بررسی تأثیر جرم‌های معلق خطوط مهار بر حرکات سازه‌های شناور در دریا

لیلا رنجبر نجف آباد[۱]، محمدرضا زارعی[۲*]، ابوذر ابراهیمی[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ms.leili.ranjbar@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، mrzarei@cmu.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، Ab_ebrahimi@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

کلمات کلیدی:
سازه فراساحلی
خط مهار
وزنه معلق
حرکات
کشش مهار

چکیده

خطوط مهار، اجزا اصلی در پایداری سازه‌های شناور در دریا هستند. وزنه‌های معلق و بویه‌های مغروق دو دسته از ادوات هستند که برای افزایش تأثیر خطوط مهار طراحی شده‌اند. در این مقاله تأثیر وزنه‌های معلق بر حرکات یک شناور نیمه مغروق با در نظر گرفتن شرایط محیطی خلیج فارس بررسی شده‌است. بدین منظور، نیروی بازگرداننده خطوط مهار در شرایط آب آرام، حرکات سازه شناور و کشش یکی از خطوط مهار آن در موج نامنظم با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بررسی شده است. نتایج نشان می دهد، افزودن وزنه‌های معلق از سویی سبب کاهش حرکات سازه شناور و از سوی دیگر باعث افزایش کشش خطوط مهار خواهد شد. این دو نتیجه متفاوت، نشان می‌دهد که اضافه‌کردن وزنه‌های معلق به خطوط مهار، نیاز به بررسی و تحقیقات بیشتری دارد.

Investigating the effect of clump weight of mooring lines on the motions of floating structures in the sea

Leila Ranjbar Najaf Abad[1], Mohammad Reza Zareei[2*], Abouzar Ebrahimi[3]

[1] M.Sc graduated student, Marine engineering faculty, Chabahar Maritime University (CMU),
[2] Assistant Professor, Marine engineering faculty, Chabahar Maritime University (CMU), mrzarei@cmu.ac.ir
[3] Assistant Professor, Marine engineering faculty, Chabahar Maritime University (CMU),

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 20 Jan 2023
Accepted: 04 Dec 2024
Available online: 07 Dec 2024

Keywords:
Offshore structures
Mooring lines
Clump weight
Motions
Mooring tension

ABSTRACT

Mooring lines are the main components in the stability of floating structures in the sea. Clump weights and submerged buoys are two types of devices designed to increase the effectiveness of mooring lines. In this article, the effect of clump weights on the motions of a semi-submersible offshore structure has been investigated considering the environmental conditions of the Persian Gulf. For this purpose, the restoring force of the mooring line in calm water conditions, the motions of the floating structure and the top tension of one of its mooring lines in an irregular wave with a return period of 100 years have been investigated. In general, adding clump weights will reduce the movements of the floating structure and increase the tension of the moorings. These two different effects show that the addition of clump weights needs further investigation.

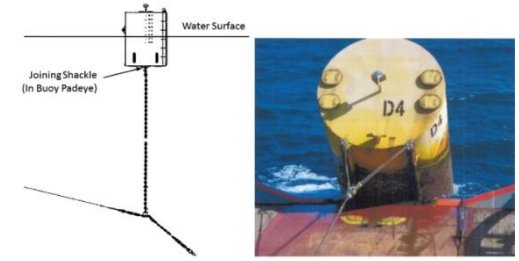
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

۱ - مقدمه

در اجرای خطوط مهار برای سازه‌های دریایی شناور، معمولاً از خطوط مهار زنجیری یا کابلی استفاده می‌شود. این خطوط مهار وظیفه تامین پایداری و نیز کنترل حرکات سازه های شناور را بر عهده دارند. در طول یک خط مهار ممکن است از زنجیر و کابل به‌تنهایی یا بصورت ترکیبی استفاده شود. در محیط متغیر دریا، نیروهای اعمال شده از طرف محیط شامل موج، جریان دریایی و باد سبب می‌شود تا سازه شناور به‌طور مداوم در حال حرکت باشد. در صورتی که این حرکت مداوم از حدی بیشتر شود، ممکن است سبب مختل شدن عملکرد صحیح سازه دریایی شناور شود. این مشکل در سازه‌های شناور مختلف نظیر ترمینال‌های نفتی، مبدل‌های انرژی شناور و سکوهای شناور [۱] قابل وقوع است. به‌عنوان مثال، حرکات دورانی زیاد در یک توربین بادی شناور سبب می‌شود تا محور پره های توربین بادی بیش از اندازه از راستای بهینه و مناسب با جریان باد مجاز خارج شده و در نتیجه راندمان توربین بادی به میزان قابل‌توجهی افت کند. برای کنترل حرکات سازه‌های شناور روش های مختلفی پیشنهاد شده‌است. اضافه کردن ورق هیو یک راه حل است [۲-۴] همچنین مبدل‌های انرژی [۵] ابزاری برای دریافت انرژی امواج است که ترکیب آنها با سازه‌های شناور راه دیگری برای میرا کردن و کاهش پاسخ سازه است [۶, ۷]. اما یکی از روش‌های مهم، اضافه کردن متعلقات شامل وزنه معلق و بویه مغروق به خط مهار است. از بویه‌ها عمدتاً برای ایجاد فاصله عمودی بین تجهیزات زیر آب و در برخی از موارد نیز برای کاهش نیروی کشش خطوط مهار استفاده می شود تا اندازه نیروی کششی خطوط مهار در محدوده مجاز حفظ شود. بویه‌ها ممکن است که به‌صورت کاملاً مغروق یا شناور به خطوط مهار متصل شوند. نمونه‌ای از بویه‌های یک خط مهار در شکل ۱-الف نشان داده شده است. وزنه‌های معلق نیز نظیر بویه‌ها، اجزاء اضافه‌ای هستند که در خطوط مهار برخی از سازه‌های شناور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این وزنه‌ها با ایجاد نیروی اضافی بر خطوط مهار سبب می‌شوند تا نیروی اضافه‌ای بر سازه شناور وارد شده و در نتیجه محدوده جابجایی سازه شناور کمتر شود. این عامل به نوبه خود سبب افزایش پایداری سازه شناور و در عین حال نیز می‌تواند سبب افزایش احتمال خرابی خطوط مهار شود. در شکل ۱-ب نمونه‌ای از وزنه‌های معلق یک خط مهار نمایش داده شده است.

اولین بار در سال ۱۹۷۶، استفاده از وزنه‌های معلق برای سکوهای شناور پیشنهاد داده شد. این وزنه‌ها با حرکت جسم شناور و خطوط مهار آن تغییر موقعیت داده و از طریق نیروی وزن خود کشش اضافه ای در خط مهار ایجاد می‌کند و از این طریق در کنترل حرکات سازه شناور مؤثر است. در این تحقیق سعی شده‌است تا اثر وزنه‌های معلق تعبیه شده در خطوط مهار یک سازه شناور بررسی شود. فیتزجرالد و برگدال [۸] در سال ۲۰۰۷ تأثیر وجود بویه بر روی خطوط مهار را برای مبدلهای انرژی شناور در عمق ۵۰ متر بررسی نمودند. آنها نشان دادند که با استفاده از بویه ها می توان وزن خطوط مهار و در نتیجه آن نیروهای مهار و حرکات مبدل شناور را کاهش داد. در سال ۲۰۱۴، یوآن و همکارانش [۹] تأثیر ترکیب بویه مغروق و جرم معلق را برای یک سکوی نیمه مغروق در آب عمیق بررسی نموده اند. آنها حالتهایی را برای این دو افزوده در بالا و پایین خطوط مهار بررسی نموده و برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیک از معادله موریسون استفاده کرده اند. در این تحقیق بهینه سازی موقعیت و حجم بویه های مغروق بر اساس نیروی کشش خطوط مهار انجام شده است. شنگ ژو و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۱۰] تحقیقی را با موضوع مطالعه تجربی تأثیر خطوط مهار کشیده و کاتنری بر میرایی حرکات سازه شناور نیمه مغروق انجام دادند. در مطالعه آنها سه حالت برای خطوط مهار در نظر گرفته شده است. در این تحقیق در دو حالت آب آرام و موج نامنظم تأثیر خطوط مهار بر میرایی حرکات سازه بررسی شده است. در حالت آب آرام نیروی بازگرداننده و کشش خطوط مهار به عنوان معیارهای اصلی و در موج نامنظم نیز حرکات سازه و کشش مهار بررسی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمونه ای از الف- بویه شناور، ب- وزنه معلق [۱۱]

در سال ۲۰۱۹ لیو و همکارانش [۱۲] تأثیر وزنه‌های معلق در خطوط مهار سکوی اسپار یک توربین بادی شناور را بر روی حرکات و کشش مهار آن بصورت عددی بررسی نمودند. آنها حرکات هیو[1]

[1] Heave

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

و سرج[2]سازه را به عنوان معیار بررسی کرده اند. در این تحقیق نشان داده شده است که موقعیت جرمهای معلق بر کشش مهار در نقطه اتصال به سازه تاثیر ندارد و هم چنین هر چه جرم ها به کف دریا نزدیکتر باشند، تأثیر آنها بر حرکات سرج سازه شناور کمتر است. بروشی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۳] تأثیر وجود جرمهای معلق را برای یک سکوی اسپار توربین بادی با توربین مدل OC3 بررسی نمودند. نتایج این تحقیق برای حرکت سرج نشان داده است که موقعیت جرمهای معلق نسبت به اندازه جرم آنها تاثیری بر روی حرکت سرج سازه شناور نداشته و این حالت برای جرمهایی که نزدیکتر به سازه شناور هستند، مشهود تر است. در این تحقیق وزنه‌های ۲ تا ۸ تنی در فواصل ۵۰ تا ۶۰۰ متر از سازه اسپار بررسی شده است. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴] مطالعه ای در خصوص اثرات عمق آب متوسط بر پاسخ توربین بادی شناور انجام دادند. در این تحقیق سازه یک توربین بادی وی شکل با سه خط مهار در آب کم عمق ۵۰ متر در نظر گرفته شده و اثرات باد و موج بر کشش مهار و حرکات سازه توربین بادی بررسی شده است. در این تحقیق اثرات عمق آب نیز بررسی شده و برای اینکار خروجیهای سازه توربین بادی در سه عمق ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ بررسی شده است. در این تحقیق یک وزنه معلق ۷۵ تنی در فاصله ۸۲ متری از سازه شناور برای حالت عمق ۵۰ متری لحاظ شده است. بررسی چیدمان‌های مختلف وزنه معلق و بویه در سال ۲۰۲۱ توسط ژو و همکارانش [۱۵] برای سکوی نیمه مغروق OC4 بررسی شده است. در این تحقیق فرض شده است که سازه در آب کم عمق ۵۰ متر قرار دارد. همچنین در این تحقیق سعی شده بود تا از دیدگاه طراحی بر اساس استحکام نهایی برای سازه فوق چیدمان مناسبی از جرم معلق و بویه پیشنهاد گردد. این تحقیق جزو معدود تحقیقاتی است که در آن سازه شناور مهار شده در محدوده آب کم عمق فرض شده است. در سال ۲۰۲۱ تحقیقی توسط رینالدی و همکارانش [۱۶] با موضوع توسعه یک سیستم مهار با وزنه‌های معلق برای یک کشتی شناور انجام شده است. در این تحقیق ارزیابی هزینه خطوط مهار به همراه تثبیت موقعیت کشتی مدنظر بوده است. هدف اصلی این تحقیق دستیابی به سیستمی از خطوط مهار با هزینه نصب و نگهداری کمتر برای کشتیهای فعال در محدوده بندر فالموس انگلستان بوده است. در نهایت با استفاده از وزنه‌های معلق سیستم مهار مناسب پیشنهاد شده است. در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای توسط عاطفه نیسی و همکارانش [۱۷] با موضوع تأثیر وزنه‌های معلق در سیستم مهار بر حرکت دینامیکی سازه شناور توربین بادی OC4 انجام شده است. در این مقاله با استفاده از روش المان مرزی تأثیر وزنه‌های معلق بر حرکات سازه در چند حالت موج منظم و نامنظم بررسی شده است. در سال ۲۰۲۲ تحقیقی توسط لوپز و همکارانش [۱۸] در مورد تأثیر وزنه‌های معلق در سازه شناور توربین بادی OC4 بصورت عددی و تجربی انجام شده است. در این تحقیق، موقعیت وزنه در طول خطوط مهار تغییر داده شده و سازه شناور تحت تأثیر امواج منظم با دامنه و دوره تناوب متفاوت قرار گرفته است. در این مقاله محدوده تغییرات حرکت سازه در امواج منظم و همچنین کشش مهار به عنوان خروجی سازه در نظر گرفته شده و در حالتهای مختلف تأثیر اضافه کردن وزنه معلق بر خروجی ها بررسی شده است.

استفاده از وسایل اضافه در سیستم مهار سازه‌های شناور قدمت زیادی ندارد. یک دلیل عمده این بحث نامشخص بودن تأثیر این ادوات در شرایط مختلف دریا است. در سال‌های اخیر محققین مختلفی سعی نموده‌اند تا جنبه‌های مختلف تأثیر اضافه‌کردن وزن معلق بر رفتار هیدرودینامیکی سازه‌های شناور و همچنین کشش خطوط مهار بررسی کنند.

تقریباً همه تحقیقات انجام شده در زمینه وزنه‌های معلق خطوط مهار مختص به آب‌های عمیق است، و این درصورتی‌که است که بیشتر محدوده دریاهای کشورمان که نیاز به سازه شناور دارند در محدوده خلیج‌فارس قرار دارد که در محدوده آب‌های با عمق متوسط و کم‌عمق است. در این تحقیق سازه شناور نمونه مد نظر در محدوده آب‌های با عمق ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. این مقاله در پنج بخش تهیه شده است. در بخش دوم ابتدا مدل هندسی سکوی نیمه مغروق HYSY 981 که به عنوان سازه شناور نمونه در نظر گرفته شده، تشریح شده است. در بخش سوم شرایط محیطی و مش بندی مدل ارائه شده است. تحلیل‌های هیدرودینامیکی عددی بوسیله نرم افزار انسیس-آکوا[3]انجام شده است. در بخش چهارم صحت سنجی نتایج عددی به‌منظور بررسی قابلیت نرم افزار انجام شده است. در بخش پنجم برای بررسی تأثیر افزودن وزنه های معلق به خطوط مهار، چند حالت بررسی شده است. در این حالت‌ها اندازه وزنه و موقعیت آن در طول خط مهار تغییر داده شده است. پاسخ‌های هیدرودینامیکی سازه شناور در دو حالت آب آرام و موج نامنظم با دوره بازگشت ۱۰۰ساله بررسی شده است. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی در بخش آخر ارائه شده است.

۲ - مدل هندسی شناور نیمه مغروق

در مطالعه حاضر از مدل هندسی سکوی نیمه مغروق HYSY 981 استفاده شده است. این سازه از دو پانتون ۱۱۴ متری، چهار ستون با ابعاد ۱۷/۴×۱۷/۴ متر و چهار بریس ۴۲/۶ متری با قطر ۱/۸ متر تشکیل شده است. جابجایی کل سازه شناور ۷۸۱۹۶ تن است. در شکل ۲ ابعاد مدل آزمایشگاهی سازه مدنظر با مقیاس ۱:۳۰۰ نمایش داده شده است. برای مهار این سازه از ۱۲ مهار کاتنری در

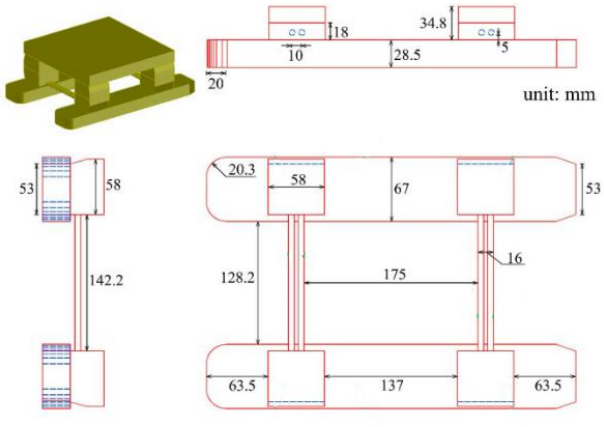
[2] Surge

[3] Ansys AQWA

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

نظر گرفته شده که در کنار ستون‌های پایه در ارتفاع ۲/۴ متری نصب شده‌اند. طول هریک از خطوط مهار در حالت غیر کشش ۷۲۰ متر و قطر خطوط مهار ۰/۱۳۴ متر در نظر گرفته شده است. جرم واحد طول برای هر سه مهار ۱۷۹/۶ کیلوگرم بر متر و سختی کششی معادل ۷۷۰/۷۳۵×۱۰۶ نیوتن است. عمق آب ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ مدل ساخته شده سکوی شناور به همراه خطوط مهار آن در نرم‌افزار انسیس نمایش‌داده شده است.



شکل ۲- ابعاد مدل شناور نیمه مغروق با مقیاس ۱:۳۰۰ [۱۹]

برای بررسی تأثیر وزنه‌های آویخته بر رفتار هیدرودینامیکی سازه شناور چهار حالت شامل بدون وزنه معلق و سه وزنه ۵، ۱۵ و ۲۵ تنی بررسی شده است. هرکدام از این وزنه‌ها به‌صورت استوانه‌ای به قطر واحد و ارتفاع ۰/۸۱۰ ، ۲/۴۳۱ و ۴/۰۵۲ متر در نظر گرفته شده و ضریب درگ آنها نیز برابر با ۱ فرض شده است. براین‌اساس مشخصات وزنه‌های مفروض بصورت جدول ۴ در نرم‌افزار تعریف شده است.

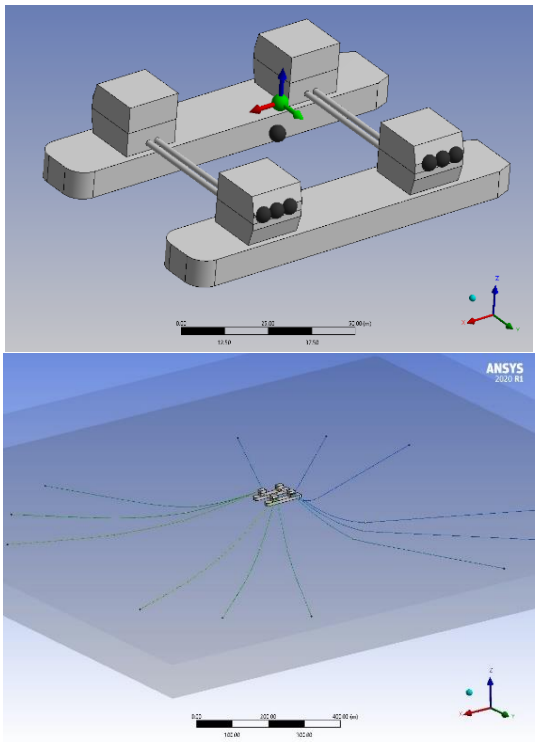
نکته مهم و تأثیرگذار در استفاده از وزنه‌های معلق، مشخص‌کردن موقعیت وزنه در راستای خطوط مهار است. در تحقیق حاضر سه موقعیت ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ متر برای وزنه تعریف شده و تأثیر آن بر مشخصات هیدرودینامیکی سازه بررسی شده است. در شکل ۴ مفهوم فواصل فوق نشان داده شده است. باتوجه‌به عمق آب، وزنه معلق در موقعیت ۲۴۰ متر فاصله تقریباً در فاصله ۹ متری از بستر دریا قرار داشته و لذا در حرکات زیاد شناور بیشترین امکان تماس با بستر دریا را دارد.

۳ - شرایط محیطی و مش‌بندی مدل

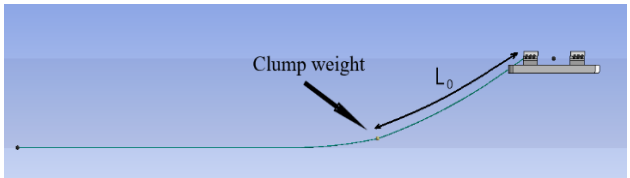
نیروهای محیطی وارد بر سازه‌های شناور شامل نیروهای امواج، جریان‌های دریایی و باد است. برای تحلیل هیدرودینامیکی نیمه مغروق مدنظر در کل دو حالت در نظر گرفته شده است. شرایط آب آرام، در این حالت شرایط دریا به‌صورت کاملاً آرام و بدون موج، باد و جریان دریایی لحاظ شده است. در این حالت هدف اصلی بررسی تأثیر وزنه‌های معلق بر رفتار ارتعاشی و نیروی بازگرداننده خطوط مهار سازه شناور است. شرایط موج نامنظم، در این حالت شرایط محیطی با دوره بازگشت ۱۰۰ساله برای شناور در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر حرکات و کشش مهار سازه شناور بررسی شده است.

جدول ۴: لیست وزنه‌های معلق خطوط مهار در سازه نیمه مغروق

	unit	1	2	3
Clump weight (CW)	ton	5	15	25
displaced mass of water	ton	0.652	1.957	3.262
Added mass	ton	0.652	1.957	3.262
Drag coeff. × Area	m^2	0.81	2.431	4.052



شکل ۳- مدل سکوی نیمه مغروق به همراه خطوط مهار در نرم‌افزار ANSYS



شکل ۴- تعریف موقعیت قرارگیری وزنه معلق در مدل سکوی نیمه مغروق

در این تحقیق قصد داریم تا بیشترین تأثیر اضافه‌کردن وزنه‌های معلق بر حرکات و کشش مهار سازه نیمه مغروق را بررسی کنیم. براین‌اساس باید اطلاعات محیطی دریا با دوره بازگشت طولانی (مثلاً ۱۰۰ساله) مورداستفاده قرار گیرد. اطلاعات امواج خلیج‌فارس با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال در مقاله داستان و همکاران [۲۰] آورده شده است. بر اساس این مرجع، امواج موجود در محدوده خلیج‌فارس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

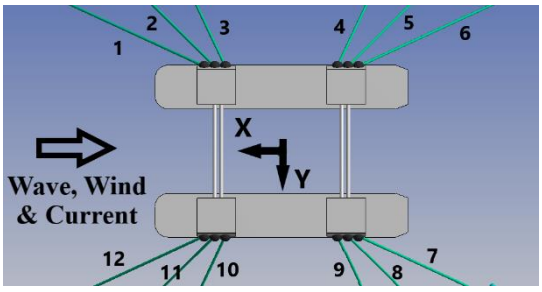
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

با دوره بازگشت ۱۰۰ساله را می‌توان بوسیله طیف جانسوآپ با ارتفاع مشخصه موج ۵/۸۳ متر، دوره تناوب پیک ۷/۱۰ ثانیه و پارامتر مشخصه پیک موج ۳/۰ در نظر گرفت.

بخشهای زیر آب سازه های دریایی تحت تاثیر جریانهای دریایی هستند. در تحلیلهای هیدرودینامیکی معمولا سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰ ساله به عنوان سرعت معیار در جریانهای دریایی درنظر گرفته می شود. در اینجا بر اساس مرجع [۲۱]، سرعت جریان دریایی در محدوده خلیج‌فارس برابر با ۰/۷۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

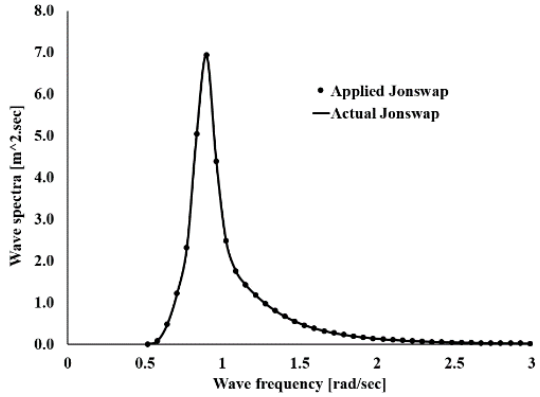
نیروی ناشی از باد معمولاً برای سازه‌های شناور با مساحت بادگیر قابل‌توجه حائز اهمیت است. در استانداردهای دریایی، برای طراحی سازه شناور باید از سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ساله در ارتفاع ۱۰ متر استفاده کرد. بر اساس مرجع اخیر، سرعت باد با مشخصات موردنظر در محدوده خلیج‌فارس برابر با ۱۱/۳ متر بر ثانیه است. این سرعت به‌عنوان سرعت مرجع در نرم‌افزار تعریف شده است.

نیروهای محیطی ذکر شده ممکن است در جهات مختلف بر روی سازه شناور نیمه مغروق تأثیرگذار باشند. در این پژوهش بر اساس شکل ۵ فرض می‌شود که همه نیروهای محیطی در راستای طولی شناور نیمه مغروق بر سازه وارد می‌شوند. این عامل سبب می‌شود تا بیشترین جابجایی سازه در راستای طولی آن (حرکت سرج) اتفاق افتد. با درنظرگرفتن این حالت، بیشترین میزان کشش نیز در خطوط مهار شماره ۱ و ۱۲ روی می‌دهد.

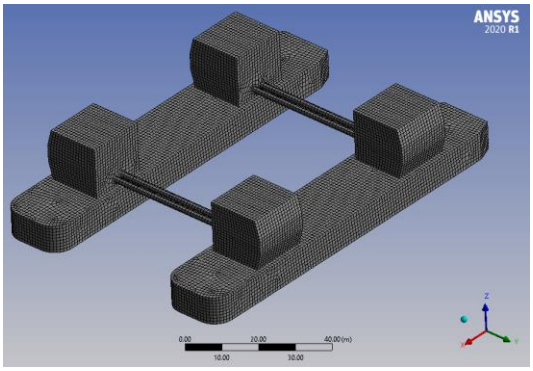


شکل ۵- زاویه اعمال نیروهای محیطی

اجزاء موجود در یک سازه شناور را بر اساس نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن می‌توان به دودسته خطوط مهار و اعضا شناور نیمه مغروق تقسیم‌بندی کرد. خطوط مهار غالبا اجزاء باریک با مساحت مقطع عرضی کم هستند که از تغییرات شتاب عمود بر راستای طولی آنها صرفنظر می شود [۲۲]. برای محاسبه نیروی موج در این اعضا باریک از معادله موریسون بهره برده می شود. در این شرایط باید ضرایب درگ و اینرسی برای اعضا تعریف شود. در استاندارد DNVGL [۲۳] مقدار ۱/۰ برای ضریب اینرسی خطوط مهار پیشنهاد شده است. ضرایب درگ نیز بر اساس نوع خطوط مهار پیشنهاد شده است. در خطوط مهار طنابی ۱/۸ به عنوان ضریب درگ عرضی ارائه شده است. مقدار ضریب درگ عرضی برای خطوط مهار زنجیری نیز ۲/۴ می باشد. مقدار ضریب درگ طولی در این استاندارد ۱/۴ برای خطوط مهار زنجیری پیشنهاد شده است. بدنه اصلی سازه های شناور معمولا بخشهایی حجیم هستند و لذا نیروی وارد بر آنها را میتوان با استفاده از تئوری تفرق بدست آورد. در نرم افزار انسیس-آکوا با استفاده از روش المان مرزی این نیروی تفرق محاسبه می شود. این کار با مش بندی سازه و حل مساله تابع پتانسیل انجام می شود. برای مش بندی سازه در انسیس-آکوا باید اندازه المان مشخص گردد. این اندازه المان باید به نوعی مشخص شود تا حداکثر فرکانس متناظر با اندازه مش بیشتر از حداکثر فرکانس موج نباشد. در شکل ۶ همچنین طیف موج واقعی جانسواپ با طیف موج پیشنهاد شده توسط نرم افزار مقایسه شده است. بر اساس این شکل، با دادن مشخصات موج، حداکثر فرکانس موج نامنظم تولید شده برابر با ۲/۶۱ رادیان بر ثانیه است که تعیین کننده اندازه بزرگترین المان است. در سازه مدنظر، بر اساس این اطلاعات بزرگترین اندازه مش برابر با ۱/۹۰ است. در اینجا اندازه ۱/۷۵ متر به عنوان اندازه المان انتخاب شده است. مش بندی سازه در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶- طیف موج جانسوآپ بکار رفته



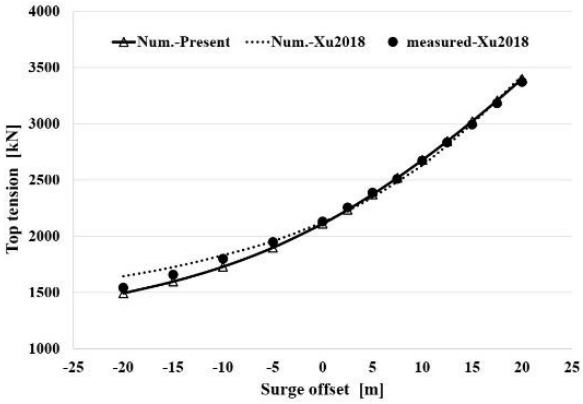
شکل ۷- مش بندی شناور نیمه مغروق

۴ - صحت سنجی

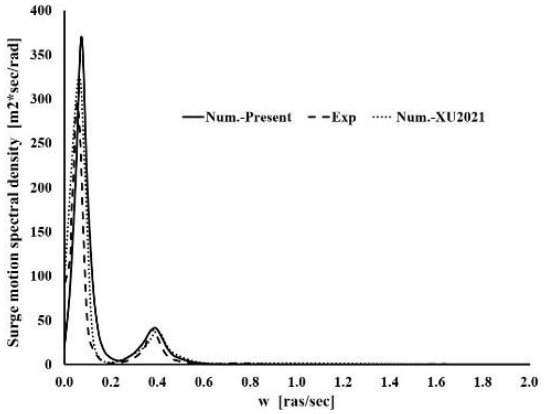
در تحلیل‌های عددی نرم‌افزاری، معمولاً باید ابتدا نتایج تحلیل عددی صحت سنجی شود. مدلی با مقیاس ۱ به ۵۰ از این شناور ساخته شده و در تانک کشش مرکز تحقیقات کشتی چین مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها این مدل در تحقیقات مختلفی نظیر [۱۵, ۲۴, ۲۵]منتشر شده است. آزمایش هایی بر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

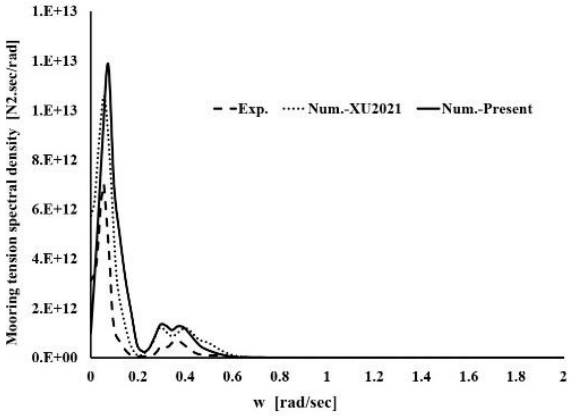
روی این مدل انجام شده است که در کل به دو دسته قابل تقسیم بندی است. در ابتدا برای بررسی تأثیر خطوط مهار، سازه شناور در شرایط آب آرام آزمایش شده و میزان کشش مهار آن در نقاط فیرلید سازه محاسبه شده است. برای اینکار ابتدا سازه شناور در راستای طولی به اندازه های مختلف جابجا شده و ثابت نگه داشته می شود؛ سپس میزان کشش انتهای خط مهار شماره ۱ آن محاسبه می شود. در شکل ۸ این مقادیر کشش انتهایی با مرجع [۲۴] مقایسه شده است. این مقایسه به خوبی دقت نتایج تحلیلهای عددی را در شرایط بدون موج نشان می دهد. در ادامه آزمایشات مرکز تحقیقاتی ذکر شده، سازه شناور در امواج نامنظمی با ارتفاع ۱۳/۷ متر و دوره تناوب پیک ۱۶ ثانیه مورد آزمایش قرار گرفته است. این موج نامنظم با طیف جانسوآپ مدلسازی شده و معادل با امواجی با دوره بازگشت ۱۰۰ساله در دریای چین جنوبی است. در مرجع [۱۵] طیف حرکت سرج شناور و همچنین کشش انتهایی مهار شماره ۱ بصورت طیف داده شده است. در اینجا نیز امواجی با مشخصات فوق مدلسازی شده و نتایج حرکت سرج و کشش انتهایی مهار شماره ۱ استخراج شده است. طیف حاصل از این موارد بدست آمده و در اشکال ۹ و ۱۰ با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۵] مقایسه شده است. مقایسه ارائه شده در این اشکال به خوبی دقت نتایج عددی بدست آمده توسط تحلیل های عددی حاضر را نشان می دهد.



شکل ۸- مقایسه کشش انتهای مهار شماره ۱ در شرایط بدون موج با مرجع [۲۴]



شکل ۹- مقایسه حرکت سرج شناور نیمه مغروق در شرایط موج نامنظم با مرجع [۱۵]



شکل ۱۰- مقایسه کشش مهار شناور نیمه مغروق در شرایط موج نامنظم با مرجع [8]

۵ - تحلیل هیدرودینامیکی در شرایط آب آرام

معمولاً اولین مرحله در ارزیابی هیدرودینامیکی سازه‌های شناور مهار شده، بررسی میزان تأثیر خطوط مهار است. این مرحله به نام تحلیل هیدرودینامیکی در آب آرام شناخته می‌شود. برای این تحلیل عمدتاً دو نوع تحلیل قابل انجام است. در ادامه این دو نوع تحلیل بیان می‌گردد.

۵-۱- تحلیل نیروی بازگرداننده خطوط مهار

درصورتی‌که یک جسم شناور مهار شده از موقعیت اولیه خود جابه‌جا شود، باید یک نیروی بازگرداننده برای بازگرداندن سازه به موقعیت اولیه ایجاد شود. هر چه میزان نیروی بازگرداننده قوی‌تر باشد، در شرایط متغیر دریا امکان کنترل حرکات سازه شناور بیشتر خواهد بود. برای دستیابی به مقادیر نیروی بازگرداننده، می‌توان سازه شناور را در یک راستا (در اینجا راستای طولی سازه شناور X مطابق با شکل ۵) به میزان مشخص جابه‌جا کرده و میزان نیروی بازگرداننده وارد بر کل سازه از طرف خطوط مهار را به دست آورد. در شکل ۱۱ نیز مقادیر نیروی بازگرداننده برای هر وزنه در موقعیت‌های مختلف مقایسه شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که هر چه فاصله وزنه معلق از شناور دورتر باشد، تأثیر آن بر نیروی بازگرداننده نیز بیشتر خواهد بود. در حالت بدون وزنه و در جابجایی ۱۰ متر به‌اندازه ۵۶۶۶۹۶۶ نیوتن برای بازگرداندن جسم ایجاد می‌شود. اگر وزنه در فاصله ۱۶۰ متری قرار داشته باشد، به ترتیب نیروی بازگرداننده برای وزنه‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ تن به‌اندازه ۲/۳، ۶/۸ و ۱۱/۲ درصد افزایش می‌یابد. برای وزنه‌های فوق اگر در فاصله ۲۴۰ متری قرار داشته باشند، به ترتیب شاهد ۷/۳، ۲۲/۸ و ۴۱/۲ درصد افزایش در نیروی بازگرداننده خواهیم بود.

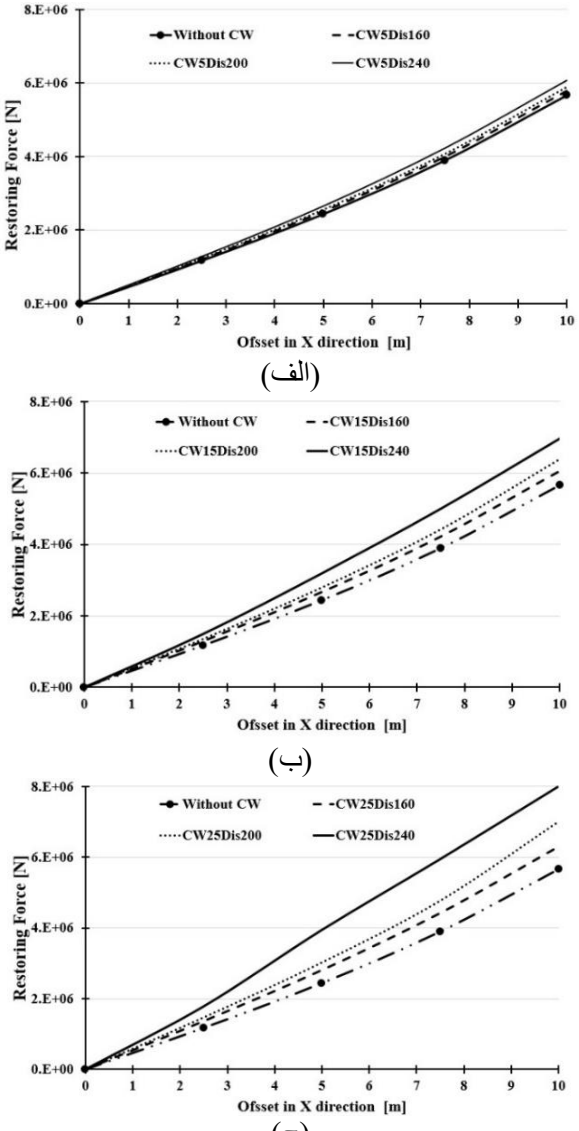
با بررسی شکل ۱۱ می‌توان دید که وزنه سبک ۵ تنی تأثیر قابل‌توجهی بر میزان نیروی بازگرداننده سازه ندارد. این تأثیر حداکثر برای فاصله ۲۴۰ متر و به میزان ۷/۳ درصد است. این در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

حالی است که وزنه ۲۵ تنی در فواصل فوق سبب افزایش ۱۱/۲ تا ۴۱/۲ درصد در میزان نیروی بازگرداننده شده است.

نقطه تماس خطوط مهار با بستر دریا در این سازه برابر با ۳۰۸ متر است. با مقایسه این نتایج می‌توان گفت که اضافه‌کردن وزنه در دو سوم ابتدایی خطوط مهار، تأثیر قابل‌توجهی بر میزان نیروی بازگرداننده نخواهیم داشت. لذا باید وزنه‌های معلق در یک سوم انتهایی آن اضافه شوند. همچنین بر اساس این اشکال می‌توان گفت که در سازه مدنظر حداقل باید اندازه وزنه معلق ۱۵ تن باشد.

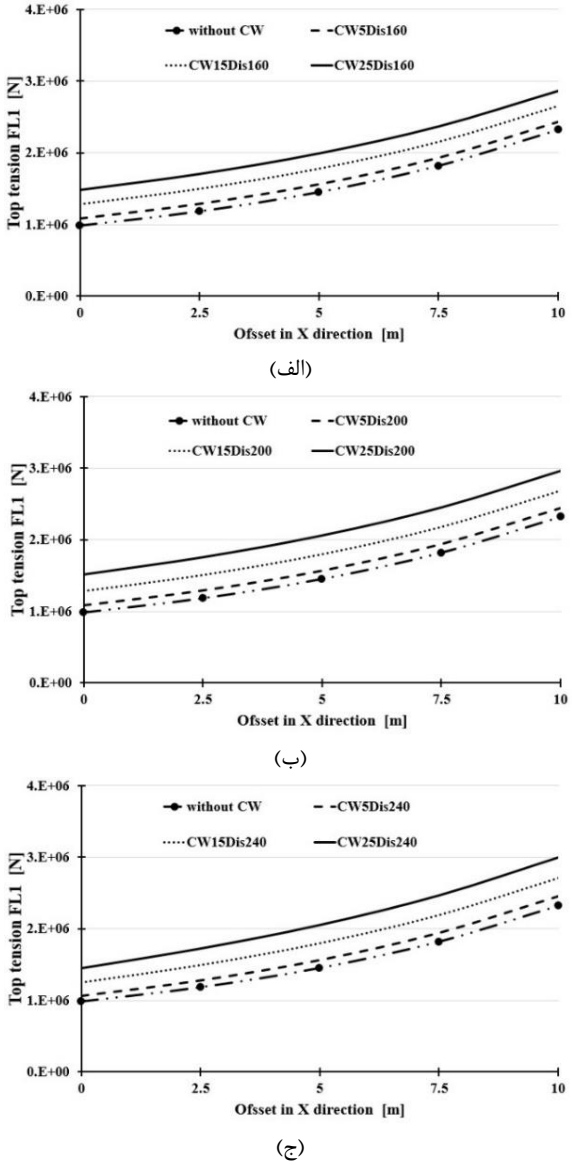


شکل ۱۱- مقایسه نیروی بازگرداننده وارد بر سازه از طرف خطوط مهار در اندازه های مختلف وزنه معلق، الف-وزنه معلق ۵ تنی، ب-وزنه معلق ۱۵ تنی، ج-وزنه معلق ۲۵ تنی

۵-۲-تحلیل کشش انتهایی خطوط مهار

یکی از مشکلات مهم در اضافه‌کردن وزنه به خطوط مهار، افزایش میزان کشش مهار و درنتیجه افزایش احتمال خرابی آن است. به دلیل اهمیت این امر باید کشش انتهایی خطوط مهار به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس جهت اعمال نیروهای خارجی در خط مهار شماره ۱ بیشترین کشش انتهای روی داده است، لذا در ادامه میزان کشش انتهایی این خط مهار در حالت‌های مختلف گزارش و مقایسه خواهد شد.

در شکل ۱۲ کشش انتهایی خط مهار شماره ۱ در سه موقعیت وزنه معلق آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تغییر موقعیت وزنه تأثیر قابل‌توجهی بر میزان کشش انتهایی خط مهار شماره ۱ در آب آرام ندارد. به‌عنوان‌مثال در جابجایی سرج ۱۰ متر، برای حالت وزنه ۲۵ تنی، کشش انتهایی به ترتیب ۲۳/۴ و ۲۸/۹ برای وزنه به فواصل ۱۶۰ و ۲۴۰ متری بیشتر از حالت بدون وزنه خواهد بود. برای وزنه معلق در فاصله ۲۰۰ متری این میزان افزایش ۲۷/۳ درصد است.



شکل ۱۲- مقایسه کشش انتهایی خط مهار شماره ۱ در موقعیتهای مختلف وزنه معلق، الف-وزنه معلق در فاصله ۱۶۰ متری از سازه، ب-وزنه معلق در فاصله ۲۰۰ متری از سازه، ج-وزنه معلق در فاصله ۲۴۰ متری از سازه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

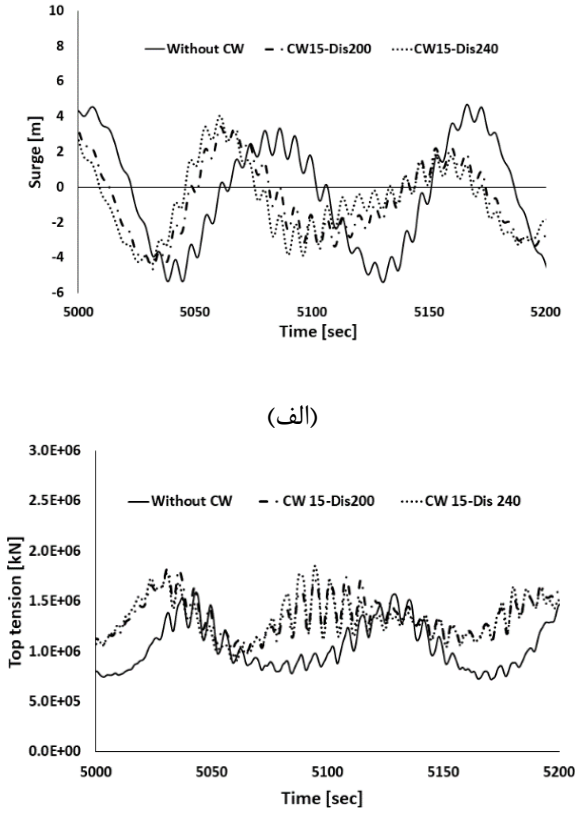
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

۶ - تحلیل هیدرودینامیکی در شرایط موج نامنظم

برای تحلیل هیدرودینامیکی در شرایط موج نامنظم، ابتدا تحلیل‌های حوزه فرکانس با ۴۰ فرکانس در بازه ۰/۵ تا ۳/۰ رادیان بر ثانیه انجام شده است. پس از تحلیل فرکانسی، پاسخ‌های حرکتی سازه در حوزه زمان با استفاده از ماژول ANSYS-Hydrodynamic Response به‌دست‌آمده است. برای این کار شبیه‌سازی حرکات سازه در دوره زمانی سه ساعته با تقسیم‌بندی نیم ثانیه‌ای انجام شده است. برای صرف‌نظرکردن از تأثیر پاسخ‌های ابتدایی، ۱۲۰۰ ثانیه اول خروجی‌ها در نظر گرفته نشده، لذا در کل در هر حالت ۱۲۰۰۰ ثانیه تحلیل هیدرودینامیکی انجام شده است. در بخش قبل تأثیر اندازه وزنه معلق و موقعیت آن در حالت بدون موج بررسی گردید. همانطور که در نتایج ارائه شد، وزنه کوچک ۵ تنی کمترین تأثیر را داشت. همچنین اگر وزنه‌ها در موقعیت ۱۶۰ متری قرار داشتند، تأثر قابل‌توجهی بر روی کنترل حرکات سازه نداشتند؛ لذا در این بخش تنها تأثیر وزنه ۱۵ تنی در موقعیت‌های ۲۰۰ و ۲۴۰ متری بررسی شده است.

۶-۱- تحلیل هیدرودینامیکی در حوزه زمان

در این حالت می‌توان پاسخ‌های سازه شناور شامل حرکات سرج، هیو و پیچ و همچنین کشش انتهایی مهار شماره ۱ را در بازه زمان بررسی نموده و با به‌دست‌آوردن مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین برداشت اولیه‌ای را از تأثیر وزنه‌های معلق بر رفتار هیدرودینامیکی سازه ارائه داد. دو نمونه از خروجی‌های زمانی به‌دست‌آمده در شکل ۱۳ برای مقایسه بین حرکت سرج و کشش مهار در دو حالت وزنه ۱۵ تنی با حالت بدون وزنه در بازه نمونه ۵۰۰۰ تا ۵۲۰۰ ثانیه ارائه شده است. در جدول ۵ مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط حرکات سرج، هیو، پیچ و کشش مهار آورده شده است. در حرکت سرج وزنه ۱۵ تنی در فاصله ۲۰۰ متر سبب کاهش ۱۹/۶ مقدار ماکزیمم حرکت از ۸/۳۵ متر به ۶/۷۱ شده است. این در حالی است که وزنه ۱۵ تنی در فاصله ۲۴۰ متر تأثیر کمتری داشته و ماکزیمم حرکت به میزان ۶/۷ درصد از ۸/۳۵ متر به ۷/۷۹ متر رسیده است. مقدار مینیمم حرکت سازه نیز به ترتیب در دو حالت وزنه ۱۵ تنی در فاصله ۲۰۰ متر و ۲۴۰ متر به میزان ۱۶/۱ و ۱۰/۴ درصد کمتر شده است. مقدار متوسط حرکت سرج در سه حالت تقریباً برابر و در حدود ۰/۴۵- متر است. اضافه‌کردن وزنه، مشابه با بررسی حالت بدون موج، سبب کاهش حرکت سرج و به تعبیری کنترل حرکت آن خواهد شد. این کاهش برای یک حالت در حدود ۲۰ درصد مقدار بدون وزنه است که درصد قابل‌توجهی است. با دورکردن وزنه، حالت وزنه در موقعیت ۲۴۰ متری، توقع می‌رفت که کاهش بیشتری در مقدار حداکثر سرج دیده شود. با بررسی حرکات شناور در شرایط دینامیکی مشخص شد که در این حالت به دلیل نزدیکی بیش از اندازه وزنه به بستر دریا، در حرکات شدید سازه شناور، وزنه‌ها در چند خط مهار تماس بیشتری با بستر دریا داشته و لذا تأثیر خود را از دست خواهند داد. این امر نشان‌دهنده این است که در هنگام طراحی خطوط مهار، باید محل وزنه‌ها به‌دقت مشخص شود تا در شرایط بحرانی و حرکات شدید تأثیر وزنه بر حرکات شناور قابل‌توجه‌تر باشد. روند تقریباً مشابهی در بررسی مقادیر ارائه شده در جدول ۵ برای حرکات هیو و پیچ سازه شناور دیده می‌شود. در دو حالت وزنه در فاصله ۲۰۰ و ۲۴۰ متر، مقادیر حداکثر حرکت هیو ۹/۵ و ۶/۸ درصد کاهش داشته است. این کاهش برای مقادیر حداکثر حرکت پیچ ۷/۲ و ۶/۰ درصد است. در هر دو حالت دیده می‌شود که وزنه دورتر تأثیر کمتری بر کاهش حرکات سازه شناور داشته است.



(الف)

(ب)

شکل ۱۳- مقایسه حالت بدون وزنه و با وزنه ۱۵ تنی در موقعیتهای ۲۰۰ و ۲۴۰ متر، الف- حرکت surge شناور، ب- کشش انتهایی مهار شماره ۱

با اضافه‌کردن وزنه به خطوط مهار، کشش خطوط مهار افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های جدول ۵، مقدار متوسط کشش مهار در فواصل ۲۰۰ و ۲۴۰ متری وزنه به ترتیب ۲۷/۱ و ۲۳/۴ درصد افزایش می‌یابد. مقدار افزایش حداکثر کشش مهار در این دو حالت ۴/۳ و ۶/۸ درصد است. در این حالت دورتر کردن وزنه تأثیر سبب تماس بیشتر خط مهار با بستر دریا شده و در نتیجه مقدار متوسط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

کشش مهار کمتر شده است. این کاهش کشش خط مهار بالطبع سبب افزایش حرکات سازه شناور خواهد شد.

جدول ۵: مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط حرکات و کشش مهار در شرایط وزنه معلق ۱۵ تنی و بدون وزنه

CW15-Dis240	CW15-Dis200	without CW		
7.79	6.71	8.35	max	Surge [m]
-8.57	-8.02	-9.56	min	
-0.44	-0.45	-0.47	average	
10.94	10.62	11.74	max	Heave [m]
7.88	8.24	7.05	min	
9.41	9.38	9.52	average	
10.65	10.51	11.33	max	Pitch [deg.]
-8.44	-7.72	-8.75	min	
0.7	0.68	0.66	average	
2790	2825	2612	max	Top tension [kN]
647	866	565	min	
1306	1345	1058	average	

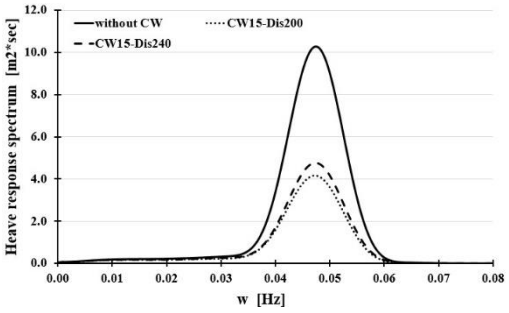
۶-۲- تحلیل طیف پاسخ

پاسخ‌های سازه شناور در امواج نامنظم به‌صورت نامنظم است. تبدیل طیفی یکی از این روش‌های بررسی پاسخ نامنظم سازه شناور است. در اشکال ۱۴ تا ۱۷ به ترتیب پاسخ طیفی سازه در حرکات هیو، پیچ، سرج و کشش انتهایی مهار داده شده است. پاسخ‌های طیفی سازه در دو محدوده فرکانس پایین و فرکانس بالا (در حدود فرکانس موج نامنظم) ارائه شده است. این کار به دلیل اختلاف مقادیر طیف در این دو محدوده فرکانسی انجام شده است تا بادقت بیشتری در هر دو محدوده اعداد طیف قابل‌رؤیت باشند.

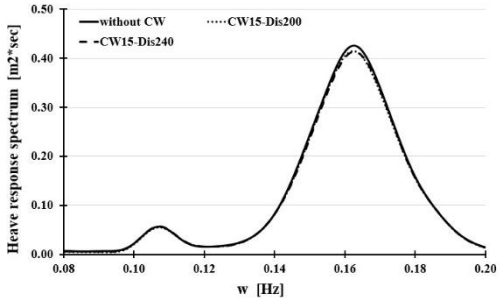
مطابق با شکل ۱۴، در حرکت هیو مقدار حداکثر طیف حرکت سازه در محدوده فرکانس ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۵۰ هرتز روی می‌دهد. در این محدوده فرکانسی استفاده از وزنه معلق کاهش قابل‌توجهی در مقادیر طیف ایجاد کرده است. این مقدار کاهش نشان‌دهنده کم‌شدن انرژی حرکت هیو در این محدوده است.

در شکل اخیر می‌توان دید که در محدوده فرکانس پیک موج نامنظم مقادیر طیف در محدوده کمتری بوده و درعین‌حال شاهد تاثیر خاصی بر مقادیر طیف در اثر به‌کارگیری وزنه معلق نخواهیم بود. در کل مجموعه دو شکل ارائه شده در ۱۴ نشان‌دهنده این محدوده فرکانسی است که حرکت هیو سازه بیشتر از وجود وزنه معلق تأثیر می‌پذیرد.

در شکل ۱۵ طیف حرکت پیچ سازه در دو محدوده فرکانسی نشان داده شده است. مطابق با این شکل، بیشترین مقدار انرژی طیف در محدوده فرکانسی ۰/۰۱ تا ۰/۰۱۵ هرتز است. در این محدوده نیز تأثیر وزنه معلق بر حرکت پیچ سازه قابل‌توجه است. در این حالت نیز مشابه با حرکت هیو، در محدوده فرکانس بالا وجود وزنه معلق تأثیری بر مقدار طیف حرکت سازه ندارد. در این حالت در فرکانس پایین شاهد تأثیر معکوس وجود وزنه معلق دورتر خواهیم بود. این امر بدین معنی است که در این محدوده فرکانسی نه‌تنها وزنه دورتر سبب کاهش حرکات سازه نشده، بلکه دامنه حرکات با این محدوده فرکانسی در سازه افزایش نیز یافته است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- طیف حرکت هیو ، الف-محدوده فرکانس پایین، ب- محدوده فرکانس بالا

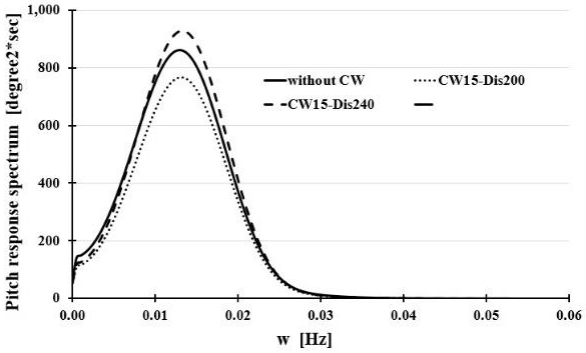
در شکل ۱۶ طیف حرکت سرج سازه ارائه شده است. رفتار این منحنی تقریباً مشابه با حرکت هیو سازه است، با این تفاوت که در این حالت مقدار حداکثر طیف در این حالت در محدوده ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۱۵ هرتز است. در این محدوده وزنه معلق دورتر سبب کاهش دامنه حرکات سازه شده است.

در شکل ۱۷ طیف کشش انتهایی خط مهار شماره ۱ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، برخلاف حالت‌های قبل، در این حالت وجود وزنه معلق در هر دو محدوده فرکانسی مؤثر است. در فرکانس‌های پایین مقدار پیک منحنی در محدوده فرکانسی ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۱۵ هرتز است. در این محدوده فرکانسی وجود وزنه معلق سبب کاهش دامنه کشش مهار شده است. همچنین در این محدوده موقعیت وزنه تأثیری بر این موضوع ندارد. این موضوع در حالی است که در محدوده فرکانس بالا شاهد روند معکوس خواهیم بود. در محدوده فرکانس بالا که در محدوده فرکانس پیک موج نامنظم است، وجود وزنه معلق سبب افزایش مقادیر طیف شده است که نشان‌دهنده افزایش کشش مهار در این محدوده است. مطابق با این شکل، برای موقعیت ۲۴۰ متری وزنه مقادیر طیف کمتر از موقعیت ۲۰۰ متری است. این موضوع به طور

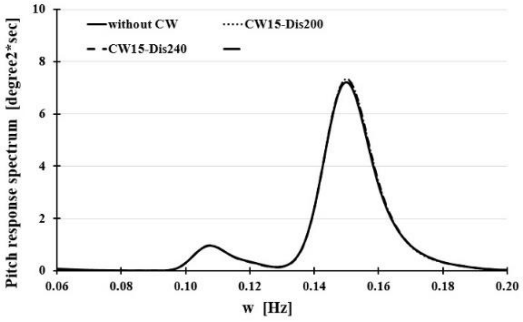
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

مشابه در مقادیر متوسط کشش مهار در تحلیل زمانی قابل‌رؤیت است.

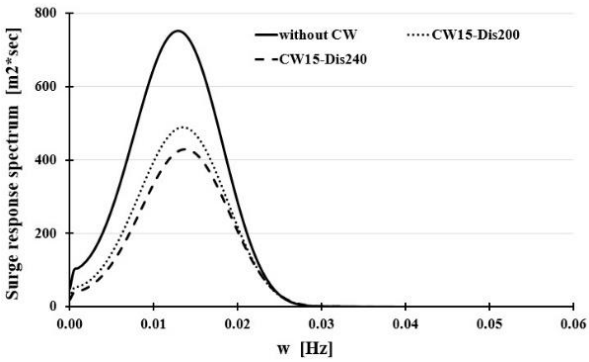


(الف)

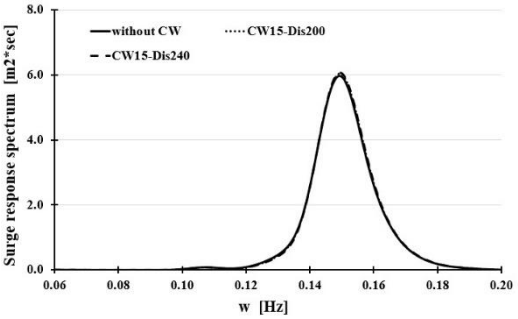


(ب)

شکل ۱۵- طیف حرکت پیچ ، الف-محدوده فرکانس پایین، ب- محدوده فرکانس بالا

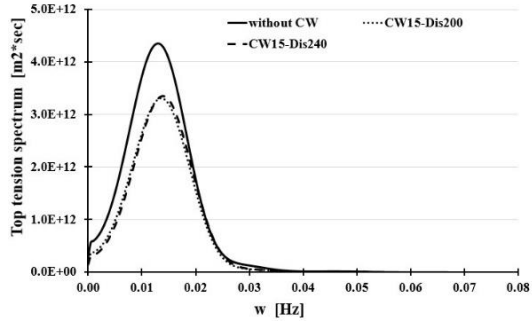


(الف)

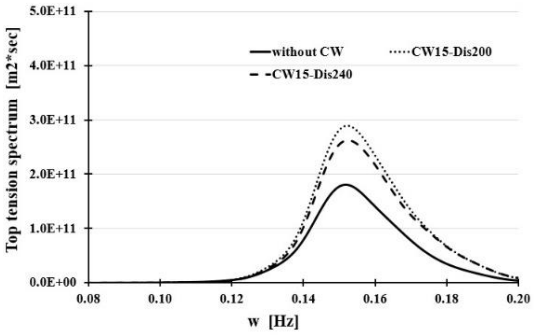


(ب)

شکل ۱۶- طیف حرکت سرج ، الف-محدوده فرکانس پایین، ب-محدوده فرکانس بالا



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- طیف کشش انتهایی مهار شماره ۱ ، الف-محدوده فرکانس پایین، ب-محدوده فرکانس بال

۷ - نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار

خطوط مهار یکی از بخش‌های اصلی در سازه‌های شناور هستند. وظیفه اصلی خطوط مهار حفظ پایداری سازه‌های شناور در شرایط متغیر دریا است. برای افزایش کارایی خطوط مهار سیستم‌های مختلفی تاکنون پیشنهاد شده‌است. استفاده از خطوط مهار غیر زنجیری یا اضافه‌کردن تجهیزات اضافی روی خطوط مهار از جمله این پیشنهادها است. وزنه‌های معلق یکی از تجهیزاتی است که در سال‌های اخیر برای افزایش کارایی خطوط مهار پیشنهاد شده و مورد استقبال نیز قرار گرفته‌است. وزنه‌های معلق با اضافه‌کردن نیروهای موضعی به خطوط مهار کشش بیشتری را در خط مهار ایجاد کرده و سبب کنترل بیشتر حرکات سازه شناور می‌شود. براین‌اساس می‌توان گفت که اضافه‌کردن وزنه‌های معلق تأثیر دوگانه‌ای بر خطوط مهار یک سازه شناور دارد. از یک‌طرف با اضافه‌کردن نیروی کشش خطوط مهار به کنترل حرکات آن کمک کرده و از طرف دیگر با ایجاد کشش اضافی در خطوط مهار سبب افزایش احتمال خرابی آن خواهند شد. براین‌اساس در این تحقیق سعی شده‌است تا تأثیر اضافه‌کردن وزنه معلق بررسی شود.

بیشتر آب‌های سرزمینی ایران در محدوده خلیج‌فارس و دریای عمان دارای عمق کم تا متوسط است. در خلیج‌فارس برای استخراج و فراوری نفت سازه‌های مختلفی وجود دارد که نیمه مغروق‌ها دسته‌ای از این سازه‌های فراساحلی هستند. برای مهار نیمه مغروق‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

از خطوط مهار کاتنری استفاده می‌شود. در این تحقیق یک سازه نیمه مغروق به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده و وزنه‌های معلق بر روی خطوط مهار آن جهت برآورد تأثیر آنها اضافه شده‌است.

برای بررسی تأثیر هیدرودینامیکی اضافه‌کردن وزنه معلق دو حالت دریا شامل حالت دریای بدون موج و با موج نامنظم در نظر گرفته شده‌است. در تحلیل دریای بدون موج سه مورد نیروی بازگرداننده، کشش انتهای خط مهار شماره ۱ و دوره تناوب طبیعی حرکات سازه بررسی شده‌است. با بررسی موارد فوق می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

- نیروی بازگرداننده مهم‌ترین تأثیر خطوط مهار بر سازه شناور است. با قراردادن وزنه معلق بر خطوط مهار نیروی بازگرداننده خطوط مهار افزایش می‌یابد. این تأثیر با افزایش وزن وزنه و همچنین افزایش فاصله وزنه از سازه شناور افزایش می‌یابد. در حالتی که وزنه به بستر دریا نزدیک باشد در جابجایی سازه امکان تماس آن با بستر بیشتر شده و در نتیجه از تأثیر آن کاسته می‌شود. از دیدگاه نیروی بازگرداننده می‌توان گفت که وزنه معلق باید در فاصله مناسب از سازه و همچنین بستر دریا قرار داشته باشد.
- در آب آرام، با تغییر موقعیت وزنه در طول خطوط مهار شاهد تغییر قابل‌توجهی بر میزان کشش انتهایی خط مهار نخواهیم بود. براین‌اساس می‌توان گفت که موقعیت وزنه را بر اساس نیروی بازگرداننده تعیین نمود.
- تغییر وزن خطوط مهار با اضافه‌کردن وزنه معلق سبب تغییر دوره تناوب طبیعی حرکت سازه شناور می‌شود. اطلاع از این دوره تناوب با اطلاع از در شرایط نیروی تحریک امواج حائز اهمیت است. افزایش اندازه وزنه و همچنین افزایش فاصله آن از سازه سبب کاهش دوره تناوب طبیعی حرکت سازه می‌شود. موقعیت وزنه نسبت به‌اندازه آن تأثیر بیشتری در دوره تناوب طبیعی حرکت سازه دارد.

دومین تحلیل هیدرودینامیکی شامل دریای مواج با موج نامنظم با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله است. در این حالت یک وزنه معلق در دو موقعیت بر روی خطوط مهار در نظر گرفته شده و تأثیر وجود آن بررسی شده‌است. با بررسی نتایج در این حالت موارد ذیل را می‌توان به‌عنوان نتیجه بیان نمود:

- اضافه‌کردن وزنه معلق سبب کاهش قابل‌توجه حرکات سازه در موج نامنظم می‌شود.
- هم‌زمان با کاهش دامنه حرکات سازه، متوسط کشش مهار در سازه نمونه در امواج نامنظم به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. میزان افزایش در مقادیر حداکثر کشش مهار کمتر از میزان متوسط آن است.
- با تحلیل طیفی پاسخ حرکات سازه مشخص شد که اضافه‌کردن وزنه معلق بیشترین تأثیر را در فرکانس‌های پایین دارد. در فرکانس‌های بالا مقادیر طیفی پاسخ حرکات سازه تغییر چندانی نداشته‌است.
- با بررسی طیف کشش مهار سازه مشخص می‌شود که اضافه‌کردن وزنه معلق در هر دو محدوده فرکانس‌های پایین و فرکانس‌های بالا مؤثر بوده و سبب کاهش مقادیر طیف خواهد شد.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان موارد زیر را به‌عنوان پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه داد:

- بررسی تأثیر وزنه معلق در امواج منظم
- بررسی تأثیر وزنه معلق در خستگی خطوط مهار
- بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از وزنه معلق و بویه مغروق

۸ – مراجع

1- AZIMINIA, M., ABAZARI, A., BEHZAD, M. and HAYATDAVOODI, M.,(2022), *Stability analysis of parametric resonance in spar-buoy based on Floquet theory*, Ocean Engineering 266, p. 113090. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113090

2- ABAZARI, A., BEHZAD, M. and THIAGARAJAN, K.,(2021), *Hydrodynamic damping enhancement by implementing a novel combined rigid-elastic heave plate*, Journal of Marine Science and Technology 26, p. 216-232. http://dx.doi.org/10.1007/s00773-020-00732-7

3- ABAZARI, A., BEHZAD, M. and THIAGARAJAN, K. P.,(2022), *Experimental assessment of hydrodynamic coefficients for a heave plate executing pitch oscillations*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 148(1), p. 04021038. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.000068

4- ABAZARI, A., ALVANDI, M., BEHZAD, M. and THIAGARAJAN, K. P.,(2021), *Vortex shedding modes around oscillating non-uniform double heave plates*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 235(2), p. 558-569. https://doi.org/10.1177/1475090220966

5- ABAZARI, A. and AZIMINIA, M.,(2023), *Enhanced power extraction by splitting a single flap-type wave energy converter into a double configuration*, Renewable Energy Research and Applications 4(2), p. 243-249. https://doi.org/10.22044/rera.2022.11846.1118

6- ABAZARI, A.,(2023), *Dynamic response of a combined spar-type FOWT and OWC-WEC by a simplified approach*, Renewable Energy Research and Applications 4(1), p. 66-77. https://doi.org/10.22044/rera.2022.11768.1109

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]

7- GHARECHAE, A., ABAZARI, A. and KETABDARI, M. J.,(2022), *A semi-analytical solution for energy harvesting via the elastic motion of the circular floater of aquaculture cages attached with piezoelectric*, Renewable Energy 196, p. 181-194.
https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.093
8- FITZGERALD, J. and BERGDAHL, L.,(2007), in *Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal*.
9- YUAN, Z.-M., INCECIK, A. and JI, C.,(2014), *Numerical study on a hybrid mooring system with clump weights and buoys*, Ocean Engineering 88, p. 1-11.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.06.002
10- XU, S., JI, C.-Y. and SOARES, C. G.,(2019), *Estimation of short-term extreme responses of a semi-submersible moored by two hybrid mooring systems*, Ocean Engineering 190, p. 106388.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106388
11- MA, K.-T., LUO, Y., KWAN, C.-T. T. and WU, Y.,(2019), *Mooring system engineering for offshore structures*, Gulf Professional Publishing.
12- LIU, Z., TU, Y., WANG, W. and QIAN, G.,(2019), *Numerical analysis of a catenary mooring system attached by clump masses for improving the wave-resistance ability of a spar buoy-type floating offshore wind turbine*, Applied Sciences 9(6), p. 1075.
https://doi.org/10.3390/app9061075
13- BRUSCHI, N., FERRI, G., MARINO, E. and BORRI, C.,(2020), *Influence of clumps-weighted moorings on a spar buoy offshore wind turbine*, Energies 13(23), p. 6407.
https://doi.org/10.3390/en13236407
14- ZHANG, L., MICHAILIDES, C., WANG, Y. and SHI, W.,(2020), in *Structures*. Elsevier, vol. 28, p. 1435-1448.
https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.067
5- XU, K., *et al.*,(2021), *Design and comparative analysis of alternative mooring systems for floating wind turbines in shallow water with emphasis on ultimate limit state design*, Ocean Engineering 219, p. 108377.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108377
16- RINALDI, G., GORDELIER, T., SANSOM, M. and JOHANNING, L.,(2021), *Development of a modular mooring system with clump weights*, Ocean Engineering 223, p. 108536.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108536
17- NEISI, A., GHASSEMI, H., IRANMANESH, M. and HE, G.,(2022), *Effect of the multi-segment mooring system by buoy and clump weights on the dynamic motions of the floating platform*, Ocean Engineering 260, p. 111990.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111990
18- LOPEZ-OLOCCO, T., *et al.*,(2022), *Experimental and numerical study of the influence of clumped weights on a scaled mooring line*, Journal of Marine Science and Engineering 10(5), p. 676.
https://doi.org/10.3390/jmse10050676
19- DING, W., AI, C., JIN, S. and LIN, J.,(2020), *3D numerical investigation of forces and flow field around the semi-submersible platform in an internal solitary wave*, Water 12(1), p. 208.
https://doi.org/10.3390/w12010208
20- DIZNAB, M. D., MOHAJERNASSAB, S., SEIF, M., TABESHPOUR, M. and MEHDIGHOLI, H.,(2014), *Assessment of offshore structures under extreme wave conditions by modified endurance wave analysis*, Marine structures 39, p. 50-69.
https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.06.003
21- BAGHERNEZHAD, N., EDALAT, P. and ETEMADDAR, M.,(2017), *Hull Performance Assessment and Comparison of Ship-Shaped and Cylindrical FPSOs With Regards To: Stability, Sea-Keeping, Mooring and Riser Loads In Shallow Water*, International Journal of Maritime Technology 8, p. 1-13.
10.29252/ijmt.8.1
22- DNV, G.,(2010), *DNV-RP-C205*, Environmental conditions and environmental loads.
23- DNVGL, P. M. D.-O.-E., ” 2018,(
24- XU, S., JI, C. and SOARES, C. G.,(2018), *Experimental study on taut and hybrid moorings damping and their relation with system dynamics*, Ocean Engineering 154, p. 322-340.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.085
25- JI, C. and YUAN, Z.,(2015), *Experimental study of a hybrid mooring system*, Journal of Marine Science and Technology 20, p. 213-225.
https://doi.org/10.1007/s00773-014-0260-7

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.2]