معرفی یک روش بهینه‌سازی چند هدفه‌ی ساده و قابل قبول برای پیش‌بینی ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق حفار

عارفه امامی[۱] ، احمد رضا مصطفی قره باغی[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، a_emami@sut.ac.ir
[۲] استاد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز mgharabaghi@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷

کلمات کلیدی:
نیمه مغروق
بهینه‌سازی
جستجوی شبکه‌ای
توابع چندهدفه
پاسخ حرکات

چکیده

برای طراحی بهینه ابعاد بدنه یک سکوی نیمه‌مغروق، روشی نیاز است که جواب‌های بهینه را با اهداف مشخصی در زمان محاسباتی کوتاه بدست آورد. این مطالعه به معرفی الگوریتم جستجوی‌شبکه‌ای به‌صورت تابع سه هدفه با اهداف حداقل کردن وزن، کاهش حرکات هیو و پیچ بدنه سکوی نیمه‌مغروق می‌پردازد. برای این منظور، ابتدا معادلات وزن بدنه، حرکات هیو و پیچ این سکو به‌صورت توابع پارامتری گسسته شدند. متغیرها و قیود طراحی برای سکوی نیمه مغروق در نظر گرفته شد. سپس الگوریتم فوق به‌صورت تک هدفه با هدف کاهش وزن بدنه نیمه‌مغروق نوشته شد و کارایی آن با مقایسه نتایج مطالعات پیشین بررسی شد. در ادامه، الگوریتم جستجوی‌شبکه‌ای به‌صورت توابع سه هدفه توسعه داده شد و جواب‌های قابل قبولی را در کوتاه‌ترین زمان محاسباتی نشان داد. این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی‌شبکه‌ای یک راهکار مناسب برای بهینه‌سازی چند هدفه بوده و می‌تواند به طراحی اقتصادی‌تر و کارآمدتر سکوهای شناور کمک کند.

Introducing a simple and reliable multi-objective optimization method to estimate hull dimensions of a semi-submersible rig

Arefeh Emami[1], Ahmad Reza Mostafa Gharabaghi[2*]

[1] *PhD candidate, Sahand University of Technology;* a_emami@sut.ac.ir
[2] *Professor, Sahand University of Technology;* mgharabaghi@sut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 29 Sep. 2019
Accepted: 05 Apr. 2020

Keywords:
Semi-submersible
Optimization
Grid Search
Multi-objective functions
Motions response

ABSTRACT

For optimal design of the hull dimensions of a semi-submersible platform, a method is required that calculates optimal answers in a short time according to the certain objectives. In this study, the grid search (GS) algorithm was introduced in the form of triple-objective function in order to minimize the hull weight and reduce the heave and pitch motion response.

For this purpose, first the equations of the hull weight and heave and pitch motion response were discretized as the parametric equations. The design variables and constraints of the semi-submersible platform were considered. Then, this algorithm was implemented as a single-objective function with the objective of minimizing hull weight of a semi-submersible platform and its efficiency was evaluated by comparing the results with the results from previous studies. Subsequently, the GS algorithm was developed as the triple-objective function, which gives acceptable results in the shortest computational time. This study shows that the GS algorithm is an appropriate method for multi-objective optimization and can contribute to the more economical and efficient design of floating platforms.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

۱ - مقدمه

سکوهای شناور یک جایگزین مناسب برای سکوهای ثابت جهت حفاری و استخراج نفت و گاز از آب‌های عمیق‌تر دریا هستند. یکی از این سکوها، سکوی نیمه مغروق است[۱]. سکوی نیمه مغروق یک سکو با کاربری عموماً نفت و گاز است که برای تولید ذخایر نفتی از آب‌های عمیق با اعماق بالاتر از ۱۰۰۰ متر استفاده می‌شود. این سکو دارای ظرفیت حفاری بالایی بوده و می‌تواند از مکانی به مکان دیگر جابجا شود. سکوهای نیمه مغروق دارای هندسه ساده شامل بدنه، عرشه، سیستم‌های مهاری و رایزر هستند. این سکوها به دلیل شناور بودن، شش درجه آزادی حرکت شامل سرج، سوای، هیو، پیچ، رول و یاو دارند. سیستم‌های مهاری نقش مهمی را در پاسخ حرکات سرج، سوای و یاو ایفا می‌کنند در حالی که بدنه این سکو نقش مهمی در کنترل حرکات هیو، پیچ و رول دارد. سکوی نیمه مغروق حرکات هیو، پیچ یا رول نسبتاً زیادی نسبت به سایر حرکات خود دارد که افزایش این حرکات در عملیات حفاری مشکل ایجاد کرده و حتی ممکن است باعث صدمه زدن به سیستم‌های رایزر شده و گاهی عملیات حفاری را متوقف کند. در نتیجه کاهش این حرکات در بهبود عملکرد آن نقش بسزایی خواهد داشت. یکی از راهکارهای بهبود حرکات سکوی نیمه مغروق بهینه کردن ابعاد هندسی بدنه آن است. به طور کلی، در طراحی ابعاد بدنه سکوهای نیمه مغروق دو فاکتور بایستی همزمان در نظر گرفته شود: (۱) کاهش وزن بدنه سکوی نیمه مغروق که باعث کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. (۲) کاهش حرکات سکوی نیمه مغروق که می‌تواند در کارایی بهتر عملیات حفاری و افزایش اکتشافات نفتی مؤثر باشد. یک راه برای پیش‌بینی ابعاد بهینه سکوهای نیمه مغروق حفار استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که بتواند جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را با عملیات محاسباتی کمتری ارائه دهد[۲]. بهینه‌سازی بهترین روش برای طراحی سازه‌ها است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی گوناگونی برای حل مسائل مهندسی وجود دارد به‌گونه‌ای که می‌توانند مسائل پیچیده را در زمان محاسباتی کوتاه‌تری حل کنند.

به طور کلی دو دسته الگوریتم بهینه‌سازی وجود دارد: (۱) الگوریتم بهینه‌سازی دقیق و (۲) الگوریتم بهینه‌سازی تقریبی. الگوریتم بهینه‌سازی دقیق برای مسائل پیچیده مناسب نیست زیرا زمان محاسبات را بسیار پیچیده خواهد کرد. الگوریتم‌های تقریبی الگوریتم‌هایی هستند که جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را برای مسائل پیچیده ارائه می‌دهند[۳و ۴]. از جمله این الگوریتم‌ها را می‌توان به الگوریتم ژنتیک[۱] (GA)، الگوریتمGRG[۲]، الگوریتم شبیه‌سازی آنالینگ[۳] (SA) و الگوریتم جستجوی شبکه‌ای[۴] (GS) اشاره کرد.

در میان این الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی انواع مختلف سازه‌های دریایی استفاده فراوانی شده است[۱۰-۵]. اگرچه الگوریتم ژنتیک دارای مزایایی از جمله توزیع جستجوی بالا و قابلیت جستجو در محدوده وسیعی از مقادیر است اما درک روند کد نویسی آن و زمان محاسباتی نسبتاً بالا برای توابع چندهدفه از جمله معایب این الگوریتم است. الگوریتم بهینه‌سازی GRG نیز برای بهینه کردن ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق استفاده شده است[۱۱]. این الگوریتم توسط Microsoft Excel Solver انجام می‌شود که یک نرم‌افزار ساده و قابل دسترس است؛ اما عموماً برای توابع تک هدفه کاربرد داشته و قابلیت استفاده برای حل پارامترهای چند منظوره را ندارد. از دیگر الگوریتم‌های تقریبی که برای بهینه‌سازی سازه‌های دریایی استفاده می‌شود الگوریتم شبیه‌سازی آنالینگ است[۱۲ و ۱۳]. این الگوریتم در سطح وسیعی از مسائل بهینه‌سازی با چندین نقاط مینیمم محلی استفاده می‌شود و عموماً جواب‌های قابل قبولی را برای حل مسئله فراهم می‌کند. با این حال برای مسائلی که نیاز به تکرار دارند بخصوص اگر تابع هدف پیچیده باشد دارای سرعت بسیار پایینی است [۱۴].

الگوریتم جستجوی شبکه‌ای از دیگر الگوریتم‌های تقریبی بوده که تاکنون برای بهینه‌سازی سکوهای شناور استفاده نشده است. این الگوریتم دارای مزایای زیادی نسبت به سایر الگوریتم‌های مذکور است. از جمله مزایای آن را می‌توان به جستجوی مقادیر در محدوده وسیع، عدم محدودیت در تقسیم‌بندی بازه‌ها، تغییر تقسیم‌بندی هر پارامتر بر اساس اهمیت آن، درک و پیاده‌سازی آسان و محاسبه جواب‌های بهینه در زمان کوتاه اشاره کرد. لازم به ذکر است که الگوریتم فوق در علوم مهندسی پزشکی به‌صورت تک هدفه استفاده فراوانی می‌شود [۱۵].

علاوه بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی گفته شده، روش‌های بهینه سازی دیگری از جمله الگوریتم‌های خطی و غیر خطی، الگوریتم‌ها با برنامه ریاضیاتی و الگوریتم‌های شبکه عصبی وجود دارد که به صورت توابع تک هدفه و چند هدفه برای سازه‌های شناور بکار رفته است.

مطالعات زیادی به‌صورت تک هدفه برای بهینه کردن سکوهای شناور نیمه مغروق وجود دارد از جمله Akagi و همکاران (۱۹۸۴) به بهینه‌سازی هندسه سکوی نیمه مغروق با روش quadratic programming با هدف کاهش واریانس دامنه حرکت هیو تحت امواج دریا در شرایط عملیاتی پرداختند [۱۶]. Clauss و Birk (۱۹۹۶) به بهینه کردن هندسه انواع گوناگون سازه‌های شناور بزرگ به روش non linear programming با هدف مینیمم کردن زمان از کارافتادگی پرداختند [۱۷]. بهینه‌سازی کامل بدنه سکوهای نیمه مغروق و سکوهای ثلبت بر اساس معیار sea

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

keeping توسط Birk و Clauss (۲۰۰۱) انجام شد[۱۸]. آن‌ها از الگوریتم non-interactive با تابع هدف مینیمم کردن زمان از کارافتادگی در شرایط کوتاه مدت دریا استفاده کردند. Sharma و Kim (۲۰۱۰) به طراحی مفهومی بهینه یک سکوی نیمه مغروق برای تولید نفت و گاز در آب عمیق با هدف حداقل کردن تابع هزینه پرداختند[۱۹]. Venzon و همکاران (۲۰۱۳) فرآیندی برای بهینه‌سازی بدنه یک سکوی نیمه مغروق بر اساس مدل‌های پیش‌بینی به‌منظور افزایش سرعت تخمین پاسخ حرکت هیو آن ارائه دادند[۲۰]. Chen و Uddin (۲۰۱۳) پاسخ حرکت سکوی نیمه مغروق با هندسه متفاوت را با استفاده از ابزار طراحی HYDA، در محیط فرترن توسعه داده در GVA با هدف طراحی و بهینه‌سازی سکوهای شناور بهینه کردند[۲۱]. Ringsberg و همکاران (۲۰۱۴) یک روش بهینه‌سازی برای سکوهای فراساحل sell-plated با هدف کاهش وزن ارائه دادند[۲۲].

از سوی دیگر مطالعات بسیار کمی در مورد بهینه‌سازی سکوهای شناور به‌صورت توابع چندهدفه وجود دارد. Brik در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی بدنه‌های سکوهای دریایی به‌صورت توابع چند هدفه پرداخت. توابع هدف شامل کاهش حرکت هیو در مقابل افزایش بار عرشه به طور هم زمان بود [۲۳ و ۲۴]. Park و همکاران (۲۰۱۵) به بهینه‌سازی ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق FPU[۵] به‌صورت چند هدفه با هدف کاهش وزن و کاهش حرکت هیو پرداختند. آن‌ها دو تابع هدف را در یک تابع وزنی ارائه دادند و بهینه‌سازی را به‌صورت یک تابع تک هدفه با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی انالینگ ادامه دادند[۱۳].

با توجه به عدم وجود مطالعات تحقیقاتی وسیعی در زمینه‌ی بهینه سازی چند هدفه سکوهای نیمه مغروق، توسعه یک روش ساده و سریع برای بهینه کردن آن به‌صورت چند هدفه به گونه‌ای که جواب‌های قابل قبولی را در کوتاه‌ترین زمان ممکن بدون سعی و خطا ارائه دهد ارزشمند خواهد بود. در این مطالعه، بر اساس مزایای الگوریتم جستجوی شبکه‌ای و با ایده گرفتن از شاخه علوم مهندسی پزشکی، برای اولین بار الگوریتم فوق به‌صورت تابع چندهدفه به منظور پیش‌بینی ابعاد بدنه یک سکوی نیمه مغروق توسعه داده شد. توابع هدف شامل حداقل کردن وزن بدنه، کاهش پاسخ حرکت هیو و کاهش پاسخ حرکت پیچ سکوی نیمه مغروق است. برای این منظور در ابتدا معادله وزن بدنه و همینطور پاسخ حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق با روش تئوری موریسون تحت امواج کوتاه مدت دریا با زاویه صفر درجه به‌صورت پارامتری گسسته می‌شود. پس از آن قیود طراحی از جمله قید وزن و شناوری، هوا خور، آبخور، قیود مشخصات هندسی و قیود پایداری برای سکوی نیمه مغروق در نظر گرفته خواهد شد. به منظور اطمینان از کارایی این الگوریتم برای بهینه کردن ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق، الگوریتم فوق به‌صورت تک هدفه با هدف حداقل کردن وزن بدنه یک سکوی نیمه مغروق در محیط متلب نوشته می‌شود و نتایج حاصل از اجرای آن با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه می‌گردد. با اطمینان از صحت کارایی آن، در ادامه این الگوریتم به‌صورت توابع سه هدفه و مستقل از هم توسعه داده می‌شود. نتایج به دست آمده با ابعاد واقعی یک سکوی نیمه مغروق ساخته و اجرا شده مقایسه می‌گردد.

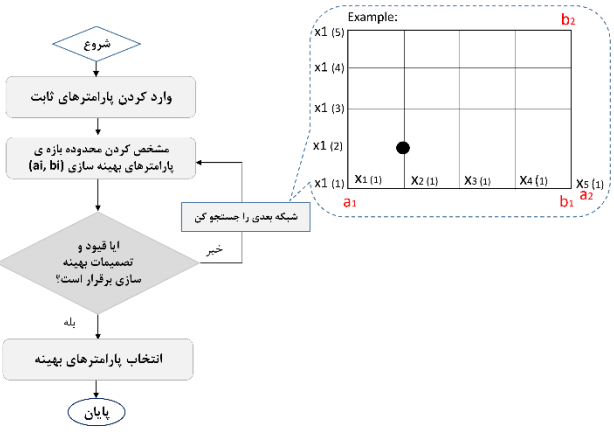
روند این مطالعه در ادامه به شرح زیر خواهد بود: در بخش دوم به معرفی روش جستجوی شبکه‌ای پرداخته می‌شود. بخش سوم متغیرها و قیود طراحی را بیان می‌کند. همچنین معادلات پاسخ حرکات هیو و پیچ به‌صورت پارامتری در این بخش توضیح داده خواهد شد. توابع هدف بهینه‌سازی سکوی نیمه مغروق در بخش چهارم بیان می‌شود. در بخش پنجم به صحت کارایی الگوریتم ارائه شده پرداخته خواهد شد. بخش ششم مربوط به توسعه الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی شبکه‌ای به‌صورت سه هدفه و بررسی نتایج و مقایسه آن با یک سکوی نیمه مغروق واقعی است. در نهایت بخش هفتم به جمع‌بندی از این مطالعه اختصاص دارد.

۲ – روش جستجوی شبکه‌ای

الگوریتم جستجوی شبکه‌ای زیرگروه الگوریتم‌های تقریبی است که روند آن بر اساس جستجوی معین بوده و بر مبنای یک جواب است. این الگوریتم توانایی ذخیره اطلاعات را در حافظه خود داشته و در حین جستجوی شبکه، اطلاعات را در حافظه خود ذخیره می‌کند. الگوریتم فوق مسئله را با استفاده از قیود و تصمیمات تعریف شده حل می‌کند.

ساختار کلی این الگوریتم؛ جستجوی بر روی شبکه محاسباتی است. اگر مسئله دارای بازه (a_i,b_i) باشد که $i=1,2,..n$ است و بازه به Δ_i بخش به شکل $x_i^{(1)},x_i^{(2)},....,x_i^{(i)}$ تقسیم شده باشد، آنگاه برای محاسبه جواب بهینه با توجه به هدف مورد نظر و قیود مطرح شده، جستجو از نقطه اول و سطر اول $(x_1^{(1)},x_2^{(1)})$ در شبکه محاسباتی شروع می‌شود. این نقطه با تمام نقاط موجود در ستون‌های شبکه (مانند $x_2^{(1)},x_2^{(2)},x_2^{(3)},x_2^{(4)},..$) با توجه به تابع هدف مسئله کنترل می‌شود و جواب بهینه را در حافظه خود ذخیره می‌کند. سپس با جابجایی نقطه جاری به نقطه همسایه در همان سطر یعنی $(x_1^{(2)},x_2^{(1)})$، روند جستجو دوباره تکرار می‌گردد. با جستجوی تمام نقاط موجود در شبکه، بهینه‌ترین جواب ذخیره شده در حافظه خود را نمایش می‌دهد و الگوریتم پایان می‌یابد. لازم به ذکر است که در این الگوریتم؛ جستجو در اولین جواب بهینه محلی متوقف نمی‌شود بلکه تمام حالات موجود را بررسی می‌کند و در نهایت بهینه‌ترین جواب را به دست می‌آورد. شکل ۱ روند کلی این الگوریتم را به‌صورت فلوچارت نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]



شکل ۱- فلوچارت جستجوی شبکه‌ای

۳- متغیرهای طراحی سکوی نیمه مغروق

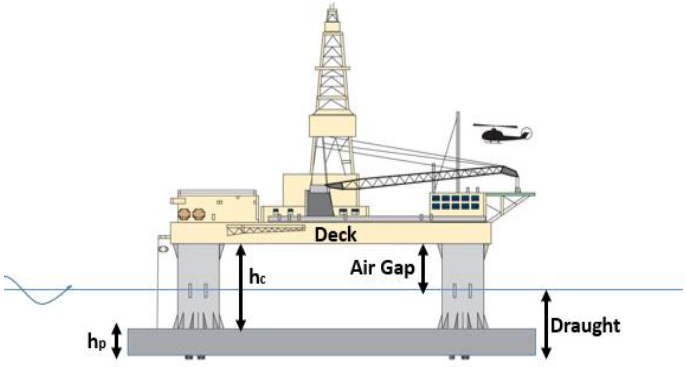
بدنه سکوی نیمه مغروق شامل سه بخش مختلف است:

۱) عرشه که در بالاترین بخش بدنه سکو قرار گرفته است.

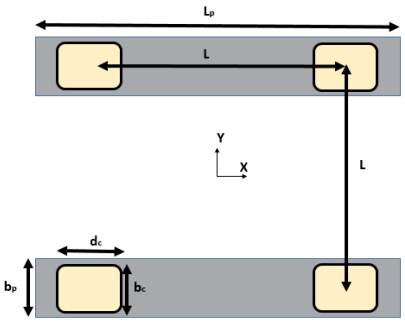
۲) پانتون‌ها که در زیر سطح آب قرار داشته و شناوری لازم را فراهم می‌کنند.

۳) ستون‌ها که به پانتون و عرشه متصل هستند و مهاربندهایی به آن‌ها متصل هستند.

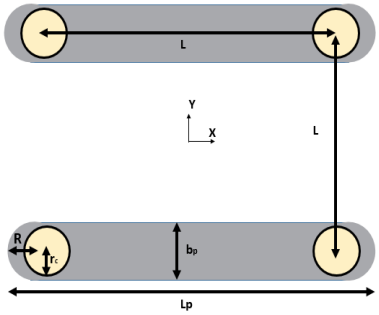
برای پیش‌بینی ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق، یک شکل معینی از سکو لازم است. با توجه به هدف این مطالعه، دو هندسه سکوی نیمه مغروق در نظر گرفته شد (اشکال ۲-۴). شکل ۳ سکوی نیمه مغروق پیشنهاد شده توسط Gallala (۲۰۱۳) است که به منظور شناسایی کفایت و کارایی الگوریتم جستجوی شبکه‌ای به کار گرفته شد. شکل ۴ شکل شماتیک از هندسه بدنه یک سکوی نیمه مغروق اجرا شده است که برای توسعه الگوریتم فوق به‌صورت تابع سه هدفه استفاده می‌شود.



شکل ۲- نمای روبروی سکوی نیمه مغروق



شکل ۳- نما از بالای سکوی نیمه مغروق در تحقیق Gallala (۲۰۱۳)



شکل ۴- نما از بالای سکوی نیمه مغروق ایران امیرکبیر

در اشکال ۲ تا ۴، $L, h_c, d_c, b_c, b_p, L_p, R, h_p$ به ترتیب ارتفاع پانتون، شعاع دماغه، طول پانتون، عرض پانتون، عرض ستون مستطیلی، طول ستون مستطیلی، ارتفاع ستون و فاصله بین ستون‌ها است.

۱-۳. وزن و شناوری سکوی نیمه مغروق

وزن بدنه سکوی نیمه مغروق شامل topside (TPS)، وزن variable deck load (VDL)، وزن پانتون‌ها، وزن ستون‌ها و وزن مخازن تعادل است که مجموع این‌ها وزن کل را نشان می‌دهد. در این مطالعه، برای محاسبه ابعاد بهینه بدنه‌ی سکوی نیمه مغروق، وزن TPS و VDL ثابت در نظر گرفته شد. وزن پانتون‌ها و ستون‌ها به‌صورت جدول ۱ برای اشکال ۳ و ۴ به‌صورت پارامتری نوشته شد. همچنین فرض گردید که وزن مهاربند نسبت به سایر بخش‌ها ناچیز است در نتیجه از بهینه کردن آن صرفنظر شد.

جدول ۱- معادله وزن سکوی نیمه مغروق (W_t) به‌صورت پارامتری

اشکال	(W_t)
شکل ۳	$\rho_{steel}\left(2\left(L_p\, b_p\, h_p\right)+4\left(d_c\, b_c\, h_c\right)\right)$
شکل ۴	$\rho_{steel}\left(2\left(\left(L_p-2R\right)b_p\, h_p\right)+R\pi b_p\, h_p+4\left(\pi r_c^2\right)h_c\right)$

که در این جدول ρ_{steel} چگالی بدنه سکوی نیمه مغروق از جنس فولاد است.

پارامتر مهم دیگر برای بهینه‌سازی ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق، بحث شناوری آن بوده که برابر با وزن سیال جابجا شده است. معادله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

پارامتری برای وزن سیال جابجا شده در اشکال ۳ و ۴ در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- معادله وزن سیال جابجا شده (Δ_t) به‌صورت پارامتری

اشکال	($\Delta_t = \rho_w \nabla$)
شکل ۳	$\rho_w \left(2\left(L_p\, b_p\, h_p\right)+4\left(b_c\, d_c\left(draught-h_p\right)\right)\right)$
شکل ۴	$\rho_w \begin{pmatrix} 2\left(\left(L_p-2R\right)b_p\, h_p\right)+R\pi b_p\, h_p+ \\ 4\left(\pi r_c^2\right)\left(draught-h_p\right) \end{pmatrix}$

که در این معادلات ∇ حجم جابجایی سکوی نیمه مغروق و ρ_w چگالی آب دریا است.

وزن مخازن تعادل[۶] یک پارامتر مهم برای بهینه‌سازی سکوی نیمه مغروق است که در محاسبه وزن کل سکوی نیمه مغروق می‌تواند مؤثر باشد. در محاسبه وزن مخازن تعادل بایستی یک ضریب پرشدگی که نسبت حجم مخازن تعادل به حجم پانتون است در نظر گرفته شود. معادله وزن مخازن تعادل برای سکوی نیمه مغروق اشکال ۳ و ۴ به‌صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$W_{ballast\ water} = \Delta_t - \left(w_{pontoons} + w_{columns} + w_{VDL} + w_{TPS}\right) \quad (۱)$$

قابل توجه است که مقدار وزن مخازن تعادل بایستی از صفر بیشتر و از ۰/۷۵ برابر حجم پانتون (ضریب پرشدگی[۷]) کمتر باشد. ۰/۲۵ درصد باقی‌مانده شامل:

- ۱۰ درصد اتاق پمپ و موتور
- ۱۰ درصد برای اصلاح trim و heel
- ۵ درصد خطا ناشی از شکل هندسی مخزن است که در بهینه‌سازی گوشه‌های آن به شکل مستطیلی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ قید وزن مخزن تعادل را برای اشکال ۳ و ۴ نشان می‌دهد.

جدول ۳- قید وزن مخزن تعادل

اشکال	قید وزن مخزن تعادل
شکل ۳	$0 < W_{ballast\ water} < \left(2\left(L_p\, b_p\, h_p\right)\right) \times filling\ ratio$
شکل ۴	$0 < W_{ballast\ water} < \left(2\left(\left(L_p-2R\right)b_p\, h_p\right)+R\pi b_p\, h_p\right) \times filling\ ratio$

۲-۳. پایداری بدنه سکوی نیمه مغروق

اولین مرحله برای ارزیابی پایداری بدنه یک سکوی نیمه مغروق، تعیین ارتفاع متاسنتریک است که از مرکز جرم و مرکز شناوری حاصل می‌شود. مطابق اشکال ۳ و ۴، سیستم مختصات کارتزین بر روی سطح آزاد آب و در مرکز آن سکو واقع شده است که محور z محور عمودی به سمت بالا و محور افقی در راستای x در طول پانتون‌ها است. به دلیل متقارن بودن سکوهای نیمه مغروق در نظر گرفته شده، مرکز جرم و شناوری در راستای x و y صفر هستند و تنها مرکز جرم و شناوری در راستای عمودی z وجود خواهد داشت. برای محاسبه مرکز جرم در راستای عمودی (VCG)، سکو به چهار بخش تقسیم می‌شود: مرکز جرم TPS، مرکز جرم VDL، مرکز جرم پانتون‌ها، مرکز جرم ستون‌ها و مرکز جرم مخزن تعادل. برای تعیین مرکز شناوری در راستای عمودی (VCB)، سکو به دو بخش تقسیم می‌شود: مرکز شناوری ستون و مرکز شناوری پانتون. جدول ۴ مرکز جرم و مرکز شناوری هر بخش را نشان می‌دهد. قابل توجه است که در این مطالعه فاصله عمودی از کف پانتون‌های سکو در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مرکز جرم و شناوری عمودی (فاصله از کف سکو)

بخش	VCG	VCB
TPS	مقدار ثابت	-
VDL	مقدار ثابت	-
پانتون‌ها	نصف ارتفاع پانتون‌ها	نصف ارتفاع پانتون‌ها
ستون‌ها	ارتفاع پانتون‌ها + نصف ارتفاع ستون‌ها	ارتفاع پانتون‌ها + نصف (ارتفاع ستون‌ها – هوا خور)
مخازن تعادل	نصف ارتفاع پانتون‌ها	-

بر طبق Aker solution، مقدار مرکز جرم TPS و VDL ثابت است که به ترتیب مقداری بین ۸ تا ۱۲ متر و ۴ تا ۸ متر بالای عرشه در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

پس از محاسبه مرکز جرم و شناوری؛ ارتفاع متاسنتریک در شرایط عملیاتی مطابق با معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود.

$$GM_x = KB + BM_x - KG \quad (۲)$$

$$GM_y = KB + BM_y - KG \quad (۳)$$

که در آن KB مرکز شناوری که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود، KG مرکز جرم بوده و مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید و BM ارتفاع از مرکز شناوری تا نقطه متاسنتر است که در شرایط عملیاتی از رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌شود.

$$KB = \frac{\hbar_{VCB}^{pontoons} \forall^{pontoons} + \hbar_{VCB}^{columns} \forall^{columns}}{\forall^{pontoons} + \forall^{columns}} \quad (۴)$$

$$KG = \frac{\begin{pmatrix} \hbar_{VCG}^{pontoons} m^{pontoons} + \hbar_{VCG}^{columns} m^{columns} \\ + \hbar_{VCG}^{TPS} m^{TPS} + \hbar_{VCG}^{VDL} m^{VDL} + \hbar_{VCG}^{ballast} m^{ballast} \end{pmatrix}}{\left(m^{pontoons} + m^{columns} + m^{TPS} + m^{VDL} + m^{ballast}\right)} \quad (۵)$$

که $\forall$ حجم هر بخش است. m جرم، $\hbar$ فاصله عمودی از کف سکو است.

$$BM_y = \frac{I^{yy}}{\nabla} \quad (۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

$$BM_x = \frac{I^{xx}}{\nabla} \qquad (۷)$$

که در این رابطه I^{yy} و I^{xx} به ترتیب ممان دوم سطح آبخور در جهت y و x است. در این مطالعه از اثرات اسلوشینگ[۸] واقع در مخازن تعادل روی پایداری سکو صرفنظر شده است و قیود در نظر گرفته شده برای ارتفاع متاسنتر بر اساس آیین نامه DNV بیشتر از ۱/۵ متر و کمتر از ۴ متر است.

۳-۳. قید هوا خور

یک پارامتر بسیار مهم در طراحی بهینه سکوی نیمه مغروق قید هوا خور است. هر سکوی نیمه مغروق بایستی هوا خور کافی داشته باشد که از خطر برخورد ضربه موج به عرشه محافظت شود و در نتیجه از خرابی تجهیزات روی عرشه جلوگیری کند[۲۵]. هوا خور موردنیاز برای شرایط عملیاتی و بقا به‌صورت معادله (۸) بیان می‌شود.

$$d_p + h_c - d \geq Air\,Gap \qquad (۸)$$

قابل توجه است که در هنگام عملیات مقدار هوا خور بایستی ثابت باشد؛ بنابراین در این مطالعه با توجه به هدف بهینه‌سازی در شرایط عملیاتی، مقدار هوا خور ثابت در نظر گرفته شده است.

۴-۳. قید هندسی

در طراحی بهینه ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق، ابعاد محاسبه شده بایستی به‌گونه‌ای باشند که قابل طراحی و اجرا باشد. جدول ۵ قیود هندسی بکار گرفته شده در الگوریتم جستجوی شبکه‌ای را نشان می‌دهد. این قیود با بررسی تعدادی از سکوی نیمه مغروق اجرا شده در سطح جهان تعریف شده‌اند.

جدول ۶- قیود هندسی معرفی شده به الگوریتم

نسبت عرض ستون به عرض پانتون	$b_c \leq 0.9 b_p$
نسبت عرض به ارتفاع پانتون	$1.5 \leq \frac{b_p}{h_p} \leq 2.5$
نسبت فاصله بین ستون‌ها تا طول پانتون	$L \leq 0.95 L_p$

۵-۳. معادلات حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق

از آنجایی که هدف اصلی این مطالعه بیان یک روش بهینه‌سازی چند هدفه برای پیش‌بینی ابعاد بدنه یک سکوی نیمه مغروق بوده به‌گونه‌ای که هر مهندس به آسانی بتواند از آن بهره بگیرد است، لذا از معادله موریسون و نیروی فرودکریلوف برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی این سکو تحت شرایط امواج کوتاه مدت دریا بهره گرفته شد. فرض شد که سیال همگن، غیر لزج، غیرقابل تراکم و جریان غیر چرخشی است و سکوی نیمه مغروق تحت امواج پیشرونده دامنه کوتاه تک جهته در راستای پانتون‌ها (جهت صفر درجه) قرار گرفته است. از اثرات باد و نیروی درگ هیدرودینامیکی چشم پوشی شده و برای ساده سازی حل، فرض می‌شود که اثرات اندرکنش بین مؤلفه‌های سازه ناچیز بوده و تکنیک سوپرپوزیشن قابل استفاده است. در نتیجه عملگر دامنه پاسخ[۹] (RAO) حرکات هیو و پیچ این سکو با کمک معادلات یک درجه آزادی حرکت یک سیستم صلب قابل محاسبه است که در ادامه ذکر می‌شود.

۱-۵-۳. حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق

به منظور محاسبه پاسخ حرکت هیو و پیچ، فرض می‌شود که قطار موج دامنه کوتاه است لذا حرکات تحریک شده به سازه کوچک بوده و اندرکنش بین مودهای مختلف نوسانی قابل چشم‌پوشی خواهد بود. در این صورت معادله حرکات قابل تبدیل به سیستم یک درجه آزادی است و معادلات حرکات هیو و پیچ به ترتیب به صورت روابط (۹) و (۱۰) نوشته می‌شود.

$$(m + A_{33})\ddot{Z} + B_v \dot{Z} + C_h Z = F(t) \qquad (۹)$$

$$(I + I_a)\ddot{\theta} + B_v \dot{\theta} + C_p \dot{\theta} = M(t) \qquad (۱۰)$$

که m جرم سکو، A_{33} جرم اضافی، B_{vh} و B_{vp} ضرایب میرایی خطی، C_h و C_p به ترتیب سختی هیدرواستاتیکی حرکت هیو و سختی زاویه‌ای حرکت پیچ است. I ممان اینرسی جرمی سکو و I_a ممان اینرسی جرمی اضافی است. $F(t)$ و$M(t)$ به ترتیب نیرو و ممان تحریک می‌باشند. مقادیر هر یک از پارامترهای ذکر شده در جدول ۷ به‌صورت معادلات پارامتری نشان داده شده است.

جدول ۷- معادلات پارامتری مقادیر پارامترهای معادلات یک درجه آزادی

نوع	حرکت هیو	حرکت پیچ
جرم و ممان اینرسی جرمی	Δ_t	$(\Delta_t)\times\left(r_y^2 + (KG - KB)^2\right)$
جرم اضافی	$\sum A_{33}$	$\sum A_{11}\times z^2 + \sum A_{33}\times x^2 + \sum A_{55}$
سختی هیدرواستاتیکی	$\rho_{water}\times g \times water\ \ plane\ \ area$	$g \times \Delta_t \times GML$

که در این جدول A_{33} ,A_{11} وA_{55} به ترتیب جرم اضافی حرکات هیو، سرج و پیچ سکوی نیمه مغروق است که برای محاسبه آن‌ها می‌توان به مرجع [۲۶] مراجعه کرد. r_y شعاع ژیراسیون، GML ارتفاع متاسنتریک در راستای طولی و g شتاب جاذبه است.

برای محاسبه $F(t)$ و$M(t)$ به شتاب افقی و عمودی ذرات موج و فشار ذرات موج نیاز است که مطابق با روابط (۱۱) تا (۱۳) به دست می‌آیند.

$$\dot{w} = -a\omega^2 e^{-kd}\sin(kx - \omega t) \qquad (۱۱)$$

$$\dot{u} = a\omega^2 e^{-kd}\cos(kx - \omega t) \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

$$p = a\frac{\rho\omega^2}{k}e^{-kd}\cos(kx-\omega t) \qquad (۱۳)$$

که a دامنه موج، ω فرکانس موج، k عدد موج، d آبخور سکوی نیمه مغروق است. در نتیجه نیرو و ممان تحریک از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه خواهد شد.

$$F(t)=\sum f_{33} \qquad (۱۴)$$

$$M(t)=\sum f_{55}-\sum f_{33}\,x+\sum f_{11}\,z \qquad (۱۵)$$

که در این روابط f_{33} نیروی تحریک وارده در راستای حرکت هیو، f_{11} نیروی تحریک وارد شده به بخش‌های سکو در راستای حرکت سرج و f_{55} ممان تحریک وارد شده در راستای حرکت پیچ است [۲۶].

با محاسبه نیرو و ممان تحریک، مقدار عملگر دامنه پاسخ سکوی نیمه مغروق از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود[۲۷].

$$RAO_i = \frac{|F_i|}{C_i\sqrt{\left(1-r_i^2\right)^2+\left(2\xi r_i\right)^2}} \qquad (۱۶)$$

$|F_i|$ نیرو یا ممان تحریک در مود حرکتی مورد نظر، C_i سختی هیدرواستاتیکی، r_i نسبت فرکانس طبیعی سازه به فرکانس تحریک موج و ξ مقدار درصد میرایی است که معمولاً بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد است.

مقدار فرکانس طبیعی (ω_n) از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود و در نتیجه پریود طبیعی سازه مطابق با رابطه (۱۸) خواهد شد که بر اساس آیین نامه DNV مقدار آن بایستی از ۲۰ ثانیه بیشتر باشد و در الگوریتم جستجوی شبکه‌ای این قید بایستی در نظر گرفته شود.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C_i}{m_i + A_{ii}}} \qquad (۱۷)$$

$$T_n = 2\pi\sqrt{\frac{m_i + A_{ii}}{C_i}} \qquad (۱۸)$$

اندیس i مد حرکتی مورد نظر را نشان می‌دهد.

۶-۳. محدوده‌ی پارامترهای طراحی

هر پارامتر طراحی نیاز به محدوده‌ای دارد تا جستجو در آن محدوده انتخاب شده صورت گیرد. این بازه‌ها بر اساس اهمیت هر پارامتر، شرایط اجرایی و اقتصادی تعیین می‌شود. محدوده‌ی بکار رفته برای هر پارامتر در سکوهای نیمه مغروق در نظر گرفته شده (اشکال ۳ و ۴) در بخش پنجم و ششم بیان می‌شود.

۴. بهینه‌سازی چندهدفه

برای پیش‌بینی دقیق‌تر ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق، ضروری است که الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت چندهدفه توسعه یابد. در این مطالعه، به منظور بهینه سازی، هر سه تابع هدف به‌صورت توابعی جدا در نظر گرفته شد که شامل:

۱- مینیمم کردن وزن بدنه سکوی نیمه مغروق

برای حداقل کردن وزن بدنه (ستون‌ها و پانتون‌ها)، تابع هدف وزن بایستی مینیمم گردد. این تابع به‌صورت رابطه (۱۹) بیان شد.

$$f(w) = \min(W_{total}) \qquad (۱۹)$$

تابع هدف وزن محاسبه شده بایستی در محدوده $\overline{w}_{SSP}-\varepsilon \le f(w) \le \overline{w}_{SSP}+\varepsilon$ قرار گیرد. $\overline{w}_{SSP}$ میانگین وزن تعدادی سکوی نیمه مغروق ساخته و اجرا شده است و ε میزان خطا است. در این مطالعه میانگین وزن بدنه ۸۴۲۵ تن و میزان خطا ۵۰۰ تن در نظر گرفته شد.

۲- مینیمم کردن حرکت هیو سکوی نیمه مغروق

۳- مینیمم کردن حرکت پیچ سکوی نیمه مغروق

به منظور کاهش حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق، تابع پاسخ حرکات بایستی حداقل شود. پاسخ حرکات سکوی نیمه مغروق از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} &S_s(\omega) = RAO^2 \times S_J, \\ &m_{0s} = \int_0^\infty S_s(\omega)d\omega, \quad and \\ &(2S)_s = 4\sqrt{m_{0s}} \\ &f(S_s) = \min(S_s) \end{aligned} \qquad (۲۰)$$

که در رابطه فوق S_s پاسخ حرکات بوده و S_J طیف امواج است. در مطالعه حاضر طیف موج بکار رفته طیف JONSWAP است که از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شوند.

$$S_J(\omega) = \hat{a}\times H_s^2 \times \frac{\omega^{-5}}{\omega_p^{-4}} \times \exp\left[-1.25\left(\omega/\omega_p\right)^{-4}\right]\gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\tau^2\omega_p^2}\right]} \qquad (۲۱)$$

H_s ارتفاع موج مشخصه، ω_p فرکانس پیک، τ پارامتر شکل بوده که مقدار آن برای $\omega \le \omega_p \Rightarrow \tau = 0.07$ و $\omega > \omega_p \Rightarrow \tau = 0.09$ است. مقدار $\hat{a}$ موجود در رابطه (۲۱) از رابطه (۲۲) به دست می‌آید[۲۸].

$$\hat{a} = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185\left(1.9+\gamma\right)^{-1}} \qquad (۲۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

بر اساس آیین‌نامه DNV پاسخ حرکات هیو بایستی کمتر از ۱/۱ تا ۲/۵ بوده و پاسخ حرکت پیچ بایستی کمتر از ۳ تا ۷ درجه باشد. شکل ۵ فلوچارت الگوریتم توسعه داده شده جستجوی شبکه‌ای در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مراحل انجام الگوریتم جستجوی شبکه‌ای در محیط متلب به‌صورت زیر است:

مرحله اول: اختصاص دادن پارامترهای ثابت ورودی به الگوریتم

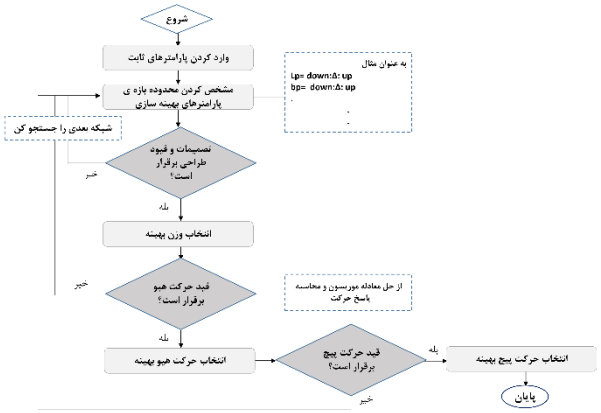
مرحله دوم: در نظر گرفتن مرزهای بالا و پایین و تقسیم‌بندی محدوده‌ی متغیرهای بهینه‌سازی

مرحله سوم: نوشتن قیود طراحی

مرحله چهارم: تعریف توابع هدف در الگوریتم

مرحله پنجم: اجرای برنامه نوشته شده

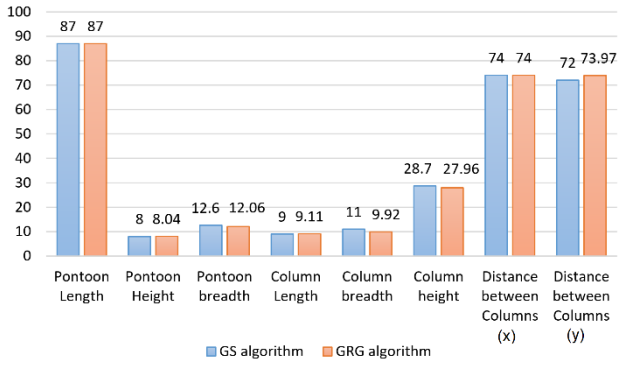
مرحله ششم: نمایش نتایج و زمان محاسبه الگوریتم



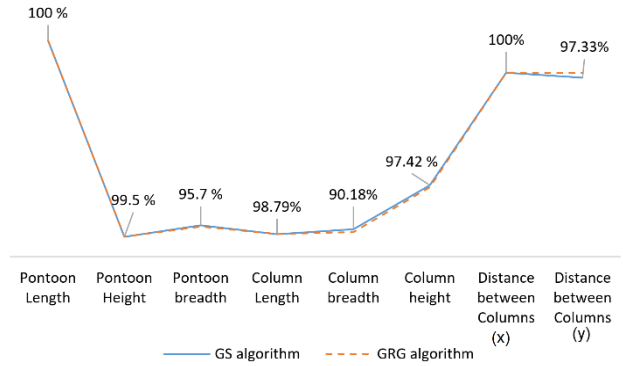
شکل ۵. فلوچارت الگوریتم توسعه یافته جستجوی شبکه‌ای

۵. صحت کارایی الگوریتم جستجوی شبکه‌ای

به منظور شناسایی دقت و کارایی روش جستجوی شبکه‌ای برای یک سازه شناور، در ابتدا الگوریتم فوق به‌صورت تابع تک هدفه بر روی سکوی نیمه مغروق پیشنهاد شده توسط Galalla (۲۰۱۳) [۱۱] (شکل ۳) در محیط متلب نوشته شد. تابع هدف حداقل کردن وزن بدنه است و متغیرها و معیارهای طراحی مطابق با مطالعه Galalla در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای با نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم GRG در مطالعه Galalla مقایسه گردید. شکل ۶ مقایسه بین نتایج این دو الگوریتم را نشان می‌دهد و شکل ۷ میزان همگرایی این دو الگوریتم را بیان می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود توافق نسبتاً خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد الگوریتم جستجوی شبکه‌ای کارایی لازم برای استفاده در سکوهای نیمه مغروق را دارد.



شکل ۶- مقایسه نتایج الگوریتم جستجوی شبکه‌ای با الگوریتم GRG



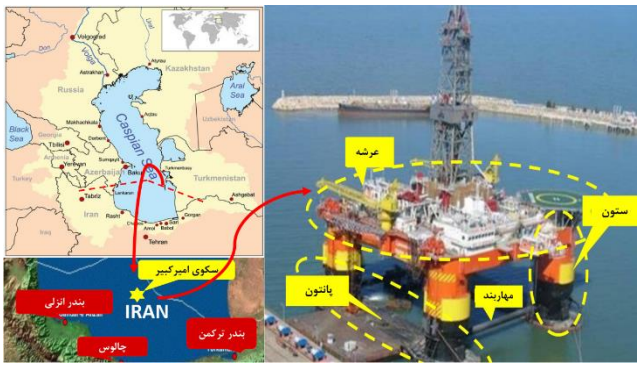
شکل ۷- درصد همگرایی دو الگوریتم جستجوی شبکه‌ای و GRG

۶. توسعه الگوریتم جستجوی شبکه‌ای به‌صورت سه هدفه

با اطمینان از صحت کارایی الگوریتم جستجوی شبکه‌ای به‌صورت تک هدفه، در ادامه این الگوریتم به‌صورت چندهدفه با هدف حداقل کردن وزن بدنه، کمینه بودن حرکت هیو و کمینه بودن حرکت پیچ توسعه داده شد. برای این منظور از سکوی نیمه مغروق ایران-امیرکبیر به دلیل در دسترس بودن اطلاعات آن استفاده شد.

سکوی ایران-امیرکبیر یک سکوی نیمه مغروق از نوع GVA4000M است که در شمال ایران و دریای خزر واقع شده است. این سکو به‌منظور حفاری چاه‌های نفتی دریای خزر طراحی و اجرا شده است. هندسه آن مانند شکل شماتیک ۴ بوده که دارای یک عرشه، چهار ستون، دو پانتون، دو مهاربند بوده و توسط ۸ سیستم مهاری با وزن ۲۰ تن به کف دریا مهار شده است. سکوی نیمه مغروق ایران امیرکبیر برای حفاری در آب‌هایی با عمق ۱۰۰۰ متر طراحی شده است اما توانایی حفاری برای اعماق بیشتر از ۶۶۰۰ متر را نیز دارا است. شکل ۸ سکوی نیمه مغروق حفار ایران امیرکبیر و موقعیت قرارگیری آن را نشان می‌دهد و ابعاد واقعی بدنه ساخته و اجرا شده سکوی فوق به‌صورت جدول ۸ است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]



شکل ۸- نمایی از سکوی امیرکبیر و موقعیت قرارگیری آن

جدول ۸- ابعاد سکوی نیمه مغروق ایران امیرکبیر

بخش‌های سکوی نیمه مغروق	ابعاد	واحد
قطر ستون	۱۲/۹	متر
قطر مهاربند	۲	متر
فاصله در راستای x و y دو ستون از همدیگر	۵۴/۷۲	متر
ارتفاع از کف سکو تا عرشه بالایی	۳۶/۵	متر
ارتفاع از کف سکو تا عرشه پائینی	۲۸/۵	متر
طول پانتون	۸۰/۵۶	متر
ارتفاع پانتون	۷/۵	متر
عرض پانتون	۱۸/۶۸	متر
میزان آبخور در شرایط عملیاتی	۲۰/۵	متر
وزن کل سکو	۲۸۶۲۱	تن

سکوی حفار ایران - امیرکبیر تحت امواج با زوایای گوناگونی قرار دارد اما بدترین شرایط آن موجی با زاویه صفر درجه در راستای محور پانتون‌ها است. طیف حاکم بر دریای خزر طیف JONSWAP بوده که دارای ارتفاع موج شاخص ۷ متر و پریود موج ۹ ثانیه و پریود موج حداکثر ۱۳/۲۵ ثانیه در شرایط کوتاه مدت یک ساله دریا است.

۱-۵. کد نویسی الگوریتم توسعه‌یافته در محیط متلب

به منظور توسعه الگوریتم جستجوی شبکه‌ای ابتدا ورودی‌های ثابت مربوط به سکوی نیمه مغروق ایران-امیرکبیر به برنامه داده شد. این ورودی‌ها شامل:

- زاویه موج: صفر درجه
- عمق آب: ۱۰۰۰ متر
- ارتفاع موج مشخصه: ۷ متر
- پریود موج: ۱۳/۲۵
- هوا خور: ۸ متر
- VDL: ۵۰۰۰ تن
- TPS: ۷۰۰۰ تن
- چگالی دریای خزر: ۱/۰۱ تن بر مترمکعب
- شتاب گرانش: ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه
- مرکز جرم TPS: ۱۰ متر
- مرکز جرم VDL: ۶ متر

سپس ۳۰٪ - تا ۳۰٪ + ابعاد اصلی سکوی نیمه مغروق به‌عنوان مرزهای پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد که به‌صورت جدول ۹ نشان داده شده است. محدوده فرکانس موج در نظر گرفته شده به‌منظور محاسبه پاسخ حرکات هیو و پیچ بین ۰/۰۰۱ تا ۱/۲ رادیان بر ثانیه است.

در ادامه قیود طراحی که در بخش ۲-۱ تا ۲-۶ بیان گردید در الگوریتم کد نویسی شد و با نوشتن توابع هدف، الگوریتم اجرا گردید. در ادامه نمونه‌ای از نحوه نوشتن الگوریتم جستجوی شبکه‌ای در محیط متلب نشان داده شده است.

جدول ۹- مرز بالا و پایین متغیرهای بهینه‌سازی سکوی نیمه مغروق حفار ایران امیرکبیر

٪+۳۰	متغیر بهینه‌سازی	٪-۳۰
۱۰۴/۷۲۸	طول پانتون	۵۶/۳۹۲
۲۴/۲۸۴	عرض پانتون	۱۳/۰۷۶
۹/۷۵	ارتفاع پانتون	۵/۲۵
۸/۳۸۵	شعاع ستون	۴/۵۱۵
۲۷/۳	ارتفاع ستون	۱۴/۷

```
%%% Grid Search Algorithm in MATLAB software%%%
clear all
clean

tic;

% write the input constant parameters

for Lp=down boundary :ΔLp: up boundary
    for bp= down : Δbp: up
        for hp= down : Δbp: up
            for rc= down : Δbp: up
                for hc= down : Δbp: up
                    for …
                        for …
                                    …
% write the hull weight and buoyancy equations
% write the ballast tanks weight
% write the constrain of ballast tanks
% write the center of mass and center of buoyancy
% write the GM constrains
% write the neutral period constrain
% write the geometrical dimension constrains

 %%% Objective functions%%%
if
The written constrains is establish
end
bestw=w

% determine the range of the wave frequency
% write the equation of heave motion
% calculate the heave motion response

if
The heave motion response constrain is establish
end

% write the equation of the pitch motion
% calculate the pitch motion response

if
The pitch motion response constrain is establish
end
```


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

```
                    bestp(1,1)=Lp;
                    bestp(1,2)=bp;
                    bestp(1,3)=hp;
                    bestp(1,4)=Lc;
                    bestp(1,5)=bc;
                    bestp(1,6)=hc;
                    .
                    .
                    .
                    end
                end
            end
        end
    end
.
.
.

w=best w
H=best heave
P=best pitch

t=toc;
fprintf('CPU Time(sec) =');
disp(t);
```

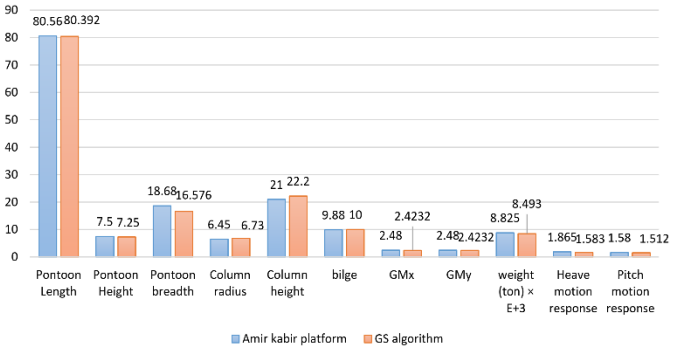
۲-۶. نتایج حاصل از الگوریتم توسعه‌یافته جستجوی شبکه-ای

پارامترهای بهینه به دست آمده از اجرای الگوریتم جستجوی شبکه-ای شامل ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق امیرکبیر، وزن بهینه بدنه و پاسخ حرکات هیو و پیچ به‌صورت جدول ۱۰ نشان داده شده است. الگوریتم در زمان $۸/۱۱۱۸ \times ۱۰^{۴}$ ثانیه با استفاده از یک رایانه معمولی با حافظه corei5, 2.5 GHz اجرا شد که یک زمان بسیار کوتاهی برای پیش‌بینی ابعاد بهینه بدنه سکوی نیمه مغروق است.

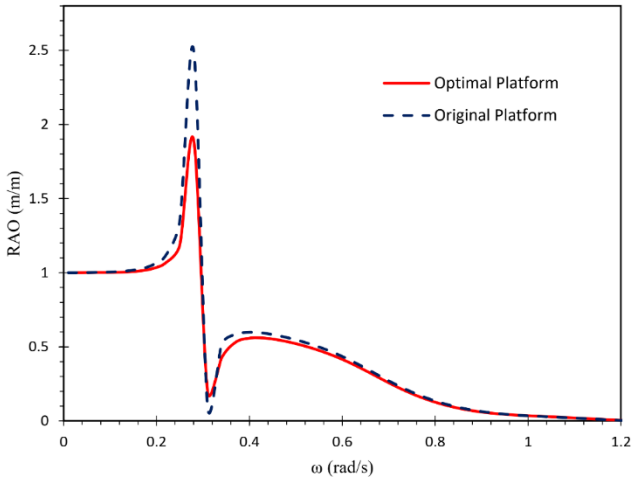
جدول ۱۰- ابعاد بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای

پارامتر	الگوریتم بهینه جستجوی شبکه‌ای
طول پانتون (متر)	۸۰/۳۹۲
عرض پانتون (متر)	۱۶/۵۷۶
ارتفاع پانتون (متر)	۷/۲۵
شعاع ستون (متر)	۶/۷۳
ارتفاع ستون (متر)	۲۲/۲
ارتفاع متاسنتر در جهت طولی (متر)	۲/۴۲۳۲
ارتفاع متاسنتر در جهت عرضی (متر)	۲/۴۲۳۲
وزن بدنه (تن)	۸۴۹۳
پاسخ حرکت هیو (متر)	۱/۵۸۳
پاسخ حرکت پیچ (درجه)	۱/۸۶۵

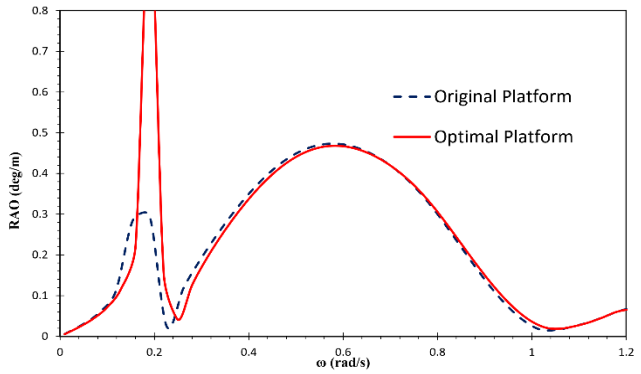
شکل ۹ مقایسه ابعاد به دست آمده از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای و ابعاد واقعی سکوی امیرکبیر ساخته و اجرا شده را شرح می‌دهد و اشکال ۱۰ تا ۱۳ منحنی عملگر دامنه پاسخ حرکات هیو و پیچ و همینطور پاسخ این حرکات را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۱۱ بیان کننده میزان درصد بهبود وزن بدنه؛ کاهش حرکت هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق فوق الذکر است.



شکل ۹- مقایسه نتایج الگوریتم جستجوی شبکه‌ای با ابعاد اجرا شده سکوی نیمه مغروق امیرکبیر

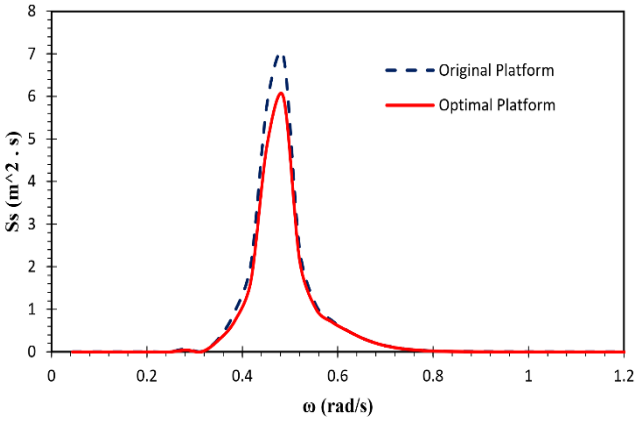


شکل ۱۰- مقایسه منحنی عملگر دامنه پاسخ حرکت هیو سکوی نیمه مغروق امیرکبیر اجرا شده با نتایج حاصل الگوریتم جستجوی شبکه‌ای

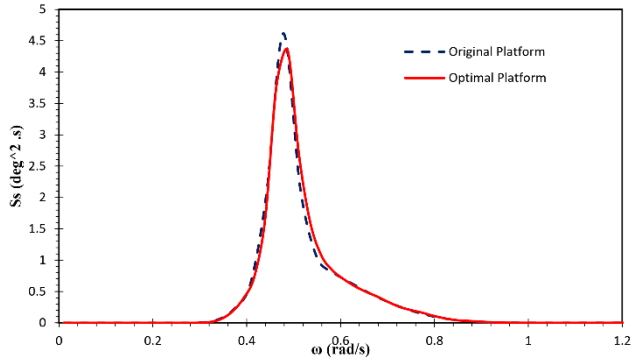


شکل ۱۱- مقایسه منحنی عملگر دامنه پاسخ حرکت پیچ سکوی نیمه مغروق امیرکبیر اجرا شده با نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]



شکل ۱۲- مقایسه منحنی طیف پاسخ حرکت هیو سکوی نیمه مغروق امیرکبیر اجرا شده با نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای



شکل ۱۳- مقایسه منحنی طیف پاسخ حرکت پیچ سکوی نیمه مغروق امیرکبیر اجرا شده با نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی شبکه‌ای

جدول ۱۱- درصد بهبود توابع هدف بهینه شده

تابع هدف	مقدار واقعی	مقدار بهینه شده	درصد بهبود
وزن بدنه (تن)	۸۸۲۵	۸۴۹۳	۳/۷۶
پاسخ حرکت هیو (متر)	۱/۸۶۵	۱/۵۸۳	۱۵/۱۲
پاسخ حرکت پیچ (درجه)	۱/۵۸	۱/۵۱	۴/۴۳

از مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که الگوریتم جستجوی شبکه‌ای توسعه داده شده قابلیت پیش‌بینی ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق را در مدت زمان کوتاهی به طور قابل قبول دارد. علاوه بر این، مطابق با جدول ۱۱ ابعاد پیش‌بینی شده مقدار وزن بدنه را ۳/۷۶ درصد، پاسخ حرکات هیو ۱۵/۱۲ درصد و پاسخ حرکت پیچ را ۴/۴۳ درصد نسبت به ابعاد واقعی آن بهبود داده است.

۷- جمع بندی

سکوی نیمه مغروق یک سکوی شناور توسعه یافته در سرتاسر جهان به منظور تولید نفت و گاز از آب‌های عمیق است. برای بهبود کارایی این سکو، کاهش حرکات آن لازم است. یک راه برای بهبود رفتار آن، بهینه کردن ابعاد بدنه این سکو است. در این مطالعه، الگوریتم جستجوی شبکه‌ای برای بهینه کردن ابعاد بدنه سکوی نیمه مغروق به صورت تابع سه هدفه معرفی شد. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل حداقل کردن وزن بدنه، کاهش پاسخ حرکت هیو و کاهش حرکت پیچ برای سکوی نیمه مغروق بود. پاسخ حرکت هیو و پیچ با کمک روابط موریسون و فرود کریلوف به‌صورت پارامتری بیان شد. قیود طراحی از جمله پایداری، هوا خور، آبخور، محدودیت هندسی در الگوریتم در نظر گرفته شد. الگوریتم فوق در محیط متلب کد نویسی گردید. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم جستجوی توسعه‌یافته به شرح زیر حاصل شد:

- الگوریتم جستجوی شبکه‌ای کارایی لازم برای پیش‌بینی ابعاد بدنه‌ی سکوی نیمه مغروق به‌صورت تک هدفه و چندهدفه را دارد.
- الگوریتم توسعه‌یافته فوق جواب‌های بهینه را در کوتاه‌ترین زمان محاسباتی ممکن نشان می‌دهد.
- جواب‌های بهینه محاسبه‌شده از اجرای الگوریتم جستجوی شبکه‌ای باعث بهبود حرکات هیو و پیچ و همین‌طور وزن بدنه سکو گردید.
- نیاز به سیستم رایانه‌ای قوی برای اجرای الگوریتم نیست.
- قابل اجرا برای سایر سکوهای شناور از جمله سکوهای اسپار و سکوی پاکششی است.

به عنوان تحقیق آینده پیشنهاد می‌شود معادلات حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه مغروق به روش عددی گسسته شود و با جایگذاری آن در الگوریتم جستجوی شبکه‌ای توسعه یافته، ابعاد بهینه بدنه سکوی نیمه مغروق پیش‌بینی شده و زمان اجرای آن محاسبه گردد.

۸- کلید واژگان

1- Genetic Algorithm
2- Generalized Reduced Gradient
3- Simulated Annealing Algorithm
4- Grid Search Algorithm
5- Floating Production Unit
6- Ballast Tanks
7- Filling ratio
8- Sloshing
9- Response Amplitude Operator

۹- مراجع

1- Ye, Q., Jin, W.-l., He, Y., and Bai, Y.J.S, (2013), *System reliability of a semi-submersible drilling rig*, Vol. (1) 8, p. 84-93

2- Rothlauf, F, (2011), *Design of modern heuristics: principles and application*, Springer Science & Business Media, Vol 2.

3- Kratsch, D, (2010), *Exact exponential algorithms*,Springer Heidelberg.

4- Williamson, D.P., and Shmoys, D.B, (2011), *The design of approximation algorithm*, Cambridge university press.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]

5- Shafieefar, M., and Rezvani, A, (2007), *Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm*, Ocean Engineering, Vol. 34, (10), p. 1413-1421.
6- Dai, L., Hu, H., and Chen, F.J.S, (2015), *A GA-based heuristic approach for offshore structure construction spatial scheduling under uncertainty*, Vol. 10 (6), p. 660-668.
7- Sekulski, Z, (2009), *Structural weight minimization of high speed vehicle-passenger catamaran by genetic algorithm*, Polish Maritime Research, Vol.16 (2), p. 11-23.
8- Sekulski, Z, (2014), *Ship hull structural multiobjective optimization by evolutionary algorithm*, Journal of Ship Research, Vol. 58 (2), p. 45-69.
9- Xiao, W., Wu, L., Tian, X., and Wang, J, (2015), *Applying a new adaptive genetic algorithm to study the layout of drilling equipment in semisubmersible drilling platforms*, Mathematical Problems in Engineering,
10- Vasudev, K., Sharma, R., Bhattacharyya, S.J.S, (2018), *Shape optimisation of an AUV with ducted propeller using GA integrated with CFD*, Ships and offshore strucutures, Vol. 13 (2), p. 194-207
11- Gallala, J.R, (2013), *Hull Dimensions of a Semi-Submersible Rig: A Parametric Optimization Approach*, Institutt for marin teknikk. Master Thesis.
12- Lee, J.Y., and Clauss, G.F, (2007), *Automated development of floating offshore structures in deepwater with verified global performances by coupled analysis*, Book Automated development of floating offshore structures in deepwater with verified global performances by coupled analysis' (International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007, edn.).
13- Park ,Y., Jang, B.-S., and Du Kim, J, (2015), H*ull-form optimization of semi-submersible FPU considering seakeeping capability and structural weight*, Ocean engineering, Vol. 104, p. 714-724
14- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P, (1983), *Optimization by simulated annealing*, science, Vol. 220, (4598), p. 671-680.
15- Ghaderyan, P., Abbasi, A., and Sedaaghi, M, (2014), *An efficient seizure prediction method using KNN-based undersampling and linear frequency measures*, Vol. 232, p. 134-142.
16- Akagi, S., and Ito, K, (1984), *Optimal design of semisubmersible form by minimizing its motion in random seas*, Journal of Mechanical Design, Vol. 106, p. 23-30.
17- Clauss, G., and Birk, L, (1996), *Hydrodynamic shape optimization of large offshore structures*, Applied Ocean Research, Vol.18, (4), p. 157-171.
18- Birk, L., and Clauss, G, (2001), *Automated hull optimisation of offshore structures based on rational seakeeping criteria*, International Society of Offshore and Polar Engineers, Confference, 17-22 June
19- Sharma, R., and Kim, T.-w, (2010), *Optimum Design of an Ultra-Low Motion Semi-Submersible Platform*, International Society of Offshore and Polar Engineers.
20- Venzon, R., Tancredi, T., and de Andrade, B, (2013), *Hull optimization of semisubmersible with multidirectional seakeeping criteria evaluated with neural network response surface*, Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources: IMAM 2013, p. 147
21- Chen, H., and Uddin, M, (2013), *Optimization of a Floating Platform Design*, Chalmers University of Technology, Göteborg.
22- Ringsberg, J.W., Sağlam, H., Sarder, M.A., and Ulfvarson, A.J.S., (2014), *Lightweight design of offshore platform marine structures–optimisation of weight to strength utilisation of corrugated shell plating*, Vol. 9, (1), p. 38-53
23- Birk, L, (2009), *Application of constrained multi-objective optimization to the design of offshore structure hulls*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.131, (1), p. 011301
24- Birk, L, (2008), *On the Shape Optimization of Semisubmersibles*, Vol. 55, (4), p. 166-176.
25- Wang, Z., Low, Y.M., and Li, B, (2019), *Stochastic analysis of the non-Gaussian airgap response of a semi-submersible using frequency domain analysis*', Marine Structures, Vol. 67, p. 102636
26- Sengupta, S., and Chatterjee, M, (1986), *Evaluation of semisubmersible motion characteristics*, Marine Technology and SNAME News, Vol. 23, (03), p. 217-225
27- Patel, M.H, (2013), *Dynamics of offshore structures*, Butterworth-Heinemann, 2013.
28- Chakrabarti, S.K., (1987), *Hydrodynamics of offshore structures* WIT press, 1987

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.8.7]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.29]