

Development of an efficient method for reliability assessment of offshore platforms using improved linear simulation method

Jafar Jafari-Asl^{1*}, Mahdi Rabiei Lakarmeh-Sari²

¹Ph.D. Graduated. Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran

²Ph.D. Graduated. Department of Mechanical Engineering, Gilan University, Rasht, Iran

Corresponding Author's E-mail: jafariaslyu@gmail.com

Received: 29 Oct. 2022



Accepted: 19 May 2023

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This paper aims to develop a robust and efficient method for modeling the performance of steel jacket platforms under parameter uncertainties. For this purpose, a combined approach using Linear Simulation (LS) and the improved Grey Wolf Optimization algorithm was developed. First, the performance of the developed model was evaluated on benchmark functions, and then, the probability of failure of the steel jacket structure due to wave loads was calculated. The results showed that the highest probability of platform failure occurred under wave impact with an angle of 315 degrees, a height of 12.2 meters, and a period of 11 seconds, with a probability of 1E-5. This indicates a high level of safety for the designed platform. The results showed that the proposed model has suitable accuracy and can calculate the safety level of various offshore structures with acceptable precision.

Keywords: Reliability, Monte Carlo simulation , Linear simulation , Jacket Platforms , Gray Wolf Optimizer

Introduction: Fixed steel platforms that are used for extracting oil and gas from deep sea depths are among the most important offshore structures. Due to the high cost of their construction, these platforms are designed for long-term use. Oil and gas platforms are subjected to various loads during their operational period, including dynamic loads such as forces caused by waves, ocean currents, and wind loads; impact loads such as collisions with vessels during loading and unloading, and the impact of heavy objects falling onto the platform deck (Gjerde 1993). The aim of this study is to develop a probabilistic model for modeling the performance of jacket-type metal platforms, taking into account the uncertainty of influential parameters. For this purpose, the performance of a linear simulation method was improved using a new hybrid metaheuristic algorithm and then used to estimate the reliability level of oil and gas metal platforms.

Methodology: In this study, to determine the failure and safe states of steel jacket platforms, the limit state function was used in the form of Eq. (3) in which f_a is the stress in the structural members caused by compressive forces; f_{bx} and f_{by} are the stresses resulting from the bending moment around the x and y axes, respectively, all represented in Eq. (4), where P is the axial force applied to the members, M_x and M_y are the calculated bending moments around the x and y axes, respectively; D and A reveal the diameter and cross-sectional area of the pipe

members, respectively; and I is the moment of inertia of the members, calculated by Eq. (6), here t is the thickness of the pipe member wall.

To solve this problem, the Line Sampling (LS) method was used. The LS method is a robust and accurate method for evaluating the reliability of structures, which was first introduced by Koutsourelakis et al. (2004) based on a combined approach of Monte Carlo and first-order reliability methods. Here, a combination of meta-heuristic approach was developed to improve the performance of the LS method. Particle Swarm Optimization (PSO) was incorporated into Grey Wolf Optimizer (GWO) to upgrade the efficiency and robustness of GWO.

Results and Discussion: First, two numerical benchmark functions were solved by the developed hybrid model to validate the robustness of the method, Eqs. (24-25) in which, X_1 and X_2 are the random numbers with normal distribution, $N(4, 0)$. Also, the mean and standard deviation of X_i in Eq. (24) are 1 and 0, respectively.

Table 1 presents the results of implementing the proposed method on the benchmark problems. It shows, the classical LS method was unable to solve both examples due to the nonlinearity of the problem functions and the use of gradient-based methods to find the direction of the unit vector, which failed to find the optimal point. However, all three LS-GWO, LS-PSO, and LS-WGOPSO methods were able to estimate the reliability index with reasonable accuracy compared to the MCS method. It is also observed that the LS-GWOPSO hybrid method was able to converge with fewer limit state function calls compared to the other two methods.

After validating and evaluating the performance of the proposed model on two benchmark examples, the new model's reliability was applied to assess the reliability level of metal jacket platforms, one of the oil platforms in the South Pars oil field was selected as a case study. This platform has a 4-legged jacket weighing 1240 tons and a height of 72.7 meters. The weight of the platform deck is 1050 tons, and the depth of the water at the installation site is 66.8 meters. The statistical properties of the uncertain parameters, including the yield stress of steel, member diameter, wall thickness, effective length factor, and member length, are presented in Table 2.

In this study, the failure mode is considered the failure of the weakest member. For this purpose, the internal forces in the members are first generated in different directions due to wave loads. Then, based on the limit state function presented in Eq. (24), the probability of failure of the metal jacket structure is calculated.

Table 3 shows the values of the failure probability and reliability index of the metal jacket platform for the internal forces generated in the members due to wave loads. As shown in Table 3, the designed platform is highly safe against uncertainties, with a reliability level of 99% in all 8 wave-impact scenarios with different angles. Among the investigated scenarios, the highest probability of failure occurred in the wave impact with an angle of 135 degrees. This may be due to the high wave height in the direction of 135 degrees compared to other directions. It should be noted that the limit state function was called 400 times in all of the above scenarios.

Conclusion: In the present study, a new reliability assessment method based on the Linear Simulation (LS) approach was developed for probabilistic modeling of the performance of steel jacket platforms. The results showed that the highest probability of platform failure occurred due to the impact of a floating object and wave impact with an angle of 135 degrees. Overall, the safety assessment of the studied platform indicated that the platform has a suitable level of safety.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

توسعه یک روش کارآمد برای ارزیابی قابلیت اطمینان سکوه‌های فراساحلی با استفاده از بهبود روش شبیه‌سازی خطی

جعفر جعفری اصل^{۱*}، مهدی ربیعی لاکرمه سری^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. ایمیل: Jafar.Jafariasl@yahoo.com: کد پستی: ۹۸۷-۹۸۱۵۵
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. ایمیل: Mrabiei@webmail.guilan.ac.ir: کد پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

Corresponding Author's E-mail: jafariaslyu@gmail.com

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

چکیده

سکوه‌های جکت فلزی از جمله سازه‌های مهم فراساحلی هستند که در بحث اکتشاف و استخراج انرژی از دریا نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. علی‌رغم اینکه، این سازه‌های حساس و مهم برای استفاده در زمان طولانی طراحی می‌گردند، به دلیل وجود برخی از عوامل غیرقابل پیش‌بینی دچار خرابی زودرس می‌گردند. ارزیابی احتمال خرابی این سازه‌های حساس با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و نیروهای وارده و همچنین مصالح اجرایی آن‌ها، می‌تواند سطح ایمنی آن‌ها را مشخص و کمک شایانی برای جلوگیری از خرابی زود هنگام نماید. از این رو، هدف از مقاله حاضر توسعه یک روش کارا و قدرتمند برای مدل‌سازی عملکرد سکوه‌های جکتی فلزی در شرایط عدم قطعیت پارامترها می‌باشد. برای این منظور، یک روش ترکیبی با استفاده از شبیه‌سازی خطی (LS^1) و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبود یافته توسعه داده شد. ابتدا عملکرد مدل توسعه یافته بر روی توابع بنچمارک مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه احتمال خرابی سازه جکت فولادی در اثر بارهای ناشی از امواج محاسبه شد. نتایج نشان داد بیشترین احتمال خرابی سکو در شرایط برخورد امواج با زاویه ۳۱۵، با ارتفاع ۱۲/۲ متر و پریود ۱۱ ثانیه برابر ۱۰^{-۵} است که سطح ایمنی بالای سکوی طراحی شده را نشان می‌دهد. همچنین، مدل معرفی شده از دقت مناسبی برخوردار است و می‌تواند با دقت قابل قبولی سطح ایمنی انواع سازه‌های فراساحلی را محاسبه نماید.

کلیدواژگان: قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شبیه‌سازی خطی، سکوه‌های جکت، بهینه‌ساز گرگ خاکستری.

¹ Line Sampling

۱- مقدمه

خاک بستر دریا نیز به طور واقع بینانه در ارزیابی احتمالاتی سازه‌های فراساحلی مورد توجه قرار گرفت.

با گسترش و توسعه مدل‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در تجزیه و تحلیل احتمال خرابی سکوه‌های نفت و گاز، استفاده از رویکرد طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان (RBDO¹) برای طراحی سازه‌های فراساحلی (Engelund and Sørensen, 1995; Kiureghian and Ke, 1998) برای طراحی ایمن سکوه‌های ثابت جکتی (Manuel et al. 2013) به کار رفته است.

مطالعه سطح ایمنی، واسنجی ضرایب بار و مقاومت روابط آئین‌نامه‌ای نشان داد، که روش تنش مجاز آئین‌نامه دارای ضعف‌های بسیاری در مواجهه با عدم قطعیت‌ها می‌باشد (Birkinshaw and Smith, 1996).

در مطالعه‌ای یک چارچوب جدید برای طراحی بهینه سکوه‌های فراساحلی ثابت تحت اثر هم‌زمان چندین بار با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه، همچنین، برای تعیین ابعاد بهینه سازه یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی پیشنهاد گردید (Halil and Vrouwenvelder, 2010). در پژوهشی دیگر، اثر عدم قطعیت بر روی ضرایب تمرکز تنش در اتصالات سکوه‌های ثابت و حساسیت پارامترها بر اساس منحنی S-N مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Ahmadi and Lotfollahi, 2012).

با استفاده از روش مونت کارلو، یک مدل جدید برای ارزیابی قابلیت اطمینان وابسته به زمان سکوه‌های فراساحلی جکتی معرفی گردید (Bai et al., 2016). همچنین، میزان تاثیر پارامترهای گوناگون بر روی خرابی و سلامت سکوه‌های فراساحلی شابلونی تعیین گردید (Hezarjaribi et al., 2017; Karimi et al., 2013). توسعه یک مدل پایدار، از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی احتمالاتی سکوه‌های فلزی نشان داد که روش ارائه شده در مقایسه با روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان و مونت کارلو، دارای دقت و سرعت بالایی برخوردار است (Yuliang et al., 2020).

سکوه‌های ثابت فلزی که برای استخراج نفت و گاز از اعماق دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند، از مهم‌ترین سازه‌هایی فراساحلی به شمار می‌آیند. با توجه به هزینه‌های بالای احداث آن‌ها، این سکوها برای استفاده در زمان طولانی طراحی می‌گردند. سکوه‌های نفت و گاز، در طول دوره بهره‌برداری تحت تأثیر بارهای گوناگونی شامل بارهای دینامیکی نظیر نیروهای ناشی از امواج، جریان‌های دریایی و بار باد؛ بارهای ضربه‌ای نظیر برخورد شناورها در هنگام بارگیری و سقوط اشیاء سنگین بر روی عرشه قرار دارند (Gjerde 1993).

با توجه به اینکه، تمامی بارهای وارده به سکوها ماهیت تصادفی دارند و اغلب دارای عدم قطعیت می‌باشند، پیش‌بینی عملکرد این سازه‌ها و برآورد سطح ایمنی آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. علاوه بر این، عدم قطعیت‌های دیگری نیز شامل خطاهای انسانی در زمان طراحی، ساخت و انتقال این سازه‌ها و همچنین عدم قطعیت ناشی از خصوصیات مصالح به کار برده شده در ساخت این سازه‌های مهم، بر پیچیدگی رفتار آن‌ها می‌فزاید. از این رو، در چند سال اخیر مطالعات گسترده‌ای در جهت کمک به شبیه‌سازی عملکرد سکوه‌های فراساحلی با لحاظ نمودن حضور عدم قطعیت‌ها صورت گرفته است (Shabkhty et al., 2018).

ارزیابی قابلیت اطمینان در سکوه‌های فلزی نفت و گاز، ابتدا با بررسی خستگی اعضای سازه مطرح گردید (Ahmadi et al. 2020). سپس علاوه بر لحاظ نمودن خستگی اعضای سازه‌ای سکوها، مدل‌سازی ظرفیت نهایی اعضای سازه نیز مورد توجه قرار گرفت که در ابتدای رشد و توسعه روش‌های احتمالاتی برای این منظور، ساده‌سازی‌های زیادی انجام گرفت (Pillai and Parasad, 2000). با رشد علم و پیشرفت‌های چشمگیر ایجاد شده در بحث اطمینان‌پذیری سازه‌ها، تأثیر عدم قطعیت پارامترهای زیادی نظیر پرید و ارتفاع موج، سرعت جریان و باد، تنش تسلیم اعضا و مقاومت

¹ Reliability-based design optimization

فلزی

ارزیابی احتمالاتی هر سیستم سازه‌ای بر اساس یک تابع حالت حدی صورت می‌پذیرد. اگر در یک سیستم سازه‌ای $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ بردار متغیرهای تصادفی باشد که مقاومت سازه (R) و بار وارده به آن (L) را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تابع حالت حدی برابر خواهد بود با (Jafari-Asl et al., 2021):

$$g(X) = R - L \quad (1)$$

که $g(X)$ بیانگر حد بین ناحیه سلامت و خرابی سازه در فضای طراحی می‌باشد. یا به عبارتی $g(X) \leq 0$ بیانگر خرابی و $g(X) > 0$ بیانگر ایمنی سازه می‌باشد. با داشتن تابع حالت حدی برای هر سازه‌ای می‌توان احتمال خرابی آن را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمود (Rashki 2018):

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} f(X) dX \quad (2)$$

که $f(X)$ تابع چگالی احتمال بردار متغیرهای تصادفی X می‌باشد. در این مطالعه برای تعیین حالت خرابی و سلامت سکوه‌های جکت فلزی، از تابع حالت حدی به صورت رابطه (۳) استفاده شده است:

$$g(X) = 1 - \frac{f_a}{F_a} - \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \quad (3)$$

که f_a تنش موجود در اعضای سازه ناشی از نیروی فشاری می‌باشد. همچنین f_{bx} و f_{by} تنش‌های حاصل از لنگر خمشی حول محورهای x و y می‌باشند:

$$f_a = \frac{P}{A}; f_{bx} = \frac{M_x D}{2I}; f_{by} = \frac{M_y D}{2I} \quad (4)$$

که P ، نیروی محوری وارد به اعضا، M_x و M_y لنگرهای خمشی محاسبه شده حول محورهای x و y می‌باشند. همچنین D و A به ترتیب قطر و سطح مقطع اعضای لوله‌ای می‌باشند. I نیز ممان اینرسی اعضا می‌باشد که به صورت

نتایج مدل توسعه‌یافته برپایه روش مرتبه اول قابلیت اطمینان برای ارزیابی احتمالاتی سکوه‌های جکت فلزی تحت بار ضربه شناور حاکی از موفقیت رویکرد پیشنهادی برای تخمین سطح ایمنی سازه‌های فراساحلی در اثر برخورد شناور بود (Shabkhty et al., 2018). در پژوهشی دیگر، بر اساس رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، روابط آئین‌نامه‌ای طراحی سکوه‌های نفتی فلزی بهبود یافت و یکسری روابط دقیق و مؤثر برای مدل‌سازی عملکرد سکوه‌های فلزی نفت و گاز ارائه گردید (Ahmadi et al., 2019).

اگرچه تاکنون مطالعات گوناگونی برای تخمین احتمال خرابی سکوه‌های فراساحلی تحت تأثیر عدم قطعیت بارهای وارده و مصالح مصرفی، انجام شده است. اما هنوز هم سوالاتی در این زمینه بدون پاسخ باقی مانده است. به عنوان مثال در بیشتر مطالعات موجود، از روش‌های قدیمی و سنتی مونت‌کارلو و مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده شده است. این در حالی است که استفاده از رویکرد طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان این سکوها نیازمند یک مدل شبیه‌سازی در کنار روش ارزیابی قابلیت اطمینان است. در واقع استفاده از روش مونت‌کارلو نیازمند هزینه محاسباتی بسیار بالا و استفاده از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان در برخی مواقع منجر به پاسخ غیردقیق می‌گردد.

از این رو توسعه مدل‌های احتمالاتی مؤثر که بتواند با هزینه‌های محاسباتی بسیار اندک، تخمین مناسبی از سطح ایمنی این سازه‌های مهم ارائه دهد، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر توسعه یک مدل احتمالاتی برای مدل‌سازی عملکرد سکوه‌های فلزی جکتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر می‌باشد. برای این منظور عملکرد روش شبیه‌سازی خطی با استفاده از یک الگوریتم فراکاوشی ترکیبی جدید بهبود داده شد و سپس برای برآورد سطح قابلیت اطمینان سکوه‌های فلزی نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- مدل‌سازی احتمالاتی عملکرد سکوه‌های جکت

زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_b = \begin{cases} 0.75F_y \text{ if } \frac{D}{t} \leq \frac{10340}{F_y} \\ \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \text{ if } \frac{10340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20680}{F_y} \\ \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \text{ if } \frac{20680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \end{cases} \quad (10)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D-2t}{2} \right)^4 \right] \quad (6)$$

۲-۲- تئوری روش شبیه‌سازی خطی

روش شبیه‌سازی خطی (LS^1)، روشی پایدار و دقیق برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها می‌باشد که نخستین بار توسط Koutsourelakis et al. (2004) بر اساس رویکرد ترکیبی روش‌های مونت‌کارلو و مرتبه اول قابلیت اطمینان ارائه شد. در ادامه به نحوه محاسبه احتمال خرابی با این روش اشاره خواهد شد. با انتقال فضای اصلی متغیرها به یک فضای نرمال، رابطه (۱۱) در روش LS به صورت زیر بازنویسی می‌شود (Shayanfar et al., 2017):

$$P_f = \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} I(u) \phi(u_1) du_1 \right) \prod_{i=2}^{n-1} \phi(u_i) du_i \quad (11)$$

که ϕ بیانگر تابع چگالی توزیع استاندارد نرمال می‌باشد. $I(\cdot)$ یک تابع شمارنده می‌باشد. در واقع، انتگرال گیری ابتدا در یک جهت حل شده و سپس در تمام فضای \mathbb{R}^{n-1} اقلیدسی تعمیم داده می‌شود. نتیجه انتگرال داخلی را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(u) \phi(u_1) du_1 = \Phi(-|c|) \quad (12)$$

که c اولین بعد یک نقطه بر روی تابع حالت حدی می‌باشد با بعدهای دیگر همان بردار u به غیر از u_1 و Φ تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال می‌باشد که شماتیک آن در شکل ۱ برای یک مسئله دوبعدی نشان داده شده است. بنابراین می‌توان رابطه (۱۱) را به صورت زیر بیان کرد:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(-|c|) \prod_{i=2}^{n-1} \phi(u_i) du_i \quad (13)$$

که t ضخامت جداره عضو لوله‌ای می‌باشد.

پارامتر F_a بیانگر مقدار تنش مجاز تحت بار محوری فشاری است و طبق آئین‌نامه (2007) API-RP2A به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_a = \begin{cases} \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{1.66 + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{3(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \text{ if } \frac{Kl}{r} < C_c \\ \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \text{ if } \frac{Kl}{r} \geq C_c \end{cases} \quad (7)$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{0.5} \quad (8)$$

که F_y و E به ترتیب بیانگر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد می‌باشند. K ضریب طول مؤثر و l طول مهار نشده عضو می‌باشند. همچنین r بیانگر شعاع ژیراسیون مقطع عرضی عضو می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که رابطه (۱) طبق آئین‌نامه API RP 2A 2007 تنها زمانی برای کنترل مقاومت عضوهای لوله‌ای تحت بارهای محوری و لنگر خمشی مجاز می‌باشد که $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$ همچنین در صورتیکه، نسبت $\frac{D}{t}$ از ۶۰ بزرگ‌تر باشد، از کماتش حلقوی به جای تنش تسلیم فولاد در رابطه (۷) استفاده می‌شود.

در رابطه (۳)، F_b تنش مجاز خمشی می‌باشد که به صورت زیر برآورد می‌شود:

¹ Line Sampling

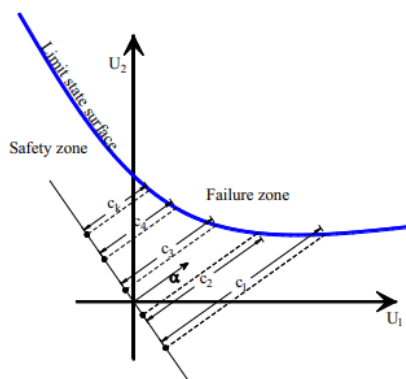


Fig. 2 The proceses of LS (Shayanfar et al., 2017).

شکل ۲ فرآیند روش LS (شایان‌فر و همکاران ۲۰۱۷).

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO¹)

این الگوریتم برای اولین بار توسط کِنِدی و آبرهات در سال ۱۹۹۵ با الهام از رفتار ازدحامی پرندگان برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شد. این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت فراکوشی، ابتدا موقعیت ذره‌ها (به‌عنوان مثال: موقعیت پرندگان، ماهی‌ها و غیره...) را به‌صورت تصادفی در فضای حل مسئله تولید نموده که بیانگر پاسخ‌های مسئله می‌باشند، سپس در طول فرآیند بهینه‌سازی، این پاسخ‌ها را به‌روزرسانی می‌نماید. در این الگوریتم، اگر x_i^k معرف بهترین موقعیت ذره‌ها در هر تکرار باشد، موقعیت ذره‌ها در هر تکرار با استفاده از رابطه زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (16)$$

$$v_i^{k+1} = w * (v_i^k + c_1 r_1 (x_1 - x_i^k) + c_2 r_2 (x_2 - x_i^k)) \quad (17)$$

که w بیانگر ثابت اینرسی است که به‌طور تصادفی در بازه ۰ و ۱ تولید می‌شود و r_1, r_2, r_3 مقاداری تصادفی بین ۰ و ۱ می‌باشند. همچنین v_i^k بیانگر سرعت ذره نام در تکرار k ام است. w, c_1 و c_2 پارامترهای ثابت الگوریتم می‌باشند که بر اساس آنالیز حساسیت تعیین می‌گردند. بروز رسانی موقعیت ذره‌ها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شرایط خاتمه

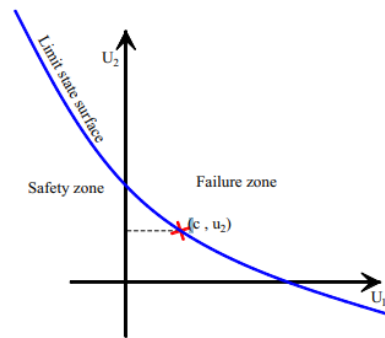


Fig. 1 The value of c in Eq. 11 (Shayanfar et al. 2017).

شکل ۱ مقدار c در رابطه (۱۲) (شایان‌فر و همکاران ۲۰۱۷).

که در آن c تابع u_2, u_3, u_n, \dots می‌باشد. بر اساس معادله (۱۳) می‌توان احتمال خرابی را به‌صورت زیر برآورد نمود:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi(-|c_k|) \quad (14)$$

c از بردار رسم شده در فضای استاندارد نرمال به دست می‌آید. جهت c ها از جهت بردار یکه a استفاده می‌شود، بردار یکه به‌صورت رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$u_a^1 = u - (u \cdot a)a \quad (15)$$

که $u \cdot a$ معرف نقاط تولید شده برای بردارهای a و u می‌باشد. پس از تعیین جهت بردار مهم، با رسم یک خط در جهت عمود بر این بردار نمونه‌های بر روی خط عمود تولید می‌شود. سپس با محاسبه فاصله این نقاط تا تابع حالت حدی می‌توان میزان احتمال خرابی را با استفاده از رابطه (۱۴) برآورد نمود. فرآیند تشریح شده در شکل ۲ ارائه شده است.

یافتن جهت بردار یکه از مهم‌ترین چالش‌های موجود برای استفاده از روش LS می‌باشد. در این مطالعه از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری و جستجوی ذرات برای این منظور استفاده شده است.

¹ Particle Swarm Optimization

الگوریتم ارضاء گردد (Kenedy and Eberhart, 1995).

۲-۴- الگوریتم گرگ خاکستری (GWO¹)

الگوریتم گرگ خاکستری با الهام از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری ارائه شده است (Mirjalilie et al., 2014). اساس این الگوریتم به این صورت است که ابتدا گرگ‌های خاکستری برای شکار طعمه را ردیابی، تعقیب و محاصره می‌کنند و پس از خسته شدن شکار به آن حمله می‌کنند. مراحل اصلی الگوریتم گرگ خاکستری در ادامه به زبان ریاضی بیان شده است:

گام اول: تعداد N گرگ خاکستری طبق رابطه زیر در فضای جستجو قرار داده می‌شوند:

$$X_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^l, \dots, x_i^d\} \quad i = 1, \dots, N \quad (18)$$

که x_i^l موقعیت i امین گرگ در بعد l ام را بیان می‌کند و d بعد فضای جستجو را نشان می‌دهد.

گام دو: میزان برازندگی برای عوامل جستجو با استفاده از تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس عوامل بر اساس برازندگی به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند و سه عامل اول به ترتیب با ویژگی X_α و X_β و X_δ ارائه می‌شوند.

گام سوم: بردارهای ضرایب \vec{a} ، \vec{A} و \vec{C} در فرآیند جستجو با استفاده از رابطه (۱۹) به‌روزرسانی می‌شوند.

$$\begin{aligned} \vec{a} &= 2 \left(1 - \frac{k}{K_{max}}\right) \\ \vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2\vec{r}_2 \end{aligned} \quad (19)$$

که k تکرار فعلی را نشان می‌دهد و K_{max} نشان‌دهنده ماکزیمم تعداد تکرارهاست. ضریب \vec{a} در طول فرآیند به طور خطی از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد و \vec{r}_1 و \vec{r}_2 بردارهای تصادفی در بازه [۰ و ۱] می‌باشند.

گام چهارم: از آنجایی که موقعیت طعمه مشخص نیست، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا نزدیک‌ترین طعمه محسوب

می‌شوند. رفتار محاصره و شکار به شرح زیر مدل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - w * \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - w * \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - w * \vec{X}| \\ \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{aligned} \quad (20)$$

گام پنجم: موقعیت نهایی گرگ i ام در تکرار k ام به‌صورت زیر بروز رسانی می‌شود:

$$x_i^{k+1} = \text{average}(X_1, X_2, X_3) \quad (21)$$

۲-۵- الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری و ازدحام ذرات (GWOPSO²)

این الگوریتم ترکیبی جدید از مکانیزم‌های دو الگوریتم گرگ خاکستری و ازدحام ذرات است که توسط دهمانی و یدبیری در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است که ویژگی‌های الگوریتم ازدحام ذرات را با الگوریتم گرگ خاکستری ادغام می‌کند تا قابلیت اکتشاف GWO و بهره‌برداری PSO را بهبود ببخشد. این الگوریتم ترکیبی از رفتار شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت به شکل GWO تقلید می‌کند. گرگ‌های خاکستری با سلسله مراتب دقیق از بالا به پایین در چهار گروه آلفا، بتا، دلتا و امگا زندگی می‌کنند. آلفا به عنوان رهبر گروه در نظر گرفته می‌شود و مسئول تصمیم‌گیری در مورد رفتار اجتماعی گروه به ویژه در هنگام شکار است. بتا و دلتا تابع آلفا هستند و می‌توانند بقیه گروه (امگا) را کنترل کنند (Dahmani and Yebdri, 2020). اساس این الگوریتم همان الگوریتم گرگ خاکستری می‌باشد با این تفاوت که بجای رابطه (۲۱)، از روابط (۲۲) و (۲۳) برای به‌روزرسانی موقعیت عامل‌های جستجو در هر تکرار استفاده می‌شود:

² Grey Wolf Optimizer Particle Swarm Optimizer

¹ Grey Wolf Optimizer

$$g(X) = \frac{120}{X_1} - \frac{X_2}{X_1} - 1 \quad (24)$$

که X_1 و X_2 متغیرهای نرمال با میانگین ۴ و انحراف از معیار ۱ می‌باشند.

مثال ۲:

$$g(X) = 2 + 0.015 \sum_{i=1}^9 X_i^2 - X_{10} \quad (25)$$

که X_i متغیر نرمال با میانگین و انحراف از معیار به ترتیب برابر ۰ و ۱ است.

الگوریتم‌های فراکاوشی، یک سری پارامترهایی تحت عنوان پارامترهای تنظیمی دارند که یافتن مقادیر بهینه این پارامترها موجب افزایش دقت و سرعت الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی می‌گردد. از این رو بر اساس آنالیز حساسیت بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم GWOPSO و PSO که شامل C_1 ، C_2 ، C_3 و w به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۵، ۰/۹ و ۰/۵ به دست آمد.

همان گونه که در بخش ۲-۲ ارائه شده، با توجه به اینکه LS از رویکرد روش‌های گرادیانی برای یافتن جهت بردار یکه استفاده می‌کند، در مواجه با مسائل دارای تابع حالت حدی غیرخطی و پیچیده به سختی همگرا می‌شود. نتایج تحلیل مسائل بنچمارک با استفاده از روش ترکیبی LS-GWOPSO، LS-GWO، LS-PSO، LS و MCS در جدول ۱ ارائه شده است. همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود LS کلاسیک برای حل هر دو مثال فوق ناتوان بوده و یا به عبارتی با توجه به غیرخطی بودن توابع مثال‌ها و اینکه از روش‌های گرادیانی برای یافتن جهت بردار یکه استفاده می‌کند نتوانسته است نقطه بهینه را پیدا کند. ولی در مقابل هر سه روش LS-GWO، LS-PSO و LS-GWOPSO توانسته‌اند میزان شاخص قابلیت اطمینان را با دقت مناسبی نسبت به روش MCS برآورد کنند. همچنین مشاهده می‌شود که روش ترکیبی LS-GWOPSO با تعداد فراخوانی تابع حالت حدی کمتری نسبت به دو روش دیگر توانسته است همگرا شود.

$$v_i^{k+1} = w * (v_i^k + c_1 r_1 (x_1 - x_i^k) + c_2 r_2 (x_2 - x_i^k) + c_3 r_3 (x_3 - x_i^k)) \quad (22)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (23)$$

که w بیانگر ثابت اینرسی است که به‌طور تصادفی در بازه ۰ و ۱ تولید می‌شود و r_3 مقداری تصادفی بین ۰ و ۱ است. فلوجارت کلی مدل ترکیبی ارائه شده برای ارزیابی قابلیت اطمینان سکوها با استفاده از روش شبیه‌سازی خطی و الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی در شکل ۱ ارائه شده است.

۶-۲- مدل COMSOL

در مطالعه حاضر، از نرم‌افزار عددی COMSOL Multiphysics 5.0 برای شبیه‌سازی رفتار سکوی مورد مطالعه استفاده شده است. این مدل عددی یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی و محاسبات مرتبط با علوم مختلف از قبیل ترمودینامیک، ریاضیات، فیزیک جامدات، الکترومغناطیس، فیزیک و پلاسما است. مدل COMSOL دارای یک کتابخانه جامعی از اطلاعات مربوط به عناصر ترکیبات گوناگون بوده و روابط و معادلات مرتبط با زمینه‌های مختلف علمی در این شبیه‌ساز قدرتمند موجود است (Ehsani et al. 2015).

۳- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا دقت روش توسعه داده شده بر مبنای LS با استفاده از ۲ تابع بنچمارک مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس از مدل LS-GWOPSO برای ارزیابی احتمالاتی سکوهایی جکته فولادی استفاده شد.

۳-۱- مثال‌های عددی

برای بررسی دقت و عملکرد روش پیشنهادی، مسائل پیچیده که روش شبیه‌سازی خطی (LS) کلاسیک قادر به حل آن‌ها نمی‌باشد انتخاب شد (Shayanfar et al., 2017):

مثال ۱:

جدول ۱ نتایج تحلیل مسائل عددی بنچمارک.

Table 1 The result of analysis of examples.

No	MCS		LS		LS-PSO		LS-GWO		LS-GWOPSO	
	B	#g_call	B	#g_call	B	#g_call	B	#g_call	B	#g_call
1	3.99	1000000	11.2	100	3.56	300	3.81	300	4.01	200
2	2.13	1000000	0.01	100	2.21	300	2.09	300	2.14	200

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه احتمال شکست اسکله ممکن است در اثر خرابی هرکدام از اعضا رخ دهد، تابع حالت حدی برای تمامی اعضا محاسبه شده و در نهایت احتمال خرابی سازه بر اساس ضعیف‌ترین عضو محاسبه می‌شود. برای این منظور در جدول ۳، میانگین متغیرها برای هر عضو مقدار محاسبه شده در مرحله مدل‌سازی با نرم‌افزار COMSOL و جدول ۲ مقادیر اولیه مربوط به اعضا می‌باشد.



Fig. 3 The schematic of case study (Mirzavand 2013).

شکل ۳ نمایی از جکت سکوی مورد مطالعه (میرزاوند ۱۳۹۱).

جدول ۲ خصوصیات آماری متغیرها.

Table 2 The Statistical characteristics of variables.

Variables	PDF	Mean	COV
D	Normal	Variate	0.0025
t	Normal	Variate	$0.25t+0.004$
l	Normal	Variate	0.0025
k	Normal	Variate	0.085
E	Log-Normal	2000 MPa	0.25
f_y	Log-Normal	350 MPa	0.10

۳-۲- ارزیابی احتمالاتی سکوی جکت فلزی

پس از صحت‌سنجی و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی بر روی دو مثال بنچمارک، در این بخش از مدل جدید قابلیت اطمینان برای ارزیابی سطح اطمینان سکوهای جکت فلزی استفاده شد. برای مدل‌سازی احتمالاتی سکوهای نفتی با استفاده از رویکرد پیشنهادی در این مطالعه، یکی از سکوهای نفتی میدان نفتی پارس جنوبی به عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. این سکو دارای یک جکت ۴ پایه با وزن ۱۲۴۰ تن و ارتفاع ۷۲.۷ می‌باشد. وزن عرشه سکو نیز برابر ۱۰۵۰ تن و عمق آب در محل نصب آن ۶۶.۸ متر می‌باشد. شکل ۳ نمایی از جکت سکو را قبل از نصب نشان می‌دهد.

خصوصیات آماری پارامترهای دارای عدم قطعیت تنش تسلیم فولاد، قطر اعضا، ضخامت جدار، ضریب طول مؤثر و طول اعضا در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از مشخص نمودن پارامترهای دارای عدم قطعیت، نوع توزیع احتمال آن‌ها تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که پارامتر بار مهم‌ترین منبع عدم قطعیت به دلیل ناشناخته بودن کامل شرایط بارگذاری در مسئله مذکور می‌باشد. برای تعیین خصوصیات آماری نیروی محوری و لنگرهای خمشی در عضوها، ابتدا سکوی مورد بررسی در نرم‌افزار COMSOL در حضور نیروهای ناشی از امواج تحلیل دینامیکی گردید. همچنین برای شبیه‌سازی موج تصادفی، بنا به توصیه مطالعات قبلی از طیف جانسواپ استفاده شد.

بنا به پیشنهاد مطالعات پیشین و همچنین بررسی‌های انجام شده در مطالعه حاضر بر اساس تست مربع کاه، برای مدل‌سازی نیروی محوری و لنگر خمشی از تابع توزیع لاگ نرمال استفاده شد.

جدول ۴ خصوصیات موج.

Table 4 The characteristics of wave.

Angle (°)	Hight (m)	Period (s)
0	9.7	10
45	8.8	9.6
90	10.8	10.4
135	11.6	10.8
180	10.2	10.2
225	8.8	9.5
270	10.8	10.4
315	12.2	11

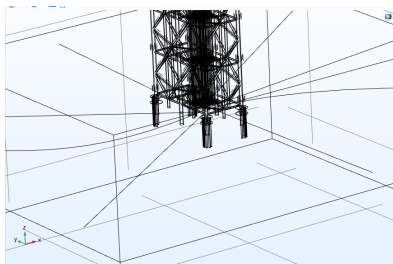


Fig. 4 The schematic of Jacket Platform in COMSOL.

شکل ۴ نمایی از سکو در COMSOL.

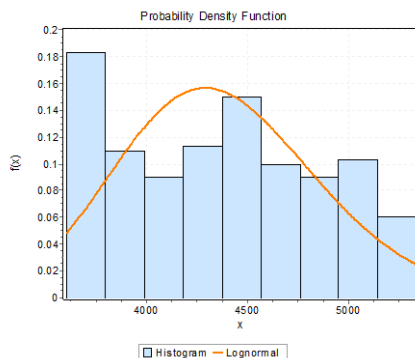


Fig. 5 The histogram of axial force.

شکل ۵ هیستوگرام نیروی محور.

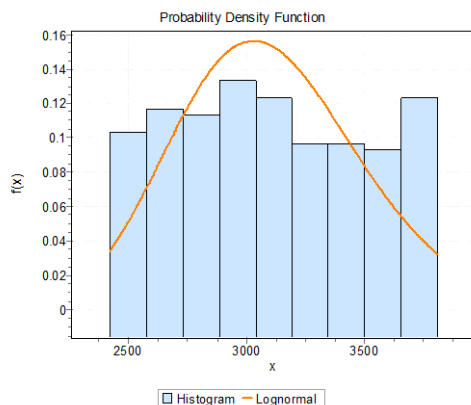


Fig. 6 The histogram of moment.

شکل ۶ هیستوگرام لنگر خمشی.

جدول ۳ خصوصیات آماری نیروها.

Table 3 The Statistical characteristics of forces.

Variables	PDF	Mean	COV
P	Normal	Variate	0.0025
M	Log-Normal	350 MPa	0.10

برای بارگذاری موج از اطلاعات ثبت شده در خلیج فارس با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در ۸ جهت استفاده شد (جدول ۴). شکل ۴ شماتیک سکوی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL را نشان می‌دهد.

هیستوگرام نمونه‌های تولید شده بر اساس تابع توزیع احتمال لاگ - نرمال برای نیروی فشاری محوری و لنگر خمشی یکی از اعضای سکو جهت نمونه در شکل ۵ ارائه شده است.

همان گونه که قبل‌تر اشاره شد، مود خرابی در این مطالعه به صورت خرابی ضعیف‌ترین عضو در نظر گرفته شده است. برای این منظور ابتدا نیروهای داخلی اعضا در اثر نیروی امواج در جهت‌های مختلف تولید شده و سپس بر اساس تابع حالت حدی ارائه شده به صورت رابطه (۳) میزان احتمال خرابی سازه جکت فلزی محاسبه می‌گردد. جدول ۵ مقادیر احتمال خرابی و میزان قابلیت اطمینان ($S = 1 - P_f$) سکوی جکت فلزی را به ازای نیروهای داخلی تولید شده در اعضا در اثر نیروهای امواج را نشان می‌دهد.

همان گونه که از جدول ۵ مشخص است، سکوی طراحی شده در مقابل عدم قطعیت‌ها از ایمنی بسیار بالایی برخوردار است، به گونه‌ای که در ۸ حالت برخورد موج با زاویه‌های گوناگون، دارای سطح اطمینان‌پذیری ۹۹٪ می‌باشد.

در بین حالت‌های بررسی شده، در شرایط برخورد موج با زاویه ۱۳۵ درجه، بیشترین احتمال خرابی رخ داده است. می‌توان دلیل این امر را ارتفاع زیاد موج در جهت ۱۳۵ درجه نسبت به سایر جهات دانست. لازم به ذکر است که تعداد فراخوانی‌های تابع حالت حدی در تمامی حالات فوق برابر ۴۰۰ مرتبه بوده است.

قطر، ضخامت جداره و تنش تسلیم عضو مورد نظر می‌باشد. در این مطالعه فرض شده است که یک شناور با سرعت ۲ متر بر ثانیه و جرم ۵۰۰۰ تن به اسکله برخورد می‌کند و بر اساس روابط فوق یک تغییر شکلی به اندازه ۱۳/۳۶ سانتی‌متر در اعضای سکو ایجاد می‌شود. سپس مطابق با مراحل قبلی نمونه‌های تصادفی بر اساس مشخصات فیزیکی اعضا همچنین نیروهای داخلی پس از اجرای مجدد COMSOL بر اساس شرایط به وجود آمده جدید، تولید شد. نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان سکوی جکت فلزی در شرایط برخورد شناور و نیروی امواج در جدول ۷ ارائه شده است.

همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است، با اضافه شدن نیروهای ناشی از ضربه شناور به سکوی جکت فلزی احتمال خرابی آن افزایش پیدا کرده است. همچنین مطابق با مرحله قبل مشخص است که ارتفاع موج در این مرحله نیز تاثیرگذار بود، زیرا بیشترین احتمال خرابی همانند بخش قبل مربوط به اعمال نیروی موج در زاویه ۱۳۵ درجه است.

جدول ۶ مقایسه روش‌ها.

Table 6 The comparison of methods.

Angle (°)	P_f	#g_call
MCS	4.9×10^{-6}	0.99
LS	2.6×10^{-7}	0.99
LS-GWOPSO	3.5×10^{-16}	1.00

جدول ۷ احتمال خرابی سکو در اثر ضربه شناور.

Table 7 The failure probability of jacet platform under ship impact.

Angle (°)	P_f	Reliability level
0	7.1×10^{-6}	0.99
45	1.2×10^{-6}	0.99
90	6.2×10^{-15}	0.99
135	3.9×10^{-7}	0.99
180	6.8×10^{-8}	0.99
225	1.3×10^{-6}	0.99
270	7.9×10^{-16}	0.99
315	1.6×10^{-5}	0.99

جدول ۵ احتمال خرابی سکو.

Table 5 The failure probability of jacet platform.

Angle (°)	P_f	Reliability level
0	4.9×10^{-6}	0.99
45	2.6×10^{-7}	0.99
90	3.5×10^{-16}	1.00
135	9.9×10^{-8}	0.99
180	6.8×10^{-8}	0.99
225	4.1×10^{-7}	0.99
270	5.2×10^{-16}	1.00
315	7.4×10^{-6}	0.99

برای نشان دادن کارایی روش ترکیبی توسعه داده شده در این مطالعه، احتمال خرابی سکوی فولادی با استفاده از روش‌های مونت‌کارلو و شبیه‌سازی خطی کلاسیک نیز برای حالت برخورد موج با زاویه ۱۳۵ درجه محاسبه گردید. جدول ۶ نتایج مقایسه سه روش مذکور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، به دلیل پیچیدگی تابع حالت حدی مسئله و تعداد بالای متغیرهای تصادفی، روش LS همگرا نشده و احتمال خرابی را برابر ۰/۲۳ تخمین زده است. همچنین روش مونت‌کارلو نیز احتمال خرابی را برابر $10^{-6} \times 7/5$ و با 10^6 مرتبه فراخوانی تابع حالت حدی برآورد کرده است. بر این اساس می‌توان اظهار نمود، روش پیشنهادی علاوه بر نیاز به نمونه‌گیری بسیار کم، دقت بالایی در مدل‌سازی احتمالاتی سازه‌های پیچیده دارد.

در ادامه با لحاظ نمودن ضربه برخورد یک شناور به اسکله در کنار نیروی حاصل از امواج، احتمال خرابی و سطح اطمینان اسکله محاسبه گردید. برای لحاظ نمودن اثر ضربه شناور به اسکله، از روابط زیر استفاده شد.

$$P_m = 0.017M^{0.7}V \quad (26)$$

که P_m میزان ضربه ناشی از برخورد شناور به سکو، M و V به ترتیب جرم و سرعت شناور می‌باشند. ارتباط بین نیروی ضربه و عمق فرورفتگی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P_m = 150f_y \frac{t^2}{4} \sqrt{\frac{\delta_d}{D}} \quad (27)$$

که δ_d عمق آسیب در عضو مورد نظر، D ، t و f_y به ترتیب

در ارزیابی و حل این مسئله پیچیده قابلیت اطمینان بود. بررسی نتایج نشان داد، بیشترین احتمال خرابی سکو در اثر برخورد شناور و اثر موج با زاویه ۱۳۵ درجه بود. به طور کلی ارزیابی سطح ایمنی سکوی مورد مطالعه نشان داد، سکو دارای سطح ایمنی مناسبی می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه، پیشنهاد می‌شود از روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ای برای ارزیابی و تحلیل احتمالاتی سایر سازه‌های فراساحلی مهم نظیر شیب‌شکن‌ها، لوله‌های انتقال نفت و گاز، توربین‌ها و نظیر آن‌ها استفاده شود.

۵- فهرست علائم

$g(X)$	تابع حالت حدی
R	مقاومت سازه
L	بار وارده به سازه
P_f	احتمال خرابی
$f(X)$	تابع چگالی احتمال
f_a	تنش مجاز (MPa)
P	نیروی محوری (N/mm^2)
E	مدول الاستیسیته (MPa)
	علائم یونانی:
δ_d	عمق آسیب (mm)
	بالانویس‌ها:
LS	شبیه‌سازی خطی

منبع‌ها References

- Ahmadi, H., and Lotfollahi-Yaghin, M. A. (2012). A probability distribution model for stress concentration factors in multi-planar tubular DKT-joints of steel offshore structures. *Applied Ocean Research*, 34, 21-32. doi.org/10.1016/j.apor.2011.11.002.
- Ahmadi, H., and Samice-Zonoozian, M. (2021). Reliability analysis-based safety factors for designing the tubular members of horizontal braces in offshore jacket structures. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 106(52), 1-12. doi.10.22034/JCEE.2020.9814.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از رویکرد الگوریتم‌های فراکاوشی به طور موثری می‌تواند موجب بهبود جستجوی جهت بردار یکه در روش‌هایی نظیر شبیه‌سازی خطی، مرتبه اول قابلیت اطمینان و شبیه‌سازی جهتی شود. به‌گونه‌ای که نتایج مطالعه حاضر نشان داد، ترکیب یک الگوریتم جدید توانست دقت و سرعت همگرایی روش LS را در حل مسئله پیچیده و سخت ارزیابی قابلیت اطمینان سکوه‌های جک‌تی فلزی افزایش دهد. علاوه بر این به دلیل کارایی بالای روش پیشنهادی در این مطالعه، می‌توان از این روش در کنار مدل‌های شبیه‌سازی جهت بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان سکوه‌های فراساحلی استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان بر مبنای روش شبیه‌سازی خطی (LS) برای مدل‌سازی احتمالاتی عملکرد سکوه‌های جک‌تی فولادی توسعه داده شد. با توجه به ضعف روش LS در یافتن بردار یکه، در این مطالعه از یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم‌های فراکاوشی در ترکیب با روش LS استفاده شد. برای این منظور، از یک الگوریتم ترکیبی با عنوان PSO-GWO که از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی PSO و GWO معرفی شده است، استفاده شد. کارایی روش ترکیبی جدید LS بر روی دو مسئله عددی بنچمارک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی مسائل بنچمارک حاکی از تخمین شاخص قابلیت اطمینان برای مثال‌های اول و دوم با خطای ۰/۵ و ۰/۷ درصد بود. سپس برای برآورد احتمال خرابی سکوه‌های جک‌تی فلزی تحت عدم قطعیت پارامترهای مؤثر شامل قطر و ضخامت جداره اعضا، خصوصیات مصالح استفاده شده در ساخت سکو، پارامترهای آئین‌نامه‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

برای تعریف تابع حالت حدی، از روابط آئین‌نامه API-RP2A بهره برده شد. سطح ایمنی سازه مذکور در دو سناریو با حضور نیروی امواج و ضربه وارده از سمت یک شناور به سکو ارزیابی شد. نتایج حاکی از دقت بالای روش

- validation. Probabilistic engineering mechanics, 19(4), 419-423. doi.org/10.1016/j.probenmech.2004.05.002.
- Manuel, L., Schmucker, D. G., Cornell, C. A., and Carballo, J. E. (1998). A reliability-based design format for jacket platforms under wave loads. *Marine Structures*, 11(10), 413-428. doi.org/10.1016/S0951-8339(99)00004-0.
- Mirzavand, S. (2013). Damage Identification in Offshore Structures with Wavelet Transform, M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 159p (In Persian).
- Pillai, T. M., and Prasad, A. M. (2000). Fatigue reliability analysis in time domain for inspection strategy of fixed offshore structures. *Ocean engineering*, 27(2), 167-186. doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00020-1.
- RP2A, A. P. I. (2007). Recommended practice for planning, designing and constructing offshore platforms-Working stress design. Washington, DC.
- Shabakhty, N., Jabbari, E., and Salehi, J. (2018). Reliability Analysis of damaged jacket platform under ship impact. *Journal Of Marine Engineering*, 14(27), 111-117. Doi.org/20.1001.1.17357608.1397.14.27.2.9.
- Shayanfar, M. A., Barkhordari, M. A., Barkhori, M., and Rakhshanimehr, M. (2017). An adaptive line sampling method for reliability analysis. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 41(3), 275-282. doi.org/10.1007/s40996-017-0070-3.
- Sørensen, J. D., and Engelund, S. (1995). Stochastic finite elements in reliability-based structural optimization. The 1st World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Germany.
- Zhao, Y., Dong, S., Jiang, F., and Guedes Soares, C. (2020). System reliability analysis of an offshore jacket platform. *Journal of Ocean University of China*, 19(1), 47-59. doi.org/10.1007/s11802-020-4181-2.
- Bai, Y., Yan, H. B., Cao, Y., Kim, Y., Yang, Y. Y., and Jiang, H. (2016). Time-dependent reliability assessment of offshore jacket platforms. *Ships and Offshore Structures*, 11(6), 591-602. doi.org/10.1080/17445302.2015.1038869.
- Birkinshaw, M., and Smith, D. (1996, May). The setting of target safety levels for the assessment of offshore structures. In *The Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- Dahmani, S., and Yebdri, D. (2020). Hybrid algorithm of particle swarm optimization and grey wolf optimizer for reservoir operation management. *Water resources management*, 34(15), 4545-4560. doi. 10.1007/s11269-020-02656-8.
- Der Kiureghian, A., and Ke, J. B. (1988). The stochastic finite element method in structural reliability. *Probabilistic engineering mechanics*, 3(2), 83-91. doi.org/10.1016/0266-8920(88)90019-7.
- Gjerde, P., Parsons, S. J., and Igbenabor, S. C. (1999). Assessment of jack-up boat impact analysis methodology. *Marine Structures*, 12(4-5), 371-401. doi.org/10.1016/S0951-8339(99)00022-2.
- Hezarjaribi, M., Bahaari, M. R., Bagheri, V., and Ebrahimian, H. (2013). Sensitivity analysis of jacket-type offshore platforms under extreme waves. *Journal of Constructional Steel Research*, 83, 147-155. doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.01.013.
- Jafari-Asl, J., Ohadi, S., Ben Seghier, M. E. A., and Trung, N. T. (2021). Accurate structural reliability analysis using an improved line-sampling-method-based slime mold algorithm. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7(2), 04021015. doi.org/10.1061/AJRUA6.0001129.
- Karadeniz, H., Toğan, V., Daloğlu, A., and Vrouwenvelder, T. (2010). Reliability-based optimisation of offshore jacket-type structures with an integrated-algorithms system. *Ships and Offshore Structures*, 5(1), 67-74. doi.org/10.1080/17445300903098334.
- Karimi, H. R., KaramZadeh, N. S., and Golami, E. O. D. R. (2017). Effect of elevational and member damage on jacket strength: sensitivity and reliability review of South Pars phase-20 jacket, using push-over analysis. *Ocean Engineering*, 143, 209-216. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.001.
- Koutsourelakis, P. S. (2004). Reliability of structures in high dimensions. Part II. Theoretical