J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 50, 2026. (59-75)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Numerical Investigation of Hydrodynamic Responses of a Cellular-Truss Spar Platform Using MOSES and Development of Hydrodynamic Parameters for Dynamic Analysis

Fatemeh Zolfagharnasab[*1]

[1] *PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, fzolfagharnasab@yahoo.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 22 Jun 2026
Last modification: 10 Nov 2026
Accepted: 12 Nov 2026
Available online: 14 Nov 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Truss-Cell Spar Platform
Numerical Hydrodynamic Modeling
Dynamic Response Analysis
MOSES Software Simulation
Response Amplitude Operator

ABSTRACT

Accurate prediction of the hydrodynamic responses of floating offshore platforms is essential for their safe design and performance assessment under environmental loading conditions. In this study, the hydrodynamic behavior of a cell-truss spar platform was investigated using the MOSES software based on the Boundary Element Method (BEM). A three-dimensional numerical model of the platform was developed using approximately **1,800 boundary panels**, and a mesh convergence study confirmed that increasing the mesh density resulted in variations of less than **2%**, demonstrating the numerical stability of the model. Hydrodynamic analyses were carried out over a frequency range of **0–1.2 rad/s**, and the added-mass coefficients together with the Response Amplitude Operators (RAOs) for surge, heave, and pitch motions were determined. The numerical results were validated against published data obtained using the Finite Element Method (FEM). The results demonstrate that the developed BEM model accurately predicts the hydrodynamic responses of the platform, with average relative errors of **5.63%, 6.10%, and 8.50%** for the heave, surge, and pitch motions, respectively. In addition, the maximum dynamic responses in all three degrees of freedom occurred near a frequency of **0.34 rad/s**, indicating resonance and showing good agreement with the reference results. The analysis of the added-mass coefficients further revealed that, in the resonance region, the ratios of added mass to the structural mass remained approximately **2.0** for surge and **0.5** for heave, with no abrupt variations, confirming the stable hydrodynamic behavior of the developed numerical model. Beyond model validation, this study presents, for the first time, the added-mass coefficients of a cell-truss spar platform, which were not reported in the reference study, thereby extending the available hydrodynamic database for this class of offshore structures. The findings demonstrate that the BEM-based model implemented in MOSES provides reliable accuracy for the hydrodynamic analysis and design of complex spar platforms and can serve as an effective tool for future studies on the dynamic analysis and structural design of offshore floating systems.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2026 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/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۵۰، ۱۴۰۵، (۷۵-۵۹)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

تحلیل عددی پاسخ‌های هیدرودینامیکی سکوی اسپار سلولی-خرپایی با استفاده از MOSES و توسعه پارامترهای هیدرودینامیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی دینامیکی

فاطمه ذوالفقارنسب[1*]

[1] دانشجوی دکتری رشته مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، fzolfagharnasab@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۲۱
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۲۳

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:
سکوی اسپار خرپایی-سلولی
مدل‌سازی عددی هیدرودینامیکی
تحلیل پاسخ دینامیکی
شبیه‌سازی با نرم‌افزار MOSES
نمودار پاسخ دامنه

چکیده

تحلیل دقیق پاسخ‌های هیدرودینامیکی سکوهای شناور فراساحلی، نقش مهمی در طراحی ایمن و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط محیطی دارد. در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی یک سکوی اسپار سلولی–خرپایی با استفاده از نرم‌افزار MOSES و بر پایه روش المان مرزی (BEM) مورد بررسی قرار گرفت. مدل سه‌بعدی سکو با شبکه‌ای شامل حدود ۱۸۰۰ پنل ایجاد شد و پس از انجام مطالعه همگرایی، اختلاف نتایج با افزایش تراکم شبکه کمتر از ۲ ٪ به دست آمد. تحلیل‌ها در بازه فرکانسی صفر تا ۱/۲ rad/s انجام شد و ضرایب جرم افزوده و تابع پاسخ دامنه (RAO) برای حرکات سرج، هیو و پیچ استخراج گردید. به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج مدل با داده‌های منتشرشده مبتنی بر روش المان محدود (FEM) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته قادر به پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های هیدرودینامیکی سکو است؛ به‌گونه‌ای که میانگین خطای نسبی در حرکات هیو، سرج و پیچ به‌ترتیب ۵/۶۳٪، ۶/۱۰٪ و ۸/۵۰٪ به دست آمد. همچنین، بیشینه پاسخ‌های دینامیکی هر سه درجه آزادی در حوالی فرکانس ۰/۳۴ rad/s مشاهده شد که بیانگر وقوع تشدید و تطابق مناسب با نتایج مرجع است. بررسی ضرایب جرم افزوده نیز نشان داد که نسبت جرم افزوده به جرم سازه در ناحیه تشدید برای حرکات سرج و هیو به‌ترتیب در حدود ۲ و ۰/۵ باقی مانده و تغییرات ناگهانی ندارد که این موضوع پایداری رفتار هیدرودینامیکی مدل را تأیید می‌کند. علاوه بر اعتبارسنجی مدل، این پژوهش برای نخستین بار ضرایب جرم افزوده سکوی اسپار سلولی–خرپایی را که در مطالعه مرجع گزارش نشده‌اند، استخراج و ارائه می‌کند و بدین‌ترتیب پایگاه داده هیدرودینامیکی این نوع سازه را توسعه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدل مبتنی بر BEM در نرم‌افزار MOSES از دقت و قابلیت اطمینان مناسبی برای تحلیل و طراحی سکوهای اسپار پیچیده برخوردار بوده و می‌تواند در مطالعات آینده مرتبط با تحلیل دینامیکی و طراحی سازه‌های فراساحلی مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

۱ - مقدمه

سازه‌های شناور فراساحلی، به‌ویژه سکوهای اسپار، به‌عنوان یکی از گزینه‌های برجسته برای توسعه میادین نفتی در آب‌های عمیق و نیز بهره‌برداری از انرژی بادی دریایی شناخته می‌شوند. ساختار ساده، پایداری مناسب و امکان پیکربندی با سیستم‌های مختلف مهاربندی، این سکوها را به انتخابی محبوب در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی تبدیل کرده است [۱, ۲].

در این میان، افزودن صفحات میرایی به سازه‌های شناور نوع اسپار موجب کاهش قابل‌توجه پاسخ پیچ در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها شده است [۱].

با پیشرفت‌های فناورانه، طراحی‌های نوینی از این سکوها مانند نوع سلولی–خرپایی توسعه یافته‌اند که ترکیبی از سبک‌سازی و افزایش پایداری را ارائه می‌دهند [۳, ۴].

به‌علاوه، در مطالعات جدیدتر، استفاده از پوسته‌های متخلخل در بدنه اسپار، باعث تضعیف نیروهای موجی و در نتیجه کاهش حرکات هیو شده است [۵]. چنین نوآوری‌هایی به‌طور مستقیم در بهبود عملکرد دینامیکی این سازه‌ها و افزایش عمر بهره‌برداری آن‌ها تأثیرگذارند [۶].

مدلسازی دینامیکی این سازه‌ها تحت تأثیر بارهای ترکیبی باد، جریان و موج، چالش‌برانگیز است. روش‌هایی مانند تحلیل‌های فرکانسی و زمانی با استفاده از مدل‌های پتانسیلی، به‌ویژه با بهره‌گیری از نرم‌افزارهایی نظیر MOSES، در تحلیل دینامیک سکوهای اسپار گسترده شده‌اند [۷, ۸]. به‌طور خاص، نرم‌افزار MOSES امکان تحلیل همزمان اثرات جریان و موج را با دقت بالا فراهم می‌آورد که در بسیاری از مطالعات اخیر برای ارزیابی ضرایب جرم افزوده و تابع پاسخ دامنه استفاده شده است [۹, ۱۰].

مطالعاتی مانند تحقیق ران و همکاران [۱۱] و وی و همکاران [۱۲] بر توسعه مدل‌های جانشین[۱] برای تحلیل پاسخ دینامیکی سکوهای اسپار متمرکز شده‌اند. آن‌ها توانستند با ترکیب این مدل‌ها با سیستم مهاربندی و مدل‌های هیدرودینامیکی، نتایج دقیق‌تری در مقایسه با داده‌های تجربی به‌دست آورند. همچنین هالاک و همکاران با تلفیق روش‌های تجربی و عددی در طراحی سکوی WIND-Bos نشان دادند که چنین ترکیب‌هایی باعث افزایش اعتبار نتایج مدل‌سازی می‌شود [۱۳].

پیش‌بینی پاسخ دینامیکی بلندمدت این سازه‌ها، مستلزم درک صحیح از نیروهای مرتبه دوم، نیروهای موج، کشش مهاربندها و اندرکنش آن‌هاست [۱۴]. تامسن و همکاران در مطالعه‌ای تطبیقی، عملکرد مدل موریسون و روش المان مرزی را برای سکوی تترا اسپار مقایسه کردند و نشان دادند که ترکیب مناسب نیروهای لختی و کششی برای دقت تحلیل ضروری است [۱۵].

مطالعات نوین نیز تأکید دارند که استفاده صرف از روش‌های تجربی، به دلیل هزینه بالا و عدم نمایش دقیق پدیده‌های سه‌بعدی گذرا، کافی نیست. مدل‌سازی کامل و تحلیل‌های غیرخطی[۲] مبتنی بر هیدرودینامیک پتانسیلی سه‌بعدی نقش فزاینده‌ای در توسعه تحلیل‌های دقیق‌تر داشته‌اند [۱۸و۱۷, ۱۶].

در زمینه طراحی بهینه، رویکرد طراحی همزمان کنترل و سازه[۳]، افق‌های جدیدی در بهبود بازده و کاهش پاسخ‌های دینامیکی گشوده است. مطالعات بیات و همکاران و ساندراجان و همکاران نشان داده‌اند که استفاده از طراحی همزمان کنترل و سازه، موجب افزایش تولید انرژی سالانه تا بیش از ۱۰٪ و همچنین بهینه‌سازی کنترل در شرایط غیرایستا می‌شود[۲۰و۱۹, ۲].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مشخصات سیستم مهار و شرایط محیطی نقش مهمی در رفتار دینامیکی سازه‌های شناور دارند. در این راستا، مطالعه انجام‌شده توسط علی معاصمی و همکاران[۲۸] به بررسی اثر جهت موج، عمق آب و آرایش مهاربندی بر پلیداری سازه‌های شناور بسیار بزرگ (VLFS) در دریای خزر پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم‌های مهاربندی می‌توانند پاسخ‌های افقی سازه را کنترل کرده و بر رفتار دینامیکی آن اثرگذار باشند. با وجود تفاوت در نوع سازه مورد بررسی، این پژوهش اهمیت مدل‌سازی دقیق سیستم مهار و اثر آن بر پاسخ هیدرودینامیکی سازه‌های شناور را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، این موضوع برای یک سکوی اسپار سلولی-خرپایی با سیستم مهار کابل–زنجیر مورد بررسی قرار گرفته است.

در این میان، مطالعه حاضر به بررسی هیدرودینامیکی یک سکوی اسپار سلولی–خرپایی نوین می‌پردازد که با هدف کاهش وزن، بهبود پایداری و عملکرد حرکتی طراحی شده است. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل‌های عددی و نرم‌افزارMOSES ، ضرایب جرم افزوده و نیروهای موجی در درجات آزادی هیو و سرج استخراج شده و توابع پاسخ دامنه نیز در حالات هیو، سرج و پیچ محاسبه شده‌اند. برای اعتبارسنجی مدل عددی از داده‌های تجربی ژانگ و همکاران استفاده شده و دقت مدل تأیید گردیده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحی سازه‌های بهینه‌تر، مقاوم‌تر و با عملکرد بالاتر در بهره‌برداری انرژی دریایی کمک شایانی نماید.

با وجود مطالعات متعدد درباره سکوهای اسپار، اطلاعات محدودی درباره ضرایب جرم افزوده سکوی اسپار سلولی–خرپایی در دسترس است. همچنین در مطالعات موجود، اعتبارسنجی مستقل نتایج با

---

[۱] surrogate

[۲] CFD

[۳] Control Co-Design (CCD)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

استفاده از نرم‌افزار MOSES و مقایسه کمی نتایج مبتنی بر BEM و FEM کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- تحلیل عددی اختصاصی یک پیکربندی جدید از سکوی اسپار سلولی-خرپایی:

مطالعات پیشین عمدتاً بر روی انواع متداول سکوهای اسپار (مانند Classic Spar، Truss Spar و دیگر پیکربندی‌های شناخته‌شده) تمرکز داشته‌اند. در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی یک پیکربندی سلولی-خرپایی به‌صورت عددی بررسی شده و اثر هندسه خاص این سازه بر پاسخ‌های دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

- توسعه داده‌های هیدرودینامیکی شامل ضرایب جرم افزوده و میرایی:

ضرایب جرم افزوده از پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی حرکت سازه‌های شناور هستند و نقش مستقیمی در تعیین پاسخ‌های حرکتی سازه تحت بارهای محیطی دارند. اگرچه محاسبه این ضرایب به‌تنهایی یک نوآوری مستقل محسوب نمی‌شود، اما استخراج این پارامترها برای هندسه خاص سکوی مورد مطالعه و ایجاد یک پایگاه داده هیدرودینامیکی اختصاصی، یک دستاورد کاربردی و قابل استفاده در مطالعات بعدی محسوب می‌شود.

- ایجاد ارتباط بین تحلیل هیدرودینامیکی و مدل‌سازی دینامیکی سازه:

در این تحقیق، نتایج تحلیل عددی نرم‌افزار MOSES تنها به بررسی پاسخ‌های حرکتی محدود نشده، بلکه داده‌های هیدرودینامیکی استخراج‌شده شامل جرم افزوده و سایر پارامترهای دینامیکی، به‌عنوان ورودی برای تحلیل‌های دقیق‌تر پاسخ سازه‌ای و مطالعات آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- بررسی اثر ویژگی‌های هندسی سکوی سلولی-خرپایی بر رفتار هیدرودینامیکی:

ترکیب بخش‌های سلولی و خرپایی موجب تغییر در توزیع جرم، سطح خیس‌شده، اندرکنش سازه و سیال و در نتیجه تغییر در ضرایب هیدرودینامیکی می‌شود. این اثرات در مقایسه با مدل‌های مرجع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

اگرچه مطالعات متعددی به تحلیل هیدرودینامیکی سکوهای اسپار پرداخته‌اند، بیشتر تحقیقات موجود بر روی پیکربندی‌های متداول اسپار یا مدل‌های ساده‌شده تمرکز داشته‌اند. با توجه به تفاوت‌های هندسی و هیدرودینامیکی سکوی اسپار سلولی-خرپایی، استفاده مستقیم از ضرایب هیدرودینامیکی سکوهای موجود می‌تواند منجر به عدم دقت در پیش‌بینی پاسخ‌های دینامیکی شود. ازاین‌رو، هدف این پژوهش توسعه یک مدل عددی مبتنی بر نرم‌افزار MOSES برای ارزیابی پاسخ‌های هیدرودینامیکی این نوع سکوی اسپار و استخراج داده‌های هیدرودینامیکی شامل ضرایب جرم افزوده و پارامترهای مرتبط با رفتار دینامیکی سازه است.

۲ - معادلات اساسی حاکم

به‌منظور تعیین معادلات حرکت دینامیکی سکوی اسپار معمولا فرضیات ساده کننده ای در نظر گرفته می‌شوند[۲۱]. این فرضیات عبارتنداز:

موج برخوردی به سازه، موج دو بعدی در نظر گرفته شده است.

۱) حرکات سرج، هیو و پیچ سکو مورد تحلیل قرار گرفته اند.

۲) از میرایی حرکت هیو در مقابل میرایی حرکات پیچ و سرج صرف نظر شده است.

دلیل انتخاب این فرضیه به دلایل زیر است:

دلیل اول، شدت کم میرایی تابشی[۴] در حرکت هیو است. در برخی شرایط به‌ویژه برای سازه‌های باریک یا بلند مثل اسپار، دامنه حرکت هیو در محدوده فرکانس‌های کاری بسیار کوچک است و انرژی هدررفته به‌واسطه موج‌های تابشی در این مود حرکتی کم‌اهمیت تلقی می‌شود.

دلیل دوم، وابستگی بیشتر پاسخ سیستم به پیچ و سرج می باشد. در سیستم‌هایی که وزن و مرکز جرم بالا هستند یا طول زیادی دارند، پاسخ سیستم نسبت به تحریک‌های موج، بیشتر در مودهای پیچشی و انتقالی جلو و عقب ظاهر می‌شود.

دلیل سوم، ساده‌سازی مدل ریاضی برای حل عددی است. حذف یک مؤلفه میرایی باعث کاهش پیچیدگی محاسبات و افزایش پایداری و سرعت همگرایی مدل عددی می‌شود. به‌ویژه در تحلیل‌های حوزه زمان[۵] ، کاهش درجه آزادی کمک‌کننده است.

و دلیل آخر، مطالعات پیشین و اعتبارسنجی تجربی می باشد. برخی مطالعات مانند مطالعه ژانگ [۲۲] یا مقالات دیگر نشان داده‌اند که میرایی هیو در تحلیل‌های دینامیکی سکوی اسپار قابل چشم‌پوشی بوده، مگر در شرایط موج شدید.

پس به طور کلی، در این تحقیق، با توجه به سهم ناچیز میرایی حرکت هیو در مقایسه با حرکات سرج و پیچ در تحلیل دینامیکی سکوهای شناور و به منظور ساده‌سازی مدل عددی، از اثر میرایی هیو صرف‌نظر شده است. این فرض بر مبنای ویژگی‌های هندسی سازه، پاسخ غالب حرکتی در مودهای انتقالی و پیچشی، و شواهد مطالعات پیشین اتخاذ شده است.

[۴] Radiation Damping

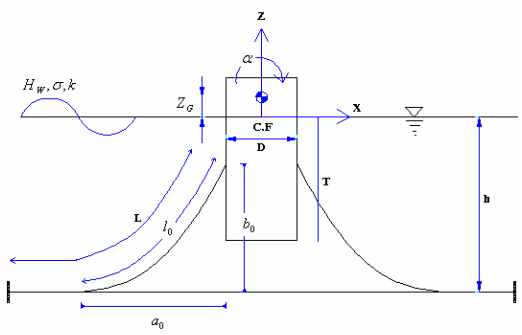
[۵] Time-domain simulations

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

۳) فرض گردیده است که کابل های متصل شده به سکو در کلیه شرایط در یک صفحه قرار دارند و در هنگام تغییر مکان سکو، کابل‌ها حول لنگر اتصال دهنده خود به زمین، دوران می نمایند (اصطکاک کابل‌ها با بستر دریا ناچیز در نظر گرفته شده است.

۴) در حالت استاتیکی بخشی از کابل روی زمین خوابیده است.

به‌منظور تعیین معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سکوی اسپار، پارامترهای ابعادی و جهت های مثبت قراردادی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده اند.



شکل ۱- مدل دو بعدی ساده سازی شده سکوی اسپار و پارامترهای تحلیل[۲۳]

جهت های مثبت قراردادی حرکت سرج، هیو و پیچ در شکل توسط محورهای مختصات به همراه پارامترهای x، z،α نشان داده شده‌اند. پارامترهای بکار رفته در تحلیل حرکات سکوی اسپار عبارتند از:

x محور مختصات در راستای حرکت سرج سکوی اسپار، z محور مختصات در راستای حرکت هیو سکوی اسپار، α محور مختصات دورانی در راستای حرکت پیچ سکوی اسپار، h عمق آب، D قطر سکوی اسپار، T آبخور سکو در حالت استاتیکی، C. F مرکز شناوری سکو، Z_G فاصله‌ی قائم مرکز ثقل سکو تا سطح آب با حفظ علامت، L طول مهار متصل شده به سکو، a_0 فاصله‌ی افقی نقطه‌ی بلند شدن مهار از روی زمین تا سکو در حالت استاتیکی، b_0 فاصله‌ی عمودی نقطه‌ی بلند شدن مهار از روی زمین تا سکو در حالت استاتیکی، l_0 طول مهار بلند شده از زمین در حالت استاتیکی، H_w ارتفاع موج برخوردی به سکو، k عدد موج و σ فرکانس زاویه ای موج می‌باشد. راستای موج برخوردی به سکو، در راستای حرکت سرج شناور در نظر گرفته شده است.

همچنین محل محورهای مختصات مسئله بر روی مرکز شناوری سکو، روی سطح آب در نظر گرفته شده است [۲۴]. منظور از حالت استاتیکی در تشریح پارامترهای a_0، b_0 و l_0 شرایط آب آرام می باشد که هیچ موجی به سکو برخورد نمی کند.

یکی از پرکاربردترین تئوری ها در محاسبه سینماتیک موج، تئوری موج خطی ایری[۶] است که با فرض این که ارتفاع موج نسبت به طول موج و یا عمق آب کوچک است صورت می‌گیرد. این فرض به شرط های مرزی سطح آزاد آب این اجازه را می‌دهد که با پایین آوردن ترم های ارتفاع موج که ماورای مرتبه اول[۷] هستند آن‌ها را خطی کنند و همچنین سطح متوسط آب را بیشتر از سطح آزاد نوسانی آب ارضا کند.

۱-۲- معادلات حاکم بر حرکت سرج سکوی اسپار[۲۳]

با توجه به قوانین حرکتی نیوتن معادله ی حرکت سرج سکو در راستای افقی به صورت ذیل تعیین می‌گردد:

$$\sum F_X = ma_{Gx} \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱)، $\sum F_x$، برآیند نیروهای وارد بر سکو در راستای افقی، m جرم سکوی اسپار و a_{Gx} شتاب مرکز ثقل سکوی اسپار می‌باشد. نیروهای وارد بر سکوی اسپار، ناشی از برخورد موج با بدنه آن دارای دو ترم کلی می باشند. ترم های این نیروها شامل نیروهای درگ و نیروهای اینرسی می‌باشند[۲۵]. نیروی وارد بر سکوی اسپار ناشی از اتصال مهار به سکو، در راستای افقی دارای مؤلفه می باشد. لذا در تعیین معادلات حاکم بر حرکت دینامیکی سکوی اسپار در راستای افقی، نیروی وارده بر سکو از طرف مهار توسط پارامتر T_x مشخص می‌گردد. نیروهای وارد بر سکو در راستای افقی به صورت روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌گردند.

$$F_{Addedmass} = \int_{-T}^{0} \frac{1}{4}\rho_W C_m \pi D^2 (\dot{u} - \ddot{x} - z\ddot{\alpha}) dz \qquad (۲)$$

$$F_{Fr} = \int_{-T}^{0} \frac{1}{4}\rho_W \pi D^2 \dot{u} dz \qquad (۳)$$

$$F_{Drag} = F_D = \int_{-T}^{0} \frac{1}{2}\rho_W C_D D(u - \dot{x} - z\dot{\alpha}) |\ (u - \dot{x} - z\dot{\alpha})|\ dz \qquad (۴)$$

که در روابط (۲) تا (۴)، u سرعت افقی ذرات آب در تراز z، $\dot{u}$ شتاب افقی ذرات آب در تراز z، C_m ضریب نیروی اینرسی و C_D ضریب نیروی درگ می‌باشد. در صورت استفاده از رابطه‌ی (۴)، بدون ساده سازی آن، حل معادله ی دیفرانسیل حاکم بر حرکت سرج دشوار خواهد بود. لذا رابطه‌ی (۴) به صورت رابطه (۵) خطی سازی می‌گردد.

$$F_D = \int_{-T}^{0} \frac{1}{2}\rho_W C_D D u |\ u|\ dz - \int_{-T}^{0} \frac{1}{2}\rho_W C_D D \dot{x} |\ \dot{x}|\ dz - \int_{-T}^{0} \frac{1}{2}\rho_W C_D D z\dot{\alpha} |\ z\dot{\alpha}|\ dz \qquad (۵)$$

شتاب مرکز ثقل سکو در رابطه ی (۱) به دلیل شتاب خطی سکو در حرکت سرج و نیز شتاب دورانی سکو در حرکت پیچ می باشد. با توجه به این نکته که سکو در هنگام حرکت پیچ حول مرکز

[۶] Airy

[۷] first order

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

شـــناوری اش دوران می نماید، شـــتاب مرکز ثقل ســـکو طبق رابطه $a_{G_x} = \ddot{x} + z_G\ddot{a}$ تعیین می گرد. با در نظر گرفتن تئوری موج خطی[۲۶] و جایگذاری روابط سـرعت و شـتاب ذرات آب، در روابط (۲)، (۳) و (۴) و انتگرال گیری از آن ها و جایگذاری در رابطه‌ی (۱)، معادله حرکت سـرج سـکو به صـورت ذیل تعیین می گردد:

$$S_1\ddot{x} + S_2\ddot{a} + S_3\dot{x}\,|\dot{x}| + s_4\dot{a}\,|\dot{a}| = T_x + S_5H_w\,\sin S_6H_w^2\cos kx + \sigma t \cos(kx - \sigma t) \quad (۶)$$

که در رابطه (۶) پارامترها به صورت روابط ذیل تعریف می شوند.

$$S_1 = m + \rho_w c_m \frac{\pi D^2}{4}T$$

$$S_2 = mz_G - \rho_w c_m \frac{\pi D^2}{8}T^2$$

$$S_3 = \frac{1}{2}\rho_w c_D DT$$

$$S_4 = -\frac{1}{6}\rho_w c_D DT^3$$

$$S_5 = (1 + c_m)\rho_w \frac{\pi D^2}{8}\frac{\sigma^2}{k\,sinh\,kh}[sinh\,kh - sinhk(h-T)]$$

$$S_6 = \frac{c_D\rho_w D\sigma^2}{32ksinh^2kh} \times [2kT + sinh\,2kh - sinh\,2k(h-T)]$$

ضرایب درگ و اینرسی $\left(C_m \text{و} C_D\right)$ با استفاده از مرجع[۲۷] قابل استخراج می‌باشند.

۲-۲- معادلات حاکم بر حرکت پیچ سکوی اسپار [۲۳]

به‌منظور تعیین معادلات حاکم بر حرکت پیچ در سـکوی اسـپار فرض گردیده اســت که زاویه ی پیچ در ســکوی اســپارکوچک می‌باشد. لذا با برقرار کردن رابطه ی تعادل ممان ها، معادله حاکم بر حرکت پیچ سـکوی اسـپار تعیین می‌گردد. با توجه به رابطه ی تعادل ممان‌ها داریم:

$$\sum M_{C.F} = I_G\ddot{a} + m\rho \times a_G \quad (۷)$$

که دررابطه فوق، $\sum M_{C.F}$، برآیند کلیه گشــتاور نیروهای وارد بر جسـم حول مرکز شـناوری سـکو، I_G، ممان اینرسـی جرمی سـکو حول محور عرضــی گذرنده از مرکز ثقل آن، m، جرم ســکو، a_G، شـتاب مرکز ثقل سـکو،ρ بردار جابجایی که مبدأ آن مرکز شـناوری و انتهای آن مرکز ثقل سـکو می‌باشـد و $\ddot{a}$، شـتاب زاویه ای حرکت پیچ، می‌باشـد. لازم به ذکر اسـت، شـتاب مرکز ثقل سـکو ناشـی از حرکات شـتاب‌دار خطی سکو در راسـتای افقی و عمودی و حرکات شــتاب‌دار زاویه ای آن حول محور yها می‌باشــد. لذا با توجه به قواعد دینامیکی داریم :

$$a_G = a_{surge} + a_{heave} + a_{normal.pitch} + a_{tan.pitch} \quad (۸)$$

$$I_G = \ddot{x}i + \ddot{z}k - z_G\dot{a^2}k + z_G\ddot{a}\,i \quad (۹)$$

$$\rho = z_G k \quad (۱۰)$$

گشـتاور برایند وارد بر سـکو ناشـی از گشـتاور نیروهای موج وارده بر سـکو، گشـتاور نیروی مهارها و ممان برگرداننده سـکو می‌باشـد. لذا داریم:

$$\sum M_{C.F} = \sum M_{wave} + \sum M_{mooring} + \sum M_{restoring} \quad (۱۱)$$

با محاسـبه ترم های معادله فوق بر اسـاس پروسـه ای مشـابه آنچه که پیش از این تشـریح گردید و بر اسـاس قواعد هیدرواسـتاتیکی جهت محاسبه $\sum M_{Mooring}$ و انتگرال گیری از روابط حاصله، رابطه (۱۲) به صورت ذیل بیان می‌گردد:

$$P_1\ddot{x} + P_2\ddot{a} + P_3\dot{x}|\dot{x}| + P_4\dot{a}|\dot{a}| - \sum M_{mooring} + P_5a = P_6H_w\sin(kx - \sigma t) + P_7H_w^2\cos(kx - \sigma t)|\cos(kx - \sigma t)| \quad (۱۲)$$

که در آن:

$$P_1 = mz_G - \rho_w c_m\frac{\pi D^2}{8}T^2$$

$$P_2 = I_G + mz_G{}^2 + \rho_w c_m\frac{\pi D^2}{12}T^3$$

$$P_3 = -\frac{1}{4}\rho_w c_D DT^2$$

$$P_4 = \frac{1}{8}\rho_w c_D DT^4$$

$$P_5 = (\frac{D^2}{16T} - \frac{T}{2} - z_{G)}\gamma_w\frac{\pi D^2}{4}T$$

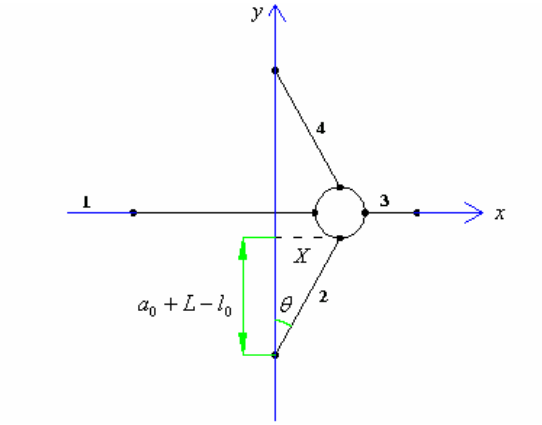
$$P_6 = (1 + c_m)\rho_w\frac{\pi D^2}{4}\frac{\sigma^2}{2k^2sinhkh}[-coshkh + kTsinhk(h-T) + coshk(h-T)]$$

$$P_7 = \frac{c_D\rho_w D\sigma^2}{64k^2sinh^2kh} \times [-2k^2h^2 - cosh2kh + 2kTsinh2k(h-T) - 2k^2(T^2 - h^2) + cosh2k(h-T)]$$

به‌منظور محاســبه ترم $\sum M_{Mooring}$ در رابطه (۱۲) با توجه به شـکل ۲ در صـورت تغییر مکان سـکو به میزان X و با توجه به این نکته که جابجایی افقی مهار به دلیل حرکت سـرج و پیچ سـکو می‌باشد و سکو در حین حرکت پیچ حول مرکز شناوری‌اش دوران می نماید، داریم:

$$X = x_s + \alpha_0(b_0 - h) \quad (۱۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]



شکل ۲- موقعیت سکو پس از جابجایی به میزان X در راستای افقی و پارامترهای دخیل در محاسبه$\Sigma M_{mooring}$ [۲۳]

که در آن b_0، فاصله‌ی قائم محل اتصال کابل به سکو تا بستر دریا، h، عمق آب، x_s، جابجایی سکو به دلیل حرکت سرج و α_0 زاویه‌ی پیچ در سکو می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل ۲ زاویه‌ی دوران مهار تحت تأثیر جابجایی سکو به صورت ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\theta = tan^{-1}(\frac{X}{a_0 + L - l_0}) \quad (۱۴)$$

با مشخص شدن زاویه ی دوران کابل‌های ۲ و ۴ و با فرض اینکه T_x، نیروی کشش کابل در راستای افقی در صفحه‌ی کابل و T_z، نیروی کشش قائم کابل باشد، گشتاور وارد بر سکو به دلیل نیروهای مهار به صورت ذیل تعیین می‌گردند:

$$\sum M_{mooring} = (-T_{x1} + T_{x3} - 2T_{x2}sin\theta).(b_0 - h) + (-T_{Z1} + T_{Z3}).\frac{D}{2} \quad (۱۵)$$

که دررابطه فوق T_{X1} نیروی افقی کابل ۱، T_{X3} نیروی افقی کابل ۳، T_{X2} نیروی افقی کابل ۲، T_{Z1} نیروی قائم کابل ۱ و T_{Z3} نیروی قائم کابل ۳ در صفحات هر یک می‌باشد.

۳-۲- معادلات حاکم بر حرکت هیو سکوی اسپار[۲۳]

به‌منظور تعیین معادلات حاکم بر حرکت هیو سکوی اسپار با توجه به قانون دوم نیوتن از رابطه (۱۶) استفاده می‌گردد.

$$\sum F_z = ma_{z_G} \quad (۱۶)$$

برآیند نیروهای وارد بر سکوی اسپار در راستای عمودی دارای ترم های مختلفی است. نیروهای جرم افزوده و فرودکریلف به دلیل برخورد موج با سازه سکو و نیروهای مهارها و نیروی شناوری و وزن سکو، دارای مؤلفه در راستای عمودی می‌باشند. لذا نیروهای در راستای عمودی وارد بر سکوی اسپار به صورت ذیل تعیین می‌گردند[۱۸].

$$\sum F_z = F_{Fr} + F_{Add} + F_B + \Delta T_c \quad (۱۷)$$

که در رابطه (۱۷)، F_{Fr} نیروی فرود کریلوف، F_{Add} نیروی جرم افزوده، F_B نیروی بویانسی و ΔT_c نیروی مهار می‌باشد. بر اساس پروسه ای مشابه، رابطه حرکت هیو به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌گردد.

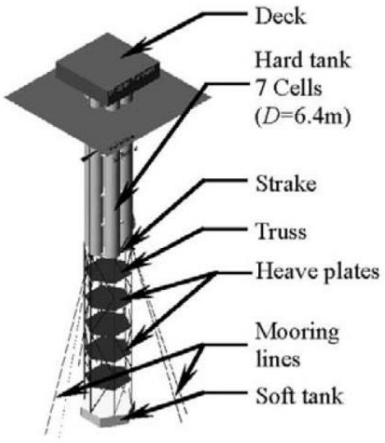
$$H_1\ddot{z} + H_2 z = (H_3 + H_4).H_w \cos(kx - \sigma t) + \Delta T_c \quad (۱۸)$$

که در آن:

$$H_1 = m + \frac{\pi}{24}\rho_w D^3$$
$$H_2 = \gamma_w \frac{\pi D^2}{4}$$
$$H_3 = -\frac{\pi}{48}\rho_w D^3 \sigma^2 \frac{sinhk(h-T)}{sinhkh}$$
$$H_4 = \frac{\pi}{8}\rho_w g D^2 \frac{coshk(h-T)}{coshkh}$$

۳- مشخصات سکو

شکل ۳، نمایی شماتیک از سکوی سلولی-خرپایی را نمایش می‌دهد که در آن نحوه‌ی ترکیب اجزای سلولی و عناصر خرپایی با هدف ایجاد یک ساختار پایدار و بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳- نمای سکوی اسپار سلولی‌خرپایی نمونه [۲۲]

در آغاز فرآیند مدل‌سازی، یک نمونه‌ی مرجع به‌عنوان مبنای تحلیل انتخاب شده است. در این پژوهش، سکوی اسپار با ساختار ترکیبی سلولی-خرپایی که پیش‌تر در مرجع [۲۲] معرفی شده، به‌عنوان مدل پایه مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات هندسی و سازه‌ای این سکو در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای اسپار اصلی[۲۲]

پارامترهای کلیدی	مقدار
قطر سکو [متر]	۲۰
ارتفاع کلی سکو [متر]	۱۷۰
آبخور [متر]	۱۶۰
ارتفاع تانک بزرگ [متر]	۸۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

ارتفاع خرپا [متر]	۸۰
قطر سلول [متر]	۶/۴
فاصله صفحات هیو [متر]	۱۰
ارتفاع تانک کوچک [متر]	۵
جابجایی [*تن*]	۱۷۰۰۰
ارتفاع مرکز ثقل از کیل [متر]	۸۶
ارتفاع مرکز بویانسی از کیل [متر]	۱۰۷

سکوی اسپار سلولی-خرپایی از سه بخش اصلی شامل تانک بزرگ، تانک کوچک و بخش خرپایی تشکیل شده است. مدل آزمایشگاهی این سکو برای نخستین‌بار در سال ۲۰۰۸ در آزمایشگاه استیت کی[۸] کشور چین مورد آزمایش قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل رفتار هیدرودینامیکی سکوی اسپار سلولی-خرپایی و مقایسه‌ی نتایج حاصل با داده‌های تحلیلی ارائه‌شده در مطالعه‌ی ژانگ [۲۲] می‌باشد. مشخصات سازه‌ای بخش سلولی این سکو در جدول ۲ و پارامترهای کلیدی مربوط به تعریف محیط دریایی در نرم‌افزار MOSES در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای اصلی اسپار مدل

پارامترهای کلیدی	مقدار
قطر سلول [متر]	۶/۴
طول سلول [متر]	۸۵
تعداد صفحات هیو [عدد]	۵
فاصله صفحات هیو [متر]	۱۰
جابجایی [تن]	۱۷۹۰۰
جرم [*تن*]	۱۹۵۲۰
ارتفاع مرکز ثقل بالای کیل [متر]	۸۶
(rx)شعاع ژیراسیون رول [متر]	۷۰
(ry) شعاع ژیراسیون پیچ [متر]	۷۰
(rz)شعاع ژیراسیون یاو [متر]	۱۵

جدول ۳- پارامترهای مهم تعریف محیط دریا در نرم‌افزار MOSES

پارامترهای کلیدی	مقدار
عمق آب [متر]	۱۵۰۰
ارتفاع موج مشخصه [متر]	۱۲/۵۹
پریود [*ثانیه*]	۱۴/۶
دانسیته آب [*کیلوگرم بر متر مکعب*]	۱۰۲۵
سرعت جریان [*متر بر ثانیه*]	۱/۵
سرعت موج [*متر بر ثانیه*]	۳۸
آبخور [متر]	۱۶۰

برای انجام تحلیل هیدرودینامیکی سکوی اسپار خرپایی-سلولی (که ترکیبی از ویژگی‌های سکوی اسپار خرپایی و سلولی است)، کلیه مشخصات مرتبط با محیط دریایی و سیستم مهار، از جمله ابعاد هر بخش از خطوط مهار، مدول الاستیسیته، قطر خارجی و وزن مغروق اجزا، در قالب فایل هیدرودینامیکی با فرمت CIF به نرم‌افزار MOSESوارد شده‌اند. در این مرحله از تحلیل، خروجی‌هایی نظیر تابع پاسخ دامنه حرکات سکو در سه درجه آزادی اصلی و ضرایب جرم افزوده استخراج شده‌اند.

۴- جزئیات توری/پنل‌بندی و همگرایی در نرم‌افزارMOSES

بدنه سکوی اسپار خرپایی–سلولی در نرم‌افزار MOSES (نسخه ۷.۱) ساخت شرکت Bentley Systems به‌صورت کامل مدل‌سازی شده و شبکه پانلی به‌طور یکنواخت بر سطح سکو ایجاد گردید. برای مدل پایه، حدود ۱۸۰۰ پنل در طول بدنه و صفحات هیو در نظر گرفته شد؛ به‌طوری‌که تراکم پنل‌ها در نواحی اطراف صفحات هیو بیشتر بوده تا تغییرات موضعی میدان جریان به‌خوبی لحاظ شود.

به‌منظور اطمینان از دقت محاسبات، مطالعه همگرایی با تغییر تعداد پنل‌ها از حدود ۹۰۰ تا ۲۴۰۰ پنل انجام گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که ضرایب جرم افزوده و نمودارهای تابع پاسخ دامنه در سه درجه آزادی اصلی (سرج، هیو و پیچ) با افزایش تراکم شبکه تغییر محسوسی نداشتند و اختلاف نتایج کمتر از ۲ ٪ باقی ماند. بنابراین، مدل با ۱۸۰۰ پنل به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب شد.

تنظیمات تحلیل «diffraction/radiation» شامل بازه فرکانسی ۰ تا ۲/۱ رادیان بر ثانیه انجام گرفت. همچنین، معیار توقف حل عددی در MOSES بر اساس مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار قرار داده شد و همگرایی زمانی حاصل شد که باقی‌مانده محاسباتی به کمتر از 10^{-5}رسید.

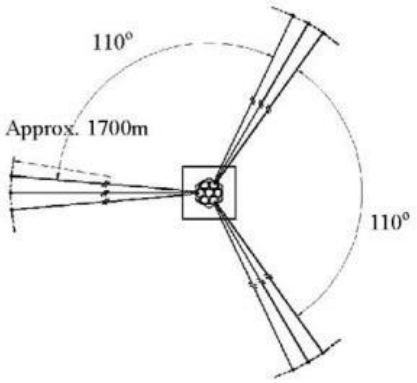
این بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج عددی پژوهش حاضر از نظر مش‌بندی و تنظیمات عددی پایدار بوده و از بازتولیدپذیری کافی برخوردار است.

[۸] State Key

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

۵- نحوه جانمایی خطوط مهار

شکل ۴، چیدمان و ویژگی‌های سیستم مهار این سکو را برای عمق آب ۱۵۰۰ متر نشان می‌دهد. در طراحی سیستم مهاربندی در نرم‌افزارMOSES، از نه خط مهار استفاده شده است که در قالب سه دسته‌ی سه‌تایی با زاویه‌ی بینابینی ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر خط مهار از دو بخش مجزا شامل زنجیر و کابل تشکیل شده است. مشخصات دقیق هر یک از این بخش‌ها نیز در فایل CIF لحاظ گردیده‌اند. نمای شماتیک خطوط مهار در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۴- جانمایی خطوط مهار سکوی اسپار [۲۲]

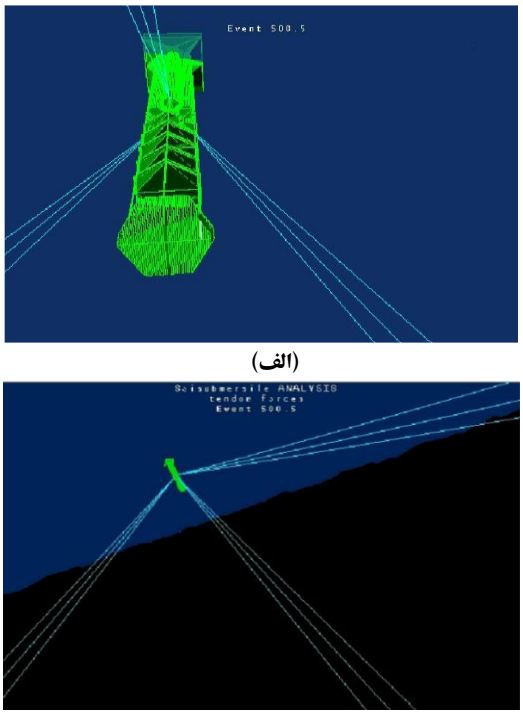
جدول ۴ مشخصات فنی و الگوی آرایش نه خط مهار به‌کاررفته در سکوی اسپار سلولی-خرپایی را ارائه می‌دهد. این جدول شامل اطلاعاتی نظیر موقعیت مکانی، طول هر بخش، نوع مصالح و ویژگی‌های مکانیکی خطوط مهار است که در طراحی سیستم پایدارسازی سکو نقش تعیین‌کننده‌ای دارند.

جدول ۴- مشخصات مهار سکوی اسپار برای عمق ۱۵۰۰ متر [۲۲]

مشخصات مهار	بخش میانی	لنگر
نوع مهار	کابل	زنجیر
جنس مهار	*Studdles*	R_4
قطر [متر]	۰/۰۹۷۵	۰/۱۳۲۰
طول [متر]	۱۷۷۳	۱۵۰
جرم [تن]	۰/۰۳۶۸	۰/۱۰۷۷
سختی *EA(KN)*	۳۸۹۴۴۴	۳۹۶۲۵۱

به‌منظور ارزیابی صحت مدلسازی و اطمینان از اعتبار نتایج حاصل از نرم‌افزارMOSES، نمودارهای تابع پاسخ دامنه مربوط به حرکات سرج، هیو و پیچ که از تحلیل سکوی مرجع استخراج شده‌اند، با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی ارائه‌شده توسط کد تحلیلی ژانگ فن [۲۲] مقایسه شده‌اند. این مقایسه امکان ارزیابی دقت مدل‌سازی و اعتبارسنجی رفتار هیدرودینامیکی سکو را فراهم می‌سازد.

شکل ۵، نمایی سه‌بعدی از سکوی اسپار به همراه سیستم مهار آن را در محیط نرم‌افزار MOSES به تصویر می‌کشد که نحوه‌ی آرایش اجزای سازه‌ای و خطوط مهار را به‌طور کامل نمایش می‌دهد.

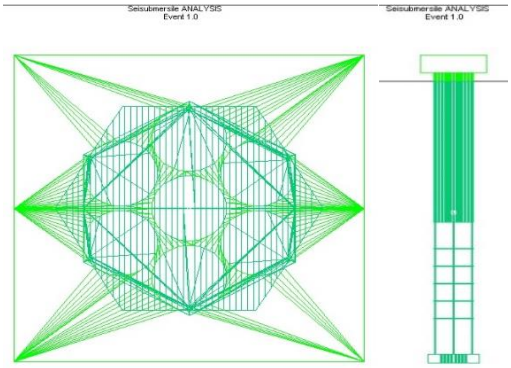


(الف)

(ب)

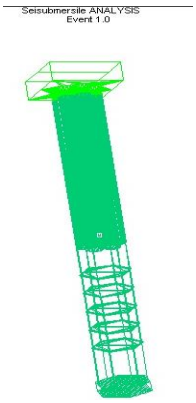
شکل ۵- نمای مقطع سازه، جزئیات مهاربندی، و تحلیل در MOSES

شکل ۶ نمایی دوبعدی از سکوی مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار MOSES را ارائه می‌دهد که شامل جزئیات هندسی و آرایش خطوط مهار در صفحه‌ی افقی است. در مقابل، شکل ۷ نمای سه‌بعدی همان مدل را نمایش می‌دهد که در آن پیکربندی کلی سازه در محیط شبیه‌سازی به‌صورت فضایی قابل مشاهده است.



شکل ۶- نمای دو بعدی مدل سکو در MOSES

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

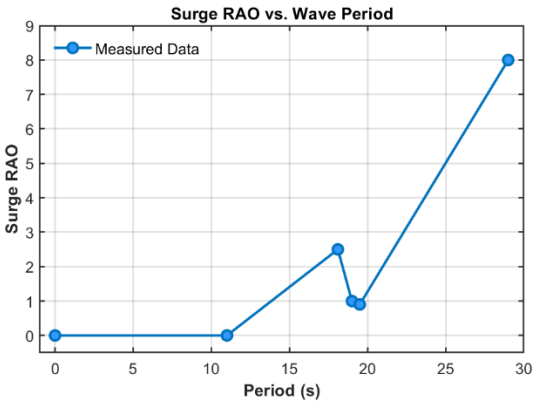


شکل۷- نمای سه بعدی مدل سکو در MOSES

۶- تابع پاسخ دامنه برای حرکت سرج در نرم‌افزار MOSES

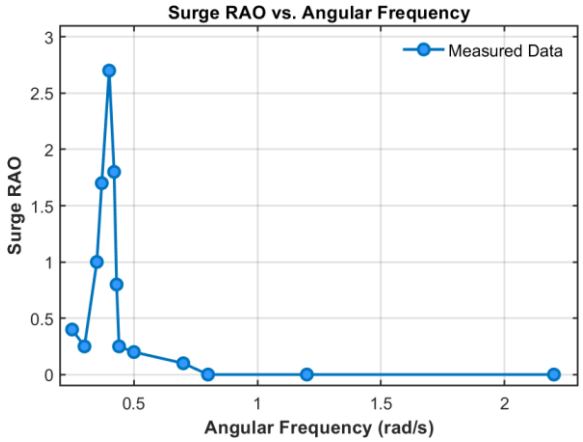
تابع پاسخ دامنه مربوط به حرکت سرج سکوی اسپار، با استفاده از تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار MOSES و در بازه‌ی پریودی ۱ تا ۲۵ ثانیه استخراج شده است. نمودار حاصل در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه پاسخ دینامیکی سکو در حرکت سرج در پریود حدود ۱۸/۱ ثانیه رخ می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی وقوع پدیده‌ی تشدید در این بازه‌ی زمانی است.

در این شرایط، یعنی در پریود تشدید و فرکانس متناظر آن، سیستم سازه-سیال وارد ناحیه‌ای از پاسخ ارتعاشی تقویت‌شده می‌شود. در این محدوده فرکانسی، به‌دلیل انطباق بسامد تحریک با یکی از فرکانس‌های طبیعی سامانه، تغییرات محسوسی در رفتار هیدرودینامیکی سکو مشاهده می‌شود. این تغییرات از جمله شامل نوسانات قابل توجه در ضرایب جرم افزوده و نیروهای هیدرودینامیکی حاصل از امواج است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی مبتنی بر تابع پاسخ دامنه، اثرات ناشی از آشفتگی سیال و ویسکوزیته در نظر گرفته نمی‌شود، مگر آنکه تحلیل غیرخطی یا تحلیل ویسکوزی به‌طور خاص انجام شده باشد.



شکل ۸- نمودار سرج سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس دوره تناوب

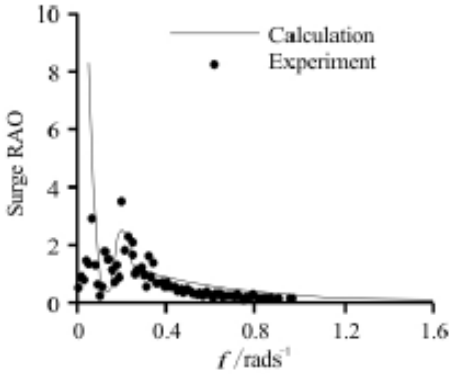
به دلیل اینکه، نمودار سرج حاصل از نتایج آقای ژانگ براساس فرکانس ترسیم شده اند. شکل ۸ ، براساس فرکانس به صورت شکل ۹ تغییر داده می شود.



شکل ۹- نمودار سرج سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس فرکانس

۷- نمودار سرج حاصل از نتایج ژانگ

نمودار مربوط به حرکت سرج بر اساس نتایج ارائه شده توسط ژانگ در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۰- نمودار سرج سکوی اسپار حاصل از نتایج تحلیل ژانگ [۲۲]

۸- تابع پاسخ دامنه برای حرکت هیو در نرم‌افزار MOSES

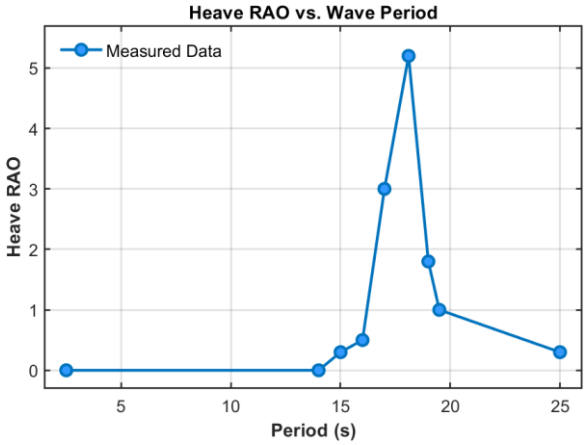
تابع پاسخ دامنه مربوط به حرکت هیو سکوی اسپار، براساس دوره تناوب در نرم‌افزار MOSES و در بازه‌ی پریودی ۱ تا ۲۵ ثانیه استخراج شده است. نمودار این تحلیل در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه پریود امواجی که موجب تشدید حرکت هیو می‌شوند، مشابه حرکت سرج، در حدود ۱۸/۱ ثانیه قرار دارد.

علاوه بر این، نمودار پاسخ دامنه در پریودهای بالاتر روند صعودی نشان می‌دهد که دامنه حرکت سازه افزایش می‌یابد. این موضوع سؤال مهمی را مطرح می‌کند که آیا این روند صعودی می‌تواند تا حدی ادامه یابد که موج سکو را با خود جابجا کند؟ در پاسخ باید

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

گفت که افزایش پاسخ دامنه تا زمانی ادامه دارد که پریود امواج به پریود طبیعی سازه برسد، پس از آن، سیستم مهار موجود در سکوی اسپار، با تأمین پایداری مکانیکی، مانع از جابجایی بیش از حد سازه و حفظ آن در مکان اولیه می‌شود.

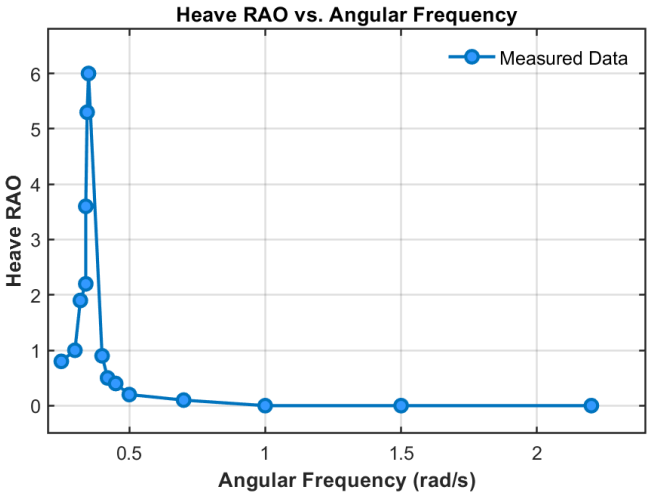
پریود طبیعی سازه در این مطالعه پس از حدود ۲۵ ثانیه و ناشی از امواج دورا اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه وقوع این امواج بسیار نادر و با احتمال کم است، تحلیل پاسخ سکو برای پریودهای فراتر از ۲۵ ثانیه در این پژوهش لحاظ نشده است.



شکل ۱۱- نمودار هیو سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس دوره تناوب

به دلیل اینکه، نمودار هیو حاصل از نتایج آقای ژانگ براساس فرکانس ترسیم شده اند. شکل ۱۱ ، براساس فرکانس به صورت شکل ۱۲ تغییر داده می شود.

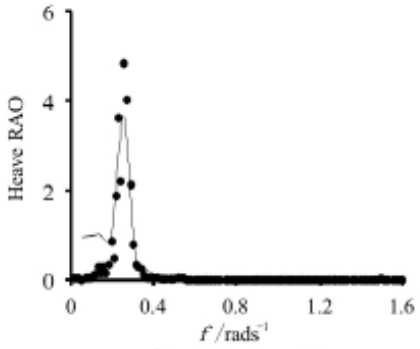
افزایش دامنه پاسخ هیو در حوالی ۰.۳۴ rad/s ناشی از نزدیک شدن فرکانس تحریک موج به فرکانس طبیعی سیستم در حرکت قائم است. در این شرایط، انرژی منتقل‌شده از امواج به سازه به حداکثر رسیده و پدیده تشدید رخ می‌دهد. پس از عبور از این فرکانس، به دلیل غلبه نیروهای اینرسی و میرایی تابشی، دامنه پاسخ به‌تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- نمودار هیو سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس فرکانس

۹- نمودار هیو نتایج ژانگ

نمودار مربوط به حرکت هیو بر اساس نتایج ارائه‌شده توسط ژانگ در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

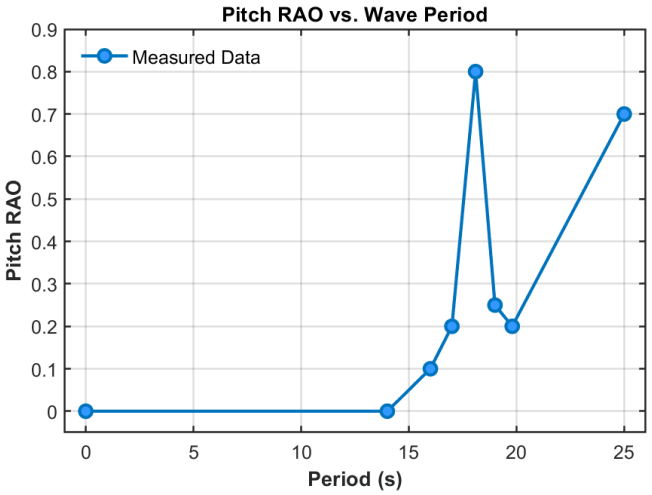


شکل ۱۳-نمودار هیو سکوی اسپار حاصل از نتایج تحلیل ژانگ [۲۲]

۱۰- تابع پاسخ دامنه برای حرکت پیچ در نرم‌افزار MOSES

تابع پاسخ دامنه مربوط به حرکت پیچ سکوی اسپار، استخراج شده از نرم افزار MOSES براساس دوره تناوب، برای مدل اصلی و در بازه پریودی ۱ تا ۲۵ ثانیه، در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، بیشینه پاسخ سکو در حرکت پیچ تقریباً در پریود ۱۸/۱ ثانیه اتفاق می‌افتد که با پریود تشدید در حالت سرج هم‌راستا است.

روند صعودی نمودار در بازه‌های پریودی بالاتر نیز مشابه حرکت سرج مشاهده می‌شود؛ به این معنی که با افزایش پریود امواج، پاسخ دامنه سکو افزایش می‌یابد. این روند به‌ویژه در حرکات تطبیقی مانند سرج و پیچ کاملاً مشهود است.

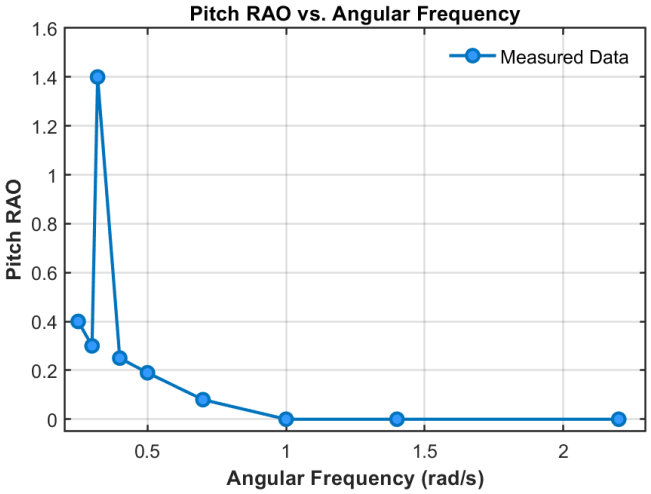


شکل ۱۴- نمودار پیچ سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس دوره تناوب

به دلیل اینکه، نمودار پیچ حاصل از نتایج آقای ژانگ براساس فرکانس ترسیم شده اند. شکل ۱۴ ، براساس فرکانس به صورت شکل ۱۵ تغییر داده می شود. وابسته است. پاسخ پیچ به فاصله مرکز شناوری از مرکز جرم، ممان اینرسی سازه و توزیع فشار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

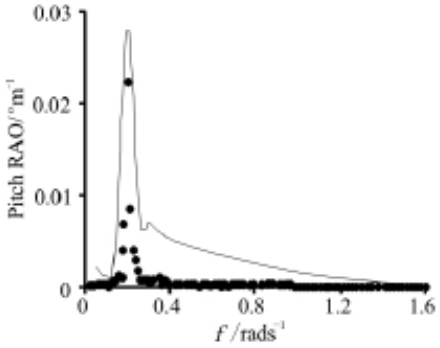
هیدرودینامیکی وابسته است. در نزدیکی فرکانس طبیعی، گشتاورهای هیدرودینامیکی ناشی از امواج بیشترین تأثیر را بر حرکت دورانی داشته و موجب افزایش دامنه پاسخ می‌شوند.



شکل ۱۵- نمودار پیچ سکوی اسپار حاصل از نرم‌افزار MOSES براساس فرکانس

۱۱- نمودار پیچ نتایج ژانگ

نمودار مربوط به حرکت پیچ، بر اساس نتایج ارائه‌شده توسط ژانگ، در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶- نمودار پیچ سکوی اسپار حاصل از نتایج تحلیل ژانگ [۲۲]

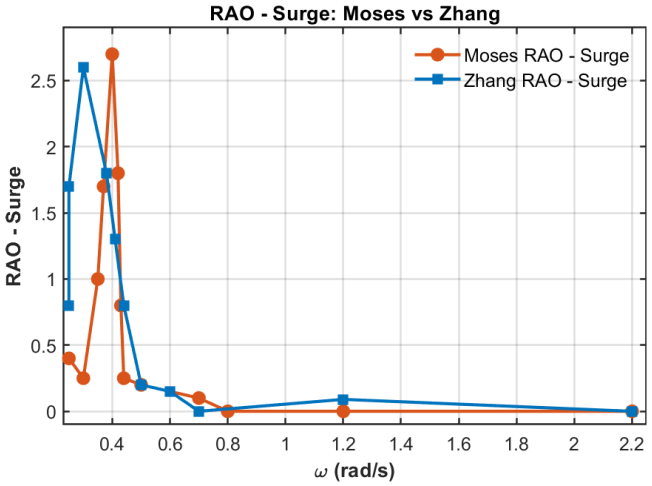
۱۲- صحت سنجی نتایج موسس با داده های ژانگ

در تحلیل‌های مرتبه اول، پدیده تشدید معمولاً در حرکات پیچ، رول و هیو از اهمیت بیشتری برخوردار است، چرا که در سازه‌های مهاربندی‌شده، حرکات انتقالی مانند سرج، سوی و یاو تحت اثر امواج برخوردی، دامنه کمتری دارند و نوسانات آن‌ها عمدتاً در دوره‌های تناوب بلند و با شدت کمتر ظاهر می‌شود.

با این حال، از آنجا که حرکت سرج در برخی شرایط می‌تواند بر پاسخ کلی سازه، از جمله اندرکنش با سیستم مهاربندی، تأثیرگذار باشد، و نیز به‌منظور پوشش کامل سه درجه آزادی متداول در تحلیل‌های هیدرودینامیکی (سرج، پیچ و هیو)، در این مطالعه برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، نمودارهای تابع پاسخ دامنه این سه مؤلفه از نرم‌افزار MOSES استخراج و با داده‌های مرجع ژانگ و همکاران [۲۲] مقایسه شده‌اند.

برای انجام این مقایسه دقیق، لازم بود واحدهای داده‌های حاصل از MOSESکه بر اساس دوره تناوب[۹] بیان شده‌اند، به واحد فرکانس زاویه‌ای ω (بر حسب رادیان بر ثانیه) تبدیل شوند تا امکان تطبیق مستقیم با نمودارهای ارائه‌شده توسط ژانگ فراهم گردد.

در شکل ۱۷، نمودار تابع پاسخ دامنه مربوط به حرکت سرج سکوی اسپار که از نرم‌افزار MOSES استخراج شده، در مقایسه با نتایج حاصل از کد تحلیلی ژانگ ارائه شده است.



شکل۱۷- مقایسه تابع پاسخ دامنه حرکت سرج نرم‌افزار MOSES و نتایج ژانگ

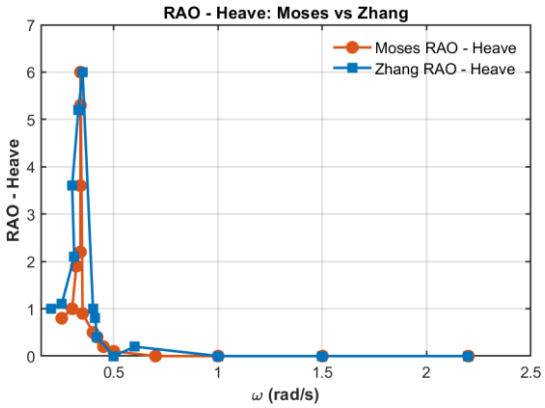
پریود طبیعی حرکت سرج در تحلیل ژانگ برای عمق آب ۱۵۰۰ متر بیش از ۱۲۰ ثانیه گزارش شده است. این مقدار برای همان سکوی مدل‌شده در نرم‌افزار MOSES برابر با ۱۲۴ ثانیه محاسبه شده است که تطابق قابل‌قبولی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۷ نیز دیده می‌شود، با توجه به ماهیت کاملاً تطبیقی حرکت سرج، افزایش پریود و طول موج امواج ورودی باعث افزایش نسبت دامنه حرکت سرج به دامنه موج ورودی می‌شود.

شکل ۱۸، مقایسه‌ای بین نمودار تابع پاسخ دامنه حرکت هیو سکوی اسپار استخراج شده از نرم‌افزار MOSES و نتایج تحلیل عددی ارائه شده توسط ژانگ را نشان می‌دهد.

این مقایسه به منظور ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی و صحت نتایج به‌دست آمده انجام شده است.

[۹] Period(T)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]



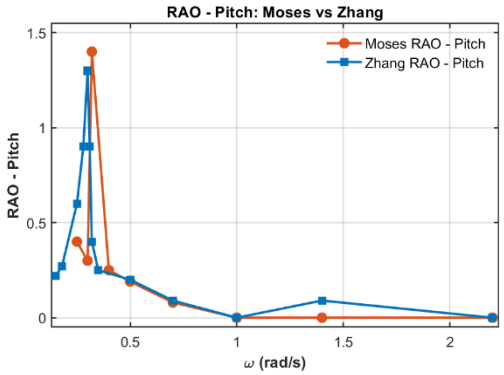
شکل ۱۸- مقایسه تابع پاسخ دامنه حرکت هیو نرم‌افزار MOSES و نتایج عددی ژانگ

مقایسه نمودارهای پاسخ دامنه، نشان می‌دهد که حرکت هیو دارای دامنه بزرگ‌تری نسبت به سایر مؤلفه‌هاست، هرچند روند کلی آن مشابه سایر درجات آزادی است. بیشینه پاسخ هیو در هر دو روش عددی، در فرکانس ۰/۳۴رادیان بر ثانیه رخ داده که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج است.

اختلاف مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از تفاوت در نحوه گسسته‌سازی دامنه، فرمول‌بندی عددی دو روش و اعمال شرایط مرزی است. در روش BEM تنها سطح مرطوب سازه مدل می‌شود، در حالی که FEMکل دامنه سیال را شبکه‌بندی می‌کند؛ بنابراین اختلافات جزئی در پیش‌بینی پاسخ‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

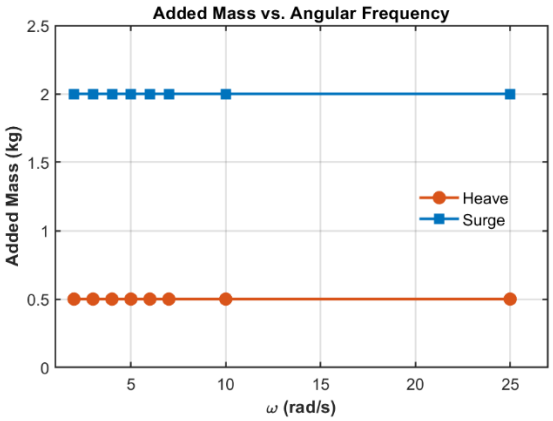
در شکل ۱۹ نیز، پاسخ دامنه پیچ حاصل از مدل MOSES با نتایج تحلیلی ژانگ [۲۲] مقایسه شده است. در حالی‌که مشخصات هندسی و شرایط مرزی در هر دو مدل یکسان بوده، پریود طبیعی پیچ در MOSES برابر با ۳۵ ثانیه و در مدل ژانگ ۴۱ ثانیه گزارش شده است. این اختلاف، که ناشی از تفاوت در روش‌های عددی (پتانسیل خطی در MOSES در برابر المان محدود در مدل ژانگ) است، در محدوده‌ای قابل قبول قرار دارد و تأثیر چشمگیری بر صحت کلی نتایج ندارد.

افزایش دامنه پاسخ در فرکانس ۰/۳۴رادیان بر ثانیه در مؤلفه پیچ نیز تأییدکننده ورود سیستم به ناحیه تشدید است، مشابه آنچه در مؤلفه‌های سرج و هیو مشاهده شد.



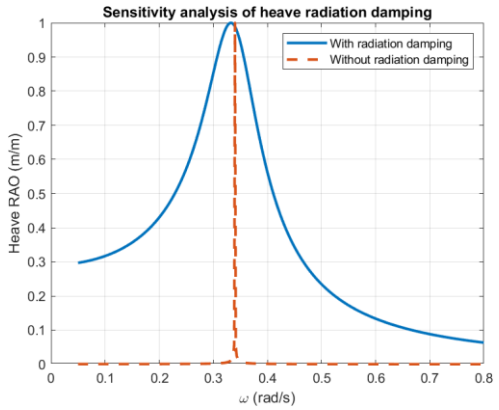
شکل ۱۹- مقایسه تابع پاسخ دامنه پیچ نرم‌افزار MOSES و نتایج عددی ژانگ

شکل ۲۰ نسبت جرم‌افزوده حرکات سرج و هیو سکوی اسپار به جرم کل را در بازه‌ای از پریودهای موج، بر اساس نتایج نرم‌افزار MOSES نشان می‌دهد. ضرایب جرم‌افزوده در تحلیل‌های مبتنی بر تئوری پتانسیل، تابعی از فرکانس موج هستند، اما معمولاً تغییرات نرمی دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حوالی فرکانس رزونانس (حدود ۰/۳۴ رادیان بر ثانیه)، ضرایب مربوط به سرج و هیو به‌ترتیب در حدود ۲ و ۰/۵ باقی مانده‌اند. این پایداری نشان می‌دهد که افزایش دامنه پاسخ در این ناحیه ناشی از تطابق فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی سازه است، نه تغییرات ناگهانی در جرم‌افزوده. در واقع، جرم‌افزوده در تعیین فرکانس طبیعی نقش دارد، اما مقدار آن در ناحیه رزونانس تقریباً ثابت می‌ملند. این رفتار با مبانی نظری سازگار بوده و دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند.



شکل ۲۰- نمودار ضرایب جرم‌افزوده اسپار برای حرکت هیو و سرج

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که حذف میرایی تابشی هیو موجب تغییر قابل توجه در فرکانس تشدید نمی‌شود، زیرا این فرکانس عمدتاً توسط جرم مؤثر و سختی هیدروستاتیکی تعیین می‌شود. با این حال، در ناحیه نزدیک تشدید، افزایش محدودی در دامنه RAO مشاهده شد که ناشی از کاهش میرایی سیستم است. بنابراین، فرض صرف‌نظر کردن از میرایی تابشی برای تحلیل اولیه پاسخ‌های هیدرودینامیکی سکوی اسپار سلولی-خرپایی قابل قبول بوده، هرچند در شرایط دریایی شدید نیازمند بررسی دقیق‌تر است.



شکل ۲۱- تحلیل حساسیت اثر میرایی تابشی هیو بر RAO حرکت هیو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

خروجی نشان می دهد:

حالت فرکانس رزونانس با میرایی تابشی حدود ۰/۳۴ rad/s است و بدون میرایی تابشی حدود ۰/۳۴ rad/s است.

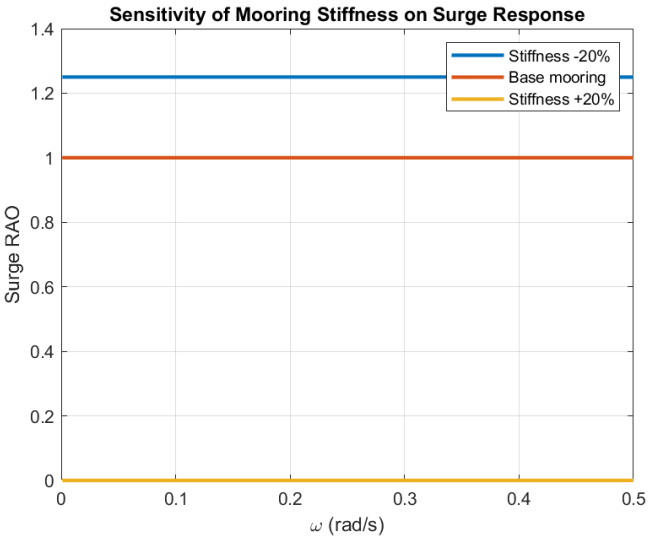
این بدان معنی است که:

- فرکانس طبیعی تغییر نمی‌کند.
- فقط ارتفاع پیک RAO افزایش می‌یابد.

بنابراین فرض حذف میرایی تابشی روی فرکانس تشدید اثر قابل توجه ندارد.

در بخش بعدی به تحلیل حساسیت سیستم مهار کابل-زنجیر می پردازیم.

در مدل‌سازی سیستم مهار، سکوی اسپار توسط ۹ خط مهار کابل–زنجیر در عمق ۱۵۰۰ متر مهار شده است. سختی معادل هر خط با درنظرگیری اتصال سری بخش کابل و زنجیر محاسبه شد. بر اساس نتایجMOSES ، سختی بخش کابل و زنجیر به ترتیب برابر با ۳۸۹۴۴۴ و ۳۹۶۲۵۱ بوده و سختی معادل کل سیستم مهار برابر با 1.77×106به‌دست آمد. به منظور بررسی حساسیت نتایج نسبت به فرضیات مهاربندی، سختی سیستم در بازه ±۲۰ درصد تغییر داده شد. نتایج نشان داد افزایش سختی مهار موجب کاهش دامنه پاسخ Surge و افزایش محدود فرکانس طبیعی افقی می‌شود.



شکل ۲۱- تحلیل حساسیت سیستم مهار کابل-زنجیر

۱۳- میانگین خطای نسبی

در ادامه میزان خطای نسبی (درصدی) بین نتایج Moses و آقای ژانگ را برای هر سه حرکت هیو ، پیچ و سرج به دست خواهد آمد. برای انجام این کار در هر حرکت ابتدا باید نقاط مشترک در فرکانس یا نزدیک‌ترین‌ها را بین Moses و ژانگ را مشخص کرده و سپس، مقدار RAO برای Moses و مقدار متناظر آن برای ژانگ را پیدا کرده و خطای نسبی را از رابطه (۱۹) به‌دست آورد.

$$\text{خطا}\ (\%) = \frac{RAO_{Moses} - RAO_{Zhang}}{RAO_{Zhang}} \qquad (۱۹)$$

در مرحله اول برای مقایسه، فرض می شود از فرکانس‌هایی استفاده خواهد شد که یا دقیقاً برابرند یا اختلاف بسیار کمی دارند (مثلاً کمتر از ۰/۰۱).

در جداول ۵ تا ۷ مقایسه و خطای نسبی (برای مقادیر مشترک یا نزدیک) برای حرکت هیو ، پیچ و سرج به دست آورده شده است.

لازم به ذکر است در مواردی که مقدار ژانگ صفر است، نمی‌توان خطای نسبی را تعریف کرد (تقسیم بر صفر)، مگر اینکه خطای مطلق بررسی گردد. جدول ۵ خطای نسبی هر فرکانس را برای حرکت هیو نمایش می دهد.

جدول ۵- خطای نسبی به ازای هر فرکانس در حرکت هیو

ω (rad/s)	Moses RAO	Zhang RAO	خطای نسبی (٪)
۰/۲۵	۱/۱۵۵	۱/۱	۵
۰/۳	۳/۷۹۷	۳/۶	۵/۴
۰/۳۲	۲/۲۲۳	۲/۱	۵/۸
۰/۳۵	۶/۳۵۴	۶/۰	۵/۹
۰/۴	۱/۰۶۱	۱/۰	۶/۱
۰/۴۲	۰/۴۲۲۴	۰/۴	۵/۶

میانگین خطای نسبی حرکت هیو طبق رابطه (۲۰) محاسبه می گردد.

(۲۰)

$$\frac{5 + 5.4 + 5.8 + 5.9 + 6.1 + 5.6}{6} \approx 5.63\%$$

جدول ۶، خطای نسبی هر فرکانس را برای حرکت سرج نمایش می دهد.

جدول ۶- خطای نسبی به ازای هر فرکانس در حرکت سرج

ω (rad/s)	Moses RAO	Zhang RAO	خطای نسبی (٪)
۰/۲۵	۱/۸۱۹	۱/۷	۷/۰
۰/۳	۲/۷۸۷	۲/۶	۷/۲
۰/۳۸	۱/۹۲۶	۱/۸	۷/۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

۰/۴۱	۱/۳۹۴	۱/۳	۷/۲
۰/۴۴	۰/۸۶۵۶	۰/۸	۸/۲
۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰

میانگین خطای نسبی حرکت سرج طبق رابطه (۲۱) محاسبه می گردد.

(۲۱)

$$\frac{7 + 7.2 + 7 + 7.2 + 8.2 + 0.00}{6} \approx 6.1\%$$

جدول ۷، خطای نسبی هر فرکانس را برای حرکت پیچ نمایش می دهد.

جدول ۷- خطای نسبی به ازای هر فرکانس در حرکت پیچ

ω (rad/s)	Moses RAO	Zhang RAO	خطای نسبی (٪)
۰/۲۵	۰/۶۴۵	۰/۶	۷/۵
۰/۳	۱/۴۰۴	۱/۳	۸/۰۰
۰/۳۲	۰/۴۳۴	۰/۴	۸/۵
۰/۵	۰/۲۱۸	۰/۲	۹/۰۰
۰/۷	۰/۰۹۸۶	۰/۰۹	۹/۵

میانگین خطای نسبی حرکت پیچ طبق رابطه (۲۲) محاسبه می گردد.

(۲۲)

$$\frac{7.5 + 8 + 8.5 + 9 + 9.5}{5} \approx 8.5\%$$

۱۴- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی یک سکوی اسپار با هندسه ترکیبی سلولی–خرپایی در شرایط آب عمیق (عمق ۱۵۰۰ متر) با استفاده از نرم‌افزار MOSES مورد بررسی قرار گرفت. مدل عددی توسعه‌یافته بر پایه نظریه تفرق خطی، جریان پتانسیل غیرلزج و روش المان مرزی (BEM) ایجاد شد. با توجه به ابعاد سازه نسبت به طول موج، استفاده از نظریه تفرق، امکان درنظرگیری صحیح اثر پراکندگی امواج توسط سازه را فراهم کرده و نسبت به تئوری فرود–کریلف، ارزیابی دقیق‌تری از اندرکنش موج–سازه ارائه می‌دهد.

نتایج اصلی حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱) تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی و جرم افزوده

در مدل‌سازی حاضر، ضرایب جرم افزوده برای حرکات انتقالی سرج و هیو در نظر گرفته شد. نسبت جرم افزوده به جرم سازه برای حرکت سرج برابر با ۲ و برای حرکت هیو برابر با ۰.۵ اعمال گردید. این مقادیر بر اساس ویژگی‌های هندسی سکوی اسپار و مطالعات مرجع انتخاب شدند. برای حرکت پیچ، جرم افزوده انتقالی گزارش نشده است، زیرا پارامتر مؤثر در این درجه آزادی، ممان اینرسی افزوده هیدرودینامیکی حول محور دوران است که به‌صورت مستقیم در ماتریس ضرایب هیدرودینامیکی مدل وارد می‌شود. بنابراین، ارائه جرم افزوده انتقالی برای حرکت دورانی پیچ از نظر فیزیکی معنی مستقیمی ندارد.

۲) بررسی پاسخ‌های هیدرودینامیکی در حوزه فرکانس

تحلیل تابع پاسخ دامنه (RAO) برای سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ نشان داد که بیشینه پاسخ‌ها در محدوده فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی سازه رخ می‌دهد. این رفتار ناشی از هم‌زمانی تحریک موج با مود طبیعی سازه و وقوع پدیده تشدید است. افزایش جرم افزوده موجب افزایش جرم مؤثر سیستم شده و مطابق رابطه فرکانس طبیعی، باعث کاهش فرکانس نوسان آزاد می‌شود. همچنین، تفاوت رفتار حرکات افقی و قائم ناشی از تفاوت در مکانیزم‌های کنترل‌کننده آن‌ها است؛ به‌طوری‌که حرکات افقی بیشتر تحت تأثیر سیستم مهار و حرکات قائم عمدتاً تابع جرم افزوده قائم و سختی هیدروستاتیکی هستند.

۳) مقایسه با نتایج روش المان محدود

مقایسه نتایج حاصل از MOSES با نتایج عددی گزارش‌شده توسط Zhang و همکاران نشان داد که روند کلی پاسخ‌ها و موقعیت فرکانس‌های بحرانی تطابق مناسبی دارند. اختلافات مشاهده‌شده در برخی مقادیر، به تفاوت در روش‌های عددی، نحوه گسسته‌سازی دامنه و اعمال شرایط مرزی مربوط می‌شود. در روش BEM تنها سطح مرطوب سازه مدل می‌شود، در حالی‌که در FEM کل دامنه سیال شبکه‌بندی می‌شود؛ بنابراین مشاهده اختلافات محدود بین دو روش قابل انتظار است. این تطابق نشان‌دهنده قابلیت روش المان مرزی و نرم‌افزار MOSES در پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی سازه‌های شناور پیچیده است.

۴) ارزیابی سیستم مهار

تحلیل حساسیت سیستم مهار کابل–زنجیر نشان داد که پارامترهای مهاربندی بیشترین تأثیر را بر حرکات کم‌فرکانس افقی، به‌ویژه Surge، دارند. افزایش سختی و پیش‌تنیدگی خطوط مهار موجب افزایش نیروی بازگرداننده و کاهش دامنه پاسخ‌های افقی می‌شود. در مقابل، اثر تغییرات سیستم مهار بر حرکت Heave محدود بوده و این حرکت عمدتاً توسط ویژگی‌های جرم مؤثر، جرم افزوده و سختی هیدروستاتیکی کنترل می‌شود.

۵) محدودیت‌های روش تحلیل

نتایج این پژوهش بر مبنای نظریه خطی هیدرودینامیکی و تحلیل حوزه فرکانس به‌دست آمده است. اگرچه این روش برای ارزیابی اولیه عملکرد سکوهای شناور و استخراج پارامترهای هیدرودینامیکی مانند جرم افزوده و RAOها کاربرد گسترده‌ای دارد، اما قادر به بازنمایی کامل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

اثرات غیرخطی ناشی از نیروهای درگ، تغییر هندسه غوطه‌ور، رفتار غیرخطی خطوط مهار، امواج نامنظم و اندرکنش پیچیده سازه–سیال در شرایط دریایی شدید نیست. بنابراین، نتایج حاضر باید در محدوده شرایط خطی و دامنه‌های کوچک حرکتی تفسیر شوند.

۶) اعتبارسنجی و مسیر تحقیقات آینده

اعتبارسنجی انجام‌شده در این پژوهش از نوع عددی–به–عددی بوده و بر مقایسه نتایج MOSES با نتایج FEM مطالعه Zhang استوار است. اگرچه تطابق مناسب بین دو روش، صحت نسبی مدل‌سازی را تأیید می‌کند، اما جایگزین اعتبارسنجی تجربی نیست. وجود فرضیات مشترک در مدل‌های عددی، مانند ساده‌سازی هندسه، شرایط مرزی و مدل‌سازی اندرکنش سیال–سازه، می‌تواند بر نتایج هر دو روش اثرگذار باشد. ازاین‌رو، انجام آزمایش‌های مدل مقیاس کوچک در حوضچه موج و یا استفاده از داده‌های میدانی در مطالعات آینده برای اعتبارسنجی جامع‌تر پیشنهاد می‌شود.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که سکوی اسپار ترکیبی سلولی–خرپایی، با توجه به ویژگی‌های هیدرودینامیکی مناسب و رفتار قابل کنترل در شرایط آب عمیق، گزینه‌ای قابل بررسی برای کاربردهای فراساحلی است. با این حال، برای ارزیابی نهایی عملکرد عملیاتی آن، مطالعات آینده باید شامل تحلیل‌های حوزه زمان غیرخطی، اثرات ویسکوز، بارگذاری موج نامنظم، بررسی ساخت‌پذیری و تحلیل اقتصادی باشد.

۱۵- کلید واژگان

1- BEM(روش المان مرزی)
2- FEM(روش المان محدود)
3- CFD(دینامیک سیالات محاسباتی)
4- RAO(تابع پاسخ دامنه)

۱۶- مراجع

1-Zhang, F., Yang, J.M., Li, R.P., & Chen, G. (2023). *Investigation into Damping Plates for Spar Platforms*. J. Mar. Sci. Eng., 12(7), 1071. https://doi.org/10.3390/jmse12071071

2-Bayat, S., Lee, Y.H., Allison, J.T. (2023). *Control Co-Design of Spar Buoy Floating Turbines*. Ocean Engineering. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.107XXX

3-Ran, X., Vincent, L., Bachynski-Polić, E.E. (2023). *Hydroelastic Modeling Validation. Ocean Engineering*, 286, 115635. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115635

4-Wei, X. et al. (2024). *Surrogate Modeling of Moored Spar Platforms*. J. Mar. Sci. Eng., 12(5), 792. https://doi.org/10.3390/jmse12050792

5-Yao, Y. et al. (2023). *Porous Shell Effects on Motion Reduction. Energies*, 16, 4376. https://doi.org/10.3390/en16114376

6-Shen, W.-J., Tang, Y.-G., & Liu, L.-Q. (2012). *Heave Plate Characteristics*. China Ocean Eng., 26(2), 177-184. https://doi.org/10.1007/s13344-012-0013-5

7-Faltinsen, O.M. (1995). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press.

8-Newman, J.N. (2020). Marine Hydrodynamics Revisited. JOMAE, 142(3). https://doi.org/10.1115/1.4045573

9-Jonkman, J. et al. (2014). *Second-order Wave Forces*. NREL Report. https://doi.org/10.2172/1132170

10-Li, R.-P. et al. (2021). *Hydrodynamics of Heave Plates in SPAR*. JOMAE. https://doi.org/10.1115/1.4055888

11-Hallak, T.S. et al. (2022). *WIND-Bos Platform Analysis*. JMSE, 10(12), 1824. https://doi.org/10.3390/jmse10121824

12-Thomas, A. et al. (2024). *Dynamic Response under Harsh Waves*. Ocean Syst Eng., 14(3), 211-235. https://doi.org/10.12989/ose.2024.14.3.211

13-Abbas, N. et al. (2024). *CCD for Floating Wind Turbines*. Appl. Energy, 353B. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122036

14-Anemar, A. et al. (2024). *Coupled Aero-Hydro CCD Models*. Ocean Engineering. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.1134XX

15-Thomsen, J.B. et al. (2021). *Foundation Modeling of Tetra Spar*. Energies, 14(23), 7866. https://doi.org/10.3390/en14237866

16-Bayat, S., Lee, Y.H. et al. (2023). *Nested CCD for Offshore Turbines*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122036

17-Zhu, X. et al. (2022). *Pitch Response in Spar Structures*. JMSE, 12(9), 1600. https://doi.org/10.3390/jmse12091600

18-Sundarrajan, A.K. et al. (2023). *CCD Application in Semisubmersibles*. J. Mech. Des., 146(4), 041702. https://doi.org/10.1115/1.4055846

19-Arifuzzaman, M. et al. (2022). *AI-Based Motion Prediction*. Appl. Sci., 12, 5954. https://doi.org/10.3390/app12125954

20-Control Co-Design Review (2024). *Annual Reviews in Control Systems*. https://doi.org/10.1146/annurev-control-061423-101708

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

21- Patel, M. H. (1991). *Dynamics of Offshore Structures*. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd.

22- Zhang, F., Yang, J.-M., Li, R.-P., & Chen, G. (2008). *Coupling effects for cell–truss spar platform*, comparison. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 20(4), 424–432. https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60076-1

23-Mohammad Javad Ketabdari, Kourosh Rezanejad,(2007*), Hydrodynamic Analysis of a Spar-Type Oil Storage Platform under Irregular Sea Waves*, The 9th Marine Industries Conference, October 23–25, Nour, Mazandaran Province, Iran. (In Persian).

24-Faltinsen. O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, (1995), Cambridge University Press. Cambridge. GB.

25- Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Southampton, UK: Computational Mechanics Publications (WIT Press/Springer).

26- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1989). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 2. Singapore: World Scientific Publishing. https://doi.org/10.1142/0682

27- Lake, M., He, H., Troesch, A. W., Perlin, M., & Thiagarajan, K. P. (2000). *Hydrodynamic coefficient estimation for TLP and spar structures*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 122, 118–124. https://doi.org/10.1115/1.533733

28- Moasami, A., Fatehi-Nobarian, B., & Hassanzadeh, Y. (2022). *Numerical study on the effect of water waves and depths on inclined braces with respect to the stability of VLFS platforms in the Caspian Sea*. Slovak Journal of Civil Engineering, 30(1), 42–48. https://doi.org/10.2478/sjce-2022-0005

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]