J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 45, 2025. (1-10)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Application of the ACO_R algorithm in minimizing the weight and heave motion of a semi-submerged platform

Zanyar Delgarm[1], Ahmad Reza Mostafa Gharabaghi[2], Arefeh Emami*[3]

[1] *M.Sc., Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. zanyardelgarm@gmail.com*
[2] *Professor, Department of Civil Engineering-Marine Structures, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. mgharabaghi@sut.ac.ir*
[*3] *Assistant Professor, Faculty of Engineering, Marine Structures, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran. emami@hormozgan.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received:
Last modification:
Accepted:
Available online:

Article type:

Keywords:
Semi-submersible
ACO_R algorithm
Optimization
Stability
Heave motion

ABSTRACT

Improving the heave response of semi-submersible platforms remains a critical and complex challenge in the offshore industry. Resonance of these motions can cause vital consequences in marine operations, particularly in drilling processes, such as disturbance in equipment action, increased stresses on the risers, and the probability of damage to the mooring systems. Hence, this study presents an innovative method that is a cost-effective and practical approach for bi-objective optimization of the total weight of the platform body and heave motion of a typical GVA4000 platform under 100-year wave conditions in the South China Sea. To ensure the feasibility and applicability of the optimized design, key restraints such as platform stability, geometric constraints, draft depth, natural heave period, and peak response spectrum were examined in order that the final design keeps its function, in addition to being realistic and applicable. For this purpose, the Ant Colony Optimization for continuous domain (ACO_R) algorithm was used to minimize both the total weight of the structural platform and the heave response. The validity of the developed model was confirmed through the comparison with benchmark heave motion analyses. The results indicated that this optimization algorithm significantly enhances platform response while simultaneously optimizing the total weight of the platform body. This improvement in the structural performance and efficiency of semi-submersible platforms can play a significant role in the safety, reliability of semi-submersible platforms under harsh environmental conditions.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.4

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۵، ۱۴۰۴، (۱۰-۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

استفاده از الگوریتم مورچگان در کمینه‌سازی وزن و حرکت هیو سکوی نیمه‌مغروق

زانیار دل‌گرم[۱]، احمدرضا مصطفی قره‌باغی[۲]، عارفه امامی[۳*]

[۱] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند-تبریز، ایران zanyardelgarm@gmail.com

[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران-سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند-تبریز، ایران mgharabaghi@sut.ac.ir

[۳*] استادیار دانشکده فنی و مهندسی-سازه‌های دریایی، دانشگاه هرمزگان-بندرعباس، ایران emami@hormozgan.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: --/--/---

تاریخ اصلاح مقاله: --/--/--

تاریخ پذیرش مقاله: --/--/--

تاریخ انتشار مقاله: --/--/--

نوع مقاله:

کلمات کلیدی:

سکوی نیمه‌مغروق

الگوریتم مورچگان پیوسته

بهینه‌سازی

پایداری

حرکت هیو

چکیده

بهبود پاسخ حرکت هیو سکوهای نیمه‌مغروق یکی از چالش‌های اساسی و پیچیده در صنعت فراساحل به‌شمار می‌رود. تشدید این نوع از حرکات پیامدهای جدی برای عملیات‌های دریایی به‌ویژه در حوزه حفاری از جمله اختلال در عملکرد تجهیزات، افزایش تنش در رایزرها، و احتمال آسیب به سیستم‌های مهار به همراه دارد. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف ارائه یک راهکار نوین، مقرون‌به‌صرفه و کاربردی به بهینه‌سازی دو هدفه وزن کلی بدنه سکو و حرکت هیو سکوی نیمه‌مغروق *GVA4000* در مواجهه با امواج شدید ۱۰۰ ساله در دریای جنوب چین پرداخته است. در این مطالعه، ملاحظات مهمی نظیر حفظ پایداری سکوی شناور، محدودیت‌های هندسی، عمق آبخور، دوره تناوب طبیعی حرکت هیو و همچنین بیشینه پاسخ طیفی در نظر گرفته شد تا طراحی نهایی ضمن حفظ عملکرد، واقع‌گرایانه و قابل اجرا باشد. در این مسیر، از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در دامنه پیوسته (ACO_R) با هدف کاهش هم‌زمان وزن کلی بدنه سکو و پاسخ دینامیکی سکو در استفاده شد. مدل توسعه‌یافته در این تحقیق از طریق مقایسه با تحلیل‌های معتبر حرکت هیو تأیید و اعتبارسنجی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فوق می‌تواند به‌صورت قابل‌توجهی پاسخ دینامیکی سکو را کاهش داده و هم‌زمان وزن کلی بدنه سکو آن را بهینه نماید. این بهبود هم‌زمان در عملکرد و کارایی سازه، می‌تواند نقش بسزایی در افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان سکوهای نیمه‌مغروق در شرایط محیطی سخت ایفا کند.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.4

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

۱- مقدمه

با گسترش فعالیت‌های اکتشاف نفت و گاز به آب‌های عمیق، استفاده از سکوهای شناور به شکل گسترده رواج یافته است [۱]. بدین منظور، انواع سازه‌های شناور از جمله واحدهای شناور ذخیره‌سازی، تولید و بارگیری[۱]، سکوهای پایه کششی[۲]، اسپار[۳] و نیمه‌مغروق[۴] طراحی و اجرا شده‌اند. نیمه‌مغروق‌ها به دلیل ویژگی‌هایی از جمله برخورداری از عرشه وسیع‌تر و سازگاری با اعماق مختلف، به گزینه‌ای مناسب تبدیل شده‌اند. این سکوها دارای انعطاف‌پذیری در محل ساخت و سهولت نصب بوده و امکان ساخت آن‌ها در کارخانجات کشتی‌سازی در سراسر جهان و یکپارچه‌سازی در یک محوطه مشخص فراهم است.

سکوهای نیمه‌مغروق، تحت تأثیر نیروهای محیطی، حرکاتی شامل هیو[۵]، سرج[۶]، سوای[۷]، رول[۸]، یاو[۹] و پیچ[۱۰] را تجربه می‌کنند [۲, ۳]. حرکت هیو این نوع سکوها به دلیل تأثیر مستقیم بر عملیات حفاری، سیستم‌های مهار و همچنین نزدیکی دوره تناوب ویژه آن به دوره تناوب موج غالب و احتمال رخداد تشدید[۱۱]، اهمیت ویژه‌ای دارد [۴]. بنابراین، کاهش حرکت هیو این نوع سکوها به عنوان یک چالش کلیدی مطرح است.

روش‌های متعددی برای کاهش حرکت هیو در سکوهای نیمه‌مغروق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از *THPI*[۱۲] [۵]، *IVIS*[۱۳] [۶]، بهینه‌سازی هندسه موونپوول[۱۴] [۷]، استفاده از ورق‌های میراگر[۱۵] بر روی پانتون سکو [۸]، کامپوزیت‌های لاستیکی استایرن-بوتادین متخلخل[۱۶] و امولسیونی[۱۷] در پایین پانتون با ایجاد میرایی اصطکاکی [۹]، سیستم‌های کنترل غیر فعال [۱۰] و لایه‌های متخلخل پروالاستیک در پایین پانتون‌ها [۱۱] از جمله موارد بررسی شده می‌باشند.. اگرچه این روش‌ها موثر هستند، اما اغلب با افزایش وزن، پیچیدگی ساخت و هزینه‌های اضافی همراه‌اند. از سوی دیگر، کاهش وزن اگرچه موجب صرفه‌جویی در هزینه ساخت و افزایش ظرفیت بارگذاری می‌شود، اما می‌تواند به تشدید حرکات ناخواسته منجر گردد و این مسئله در شرایط محیطی شدید اهمیت بیشتری می‌یابد. بنابراین، توسعه راهکارهایی که بتوانند وزن و پاسخ‌های حرکتی سکو را هم‌زمان در محدوده‌ای مطلوب کنترل کنند، ضروری است. در همین راستا، با پیشرفت دانش بهینه‌سازی و معرفی الگوریتم‌های نوین، پژوهشگران این رویکردها را به طور گسترده در طراحی و تحلیل سازه‌های دریایی به کار گرفته‌اند. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری[۱۸] است که به‌طور گسترده در مسائل مهندسی فراساحل استفاده شده‌اند. این الگوریتم‌ها با الهام از پدیده‌های طبیعی، توانایی جستجوی سراسری در فضای طراحی را دارند که می‌توانند در بهینه‌سازی مسائل پیچیده موثر واقع شوند. الگوریتم‌هایی مانند ژنتیک[۱۹] [۱۲]، ازدحام ذرات[۲۰] [۱۳] و کرم شب‌تاب[۲۱] [۱۴] در این حوزه جای دارند. سوشا و دوریگو در سال ۲۰۰۸ به توسعه الگوریتم کلونی مورچگان[۲۲] با فضای جستجوی پیوسته پرداختند. نامبردگان با ایده مدل‌سازی فرومون[۲۳] به عنوان تابع گوسی، الگوریتم مورچگان در دامنه پیوسته را معرفی و توابع بنچمارک[۲۴]، را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵].

هدف اصلی این مطالعه، استفاده از الگوریتم مورچگان معرفی شده توسط سوشا و دوریگو [۱۵]، در کاهش حرکت هیو و وزن سازه‌ای سکوی نیمه‌مغروق *GVA4000* تحت شرایط موج ۱۰۰ ساله دریای جنوب چین، به دلیل شرایط محیطی سخت آن برای شرایط عملیاتی است. در این راستا، محدودیت‌های طراحی نظیر عمق آبخور[۲۵]، پایداری سازه، دوره تناوب طبیعی حرکت و پیک‌های طیف پاسخ سکو و عملگر دامنه پاسخ[۲۶] در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده با سازه اولیه مقایسه شده‌اند تا کارایی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در ادامه پس از بیان مقدمه حاضر، در بخش دوم، الگوریتم مورچگان و پیاده‌سازی آن در محیط متلب شرح داده شده است. بخش سوم به مدل‌سازی ریاضی سکو، شامل متغیرهای تصمیم، تابع هدف، محدودیت‌های پایداری و دینامیکی، محاسبات طیف تحریک و پاسخ و همچنین صحت‌سنجی مدل می‌پردازد. در بخش چهارم، پس از ارائه جبهه پارتو، نتایج بهینه‌سازی ارائه و تحلیل شده‌اند. نهایتاً، بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌ها و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده اختصاص دارد.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی

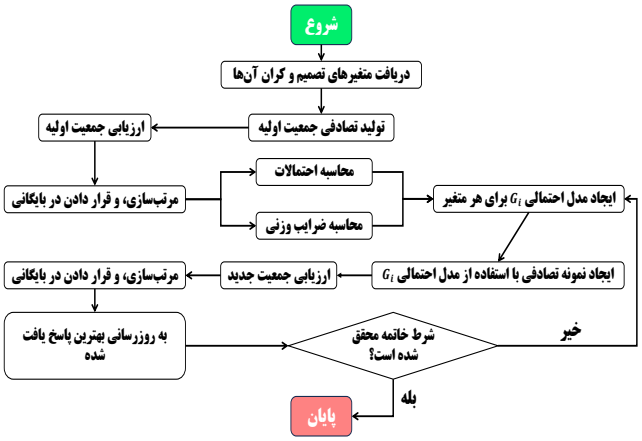
۲-۱- الگوریتم مورچگان

الگوریتم مورچگان یک الگوریتم فراابتکاری است که از رفتار جمعی مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر به سمت غذا الهام گرفته شده است. این الگوریتم با استفاده از مکانیسم فرومون که توسط مورچه‌ها برای مشخص‌کردن راه‌حل‌های بهتر استفاده می‌شود، فضای جستجو را به‌طور سازمان‌یافته بررسی می‌کند. در این مطالعه، از نسخه پیوسته الگوریتم مورچگان (ACO_R) [۱۵] استفاده شده است که برای مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با متغیرهای تصمیم پیوسته مناسب است. این الگوریتم با به‌روزرسانی توزیع گوسی، امکان جستجوی کارآمد در فضای طراحی را فراهم می‌کند و امکان در دام افتادن الگوریتم را در بهینه‌های محلی کاهش می‌دهد.

۲-۲- مراحل الگوریتم مورچگان

الگوریتم مورچگان با ایجاد جمعیت اولیه از متغیرهای تصمیم آغاز شد. در هر تکرار، با استفاده از ضرایب وزنی و احتمالات انتخاب،

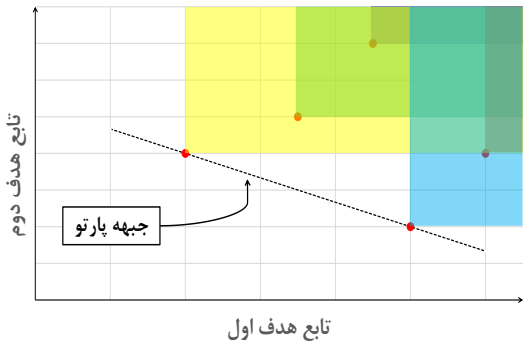
یک مدل احتمالی برای تولید راه‌حل‌های جدید ایجاد گردید. راه‌حل‌های اولیه و جدید ارزیابی شده و بهترین ترکیب متغیرها به‌روزرسانی شد. این فرآیند تا تحقق شرط توقف (در این مطالعه تعداد ۱۰۰۰ تکرار) ادامه یافت. در روند بهینه‌سازی، با نقض محدودیت‌ها (با وزن یکسان)، تابع جریمه[۲۷] ($csv = 1 \times 10^{12}$) به تابع هدف اضافه گردید. پارامترهای الگوریتم عبارت‌اند از: اندازه بایگانی ($nPop = 50$)، تعداد نمونه‌ها ($nSample = 5$)، فشار انتخاب ($q = 0.5$)، نسبت انحراف-فاصله ($\xi = 1$)، محاسبه خودکار پارامتر σ برای کنترل گام‌های تصادفی و اعمال غیرمستقیم نرخ تبخیر از طریق جایگزینی راه‌حل‌های ضعیف با راه‌حل‌های بهتر. جهت تکرارپذیری نتایج این مطالعه، در ابتدای کدنویسی، دانه بذر برابر صفر ($MATLAB\ code: rng(0,'twister')$) لحاظ گردید. روند کدنویسی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم مورچگان تک هدفه

۳-۲- الگوریتم مورچگان دو هدفه

بهینه‌سازی دوهدفه نیازمند تعادل بین اهداف متضاد است. با پذیرش تمامی مفاهیم بخش قبل، مفهوم غلبه کردن[۲۸] برای مقایسه جواب‌ها استفاده شد. به‌طوری که یک جواب در صورت برتری در تمام اهداف (یا یک هدف بدون افت در هدف دیگر) به‌عنوان یکی از اعضای مجموعه پارتو[۲۹] انتخاب گردید. شکل ۲ به طور شماتیک مفهوم غلبه کردن و پارتو را بیان می‌کند. در این شکل محور افقی تابع هدف اول و محور قائم تابع هدف دوم را نشان می‌دهد. جواب‌ها که حاصل تقاطع دو تابع هدف است، با نقاط قرمز مشخص شده‌اند. مجموعه‌ی جواب‌هایی که نسبت به سایر جواب‌های موجود در فضای حل، برتری دارند، به عنوان جبهه پارتو (جبهه اول) شناخته می‌شوند. برتری جواب‌ها با مستطیل‌های آبی و زرد مشخص شده است که در واقع مفهوم غلبه کردن بر سایر راه‌حل‌ها را بیان می‌کند. فاصله ازدحامی[۳۰] امکان ایجاد مجموعه‌ای از جواب‌های یکنواخت، با فواصل کم از یکدیگر را بر روی جبهه پارتو فراهم ساخت.



شکل ۲- مفهوم غلبه کردن و جبهه پارتو

۳- مدل‌سازی ریاضی سکوی نیمه‌مغروق

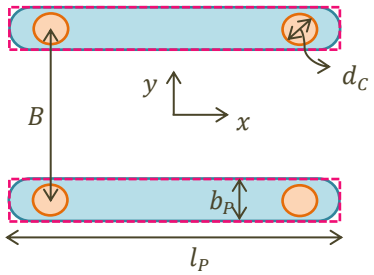
سکوی نیمه‌مغروق متشکل از چهار بخش عرشه، ستون، پانتون و مهاربند است. جهت پیشبرد روند بهینه‌سازی، سکوی نیمه‌مغروق *GVA4000* به عنوان هندسه اولیه انتخاب شد (شکل ۳) [۱۶]. جدول ۱ ابعاد اولیه هندسه فوق را نشان می‌دهد. متغیرهای تصمیم نشان داده شده شامل قطر (d_C) و ارتفاع (h_C) ستون، طول (l_P)، عرض (b_P) و ارتفاع (h_P) پانتون، فاصله بین ستون‌ها (B) (برابر با فاصله بین پانتون‌ها)، و عمق آبخور (D) نیز به عنوان متغیر تصمیم هفتم انتخاب شده است. هر یک از این متغیرها بر روی شکل ۳ نام گذاری شده اند.

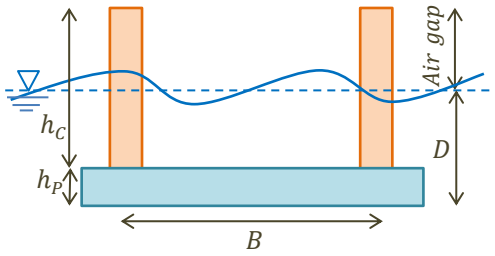
۳-۱- تابع هدف

در این مطالعه از الگوریتم مورچگان به صورت دو هدفه با اهداف کمینه‌کردن وزن کلی بدنه سکو و حرکت در امتداد قائم سکوی نیمه‌مغروق به صورت هم‌زمان استفاده شده‌است. منظور از وزن کلی بدنه سکو، وزن اعضای سازه‌ای ثابت شامل پانتون و ستون، بر اساس هندسه کلی سکو بوده و از وزن‌های متغیر یا تجهیزات عملیاتی صرف‌نظر شده است که در ادامه مطالعه از آن، به اختصار، با وزن یاد شده است. در این مسئله تابع هدف به شکل بردار رابطه (۱) تعریف شد که در آن Z_1، تابع هدف اول و Z_2، تابع هدف دوم است. مجموع وزن پانتون‌ها (W_P) و وزن ستون‌ها (W_C) به عنوان وزن با رابطه (۲) به عنوان تابع هدف اول در نظر گرفته شد. به دلیل حجم کم مهاربندها نسبت به سایر اجزا، از وزن مهاربندها (W_B) صرف‌نظر شده است. تابع هدف دوم در رابطه (۳۱) بیان شده است.

$$Z = [Z_1 \quad Z_2] \qquad (۱)$$

$$Z_1 = W_P + W_C \qquad (۲)$$





شکل ۳- شماتیک نما و پلان سکو، دستگاه مختصات و متغیرهای تصمیم [۱۶، ۱۷]

جدول ۱- ابعاد اولیه سکوی *GVA4000* [۱۶]

پارامتر	واحد	نماد	مقدار
قطر ستون	m	d_C	۱۲/۹۰
ارتفاع ستون	m	h_C	۴۱/۵۰
عرض پانتون	m	b_P	۱۶/۰۰
طول پانتون	m	l_P	۸۰/۵۶
ارتفاع پانتون	m	h_P	۷/۵۰
فاصله پانتون‌ها	m	B	۵۴/۷۲
عمق آبخور	m	D	۴۹/۰۰
هواخور	m	$AirGap$	۲۰/۵۰

۳-۲- قیود طراحی

۳-۲-۱- پایداری سکوی نیمه‌مغروق

در این مطالعه، تنها محدودیت‌های پایه‌ای پایداری، مانند حفظ ارتفاع فرامرکز[۳۱] مثبت (GM) [۱۸, ۱۹]، در الگوریتم بهینه‌سازی لحاظ شده‌اند، زیرا این محدودیت‌ها تضمین‌کننده پایدار بودن شناور در شرایط طراحی اولیه هستند. اثرات دینامیکی پیچیده‌تر، مانند بازوی بازگرداننده، ممان بازگرداننده باد یا پاسخ‌های ثانویه، در نظر گرفته نشده‌اند، زیرا تمرکز اصلی بر تعیین یک بازه مطمئن و عملی برای GM جهت اجرای بهینه‌سازی عددی بود.

با این حال، از مقادیر بالای GM که باعث ایجاد دوره تناوب کوتاه غلتشی و افزایش شتاب می‌شود، اجتناب می‌گردد. در این مطالعه محدودیت‌های پایداری در رابطه (۳) و (۴) با کران پایین ۱/۵ متر [۲۰] به صورت محافظه‌کارانه و کران بالای ۱۵ متر (حدود ۳۵ درصد بیشتر از مقدار اولیه) محدود شده‌اند. پارامتر GM سازه‌های مشابه نیز در این بازه قرار دارد.

$$g_t^{TRANSVERSAL} \le S_t^{TRANSVERSAL,MAX} \quad (۳)$$

$$g_t^{LONGITUDINAL} \le S_t^{LONGITUDINAL,MAX} \quad (۴)$$

مقدار g_t مطابق رابطه (۵) تعریف شد که در آن d_t بیانگر فاصله عمودی بین ترازهای مختلف شامل فاصله عمودی از کیل[۳۲] تا مرکز شناوری[۳۳] (COB)، کیل تا مرکز جرم[۳۴] (COG)، و فاصله مرکز شناوری تا فرامرکز است. با توجه به یکسان بودن فاصله بین پانتون‌ها و ستون‌ها، مقادیر طولی و عرضی فاصله مرکز شناوری تا فرامرکز و در نتیجه g_t برابر است.

$$g_t = d_t^{KEEL-COB} + d_t^{COB-META} - d_t^{KEEL-COG} \quad (۵)$$

مساحت سطح آبخور[۳۵] توسط مقطع دایره‌ای چهار ستون محاسبه گردید. گشتاور دوم مساحت سطح آبخور سکو به صورت رابطه (۶) بیان شد.

$$i = 4 \times \left[\frac{\pi d_C^4}{64} + \left(\frac{\pi d_C^2}{4} \times \frac{B^2}{4}\right)\right] \quad (۶)$$

۳-۲-۲- محدودیت‌های ویژگی حرکتی

به منظور اطمینان از قرارگیری دوره تناوب حرکت هیو سکو خارج از محدوده امواج غالب، قید دوره تناوب طبیعی مطابق با روابط (۷) و (۸) در نظر گرفته شد. حداقل دوره تناوب با توجه به محدوده متعارف [۴]، برابر ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

$$p_t^{HEAVE} \ge T_t^{HEAVE,MIN} \quad (۷)$$

$$p_t^{HEAVE} = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta_t + m_z}{\rho g A_w}} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، ρ چگالی آب دریا برابر ۱۰۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و g شتاب گرانشی است. m_z جرم افزوده سکو مطابق رابطه (۹)، A_w برابر با مساحت سطح آبخور چهار ستون دایره‌ای و Δ_t وزن جابجاشده معرفی شده در رابطه (۱۰) است.

$$m_z = 2 \times C^{AM,HEAVE} \rho b_P l_P h_P \quad (۹)$$

$$\Delta_t = \rho \nabla_t \quad (۱۰)$$

در رابطه (۹)، $C^{AM,HEAVE}$ ضریب جرم افزوده در هیو بوده که به عنوان پارامتر ورودی برابر با ۱/۱ اعمال شد. ∇_t حجم سیال جابجاشده است که در بخش بعدی روابط آن بیان شده است.

۳-۲-۳- محدودیت‌های وزن و شناوری

یکی از پارامترهای موثر در طراحی سکوهای نیمه‌مغروق، وزن عرشه (شامل بار متغیر عرشه W^{VDL} و وزن روسازه W^{TS}) است که نیازمند ایجاد محدودیت‌هایی برای تضمین تعادل بین شناوری و وزن می‌باشد. وزن به وزن پانتون‌ها، ستون‌ها (با صرف‌نظر کردن از وزن مهاربندها) تقسیم و آب به‌عنوان بالاست[۳۶] در نظر گرفته شد. ظرفیت پرشدگی بالاست پانتون، $Z = 0.8$ در نظر گرفته شد. معادلات این وزن‌ها در ادامه برای شرایط عملیاتی[۳۷] بیان شده‌اند.

- **پانتون‌ها:** جابجایی پانتون‌ها در شرایط عملیاتی با محاسبه حجم پانتون‌ها فرمول‌بندی شد.

فاصله عمودی کیل تا مرکز شناوری (COB) پانتون‌ها با رابطه (۱۱) بیان گردید. با فرض توزیع متقارن تجهیزات واقع در پانتون، فاصله عمودی کیل تا مرکز جرم (COG) پانتون، در مرکز قرار می‌گیرد و با رابطه (۱۲) معرفی شد. در نهایت گشتاور عمودی از طریق رابطه (۱۳) فرموله شد.

$$d_t^{P,COB} = \frac{1}{2}h^P \quad (۱۱)$$

$$d^{P,COG} = \frac{1}{2}h^P \quad (۱۲)$$

$$m^P = w^P d^{P,COG} \quad (۱۳)$$

- **ستون‌ها:** در شرایط عملیاتی بخشی از ستون‌ها در زیر آب قرار دارند. جابجایی حجمی با رابطه (۱۴) محاسبه شد. فاصله کیل تا COB ستون‌ها با رابطه (۱۵) بیان گردید. در رابطه (۱۶) فرض شد که COG در مرکز حجم ستون‌ها قرار دارد. رابطه (۱۷) گشتاور عمودی ستون‌ها را محاسبه کرد. با تغییر آبخور، ارتفاع خروجی ستون باید منجر به هواخور بیشتر از سازه اولیه (۲۷/۵ متر) شود.

$$\nabla_t^C = \pi d_C^2 (D - h^P) \quad (۱۴)$$

$$d_t^{C,COB} = h^P + \frac{D - h^P}{2} \quad (۱۵)$$

$$d^{C,COG} = \frac{1}{2}h^C + h^P \quad (۱۶)$$

$$m^C = w^C d^{C,COG} \quad (۱۷)$$

- **شناوری و تعادل وزن:** بر اساس اصل ارشمیدس، یک جسم شناور نیروی شناوری معادل وزن سیالی که توسط آن جابجا می‌شود، تجربه می‌کند [۱۹]. در این مطالعه، حجم جابجا شده از مجموع جابجایی حجمی پانتون‌ها و ستون‌ها به‌دست آمد و وزن جابجاشده با ضرب آن در چگالی آب دریا محاسبه شد. وزن آب بالاست درون پانتون‌ها با رابطه (۱۸) تعیین گردید که در آن مقدار W^{VDL} برابر ۴۰۰۰ تن لحاظ شد. پارامتر W^{TS} مانند W^{VDL} می‌تواند در رابطه (۱۸) قرار بگیرد اما با توجه به عدم دسترسی به مقدار دقیق آن، در نظر گرفته نشد.

$$w_t^{BALLAST} = \Delta_t - w^P - w^C - w^{VDL} \quad (۱۸)$$

همچنین مرکز جرم بالاست در مرکز پانتون‌ها قرار دارد که فاصله عمودی و گشتاور آن به ترتیب با روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه گردید.

$$d^{BALLAST,COG} = \frac{1}{2}h^P \quad (۱۹)$$

$$m_t^{BALLAST} = d^{BALLAST,COG} w_t^{BALLAST} \quad (۲۰)$$

محدودیت‌های دیگری برای هواخور با رابطه (۲۱)، قطر ستون‌ها با رابطه (۲۲)، فاصله بین ستون‌ها با رابطه (۲۳) و مساحت عرشه با روابط (۲۴) و (۲۵) اعمال شد. به منظور حفظ یکپارچگی سازه‌ای و با توجه به سازه‌های مشابه، نسبت عرض به ارتفاع پانتون‌ها در روابط (۲۶) و (۲۷) محدود شد. این محدودیت‌ها به دلیل حفظ هندسه اولیه و اجرایی بودن خروجی اعمال شد. در رابطه (۲۲) و (۲۳) پارامترهای U و Y ضرایب کاهشی است. اگر U برابر ۱ فرض شود، در روند بهینه‌سازی قطر ستون با عرض پانتون می‌تواند برابر به دست آید. همچنین اگر Y برابر ۱ فرض شود، فاصله لبه‌ی ستون‌ها از یکدیگر برابر با طول پانتون نیز می‌تواند در راه‌حل‌های حاصل از بهینه‌سازی نتیجه داده شود. در این مطالعه پارامترهای U و Y به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۱ لحاظ گردید.

$$h^C + h^P - D \geq AirGap^{Min} = 27.5\ m \quad (۲۱)$$

$$d_C \leq Ub_P \quad \& \quad 0 < U \leq 1 \quad (۲۲)$$

$$B \leq Y(l_P - d_C) \quad \& \quad 0 < Y \leq 1 \quad (۲۳)$$

$$A_{Deck} = (B + d_C)^2 \quad (۲۴)$$

$$A_{Deck} \geq A_{Deck}^{Min} \quad \& \quad A_{Deck}^{Min} = 4000\ m^2 \quad (۲۵)$$

$$\frac{b_P}{h_P} \geq R_{min} \quad with \quad R_{min} = 2 \quad (۲۶)$$

$$\frac{b_P}{h_P} \leq R_{max} \quad with \quad R_{max} = 4 \quad (۲۷)$$

تابع هدف و بسیاری از محدودیت‌ها، غیرخطی بودن مسئله را نشان دادند. گاهی مسائل غیرخطی را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف تبدیل به مسئله خطی کرد. در این مطالعه فرض بر این بود که مدل را نمی‌توان به مدل خطی تبدیل کرد.

۳-۳- تحلیل فرکانسی

۳-۳-۱- دامنه پاسخ سازه

حرکت هیو سکوی نیمه‌مغروق با رابطه (۲۸) قابل محاسبه است که m_z جرم افزوده سکو مطابق با رابطه (۹) بوده و A_w مساحت سطح آبخور چهار ستون است. همچنین در این رابطه F_Z نیروی تحریک موج است که در بخش بعدی توضیح داده شده است.

$$(m + m_z)\ddot{z} + N_z\dot{z} + (\rho g A_w)z = F_Z \cos(\omega t + \sigma) \quad (۲۸)$$

جابجایی سازه با فرض در نظر گرفتن موج منظم (رابطه ۲۹) و از حل معادله دیفرانسیل به صورت رابطه ۳۰ محاسبه گردید.

$$z = z_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (۲۹)$$

$$z_a = \frac{F_Z}{\sqrt{\{\rho g A_w - (m + m_z)\omega^2\}^2 + (N_z\omega)^2}} \quad (۳۰)$$

با جایگذاری فرکانس طبیعی سازه در حرکت هیو (رابطه ۳۱)، دامنه پاسخ سازه (z_a) به صورت رابطه (۳۲) بازنویسی شد.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{m + m_z}} \qquad (۳۱)$$

در رابطه (۳۲) که با روابط کمکی (۳۳) و (۳۴) محاسبه گردید، β میرایی سازه بوده که نیاز به محاسبات پیچیده دارد. به دلیل نبود اطلاعات کافی در مطالعه فوق، نسبت میرایی (ζ) در محدوده معرفی شده بر اساس استاندارد *DNV* [۲۱]، برابر ۲ درصد لحاظ شد.

$$z_a = \frac{F_Z / \rho g A_w}{\sqrt{\left\{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + (2\beta)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \qquad (۳۲)$$

$$\beta = \frac{actual\ damping}{critical\ damping} = \frac{N_z}{2(m + m_z)\omega_n} \qquad (۳۳)$$

$$N_z = \zeta \frac{\rho g A_w}{\omega_n} \quad \& \quad \zeta = 2\% \qquad (۳۴)$$

۳-۳-۲- نیروی تحریک موج در شرایط موج از روبرو[۳۸]

شکل ۴، سکوی *GVA4000* را تحت شرایط برخورد موج از روبرو، همراه با دستگاه مختصات و جهت موج، برای تعیین نیروی تحریک موج (F_Z)، نشان می‌دهد. با استفاده از پتانسیل سرعت ارائه شده در رابطه (۳۵) و به کمک روابط (۳۶) و (۳۷)، می‌توان ویژگی‌های یک موج تاج بلند منظم را که در جهت مخالف محور ξ در یک سیال با عمق بی‌نهایت پیش می‌رود، استنباط کرد.

$$\phi = \frac{\omega}{K} \zeta_a e^{-k\zeta} \sin(K\eta + \omega t) \qquad (۳۵)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_w} = \sqrt{gK} \qquad (۳۶)$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} \qquad (۳۷)$$

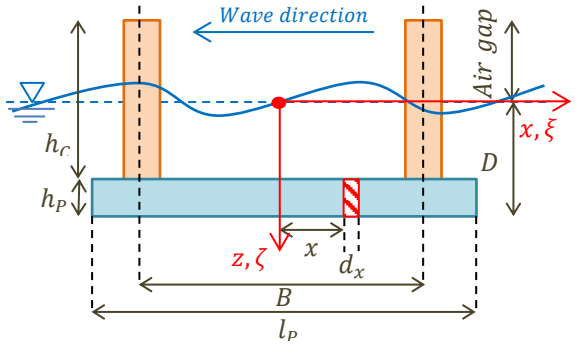
از رابطه (۳۵)، حرکت سطح آب موجود در رابطه (۳۸)، سرعت مداری[۳۹] ارائه شده در رابطه (۳۹)، شتاب ذرات آب در رابطه (۴۰) و فشار ناشی از تشکیل امواج موجود در رابطه (۴۱) را می‌توان استنباط کرد.

$$\zeta_w = \frac{1}{g}\frac{\partial \phi}{\partial t} = \zeta_a e^{-K\zeta} cos(K\eta + \omega t) \qquad (۳۸)$$

$$\dot{\zeta}_w = \frac{d\zeta_w}{dt} = \frac{d\phi}{d\zeta} = -\omega \zeta_a e^{-K\zeta} \sin(K\eta + \omega t) \qquad (۳۹)$$

$$\ddot{\zeta}_w = \frac{d^2\zeta_w}{dt^2} = \frac{d\dot{\zeta}_w}{dt} = -\omega^2 \zeta_a e^{-K\zeta} \cos(K\eta + \omega t) \qquad (۴۰)$$

$$P = -\rho \frac{\partial \emptyset}{\partial t} = -\rho g \zeta_a e^{-K\eta} \cos(K\eta + \omega t) \qquad (۴۱)$$



شکل ۴- شماتیک سکوی نیمه‌مغروق *GVA4000* در شرایط موج از روبرو

نیروی تحریک موج را می‌توان با مجموع سه نیروی زیر تقریب زد:

- نیروی فرود-کریلوف[۴۰] F_{Z1}
- نیروی اینرسی ناشی از شتاب ذرات آب F_{Z2}
- نیروی میرایی ناشی از میرایی بدنه F_{Z3}

بنابراین کل نیروی تحریک موج با رابطه (۴۲) محاسبه می‌شود.

$$F_Z = \sqrt{(F_{Z1} + F_{Z2})^2 + (F_{Z3})^2} \qquad (۴۲)$$

نیروی میرایی در ارزیابی دامنه حرکت در ناحیه تشدید دارای اهمیت است، اما در خارج از این ناحیه، تأثیر آن بر دامنه نسبتاً ناچیز است. با توجه به اینکه نیروی میرایی در یک سکوی نیمه‌مغروق بسیار کوچک‌تر از نیروی فرود-کریلوف و نیروی اینرسی است، می‌توان آن را به جز در محدوده تشدید، نادیده گرفت. همچنین از آنجا که سکوهای نیمه‌مغروق مورد مطالعه در این تحقیق دارای فرکانس طبیعی پایینی (از مرتبه ۰/۳۱۴ رادیان بر ثانیه [۲۳]) هستند، فرکانس اکثر امواج بسیار بالاتر از فرکانس طبیعی خواهد بود. در نتیجه در این مطالعه، از اثر نیروی میرایی صرف نظر شد و کل نیروی تحریک موج به صورت رابطه (۴۳) بیان گردید.

$$F_Z = F_{Z1} + F_{Z2} \qquad (۴۳)$$

نیروی فرود-کریلوف (F_{z1})

نیروی فرود-کریلوف تحت شرایط موج از روبرو، مطابق رابطه (۴۴) فرمول‌بندی شد.

$$F_{z1} = (F_{z1})_{Ponton} + (F_{z1})_{Column} \qquad (۴۴)$$

نیروی فرود-کریلوف وارد بر پانتون‌ها با به‌کارگیری تئوری نواری تقریب زده شد. در این روش، پانتون به بخش‌های کوچکی (همانند شکل ۴) به طول d_x تقسیم‌بندی شده و نیروی فشار وارد بر هر

بخش محاسبه گردید. نیروی کل وارد بر پانتون از انتگرال‌گیری نیروهای وارد بر این بخش‌ها در طول پانتون به دست آمد.
نیروی فشار عمودی وارد بر یک مقطع به طول d_x که در فاصله x از محور Z (مطابق با شکل ۴) قرار دارد، با رابطه (۴۵) بیان شد.

$$df_z = -\rho g \xi_a \frac{h_P}{2} e^{-k\left((D-h_P)+\frac{h_P}{2}\right)} \cos(kx+\omega t)\, dx \int_0^{2\pi} e^{-k\frac{h_P}{2}\sin\theta} \sin\theta \, d\theta \quad (۴۵)$$

بنابراین نیروی کل وارد بر دو پانتون افقی را می‌توان پس از ساده‌سازی رابطه (۴۶) به صورت رابطه (۴۷) استنباط کرد.

$$(F_{z1})_{Pontoon} = -2\rho g \xi_a \frac{h_P}{2} e^{-k\left((D-h_P)+\frac{h_P}{2}\right)} \int_0^{2\pi} e^{-k\frac{h_P}{2}\sin\theta} \sin\theta \, d\theta \int_{-l_P/2}^{+l_P/2} \cos(kx+\omega t)\, dx \quad (۴۶)$$

$$(F_{z1})_{Pontoon} = -4\rho g \xi_a \frac{\pi}{4} h_P^2 e^{-k\left((D-h_P)+\frac{h_P}{2}\right)} \sin\frac{Kl_P}{2} \cos\omega t \quad (۴۷)$$

نیروی فرود-کریلوف وارد بر ستون‌ها با رابطه (۴۸) بیان شد.

$$(F_{z1})_{Column} = -\rho g \xi_a \pi d_C^2 e^{-k(D-h_P)} \cos\left(\frac{kB}{2}\right) \cos\omega t \quad (۴۸)$$

بدین ترتیب با جایگذاری روابط (۴۷) و (۴۸) در رابطه (۴۴)، نیروی فرود-کریلوف مطابق رابطه (۴۹) محاسبه گردید.

$$F_{Z1} = 2\rho g \xi_a \frac{\pi}{4} d_C^2 e^{-k(D-h_P)} \left\{2\cos\left(\frac{kB}{2}\right) - 2\left(\frac{h_P}{d_C}\right)^2 e^{-k\left(\frac{h_P}{2}\right)} \sin\left(\frac{kl_P}{2}\right)\right\} \cos\omega t \quad (۴۹)$$

نیروی اینرسی (F_{Z2})

نیروی اینرسی وارد بر یک بخش کوچک به طول d_x در فاصله x از محور Z (مطابق شکل ۴) از حاصل ضرب جرم افزوده و میانگین شتاب مداری ذرات آب در مرکز آن مقطع محاسبه شد. بر این اساس، رابطه (۵۰) برای این المان طول به دست آمد.

$$df_z = -\rho \frac{\pi}{4} h_P^2 \omega^2 \xi_a e^{-k\left((D-h_P)+\frac{h_P}{2}\right)} \cos(kx+\omega t)\, dx \quad (۵۰)$$

نیروی اینرسی وارد بر ستون‌ها با رابطه (۵۱) بیان شد. بنابراین، با جایگذاری روابط (۴۹) و (۵۱) در رابطه (۴۳) نیروی تحریک موج در امتداد قائم مطابق رابطه (۵۲) محاسبه شد که V_1 حجم ستون‌ها و α نسبت حجم پانتون‌ها به حجم ستون‌ها است.

$$F_{Z2} = -4\rho g \xi_a \frac{\pi}{4} h_P^2 e^{-k\left((D-h_P)+\frac{h_P}{2}\right)} \sin\frac{kl_P}{2} \cos\omega t \quad (۵۱)$$

$$F_Z = \rho g \xi_a \frac{V_1}{(D-h_P)} e^{-k(D-h_P)} \left\{\cos\left(\frac{kB}{2}\right) - e^{-k\left(\frac{h_P}{2}\right)} \left(\frac{4\alpha}{l_P/(D-h_P)}\right) \sin\left(\frac{kl_P}{2}\right)\right\} \cos\omega t \quad (۵۲)$$

۳-۳-۳- طیف تحریک

طیف موج جانسواپ[۴۱] $S_\xi(\omega)$ با ارتفاع موج شاخص (H_S) برابر ۱۳/۳ متر با دوره تناوب (T_P) برابر ۱۵/۵ ثانیه مربوط به موج ۱۰۰ ساله دریای جنوب چین [۵] ، طبق رابطه (۵۳) در نظر گرفته شد.

$$S_\xi(\omega) = \hat{a} H_S^2 \frac{\omega^{-5}}{\omega_P^{-4}} exp[-1.25(\omega/\omega_P)^{-4}] \gamma^{exp\left[-\frac{(\omega-\omega_P)^2}{2\tau^2\omega_P^2}\right]} \quad (۵۳)$$

در رابطه (۵۳)، τ پارامتر شکل است که مقدار آن اگر $\omega \le \omega_P \Leftrightarrow \tau = \tau_a = 0.07$ و در غیر اینصورت $\tau = \tau_b = 0.09$ است. مقدار $\hat{a}$ با رابطه (۵۴) محاسبه شد.

$$\hat{a} = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9+\gamma)^{-1}} \quad (۵۴)$$

در رابطه (۲۹)، γ پارامتر پیک است که با توجه به شرایط دریا و مطابق با رابطه (۵۵) در نظر گرفته شد.

$$\frac{T_P}{\sqrt{H_S}} < 3.6 \Rightarrow \gamma = 1$$
$$3.6 < \frac{T_P}{\sqrt{H_S}} < 5 \Rightarrow \gamma = exp\left(5.75 - 1.15\frac{T_P}{\sqrt{H_S}}\right)$$
$$\frac{T_P}{\sqrt{H_S}} > 5 \Rightarrow \gamma = 5 \quad (۵۵)$$

۳-۳-۴- طیف پاسخ و عملگر دامنه پاسخ

عملگر دامنه پاسخ (RAO) برابر با نسبت دامنه پاسخ سازه (z_a) به دامنه موج در هر باند فرکانسی است. در این راستا، دامنه موج برابر

با نصف ارتفاع موج ($H_{(\omega)}$) بیان شده در رابطه (۵۶) است. با در دست داشتن طیف تحریک ($S_\xi(\omega)$) و RAO، طیف پاسخ ($S_z(\omega)$) به کمک رابطه (۵۷) قابل محاسبه است.

$$H_{(\omega)} = 2\sqrt{2S_\xi(\omega)\Delta\omega} \quad (۵۶)$$

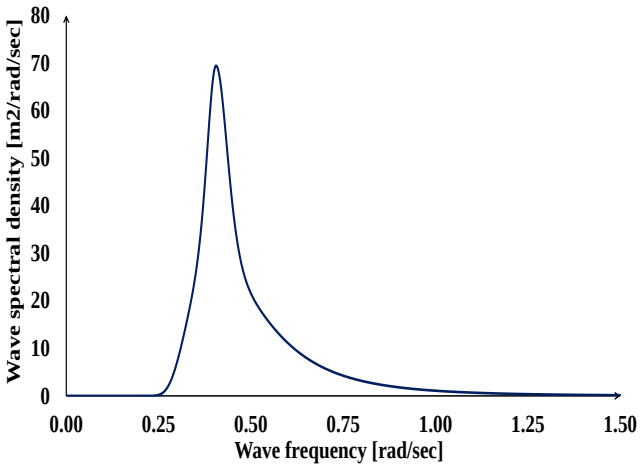
$$S_z(\omega) = |RAO|^2 S_\xi(\omega) \quad (۵۷)$$

مقدار پاسخ سکو به عنوان تابع هدف دوم از رابطه (۱)، با رابطه (۵۸) و با روش انتگرال‌گیری سیمپسون در بازه‌ی ۰ تا ۱/۵ رادیان بر ثانیه و گام ۰/۰۰۳ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

$$Z_2 = 2\sqrt{\int_0^\infty S_z(\omega)d\omega} \quad (۵۸)$$

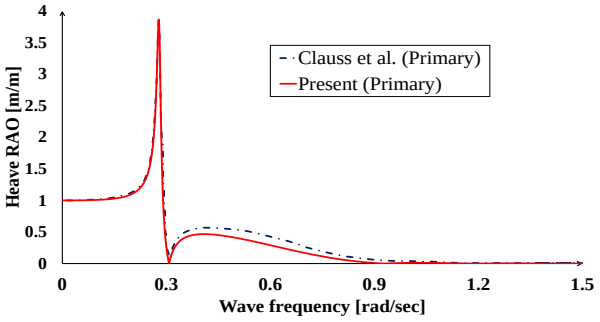
۳-۴- صحت سنجی روابط استخراج شده

در این مطالعه، شرایط موج ۱۰۰ ساله دریای جنوب چین برای محاسبات حوزه فرکانس مورد استفاده قرار گرفت. طیف جانسواپ رابطه (۵۳) با شرایط بیان شده، در شکل ۵ نشان داده شده است.



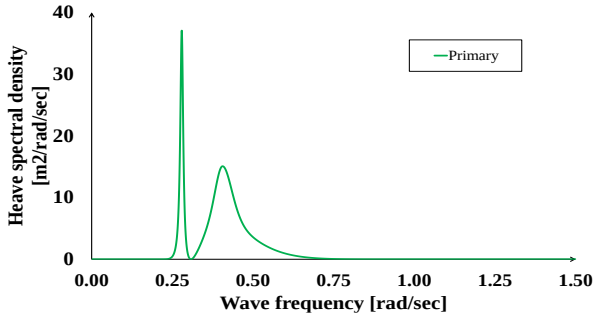
شکل ۵- طیف جانسواپ با شرایط موج ۱۰۰ ساله دریای جنوب چین [۵] ($H_s = 13.3\ m\ And\ T_P = 15.5\ sec$)

با به کارگیری روابط *Heave-RAO* و مقایسه نتایج با گزارش کلاوس و همکاران [۱۶] در شکل ۶، تطابق بین دو نتیجه مشاهده شد. در این خصوص، خطاهای MAD[۴۲]، MSE[۴۳] و $RMSE$[۴۴] به ترتیب حدود ۰/۰۸۴، ۰/۰۲۱ و ۰/۱۴۶ برآورد گردید. این محدوده در رنج محدوده قابل قبول آماری است [۲, ۳]. قابل توجه است که جهت انجام محاسبات دقیق‌تر می‌توان از تئوری تفرق[۴۵] موج استفاده کرد. با پذیرش تفاوت‌های ناچیز دو نمودار، وزن سکوی نیمه‌مغروق با هندسه اولیه برابر ۱۰۷۵۹ تن برآورد شد.



شکل ۶- صحت‌سنجی نمودار *RAO* با استفاده از نتایج گزارش شده و روابط بسط داده شده در این مطالعه

با استفاده از طیف جانسواپ و نمودار *RAO* مربوط به هیو صحت‌سنجی شده، طیف پاسخ سازه مطابق با شکل ۷ به دست آمد. در شکل ۷ پیک اول (در محدوده ۰/۲۷۵ رادیان بر ثانیه) مربوط به فرکانس ویژه سکوی نیمه‌مغروق و پیک دوم (در محدوده ۰/۴۰۵ رادیان بر ثانیه) مربوط به فرکانس پیک موج است.



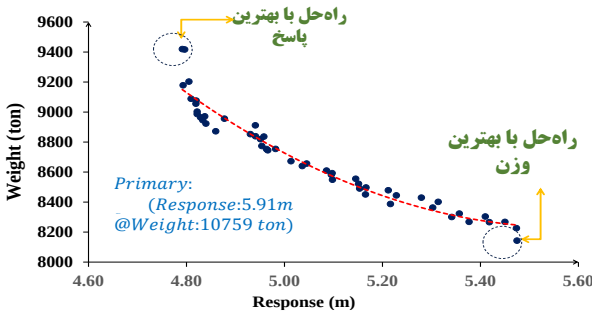
شکل ۷- طیف پاسخ سکوی نیمه‌مغروق *GVA4000* با هندسه اولیه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعیین جبهه پارتو

با انجام روند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم مورچگان و در نظرگیری کران‌ها با ۳۵ درصد بالاتر و پایین‌تر [۱۷، ۲۲] متغیرهای تصمیم نسبت به مقادیر اولیه معرفی شده در جدول ۱ [۱۶]، جبهه پارتو حاصل از ترکیبات مختلف متغیرهای تصمیم در شکل ۸ ارائه شد. برای تضمین تکرارپذیری نتایج، از دانه‌بذر ثابت مطابق بخش ۲-۲ استفاده شد. انتخاب نقطه بهینه از جبهه پارتو به نظر کارفرما و اهمیت توابع هدف بستگی دارد. برای این منظور دو راه حل در نظر گرفته شد ۱) محاسبه پاسخ با در نظر گرفتن کمترین وزن ۲) محاسبه وزن با در نظر گرفتن بهترین پاسخ. در راه‌حل با کم‌ترین وزن، کاهش ۲۴/۳ درصد (انحراف معیار: ۹۴ تن) در وزن و بهبود ۷/۴ درصد (انحراف معیار: ۰/۰۶ متر) در پاسخ مشاهده شد. در راه‌حل با کم‌ترین پاسخ، بهبود ۱۸/۹ درصد (انحراف معیار: ۰/۰۱ متر) در پاسخ و کاهش ۱۲/۴ درصد (انحراف معیار: ۱۶۱ تن) در وزن حاصل گردید (جدول ۲). مطابق با شکل ۸، تمامی نقاط جبهه پارتو، بهبودی در هر دو هدف نسبت به حالت اولیه نشان دادند. لازم

به ذکر است که مقادیر انحراف معیار گزارش‌شده حاصل ۵ اجرای متعدد بدون اعمال دانه‌بذر ثابت بوده و تنها دو راه‌حل حدّی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل کامل پایداری کل جبهه پارتو به مطالعات آتی موکول گردید.

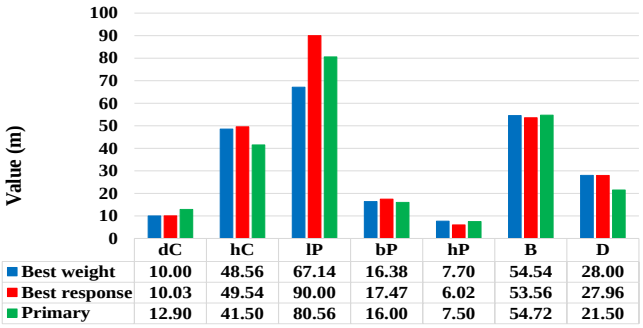


شکل ۸- جبهه پارتو حاصل از بهینه‌سازی دو هدفه و مقایسه نتایج اهداف بهینه‌سازی با سازه اولیه

۴-۲- نتایج بهینه‌سازی

در شکل ۹ و جدول ۲ نتایج متغیرهای تصمیم و اعضای سازه‌ای شامل هواخور، وزن پانتون‌ها و ستون‌ها، بالاست، وزن و پاسخ سکو در هر دو راه‌حل، شامل کمترین پاسخ و مناسب‌ترین وزن، با مقادیر مربوط به سازه اولیه مقایسه شده است. با توجه به محدودیت اعمال شده برای هواخور (بیشتر از مقدار آن در سازه اولیه)، قید هواخور به طور صحیح عمل کرده و مقدار آن در مقایسه با حالت اولیه افزایش یافته است. تغییرات جزئی در ابعاد سازه (شکل ۹) منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در وزن نهایی و پاسخ هیو (جدول ۲) شده است. راه‌حل با بهترین وزن، عمدتاً با کاهش طول پانتون حاصل شده است. در حالی که راه‌حل با بهترین پاسخ، با افزایش این طول به دست آمده است. در هر دو راه‌حل، آبخور و ارتفاع ستون افزایش یافته‌اند. نتایج جدول ۲ نشان‌دهنده تأثیر بیشتر پانتون‌ها نسبت به ستون‌ها در روند بهینه‌سازی است. بنابراین به نظر می‌رسد تغییر در طول پانتون بیشترین تأثیر را در کاهش وزن داشته است.

در شکل ۱۰ نمودار *RAO* حرکت هیو و شکل ۱۱ طیف پاسخ سازه برای هندسه بهینه در هر دو راه‌حل نسبت به سازه اولیه نشان داده شده است. علاوه بر قیود بیان شده در بخش ۳-۲، پیک نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به گونه‌ای محدود شد که از سازه اولیه فراتر نروند. مطابق با این اشکال، پیک‌های اول و دوم پایین‌تر از سازه اولیه بوده که نشان از درستی عملکرد الگوریتم و محدودیت‌ها دارد. مشاهده شد که الگوریتم تمایل دارد روند بهینه‌سازی را به سمتی پیش ببرد که تشدید در فرکانس‌های پایین‌تر، که احتمال رخداد موج کمتر است، اتفاق بیافتد. این جابجایی عمدتاً ناشی از کاهش نسبت ارتفاع ستون به عمق آبخور است. به عبارتی، این نسبت در سازه اولیه در محدوده ۱/۹ بوده، اما در نتایج بهینه این نسبت ابعادی، وارد محدوده ۱/۷ تا ۱/۸ شده است. افزایش ارتفاع ستون منجر به افزایش جرم سازه و افزایش عمق آبخور منجر به افزایش جرم افزوده می‌شود. طول پانتون تأثیر کم‌تری بر فرکانس طبیعی حرکت هیو دارد، زیرا افزایش جرم بر افزایش سختی غالب است. اما افزایش ارتفاع ستون تقریباً سختی هیو را تغییر نمی‌دهد. تأثیر کاهش قطر ستون توسط پارامترهای D و h_C جبران شده است. سایر پارامترها تغییر محسوسی نداشته‌اند. نتایج نشان دادند که نسبت ارتفاع ستون به عمق آبخور، پارامترهای تاثیرگذار در کاهش پاسخ هیو سکو هستند.

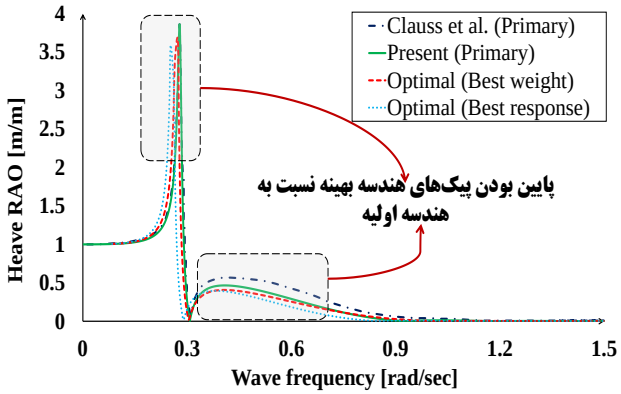


شکل ۹- متغیرهای تصمیم در سازه اولیه و بهینه‌ترین وزن، پاسخ هیو

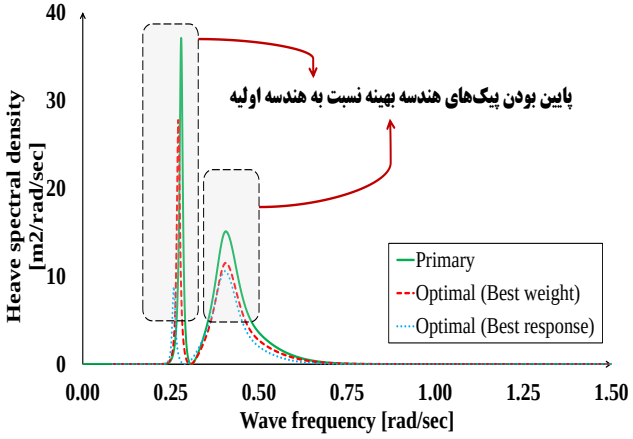
اگرچه کاهش پیک‌ها در این مطالعه به عنوان یک ضرورت برای الگوریتم تعریف نشده بود و تنها کران بالایی به عنوان محدودیت اعمال گردید، اما نتایج نشان داد در راه‌حل بهترین وزن، پیک اول حدود ۲۵ درصد و پیک دوم حدود ۲۳ درصد کاهش یافته است. در راه‌حل بهترین پاسخ نیز پیک اول حدود ۷۱ درصد و پیک دوم تقریباً ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲- مقایسه سکو اولیه و بهینه در هر دو راه‌حل

پارامتر	واحد	سازه اولیه	راه‌حل بهنیه	
			بهترین پاسخ	بهترین وزن
هواخور	متر	۲۷/۵۰	۲۷/۶۰	۲۸/۲۶
وزن پانتون‌ها	تن	۶۵۶۰/۹۰	۵۵۲۹/۲۵	۴۳۴۱/۴۶
وزن ستون‌ها	تن	۴۱۹۸/۶۰	۳۸۸۹/۹۹	۳۸۰۱/۵۴
بالاست	تن	۲۴۳۵۲/۷۵	۱۵۲۱۱/۹۲	۱۵۱۷۰/۶۳
وزن سکو	تن	۱۰۷۵۹/۵۴	۹۴۱۹/۵۵	۸۱۴۳/۰۰
پاسخ سکو	متر	۵/۹۱	۴/۷۹	۵/۴۷



شکل ۱۰- مقایسه *Heave-RAO* سازه اولیه و بهینه شده



شکل ۱۱- مقایسه طیف پاسخ سازه اولیه و سازه‌های بهینه شده

علاوه بر پارامترهای بیان شده، در جدول ۳ تأثیر میزان ظرفیت پرشدگی پانتون (Z) بر نتایج وزن بهینه سکو نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش Z، وزن بهینه سازه روندی نزولی از ۹۱۶۱ به ۸۰۵۱ تن خواهد داشت که حاکی از آزادی عمل بیشتر الگوریتم بهینه‌ساز در استفاده از بالاست به‌جای جرم سازه‌ای برای تأمین پایداری است. همزمان، پاسخ بهینه به دلیل افزایش جرم کل، به طور پیوسته از ۵/۶۸ به ۴/۷۸ متر بهبود یافته است. در نهایت مقدار Z برابر با ۰/۸ به عنوان نقطه بهینه انتخاب شد زیرا این مقدار ضمن دستیابی به پاسخ هیو مطلوب ۴/۷۹ متر و وزن پایین ۸۱۴۳ تن، حاشیه امنیت عملیاتی ۲۰ درصدی را برای مدیریت شرایط عملیاتی غیرمنتظره حفظ کرد.

جدول ۳- تاثیر پارامتر میزان پرشدگی پانتون بر نتایج بهینه‌سازی

Z	راه‌حل با بهترین وزن		راه‌حل با بهترین پاسخ	
	وزن (تن)	پاسخ هیو (متر)	وزن (تن)	پاسخ هیو (متر)
۰/۷۰	۹۱۶۱	۵/۸۱	۹۴۵۴	۵/۶۸
۰/۷۵	۸۵۲۸	۵/۶۲	۹۴۳۷	۵/۲۷
۰/۸۰	۸۱۴۳	۵/۴۷	۹۴۲۰	۴/۷۹
۰/۸۵	۸۲۳۵	۵/۳۸	۹۴۷۱	۴/۷۸
۰/۹۰	۸۰۵۱	۵/۲۳	۹۱۱۶	۴/۷۸

۵ – جمع‌بندی و پیشنهادات

در این مطالعه به بهینه‌سازی دو هدفه وزن و پاسخ هیو سکو به‌طور همزمان با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان با درنظرگیری محدودیت‌هایی نظیر پایداری، دوره تناوب، عمق آبخور و پیک نمودارهای *RAO* و طیف پاسخ سازه، در شرایط موج ۱۰۰ ساله دریای جنوب چین، پرداخته شد.

پس از صحت‌سنجی و ارائه راه‌حل‌های پارتو، دو راه‌حل ۱) راه‌حل بهترین وزن و ۲) راه حل بهترین پاسخ معرفی گردید. نتایج حاصل به صورت زیر جمع‌بندی شد:

- راه‌حل بهترین وزن، کاهش ۲۴/۳ درصد در وزن و بهبود ۷/۴ درصد در پاسخ را نشان داد.
- راه‌حل بهترین پاسخ، بهبود ۱۸/۹ درصد در پاسخ و کاهش ۱۲/۴ درصد در وزن را به همراه داشت.
- کاهش قابل‌توجهی در پیک‌های طیف پاسخ مشاهده شد. این در حالی بود که کاهش در پیک ضرورتی برای الگوریتم نبوده و صرفاً برآورده کردن کران بالایی در این مطالعه کفایت می‌کرد.
- طول پانتون بیشترین تأثیر را بر وزن و نسبت ارتفاع ستون به عمق آبخور بیشترین تأثیر را بر پاسخ هیو داشت.

برای افزایش کاربرد عملی نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود هندسه اصلی سکو با در نظر گرفتن مهاربندها و جزئیات سکو مدل‌سازی و بررسی شده و پاسخ آن بهینه‌سازی گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود در کارهای آتی، این مطالعه بار دیگر برای انواع مختلف سکوها و الگوریتم‌ها تکرار شود. در این مسیر، در نظر گرفتن محدودیت‌های جامع‌تری همچون قیود سازه‌ای، الزامات مهاری، خستگی، منحنی بازگردانندگی، زاویه پایداری، شرایط انتقال و دوام، علاوه بر شرایط عملیاتی و بر اساس استانداردهای معتبر، می‌تواند به تأیید و تعمیم گسترده‌تر روند بیان‌شده کمک کند.

۶ – کلید واژگان

1- Floating Production, Storage and Offloading
2- Tensile Leg Platforms
3- Spar
4- Semi-submerged
5- Heave
6- Surge
7- Sway
8- Roll
9- Yaw
10- Pitch
11- Resonance
12- Tuned Heave Plate Inerter
13- Inerter-based Vibration Isolation System
14- Moonpool
15- Damping sheets

16- Porous Styrene-Butadiene Rubber (Porous SBR)
17- Emulsion Styrene-Butadiene Rubber (E-SBR)
18- Metaheuristic algorithms
19- Genetics
20- Particle Swarm
21- FireFly
22- Ant Colony
23- Pheromones
24- Benchmark functions
25- Draught
26- Response Amplitude Operator
27- Penalty function
28- Dominate
29- Pareto
30- Crowding distance
31- Metacenter
32- Keel
33- Center of Buoyancy
34- Center of Gravity
35- Waterline
36- Ballast
37- Operating conditions
38- Head-sea
39- Orbital
40- Froude-Krylov
41- JONSWAP
42- Mean Absolute Deviation
43- Mean Squared Error
44- Root Mean Square Error
45- Diffraction theory

۷- مراجع

1- Shu, H., Yao, A., Ma, K.-T., Ma, W., and Miller, J., API RP 2SK 4th edition-an updated stationkeeping standard for the global offshore environment, in *Offshore Technology Conference*, 2018: OTC, p. D011S004R001.
2- Emami, A. and Karimirad, M., "Further development of offshore floating solar and its design requirements," *Marine Structures*, vol. 100, p. 103730, 2025.
3- Mohammadi, P., Emami, A., Gharabaghi, A. R. M., Tahmooresi, S., Chenaghlou, M. R., and Ghavifekr, H. B., "Evaluation of RAOs of a semi-submersible platform using field measurements: A full-scale model in Caspian sea environmental conditions," *Marine Structures*, vol. 91, p. 103467, 2023.
4- DNV, G., "DNV-OS-J101–Design of offshore wind turbine structures, ," *DNV GL*, 2004.
5- Ma, R., Bi, K., and Hao, H., "Mitigation of heave response of semi-submersible platform (SSP) using tuned heave plate inerter (THPI)," *Engineering Structures*, vol. 177, pp. 357-373, 2018.
6- Liu, K. and Ou, J., "A novel tuned heave plate system for heave motion suppression and energy harvesting on semi-submersible platforms," *Science China Technological Sciences*, vol. 59, no. 6, pp. 897-912, 2016.
7- Li, Y., Shi, Z., Yang, H., Xie, D., and Chen, Y., "Motion responses optimal design of semi-submersible platform equipped with a hollow moonpool based on CFD," *Ocean Engineering*, vol. 311, p. 119010, 2024.
8- Emami, A. and Gharabaghi, A. R. M., "Improvement of the heave motion of a semi-submersible platform with damping sheets subjected to sea waves," *Journal Of Marine Engineering*, vol. 19, no. 38, pp. 62-76, 2023.
9- Emami, A., Pourjafari, N., and Parghi, A., "Effect of porous SBR composites on mitigating the heave motion response of a semi-submersible platform," *Ocean Engineering*, vol. 295, p. 116856, 2024.
10- Chandrasekaran, S. and Das, A. K., Heave Minimization of Semisubmersible Using Passive Control System, in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2025: ISOPE, pp. ISOPE-I-25-139.
11- Emami, A. and Gharabaghi, A. R. M., "Application of poroelastic layers in a semi-submersible platform: Devising an efficient heave motion response reduction method," *Ocean engineering*, vol. 201, p. 107148, 2020.
12- Mathew, T. V., "Genetic algorithm," *Report submitted at IIT Bombay*, vol. 53, pp. 18-19, 2012.
13- Wang, D., Tan, D., and Liu, L., "Particle swarm optimization algorithm: an overview," *Soft computing*, vol. 22, no. 2, pp. 387-408, 2018.
14- Fister, I., Fister Jr, I., Yang, X.-S., and Brest, J., "A comprehensive review of firefly algorithms," *Swarm and evolutionary computation*, vol. 13, pp. 34-46, 2013.

15- Socha, K. and Dorigo, M., "Ant colony optimization for continuous domains," *European journal of operational research*, vol. 185, no. 3, pp. 1155-1173, 2008.

16- Clauss, G. n. F., Schmittner, C., and Stutz, K., Time-domain investigation of a semisubmersible in rogue waves, in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2002, vol. 36126, pp. 509-516.

17- Emami, A. and Mostafa Gharabaghi, A. R., "Introducing a simple and reliable multi-objective optimization method to estimate hull dimensions of a semi-submersible rig," *Journal Of Marine Engineering*, vol. 16, no. 31, pp. 29-40, 2020.

18- Patel, M. H., *Dynamics of offshore structures*. Butterworth-Heinemann, 2013.

19- White, F.1994, *Fluid Mechanics, McGraw-Hill Inc*, ed: USA.

20- Xue, W., "Design, numerical modelling and analysis of a spar floater supporting the DTU 10MW wind turbine," NTNU, 2016.

21- Veritas, N., *Environmental conditions and environmental loads*. Det Norske Veritas Oslo, Norway, 2000.

22- Gallala, J. R. 2013. Hull Dimensions of a Semi-Submersible Rig: A Parametric Optimization Approach, *Institutt for marin teknikk.*

23- Oo, K. M. (1974). The design of semi-submersibles for minimum vertical motion (*Doctoral dissertation, University of Glasgow*).