq 3.5$  ( $P_f \leq 2.3 \times 10^{-4}$ ). Nonlinear finite element analysis was performed in Abaqus/Standard using S4R shell elements, incorporating geometric and material nonlinearities for A516 Grade 70 steel ( $E=200$  GPa,  $\nu=0.3$ , yield 260 MPa). The Riks method handled post-buckling. Validation against analytical and experimental data showed <5% discrepancy. Uncertainties were modeled as yield strength (normal, COV=2.7%), shell thickness (normal, COV=3%), and out-of-roundness (Gumbel, COV=40%). A genetic algorithm (population 50, 100 generations) with RBDO constraints generated a Pareto frontier (M1–M5). A Kriging surrogate ( $R^2 > 0.98$ ) reduced computational cost in Monte Carlo simulation (100,000 samples).

\* Corresponding author, [0000-0003-3343-2769](https://orcid.org/0000-0003-3343-2769)

2981-0329 / © University of Isfahan



This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

How to cite: sheikh hafshejani, J. , Fallah Nezhad, M. S. , Fakhrzad, M. B. and Hosseini Nasab, H. (2026). A Reliability-Based Multi-Criteria Decision Framework for Submarine Pressure Hull Design. *Research in Production and Operations Management*, 17(2), 109 -136 . doi: 10.22108/pom.2026.149494.1671

Global sensitivity analysis used importance vectors  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\eta$ . The Analytic Hierarchy Process (AHP) with ten naval experts evaluated the Overall Measure of Effectiveness (OMOE) across six operational capabilities. Life-Cycle Cost (LCC) was calculated via activity-based costing (material, manufacturing, welding). Finally, a multi-criteria comparison integrated weight, reliability, LCC, and OMOE to select the optimal design.

**Findings:** The framework achieved 23.4% weight reduction (51.0 to 39.1 t) with a reliability index of 3.50. Model M2 was optimal, satisfying  $\beta \geq 3.5$  while maximizing weight reduction. Model M5 had similar weight reduction but failed reliability ( $\beta = 3.10 < 3.5$ ). M2 scored OMOE=0.85 vs. baseline 0.67. LCC showed a 40.9% cost reduction (\$42,640 to \$25,205 k), mainly from lower welding costs. Meeting the reliability target required only 0.4% extra cost compared with unreliable M5, demonstrating a high safety return. Sensitivity analysis identified yield strength as dominant (70% contribution to failure variance). The  $\eta$  vector confirmed that reducing yield strength standard deviation ( $|\eta| = 0.78$ ) most effectively lowers failure probability, prioritizing material quality control. Stiffener spacing affects weight reduction more than shell thickness.

**Research limitations/implications:** Limitations include: static collapse only (no dynamic/fatigue), restriction to A516 steel (no composites), omission of detailed manufacturing effects (e.g., welding distortions), and reliance on ten naval experts (broader stakeholder input could improve robustness). Future work should incorporate spectral fatigue and dynamic loading, extend to advanced materials, integrate manufacturing simulations, and apply multi-fidelity modeling to reduce computational costs.

**Practical implications** – For submarine project managers: (1) early-stage RBDO can cut weight by up to 23.4%, improving maneuverability and fuel efficiency; (2) yield-strength quality control is the most cost-effective safety strategy; (3) manufacturing tolerances must be included in reliability assessments; (4) OMOE enables balanced trade-offs; (5) the Pareto frontier aids in selecting designs for specific missions.

**Social implications:** The risk-based framework applies to other pressure vessels (deep-sea submersibles, offshore platforms, pipelines), enhancing marine safety and environmental protection. Improved reliability lowers catastrophic failure risks (loss of life, oil spills, ecosystem damage). Cost optimization reduces public spending on defense and infrastructure. Emphasis on material quality fosters higher industry standards and workforce skills.

**Originality/value:** Novelty lies in integrating weight, reliability, cost, and operational effectiveness within one probabilistic framework—unlike prior isolated studies. Contributions include advancing risk assessment via Monte Carlo with Kriging; enabling safety-reliability trade-offs via RBDO–AHP integration; demonstrating real-world feasibility; and offering a multi-stakeholder decision tool. This provides significant value to naval engineers, project managers, and offshore industry decision makers.

**Keywords:** Submarine pressure hull, Reliability-Based Design Optimization (RBDO), Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Monte Carlo Simulation, Analytic Hierarchy Process (AHP)



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۲، پیاپی ۴۵، ۱۴۰۵  
دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳، ص ۱۰۹-۱۳۶



DOI: [10.22108/pom.2026.149494.1671](https://doi.org/10.22108/pom.2026.149494.1671)

(مقاله پژوهشی)

## چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر قابلیت اطمینان برای طراحی بدنه فشار زیردریایی

جواد شیخ هفشجانی<sup>۱</sup>؛ محمدصابر فلاح‌نژاد<sup>۲\*</sup>؛ محمدباقر فخرزاد<sup>۳</sup>؛ حسن حسینی‌نسب<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، [jsheikh@stu.yazd.ac.ir](mailto:jsheikh@stu.yazd.ac.ir)

۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، [fallahnezhad@yazd.ac.ir](mailto:fallahnezhad@yazd.ac.ir)

۳- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، [mfakhrzad@yazd.ac.ir](mailto:mfakhrzad@yazd.ac.ir)

۴- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، [hnn@yazd.ac.ir](mailto:hnn@yazd.ac.ir)

**چکیده:** طراحی بدنه‌های فشار زیردریایی، همواره با اهداف متعارض کاهش وزن، افزایش ایمنی، کاهش هزینه و حفظ اثربخشی عملیاتی همراه است. پرسش اصلی پژوهش این است که چگونه با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل قابلیت اطمینان، به طراحی بهینه‌ای دست یافت که تعادلی میان این اهداف متضاد برقرار کند. در این پژوهش، چارچوب نوینی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره احتمالاتی ارائه شد. برای این منظور، بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان (RBDO) با تحلیل غیرخطی اجزای محدود و الگوریتم ژنتیک تلفیق شد. مدل جانشین کریجینگ با ضریب تبیین بیش از ۰/۹۸، برای اجرای کارآمد شبیه‌سازی مونت کارلو و کمی‌سازی احتمال خرابی تحت عدم قطعیت‌های خواص مواد (ضریب تغییرات مقاومت تسلیم ۲/۷ درصد) و نقص‌های هندسی سازه به کار رفت. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) با بهره‌گیری از نظرات ده متخصص معماری دریایی، معیار کلی اثربخشی (OMOE) را ارزیابی و طراحی متوازن بهینه را شناسایی کرد. یافته‌ها نشان داد چارچوب پیشنهادی کاهش ۲۳/۴ درصدی وزن سازه (از ۵۱/۰ به ۳۹/۱ تن) را با شاخص قابلیت اطمینان ۳/۵ محقق می‌کند. طراحی متوازن بهینه، امتیاز ۰/۸۵ OMOE را کسب کرد. تحلیل حساسیت سراسری نشان داد مقاومت تسلیم با سهم ۷۰ درصد، عامل غالب در قابلیت اطمینان سازه است و فاصله سخت‌کننده‌ها نسبت به ضخامت پوسته، تأثیر بیشتری در کاهش وزن دارد. مرز پارتو شامل فلسفه‌های طراحی متمایز، ابزار عملی را برای تصمیم‌گیری مهندسان فراهم می‌آورد. این پژوهش با تلفیق مؤثر تصمیم‌گیری چندمعیاره و بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، ابزار دقیق و مبتنی بر ریسکی را برای طراحان سازه‌های دریایی حساس به وزن ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** بدنه فشار زیردریایی، بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، تصمیم‌گیری چندمعیاره، شبیه‌سازی مونت کارلو، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

## ۱- مقدمه

طراحی بدنه‌های فشار زیردریایی، چالش اساسی در مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌ها محسوب می‌شود که با الزامات سخت‌گیرانه و بیشتر متضاد همراه است. بدنه فشار اولین مانع ایمنی حیاتی در برابر فشارهای هیدرواستاتیک فوق‌العاده بیش از ۵۰ مگاپاسکال است که باید احتمال خرابی بسیار پایینی را حفظ و در عین حال وزن حداقلی را برای حفظ مانورپذیری و ظرفیت محموله شناور تأمین کند (Keane et al., 2017). پیامدهای خرابی فاجعه‌بار است و ارزیابی ریسک احتمالاتی را نه تنها یک تمرین تحلیلی، یک الزام اساسی در طراحی می‌کند. محدودیت‌های اقتصادی، این چالش را تشدید می‌کنند؛ زیرا تصمیمات طراحی در مراحل اولیه، بیش از ۸۰٪ از کل هزینه چرخه عمر را تعیین می‌کند (Blanchard & Fabrycky, 2011). با وجود این واقعیت، اتکا به عوامل ایمنی قطعی بسیار محافظه‌کارانه همچنان ادامه دارد و به ناکارآمدی‌های سازه‌ای مستند به میزان ۱۸ تا ۲۵ درصد اضافه‌وزن منجر می‌شود (Ross, 2011). این ناکارآمدی‌ها در پروفایل‌های عملیاتی عمق زیاد بیش از ۵۰۰ متر تشدید می‌شوند؛ جایی که رفتار مجزای تغییرپذیری مواد و نقص‌های هندسی به افزایش‌های درخور توجه و کمی‌نشده ریسک منجر شود (Zhang et al., 2025).

بررسی انتقادی پیشینه اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۵) در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های دریایی، سه شکاف پایدار را نشان می‌دهد که این مطالعه آنها را به‌طور مستقیم بررسی می‌کند.

**شکاف اول: مدل‌سازی احتمالاتی ناقص:** اگرچه الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند الگوریتم‌های ژنتیک (GA) به‌طور گسترده برای کاهش وزن به کار می‌روند (Lee & Geem, 2005)، حدود ۶۵٪ از این مطالعات رویکرد قطعی اتخاذ می‌کنند و تغییرپذیری‌های ذاتی را در خواص مواد نادیده می‌گیرند؛ برای نمونه، ضریب تغییرات (COV) معادل ۲۰۷ درصد در مقاومت تسلیم فولاد دریایی (Pambudi et al., 2024) HY-80 در بیشتر مواقع نادیده گرفته می‌شود. افزون بر این، عدم قطعیت‌های هندسی شامل نقص‌های اولیه، خارج از مدوربودن و تغییرات ضخامت که عوامل غالب در کماتش پوسته‌های جدار نازک به‌طور گسترده شناخته شده‌اند (Singer et al., 2002; Teng & Rotter, 2004)، معمولاً از تحلیل‌های قابلیت اطمینان حذف می‌شوند. این حذف، نشان‌دهنده ضعف درخور توجهی در پیش‌بینی ایمنی واقعی سیستم است.

**شکاف دوم: فقدان ارزیابی قابلیت اطمینان چندحالتی یکپارچه:** این حوزه تحت سلطه روش‌هایی مانند روش‌های قابلیت اطمینان مرتبه اول و دوم (FORM<sup>۶</sup>/SORM<sup>۷</sup>) قرار دارد که در حدود ۷۸٪ از مطالعات مرتبط به کار رفته‌اند (Der Kiureghian, 2005). روش FORM با خطی‌سازی تابع حالت حدی در نقطه طراحی و روش SORM با تقریب درجه دوم، کارایی محاسباتی بالایی دارند؛ اما کاربرد آنها بیشتر به حالت‌های خرابی منفرد و مجزا (مانند ناپایداری کلی یا تجاوز از تنش تسلیم) محدود می‌شود. به‌ندرت به تعامل پیچیده و رقابت بین حالت‌های خرابی بالقوه متعدد در یک بدنه فشار (شامل تسلیم، کماتش موضعی، کماتش کلی و فروپاشی ترکیبی) توجه می‌شود که در اصطلاح «قابلیت اطمینان چندحالتی» نامیده می‌شود و جامعیت محاسبه شاخص قابلیت اطمینان (β) را محدود می‌کند. سرمقاله‌های اخیر به‌صراحت خواستار چارچوب‌های قابلیت اطمینان سیستم‌محور جامع‌تری برای سازه‌های دریایی شده‌اند (Elishakoff, 2000).

**شکاف سوم:** گسست بین مدل‌های مهندسی و تصمیم‌گیری عملیاتی: مدل‌های مهندسی معمولاً به دنبال بهینه‌سازی یک هدف فنی (مانند کمینه‌سازی وزن یا بیشینه‌سازی ضریب ایمنی) با متغیرهای طراحی هندسی و قیود تنش/کمانش‌اند؛ در حالی که تصمیم‌گیری عملیاتی نیازمند در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای اقتصادی، عملیاتی و ایمنی است. هنوز گسست آشکاری بین شبیه‌سازی‌های مهندسی با دقت بالا و معیارهایی وجود دارد که انتخاب‌های طراحی راهبردی را هدایت می‌کنند. کمتر از ۸٪ از مطالعات بهینه‌سازی، معیارهای اثربخشی عملیاتی وابسته به مأموریت، مانند معیار کلی اثربخشی را در بر می‌گیرند (Gaspar & Guedes Soares, 2013). هم‌زمان مدل‌های هزینه، دقت لازم برای در نظر گرفتن واقعیت‌های تولید را ندارند؛ مانند عیوب جوشکاری که به ۱۵ تا ۲۰ درصد واریانس هزینه ساخت کمک می‌کنند (Chen & Guedes Soares, 2008). این گسست، کاربرد عملی نتایج بهینه‌سازی را در فرایند طراحی آگاهانه از ریسک و چندذی‌نفره<sup>۸</sup> (یعنی فرآیندی که در آن چندین ذی‌نفع با اولویت‌های متفاوت، در تصمیم‌گیری نقش دارند) مختل می‌کند.

براساس این سه شکاف، مسئله اصلی پژوهش به صورت زیر تعریف می‌شود: «چگونه با تلفیق بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان و تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM<sup>۹</sup>)، به طراحی بدنه فشار زیردریایی دست یافت که به طور هم‌زمان وزن را کمینه و قابلیت اطمینان را تأمین کند، هزینه را کاهش دهد و اثربخشی عملیاتی را بیشینه کند؟»

متغیرهای تصمیم شامل ضخامت پوسته (t)، فاصله سخت‌کننده‌ها (L)، ارتفاع جان (h\_w)، ضخامت جان (t\_w)، عرض بال (b\_f) و ضخامت بال (t\_f) هستند. قیود مسئله شامل برآورده‌سازی شاخص قابلیت اطمینان هدف  $\beta \geq 3.5$  برای سه حالت خرابی (تسلیم، کمانش و فروپاشی کلی) و محدوده‌های هندسی متغیرها هستند. عدم قطعیت‌های مقاومت تسلیم، ضخامت پوسته و خارج از مدور بودن با توزیع‌های نرمال و گامبل مدل‌سازی شده‌اند. پژوهش حاضر با توسعه و ارائه چارچوب نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره احتمالاتی (PMCDM<sup>۱۰</sup>)، این شکاف‌ها را پر می‌کند و مشارکت‌های کلیدی زیر را ارائه می‌دهد: (۱) پیشبرد ارزیابی ریسک احتمالاتی برای سازه‌های دریایی از طریق تلفیق شبیه‌سازی مونت کارلو با مدل جانشین کریجینگ و روش FORM (Halder & Mahadevan, 2024)؛ (۲) امکان‌پذیری مصالحه‌های سیستماتیک ایمنی سیستم با تلفیق RBDO و AHP و (۳) ارائه شفافیت روش‌شناختی و اعتبارسنجی کامل مدل‌ها.

برای ترسیم روشن نوآوری و مشارکت این اثر، جدول ۱ تحلیل مقایسه‌ای را با مطالعات کلیدی اخیر، در حوزه‌های مرتبط ارائه می‌دهد.

در ادامه مقاله، ابتدا مبانی نظری و مفاهیم کلیدی شامل تحلیل اجزای محدود، بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان و تصمیم‌گیری چندمعیاره تشریح و بعد روش‌شناسی پژوهش شامل مدل‌سازی عدم قطعیت، پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و فرایند AHP ارائه می‌شود.

همچنین مطالعه کاربردی روی بدنه فشار زیردریایی و یافته‌های حاصل از بهینه‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان گزارش می‌شود. درنهایت، نتایج بحث و تفسیر می‌شود، نتیجه‌گیری انجام و پیشنهادها ارائه می‌شود.

جدول ۱- تحلیل مقایسه‌ای مطالعات اخیر در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های دریایی و پیشرفت‌های چارچوب حاضر  
 Table 1- Comparative analysis of recent studies on marine structural optimization and advances of the current framework

| مطالعه (سال)                            | روش‌شناسی اصلی       | جزء کاربرد                 | قطبیت                    | رویکرد به علم     | تعداد حالت‌های خرابی | در نظر گرفتن هزینه عملیاتی | در نظر گرفتن معیارهای           | محدودیت‌های کلیدی                                    | مشارکت کار حاضر |
|-----------------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|
| اسمیت و همکاران <sup>۱۱</sup> (۲۰۲۳)    | FORM                 | کمانش استوانه‌ها           | مقاومت تسلیم (قطعی)      | تک‌حالت           | خیر                  | خیر                        | نادیده‌گرفتن عدم قطعیت هندسی    | تلفیق شبیه‌سازی مونت‌کارلو با عدم قطعیت ماده و هندسه |                 |
| جونز و لی <sup>۱۲</sup> (۲۰۲۴)          | الگوریتم ژنتیک       | کاهش وزن سازه‌های دریایی   | خیر (قطعی)               | -                 | خیر                  | خیر                        | تک‌هدفه و قطعی                  | تلفیق GA با MCDA و OMOE                              |                 |
| براون و همکاران <sup>۱۳</sup> (۲۰۲۵)    | RBDO                 | قابلیت اطمینان اتصالات جوش | مقاومت تسلیم (تصادفی)    | تک‌حالت           | جزئی                 | خیر                        | محدودیت به یک حالت خرابی        | تحلیل چندحالتی شامل کمانش، تسلیم و فروپاشی           |                 |
| ژانگ و الینگوود <sup>۱۴</sup> (۲۰۲۳)    | روش‌های ترکیبی       | ایمنی سازه‌های دریایی      | چندمتغیره                | چندحالت           | خیر                  | خیر                        | نبود ارتباط با اثربخشی عملیاتی  | تلفیق با مدل‌سازی هزینه و OMOE                       |                 |
| آون و زیو <sup>۱۵</sup> (۲۰۲۵)          | AHP                  | سیستم‌های ایمنی-حیاتی      | -                        | -                 | خیر                  | جزئی                       | تلفیق‌نداشتن با بهینه‌سازی عددی | کاربرد AHP درون حلقه بهینه‌سازی                      |                 |
| وانگ و گوئدس سوارس <sup>۱۶</sup> (۲۰۲۴) | قابلیت اطمینان سیستم | سازه‌های دریایی            | چندمتغیره                | چندحالت           | خیر                  | خیر                        | در نظر نگرفتن اقتصاد تولید      | تلفیق با مدل هزینه مبتنی بر عیوب                     |                 |
| این مطالعه                              | RBDO تلفیقی + MCDM   | طراحی بدنه فشار زیردریایی  | چندمتغیره (ماده و هندسه) | چند حالت (۳ حالت) | بله (LCC)            | بله (OMO E)                | -                               | چارچوب احتمالاتی یکپارچه برای طراحی آگاهانه از ریسک  |                 |

## ۲- ارکان اصلی پژوهش (مفاهیم و مبانی نظری)

در این بخش، مفاهیم بنیادین استفاده‌شده در پژوهش شامل تحلیل اجزای محدود غیرخطی، بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی تشریح می‌شوند.

### ۲-۱ تحلیل اجزای محدود غیرخطی

تحلیل اجزای محدود (FEM<sup>۱۷</sup>)، یک روش عددی قدرتمند برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسائل مهندسی است (Bathe, 1996). در این پژوهش، از نرم‌افزار Abaqus/Standard 2021 برای مدل‌سازی غیرخطی بدنه فشار استفاده شده است. ورودی‌های این نرم‌افزار شامل هندسه سازه (مشخصات پوسته و سخت‌کننده‌ها)، خواص مواد مدول الاستیسیته ( $E=200 \text{ GPa}$ )، نسبت پواسون  $\nu=0.3$  و منحنی تنش-کرنش فولاد (A516 Grade 70)، شرایط مرزی (گیرداری در دو انتها) و بارگذاری (فشار هیدرواستاتیک یکنواخت تا ۵ مگاپاسکال) هستند.

خروجی‌های اصلی شامل توزیع تنش فون‌میزس، تغییر شکل‌ها، بار کمانش بحرانی و فشار فروپاشی نهایی‌اند. تحلیل غیرخطی شامل دو جنبه اصلی است: (۱) غیرخطی هندسی ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ و (۲) غیرخطی مادی ناشی از رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد. برای ردیابی مسیر تعادل کامل از طریق نقاط حدی و تا ناحیه پس‌کمانش، از روش تثبیت استاتیکی ریکس استفاده شد (Riks, 1972).

## ۲-۲. بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان

بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان، رویکردی است که عدم قطعیت‌های پارامترهای طراحی را در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ می‌کند (Melchers, 1999). در این رویکرد، به‌جای استفاده از عوامل ایمنی قطعی، قیود به‌صورت احتمالاتی و براساس شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) یا احتمال خرابی ( $P_f$ ) تعریف می‌شوند. متغیرهای طراحی ( $d$ ) شامل شش پارامتر هندسی‌اند: ضخامت پوسته ( $t$ )، فاصله سخت‌کننده‌ها ( $L$ )، ارتفاع جان ( $h_w$ )، ضخامت جان ( $t_w$ )، عرض بال ( $b_f$ ) و ضخامت بال ( $t_f$ ). حدود پایین و بالای این متغیرها به‌ترتیب  $d^L = [5, 300]$  و  $d^U = [15, 1200, 120, 15]$  میلی‌مترند که براساس محدودیت‌های ساخت و الزامات آیین‌نامه‌ای تعیین شده‌اند. فرمول‌بندی کلی مسئله RBDO به‌صورت رابطه (۱) است.

$$W(d) = \rho \cdot V(d) \quad (1)$$

$d$  سازی کمینه

$$P_{f,i}(d) \leq P_{f,target}, i = 1, \dots, m$$

قیود تابع

$$d^L \leq d \leq d^U$$

که در آن  $W$  وزن کل سازه‌ای،  $\rho$  چگالی ماده ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ) و  $V$  حجم سازه‌ای است. سه حالت خرابی شامل (۱) تسلیم پوسته (تنش فون‌میزس بیش از مقاومت تسلیم)؛ (۲) کمانش الاستیک خطی (ضریب کمانش کمتر از ۱) و (۳) فروپاشی کلی پس‌کمانش (ناتوانی در تحمل بار طراحی) هستند. احتمال خرابی هدف  $P_{(f,target)} = 0.00023$  معادل شاخص قابلیت اطمینان  $\beta = 3.5$  در نظر گرفته شده است که سطح ایمنی رایج برای سازه‌های دریایی حیاتی محسوب می‌شود (Moan, 2005).

## ۲-۳. شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو ( $MCS^{18}$ ) یک روش عددی برای تخمین احتمال خرابی با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی از توابع توزیع متغیرهای ورودی است (Fishman, 1996). احتمال خرابی با استفاده از رابطه (۲) تخمین زده می‌شود.

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(X_j) \leq 0] \quad (2)$$

در این رابطه،  $N$  تعداد نمونه‌ها،  $g(X)$  تابع حالت حدی و  $I[0]$  تابع نشان‌گر است.

## ۲-۴. مدل جانشین کریجینگ

مدل کریجینگ<sup>۱۹</sup> یک روش درونیابی مبتنی بر فرآیند گاوسی است که برای تقریب توابع هزینه‌بر محاسباتی به کار می‌رود (Sacks et al., 1989). این مدل با فرض همبستگی فضایی بین نقاط نمونه، پیش‌بینی را به‌همراه عدم قطعیت مربوطه ارائه می‌دهد.

۲-۵ فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP<sup>۲۰</sup>)

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که ساعتی<sup>۲۱</sup> (۱۹۸۰) آن را ارائه کرده است. در این روش، مسئله تصمیم‌گیری به صورت سلسله‌مراتبی شامل هدف، معیارها و گزینه‌ها ساختاردهی می‌شود. وزن‌دهی معیارها از طریق مقایسات زوجی با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای انجام می‌پذیرد. نسبت ناسازگاری (IR) برای تأیید سازگاری قضاوت‌های خبره به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$IR = \frac{CI}{RI}, CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

در این رابطه،  $\lambda_{max}$  بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه و  $n$  تعداد معیارهاست. معیار کلی اثربخشی یک شاخص ترکیبی برای ارزیابی جامع عملکرد عملیاتی طرح‌های طراحی تعریف می‌شود (Gaspar & Guedes Soares, 2013). این شاخص با استفاده از یک ساختار سلسله‌مراتبی سه‌سطحی محاسبه می‌شود:

- سطح اول: هدف نهایی بیشینه‌سازی (OMOE)؛
  - سطح دوم: شش قابلیت عملیاتی ( $OC_1$ ) تا ( $OC_6$ ) شامل ایمنی، پنهان‌کاری، مانورپذیری، پایداری، قابلیت رهبری رزمی و قابلیت جنگ‌افزاری؛
  - سطح سوم: مشخصات فنی (TS) مرتبط با هر قابلیت.
- مقدار عملکرد (VOP) برای هر مشخصات فنی با استفاده از رابطه نرمال‌سازی (۴) محاسبه می‌شود.

$$VOP = (X - L_1) / (L_2 - L_1) \quad (4)$$

در این رابطه،  $X$  مقدار فعلی،  $L_1$  مقدار آستانه (حداقل) و  $L_2$  مقدار هدف (حداکثر) است؛ سپس با استفاده از وزن‌های به دست آمده از AHP، ابتدا MOP (معیار عملکرد) در رابطه (۵) برای هر قابلیت و در نهایت OMOE نهایی در رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$MOP_i = \sum W_{1ij} \times VOP_{ij} \quad (5)$$

$$OMOE = \sum W_i \times MOP_i \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $W_i$  وزن قابلیت عملیاتی  $i$  و در رابطه (۵)،  $W_{1ij}$  وزن مشخصات فنی  $j$  مرتبط با قابلیت  $i$  است.

۲-۶ هزینه چرخه عمر (LCC<sup>۲۲</sup>)

هزینه چرخه عمر (LCC)، مجموع هزینه‌های مرتبط با طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری در طول عمر مفید سازه تعریف می‌شود (Blanchard & Fabrycky, 2011). در این پژوهش، مدل هزینه‌یابی مبتنی بر فعالیت<sup>۲۳</sup>، با در نظر گرفتن سه مؤلفه اصلی رابطه (۷)، به کار گرفته شده است.

$$LCC = C_{\text{material}} + C_{\text{manufacturing}} + C_{\text{welding}} \quad (7)$$

در این رابطه،

- $C_{\text{material}}$  = (با قیمت ۱۲۰۰ دلار به ازای هر تن A516 Grade 70 فولاد) هزینه مواد اولیه
- $C_{\text{manufacturing}}$  = ۵۰ دلار و هزینه ساخت شامل برش، شکل‌دهی، ماشین‌کاری و مونتاژ (بر زمان تخمینی هر قطعه)

- هزینه جوشکاری شامل مواد مصرفی، نیروی کار و بازرسی (با در نظر گرفتن عیوب جوشکاری  $C_{welding} =$  (Chen & Guedes Soares, 2008) به عنوان منبع عدم قطعیت)

### ۳- روش شناسی پژوهش

#### ۳-۱ روش شناسی پژوهش

روش شناسی این پژوهش شامل هفت مرحله اصلی است که در ادامه به ترتیب تشریح می‌شوند. مراحل تحقیق به صورت زیر شماره گذاری و در هر مرحله، ورودی‌ها، ابزارها و خروجی‌ها مشخص شده است.

#### مرحله ۱: تعریف مسئله و داده‌های ورودی

- ورودی: مشخصات هندسی پایه، خواص مواد، شرایط بارگذاری؛
- ابزار: استانداردهای طراحی دریایی؛
- خروجی: متغیرهای طراحی (۶ پارامتر)، حدود کرانه‌ها، قیود ایمنی.

#### مرحله ۲: مدل‌سازی اجزای محدود و اعتبارسنجی

- ورودی: هندسه، خواص مواد، شرایط مرزی، بارگذاری؛
- ابزار: نرم‌افزار Abaqus/Standard 2021؛
- خروجی: توزیع تنش، بار کمانش، فشار فروپاشی.

#### مرحله ۳: مشخصه‌سازی عدم قطعیت‌ها

- ورودی: داده‌های آماری خواص مواد و تلورانس‌های ساخت؛
- ابزار: توزیع‌های نرمال و گامبل؛
- خروجی: توابع توزیع احتمال برای مقاومت تسلیم، ضخامت و خارج از محور بودن.

#### مرحله ۴: بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک تحت قیود RBDO

- ورودی: متغیرهای طراحی، توابع توزیع عدم قطعیت، قیود احتمالاتی؛
- ابزار: الگوریتم ژنتیک (کدگذاری حقیقی، جمعیت ۵۰، نسل ۱۰۰)؛
- خروجی: جبهه پارتو شامل ۵ مدل بهینه (M1) تا (M5).

#### مرحله ۵: تحلیل قابلیت اطمینان با شبیه‌سازی مونت کارلو

- ورودی: مدل‌های بهینه، مدل جانشین کریجینگ؛
- ابزار: شبیه‌سازی مونت کارلو (۱۰۰,۰۰۰ نمونه)؛
- خروجی: شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) و احتمال خرابی ( $P_f$ ) برای هر مدل.

#### مرحله ۶: تحلیل حساسیت سراسری

- ورودی: نتایج MCS، متغیرهای تصادفی؛
- ابزار: بردارهای اهمیت  $\alpha$ ،  $\delta$ ،  $\eta$ ؛
- خروجی: سهم هر پارامتر در واریانس  $P_f$ .

### مرحله ۷: ارزیابی چندمعیاره با AHP و محاسبه OMOE و LCC

- ورودی: ۵ مدل بهینه، معیارهای عملیاتی، هزینه‌ها؛
- ابزار AHP: (نظرات ۱۰ خبره)، مدل هزینه‌یابی؛
- خروجی OMOE LCC و طراحی نهایی برتر.

### ۳-۱. طراحی پایه بدنه فشار

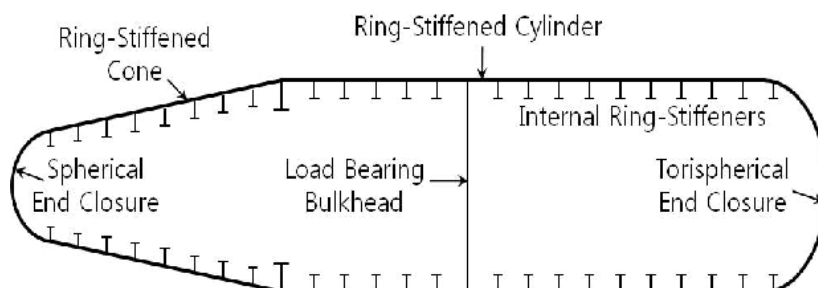
طراحی پایه براساس استانداردهای دریایی (ABS, DNV) و مطالعات پیشین (Ross, Keane et al., 2017; 2011) انجام شده است. مشخصات هندسی اولیه (جدول ۲) با در نظر گرفتن الزامات آیین‌نامه‌ای برای عمق عملیاتی ۵۰۰ متر و فشار طراحی ۵ مگاپاسکال تعیین شدند. این اعداد از تحلیل‌های اولیه اجزای محدود و روابط تحلیلی کمانش استوانه‌ها (Teng & Rotter, 2004) استخراج شده‌اند. طراحی پایه شامل یک پوسته استوانه‌ای با حلقه‌های سخت‌کننده داخلی T شکل است که با استفاده از فولاد A516 Grade 70 ساخته شده است. مشخصات هندسی طراحی پایه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی طراحی پایه

Table 2- Geometric specifications of the baseline pressure hull design

| پارامتر            | نماد | مقدار | واحد     |
|--------------------|------|-------|----------|
| ضخامت پوسته        | t_s  | ۱۱    | میلی‌متر |
| فاصله سخت‌کننده‌ها | L_f  | ۱۰۲۰  | میلی‌متر |
| ارتفاع جان         | h_w  | ۸۰    | میلی‌متر |
| ضخامت جان          | t_w  | ۱۱    | میلی‌متر |
| عرض بال            | b_f  | ۸۰    | میلی‌متر |
| ضخامت بال          | t_f  | ۱۱    | میلی‌متر |
| وزن کل سازه‌ای     | W    | ۵۱/۰  | تن       |

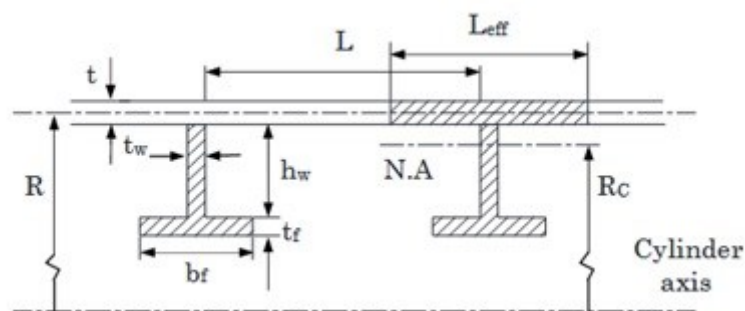
بدنه فشار مطالعه‌شده در شکل ۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. این بدنه شامل یک پوسته استوانه‌ای با شعاع خارجی ۱۰۰۰ میلی‌متر و طول ۸۸۰۰ میلی‌متر است. پوسته با حلقه‌های سخت‌کننده T شکل در فواصل منظم تقویت و بسته‌های انتهایی به صورت نیم‌کروی با بخش‌های انتقال نیم‌رخ‌دار برای کاهش تمرکز تنش طراحی شده‌اند.



شکل ۱- شماتیک هندسه بدنه فشار شامل پوسته استوانه‌ای، حلقه‌های سخت‌کننده داخلی و بسته‌های انتهایی

Fig. 1- Schematic of the pressure hull geometry showing cylindrical shell, internal ring frames, and end closures

این شکل نمای کلی هندسه بدنه فشار را نشان می‌دهد. پوسته استوانه‌ای با شعاع ۱۰۰۰ میلی‌متر و طول ۸۸۰۰ میلی‌متر، حلقه‌های سخت‌کننده T شکل با فاصله ۱۰۲۰ میلی‌متر و بسته‌های انتهایی نیم‌کروی با بخش‌های انتقال نیم‌رخ‌دار در این شکل مشاهده می‌شوند. این هندسه طراحی پایه در نظر گرفته شده است. آرایش دقیق حلقه‌های سخت‌کننده T شکل داخلی در شکل (۲) نشان داده شده است. هر سخت‌کننده از دو بخش جان<sup>۲۴</sup> و بال<sup>۲۵</sup> تشکیل شده است. ابعاد هندسی این سخت‌کننده‌ها شامل ارتفاع جان، ضخامت جان، عرض بال و ضخامت بال است که متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲- آرایش دقیق حلقه‌های سخت‌کننده T شکل داخلی

Fig. 2-Detailed arrangement of the internal T-shaped stiffening rings

### ۲-۳ مدل اجزای محدود و اعتبارسنجی

مدل اجزای محدود با استفاده از المان‌های پوسته‌ای S4R (المان پوسته ۴ گره‌ای با کاهش انتگرال‌گیری و کنترل ساعت شنی) در نرم‌افزار Abaqus توسعه داده شد. ورودی‌های مدل شامل هندسه (با استفاده از المان‌های S4R)، خواص مواد الاستیک-پلاستیک (جدول ۳)، شرایط مرزی (گیرداری ساده در دو انتها) و بارگذاری فشار هیدرواستاتیک یکنواخت است. خروجی‌های اصلی شامل توزیع تنش فون میزس، تغییر شکل‌ها، بار کمناش خطی (از تحلیل ویژه مقدار) و فشار فروپاشی نهایی (از تحلیل ریکس) هستند. مطالعه همگرایی مش نشان داد که اندازه المان ۵۰ میلی‌متر با حدود ۸۵،۰۰۰ المان برای دستیابی به دقت مناسب، کافی است. اعتبارسنجی مدل با مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با روابط تحلیلی آیین‌نامه‌ای (DNV) و نتایج تجربی گزارش شده در پیشینه (Singer et al., 2002) انجام شد. حداکثر اختلاف مشاهده شده کمتر از ۵٪ بود که دقت مدل را تأیید می‌کند. نتایج اعتبارسنجی مدل پایه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- خلاصه اعتبارسنجی سازه‌ای برای طراحی پایه

Table 3- Structural validation summary for the baseline pressure hull design

| مؤلفه                 | حداکثر تنش فون میزس<br>(مگاپاسکال) | تنش تسلیم<br>(مگاپاسکال) | میزان<br>بهره‌برداری (%) | ضریب ایمنی<br>کمانش | الزام |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------|
| پوسته استوانه‌ای      | ۱۵۰/۰                              | ۲۶۰                      | ۵۷/۷                     | ۲/۵۳                | > ۵/۱ |
| حلقه‌های<br>سخت‌کننده | ۲۰۳/۴                              | ۲۶۰                      | ۷۸/۲                     | ۳/۷۵                | > ۵/۱ |
| بخش‌های انتقال        | ۲۱۰/۶                              | ۲۶۰                      | ۸۱/۰                     | ۲/۷۰                | > ۵/۱ |

## تفسیر ستون‌های جدول ۳

- حداکثر تنش فون‌میزس: بیشینه تنش معادل در هر مؤلفه تحت بار طراحی؛
- تنش تسلیم: مقاومت تسلیم ماده (۲۶۰ مگاپاسکال)؛
- میزان بهره‌برداری: نسبت حداکثر تنش به تنش تسلیم (نشان‌دهنده نزدیکی به تسلیم)؛
- ضریب ایمنی کمانش: نسبت بار کمانش بحرانی به بار طراحی؛
- الزام آیین‌نامه: حداقل ضریب ایمنی مورد نیاز براساس استاندارد DNV (2021).

## ۳-۳. مشخصه‌سازی عدم قطعیت‌ها

دو دسته اصلی عدم قطعیت در این پژوهش مدل‌سازی شده است:

- (الف) **عدم قطعیت ماده:** مقاومت تسلیم ( $\sigma_y$ ) به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال با میانگین ۲۶۰ مگاپاسکال و ضریب تغییرات ۲/۷ درصد مدل‌سازی شد (Pambudi et al., 2024).
- (ب) **نقص‌های هندسی:** دو نوع نقص هندسی در نظر گرفته شد: (۱) تغییرات ضخامت پوسته با توزیع نرمال و ضریب تغییرات ۳ درصد و (۲) خارج از مدور بودن سراسری با توزیع گامبل (Singer et al., 2002).
- مدل‌های احتمالاتی در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصادفی، در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. مقاومت تسلیم با توزیع نرمال و ضریب تغییرات ۲/۷ درصد، ضخامت پوسته با توزیع نرمال و ضریب تغییرات ۳ درصد و خارج از مدور بودن با توزیع گامبل و ضریب تغییرات ۴۰ درصد مدل‌سازی شده‌اند. این عدم قطعیت‌ها در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ شده‌اند.

جدول ۴- مدل‌های احتمالاتی برای متغیرهای تصادفی

Table 4. Probabilistic models for random variables in reliability analysis

| متغیر تصادفی      | نماد       | توزیع | میانگین       | ضریب تغییرات |
|-------------------|------------|-------|---------------|--------------|
| مقاومت تسلیم      | $\sigma_y$ | نرمال | مگاپاسکال ۲۶۰ | ۲/۷٪         |
| ضخامت پوسته       | t          | نرمال | مقدار طراحی   | ۳/۰٪         |
| خارج از مدور بودن | $\delta_0$ | گامبل | میلی‌متر ۵/۰  | ۴۰٪          |

## ۴-۳. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

متغیرهای تصمیم:  $d=[t, L, h_w, t_w, b_f, t_f]$  تابع هدف: کمینه‌سازی  $W(d)=p \cdot V(d)$  قیود  $P_{(f,i)}(d) \leq P$   
 $d^L=[5, 300, 50, 4, 30, 4] \text{ mm}$ ,  $d^U=[15, 1200, \text{کرانه‌ها}, \text{تسلیم}, \text{کمانش}, \text{فروپاشی}]$ ,  $p_{(f,target)}=0.00023$ ,  $i=1,2,3$   
 $120, 15, 120, 15] \text{ mm}$  :

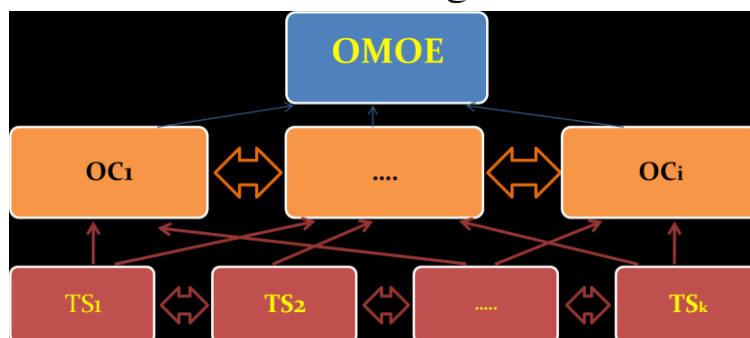
عدم قطعیت‌ها:  $\sigma_y \sim N(260, 7.02) \text{ MPa}$ ,  $t \sim N(t_{\text{design}}, 0.03t_{\text{design}})$ ,  $\delta_0 \sim \text{Gumbel}(0.5, 0.2)$

الگوریتم ژنتیک با کدگذاری حقیقی با پارامترهای اندازه جمعیت ۵۰، تعداد نسل‌ها ۱۰۰، احتمال ترکیب ۰/۸، احتمال جهش ۰/۰۵ و انتخاب مسابقه‌ای با اندازه ۲ پیاده‌سازی شد. تابع برازندگی نیز با استفاده از روش جریمه به صورت رابطه (۸) تعریف شد که در آن  $\lambda_i$  ضرایب جریمه برای هر حالت خرابی‌اند.

$$\text{Fitness}(\mathbf{d}) = W(\mathbf{d}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \max(0, P_{f,i}(\mathbf{d}) - P_{f,target}) \quad (8)$$

## ۳-۵ محاسبه OMOE با استفاده از AHP

ساختار سلسله‌مراتبی استفاده‌شده برای محاسبه معیار کلی اثربخشی (OMOEO) در شکل (۳) نمایش داده شده است. این ساختار شامل سه سطح اصلی است: سطح اول (هدف نهایی)، سطح دوم (شش قابلیت عملیاتی شامل ایمنی، پنهان‌کاری، مانورپذیری، پایداری، قابلیت رهبری رزمی و قابلیت جنگ‌افزاری) و سطح سوم (مشخصات فنی مرتبط با هر قابلیت). این ساختار، وزن‌دهی و تجمیع معیارها را با استفاده از فرآیند AHP امکان‌پذیر می‌کند.

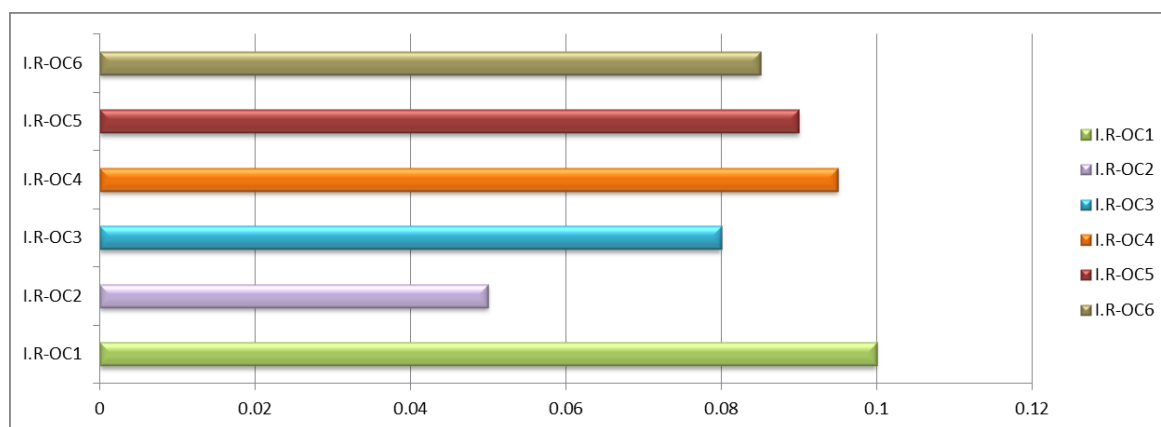


شکل ۳- ساختار طراحی سلسله‌مراتبی برای محاسبه OMOEO

Fig. 3- Hierarchical design structure for Overall Measure of Effectiveness (OMOEO) calculation

**توضیح:** این شکل، ساختار سلسله‌مراتبی AHP را برای محاسبه OMOEO نشان می‌دهد. سطح اول شامل هدف نهایی (بیشینه‌سازی OMOEO)، سطح دوم شامل شش قابلیت عملیاتی (OC<sub>1</sub> تا OC<sub>6</sub>) شامل ایمنی، پنهان‌کاری، مانورپذیری، پایداری، قابلیت رهبری رزمی و جنگ‌افزاری است و سطح سوم شامل مشخصات فنی (TS) مرتبط با هر قابلیت است و گزینه‌های نهایی شامل پنج مدل بهینه (M1 تا M5) هستند. نکته مهم اینکه در این ساختار، فلش‌ها تنها از بالا به پایین‌اند و ارتباطی بین مؤلفه‌های یک سطح وجود ندارد (که از اصول AHP پیروی می‌کند، نه از ANP).

وزن‌دهی معیارها با استفاده از مقایسات زوجی و مقیاس ۹ درجه‌ای انجام شد. برای هر قابلیت عملیاتی، یک ماتریس مقایسه زوجی جداگانه برای مشخصات فنی مرتبط با آن تشکیل شد و وزن‌های W<sub>1\_jz</sub> به‌طور مجزا محاسبه شدند. نسبت ناسازگاری (IR) محاسبه‌شده برای تمامی ماتریس‌ها (شامل ماتریس قابلیت‌های عملیاتی و ماتریس‌های مشخصات فنی هر قابلیت) در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- نسبت ناسازگاری (IR) محاسبه‌شده برای ماتریس‌های مقایسه

Fig. 4-Inconsistency Ratio (IR) calculated for comparison matrices

این نسبت برای تمامی ماتریس‌های کمتر از ۰٫۱ مقدار عملکرد ( $VOP^{۲۶}$ ) برای هر مشخصات فنی با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد.

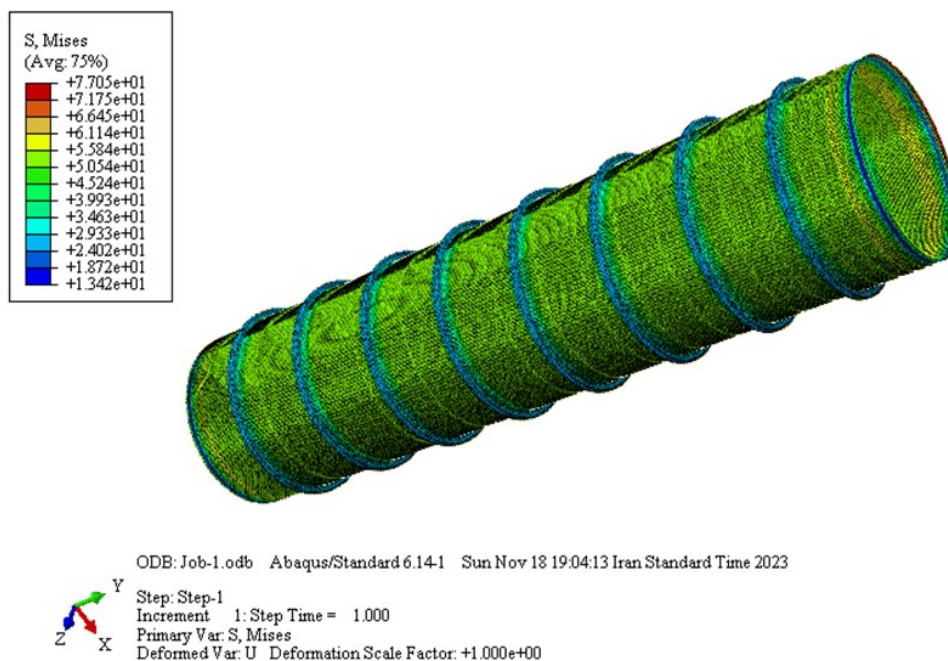
$$VOP = \frac{X - L_1}{L_2 - L_1} \quad (۹)$$

در این رابطه،  $X$  مقدار فعلی،  $L_1$  مقدار آستانه (حداقل) و  $L_2$  مقدار هدف (حداکثر) است.

#### ۴- مطالعه کاربردی و یافته‌ها

##### ۴-۱ مطالعه کاربردی

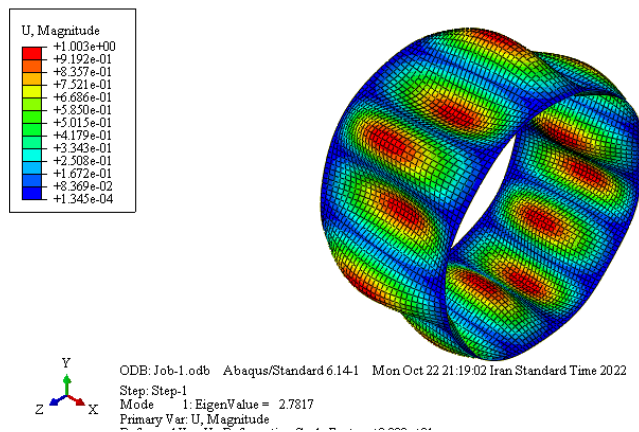
مطالعه کاربردی این پژوهش بر طراحی بدنه فشار یک زیردریایی با مشخصات هندسی ارائه شده در بخش ۳-۱ انجام شده است. بدنه مدنظر برای عملیات در اعماق بیش از ۵۰۰ متر طراحی و از فولاد A516 Grade 70 ساخته می‌شود. برای ارزیابی رفتار سازه تحت بار طراحی، توزیع تنش فونمیزس در بدنه فشار در فشار ۱٫۸ مگاپاسکال در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- توزیع تنش فونمیزس (مگاپاسکال) در بدنه فشار در فشار ۱٫۸ مگاپاسکال

Fig. 5-Von Mises stress (MPa) distribution in the pressure hull at a pressure of 1.8 MPa

برای اعمال نقص‌های هندسی در تحلیل غیرخطی پس کمانش، از اولین حالت مد کمانش خطی (مد ویژه) استفاده شده است که در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل ۶- اولین حالت مد کمانش خطی (مد ویژه) برای اعمال نقص‌های هندسی

Fig. 6- First linear buckling mode shape (eigenmode) used for geometric imperfections

#### ۲-۴. نتایج بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک به یک خانواده از طرح‌های بهینه پارتو همگرا شد. عملکرد پنج مدل بهینه‌سازی شده (M1 تا M5) با طراحی پایه در جدول ۵ مقایسه شده است.

جدول ۵- عملکرد طرح‌های پایه و بهینه‌شده

Table 5- Performance comparison of baseline and optimized pressure hull designs

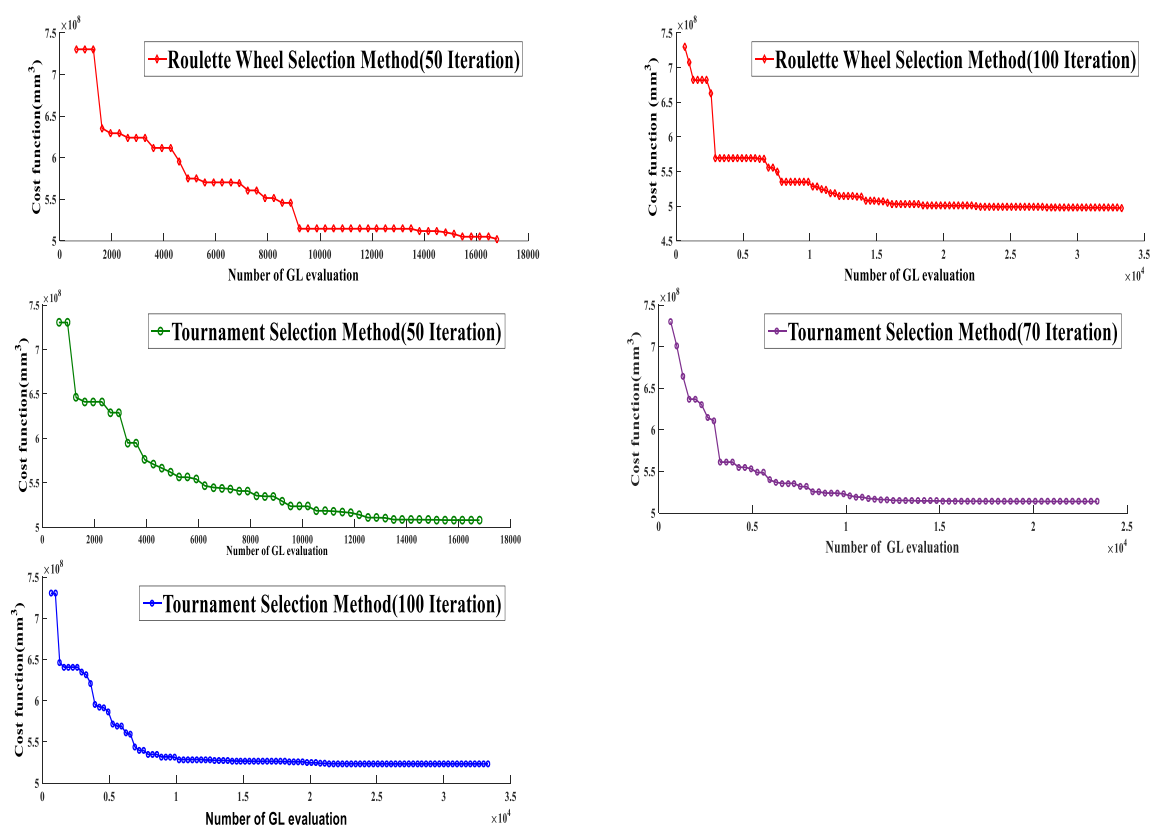
| مدل  | وزن کل (تن) | کاهش وزن (%) | ضخامت پوسته (میلی‌متر) | فاصله سخت‌کننده‌ها (میلی‌متر) | شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) |
|------|-------------|--------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| پایه | ۵۱/۰        | -            | ۱۱/۰۰                  | ۱۰۲۰                          | $> ۰/۴$                         |
| M1   | ۴۰/۳        | ۲۱/۰         | ۶/۸۹                   | ۳۶۷/۸                         | ۳/۵۲                            |
| M2   | ۳۹/۱        | ۲۳/۴         | ۶/۷۵                   | ۳۵۲/۴                         | ۳/۵۰                            |
| M3   | ۳۹/۸        | ۲۲/۰         | ۷/۰۳                   | ۳۸۷/۱                         | ۳/۵۵                            |
| M4   | ۴۰/۳        | ۲۱/۰         | ۷/۰۶                   | ۳۸۸/۲                         | ۳/۶۰                            |
| M5   | ۳۹/۱        | ۲۳/۴         | ۷/۴۹                   | ۴۴۲/۵                         | ۳/۱۰                            |

مدل M2 با کاهش وزن ۲۳٫۴ درصد و شاخص قابلیت اطمینان ۳٫۵۰، به‌عنوان طراحی متوازن بهینه انتخاب شد. ملاک انتخاب M2، برآورده‌سازی هم‌زمان قید قابلیت اطمینان ( $\beta \geq 3.5$ ) و بیشینه‌سازی کاهش وزن در میان مدل‌های دارای  $\beta \geq 3.5$  بوده است. مشخصات هندسی دقیق مدل M2 در جدول ۶ ارائه شده است. برای ارزیابی روند بهبود تابع برازندگی در طول فرآیند بهینه‌سازی، تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل (۷) نمایش داده شده است.

جدول ۶- مشخصات هندسی دقیق مدل بهینه (M2)

Table 6-tailed geometric specifications of the optimal model (M2) compared to baseline design

| پارامتر            | نماد | پایه  | (بهینه) M2 | (%) تغییر |
|--------------------|------|-------|------------|-----------|
| ضخامت پوسته        | t    | ۱۱/۰۰ | ۶/۷۵       | -۳۸/۶     |
| فاصله سخت‌کننده‌ها | L    | ۱۰۲۰  | ۳۵۲/۴      | -۶۵/۵     |
| ارتفاع جان         | h_w  | ۸۰/۰  | ۷۷/۳       | -۳/۴      |
| ضخامت جان          | t_w  | ۱۱/۰  | ۳/۸۹       | -۶۴/۶     |
| عرض بال            | b_f  | ۸۰/۰  | ۲۵/۶       | -۶۸/۰     |
| ضخامت بال          | t_f  | ۱۱/۰  | ۸/۵۶       | -۲۲/۲     |



شکل ۷- تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک

Fig. 7- Genetic algorithm convergence history

## ۳-۴. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان

نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰,۰۰۰ نمونه در جدول (۷) ارائه شده است. شاخص قابلیت اطمینان  $\beta$  با استفاده از رابطه  $\beta = -\Phi^{-1}(Pf)$  محاسبه شده است که در آن  $\Phi^{-1}$  تابع توزیع نرمال استاندارد معکوس است. مقدار  $Pf$  نیز از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰,۰۰۰ نمونه تخمین زده شده است. هدف  $\beta \geq 3.5$  معادل  $P \leq 2.3 \times 10^{-4}$  است که سطح ایمنی رایج برای سازه‌های دریایی محسوب می‌شود (Moan, 2005).

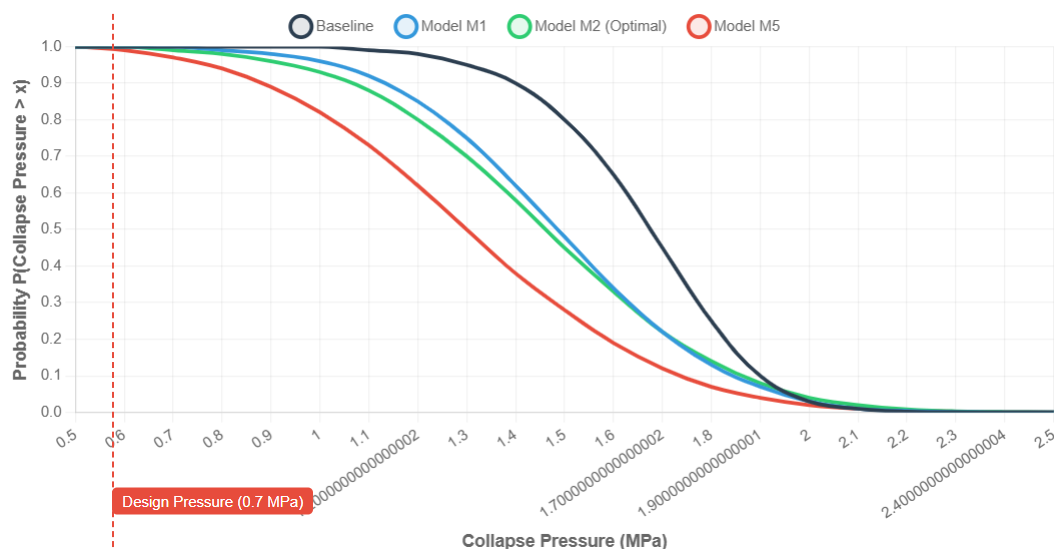
جدول ۷- نتایج تحلیل قابلیت اطمینان

Table 7- Reliability analysis results for baseline and optimized designs

| مدل  | شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) | احتمال خرابی ( $Pf$ ) | برآورده‌سازی هدف ( $\beta \geq 3/5$ ) |
|------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| پایه | ۴/۱۰                            | $۱۰^{-۶} \times ۹/۲$  | بله                                   |
| M1   | ۳/۵۲                            | $۱۰^{-۴} \times ۲/۱$  | بله                                   |
| M2   | ۳/۵۰                            | $۱۰^{-۳} \times ۶/۶$  | بله                                   |
| M3   | ۳/۵۵                            | $۱۰^{-۴} \times ۱/۹$  | بله                                   |
| M4   | ۳/۶۰                            | $۱۰^{-۴} \times ۱/۶$  | بله                                   |
| M5   | ۳/۱۰                            | $۱۰^{-۳} \times ۹/۵$  | خیر                                   |

تابع توزیع تجمعی مکمل ( $CCDF^{TV}$ ) فشار فروپاشی برای طرح‌های پایه و بهینه‌سازی‌شده در شکل (۸) نشان داده شده است. خط عمودی نشان‌دهنده فشار طراحی (۰/۷ مگاپاسکال) است. محور افقی فشار فروپاشی

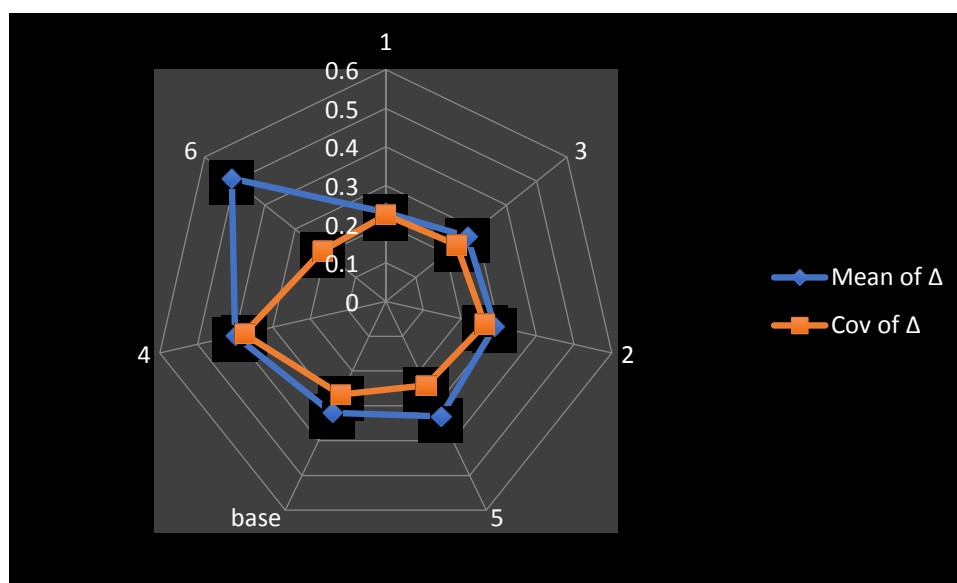
(مگاپاسکال) و محور عمودی، احتمال تجاوز را از آن فشار نشان می‌دهد. منحنی هر مدل نشان‌دهنده توزیع احتمال فشار فروپاشی آن مدل است.



شکل ۸- تابع توزیع تجمعی مکمل (CCDF) فشار فروپاشی برای طرح‌های مختلف

Fig.8- Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) of collapse pressure for different designs

تابع توزیع تجمعی مکمل (CCDF)، که تابع بقا نیز شناخته می‌شود، احتمال بیشتر بودن فشار فروپاشی ( $R$ ) از یک مقدار مشخص ( $r$ ) را نشان می‌دهد.  $P(R>r)=1-F_R(r)$ : خط عمودی نشان‌دهنده فشار طراحی (۱٫۸ مگاپاسکال) است.



شکل ۹- میانگین  $\Delta$  و ضریب تغییرات  $\Delta$

Fig. 9- Mean of  $\Delta$  and coefficient of variation of  $\Delta$  for different models

متغیر  $\Delta$  حاشیه ایمنی نرمال شده تعریف می‌شود:  $\Delta=(R-S)/S$  که در آن  $R$  فشار فروپاشی و  $S$  فشار طراحی (۱٫۸ مگاپاسکال) است. میانگین  $\Delta$  نشان‌دهنده میانگین حاشیه ایمنی نسبی و ضریب تغییرات  $\Delta$  نشان‌دهنده پراکندگی آن است. برای مقایسه جامع مدل‌ها از نظر حاشیه ایمنی و احتمال خرابی، رتبه‌بندی آنها براساس معیارهای میانگین  $\Delta$ ، ضریب تغییرات  $\Delta$  و احتمال خرابی در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- رتبه‌بندی مدل‌ها براساس معیارهای مختلف

Table 8- Ranking of models based on probability of failure

| رتبه | مدل  | $\Delta$ میانگین | $\Delta$ ضریب تغییرات | Pf     |
|------|------|------------------|-----------------------|--------|
| ۱    | M1   | ۰/۲۳             | ۰/۲۲۴                 | ۰/۰۰۰۱ |
| ۲    | M3   | ۰/۲۷             | ۰/۲۳۵                 | ۰/۰۰۳۲ |
| ۳    | M2   | ۰/۲۹             | ۰/۲۶۳                 | ۰/۰۰۶۶ |
| ۴    | M5   | ۰/۳۳             | ۰/۲۴۱                 | ۰/۰۱۷۲ |
| ۵    | پایه | ۰/۳۲             | ۰/۲۶۸                 | ۰/۰۲۴۷ |
| ۶    | M4   | ۰/۴۰             | ۰/۳۷۶                 | ۰/۱۲۳۰ |

## ۴-۴ تحلیل حساسیت

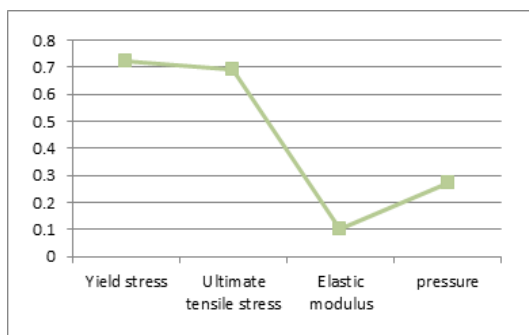
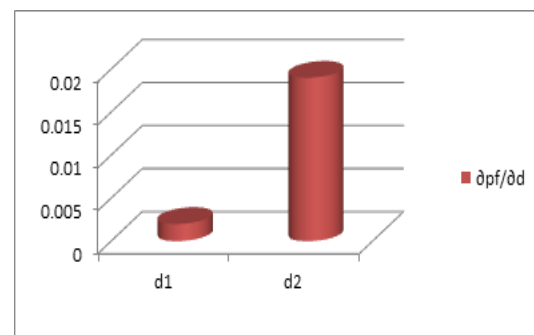
تحلیل حساسیت برای شناسایی تأثیرگذارترین پارامترها بر قابلیت اطمینان سازه‌ای انجام شد. سه بردار اهمیت  $\alpha$ ،  $\delta$  و  $\eta$  محاسبه شدند که به ترتیب تأثیر متغیرهای تصادفی، تأثیر تغییرات میانگین و انحراف معیار را نشان می‌دهند. بردار  $\alpha$  نشان می‌دهد که مقاومت تسلیم، تأثیرگذارترین عامل مقاومت ( $|\alpha|=0.72$ ) است؛ در حالی که فشار اثر بار اولیه است ( $\alpha=+0.27$ ). بردار  $\delta$  نشان می‌دهد که تقریباً ۷۳٪ از واریانس  $P_f$  با تغییرات میانگین فشار توضیح داده می‌شود. بردار  $\eta$  نشان می‌دهد که تغییرپذیری مقاومت تسلیم، حیاتی‌ترین عامل است ( $|\eta|=0.78$ ).

• **بردار  $\alpha$ :** مقاومت تسلیم، تأثیرگذارترین عامل مقاومت ( $|\alpha|=0.72$ ) است؛ در حالی که فشار اثر بار اولیه است ( $\alpha=+0.27$ )

• **بردار  $\delta$  (اثر میانگین):** تقریباً ۷۳٪ از واریانس  $P_f$  با تغییرات میانگین فشار توضیح داده می‌شود؛

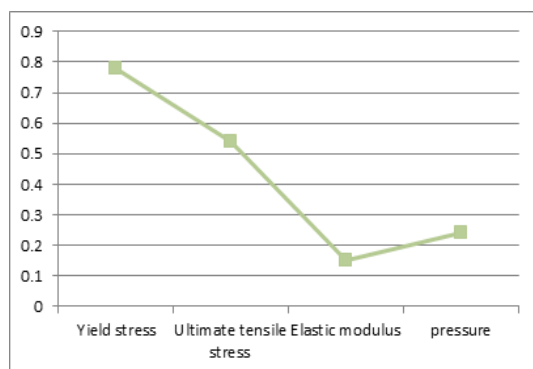
• **بردار  $\eta$  (اثر انحراف معیار):** تغییرپذیری مقاومت تسلیم حیاتی‌ترین عامل است ( $|\eta|=0.78$ ).

نتایج تحلیل حساسیت در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ ارائه شده است. شکل ۱۰ تحلیل حساسیت شش متغیر تصمیم را نسبت به قابلیت اطمینان سازه نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ به ترتیب بردارهای اهمیت  $\alpha$ ،  $\delta$ ،  $\eta$  و ترکیب آنها را نمایش می‌دهند. این بردارها به ترتیب تأثیر متغیرهای تصادفی، تأثیر تغییرات میانگین و انحراف معیار را بر احتمال خرابی نشان می‌دهند.

شکل ۱۱ - بردار اهمیت  $\alpha$  (آلفا)Fig. 11- Importance vector  $\alpha$  (alpha)

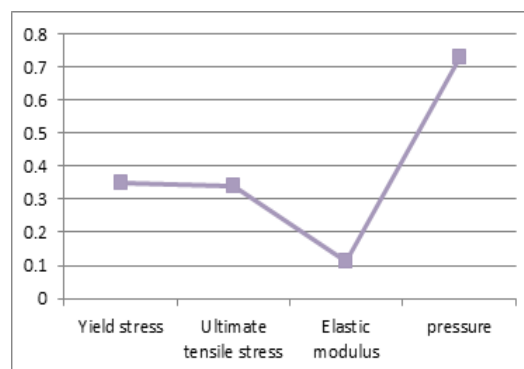
شکل ۱۰ - تحلیل حساسیت متغیرهای تصمیم

Fig. 10- Sensitivity analysis of decision variables on structural reliability



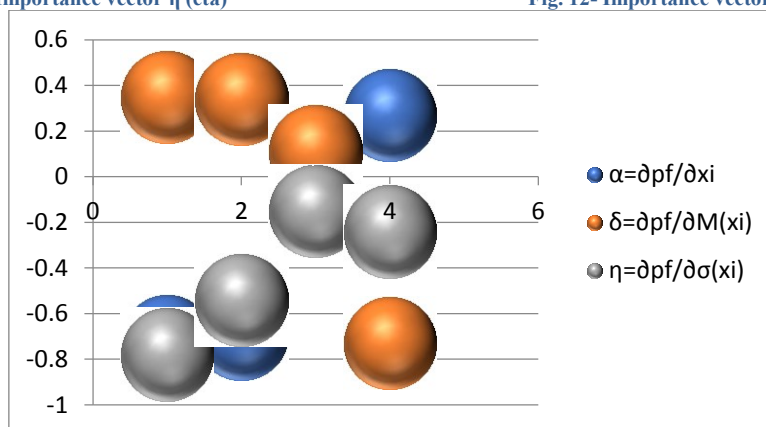
شکل ۱۳- بردار اهمیت  $\eta$  (تا)

Fig. 13- Importance vector  $\eta$  (eta)



شکل ۱۲- بردار اهمیت  $\delta$  (دلتا)

Fig. 12- Importance vector  $\delta$  (delta)



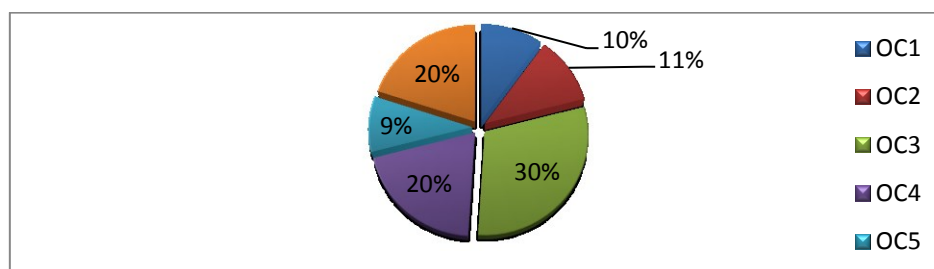
شکل ۱۴- بردارهای اهمیت  $\alpha$ ،  $\delta$ ،  $\eta$

Fig. 14- Combined importance vectors  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\eta$

نتایج نشان داد که مقاومت تسلیم با سهم ۷۰ درصد، تأثیرگذارترین عامل در تعیین قابلیت اطمینان سازه است. همچنین فاصله سخت‌کننده‌ها (L) بیشترین تأثیر را در کاهش وزن دارد.

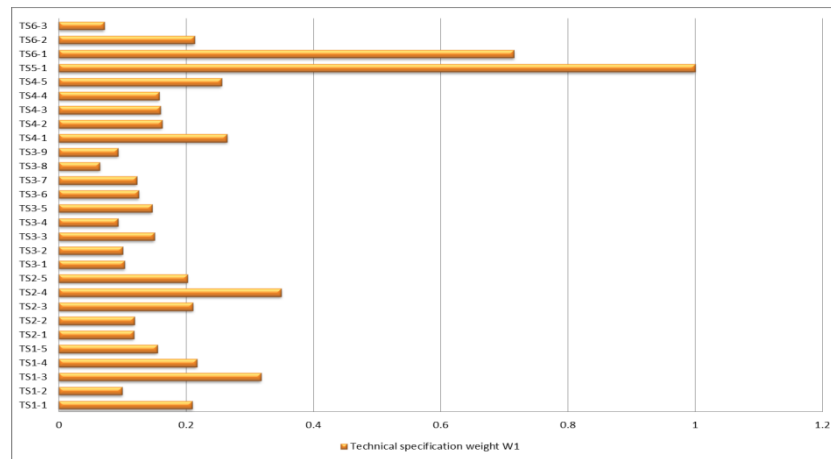
#### ۴-۵ نتایج OMOE

امتیازهای OMOE محاسبه شده برای طرح‌های مختلف در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ ارائه شده است. وزن‌های محاسبه شده برای قابلیت‌های عملیاتی (شش قابلیت) در شکل ۱۵ و وزن‌های مشخصات فنی مرتبط با هر قابلیت، در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. این وزن‌ها از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با استفاده از مقایسه‌های زوجی خبرگان به دست آمده‌اند. مدل‌های محاسبه شده برای VOP (مقدار عملکرد) در شکل ۱۷،  $MOP^{28}$  (معیار عملکرد)، در شکل ۱۸ و OMOE نهایی (معیار کلی اثربخشی) و در شکل ۱۹ ارائه شده است. این مدل‌ها به ترتیب سطوح مختلف سلسله‌مراتب OMOE را نشان می‌دهند.



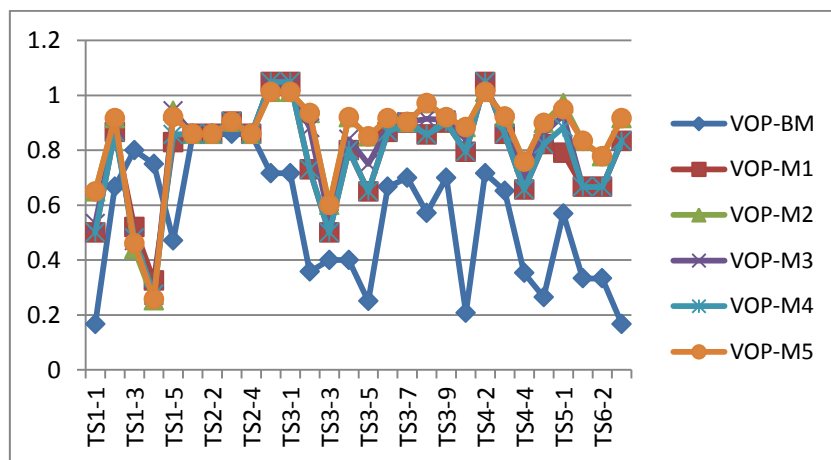
شکل ۱۵- وزن قابلیت‌های عملیاتی (w)

Fig. 15- Operational capability weights (w) derived from AHP process



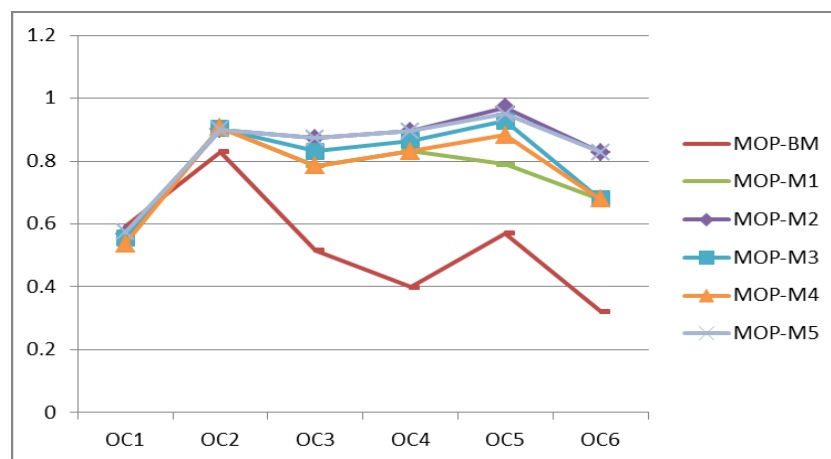
شکل ۱۶- وزن مشخصات فنی (W1)

Fig. 16- Technical specification weights (W1) derived from AHP process



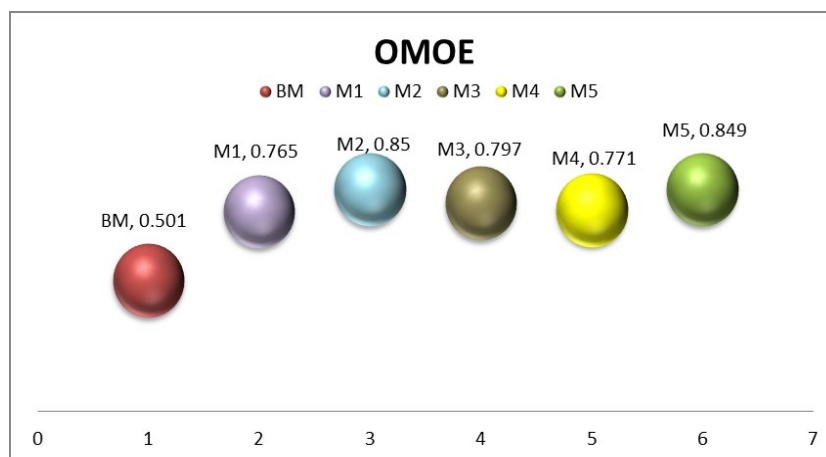
شکل ۱۷- مدل‌های VOP

Fig. 17- Value of Performance (VOP) models for technical specifications



شکل ۱۸- مدل‌های MOP

Fig. 18- Measure of Performance (MOP) models for operational capabilities



شکل ۱۹- مدل‌های OMOEO

Fig. 19- Overall Measure of Effectiveness (OMOEO) models for different designs

مدل M2 با امتیاز ۰/۸۵ بالاترین امتیاز OMOEO را کسب کرد و به‌عنوان طراحی متوازن بهینه، تأیید شد. طراحی پایه با امتیاز ۰/۶۷ و مدل M5 با امتیاز ۰/۶۲، در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

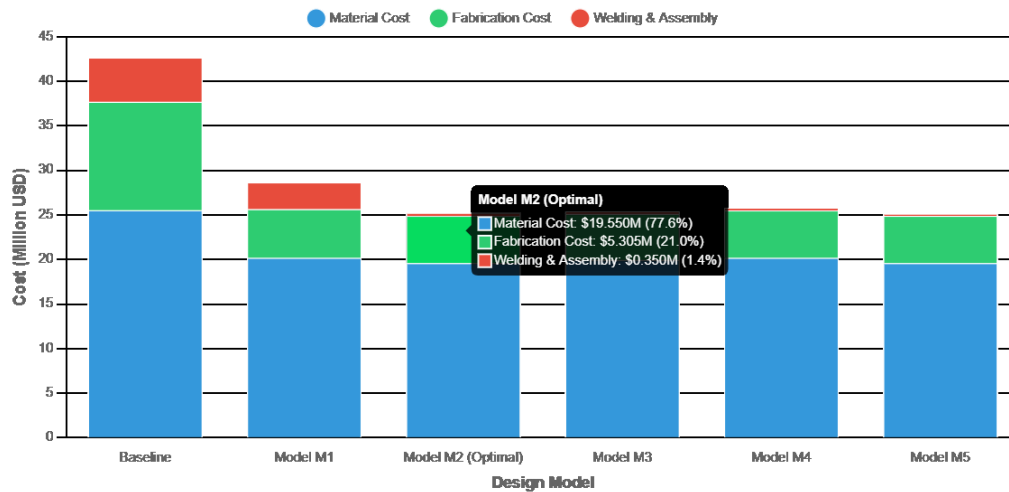
#### ۴-۶ نتایج هزینه چرخه عمر (LCC۲۹)

تفکیک هزینه چرخه عمر برای شش مدل در جدول ۹ ارائه شده است. این جدول شامل پنج ستون اصلی است: هزینه مواد، ساخت، جوشکاری، هزینه کل و درصد هزینه نسبت به طراحی پایه. مقادیر هزینه برحسب هزاران دلار آمریکا گزارش شده‌اند. هزینه چرخه عمر با استفاده از مدل هزینه‌یابی مبتنی بر فعالیت، شامل سه مؤلفه هزینه مواد، ساخت و جوشکاری محاسبه شد. نمودار میله‌ای انباشته مؤلفه‌های هزینه چرخه عمر (شامل هزینه مواد، ساخت و جوشکاری) برای شش مدل (پایه و M1 تا M5) در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. هر ستون نشان‌دهنده هزینه کل یک مدل است و بخش‌های رنگی مختلف، نشان‌دهنده سهم هر مؤلفه هزینه‌اند.

جدول ۹- تفکیک هزینه چرخه عمر (هزاران دلار)

Table 9- Life-Cycle Cost (LCC) breakdown for baseline and optimized designs (thousands of USD)

| مدل  | هزینه مواد | هزینه ساخت | هزینه جوشکاری | هزینه کل | هزینه نسبت به پایه (%) |
|------|------------|------------|---------------|----------|------------------------|
| پایه | ۲۵/۵۰۰     | ۱۲/۱۶۰     | ۴/۹۸۰         | ۴۲/۶۴۰   | ۱۰۰/۰                  |
| M1   | ۲۰/۱۵۰     | ۵/۴۶۳      | ۳/۰۰۰         | ۲۸/۶۱۳   | ۶۷/۱                   |
| M2   | ۱۹/۵۵۰     | ۵/۳۰۵      | ۳۵۰           | ۲۵/۲۰۵   | ۵۹/۱                   |
| M3   | ۱۹/۹۰۰     | ۵/۱۷۶      | ۳۰۰           | ۲۵/۳۷۶   | ۵۹/۵                   |
| M4   | ۲۰/۱۵۰     | ۵/۳۲۵      | ۳۰۰           | ۲۵/۷۷۵   | ۶۰/۴                   |
| M5   | ۱۹/۵۵۰     | ۵/۳۱۰      | ۲۵۰           | ۲۵/۱۱۰   | ۵۸/۹                   |



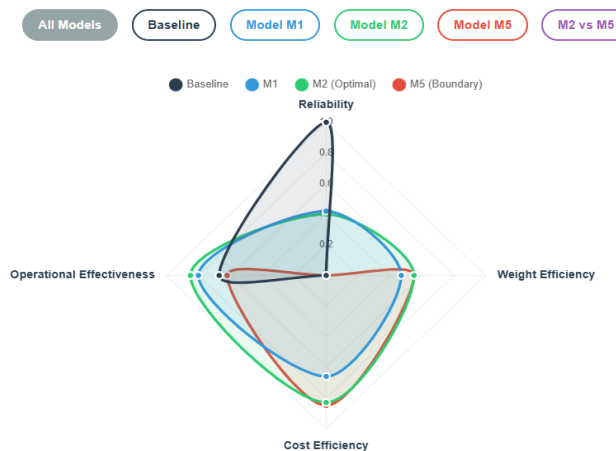
شکل ۲۰- نمودار میله‌ای انباشته مؤلفه‌های هزینه چرخه عمر

Fig. 20- Stacked bar chart of Life-Cycle Cost (LCC) components

مدل M2 با هزینه ۲۵/۲۰۵ میلیون دلار، کاهش ۴۰/۹ درصدی هزینه را نسبت به طرح پایه نشان می‌دهد.

## ۵- بحث

نتایج به دست آمده از این پژوهش، نشان‌دهنده کارایی بالای چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره احتمالاتی در طراحی بدنه فشار زیردریایی است. در این بخش، یافته‌های کلیدی تفسیر و با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه می‌شود. شکل ۲۱ نمودار رادار مقایسه متغیرهای طراحی نرمال‌شده مدل‌های بهینه را نسبت به پایه نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- نمودار رادار مقایسه متغیرهای طراحی نرمال‌شده مدل‌های بهینه نسبت به پایه

Fig. 21- Radar chart comparing normalized design variables of optimized models relative to baseline

کاهش وزن درخور توجه با حفظ ایمنی: کاهش وزن ۲۳/۴ درصدی (از ۵۱/۰ به ۳۹/۱ تن) با حفظ شاخص قابلیت اطمینان ۳/۵۰، نشان‌دهنده توانایی رویکرد RBDO در کاهش محافظه‌کاری‌های غیرضروری است. این یافته با نتایج باردواج و همکاران<sup>۳۰</sup> (۲۰۲۳)، که به کاهش وزن ۲۰ درصدی در سازه‌های دریایی دست یافتند، همسو است و از آن فراتر می‌رود. همچنین با یافته‌های چو و همکاران<sup>۳۱</sup> (۲۰۰۴) درباره بهینه‌سازی استوانه‌های حلقه‌سخت‌شده مطابقت دارد.

**تسلط عدم قطعیت مقاومت تسلیم:** تحلیل حساسیت نشان داد که مقاومت تسلیم با سهم ۷۰ درصد، عامل غالب در تعیین قابلیت اطمینان است، به‌ویژه بردار  $\eta$  نشان داد که تغییرپذیری مقاومت تسلیم ( $|\eta|=0.78$ )، پ‌بیشترین تأثیر را بر احتمال خرابی دارد؛ به این معنا که کاهش انحراف معیار مقاومت تسلیم از طریق کنترل کیفیت بهتر، مؤثرترین راهکار برای افزایش قابلیت اطمینان است. این یافته با نتایج پامبودی و همکاران<sup>۳۲</sup> (۲۰۲۴) همخوانی دارد که بر اهمیت کنترل کیفیت مواد تأکید داشتند. همچنین پائیک و همکاران<sup>۳۳</sup> (۲۰۱۸)، به تأثیر درخور توجه تغییرپذیری خواص مواد بر مقاومت نهایی سازه‌های دریایی اشاره کرده‌اند. این نتیجه، اولویت‌بندی کنترل کیفیت و گواهی مواد را مؤثرترین ابزار برای افزایش قابلیت اطمینان سازه‌های معرفی و آن را تأیید می‌کند.

**اهمیت نقص‌های هندسی:** مدل‌سازی نقص‌های هندسی (خارج از مدوربودن)، دومین منبع عدم قطعیت با سهم حدود ۲۰ درصد است که ضرورت در نظر گرفتن تلورانس‌های ساخت را در ارزیابی‌های پیشرفته قابلیت اطمینان تأیید می‌کند. این یافته با تأکید سینگر و همکاران<sup>۳۴</sup> (۲۰۰۲) و تنگ و روتر<sup>۳۵</sup> (۲۰۰۴)، بر نقش نقص‌های هندسی در کماتش پوسته‌های جدار نازک همسو است.

**مصالحه هزینه-قابلیت اطمینان:** مدل M5 با وجود کمترین هزینه (۲۵۰۱۱۰ هزار دلار)، قابلیت اطمینان هدف ( $\beta \geq 3.5$ ) را برآورده نمی‌کند. در مقابل، مدل M2 با هزینه‌ای تنها ۰٫۴ درصد بیشتر (۲۵۰۲۰۵ هزار دلار)، قابلیت اطمینان هدف را تأمین می‌کند. این یافته نشان می‌دهد که دستاوردهای درخور توجه در ایمنی، با هزینه اضافی ناچیز در فضای طراحی بهینه به دست می‌آید و  $\beta=3.10$  برای M5 در مقابل  $\beta=3.50$  برای M2، با وجود تنها ۰٫۱ هزار دلار اختلاف هزینه، نشان‌دهنده بازدهی بالای سرمایه‌گذاری در ایمنی است. این نتیجه با یافته‌های موان<sup>۳۶</sup> (۲۰۰۵) درباره مدیریت مبتنی بر قابلیت اطمینان سازه‌های دریایی همخوانی دارد.

**اثر بخشی عملیاتی:** امتیاز OMOE برابر با ۰٫۸۵ برای مدل M2 نشان می‌دهد که این طراحی علاوه بر مزایای فنی و اقتصادی، از نظر عملیاتی نیز عملکرد مطلوبی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده شد، M2 در هر شش قابلیت عملیاتی (ایمنی، پنهان‌کاری، مانورپذیری، پایدار، قابلیت رهبری رزمی و قابلیت جنگ‌افزاری) عملکرد متوازی دارد؛ در حالی که مدل M1 با وجود قابلیت اطمینان بالاتر ( $\beta=3.52$ )، در قابلیت‌های مانورپذیری و هزینه، عملکرد ضعیف‌تری دارد. این موضوع اهمیت تلفیق معیارهای عملیاتی را در کنار معیارهای فنی نشان می‌دهد و با رویکرد آون و زیو (۲۰۲۵) در تحلیل سیستم‌های ایمنی-حیاتی مطابقت دارد.

**توصیه‌های مدیریتی:** براساس یافته‌های پژوهش، به مدیران پروژه‌های ساخت زیردریایی توصیه می‌شود:

۱. در مراحل اولیه طراحی، از رویکرد RBDO به‌جای روش‌های قطعی محافظه‌کارانه استفاده کنند؛

۲. کنترل کیفیت مواد (به‌ویژه مقاومت تسلیم) را اولویت اصلی در فرآیند تولید در نظر گیرند؛

۳. تلورانس‌های هندسی را در تحلیل‌های قابلیت اطمینان لحاظ کنند؛

۴. از معیار OMOE برای ارزیابی جامع گزینه‌های طراحی استفاده کنند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چارچوب نوینی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر قابلیت اطمینان در طراحی بدنه فشار زیردریایی ارائه شد. این چارچوب با تلفیق روش‌های RBDO، تحلیل اجزای محدود غیرخطی، الگوریتم ژنتیک،

شبیه‌سازی مونت‌کارلو و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان طراحی بهینه را با در نظر گرفتن هم‌زمان وزن، قابلیت اطمینان، هزینه و اثربخشی عملیاتی فراهم می‌کند.

### نتایج عمده پژوهش به شرح زیر است:

۱. چارچوب پیشنهادی موفق به کاهش ۲۳/۴ درصدی وزن سازه (از ۵۱/۰ به ۳۹/۱ تن) با حفظ شاخص قابلیت اطمینان ۳/۵۰ شد که نشان‌دهنده کارایی بالای رویکرد RBDO در کاهش محافظه‌کاری‌های غیرضروری است.
۲. تحلیل حساسیت سراسری نشان داد که مقاومت تسلیم با سهم ۷۰ درصد، عامل غالب در تعیین قابلیت اطمینان سازه است و کنترل کیفیت، مواد را مؤثرترین راهکار افزایش ایمنی معرفی می‌کند. بردار  $\eta$  نشان داد که کاهش انحراف معیار مقاومت تسلیم ( $|\eta|=0.78$ )، بیشترین تأثیر را در کاهش احتمال خرابی دارد.
۳. مدل M2 به‌عنوان طراحی متوازن بهینه با امتیاز OMOE برابر با ۰٫۸۵ شناسایی شد که نشان‌دهنده تعادل مطلوب میان اهداف متضاد کاهش وزن، افزایش ایمنی، کاهش هزینه و حفظ اثربخشی عملیاتی است. مقایسه M2 با M5 نشان داد که دستیابی به قابلیت اطمینان هدف ( $\beta \geq 3.5$ ) تنها با ۰٫۴ درصد هزینه اضافی امکان‌پذیر است.
۴. تحلیل هزینه چرخه عمر نشان داد که مدل M2 با هزینه ۲۵/۲۰۵ میلیون دلار، کاهش ۴۰/۹ درصدی هزینه را نسبت به طرح پایه به‌همراه دارد.

**نوآوری و تمایز پژوهش:** نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق هم‌زمان چهار مؤلفه کلیدی (وزن، قابلیت اطمینان، هزینه، اثربخشی عملیاتی) در یک چارچوب یکپارچه و ارائه ابزاری دقیق و مبتنی بر ریسک برای طراحان سازه‌های دریایی است. همچنین استفاده از مدل جانشین کریجینگ با دقت بالا ( $0.98R^2 >$ ) برای کاهش هزینه محاسباتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو، از دیگر وجوه تمایز این پژوهش محسوب می‌شود.

**محدودیت‌های پژوهش:** (۱) تحلیل جاری فقط فروپاشی استاتیکی را در نظر گرفته و بارهای دینامیکی و خستگی را بررسی نکرده است؛ (۲) مواد بررسی‌شده به فولاد A516 محدود شده و مواد پیشرفته مانند کامپوزیت‌ها بررسی نشده‌اند؛ (۳) مدل‌سازی فرایند ساخت با جزئیات کامل انجام نشده است.

**پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده:** (۱) توسعه چارچوب برای تحلیل خستگی طیفی و بارهای دینامیکی (مانند انفجارهای زیرآبی)؛ (۲) تعمیم روش برای مواد ترکیبی و آلیاژهای پیشرفته؛ (۳) تلفیق دقیق‌تر شبیه‌سازی فرایند ساخت (مانند اعوجاج جوشکاری) در مدل احتمالاتی و (۴) استفاده از مدل‌سازی چند-دقتی و یادگیری فعال برای کاهش بیشتر هزینه محاسباتی.

### References

- Aven, T., & Zio, E. (2025). Foundational issues in risk assessment and risk management. *Risk Analysis*, 45(1), 15–28. <https://doi.org/10.1111/risa.14234>.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- Bhardwaj, U., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C. (2023). Reliability-based structural design of a vertical subsea separator for deep-water applications. *Marine Structures*, 92, 103489. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103489>.
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Prentice Hall.
- Brown, C., Smith, J., Johnson, M., & Williams, R. (2025). Reliability-based optimization of welded joints in marine structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 147(2), 021701. <https://doi.org/10.1115/1.4064512>.

- Chen, N.-Z., & Guedes Soares, C. (2008). Reliability assessment of post-weld heat treatment welding residual stresses model. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(3), 031401. <https://doi.org/10.1115/1.2911888>.
- Cho, S. R., Kim, Y. S., Lee, J. H., & Park, S. H. (2004). Ultimate strength formulation for ring-stiffened cylinders considering interaction between local and global failure modes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(1), 1–10.
- Der Kiureghian, A. (2005). First- and second-order reliability methods. In E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel, & S. Singhal (Eds.), *Engineering design reliability handbook* (pp. 14-1–14-20). CRC Press.
- Elishakoff, I. (2000). *Probabilistic methods in the theory of structures: Strength, stability, and vibration*. World Scientific.
- Fishman, G. S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications*. Springer.
- Gaspar, B., & Guedes Soares, C. (2013). Hull girder reliability using a Monte Carlo based simulation method. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 31, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2012.10.002>.
- Haldar, A., & Mahadevan, S. (2024). *Reliability assessment using stochastic finite element analysis* (2nd ed.). Wiley.
- Jones, P., & Lee, S. (2024). Genetic algorithm optimization for lightweight marine structures. *Ocean Engineering*, 305, 117852. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117852>.
- Keane, R. G., McNatt, T., & Beach, J. E. (2017). Reducing total ownership cost: Designing robust ship structures. *Naval Engineers Journal*, 129(4), 41–57. <https://doi.org/10.5957/NEJ-2017-0045>.
- Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2005). A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194(36–38), 3902–3933. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.09.007>.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction* (2nd ed.). Wiley.
- Moan, T. (2005). Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of marine structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1(1), 33–62. <https://doi.org/10.1080/15732470412331289131>.
- Paik, J. K., Kim, B. J., & Seo, J. K. (2018). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part 2—Sensitivity analysis. *Ocean Engineering*, 150, 22–40. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.039>.
- Pambudi, A., Santoso, A., & Baidowi, A. (2024). Improving safety by fatigue life assessment of pressure hull considering corrosion factors: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1423, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1423/1/012002>.
- Riks, E. (1972). The application of Newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics*, 39(4), 1060–1065. <https://doi.org/10.1115/1.3422869>.
- Ross, C. T. F. (2011). *Pressure vessels: External pressure technology* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
- Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., & Wynn, H. P. (1989). Design and analysis of computer experiments. *Statistical Science*, 4(4), 409–423. <https://doi.org/10.1214/ss/1177012413>.
- Singer, J., Arbocz, J., & Weller, T. (2002). *Buckling experiments: Experimental methods in buckling of thin-walled structures*, Vol. 2: Shells, built-up structures and additional topics. Wiley.
- Smith, R., Johnson, K., Lee, M., & Davis, P. (2023). FORM-based buckling reliability of cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 182, 110250. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110250>.
- Teng, J. G., & Rotter, J. M. (Eds.). (2004). *Buckling of thin metal shells*. Spon Press.
- Wang, Y., & Guedes Soares, C. (2024). System reliability of marine structures under combined loads. *Marine Structures*, 93, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103521>

- Zhang, J., & Ellingwood, B. R. (2023). Hybrid reliability methods for marine structural safety assessment. *Structural Safety*, 101, 102310. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2022.102310>.
- Zhang, X., He, X., Shen, K., Wang, L., & Liu, Y. (2025). Buckling design of corrugated cylindrical hulls with variable wall thickness under uniform external pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 213, 105321. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105321>.

#### اختصارات اضافی (موارد خاص)

| اختصار      | معنای کامل انگلیسی                     | ترجمه فارسی                         |
|-------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| M1-M5       | Model 1 to Model 5 (Optimized Designs) | مدل ۱ تا ۵ (طرح‌های بهینه‌سازی شده) |
| OC1-OC6     | Operational Capability 1 to 6          | قابلیت عملیاتی ۱ تا ۶               |
| TS6-3۶TS1-1 | Technical Specification                | مشخصات فنی (با کدهای مربوطه)        |

#### اختصارات مربوط به متغیرها و پارامترها (در فرمول‌ها)

| اختصار/نماد                     | معنای کامل                                 | ترجمه فارسی                        |
|---------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| Pf                              | Probability of Failure                     | احتمال خرابی                       |
| $\beta$                         | Reliability Index                          | شاخص قابلیت اطمینان                |
| d                               | Design Variable Vector                     | بردار متغیرهای طراحی               |
| d <sup>L</sup> , d <sup>U</sup> | Lower and Upper Bounds of Design Variables | کرانه پایین و بالای متغیرهای طراحی |
| W                               | Structural Weight                          | وزن سازه‌ای                        |
| $\rho$                          | Material Density                           | چگالی ماده                         |
| V                               | Structural Volume                          | حجم سازه‌ای                        |
| t                               | Shell Thickness                            | ضخامت پوسته                        |
| L                               | Stiffener Spacing                          | فاصله سخت‌کننده‌ها                 |
| h <sub>w</sub>                  | Stiffener Web Height                       | ارتفاع جان‌سخت‌کننده               |
| t <sub>w</sub>                  | Stiffener Web Thickness                    | ضخامت جان‌سخت‌کننده                |
| b <sub>f</sub>                  | Stiffener Flange Width                     | عرض بال سخت‌کننده                  |
| t <sub>f</sub>                  | Stiffener Flange Thickness                 | ضخامت بال سخت‌کننده                |
| $\sigma_y$                      | Yield Strength                             | مقاومت تسلیم                       |
| E                               | Young's Modulus                            | مدول یانگ                          |
| $\nu$                           | Poisson's Ratio                            | نسبت پواسون                        |
| $\delta_0$                      | Initial Out-of-Roundness                   | خارج از مدور بودن اولیه            |
| R                               | Collapse Pressure (Resistance)             | فشار فروپاشی (مقاومت)              |
| S                               | Applied Load                               | بار اعمال شده                      |
| g(X)                            | Limit State Function                       | تابع حالت حدی                      |
| N                               | Number of Monte Carlo Samples              | تعداد نمونه‌های مونت کارلو         |
| $\lambda_{\max}$                | Maximum Eigenvalue                         | بزرگ‌ترین مقدار ویژه               |
| n                               | Number of Criteria                         | تعداد معیارها                      |
| L <sub>1</sub>                  | Threshold Value (Minimum)                  | مقدار آستانه (حداقل)               |
| L <sub>2</sub>                  | Target Value (Maximum)                     | مقدار هدف (حداکثر)                 |
| X                               | Actual Value of Parameter                  | مقدار واقعی پارامتر                |

- <sup>1</sup> Reliability-Based Design Optimization
- <sup>2</sup> Analytic Hierarchy Process
- <sup>3</sup> Overall Measure of Effectiveness
- <sup>4</sup> Genetic Algorithm
- <sup>5</sup> Coefficient of Variation
- <sup>6</sup> First Order Reliability Method
- <sup>7</sup> Second Order Reliability Method
- <sup>8</sup> Multi-stakeholder (i.e., a process in which multiple stakeholders with different priorities are involved in decision-making)
- <sup>9</sup> Multi-Criteria Decision Making
- <sup>10</sup> Probabilistic Multi-Criteria Decision Making
- <sup>11</sup> Smith et al.
- <sup>12</sup> Jones & Lee
- <sup>13</sup> Brown et al.
- <sup>14</sup> Zhang & Ellingwood
- <sup>15</sup> Aven & Zio
- <sup>16</sup> Wang & Guedes Soares
- <sup>17</sup> Finite Element Method
- <sup>18</sup> Monte Carlo Simulation
- <sup>19</sup> Kriging
- <sup>20</sup> Analytic Hierarchy Process
- <sup>21</sup> Saaty
- <sup>22</sup> Life-Cycle Cost
- <sup>23</sup> Activity-Based Costing
- <sup>24</sup> web
- <sup>25</sup> flange
- <sup>26</sup> Value of Performance
- <sup>27</sup> Complementary Cumulative Distribution Function
- <sup>28</sup> Measure of Performance
- <sup>29</sup> Life-Cycle Cost
- <sup>30</sup> Bhardwaj et al.
- <sup>31</sup> Cho et al.
- <sup>32</sup> Pambudi et al.
- <sup>33</sup> Paik et al.
- <sup>34</sup> Singer et al.
- <sup>35</sup> Teng & Rotter
- <sup>36</sup> Moan

**This page intentionally left blank.**