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، ایران، saeid.kazemi@srbiau.ac.ir ۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، f.azarsina@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	چکیدہ
<i>ناریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸ تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸	در این مقاله، نقش مهارها در حرکات هیو و پیچ سکوی نیمه شناور با توجه به افزایش استفاده روز افزون این سکوها در آبهای عمیق مورد بررسی قرار می گیرد. حرکات نامناسب سکوها می تواند باعث عدم پایداری سازه شده و عملکرد آن را مختل کند. جهت آنالیز حرکات سکو، با در نظر گرفتن نقش مهارها، شبیه سازی عددی سکوی امی کسر با حالتهای مختلف معاری بصورت تحلیل غیر خطی در حوزه زمان با استفاده از نرم
مهار کتنری - کششی سکوی نیمه شناور بهینه سازی پاسخ حرکتی سکو	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 Azizi¹, Saeid Kazemi^{2*}, Farhood Azarsina³

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 semisubmersible 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 semisubmersible platform.

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 می شود، 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'(FPSO)، نیمه شناورها'، اسپارها" 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 شرايط محيطى خاص است تا عمليات مختلف مانند حفارى، استخراج، تخلیه و تولید برق (توربین بادی فراساحلی^ع) 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].

بررسی، تعارک، تجهداری و تعمیر مواجع تستین ۲۱، همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است پلتفرم نیمه شناور یک شناور تخصصی است برای حفاری دریایی، استخراج نفت، بلند کردن اجسام سنگین، اسکان یا ترکیبی از این عملکردها طراحی می شود. هنگامی که چاه های نفت حفر می شوند و توسط کشتی های حفاری تکمیل می شوند، شناورهای استخراج از این نوع (نیمه) به میدان کشیده می شوند و به سیستم های مهار دائمی متصل میدان کشیده می شوند و به سیستم های مهار دائمی متصل می شوند. نیمه شناورها سکوهای پایدار و مقرون به صرفه ای هستند. همانطور که توسعه نفت و گاز فراساحلی به سمت آب های عمیق تر حرکت کرد، استفاده از سکوهای نیمه شناور به دلیل فضای عرشه بزرگ آنها برای قرار دادن تجهیزات بزرگ در بالای سکو و سهولت ادغام بدنه بالا در کنار اسکله به طور فزآینده ای 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 ۲۰۰۰ متر طراحی شوند. سیستمهای مهار کتنری^۷ و سیستمهای مهار را میتوان به کرد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سیستم مهار 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 می کند. 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 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

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 مهار کوپلی 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 می شود 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 می گیرند. با استفاده از مدل FloaWDyn aero-servo-hydro-elastic، تأثير بارهای هیدرودینامیکی موج بر روی خطوط کتنری 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 تأثير قرار مىدهد.

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 می گیرند. با توجه به توانایی مختص هر مهار، ترکیب دو مهار کتنری و کششی بطور مجزا برای بهبود حرکتی سکوی نیمه شناور 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 می شود. برای نیرو های 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 می شود [^۸]. یک سازه شاور در آبهای آزاد بارهای محیطی را به دلیل وجود باد، موج، جریان، یخ و غیره تجربه می کند [۹–۱۰]. در شکل ۳ اثر باد، جریان و موج نشان داده شده است. این نیروها مهمترین پارامترهای محیطی هستند که بر روی حرکات سازه شناور تاثیرگذار می اشند. سیستم مهار به گونهای طراحی می شود که قابلیت کنترل سازه در مقابل نیروهای داخلی و خارجی را داشته باشد.



شکل ۳ - نیروهای باد، موج و جریان بر سکوی شناور [1].

۲-۱- معادله حرکت سکوی نیمه شناور

معادله حرکت یک جسم شناور شامل سه حرکت دورانی (رول^۱^۱، پیچ^۱، یاو^۱) و سه حرکت انتقالی (سرج^۱، سوآی^۱، هیو^۱) در جهات محورهای X، Y و Z میباشد. برای تحلیل و مدلسازی حرکت سکوی نیمهشناور در خصوص نیروها، معادله حرکتی بصورت زیر تعریف میشود:

$$M(p.a) + C(p.v) + K(p) = F(p.v.t)$$
 (1)

در معادله (۱): M نیروی اینرسی^{۱۹} C نیروی دمپینگ^{۲۰} K نیروی بازگرداننده^{۲۱} F بردار نیروهای خارجی اعمال شده بر سازه

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

$$F = \frac{1}{2}\rho V_p^2 C_D A \tag{(7)}$$

در معادله (۲): P : چگالی هوا V_P: سرعت باد C_D: ضریب مقاومت هوایی سطح سکو A: مساحت بادگیر سطح سکو

۲-۲- 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^{۳۳} (WF) با دورههای معمولی از ۵ تا ۳۰ ثانیه. این بارها، تنشهای چرخهای در سازه ایجاد می کنند 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 می کنند [11].

- 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 اموج 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].

۴-۲- میرایی

برای اثرات میرایی از معادله کلاســیک رایلی^{۳۹} طبق معادله (۳) استفاده شد. میرایی کلاسیک رایلی با ترکیب خطی جرم و سختی متناسب است. در اینجا ماتریس میرایی C برابر است با:

$$C = \mu M + \lambda K \tag{(7)}$$

که در معادله (۴) M و K به ترتیب جرم و ماتریس سـختی 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 می کند.



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 می-شود. 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:
$$f = \sqrt{\frac{K}{M + M_a}}$$
 (*)

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

۵-۲- 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 2025-08-31



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:

$$dT - P \sin\theta \, dl = 0 \tag{(?)}$$
$$T \, d\theta - p \cos\theta \, dl = 0 \tag{(Y)}$$

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

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

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

$$l = \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_0}{P}\right)} \tag{(1.1)}$$

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

$$T(l) = T_0 + P h \tag{11}$$

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 *ا* و کشش کل *T* بدست آید. 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 [1].

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^{۲۳} با شعاع انحنای زیاد است و به خوبی توسط صنعت پذیرفته شده است. تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی $P \phi g f \psi$ 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 شبیه سازی عددی است [۲۶–۱۷].

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، T0 باشد. مبدأ قاب مرجع (x,z) در نقطه تماس خط با بستر دریا (x₀,z₀) است، همانطور که در شکل در نقطه تماس خط با بستر دریا (x₀,z₀) است. همانطور که در شکل معلق مهار (طول قوس)، I طول کل خط مهار و h فاصله عمودی مهار از نقطه شروع تا بستر دریا می باشد.

$$l = h \sqrt{\left(2\frac{T}{Ph} - 1\right)} \tag{17}$$

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.

$$\begin{split} T_{H} &= (T_{H})_{M} + k_{11}\eta_{1} & (1\%) \\ T_{v} &= (T_{v})_{M} + k_{33}\eta_{3} & (1\%) \end{split}$$

در معادلات (۱۳) و (۱۴) η و η حرکات و k_{33} k_{11} به ترتیب سختی در جهت افقی و عمودی هستند. دو نیروی $T_{\rm H}$ و $\tau_{\rm V}$ با افست سازه شناور رابطه دارند. هر چه انحراف سازه شناور از موقعیت تعادلش بزرگتر باشد، نیروی واکنش $T_{\rm H}$ 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 می کند. 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 [1].

۳-۵-۲- دینامیک خطوط مهار معادله (۱۵) کشش خط مهار ناشی از حرکت فرکانس موج (WF) را توصیف می کند:

$$M\frac{d^2r}{dt^2} + B\frac{dr}{dt} + Kr = F(r,t)$$
(10)

که در معادله (۱۵) M جرم افزوده، B میرایی، K ماتریس سختی، F یک نیروی برانگیختگی خارجی و (x.y.z) = r 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.

۴-۵-۲- طراحی کلی سیستم مهار
یک سیستم مهار مطابق شکل ۸ با خطوط متعدد به سازه نیمه شناور متصل می شود.



شکل ۸ – سیستم مهار با خطوط متعدد [۱].

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

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

که در معادله (۱۶) شاخصهای i و j به ترتیب جهت نیروی سیال و حالت حرکت را نشان می دهند. *۶–۵–۲–۱– ا – ۲ ب*ه 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 [–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 می شود.

Surge:
$$K_{11} = \sum_{\substack{I=1\\n}}^{n} k_1 cos^2 \psi_I$$
 (17)

Sway:
$$K_{22} = \sum_{I=1}^{N} k_1 sin^2 \psi_I$$
 (1A)

۳- شبیه سازی

شبیه سازی به عنوان یک ابزار قدر تمند در علوم مهندسی، به ما این امکان را می دهد تا رفتار و عملکرد سیستمها و فرآیندها را در شرایط واقعی یا شرایط مد نظر، مدل سازی و تحلیل کنیم. با استفاده از شبیه سازی ما می توانیم توانایی پیش بینی و بهبود عملکرد سیستم را ارتقاء دهیم، بدون اینکه نیاز به آزمایشهای گران قیمت و زمان بر داشته باشیم. شبیه سازی عددی به ما این امکان را می دهد که در یک محیط شبیه سازی، بسیاری از تجزیه و تحلیل های مربوط به خطوط مهار و سکوهای شناور را میسر سازیم. مدل شبیه سازی شده در این مقاله سکوی نیمه شناور امیر کبیر می باشد 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 امیر کبیر 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				
عرض کل (m)	۹۸,۶	طول کل (m)				
طول پانتون (m)	۲۸,۵	ارتفاع تا کف عرشه (m)				
عرض پانتون (m)	378,0	ارتفاع تا سقف عرشه (m)				
قطر مهاربند (m)	۱۲,۹	فطر ستونها (m)				
آبخور عملیاتی (m)	54,77	فاصله بين ستونها (m)				
وزن عملياتي	11,7	ارتفاع مهار تا کف (m)				
	شرح عرض کل (m) طول پانتون (m) عرض پانتون (m) قطر مهاربند (m) آبخور عملیاتی (m) وزن عملیاتی	مقدار شرح (m) عرض کل (m) (m) عرض کل (m) (m) عرض پانتون (m) (m) عرض پانتون (m) (m) قطر مهاربند (m) (m) آبخور عملیاتی (m) (m) وزن عملیاتی				

طراحی سکوی نیمه شناور امیر کبیر به گونه ای 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 می باشد که می تواند به مشکلاتی مانند هزینه بالا، پیچیدگی در نصب، مشکلات در نگهداری مهار در شرایط آب و هوایی متغیر و محدودیت های

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].

مقاومتشكست	كيفيت	طول	قطر	نوع	بخش
KN		(m)	(mm)		
MBL5454	NV-R3S	٩٠٠	۲۶	زنجير	بالايي
MBL5100	IWRS37*6	١٠٠٠	٨۶	كابل	میانی
MBL5454	NV-R3S	11	۷۶	زنجير	پايينى

۱-۳- شبیهسازی حوزه زمان

در شبیه سازی حوزه زمان، پاسخهای مربوط به حرکات شناور و مهار، از طریق یکپارچه سازی عددی به دست میآید، همچنین می توان معادلات غیر خطی 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 شبیه سازی جفت شده پاسخهای میانگین، فرکانس پایین و فرکانس موج شناور و سیستم مهار و خطوط مهار را به طور همزمان حل می کند. جرم، میرایی، سختی، بارگذاری و غیره در هر مرحله زمانی با در نظر گرفتن هندسه در آن لحظه و متغیر با زمان ارزیابی می شوند. از تحلیل استاتیکی به عنوان پیکربندی اولیه استفاده می شود 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) می باشد. مراحل تجزیه و تحلیل دامنه زمانی به ترتیب زیر انجام می بشود:

- 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 مهارها میباشد. FE برای تحلیل استفاده می کند [۲۷]. در این تحلیل مهارها بصورت جرم تودهای به تعدادی گره تقسیم و به عنوان جرم نقطهای و فنر در نظر گرفته می شوند [۲۸–۲۹].

روش المان محدود یک تکنیک عددی است که در آن جسم یا سازه به قطعات کوچکتری به نام المانها تقسیم می شود و رفتار هر المان به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد. 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

- تقسيم بندى به المانها: سپس، مدل به المانهاى كوچكتر تقسيم می شود. در OrcaFlex، این المان ها به صورت المان های خطی (برای مهار) و المان های سطحی (برای سکو) در نظر گرفته می شوند. - تعريف خصوصيات المانها: براى هر المان، خصوصيات مواد، شرایط مرزی و سایر پارامترهای مورد نیاز تعریف میشوند. - محاسبات المان ها: با استفاده از معادلات حاكم بر المان هاى خطى و سطحی، پاسخ هر المان در هر گام زمانی محاسبه میشود. - ترکیب نتایج: نتایج محاسبات برای تک تک المان ها 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 گامبه گام حل می شود. 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

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- جمع آوری دادهها محیطی

جهت مدل سازی سکوی نیمه شناور و محاسبات نیروها باید از داده-های محیطی استفاده شود. چگالی هوا 0.0013 te/m³ و ویسکوزیته سینماتیک^{۳۷} هوا برای محاسبه عدد رینولدز^{۳۸} m²/s 10⁻⁶ × 15 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

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].

اسپين [۲۵–۲۶].	حیطی دریای ک	- نیروهای م	جدول ۳
----------------	--------------	-------------	--------

دورههای بازگشت (سال)			1.	h ~ , ". ,	
1	۱۰	۱	واحد	پارامىر محيطى	
14	۱۲,۹	٧	m	ارتفاع موج بيشينه	
۱١,۵	۱۰,۶	۹,۴	S	پريود متناسب با ارتفاع بيشينه	
۸,۴	۷,۲	۵,۶	m	ارتفاع مشخصه موج	
۱۲,۸	۱١,٨	۱۰,۴	S	پریود پیک متناسب با ارتفاع مشخصه	
۳۸	۲۹	۲۲	m/s	سرعت متوسط باد ۱ دقیقهای	
1,78	۱	۰,۸۶	m/s	سرعت جریان در سطح آزاد آب	

۴–۳– اعتبار سنجی مدل

پس از مدلسازی هندسی و تعیین شرایط محیطی و نیروهای وارده، اعتبارسنجی نرمافزار مورد ارزیابی قرار می گیرد. 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 آزمایش شده 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 می شود.





شکل ۱۲ – دامنه طیف پاسخ سکوی نیمه شناور امیر کبیر

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 AAOهای ثبت شده از انسیس با سکوی شبیهسازی شده و نیروها منطبق شده باشد. خلاصه مراحل بترتیب زیر میباشد: 1- وارد کردن MAOهای موجود ۲- مدل سازی سکو و مهارها ۳- وارد کردن نیروها ۴- بررسی AAOهای خروجی ۵- در صورت انطباق مورد قبول و در غیر اینصورت، تغییرات در جزییات مدل سازی

در فرماورار ۲۹۲ ۲۰۰۹ محیطی ثابت و غیر قابل تغییر میباشد اما 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.



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 می شود.

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 می شود، در ابتدا سکوی نیمه شناور امیر کبیر 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 می شود.



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 – کشششی – 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 شـد. نیروهای پیش کششش مهارها بر اساس استانداردهای مربوطه و نیازهای سکوی نیمه شناور امیر کبیر تعیین شدهاند.

اعمال تغییرات در بخشــهای زیر، در جهت بهبود عملکرد مهارها، در مدلسازی عددی اعمال شد. - کاهش طول مهار کششی - کاهش زاویه اتصال عمودی

- تغييرات زاويه افقى
- 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 ۲۰۰ 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.

گام اول	مدلهای	متغيرهاى	- ثابتھا و	جدول ۴

متغيرها	ثابتها
	طول مهار کتنری ۲٬۰۰۰ متر
تعداد مهارها	طول مهار کششی ۷۰۰ متر
s . ä - ""	تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر
الرئيب محل قرار مهارها	زاويه افقى مهارها ثابت
شعاع اتصال مهارها به	حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN
بستر دریا	حدااقل کشش مهار کششی KN۱،۰۰۰

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)

۳- هشت مدل ۱۲ (۴×۳) مهاری
۴- دوازده مدل ۱۶ (۴×۴) مهاری
۱۹ بررسی شکلهای حرکتی هیو و پیچ سی مدل، دوازده مدل (دو مدل ۸، چهار مدل ۲۱ 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 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، تغیییرات 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

متغيرها	ثابتها
تمداد ومارها	طول مهار کتنری ۲،۰۰۰ متر
تعداد مهارها	طول مهار کششی ۵۱۸ متر
1. 1. 1	تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر
ترتيب محل قرار مهارها	زاویه افقی مهارها ثابت
شعاع اتصال مهارها به	حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN
بستر دریا	حداقل کشش مهار کششی KN۱،۰۰۰

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، تغیییرات در محل مهارها (کتنری و کششی) و محل اتصال به بستر دریا میباشد.

متغيرها	ثابتها
تداد با ما	طول مهار کتنری ۱٬۵۰۰ متر
تعداد مهارها	طول مهار کششی ۵۱۸ متر
	تیپ مهارها، مشابه مدل اصلی امیرکبیر
ترتيب محل فرار مهارها	زاويه افقى مهارها ثابت
شعاع اتصال مهارها به	حداکثر کشش مهار کتنری ۳،۰۰۰ KN
بستر دريا	حداقل کشش مهار کششی KN۱،۰۰۰

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 01 (۴ کتنری + ۴ کششی) ، دو مدل ۱۲ مهاری 101 C و 101 D و 101 D (۴ کتنری + ۸ کششی) و دو مدل ۱۶ مهاری 101 D و 101 D (۴ کتنری + 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.

سكوهاي نيمهشناور	مشخصات مهار	جدول ۷-
------------------	-------------	---------

نام مدل	خطوط	نوع	شعاع	طول	زوايه افقي
D 10	مهار ۱	كششى	۱۹۲	۵۱۸	40
В 10	مهار ۲	كتنرى	۱،۳۶۰	۱.۵۰۰	40
C 101	مهار ۱	كششى	195	۵۱۸	۴.
	مهار ۲	كتنرى	1.882	۱.۵۰۰	40

	مهار ۳	كششى	195	۵۱۸	۵۰
C 110	مهار ۱	كششى	195	۵۱۸	4.
	مهار ۲	كششى	195	۵۱۸	۴۵
	مهار ۳	كتنرى	1.888	۱.۵۰۰	40
D 0111	مهار ۱	كتنرى	۱.۳۶۵	۱.۵۰۰	۳۷,۵
	مهار ۲	کششی	۱۹۳	۵۱۸	47,0
	مهار ۳	كششى	۱۹۳	۵۱۸	۴۷,۵
	مهار ۴	كششى	۱۹۳	۵۱۸	۵۲,۵
D 1011	مهار ۱	كششى	۱۹۳	۵۱۸	۴.
	مهار ۲	كتنرى	1.880	۱.۵۰۰	۴۵
	مهار ۳	كششى	۱۹۳	۵۱۸	۴۵
	مهار ۴	كششى	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 می گردد. 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

کشیدہ	کتنری و '	صات مهار	۸- مشخ	جدول
-------	-----------	----------	--------	------

مهار	كتنرى	کشیدہ
جنس	chain	Rope/Wire
نوع	studlink	6*19 Wire with Wire core
ضخامت (m)	۰,۰۷۹	•,1•٢
وزن در آب (kn/m)	1.17	• .• ۳۵



شکل 1۷- 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.

۱-۴- بررسی تأثیرات ترکیب مهارها بر حرکات سکو به حالت در ابتدا، با اعمال بارهای اســـتاتیکی و دینامیکی، ســکو به حالت تعادل می رســد و جابجاییها کاهش مییابند. اما با افزایش زمان، تشدید در تغییرات حرکتی مربوط به سکو را شاهد بودیم.
نتایج حاصل از مدلسازی نشان می دهد 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 می می با فزایش تعداد مهارها در می می می می در تعداد مهارها با افزایش تعداد مهارها، جابجایی عمودی سکو کاهش یافته که باعث افزایش ایمنی و کارایی سکو می باشد. همچنین، با تغییر موقعیت مهارها، زاویه چرخش سکو نیز تغییر می کند. این تغییرات شامل:
۱- بهبود زاویه چرخش نسبت به افق
۲- بهبود زاویه چرخش نسبت به افق

جایجایی 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

ts. al:	درصد کاهش			
ەم مەل	مقدارطول مهارها	شعاع عملیاتی مهار		
B 10	۶۶ ′/.			
C 101	۵۸٪.	-		
C 110	۵۸٪.	۵۳٪.		
D 0111	49%	-		
D 1011	۴٩%	-		

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.

۲-۴- 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 می شود

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



شكل ۱۹ - نمودار مقايسه و بررسي طيف دامنه پاسخ حركت پيچ

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 اصلی ترین 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 می شود. به طور خلاصه، تغییرات در مهارها بهبود قابل توجهی در می شود. به طور خلاصه، تغییرات در مهارها بهبود قابل توجهی در این مدلها، ریسک نوسانات و ارتعاشات غیر مطلوب در سکو را به حداقل می رساند.

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 نیمه شناور امیر کبیر 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 می تواند باعث تغییرات مثبت در طراحی و بهینه سازی حرکتی سکوهای نیمه شناور شود. ترکیب مهارها منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد و استحکام این سکوها می شود.

در پژوهشهای آتی، می توان به عوامل دیگری مانند امواج و شرایط آب و هوایی بر رفتار سکوهای نیمه شناور با محوریت مهارها بر اساس شرایط بستر دریا، تغییر عمق، شکل ستونها و پانتونها^{۴۲} توجه کرد. همچنین، می توان با بهبود روشهای مدل سازی 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

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

- 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-

<u>0241(2002)128:3(250)</u>

- 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). Threedimensional 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

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

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

 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.oceanong.2010.106730

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.

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. 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. <u>https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00235-4</u>
- 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