بررسی عددی تأثیر ترکیب مهارهای کتنری و کششی بر روی پاسخ‌های حرکتی هیو و پیچ یک سکوی فراساحلی نیمه شناور

فرشید عزیزی [۱]، سعید کاظمی [۲*]، فرهود آذرسینا [۳]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، farshid.azizi@srbiau.ac.ir
[۲] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، saeid.kazemi@srbiau.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، f.azarsina@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

مهار کتنری - کششی
سکوی نیمه شناور
بهینه سازی پاسخ حرکتی سکو

چکیده

در این مقاله، نقش مهارها در حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه‌شناور با توجه به افزایش استفاده روز افزون این سکوها در آب‌های عمیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. حرکات نامناسب سکوها می‌تواند باعث عدم پایداری سازه شده و عملکرد آن را مختل کند. جهت آنالیز حرکات سکو، با در نظر گرفتن نقش مهارها، شبیه‌سازی عددی سکوی امیرکبیر با حالت‌های مختلف مهاری بصورت تحلیل غیرخطی در حوزه زمان با استفاده از نرم افزار Orca-flex انجام شده است. با بررسی ۵۲ مدل ترکیب مهاری مختلف در سه مرحله، ۵ مدل ترکیب مهاری از لحاظ پاسخ حرکتی سکوی نیمه‌شناور در هیو و پیچ معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد ترکیب مهارهای یکپارچه کتنری و کششی علاوه بر کاهش کلی طول مهارها باعث رفتار بهینه در حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه‌شناور می‌شود.

Numerical Analysis of Catenary and Taut Mooring System Combination Effects on Heave and Pitch Motion Responses of a Semi-submersible Offshore Platform

Farshid Azizi[1], Saeid Kazemi[2*], Farhood Azarsina[3]

[1] Ph.D. student, Department of Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; farshid.azizi@srbiau.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; Saeid.kazemi@srbiau.ac.ir
[3] Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; f.azarsina@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 13 Jul 2024
Accepted: 29 Aug 2024
Available online: 29 Aug 2024

Keywords:
Catenary &Taut mooring
Semi-submersible platform
Optimization platform motion response

ABSTRACT

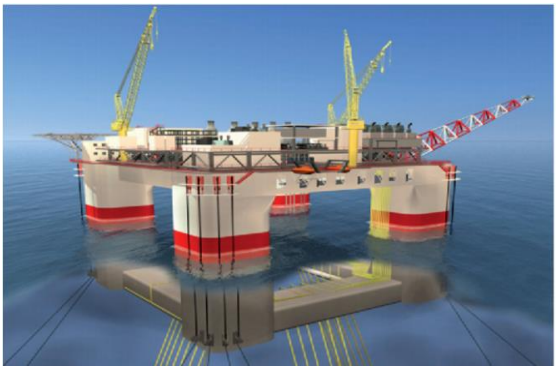
In this article, the mooring system effects on the heave and pitch responses of a semi-submersible platform is investigated. Improper movements of the floating offshore platforms can cause instability of the structure and disrupt its performance. In order to analyze the movements of the platform, taking into account the role of moorings, the numerical simulation of Amir-kabir platform with different mooring modes has been performed as a nonlinear analysis in the time domain using Orca-flex software. By examining 52 different mooring models in three stages, 5 mooring models have been introduced in terms of the heave and pitch motion responses of the semi-submersible platform. The results show that the combination of catenary and taut mooring systems with one type of mooring material, in addition to the overall reduction of the length of the moorings, causes optimal behavior in the heave and pitch responses of the semi-submersible platform.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

۱ – مقدمه

اقیانوس‌ها و دریاها منابع طبیعی ارزشمندی مانند نفت خام و گاز طبیعی زیر بستر دریا را برای ما فراهم می‌کنند. از آنجایی که اخیراً بسیاری از اکتشافات میادین بزرگ نفت/گاز در خارج از ساحل انجام می‌شود، سازه‌های شناور ساخته شده برای اکتشاف یا استخراج در آب‌های عمیق محبوبیت پیدا کرده‌اند. در طول دهه‌های گذشته، تقاضا برای پلتفرم‌های شناور مانند شناور استخراج و تخلیه[۱](FPSO)، نیمه‌شناورها[۲]، اسپارها[۳] و سکوهای پایه کششی[۴](TLP) افزایش یافته است. یک عضو کلیدی برای این سکوهای شناور، سیستم مهار[۵] می‌باشد. لازمه حیاتی یک سیستم مهار، توانایی آن برای نگهداشتن یک سازه شناور در ایستگاه تحت شرایط محیطی خاص است تا عملیات مختلف مانند حفاری، استخراج، تخلیه و تولید برق (توربین بادی فراساحلی[۶]) به طور ایمن انجام شود. طراحی سیستمی برای برآورده ساختن چنین نیازی برای مهندسان مهار کار آسانی نیست، زیرا آنها دائماً با چالش‌هایی در زمینه‌های طراحی، مهندسی، ساخت، نصب، بهره‌برداری، بازرسی، نظارت، نگهداری و تعمیر مواجه هستند [۱].

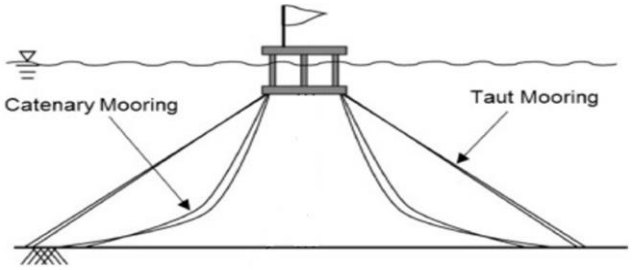
همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است پلتفرم نیمه‌شناور یک شناور تخصصی است برای حفاری دریایی، استخراج نفت، بلند کردن اجسام سنگین، اسکان یا ترکیبی از این عملکردها طراحی می‌شود. هنگامی که چاه‌های نفت حفر می‌شوند و توسط کشتی‌های حفاری تکمیل می‌شوند، شناورهای استخراج از این نوع (نیمه) به میدان کشیده می‌شوند و به سیستم‌های مهار دائمی متصل می‌شوند. نیمه شناورها سکوهای پایدار و مقرون به صرفه‌ای هستند. همانطور که توسعه نفت و گاز فراساحلی به سمت آب‌های عمیق‌تر حرکت کرد، استفاده از سکوهای نیمه‌شناور به دلیل فضای عرشه بزرگ آنها برای قرار دادن تجهیزات بزرگ در بالای سکو و سهولت ادغام بدنه بالا در کنار اسکله به طور فزآینده‌ای محبوب شد.



شکل ۱ – سکوی نیمه شناور [۲].

مهارهای دریایی بخش مهمی از سیستم‌های نگهداری شناورها هستند که برای اکتشاف و استخراج منابع نفت و گاز دریایی توسعه یافته‌اند. سیستم مهار، جدا از مهار سازه شناور در محل تعیین شده، گردش شناور را برای اطمینان از یکپارچگی و عملکرد تاسیسات حفاری و تولید مانند رایزرهای استخراج، رایزرهای حفاری و مرکزیت آنها محدود می‌کند. سیستم‌های مهار دریایی را می‌توان برای طیف وسیعی از شرایط از یک محیط سخت مانند دریای شمال تا یک محیط ملایم مانند خلیج تایلند یا غرب آفریقا طراحی کرد. آنها همچنین می‌توانند برای محدوده وسیعی از عمق آب از چند متر تا بیش از ۳۰۰۰ متر طراحی شوند.

بسته به پروفیل‌ها و پیکربندی‌ها، سیستم‌های مهار را می‌توان به سیستم‌های مهار کتنری[۷] و سیستم‌های مهار کششی[۸] دسته بندی کرد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سیستم مهار کتنری دارای یک نیمرخ خط است که بخشی از خط مهار با توجه به وزن خود روی بستر دریا در وضعیت تعادل بصورت ایستا قرار دارد. سیستم مهار کتنری پرکاربردترین سیستم به خصوص در آب-های کم عمق تا متوسط است.



شکل ۲ - انواع سیستم مهار کششی– کتنری [۳].

سیستم مهار کششی هیچ خطی بر روی بستر دریا در وضعیت تعادل و ایستا ندارد و خطوط مهاری از لنگر در بستر دریا تا فیرلید[۹] روی شناور کشیده می‌شود. بنابراین شعاع عملیاتی مهار کوچکتر بوده و از طول کمتری در مقایسه با سیستم مهار کتنری استفاده می‌کند. با این حال، از آنجایی که خطوط بصورت کشیده هستند، انطباق افست شناور و پاسخ‌های دینامیکی سازه بیشتر بر اساس کشش خط است. بنابراین یک سیستم مهار کشیده در آب کم‌عمق ممکن است خیلی سفت باشد و کشش خط را بیش از حد افزایش دهد. این نوع مهار بیشتر برای کاربردهای آب عمیق یا فوق عمیق مناسب است. معمولا یک سکوی نیمه شناور از ۸، ۱۲ یا ۱۶ خط مهار بصورت برابر در چهار گروه متصل از چهار ستون به بستر دریا استفاده می-کند [۴].

تحقیقات زیادی در بررسی و بهینه کردن خطوط مهارهای یک سکوی فراساحلی انجام گرفته است. در یکی از این مقالات هرماوان و فولکاوا [۵] به بررسی حالت دینامیکی خطوط مهار چند جزئی برای تجزیه و تحلیل حرکت یک سکوی دریایی پرداخت است. این مدل به روش جرم در سه جهت اجازه می‌دهد تا حرکت نقاط اتصال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

قطعه (شامل لنگر و وزنه‌ها) را بصورت یکجا در نظر گیرد. سپس با نرم افزار تجزیه و تحلیل پاسخ‌های دینامیکی سه بعدی از یک خط مهار چند جزئی را ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل حرکت سکوی شناور با خطوط مهار چند جزئی در عملیات واقعی و با در نظر گرفتن بارهای محیطی انجام شده است. تأثیر مدل دینامیکی ارائه شده در ارزیابی پاسخ سکوی شناور و کشش خطوط مهار بررسی و به این نتیجه رسیده است، که این مدل می‌تواند واقع بینانه‌تر حرکت سکوی شناور را نشان دهد. همچنین دریافت که خطوط مهار باید در سه جهت، در نظر گرفته شود زیرا حرکت خط مهار جانبی تأثیر قابل توجهی بر کشش خطوط دارد.

در مطالعه‌ای دیگر فنک و همکاران [۶] یک مدل خطوط مهار متحرک بهمراه ترکیب یک مدل مرزی برای بدنه شناور دو بعدی و یک مدل خطوط مهارکوپلی ساخته و مورد بررسی قرار داده است. مدل مرزی توسط رانکین در دامنه زمان فرموله شده و پتانسیل انعکاس برای بازتاب موج ناشی از شیب بستر دریا معرفی شده است. این مدل تازه توسعه یافته و با مقایسه با داده‌های موجود تأیید شده است. سپس، تجزیه و تحلیل پاسخ دینامیکی در شرایط مختلف بستر دریا انجام شده است. در مقایسه با یک کف صاف، یک بستر شیب دار باعث ایجاد پیکربندی نامتقارن در خطوط مهار می‌شود و اثرات محسوسی را در پاسخ‌های حرکتی بدنه شناور ایجاد می‌کند.

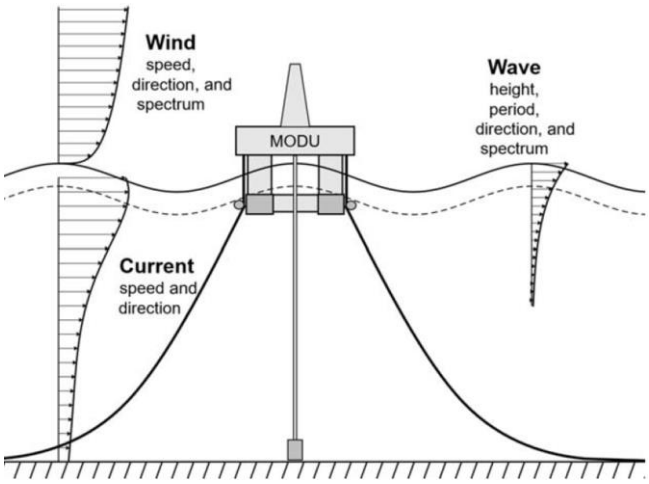
در پژوهشی دیگر تروبات و همکاران [۷] به بررسی نیروهای مهار توربین‌های بادی شناور در دریا عمدتاً توسط حرکات سکو از طریق حلقه هدایت پرداخته‌اند. تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی معمولاً فقط نیروهای هیدرودینامیکی مهار را با حرکت خطی که با توجه به نیروی موج می‌باشد را در نظر می‌گیرند. با استفاده از مدل FloaWDyn aero-servo-hydro-elastic، تأثیر بارهای هیدرودینامیکی موج بر روی خطوط کنتری و سیستم عامل برای حالت‌های مختلف دریا با و بدون نیروهای موج ارزیابی و با هم مقایسه و شبیه‌سازی شده است. تغییرات تنش‌ها و افزایش انحراف استاندارد برای موارد متعدد تجزیه و تحلیل شده است. گسترش دامنه کشش مهار با افزایش ۵٪، در حالت شدید دریا باعث صدمات در هنگام بارگذاری مهار و مقاومت در برابر خستگی مهار را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

امروزه تحقیقات و مطالعات زیادی بر روی مهارهای سکوی دریایی انجام می‌شود. هر یک از محققان جزئیاتی از شرایط محیطی و سکو را برای بهبود حرکتی سکو و عملکرد بهتر مهارها در نظر می‌گیرند. با توجه به توانایی مختص هر مهار، ترکیب دو مهار کتنری و کششی بطور مجزا برای بهبود حرکتی سکوی نیمه‌شناور فراساحلی در این مقاله در نظر گرفته شده است. تا با یک ترکیب مهاری حرکات سکو را به نحو مناسبی به حداقل ممکن کاهش داد.

۲- معادلات حاکم

سکوی نیمه شناور، بعنوان یک سازه فرا ساحلی، شامل معادلات هیدرودینامیکی و معادلات سازه‌ای است. این معادلات برای تحلیل رفتار جابجایی و پاسخ سکو در مقابل نیروها و حرکات دریا استفاده می‌شـــود. برای نیروهای هیدرودینامیکی افقی وارد بر پایه های استوانه‌ای سکو در صورتی که طول موج بسیار بیشتر از قطر المانی باشد از معادله موریسون[۱۲] استفاده شد.

در جایی که طول موج کمتر از پنج برابر قطر باشد، اثرات تفرق در نظر گرفته می‌شـود [۸]. یک سـازه شـناور در آب‌های آزاد بارهای محیطی را به دلیل وجود باد، موج، جریان، یخ و غیره تجربه می کند [۹-۱۰]. در شـکل ۳ اثر باد، جریان و موج نشـان داده شـده است. این نیروها مهمترین پارامترهای محیطی هستند که بر روی حرکات سازه شناور تاثیرگذار می‌باشند. سیستم مهار به گونه‌ای طراحی می‌شود که قابلیت کنترل سازه در مقابل نیروهای داخلی و خارجی را داشته باشد.



شکل ۳ - نیروهای باد، موج و جریان بر سکوی شناور [۱].

۲-۱- معادله حرکت سکوی نیمه شناور

معادله حرکت یک جسم شناور شامل سه حرکت دورانی (رول[۱۳]، پیچ[۱۴]، یاو[۱۵]) و سه حرکت انتقالی (سرج[۱۶]، سوآی[۱۷]، هیو[۱۸]) در جهات محورهای x، y و z می‌باشد. برای تحلیل و مدل‌سازی حرکت سکوی نیمه‌شناور در خصوص نیروها، معادله حرکتی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$M(p,a) + C(p,v) + K(p) = F(p,v,t) \quad (۱)$$

در معادله (۱):

M نیروی اینرسی[۱۹]

C نیروی دمپینگ[۲۰]

K نیروی بازگرداننده[۲۱]

F بردار نیروهای خارجی اعمال شده بر سازه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

p، v، a و t به ترتیب بردارهای موقعیت، سرعت، شتاب و زمان هستند.

۲-۲-بار باد

نیروی باد وارد بر سکوی نیمه شناور را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۱]:

$$F = \frac{1}{2}\rho V_p^2 C_D A \qquad (۲)$$

در معادله (۲):

ρ : چگالی هوا

V_p: سرعت باد

C_D: ضریب مقاومت هوایی سطح سکو

A: مساحت بادگیر سطح سکو

۲-۳- بارهای هیدرودینامیکی[۲۲]

بارهای محیطی وارد بر سازه‌های شناور را می‌توان با توجه به فرکانس امواج متمایز کرد:

- جریان و نیروهای ناشی از فرکانس موج متوسط که از نظر بزرگی و جهت برای مدت زمان مورد نظر ثابت هستند و باعث رانش موج می‌شوند. بارهای ثابت، سازه شناور را به سمتی سوق می‌دهند که توسط نیروی بازیابی مهار متوازن می‌شود [۱].

- بارهای ناشی از موج[۲۳] (WF) با دوره‌های معمولی از ۵ تا ۳۰ ثانیه. این بارها، تنش‌های چرخه‌ای در سازه ایجاد می‌کنند و باعث حداکثر کشش خطوط مهار و تجمع آسیب خستگی در خطوط مهار می‌شود. در برخی موقعیت‌ها، لنگرها و رایزرها میرایی اضافی در حرکات شناور (مانند حرکت سرج، سوآی و رول) ایجاد می‌کنند [۱۱].

- بارهای ناشی از موج فرکانس پایین[۲۴] (LF)، مانند حرکت دریفت آهسته ناشی از امواج، باد یا حرکت ناشی از رانشگرهای شناور یا سیستم مهار که معمولا در بازه زمانی ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه می‌باشد، تاثیرگذار است [۱۲].

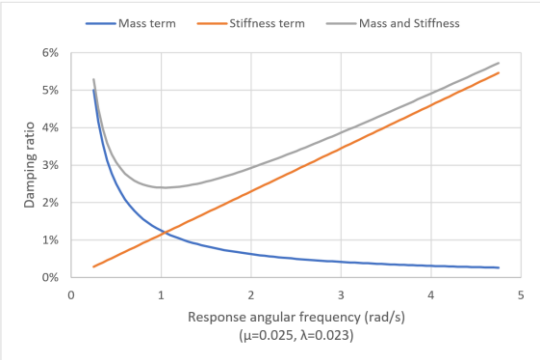
بیشترین بار موج بر روی سازه‌های دریایی در همان فرکانس امواج رخ داده و باعث حرکت سازه شناور در فرکانس موج می‌شود. برای جلوگیری از اثرات تشدید بزرگ، سازه‌های دریایی و سیستم‌های مهار آنها اغلب به گونه‌ای طراحی می‌شوند که فرکانس‌های تشدید[۲۵] به خوبی خارج از محدوده فرکانس طبیعی[۲۶] سازه قرار گیرد. بارهای ناشی از امواج می‌توانند باعث پاسخ الاستیک[۲۷] با فرکانس بالا شده و به دلیل اثرات بار غیرخطی[۲۸]، برخی از پاسخ‌ها همیشه در فرکانس‌های طبیعی ظاهر می‌شوند [۱۳].

۲-۴- میرایی

برای اثرات میرایی از معادله کلاســـیک رایلی[۲۹] طبق معادله (۳) استفاده شد. میرایی کلاسیک رایلی با ترکیب خطی جرم و سختی متناسب است. در اینجا ماتریس میرایی C برابر است با:

$$C = \mu M + \lambda K \qquad (۳)$$

که در معادله (۴) M و K به ترتیب جرم و ماتریس ســـختی و همچنین μ و λ ثابت‌های تناسب هستند. در شکل ۴ تغییر نسبت میرایی با فرکانس نشان داده شده است. این نمودار روشی را نشان می‌دهد که در آن شرایط میرایی جرم و سختی به نسبت میرایی کلی کمک می‌کند.



شکل ۴ - تغییر نسبت میرایی با فرکانس [۱۵].

ثابت‌های میرایی رایلی باید با دقت انتخاب شوند تا ازبخش مربوط به جرم در معادله میرایی، که منجر به میرایی بیش از حد پاسخ فرکانس پایین می‌شود، جلوگیری شود. همچنین باید توجه داشت که جرم[۳۰] مربوطه به دلیل حرکات صلب[۳۱] بدنه شناور میرایی ایجاد می‌کند. بنابراین میرایی متناسب با جرم معمولاً نادیده گرفته می‌شود. به عبارت دیگر توصیه برای چنین سیستم‌هایی استفاده از میرایی متناسب سختی (منحنی قرمز بالا) است [۱۴].

فرکانس‌های طبیعی و میرایی بحرانی ویژگی‌های ضروری برای حرکت شناور هستند. تشدید زمانی رخ می‌دهد که دوره نیروی تحریک خارجی نزدیک به دوره طبیعی یک سیستم شناور باشد. فرکانس طبیعی f و میرایی بحرانی BC یک سیستم شناور به عنوان توابعی از جرم کل (M+Ma) و سختی K در شش درجه آزادی بصورت زیرتعریف می‌شوند:

$$Natural\ frequency: f = \sqrt{\frac{K}{M + M_a}} \qquad (۴)$$

$$Critical\ damping: B_C = 2\sqrt{(M + M_a)K} \qquad (۵)$$

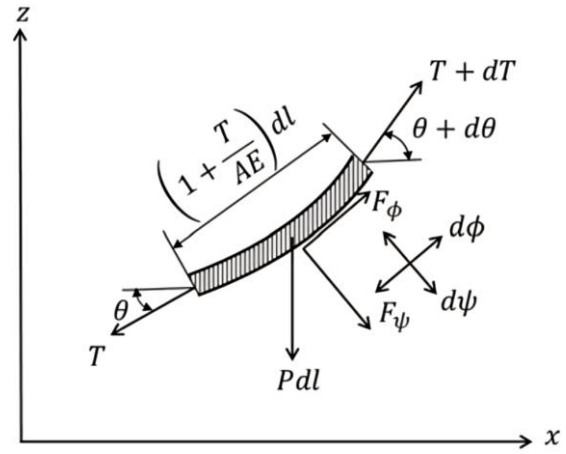
۲-۵- معادلات حاکم بر خطوط مهار

در شکل ۵ یک عنصر کوچک از خط مهار، در یک صفحه دو بعدی (سیستم مختصات فقط با x و z) نشان داده شده است. در نمودار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

بدنه آزاد شکل زیر، P وزن مرطوب در واحد طول، T کشش موثر، dl طول، AE سختی محوری، dψ نشان دهنده جابجایی در جهت عادی خط مهار و dφ تغییر مکان در جهت مماسی خط مهار می-باشد.

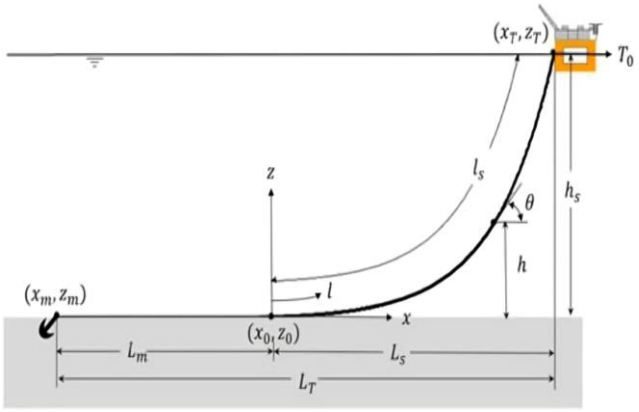


شکل ۵ - نیرو و جابجایی روی یک عنصر از خط مهار [۱].

در طراحی خطوط مهار فرض بر این است که شرایط خمش خط و سختی پیچشی ناچیز است و می‌توان از آنها صرف نظر کرد [۱۵]. این یک فرض معقول برای زنجیر و همچنین برای طناب سیمی یا پلی استر[۳۲] با شعاع انحنای زیاد است و به خوبی توسط صنعت پذیرفته شده است. تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی Fφ و Fψ بر روی مهار از طریق معادله موریسون محاسبه می‌شود. معادلات دیفرانسیل حاکم برای محاسبه نیروهای وارد بر خطوط مهار با در نظر گرفتن نیروهای دینامیکی و الاستیک[۳۳] خط مهار خواهد بود. این معادلات غیرخطی هستند و برای حل دقیق آنها نیاز به شبیه‌سازی عددی است [۱۶-۱۷].

۱-۵-۲- معادلات استاتیکی مهار

معادلات استاتیکی مهار اولین بار توسط لایب‌نیتس، هویگنس و برنولی در سال ۱۶۹۱ ثبت شد [۱۸]. حل معادله کتنری شکل مختصری از تابع کسینوس هذلولی[۳۴] دارد. در محاسبات مربوط به بارهای دینامیکی روی خط مهار، نیروهای میرایی و اینرسی[۳۵] به دلیل کوچک بودن نادیده گرفته می‌شوند. فرض می‌شود که میانگین نیروی محیطی افقی ناشی از باد، موج و جریان که بر روی خط مهار در نقطه اتصال آن وارد می‌شود، T_0 باشد. مبدأ قاب مرجع (x,z) در نقطه تماس خط با بستر دریا (x_0,z_0) است، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده شیب خط مهار برابر صفر است. در اینجا l_S طول معلق مهار (طول قوس)، l_T طول کل خط مهار و h فاصله عمودی مهار از نقطه شروع تا بستر دریا می باشد.



شکل۶ - مشخصات هندسی خط کتنری [۱].

برای سادگی محاسبات، اجزای مهار را غیر الاستیک در نظر می-گیریم، یعنی فرض می‌کنیم برای یک خط مهار کتنری از یک جنس واحد AE=∞ در نظر گرفته شده و خواهیم داشت:

$$dT - P\,sin\theta\,dl = 0 \qquad (۶)$$

$$T\,d\theta - p\,cos\theta\,dl = 0 \qquad (۷)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی در بستر دریا، برای معادلات بالا، معادلات زیر بدست می آید:

$$l(x) = \frac{T_0}{P} sinh\left(\frac{P}{T_0}x\right) \qquad (۸)$$

$$h(x) = \frac{T_0}{P} cosh\left(\frac{P}{T_0}x\right) - \frac{T_0}{p} \qquad (۹)$$

بر اساس معادلات (۸) و (۹) با توجه به کشش افقی T_0، می‌توان مشخصات خط مهار را ترسیم کرد. در بخش معلق که $0 < l < l_s$ است، داریم:

$$l = \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_0}{P}\right)} \qquad (۱۰)$$

برای محاسبه تنش در طول این بخش از رابطه زیر استفاده می شود.

$$T(l) = T_0 + P\,h \qquad (۱۱)$$

برای یک خط مهار کتنری زنجیری، معادله (۱۱) به این معنی است که کشش زنجیر ایستا در فیرلید به صورت خطی با نیروی محیطی افزایش می‌یابد، و برابر با جمع نیروی افقی و وزن زنجیر غوطه‌ور است. برای مهار کششی بدون در نظر گرفتن ظرفیت عمودی، برآورد حداقل طول خط برای جلوگیری از نیروی بالابرنده بسیار مهم است، که می‌تواند از رابطه زیر بین طول l و کشش کل T بدست آید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

$$l = h\sqrt{\left(2\frac{T}{P\,h} - 1\right)} \qquad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن معادلات (۱۰) و (۱۱)، راه مناسب برای مهار نیروها استفاده از خطوط کتنری با آلیاژ غیرکشسان می‌باشد. در ادامه با در نظر گرفتن کشسانی الاستیک می‌توان راه‌حل‌های شبه استاتیکی برای خطوط کتنری چند آلیاژی بدست آورد [۱۹-۲۰].

۲-۵-۲- سختی خطوط مهار

یک خط مهار به ترتیب نیروی افقی و عمودی T_H و T_V را بر اساس معادله (۱۳) و (۱۴) بر سازه شناور وارد می‌کند.

$$T_H = (T_H)_M + k_{11}\eta_1 \qquad (۱۳)$$
$$T_v = (T_v)_M + k_{33}\eta_3 \qquad (۱۴)$$

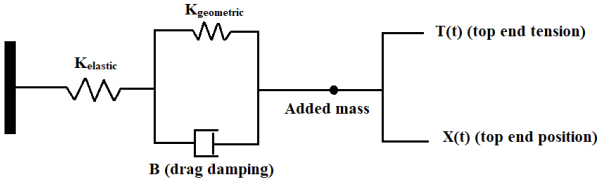
در معادلات (۱۳) و (۱۴) η_1 و η_3 حرکات و k_{11}، k_{33} به ترتیب سختی در جهت افقی و عمودی هستند. دو نیروی T_H و T_V با افست سازه شناور رابطه دارند. هر چه انحراف سازه شناور از موقعیت تعادلش بزرگتر باشد، نیروی واکنش T_H بزرگتر خواهد بود. مشابه یک سیستم فنری ساده، چنین رابطه‌ای بین افست ساختار شناور و نیروی واکنش خط مهار را سختی خط مهار می‌نامیم. سختی مهار یک رابطه متناسب بین نیرو و جابجایی ایجاد می‌کند. هنگامی که کشش بالای خط افزایش می‌یابد، خط مهار دارای کشیدگی محوری و همچنین تغییر شکل کلی هندسی خواهد شد. بنابراین سختی مهار شامل سختی محوری AE و سختی هندسی است [۱].

۲-۵-۳- دینامیک خطوط مهار

معادله (۱۵) کشش خط مهار ناشی از حرکت فرکانس موج (WF) را توصیف می کند:

$$M\frac{d^2r}{dt^2} + B\frac{dr}{dt} + K\,r = F(r.t) \qquad (۱۵)$$

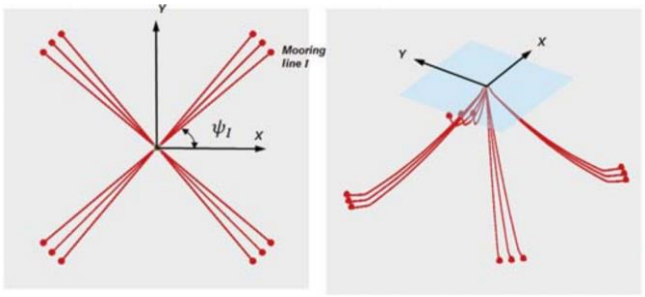
که در معادله (۱۵) M جرم افزوده، B میرایی، K ماتریس سختی، F یک نیروی برانگیختگی خارجی و $r=(x.y.z)$ بردار جابجایی از موقعیت است. تجزیه و تحلیل دینامیکی، شامل جرم اضافه شده، میرایی، و سختی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ - تصویری از یک تحلیل دینامیکی برای یک خط مهار کتنری.

۲-۵-۴- طراحی کلی سیستم مهار

یک سیستم مهار مطابق شکل ۸ با خطوط متعدد به سازه نیمه شناور متصل می‌شود.



شکل ۸ - سیستم مهار با خطوط متعدد [۱].

حرکت ساختار شناور را می‌توان به صورت معادله حرکات در شش درجه آزادی بیان کرد:

$$\sum_{j=1}^{6}\left[(M_{ij}+M_{aij})\frac{d^2\eta_j}{dt^2} + B_{Lij}\frac{d\eta_j}{dt} + B_{Q_{ij}}\left|\frac{d\eta_j}{dt}\right|\frac{d\eta_j}{dt} + K_{ij}\eta_j\right] = F_i \qquad (۱۶)$$

که در معادله (۱۶) شاخص‌های i و j به ترتیب جهت نیروی سیال و حالت حرکت را نشان می‌دهند.۶-۵-۴-۳-۲-۱= i به ترتیب سرج، سوآی، هیو، رول، پیچ و یاو اشاره دارد. B_L و B_Q به ترتیب ضرایب میرایی خطی و درجه دوم هستند. سمت راست معادله (۱۷) شامل نیروهای محیطی (نیروی متوسط باد، موج و جریان) است [۲۱-۲۲].

در سمت چپ معادله (۱۶)، جرم افزوده (Ma، جرم افزوده هم‌فاز با شتاب)، میرایی و سختی خطوط مهارقرار دارد. برای ماتریس سختی K و ماتریس میرایی B، سهم خطوط مهار مجموع مشارکت همه خطوط مهار است، بطور مثال برای جهت سرج از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$Surge: K_{11} = \sum_{I=1}^{n} k_1 cos^2\psi_I \qquad (۱۷)$$
$$Sway: K_{22} = \sum_{I=1}^{n} k_1 sin^2\psi_I \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

۳- شبیه سازی

شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار قدرتمند در علوم مهندسی، به ما این امکان را می‌دهد تا رفتار و عملکرد سیستم‌ها و فرآیندها را در شرایط واقعی یا شرایط مد نظر، مدل‌سازی و تحلیل کنیم. با استفاده از شبیه‌سازی ما می‌توانیم توانایی پیش بینی و بهبود عملکرد سیستم را ارتقاء دهیم، بدون اینکه نیاز به آزمایش‌های گران قیمت و زمان‌بر داشته باشیم. شبیه‌سازی عددی به ما این امکان را می‌دهد که در یک محیط شبیه سازی، بسیاری از تجزیه و تحلیل‌های مربوط به خطوط مهار و سکوهای شناور را میسر سازیم. مدل شبیه سازی شده در این مقاله سکوی نیمه شناور امیرکبیر می‌باشد که بر اساس طرح پایه GVA-4000 طراحی و در ۲۵۰ کیلومتری بندر نکا در دریای کاسپین مستقر است. شکل کلی و مشخصات سازه‌ای سکوی امیرکبیر در شکل ۹ و جدول ۱ ارائه شده است.

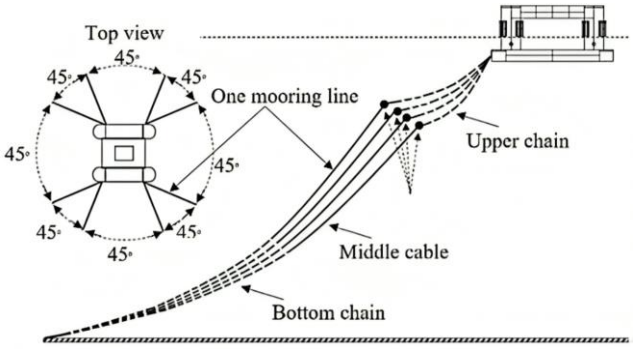


شکل ۹ - سکوی امیر کبیر.

جدول ۱ - برخی مشخصات هندسی سکوی نیمه شناور امیرکبیر [۲۳-۲۴] .

شرح	مقدار	شرح	مقدار
طول کل (m)	۹۸,۶	عرض کل (m)	۷۸,۸۴
ارتفاع تا کف عرشه (m)	۲۸,۵	طول پانتون (m)	۸۰,۵۶
ارتفاع تا سقف عرشه (m)	۳۶,۵	عرض پانتون (m)	۱۸,۶۸
قطر ستون‌ها (m)	۱۲,۹	قطر مهاربند (m)	۲
فاصله بین ستون‌ها (m)	۵۴,۷۲	آبخور عملیاتی (m)	۱۹,۵
ارتفاع مهار تا کف (m)	۱۱,۲	وزن عملیاتی	۲۸,۶۲۱

طراحی سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر به گونه‌ای است که از هشت مهار بطول سه کیلومتر (در هر گوشه سکو دو مهار) تشکیل شده است. این به معنای استفاده از مهارهای بلند و پیچیده می‌باشد که می‌تواند به مشکلاتی مانند هزینه بالا، پیچیدگی در نصب، مشکلات در نگهداری مهار در شرایط آب و هوایی متغیر و محدودیت‌های فنی و فیزیکی منجر شود. مشخصات مهارها در شکل ۱۰ و جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۰ - مشخصات مهار سکوی نیمه شناور امیر کبیر [۲۵].

جدول ۲ - مشخصات یک مهار سکوی نیمه شناور امیرکبیر [۲۶].

بخش	نوع	قطر (mm)	طول (m)	کیفیت	مقاومت‌شکست KN
بالایی	زنجیر	۷۶	۹۰۰	NV–R3S	MBL5454
میانی	کابل	۸۶	۱۰۰۰	IWRS37*6	MBL5100
پایینی	زنجیر	۷۶	۱۱۰۰	NV– R3S	MBL5454

۳-۱- شبیه‌سازی حوزه زمان

در شبیه‌سازی حوزه زمان، پاسخ‌های مربوط به حرکات شناور و مهار، از طریق یکپارچه سازی عددی به دست می‌آید، همچنین می‌توان معادلات غیرخطی تاریخچه زمانی دیگر موجود در شبیه-سازی را بدست آورد به عنوان مثال:

- حل غیرخطی، مربوط به هندسه: همراه با تغییرات بزرگ در شکل خطوط مهار.
- حل غیرخطی، مربوط به بستر دریا: برهمکنش بین خط مهار و بستر دریا.
- بارگذاری مستقیم سیال: متناسب با مجذور سرعت نسبی.

روش حوزه زمان برای انجام شبیه‌سازی جفت شده پاسخ‌های میانگین، فرکانس پایین و فرکانس موج شناور و سیستم مهار استفاده می‌شود. این رویکرد، معادلات حرکت مربوط به پاسخ شناور و خطوط مهار را به طور همزمان حل می‌کند. جرم، میرایی، سختی، بارگذاری و غیره در هر مرحله زمانی با در نظر گرفتن هندسه در آن لحظه و متغیر با زمان ارزیابی می‌شوند. از تحلیل استاتیکی به عنوان پیکربندی اولیه استفاده می‌شود و با گذشت زمان تغییر می-کند. خروجی نتایج اولیه، تاریخچه زمانی مربوط به حرکات سکو است. معادله حرکتی استفاده شده در حوزه زمان همان معادله (۱) می‌باشد. مراحل تجزیه و تحلیل دامنه زمانی به ترتیب زیر انجام می‌شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

- در ابتدا تعریف شرایط باد، موج، جریان (نیروهای محیطی) و شرایط عمق و بستر دریا
- سپس ابعاد سکو و مدل هیدرودینامیکی سیستم، شامل شناور و مهار تعیین می‌شود.
- کنترل RAOهای جابجایی مدل با RAOهای سکوی امیرکبیر
- شبیه‌سازی چندین بار با استفاده از دامنه‌های مختلف برای تولید تاریخچه زمانی
- تعیین حداکثر و حداقل مقادیر مورد انتظار کشش خطوط مهار و جابجایی شناور
- بررسی حد مجاز کشش خط و جابجایی شناور با معیارهای طراحی

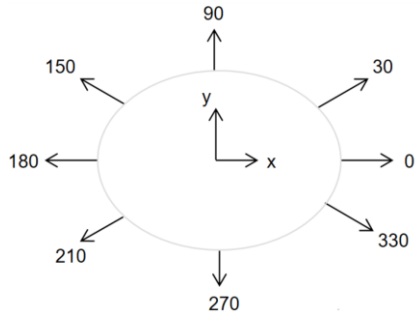
و در نهایت خروجی حوزه زمانی شبیه‌سازی‌ها، شامل پردازش آماری جابجایی شناور، کشش خطوط مهار، محل لنگر و طول مهار بدست می‌آید.

۲-۳- معرفی نرم‌افزار

برای حل معادله حرکتی شناور در حوزه زمان باید از روش‌های عددی مناسب استفاده کرد، روش‌های شهودی و تحلیلی در حل رفتار غیرخطی معمولا کارا نیستند. بنابراین استفاده از روش‌های عددی مانند المان محدود[۳۶] می‌تواند مناسب باشد. نرم‌افزار اُرکافلکس (OrcaFlex) در حال حاضر یکی از کاربردی‌ترین ابزار های عددی، در جهت آنالیز و بررسی مهارها بروش المان محدود می‌باشد. OrcaFlex برای انجام تجزیه و تحلیل دینامیکی از روش FE برای تحلیل استفاده می‌کند [۲۷]. در این تحلیل مهارها بصورت جرم توده‌ای به تعدادی گره تقسیم و به عنوان جرم نقطه‌ای و فنر در نظر گرفته می‌شوند [۲۸-۲۹].

روش المان محدود یک تکنیک عددی است که در آن جسم یا سازه به قطعات کوچکتری به نام المان‌ها تقسیم می‌شود و رفتار هر المان به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش المان محدود در نرم‌افزار OrcaFlex به شرح زیر است:

- مدل سازی هندسه: در ابتدا، هندسه سازه و مهارها به صورت مدل سه بعدی در OrcaFlex ایجاد می‌شود. زوایای نیروها و مهارها در نرم‌افزار مطابق شکل ۱۱ تعریف می‌شود.



شکل ۱۱ – زوایای نیرو و مهار در مدل‌ها

- تقسیم بندی به المان‌ها: سپس، مدل به المان‌های کوچکتر تقسیم می‌شود. در OrcaFlex، این المان‌ها به صورت المان‌های خطی (برای مهار) و المان‌های سطحی (برای سکو) در نظر گرفته می‌شوند.
- تعریف خصوصیات المان‌ها: برای هر المان، خصوصیات مواد، شرایط مرزی و سایر پارامترهای مورد نیاز تعریف می‌شوند.
- محاسبات المان‌ها: با استفاده از معادلات حاکم بر المان‌های خطی و سطحی، پاسخ هر المان در هر گام زمانی محاسبه می‌شود.
- ترکیب نتایج: نتایج محاسبات برای تک تک المان‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا پاسخ کلی سازه به دست آید.
- حل معادلات حرکت: معادلات حرکت سازه در هر گام زمانی با استفاده از روش‌های عددی مانند روش گام‌به‌گام حل می‌شود.

این روش‌های عددی به OrcaFlex این امکان را می‌دهد تا پاسخ دینامیکی سکوها را با دقت بالا محاسبه کند و نتایج مفیدی را برای طراحی و ارزیابی ارائه دهد.

مزیت تجزیه و تحلیل دامنه زمان، توانایی آن در مدل کردن همه موارد و عوامل غیرخطی سیستم، از جمله جرم، موج، میرایی، و سفتی، و بار متغیر به عنوان ورودی بهمراه در نظر گرفتن فرکانس پایین و بالا در نرم افزار می‌باشد. با این حال، محاسبه می تواند زمان بر باشد. با این وجود، با پیشرفت در فناوری محاسبات، تجزیه و تحلیل دامنه زمانی بیشتر و بیشتر محبوب می شود و راه رو به جلو را نشان می دهد. به ویژه هنگامی که برای تجزیه و تحلیل موارد بار بحرانی، تأیید تجزیه و تحلیل دامنه فرکانس، و سیستم هایی با غیرخطی بالا و غیره استفاده می شود، بسیار ارزشمند است [۳۰].

۳-۳- جمع‌آوری داده‌ها محیطی

جهت مدل‌سازی سکوی نیمه‌شناور و محاسبات نیروها باید از داده-های محیطی استفاده شود. چگالی هوا $0.0013\ te/m^3$ و ویسکوزیته سینماتیک[۳۷] هوا برای محاسبه عدد رینولدز[۳۸] $15 \times 10^{-6}\ m^2/s$ لحاظ شده است. بستر دریا بصورت صاف و الاستیک با عمق طراحی برای این سکو ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات نیروهای محیطی موج، باد و جریان لحاظ شده در نرم‌افزار در جدول ۳ ارائه شده است. موج، باد و جریان قالب اعمالی به سکو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

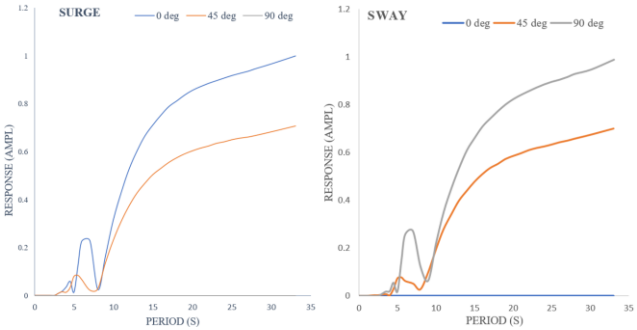
در زاویه ۱۸۰ درجه می‌باشد. شرایط محیطی دریای کاسپین برای امواج نامنظم طیف JONSWAP، باد طیف NPD و جریان روش Interpolated می‌باشد [۲۵-۲۶-۲۷].

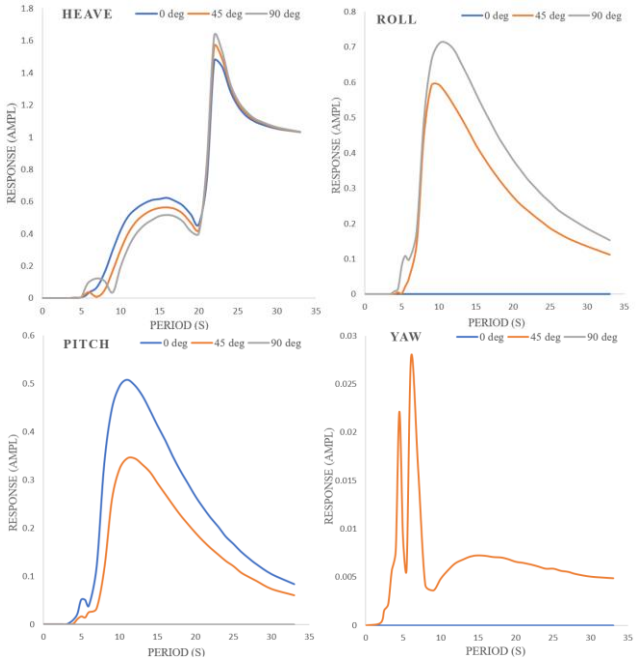
جدول ۳ - نیروهای محیطی دریای کاسپین [۲۵-۲۶].

پارامتر محیطی	واحد	دوره‌های بازگشت (سال)		
		۱	۱۰	۱۰۰
ارتفاع موج بیشینه	m	۷	۱۲,۹	۱۴
پریود متناسب با ارتفاع بیشینه	s	۹,۴	۱۰,۶	۱۱,۵
ارتفاع مشخصه موج	m	۵,۶	۷,۲	۸,۴
پریود پیک متناسب با ارتفاع مشخصه	s	۱۰,۴	۱۱,۸	۱۲,۸
سرعت متوسط باد ۱ دقیقه‌ای	m/s	۲۲	۲۹	۳۸
سرعت جریان در سطح آزاد آب	m/s	۰,۸۶	۱	۱,۲۶

۴-۳- اعتبار سنجی مدل

پس از مدل‌سازی هندسی و تعیین شرایط محیطی و نیروهای وارده، اعتبارسنجی نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در زمینه طراحی سازه‌های شناور، اپراتور دامنه پاسخ[۳۹] (RAO) یک آمار مهندسی می‌باشد که برای تعیین رفتار احتمالی یک شناور در هنگام اعمال نیروها در دریا استفاده می‌شود. اپراتورهای دامنه پاسخ که با نام اختصاری RAO شناخته می‌شوند، معمولاً از مدل‌های طرح‌های شناور پیشنهادی آزمایش‌شده در یک حوضچه مدلسازی یا از اجرای برنامه‌های کامپیوتری تخصصی CFD، مانند انسیس به‌دست می‌آیند. در این راستا، ابتدا عملکرد دامنه پاسخ بدست آمده از نرم-افزار انسیس موجود سکوی امیرکبیر در شش جهت حرکتی از سه زاویه، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است با دقت ثبت می‌شود.





شکل ۱۲ - دامنه طیف پاسخ سکوی نیمه شناور امیرکبیر

بمنظور محاسبه مابقی زوایا، از روش درونیابی استفاده شد. پس از آن نوبت به وارد کردن نیروها و سپس مدل کردن سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر در نرم‌افزار Orca-Flex می‌رسد. با دریافت نتایج، خروجی‌های دامنه طیف پاسخ توسط نرم افزار با داده‌های قبلی بدست آمده مجددا قیاس می‌شود تا اطمینان حاصل کنیم RAOهای ثبت شده از انسیس با سکوی شبیه‌سازی شده و نیروها منطبق شده باشد. خلاصه مراحل بترتیب زیر می‌باشد:

۱- وارد کردن RAOهای موجود

۲- مدل سازی سکو و مهارها

۳- وارد کردن نیروها

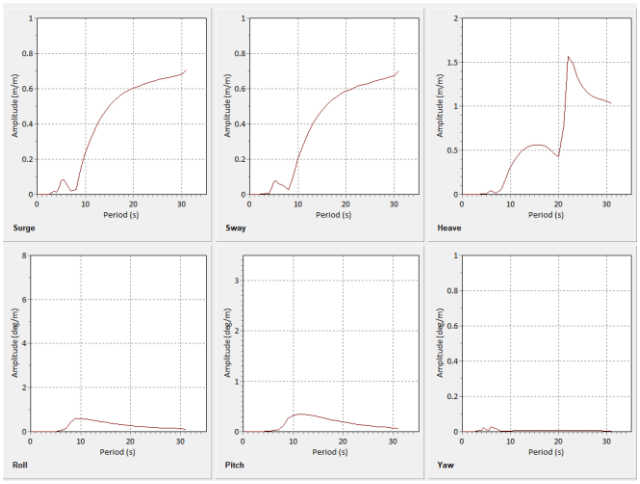
۴- بررسی RAOهای خروجی

۵- در صورت انطباق مورد قبول و در غیر اینصورت، تغییرات در جزییات مدل‌سازی

در نرم‌افزار Orca-Flex، RAOهای ورودی، مشخصات سکو، مهارها و نیروهای محیطی ثابت و غیر قابل تغییر می‌باشد اما RAOهای خروجی متغیر و وابسته به تمام موارد ثابت ذکر شده است. در صورت داشتن اختلاف، برای به حداقل رساندن RAOهای ورودی و خروجی از متغیرهایی از جزییات مدل‌سازی از قبیل اتصالات و غیره که به فرم اصلی سکو، مهارها و نیروهای محیطی تاثیر گذاشته نشود (بصورت صحیح و خطا) استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌کنید RAOهای حرکتی سکوی مدل شده توسط نرم‌افزار نشان داده شده است. به این ترتیب، با توجه به چشم پوشی از مقدار خطای جزئی نتایج مربوط به دو شکل ۱۲ و ۱۳ مورد قبول و تقریبا منطبق می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]



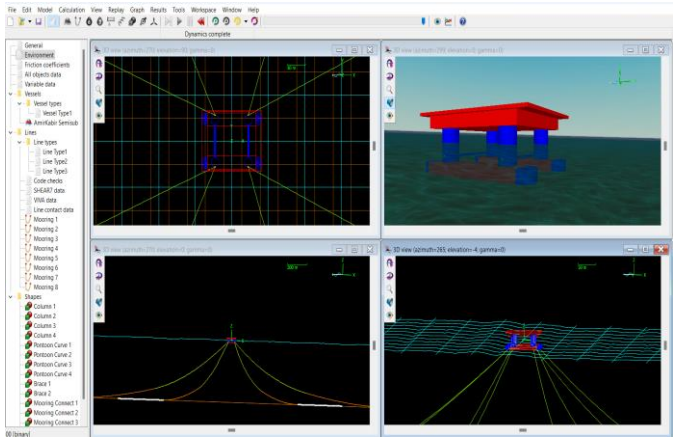
شکل ۱۳ – دامنه طیف پاسخ در زاویه ۴۵ درجه

با رعایت دقت و بهبود مستمر معیارهای مدل سازی در نرم‌افزار Orca-Flex، تشابه دو نمودار بهم نزدیکتر می‌شود.

۵-۳- مدل سازی

در این قسمت، مدل‌های مختلف سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر با تعداد مهارهای متفاوت (۴مهاری، ۸ مهاری، ۱۲ مهاری و ۱۶ مهاری) مورد بررسی قرار گرفت.

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، در ابتدا سکوی نیمه شناور امیرکبیر با تعداد مهارهای اولیه، ۸ مهار دوتایی در هر گوشه به صورت مدل اولیه در نظر گرفته شده است. سپس، با تغییراتی در طول و موقعیت مهارها مدل‌های دیگری از سکوی نیمه شناور امیر کبیر ایجاد می‌شود.



شکل ۱۴ – مدل سکوی نیمه شناور امیر کبیر

بعد از انجام هر مدل، نمودارهای زمان-جابجایی[۴۰] برای تحلیل حرکات سکو از هر مدلسازی استخراج شد. سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع[۴۱] (FFT)، از داده‌های زمان-جابجایی به شکل-های بی‌بعد طیف دامنه پاسخ دست یافتیم. در این نمودارها، تغییرات جابجایی‌های سکو در طول زمان نشان داده شده است.

برای تحلیل این نمودارها، پارامترهای مختلفی مانند جابجایی عمودی (هیو) و زاویه چرخش (پیچ) سکو مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به ترکیب مهارهای امیر کبیر (کتنری – کششی – کتنری)، در مدل‌های انجام شده هر مهار فقط از یک جنس بوده و مهار اصلی سه قسمته، یکدست و تک جنس (کتنری یا کششی) تغییر داده شد. نیروهای پیش کشش مهارها بر اساس استانداردهای مربوطه و نیازهای سکوی نیمه شناور امیر کبیر تعیین شده‌اند.

اعمال تغییرات در بخش‌های زیر، در جهت بهبود عملکرد مهارها، در مدل‌سازی عددی اعمال شد.

- کاهش طول مهار کششی
- کاهش زاویه اتصال عمودی
- کاهش طول مهار کتنری
- محل قرار گیری لنگر
- تغییرات زاویه افقی

این تغییرات در سه مرحله انجام شد.

- گام اول

بر اساس ترکیب مهارها، در گام اول با اعمال یک تا ۴ مهار در پای هر ستون شروع و این چیدمان ها در شبیه سازی با اعمال به ۳۰ مدل انجام شد. در اولین گام طول مهار کتنری را به ۲۰۰۰ متر و مهارکششی را به ۷۰۰ متر کاهش دادیم. زوایای مهارها بر اساس تقسیم تعداد مهارهای هر مدل بر ۳۶۰ درجه قرار داده شده است تا تمام جهت‌ها را پوشش داده و زوایا یکسان و متقارن باشد. مشخصات ثابت و متغیر مهارها در هر مدل در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- ثابت‌ها و متغیرهای مدل‌های گام اول

ثابت‌ها	متغیرها
طول مهار کتنری ۲،۰۰۰ متر	تعداد مهارها
طول مهار کششی ۷۰۰ متر	
تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر	ترتیب محل قرار مهارها
زاویه افقی مهارها ثابت	
حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN	شعاع اتصال مهارها به بستر دریا
حداقل کشش مهار کششی ۱،۰۰۰ KN	

۳۰ مدل اولیه شامل:

۱- دو مدل ۴ (۴×۱) مهاری (در هر مدل فقط یک نوع مهار کتنری یا کششی استفاده شده است)

۲- چهار مدل ۸ (۴×۲) مهاری (یک مدل فقط مهار کتنری – یک مدل فقط مهار کششی – یک مدل اول مهار کتنری بعد کششی – مدل بعدی اول مهار کششی بعد کتنری)

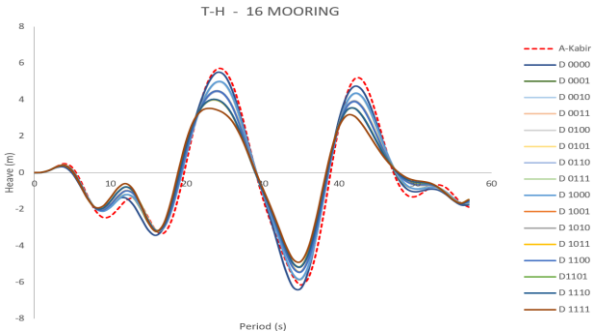
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

۳- هشت مدل ۱۲ (۴×۳) مهاری

۴- دوازده مدل ۱۶ (۴×۴) مهاری

با بررسی شکل‌های حرکتی هیو و پیچ سی مدل، دوازده مدل (دو مدل ۸، چهار مدل ۱۲ و ۶ مدل ۱۶ مهاری) از مدل‌های تغییر یافته ای که نسبت به دیگر مدل‌ها بازه حرکتی کمتری (در نمودارهای زمان-جابجایی) داشته‌اند، جهت اعمال در گام دوم استفاده شد. در شکل ۱۵ حرکت هیو سکو در شکل زمان-جابجایی برای سکوهای ۱۶ مهاری گام اول نشان داده شده است.



شکل ۱۵ - حرکت هیو سکو درمدل‌های ۱۶ مهاری گام اول

- گام دوم

در گام دوم، تغییرات شامل، کاهش طول مهارهای کششی به ۵۱۸ متر، کاهش زاویه باندازه ۱۵ درجه در امتداد عمود، تغییرات در محل قرارگیری مهارها (کتنری و کششی) و محل اتصال به بستر دریا اعمال شد. این تغییرات در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- ثابت‌ها و متغیرهای مدل‌های گام دوم

ثابت‌ها	متغیرها
طول مهار کتنری ۲،۰۰۰ متر	تعداد مهارها
طول مهار کششی ۵۱۸ متر	
تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر	ترتیب محل قرار مهارها
زاویه افقی مهارها ثابت	
حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN	شعاع اتصال مهارها به بستر دریا
حداقل کشش مهار کششی ۱،۰۰۰KN	

در ادامه با بررسی و تحلیل حرکتی مدلها، ۶ مدل (یک مدل ۸ مهاری، دو مدل ۱۲ مهاری و سه مدل ۱۶ مهاری)که دارای بازه حرکتی کمتری بودند جهت اعمال در گام بعد انتخاب شدند.

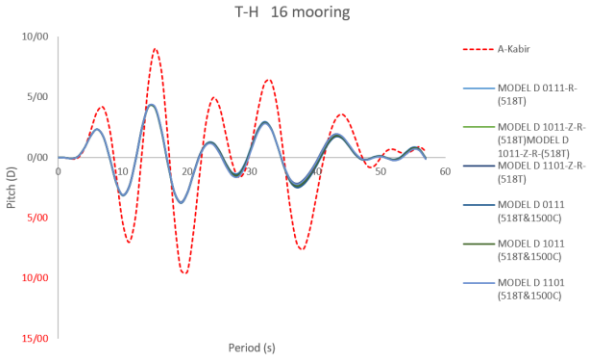
- گام سوم

با توجه به جزئیات موجود در جدول ۶ ، در گام سوم با حفظ تغییرات اعمال شده در گام‌های قبل، تغییرات در این گام بر روی طول مهار کتنری به اندازه ۱۵۰۰ متر، کاهش زاویه اتصال در امتداد عمود، تغییرات در محل مهارها (کتنری و کششی) و محل اتصال به بستر دریا می‌باشد.

جدول ۶- ثابت‌ها و متغیرهای مدل‌های گام دوم

ثابت‌ها	متغیرها
طول مهار کتنری ۱،۵۰۰ متر	تعداد مهارها
طول مهار کششی ۵۱۸ متر	
تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر	ترتیب محل قرار مهارها
زاویه افقی مهارها ثابت	
حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN	شعاع اتصال مهارها به بستر دریا
حداقل کشش مهار کششی ۱،۰۰۰KN	

با آنالیز این ترکیب مهار متوجه بهبود بیشتر در حرکات سکو شدیم. در شکل ۱۶ حرکت چرخشی پیچ در ۶ مدل باقیمانده سکوهای ۱۶ مهاری نشان داده شده است.



شکل ۱۶ - حرکت پیچ سکوهای ۱۶ مهاری گام سوم

۴- تحلیل و بررسی خروجی‌ها

خروجی‌های مربوط به تغییرات مهارهای سکوی نیمه شناور امیر کبیر بررسی شد. در این بخش برای هر مدل، تغییرات مربوط به جابجایی سکو در طول زمان بر اساس مهارهای کتنری و کششی تحلیل شده است. با توجه به گام‌های مدل‌سازی طول، جنس و زاویه اتصال از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر حرکات سکوی نیمه-شناور می‌باشد.

با مدل‌سازی‌های انجام گرفته در نهایت، با توجه به طول ۱۵۰۰ متری کتنری و ۵۱۸ متری کششی، در نهایت یک مدل ۸ مهار B 10 (۴ کتنری + ۴ کششی) ، دو مدل ۱۲ مهاری C 101 و C 110 (۴ کتنری + ۸ کششی) و دو مدل ۱۶ مهاری D 0111 و D 1011 (۴کتنری + ۱۲ کششی) که بر اساس بازه حرکتی کمتر سکوی نیمه‌شناور در حرکت هیو و پیچ، به عنوان ترکیب مهاری مناسب‌تر شده در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مشخصات مهار سکوهای نیمه‌شناور

نام مدل	خطوط	نوع	شعاع	طول	زاویه افقی
B 10	مهار ۱	کششی	۱۹۲	۵۱۸	۴۵
	مهار ۲	کتنری	۱،۳۶۰	۱،۵۰۰	۴۵
C 101	مهار ۱	کششی	۱۹۲	۵۱۸	۴۰
	مهار ۲	کتنری	۱،۳۶۲	۱،۵۰۰	۴۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

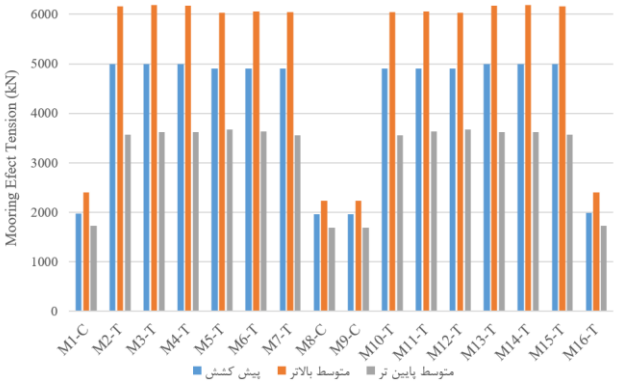
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

	مهار ۳	کششی	۱۹۲	۵۱۸	۵۰
C 110	مهار ۱	کششی	۱۹۲	۵۱۸	۴۰
	مهار ۲	کششی	۱۹۲	۵۱۸	۴۵
	مهار ۳	کتنری	۱،۳۶۳	۱،۵۰۰	۴۵
D 0111	مهار ۱	کتنری	۱،۳۶۵	۱،۵۰۰	۳۷،۵
	مهار ۲	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۴۲،۵
	مهار ۳	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۴۷،۵
	مهار ۴	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۵۲،۵
D 1011	مهار ۱	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۴۰
	مهار ۲	کتنری	۱،۳۶۵	۱،۵۰۰	۴۵
	مهار ۳	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۴۵
	مهار ۴	کششی	۱۹۳	۵۱۸	۵۰

جهت سادگی و ادراک بهتر فقط مهارهای متصل به یک ستون مربوط به سکوی نیمه‌شناور قرار داده شده است. با توجه به جدول ۷ کاهش زوایای اتصال بین مهارهای هر ستون باعث عملکرد بهتر در حرکت سکو می شود. با توجه به عملکرد نرم افزار در صورتی که مقدار کشش مهارها از مقدار مجاز بیشتر شود، مهار پاره شده و سکو واژگون می‌گردد. در جدول ۸ مشخصات مهارها که در تمام مدل‌ها استفاده شده است و در شکل ۱۷ مقدار نیروهای پیش کشش و متوسط بالا و پایین پیش کشش برای هر یک از شانزده مهار مدل D 0111 ارائه شده است.

جدول ۸- مشخصات مهار کتنری و کشیده

کشیده	کتنری	مهار
Rope/Wire	chain	جنس
6*19 Wire with Wire core	studlink	نوع
۰،۱۰۲	۰،۰۷۹	ضخامت (m)
۰،۰۳۵	۱،۱۷	وزن در آب (kn/m)



شکل ۱۷- نیروهای کششی ۱۶ مهار مدل D 0111

در شکل ۱۷ محور افقی نام و شماره مهارها می‌باشد. حروف C ،M و T بترتیب برای کلمات مهار، کتنری و کشیده بصورت مخفف استفاده شده است.

۴-۱- بررسی تاثیرات ترکیب مهارها بر حرکات سکو

در ابتدا، با اعمال بارهای اســـتاتیکی و دینامیکی، ســـکو به حالت تعادل می‌رســـد و جابجایی‌ها کاهش می‌یابند. اما با افزایش زمان، تشدید درتغییرات حرکتی مربوط به سکو را شاهد بودیم.

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که تغییر در تعداد مهارها و موقعیت آنها تأثیر قابل توجهی بر رفتار سکوی نیمه شناور دارد. با افزایش تعداد مهارها، جابجایی عمودی سکو کاهش یافته که باعث افزایش ایمنی و کارایی سکو می‌باشد. همچنین، با تغییر موقعیت مهارها، زاویه چرخش سکو نیز تغییر می‌کند. این تغییرات شامل:

۱- بهبود میزان جابجایی عمودی

۲- بهبود زاویه چرخش نسبت به افق

همچنین این نتایج نشان می‌دهند تغییرات مهارها در کاهش جابجایی سکو در محور عمودی بیشتر از محور افقی و حرکت چرخشی تأثیرگذار است. میزان کاهش طول مهارها (متعاقبا کاهش وزن) و همچنین با کاهش طول مهارها، محل لنگر به سکو نزدیکتر شده و شاهد کاهش شعاع عملیاتی برای پیاده‌سازی مهار خواهیم بود که بصورت درصد در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ - میزان کاهش مدل‌های شبیه‌سازی شده نسبت به مدل اولیه

نام مدل	درصد کاهش	
	مقدارطول مهارها	شعاع عملیاتی مهار
B 10	۶۶٪	۵۳٪
C 101	۵۸٪	
C 110	۵۸٪	
D 0111	۴۹٪	
D 1011	۴۹٪	

با توجه به مشابه بودن نتایج هر دو مدل ۱۶ مهاری، تفاوت دو مدل زوایای مهارها می‌باشد که در جدول ۷ ذکر شده می‌باشد. با توجه به کاهش محدوده عملیاتی بر اساس شرایط بستر دریا از مدل مناسبتر استفاده می‌شود.

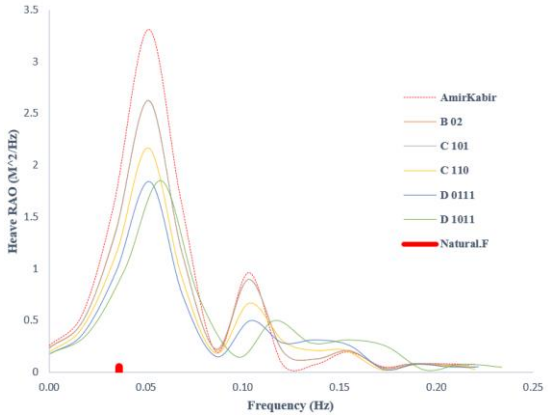
۴-۲- مقایسه طیف دامنه پاسخ مدل‌های برگزیده با مدل اولیه

با مقایسه و بررسی شکل طیف دامنه پاسخ مربوط به مدل‌های برگزیده و مدل اولیه، و اهمیت محل قرارگیری حداکثر طیف پاسخ نسبت به فرکانس طبیعی بدلیل بوجود آمدن تشدید، می‌توانیم اهمیت ترکیب مناسب مهارها بر رفتار سکو را به طور دقیق‌تر مشاهده کرد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمایش دهنده طیف دامنه پاسخ مربوط به حرکت هیو و پیچ سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر و مدل‌های برگزیده شده هستند، با توجه به حرکات هیو و پیچ مشاهده می‌شود

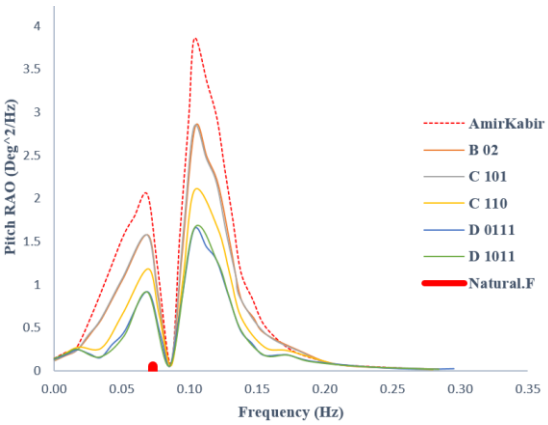
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

که میزان حداکثر طیف پاسخ نسبت به فرکانس طبیعی در محدوده فرکانسی مناسبی قرار گرفته شده است.



شکل ۱۸ - نمودار مقایسه و بررسی طیف دامنه پاسخ حرکت هیو



شکل ۱۹ - نمودار مقایسه و بررسی طیف دامنه پاسخ حرکت پیچ

با اعمال تغییرات بر روی مهارهای سکوی نیمه شناور، حرکت این سکوها در مقایسه با مدل اصلی بهبود یافته است. تغییرات مهارها عملکرد سکو را در حرکات پیچ و هیو به مقدار قابل توجهی کاهش داده است. یکی از اصلی‌ترین تغییرات اعمال شده در مدل‌ها، تنظیم، بهبود و کاهش مهارها است. همانطور که مشاهده می شود استفاده از یک نوع مهار (کتنری یا کششی) مستقل به تنهایی عملکرد بهتری در حرکت سکو نسبت به استفاده از ترکیبی از آنها (کتنری بهمراه کششی) دارد. این روند طراحی، باعث کاهش ارتعاشات سکو در مواجهه با شرایط سخت محیطی در دریا می شود. به طور خلاصه، تغییرات در مهارها بهبود قابل توجهی در عملکرد و پایداری سکو را به همراه داشته است. با بهره‌گیری از این مدل‌ها، ریسک نوسانات و ارتعاشات غیر مطلوب در سکو را به حداقل می‌رساند.

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل جابجایی‌ها، مشاهده می‌شود که تغییرات در تعداد، طول و موقعیت مهارها نسبت به مدل اولیه طراحی تأثیر مستقیمی بر بهبود رفتار و جابجایی سکو دارد. همچنین، با تحلیل نمودارهای زمان-جابجایی می‌توان به نحوه تغییرات جابجایی‌ها در طول زمان، به بهبود طراحی سکوی نیمه-شناور و افزایش ایمنی آن کمک کند.

مدل‌سازی سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر با مهارهای متفاوت در این پژوهش به وضوح نشان داد که مهارها و موقعیت آنها بر رفتار سکو و جابجایی آن تأثیر مستقیمی دارند. این نتایج می‌تواند باعث تغییرات مثبت در طراحی و بهینه‌سازی حرکتی سکوهای نیمه‌شناور شود. ترکیب مهارها منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد و استحکام این سکوها می‌شود.

در پژوهش‌های آتی، می‌توان به عوامل دیگری مانند امواج و شرایط آب و هوایی بر رفتار سکوهای نیمه‌شناور با محوریت مهارها بر اساس شرایط بستر دریا، تغییر عمق، شکل ستون‌ها و پانتون‌ها[۴۲] توجه کرد. همچنین، می‌توان با بهبود روش‌های مدل‌سازی و تحلیل، دقت نتایج را ارتقا داد.

۶- کلیدواژگان

1- Floating production storage and offloading
2- Semi-submersible platform
3- Spar platform
4- Tension leg platform
5- Mooring system
6- Offshore wind turbine
7- Catenary mooring
8- Taut mooring
9- Fairlead
10- Newton's Second Law
11- Bernoulli's equation
12- Morison equation
13- Roll
14- Pitch
15- Yaw
16- Surge
17- Sway
18- Heave
19- Inertia
20- Damping
21- Stiffness
22- Hydrodynamic loads
23- Wave frequency
24- Low frequency
25- Resonance frequencies
26- Natural periods
27- Elastic response
28- Non-linear load
29- Riley Damping
30- Mass damping
31- Rigid
32- Polyester

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

9- Zhang, Z. L., Yuan, H. T., Sun, S. L., & Ren, H. L. (2021). *Hydrodynamic characteristics of a fixed semi-submersible platform interacting with incident waves by fully nonlinear method*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 13, 526-544. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.06.003

10- Mazarakos, T., & Tsaousis, T. (2024). *Hydrodynamic Loads on a Semi-Submersible Platform Supporting a Wind Turbine Under a Mooring System With Buoys*. Polish Maritime Research, 31(1), 24-34. https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0003

11- Larsen, K. (2015). *Fatigue Analysis and Design of Mooring Systems.* Assessment and comparison of different methods (Master's thesis, NTNU). http://hdl.handle.net/11250/2350726

12- Jonkman, J. M. (2007). *Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine*. University of Colorado at Boulder.

13- Eslahi, M. J., Ezam, M., & Ghodsi Hassanabad, M. (2023). *Numerical Study on Heave Plate Effects on Hydrodynamic Responses of Floating Offshore Wind Turbines*. Journal Of Marine Engineering, 19(41), 119-133. http://marine-eng.ir/article-1-1070-en.html

14- Zerwer, A., Cascante, G., & Hutchinson, J. (2002). *Parameter estimation in finite element simulations of Rayleigh waves*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 128(3), 250-261. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:3(250)

15- Sarpkaya, T., *Experimental Determination of the Critical Reynolds Number for Pulsating Poiseuille Flow, Trans.* ASMED, J. Basic Engng, Vol. 88 (1966).

16- Schulz, K. W., & Kallinderis, Y. (2000). *Three-dimensional numerical prediction of the hydrodynamic loads and motions of offshore structures.* J. Offshore Mech. Arct. Eng., 122(4), 294-300. https://doi.org/10.1115/1.1320440

17- Johansson, P. I. (1976). *A finite element model for dynamic analysis of mooring cables* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

18- Palomo, M. (2017). *Describing Reality: Bernoulli's Challenge of the Catenary Curve and its Mathematical Description by Leibniz and Huygens.* The Dialogue Between Sciences,

33- Elastic
34- Hyperbolic cosine function
35- Inertia
36- Finite element method (FEM)
37- Kinematic viscosity
38- Reynolds number
39- Response amplitude operator
40- Time history
41- Fast Fourier Transform
42- Pontoons

۷ – مراجع

1- Ma, K. T., Luo, Y., Kwan, C. T. T., & Wu, Y. (2019). *Mooring system engineering for offshore structures*. Gulf Professional Publishing. https://doi.org/10.1016/C2018-0-02217-3

2- Karlsson, D., & Forser, M. (2015). *Structural analysis of node cut-outs in a semi-submersible offshore platform*. Master's Thesis in the International Master's Programme Naval Architecture and Ocean Engineering. https://doi.org/10.1115/OMAE2016-54068

3- Lee, J., Kwon, O., Kim, I., Kim, G., & Lee, J. (2019). *Cyclic pullout behavior of helical anchors for offshore floating structures under inclined loading condition.* Applied Ocean Research, 92, 101937. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101937

4- Wang, R. (2016). *Design of mooring systems in extreme seastates with focus on viscous drift force modelling* (Master's thesis, NTNU). http://hdl.handle.net/11250/2622949

5- Hermawan, Y. A., & Furukawa, Y. (2020). *Coupled three-dimensional dynamics model of multi-component mooring line for motion analysis of floating offshore structure*. Ocean Engineering, 200, 106928. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106928

6- Feng, A., Kang, H. S., Zhao, B., & Jiang, Z. (2020). *Two-Dimensional Numerical Modelling of a Moored Floating Body under Sloping Seabed Conditions*. Journal of Marine Science and Engineering, 8(6), 389. https://doi.org/10.3390/jmse8060389

7- Trubat, P., Molins, C., & Gironella, X. (2020). *Wave hydrodynamic forces over mooring lines on floating offshore wind turbines*. Ocean Engineering, 195, 106730. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106730

8- MacCamy, R. C., & Fuchs, R. A. (1954). *Wave forces on piles*. A Diffraction Theory. Washington DC. Crops of Engineers.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]

Philosophy and Engineering: New Historical and Epistemological Insights. Homage to Gottfried W. Leibniz and 1646–2016, 334.

19- Faltinsen, O. (1993). *Sea loads on ships and offshore structures* (Vol. 1). Cambridge university press.

20- Wu, Y., Wang, T., Eide, Ø., & Haverty, K. (2015). *Governing factors and locations of fatigue damage on mooring lines of floating structures*. Ocean Engineering, 96, 109-124. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.036

21- Krolikowski, L. P., & Gay, T. A. (1980, May). *An improved linearization technique for frequency domain riser analysis.* In Offshore Technology Conference (pp. OTC-3777). OTC.

22- Vander Velde, W. E. (1968). *Multiple-input describing functions and nonlinear system design*. McGraw-hill Book Company.

23- Sabziyan, H., Ghassemi, H., Azarsina, F., & Kazemi, S. (2015). *Appropriate model for mooring pattern of a semi-submersible platform.* Journal of Subsea and Offshore-Science and Engineering, 1(1), 18-25.

24- Rashidi, J.,Ahmadi ,A.,Seif, M., & Azarsina, F. (2015, May). *The effect of different bracing patterns on the behavior of semi-submersible platform.* The 6th International Conference of Offshore Industries, Sharif University of Technology. (In Persian)

25- Mohseni, A. S., & Mostafa, G. B. A. (2012). *The effect of heave plates on hydrodynamic behavior of Amir Kabir semi-submesible platform.* The 10th international conference of coasts, ports and marine structures in Tehran. (In Persian)

26- Dardel, M., & Ghafari, H. (2018). *Effects of Buoy size on the frequency and time response in catenary mooring systemof the semi - submersible platform*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 0 2, pp. 2 0 9 -21 8, 2018 (in Persian)

27- Aamo, O. M., & Fossen, T. I. (2000). *Finite element modelling of mooring lines.* Mathematics and computers in simulation, 53(4-6), 415-422. https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00235-4

28- DNV GL. (2017). *SESAM Theory Manual—DeepC Deep Water Coupled Floater Motion Analysis*, Version 5.2-02.

29- Ormberg, H., Fylling, I. J., Larsen, K., & Soedahl, N. (1997, April). *Coupled analysis of vessel motions and mooring and riser system dynamics. In proceedings of the international conference on offshore mechanics and arctic (pp. 91-100).* American Society of Mechanical Engineers.

30- API RP 2SK, *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, third ed., American Petroleum Institute,* 2005. Addendum 2008; Reaffirmed 2015.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.55]