تحلیل هیدرودینامیکی و فرکانسی SPM با مهاربندی متقارن به روش عددی در شرایط محیطی خلیج فارس

پرستو زمانی مفرد[۱]، سعید کاظمی[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد/ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه علوم و تحقیقات تهران؛ parastouzamani@gmail.com
[۲] استادیار/ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه علوم و تحقیقات تهران؛ saeid.kazemi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

کلمات کلیدی:
پایانه شناور تک نقطه ای
ترمینال‌های نفتی شناور
خطوط مهار
انسیس آکوا

چکیده

Single Point Mooring ها یا به اختصار SPM، سازه‌های شناوری هستند که عموماً در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار گرفته و وظیفه مهاربندی شناورها و انتقال تولیدات نفتی و گازی را به وسیله خط لوله از ساحل به نفتکش‌ها و از نفتکش‌ها به ساحل را به عهده دارند. یکی از مهم‌ترین اجزای آن سیستم مهاربندی می‌باشد که علاوه بر لزوم تحمل بارهای محیطی وارد بر ترمینال شناور باید بارهای وارده بر تانکر که توسط دو طناب قطور به SPM متصل شده است را نیز تحمل کند. از آنجاییکه سیستم مهاربندی مناسب نقش مؤثری در افزایش کارایی SPM در شرایط محیطی متفاوت و طول عمر آن را دارد، باید مورد توجه بسیار قرار گیرد. در این مقاله، SPM چهار مهاره در نرم افزار انسیس اکوا مدل‌سازی شده و نیروهای وارد بر SPM توسط تئوری تفرق و به روش المان مرزی و خطوط مهار آن با استفاده از معادلات موریسون محاسبه شده است.

Hydrodynamic Frequency Analysis of a Uniformly Moored SPM in Persian Gulf Environment Using Numerical Method

Parastoo Zamani Mofrad[1], Saeid Kazemi[2*]

[1] MSc Student, Faculty of engineering, Faculty of engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran; parastouzamani@gmail.com
[2] Assistant Professor, Faculty of engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran; saeid.kazemi@srbiau

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 3 Nov. 2018
Accepted: 25 Jun. 2019

Keywords:
Single Point Mooring
Oil Floating Terminal
hydrodynamic Analysis
ANSYS AQWA

ABSTRACT

Single Point Mooring (SPM) are floating Structures that are deployed in deep water which their duties are vessel mooring and transferring oil and gas productions by pipelines from shore to petroleum tankers and conversely. One of the most important components of SPM is mooring system. Which bears not only environmental loads but also petroleum tanker loads which conducted by two thick ropes. Mooring system of SPM regarding the important responsibility it has, has been pay attention to a lot. Proper mooring system leads to efficiency improvement in different environmental conditions and mooring system life increase.
In this research SPM with four mooring lines are simulated by ANSYS AQWA Software and forces on the SPM calculated diffraction theorem and Boundary Element and mooring lines are calculated by Morrison theorem.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

۱- مقدمه

سازه های دریایی شناور به عنوان مهمترین نوع سازه های مورد استفاده در آبهای عمیق، دارای اهمیت خاصی می‌باشند. این نوع سازه ها به وسیله انواع مهاربندی‌ها موقعیت خود را حفظ می‌کنند. از همین رو طراحی سیستم مهاربندی مناسب و الگوی چیدمان مناسب برای آن از مهمترین قسمت‌های طراحی یک پایانه نفتی شناور می‌باشد.

هرگاه عمق آب در کنار اسکله برای پهلوگیری تانکرها کافی نباشد، از پایانه‌های نفتی شناور برای انتقال نفت از ساحل به تانکر استفاده می‌شود. این ترمینال‌ها به صورت استوانه‌های قطوری هستند که با استفاده از تجهیزات لوله کشی، نفت را از خط لوله دریایی دریافت کرده و با استفاده از دو خط لوله منعطف به تانکر انتقال می‌دهند. در واقع این سازه های شناور وظیفه مهاربندی و بارگیری انواع مواد مایع نفتی و گازی را به شناورها دارند.

در آبهای عمیق پایانه های نفتی شناور با توجه به ماهیت شناور بودن، در معرض بارهای دینامیکی خارجی ناشی از جریان، باد و مخصوصاً امواج می‌باشند، از این رو بررسی برآیند نیروها و به دست آوردن تنش‌های وارده به مهاربندی‌ها و طراحی یک سیستم مهاربندی مناسب بر مبنای آن همواره مورد بحث و بررسی بوده است. سیستم‌های مهار به سه دسته مهارهای کتنری، مهارهای نیمه کشیده و مهارهای کشیده تقسیم می‌شوند. در آبهای عمیق با توجه به اینکه وزن زنجیر معلق افزایش می‌یابد، از مهارهایی متشکل از زنجیر و کابل فلزی یا زنجیر و طناب‌های فایبری استفاده می‌شود.

۱-۲- انتقال میعانات گازی و نفت خام

به طور کلی دو روش برای انتقال میعانات گازی یا نفت خام در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱-۲-۱- انتقال از طریق On Shore

در این روش کشتی‌ها و نفتکش‌ها جهت بارگیری در اسکله‌های دریایی نزدیک خشکی پهلوگیری کرده و عمل انتقال انجام می‌پذیرد.

این روش معمولاً زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که امکان پهلوگیری برای کشتی‌ها با توجه به انواع کشتی‌ها، نفتکش‌ها و شرایط ساحل امکان‌پذیر باشد.

۱-۲-۲- انتقال از طریق Near shore

در این روش از ترمینال‌های شناور دریایی برای انتقال استفاده می‌گردد. این روش معمولاً به یکی از دلایل زیر جایگزین روش اول می‌گردد:

۱-۲-۲-۱- نوع کشتی‌ها

در شرایطی که نوع کشتی‌ها و نفتکش‌ها جهت بارگیری از انواع خاص VLCC[1] یا ULCC[2] باشد، در این حالت این کشتی‌ها به فضایی در حدود حداقل ۳۰۰ متر جهت مانور و عمق زیاد آب جهت بارگیری نیازمند بوده که معمولاً چنین فضایی در اسکله‌های دریایی فراهم نمی‌باشد و در صورت فراهم بودن مقدمات ورود و پهلوگیری این کشتی‌ها به این محیط حساس و زمانبر است.

۱-۲-۲-۲- بار ترافیکی بالا در محل بارگیری

درصورتی‌که در محل بارگیری ترافیک کشتی‌ها و نفتکش‌ها بالا باشد و زمان در محل انتقال حائز اهمیت گردد، از این ترمینال‌ها استفاده می‌شود زیرا زمان پهلوگیری کشتی، بارگیری، جدا شدن و حرکت از ترمینال نسبت به روش اول بسیار کوتاه‌تر خواهد شد.

۱-۲-۲-۳- تجهیزات تولید در بستر دریا

در مواردی که امکانات و تجهیزات تولید محصولات در عمق دریا واقع شده باشند، ترمینال‌های شناور دریایی بهترین روش انتقال هستند. در این نوع پایانه ها دیگر نیازی به نصب خط لوله از میدان تا خشکی و همچنین ساخت اسکله جهت بارگیری در خشکی نیست.

۱-۲-۲-۴- جهت بارگیری

نزدیک شدن و بارگیری در این پایانه‌ها از هر جهت امکان‌پذیر می‌باشد ولی در حالت اول تنها از طریق پهلوگیری امکان‌پذیر است. لذا سرعت عملیات بارگیری یا تخلیه به صورت قابل ملاحظه ای بیشتر خواهد بود.

۱-۲-۲-۵- پدافند غیر عامل

بنا بر مسائل امنیتی و حفظ حریم بنادر، علی الخصوص بنادر استراتژیک ایران مانند خارگ، عسلویه و بندرعباس، به حداقل رساندن ریسک بارگیری محموله های نفتی و احتمال هرگونه خرابکاری شامل انفجار کشتی، اخلال در نظم بارگیری، اخلال در ورود و خروج کشتی‌های نظامی و تجاری دیگر در بندر که می‌تواند عواقب شدیدی را برای امنیت اقتصادی کشور به همراه داشته باشد، می‌توان از پایانه های نفتی شناور (SPM) استفاده نمود. به عنوان مثال انفجار به عمد یک کشتی نفتی در سال جاری در یکی از بنادر کشورهای حاشیه خلیج فارس باعث آتش سوزی گسترده، خسارت مالی و جانی و همچنین تبعات اقتصادی و امنیتی بسیار برای آن کشور مذکور گردید.

مسائل متعددی در طراحی یک سیستم مهاربندی کتنری مطرح است که شامل دینامیک سیستم مهار، خستگی خط مهار، سختی ناشی از سیستم مهار و غیره می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

پایانه‌های شناور دریایی که معمولاً از نوع SPM هستند، با توجه به کوتاه بودن زمان ساخت، عملیات آسان، قابلیت تعمیر و نگهداری راحت، دامنه وسیع عملکرد در بنادر و سواحل مختلف و قابلیت پهلودهی تانکرهایی با ظرفیت بالا یا سوپر تانکرها، بسیار مورد توجه واقع شده اند.

همچنین ترمینال‌های SPM قابلیت انتقال به مناطق عملیاتی را دارا بوده که این خود امتیاز بسیار مهم و حائز اهمیتی می‌باشد.

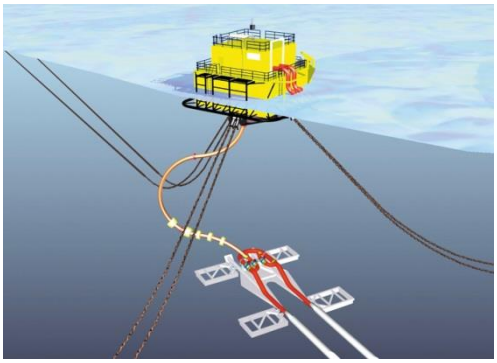
در مناطقی که ساخت اسکله‌های بارگیری نفت و گاز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده یا از نظر عملیات اجرایی مشکلاتی وجود داشته باشد می‌توان از پایانه‌های نفتی شناور به کمک مهار تک نقطه ای استفاده نمود.

SPM در حقیقت به معنای تأسیسات یک پایانه نفتی تک نقطه ای است که بدون نیاز به امکانات خارجی می‌باشد. این تأسیسات امکانات لازم برای مهار و جابه‌جایی بار از شناورهای نفتکش بسیار بزرگ یا از سازه‌های دریایی شناور را فراهم می‌سازد.

شکل ۱- پایانه نفتی شناور

فناوری‌های ساخت و اجرای این سازه پیشرفته شناور برای صنعت نفت ایران از نظر کاربردی بسیار ضرورت دارد. همچنین تحلیل سازه‌ای و بررسی هیدرودینامیکی آن از مسائل مهم برای دستیابی به تکنولوژی خاص این سازه می‌باشد.

در گذشته تحقیقات زیادی بر روی مهاربندها انجام شده که از آن جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود. فالتینسن [۱] به معرفی معادلات حاکم بر مهار کتنری یکپارچه و استخراج روابط استاتیکی مربوط به آنها پرداخته و روابط سختی این مهارها در برخی جهات حرکت را ارائه کرده است. جین [۲] در سال ۱۹۸۰روشی برای محاسبه سختی مهارهای کتنری ارائه داد. راسل و کولین [۳] در سال ۲۰۰۱ به بررسی معادلات حاکم بر یک خط مهار شامل دو کابل با جنس‌های متفاوت و یک بویه که این دو کابل را به یکدیگر متصل کرده و تأمین بویانسی می‌کند، پرداخته و روابط استاتیکی مربوط به آنها را استخراج کرده است. مظاهری و اینچپیک [۴] در سال ۲۰۰۴ از روش پاسخ محور برای پیش‌بینی نیروی مهاربند استفاده کردند. پیتر دیویس و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۸ تأثیر سختی الیاف در تعیین پاسخ‌های خطوط مهاربند در آبهای عمیق را مورد بررسی قرار دادند. استانسبرگ [۶] در سال ۲۰۰۸ تأثیر جریان به تنهایی و تأثیر جریان توأم با امواج را بر یک سازه شناور مهار شده در شرایط مختلف دریا بررسی نمودند. اولاف والس [۷] در سال ۲۰۰۹ تأثیر جهت امواج بر حرکتهای با فرکانس پایین سازه شناور و همچنین نیروهای مهاربندها را مورد بررسی قرار داد. تام لاسن و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ رفتار اجزای یک زنجیر مهاربند را هم در آزمایشگاه و هم با مدل عددی تحت تأثیر پیش تنیدگی و دوران خارج از صفحه مورد بررسی قرار دادند. ژانگ سو و همکاران[۹] در سال ۲۰۰۹ مشکلات ناشی از شل شدن خطوط مهاربندی به دلیل کاهش کشش را مورد مطالعه قرار دادند. هانگ ژو و جینپینگ او [۱۰] نیز در سال ۲۰۱۱ رفتار هیدرودینامیکی یک سکوی نیمه شناور را در مواجه با امواج دریا و باد مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به بررسی و تحلیل هیدرودینامیکی سکوی SPM به روش عددی تحت اثر امواج نامنظم در منطقه خلیج فارس خواهیم پرداخت. برای تحلیل هیدرودینامیکی خطوط مهار، اولین قدم محاسبه بارهای محیطی وارد بر سکو می باشد. یکی از رایج ترین روش ها برای محاسبه این نیروها استفاده از روشهای عددی و حل مسئله با استفاده از نرم‌افزارهای هیدرودینامیک سیالات محاسباتی می باشد. در تحلیل حاضر باد، جریان و نیروی رانش موج به عنوان نیروهای عمل کننده بر پایانه نفتی شناور در نظر گرفته می‌شوند. سخت ترین شرایط هنگامی است که تمامی این نیروها در یک جهت و در راستای یک خط مهار به پایانه اعمال شوند. بنابراین این وضعیت مبنای تحلیل حاضر خواهد بود.



شکل ۲- ترمینال شناور دریایی

۲- تئوری تحلیل

۲-۱- نیروی امواج

امواج دریایی که دارای ماهیتی اتفاقی بوده و به صورت تناوبی و تکرارپذیر هستند، باعث ایجاد نیروهای بزرگی بر سازه های دریایی می‌شوند. اتفاقی بودن و جهت‌های مختلف و انرژی‌های متفاوت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

امواج همگی سبب می‌شود تا برای پیشبینی اثرات آن بر روی سازه پیچیدگی های زیادی وجود داشته باشد. همین امر و نیز تنوع ابعاد سازه های دریایی سبب شده است تا تئوری های مختلفی برای محاسبه نیروهای حاصل از امواج ارائه شود.

امروزه تئوری‌هایی در دسترس هستند که با استفاده از آنها در کنار نرم افزارهای موجود می‌توان بارگذاری امواج روی سازه های دریایی مختلف را با دقت قابل قبولی تعیین نمود.

۲-۱-۱- معادله موریسون[۳]

جهت بیان نیروی افقی وارد بر طول پایه قائم استوانه ای ناشی از امواج معمولی، موریسون در سال ۱۹۵۰ میلادی رابطه زیر را پیشنهاد نمود[۱۱]:

$$F = C_m \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u} + C_d \frac{1}{2} \rho D_u |u| \qquad (۱)$$

در معادله فوق F بردار نیرو در واحد طول، ρ چگالی سیال، D قطر سازه، u سرعت سیال، $\dot{u}$ شتاب سیال C_d و به C_m ترتیب ضریب درگ و ضریب اینرسی هستند.

۲-۱-۲- تئوری تفرق[۴]

یکی از موارد محدودیت در رابطه موریسون، نسبت قطر پایه به طول موج است. در این حالت می‌توان از تأثیر قطر سازه بر میدان جابجایی صرف نظر نمود. در غیر این صورت باید تغییر شکل موج منظور شود. وقتی که قطر پایه به طول موج وارده قابل مقایسه باشد، باید تأثیر پایه بر میدان جابجایی سیال را در نظر گرفت. در این حالت نیروی درگ از نیروی اینرسی بسیار کمتر بوده و حتی قابل صرف نظر کردن است. مک کمی، فوکس، موگریج و جیمسون با فرض تئوری موج دامنه کوتاه و المان صلب این مسئله را بررسی نموده اند. این تئوری به نام تئوری تفرق نامیده می‌شود. نتایج نشان می دهد که وجود المان قطور باعث تغییر ضریب اینرسی در معادله موریسون و ایجاد زاویه عقب افتادگی می‌شود. نیروی وارد بر واحد طول پایه در مرکز المان برابر است با [۱۱]:

(۲)

$$F = -\rho C_1 \frac{\pi}{4} D^2 W^2 + \frac{H}{2} \frac{\cos h\ (ky)}{\cos(kh)} \sin(\omega t - \varepsilon)$$

که در این رابطه ε زاویه عقب افتادگی بوده و y از کف دریا اندازه گیری می شود.

از آنجا که در آبهای عمیق از سازه های شناور استفاده می‌شود، تئوری تفرق- انتشار برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی امواج به کار می‌رود البته با توجه به اینکه سازه ها دارای اعضای لاغر (خطوط مهار) نیز هستند از معادله موریسون در تحلیل این اعضای لاغر استفاده می‌گردد. در این تحقیق SPM چهار مهاره در نرم افزار انسیس آکوا مدلسازی شده است.

۳- مدلسازی

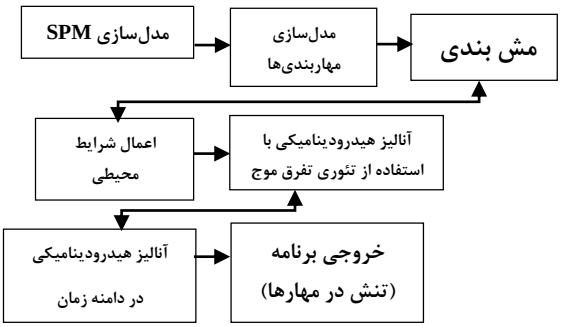
پروژه‌های امروزی نیازمند طراحی و تحلیل مؤثر سازه در فازهای هزینه و زمان هستند. با توجه به جامعیت و مقبولیت نرم افزار مهندسی انسیس آکوا در بین جوامع علمی و نتایج معتبر آن در بحث تحلیل‌های دریایی؛ در تحقیق حاضر نیز از این نرم افزار استفاده گردیده است. گسترده بودن قابلیت‌های مدلسازی و تحلیل در نرم‌افزار مورد استفاده، باعث کاهش هزینه‌های کلی پروژه و صرفه‌جویی در زمان می‌گردد.

مدلسازی پایانه شناور نفتی در سه مرحله صورت می‌پذیرد:

۱- ترسیم مدل در قسمت Geometry

۲- اعمال شرایط هیدرودینامیکی به محیط و سازه و انجام تحلیل هیدرودینامیکی در قسمت Hydrodynamic Diffraction

۳- اعمال شرایط محیطی به سازه و بررسی خروجی تنش‌ها و جابه جایی ها در قسمت Hydrodynamic Response



شکل ۳ - فلوچارت مدل سازی در نرم افزار انسیس آکوا

از نکات اساسی که در شبیه‌سازی‌های عددی بایستی مد نظر قرار گیرد، اعمال شرایط مرزی است. با توجه به اینکه نرم‌افزار انسیس آکوا برای شبیه‌سازی شناور در دریا به کار می‌رود، بسیاری از شرایط مرزی به صورت اتوماتیک توسط نرم‌افزار بر مدل اعمال می‌گردد. از جمله شرایط مرزی که به صورت اتوماتیک به سازه اعمال می‌شود عبارتند از: شرط مرزی دینامیکی و سینماتیکی سطح، شرط بستر دریا و شرط مرزی جسم نوسان کننده. مهم‌ترین شرط مرزی که برای استفاده از این نرم‌افزار باید رعایت گردد مشخص کردن سطحی از جسم شناور است که در زیر سطح آب قرار می‌گیرد. برای مدلسازی سازه‌های شناور دو نوع مش تعریف می‌گردد. اگر قسمتی از سازه زیر سطح آب باشد المان تفرق تعریف می‌شود و اگر بالای سطح آب باشد، المان مربعی تعریف می‌گردد که المان‌های تعریف شده در بالای سطح آب در عملکرد ترمینال

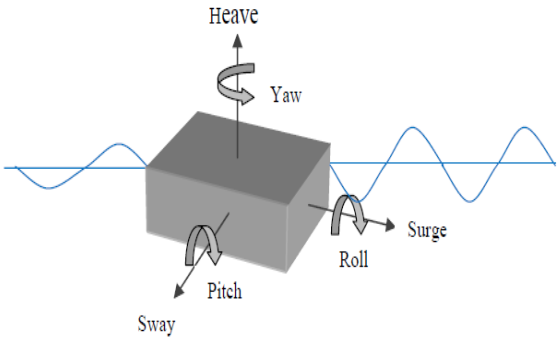
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

شناور تأثیر چندانی ندارند. ماکزیمم اندازه المان‌های مورد استفاده با توجه به ماکزیمم فرکانس موج برخوردی به سازه تعریف می‌شود.

۳-۱- حرکات SPM

سازه SPM در هنگام مقابله با موج، حرکات پیچیده شش درجه آزادی از خود نشان می‌دهد که این حرکات شامل، حرکات افقی در طول محور z بدنه (هیو)، حرکات افقی در طول محور y بدنه (سوی)، حرکات افقی در طول محور x بدنه (سرج)، چرخش بدنه حول محور z (یا)، چرخش بدنه حول محور y (پیچ) و چرخش بدنه حول محور x (رول) می‌باشند.

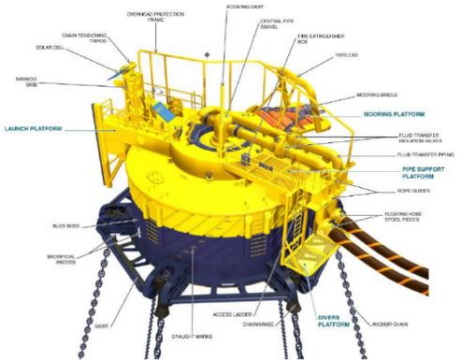


شکل ۴ – حرکات SPM

اولین گام، جداسازی یا قطعه بندی محیط پیوسته موردنظر است. این گام شامل تقسیم‌بندی محیط به زیرمحیط‌هایی است که اجزاء محدود گفته می‌شوند و همچنین انتخاب نقاطی به نام گره است. نقاط گره ای روی مرز المان‌های داخل آنها قرار دارد. تغییر مکان‌ها و نیروها در گره‌ها به صورت متغیرهای جدا از هم به دست می آید. تغییر مکان و سایر کمیت‌های وابسته در یک نقطه المان با استفاده از توابع درون‌یابی و متغیرهای گره‌ای مربوط می‌شوند. همانطور که گفته شد Single Point Mooring یا به اختصار SPM، سازه‌های شناوری هستند که عموماً در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار گرفته و وظیفه مهاربندی شناورها و انتقال تولیدات نفتی و گازی را به وسیله خطوط لوله از ساحل به نفتکش‌ها به عهده دارند. مهاربندی SPM با توجه وظیفه مهمی که این نوع سازه‌های شناور دارند، می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

۳-۲- مشخصات سازه و محیط مورد مطالعه

سازه مورد مطالعه، از نوع پایانه شناور نفتی CALM Buoy و فقط ابعاد آن برگرفته شده از یکی از نمونه های این نوع پایانه ها در خلیج فارس می‌باشد که جرم آن در حدود ۲۹۰ تن، قطر آن ۱۲/۵متر و ارتفاع آن ۵/۳ متر می‌باشد. در این تحقیق ابعاد سازه مورد بررسی به جهت مقیاس درست از روی پایانه فوق الگوبرداری شده است و لذا نتایج خروجی الزاماً با نمونه ذکر شده همخوانی نخواهد داشت.



شکل ۵ – SPM مورد مطالعه

شکل ۶– موقعیت SPM فرضی

۳-۲-۱- ورودی نرم افزار

مشخصات SPM فرض شده در جدول زیر آمده است:

جدول۱- مشخصات SPM

قطر	۱۲/۵
عمق	۵/۳
قطر پایه	۱۶/۶۳
ارتفاع پایه	۱/۰
قطر مون پول	۳/۵۷
درفت زیر آب	۱/۹۹۳
درفت بالای آب	۳/۳۰۷
درفت طراحی شده	۳/۲۶۶
درفت آزاد نصب شده	۲/۰۳۴
وزن SPM	۱۹۶/۲۶
وزن صفحه دوار	۹۳/۷۲
وزن کلی SPM	۲۸۹/۹۸

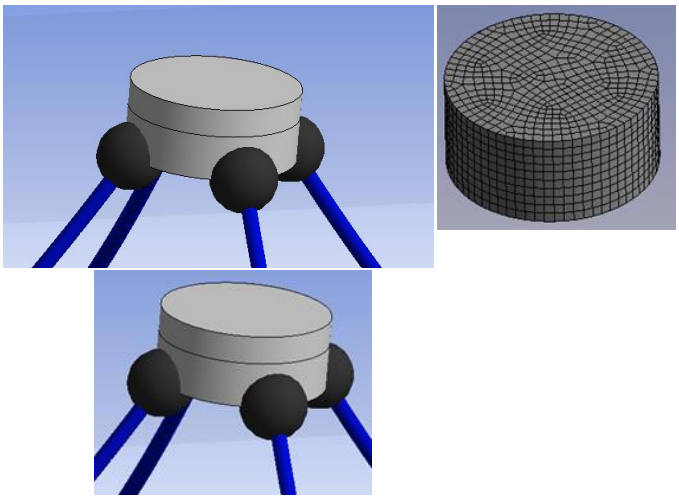
۳-۲-۲- اطلاعات محیطی

با استفاده از تئوری موج جان سوآپ[۵] که بر اساس امواج غیرخطی و نامنظم[۶] استوار است، رفتار هیدرودینامیکی سازه SPM تحلیل خواهد شد. لازم به ذکر است که متوسط سرعت جریان ۰/۸ متر بر ثانیه می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

از برخورد جریان باد به سازه به دلیل مقدار کم سطح تماس سازه و چگالی کم آن نسبت به هوا می‌توان صرف‌نظر کرد. ضریب درگ و ضریب جرم افزوده برابر ۱ درنظر گرفته شده است. چگالی سیال برابر با ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب اعمال گردیده است.



شکل ۷ – تقسیم بندی محیط زیر آب و بالای آب و تعریف گره ها

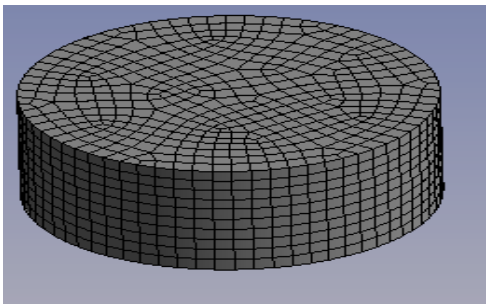
جدول ۲– اطلاعات محیطی SPM

دوره بازگشت					
ردیف		۱ ساله	۱۰ ساله	۱۰۰ ساله	توضیحات
H_{max}(m)	Wave	۴/۷	۷/۵	۶/۹	از W به NW
TH_{max} (s)		۷/۵	۸/۰	۸/۵	
H_s (m)		۲/۶	۳/۲	۳/۹	
T_p (s)		۷/۵	۸/۰	۸/۵	
باد پایدار در ارتفاع ۱۰ متری V_{1hr} (m/s)		۲۲	۲۵	۲۶	از W به NW
گردباد در ارتفاع ۱۰ متری V_{10mn} (m/s)		۲۴	۲۷	۲۸	
V_{1mn}(m/s)		۲۶	۳۰	۳۲	
V_{3s}(m/s)		۳۰	۳۴	۳۶	
جریان $U_{surface}$ (m/s)		۰/۷	۰/۸	۰/۸	به SE

خصوصیات	مقدار
چگالی در محدوده بویه	۱۰۲۳ kg × m^{-3} تا ۱۰۲۹
مقاومت الکتریکی آب	۰/۱۹ Ohm × m
ویسکوزیته دینامیکی	۱/۰۵ cp
شوری آب	۳۸ psu تا ۴۰
ویسکوزیته سینماتیکی	۱/۲m^2 × S^{-1}

۴- نحوه مش‌بندی

در تحقیق حاضر با توجه به فرکانس‌های موجود در امواج محیط، شرایط مش‌بندی مشخص می‌گردد. تصویر زیر نحوه مش بندی سطح سازه را در نرم افزار انسیس آکوا نشان می‌دهد.



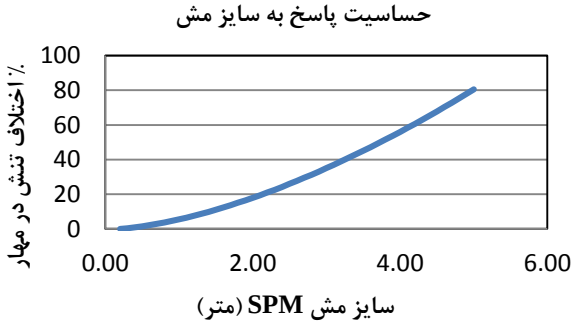
شکل ۸- نحوه مش بندی سطح سازه در نرم افزار انسیس آکوا

بدین منظور با تحلیل حساسیت پاسخ به سایز مش مقدار مناسب سایز مش به اندازه حداکثر ۲ متر با خطایی کمتر از۱۵٪ در پاسخ آن انتخاب گردید. برای کمترین مقدار مش نیز با توجه به بازه فرکانس های موجود در طیف امواج جان سوآپ مقدار ۰/۵ متر درنظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به نحوه مش‌بندی، تعداد نودها و المان‌ها در جدول زیر مشاهده می‌شود.

جدول ۳– اطلاعات مربوط به نحوه مش بندی

پارامترهای مش	
بازه شکست مش	۰/۵
بیشترین سایز المان	۲
بیشترین فرکانس مجاز	۰/۳۷۱
نوع مش	مش ترکیبی
اطلاعات مش ایجاد شده	
تعداد گره‌ها	۳۷۷
تعداد المان‌ها	۳۷۷
تعداد گره‌های پراکندگی	۲۱۰
تعداد المان‌های پراکندگی	۱۹۳



شکل ۹ – حساسیت پاسخ به سایز مش

۵- مهاربندی

سیستم مهاربندی قادر به کنترل و کاهش پاسخ‌های محوری یک پایانه شناور می باشد و تأثیر قابل توجهی در کنترل دوران‌های حول محوری آن ندارند. در واقع

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

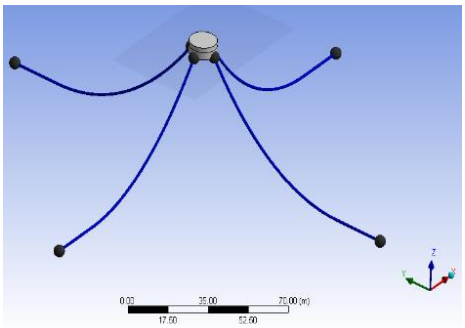
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

عامل اصلی و تعیین کننده در کاهش این نوع پاسخ‌ها ابعاد و شکل پایانه شناور می باشد. بدین منظور علاوه بر میزان اهمیت نحوه مهاربندی، باید با بهینه‌سازی شکل ظاهری نیز در کاهش پاسخ‌های هیدرودینامیکی اقدام نمود. همانطور که گفته شد مهاربندی SPM با توجه به وظیفه مهمی که این سازه شناور به عهده دارد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مهاربندی مناسب منجر به افزایش کارآیی و طول عمر می‌شود. انتخاب تعداد و شکل مهار بستگی به شرایط محیطی و محدودیت حرکت SPM دارد. جنس این مهارها اغلب از زنجیرهای فولادی، کابل‌های نایلونی - فولادی و پلی استر است و معمولاً در مهاربندی به روش کشیده از کابل‌ها استفاده می‌شود.

در این پژوهش از سیستم مهاربندی متقارن چهار نقطه ای برای سازه SPM در نرم افزار انسیس آکوا استفاده شده است و مهارها با فواصل ۹۰ درجه ای نصب گردیده اند. این نوع مهاربندی متقارن باعث می‌گردد تغییر جهت نیروهای محیطی تأثیر چندانی در پاسخ پایانه شناور استوانه ای نداشته باشد.

در تحلیل هیدرودینامیکی به وسیله این نرم افزار معمولاً نیروهای موج و جریان بر روی کابل‌ها و مهاربندی‌ها درنظر گرفته نمی‌شود و نیروهای به‌وجود آمده در کابل‌ها حاصل مهار حرکت جسم در برابر امواج و جریان‌های دریایی هستند.

شکل زیر نحوه مهاربندی چهار نقطه ای سازه مورد مطالعه را در نرم افزار انسیس آکوا نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ – سیستم مهار بندی چهار نقطه ای برای SPM

مهارهای استفاده شده در این تحلیل از نوع کتنری زنجیری با طول ۱۱۰ متر بوده و خصوصیات مربوط به سطح مقطع آنها در جدول زیر قابل مشاهده است.

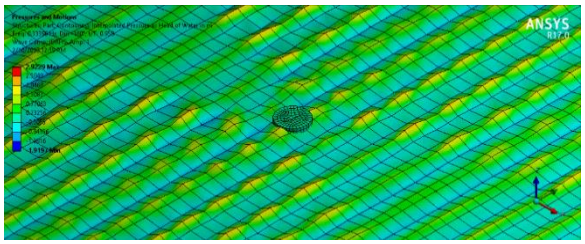
جدول۴ – مشخصات سطح مقطع SPM

جزئیات سطح مقطع مهار ۱	
اسم	سطح مقطع ۱
مشخصات سطح مقطع	
وزن بر واحد طول	۱۵۰ کیلوگرم بر متر
سطح مقطع معادل مهار	۰/۰۱ متر مربع
سختی	۶۰۰۰۰۰۰۰ نیوتن
تنش ماکزیمم	۷۵۰۰۰۰۰ نیوتن
سختی خمشی	۰/۰ نیوتن متر مربع
مشخصات هیدرودینامیکی سطح مقطع	
وزن اضافی	۱
درگ عرضی	۱
قطر معادل مهار	۰/۰۱ متر
درگ طولی	۰/۰۲۵

۶- تحلیل هیدرودینامیکی

در نرم افزار انسیس آکوا تحلیل هیدرودینامیکی در دو مرحله اصلی صورت می‌گیرد:

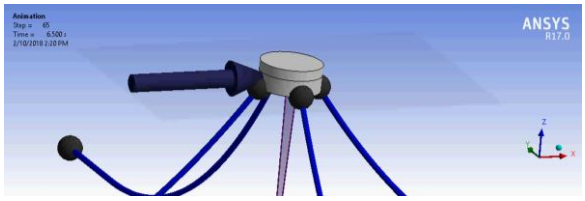
۱- تحلیل هیدرودینامیکی در دامنه فرکانس با استفاده از تئوری‌های تفرق و موریسون برای محاسبه مقدار نیروی وارده به SPM و حرکات آن.



شکل ۱۱ – تحلیل در دامنه فرکانس

۲- تحلیل هیدرودینامیکی در دامنه زمان برای محاسبه مقدار نیروی وارده در مهارها در بازه زمانی مشخص.

تصویر زیر تحلیل در بازه زمانی در نرم‌افزار انسیس اکوا را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ – تحلیل در دامنه زمان

در این نرم افزار هر دو مرحله تحلیل به یکدیگر مرتبط بوده و نمی‌توان بدون انجام یکی از آنها، تحلیل را با نتایج مورد نظر به اتمام رسانید.

۶-۱- صحت سنجی نرم افزار انسیس آکوا

منظور از صحت سنجی یک نرم افزار، مقایسه بین پاسخ به دست آمده از نرم افزار و پاسخ به دست آمده در واقعیت برای مدل مورد

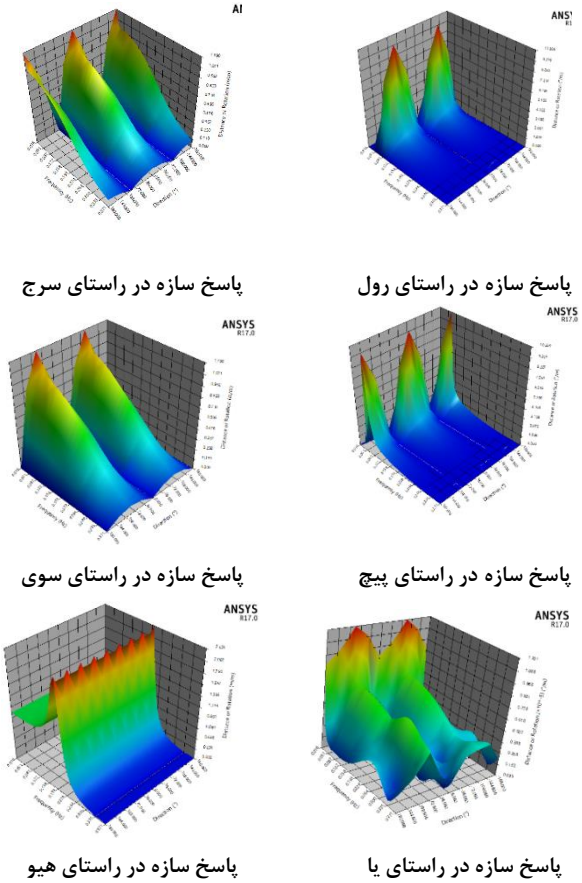
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

مطالعه می‌باشد. به بیان دیگر در این مرحله، صحت مدلسازی انجام شده توسط کاربر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور صحت‌سنجی مدلسازی انجام شده در نرم افزار انسیس آکوا، ابتدا مدل سازه SPM با ابعاد مشابه با نمونه انجام گرفته در تحقیقات پیشین، مدلسازی و نتایج آن مقایسه شد. برای این منظور از مقاله تحلیل خستگی مهاربندی سازه SPM با توجه به طول خطوط مهار و جهت برخورد امواج نوشته آقایان مهرداد یزدان دوست و روزبه پناهی استفاده شده است [۱۱]

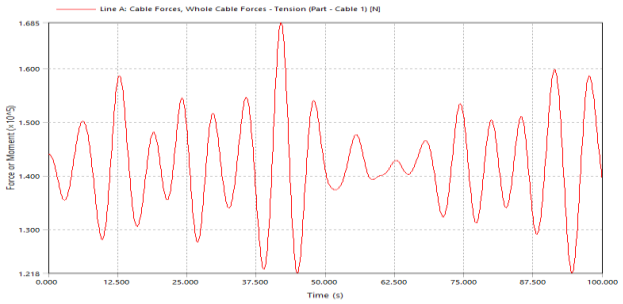
شایان ذکر می‌باشد که پژوهشگران در خصوص صحت‌سنجی مقاله مذکور مدل آزمایشگاهی سازه را با استفاده از تست‌هایی مانند decay test و UOU test و همچنین کدهایی مانند UOU fast انجام داده اند. در سال ۲۰۱۳ یک صحت‌سنجی برای نرم افزار انسیس آکوا در همین راستا انجام شده که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. شکل زیر نشان می‌دهد که نرم افزار دارای پاسخ های مناسبی بوده و مدلسازی موفقیت آمیز می‌باشد. در شکل ذیل، تصاویر سمت راست مربوط به خروجی‌های مدل ایجاد شده می‌باشد که همخوانی مناسبی دارد. پس از به‌دست آمدن پاسخ‌های سازه و مشخص شدن رفتار آن تحت فرکانس‌ها و جهت‌های مختلف، سازه در شرایط محیطی واقعی با مهاربندی مدلسازی شده است.



شکل۱۵ - رفتار سازه در مقابل امواج با فرکانس‌های مختلف با ارتفاع یک متر

با توجه به رفتار سازه، فرکانس‌های طبیعی برای یک SPM استوانه ای شکل با شرایط مدل شده در راستای رول، پیچ، سرج و سوی بزرگ بوده و در مورد راستای هیو و یا این فرکانس کوچکتر می باشد. این نتایج گویای آن است که تأثیرگذارترین عامل حرکتی در عملیات یک پایانه شناور SPM حرکت هیو آن است و در تقابل با امواج ۱۰۰ ساله با حدود فرکانس امواج ۰,۱۹۳. هرتز دچار تشدید می‌گردد.

بررسی تنش در مهار شماره ۱: همانگونه که مشاهده می‌شود مقدار تنش ماکزیمم در مدت آنالیز که ۱۰۰ ثانیه بوده است کمتر از ماکزیمم تنش مجاز برای مهار در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۶- تنش در مهار شماره ۱

همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است هر چه زاویه موج برخوردی به زاویه یکی از خطوط مهار نزدیکتر باشد، تنش در آن خط مهار از خطوط مهار دیگر بیشتر خواهد بود.

با توجه به هزینه های نصب و نگهداری و هزینه های خود این مهارها آنالیزهای اقتصادی از دیگر مواردی است که حتماً باید در تعیین طول خطوط مهار در کنار دیگر آنالیزها صورت گیرد تا بهینه ترین طول خط مهار از لحاظ خستگی و بهره برداری از سازه شناور و اقتصادی بودن مورد تأیید باشد.

۸- نتیجه گیری

در نتایج به دست آمده از مدلسازی SPM مفروض در شرایط محیطی خلیج فارس با استفاده از نرم افزار انسیس آکوا، مقدار بیشینه تنش در مهارها اندازه گیری و با مقدار بیشینه مجاز و طراحی شده آن مقایسه گردید. تنش این مهارها کمتر از مقدار بیشینه مجاز هستند. علاوه بر این رفتار سازه مذکور در فرکانس-های مختلف بررسی و تحلیل گردید و برآیند نیروهای وارد بر آن استخراج شد.

با توجه به رفتار هیدرودینامیکی یک SPM استوانه ای ، فرکانس‌های طبیعی در راستای رول، پیچ، سرج و سوی بزرگ بوده و در مورد راستای هیو و یا این فرکانس کوچکتر می باشد. این نتیجه گویای آن است که تأثیرگذارترین عامل حرکتی در عملیات یک پایانه شناور SPM حرکت هیو ناشی از امواج برخوردی به آن است و در تقابل با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]

امواج ۱۰۰ ساله با حدود فرکانس امواج ۰/۱۹۳ هرتز دچار تشدید می‌گردد.

برای طراحی سازه SPM، مشخص شدن مشخصات دقیق سازه ای آن از جمله ضخامت ورق‌ها، مقدار مورد نیاز سختی سطحی، نحوه دقیق شبکه بندی داخلی سازه، اطلاع از بازه دقیق نیروهای وارد شده بر آن در داخل دریا از اهمیت بالایی برخوردار است.

جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

با توجه به نیاز روز افزون صنعت نفت ایران به پایانه‌های دریایی شناور، دانش فنی طراحی و ساخت آنها بیشتر از قبل مورد توجه قرار گرفته است و سعی بر آن می‌باشد که بتوان فناوری طراحی و ساخت آنها را به کشور منتقل و بر توان فنی مهندسی در این بخش از صنعت دریایی کشور افزود. از مزایای اقتصادی آن می‌توان به کاهش خروج مقادیر قابل توجهی ارز از کشور اشاره نمود.

علاوه بر شرکت نفت فلات قاره ایران، از متقاضیان احتمالی دیگر ترمینال‌های شناور دریایی می‌توان، سازمان بنادر و دریانوردی، شرکت صنعتی دریایی ایران و سایر شرکت‌های دریایی بخش خصوصی نام برد.

ارزیابی هیدرودینامیکی سازه‌های دریایی ثابت و متحرک، کاربرد بسیاری در طراحی آنها داشته و پیشرفت توان رایانه‌ها، دینامیک سیالات محاسباتی را به عنوان یک ابزار مناسب در این زمینه مطرح نموده است.

نتایج عددی متنوع ارائه شده، بیانگر وسعت کاربرد نرم افزار در حال تهیه و توسعه می‌باشد. بدین ترتیب، امکان بررسی رفتار آنچه در نتیجه این پژوهش روشن شد این است که در طراحی خطوط مهار پایانه های نفتی شناور اهمیت وزن مخصوص مهار در شعاع لنگر اندازی دیده می‌شود و در دیگر موارد تأثیر چشمگیری روی پاسخ استاتیکی مهار ندارد. البته این به معنای بی تأثیر بودن وزن مخصوص نیست و باتوجه به ابعاد کم و محدودیت در دامنه حرکات پایانه‌های نفتی شناور، این مسئله می‌تواند در برخی شرایط مورد توجه جدی قرار گیرد. همچنین دیده شده که توجه به طراحی استاتیکی می‌تواند در انتخاب محدوده امن برای حرکت پایانه های نفتی شناور بسیار مفید و مؤثر باشد

کلید واژگان

1- Very Large Crude Carriers
2- Ultra Large Crude Carriers
3- Morrison theorem
4- Diffraction Theorem
5- JONSWAP (Joint North Sea Wave Project)
6- Nonlinear and Irregular Waves

مراجع

1- Faltinsen, O.M., (1998), *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge University Press, ISBN 0521458706.

2- Jain, R. K., (1980), *A Simple Method of Calculating the Equivalent Stiffnesses in Mooring Cables*, Applied Ocean Research 2.

3- Russell, J.Smith, Cloin, J.MacFarlaine, (2001), *Statics of a three Component Mooring Line*, Ocean Engineering 28.

4- Mazaheri S. & Incesik A., (2004), *Predicting the Maximum Mooring Force of a Moored Floating Offshore Structure*, 23^{rd} International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2004-51245, Vancouver, British Columbia, Canada.

5- Davies P., Baron P., Salomon K., Bideaud C., Labbe J.p., Toumit S., Francois M., Grosjean F., Bunsell T. & Moysan A.G., (2008), *Influence of Fiber Stiffness on Deepwater Mooring Line Response*, 27^{th} International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2008-57147, Estoril, Portugal.

6- Stansberg C.T., (2008), *Current Effects on a Moored Floating Platform in a Sea State*, 27^{th} International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, OMAE 2008-57621, Estoril, Portugal.

7- Waals O.J., (2009), *The Effect of Wave Directionality on Low Frequency motions and mooring Forces*, 28^{th} International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2009-79412, Honolulu, Hawaii, USA.

8- Lassen T., Storvoll E. & Bech A., (2009), *Fatigue Life Prediction Of Mooring Chains Subjected to Tension and Out of Plane Bending*, 28^{th} International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2009-79253, Honolulu, Hawaii, USA.

9- Su-xia Z., You-gang T. & Hai-xiao L., (2009), *Study on Snap Tension in Mooring Lines on Deep Water Platform*, 28^{th} International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2009-79881, Honolulu, Hawaii, USA.

10- Zhu, h. and Ou, Jinping., (2011), *Dynamic Performance of a Semi-Submersible platform subject to wind and waves, Journal of Ocean univ*, China, Vol.10, NO.2, P.127-134.

11- Sabziyan H., Ghassemi H, Azarsina F., & Kazemi S., (2014), *Effect of Mooring Lines pattern in a Semi-Submersible Platform at Surge and Sway Movements*, Journal of Ocean Research, Vol.2, No.1, PP.17-22, Tehran, Iran.

12- Panahi R & Yazdan dust M., (2015), *Fatigue analysis of SPM mooring due to length of mooring line and direction of wave incident*, Tehran, Iran.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7]