مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 209-218

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر اندازه بویه بر پاسخ فرکانسی و زمانی در سیستم مهار کاتناری سکوی نیمه مغروق

مرتضی دردل[1*]، حمیدرضا غفاری[2]، سید وحید سپهر موسوی[3]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- دانشجوی دکتری، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* بابل، صندوق پستی 484، dardel@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 03 آذر 1396
پذیرش: 27 دی 1396
ارائه در سایت: 05 بهمن 1396

کلید واژگان:
سکوی نیمه مغروق
بویه
سیستم مهار کاتناری
تئوری سه بعدی تفرق/انتشار

چکیده

با توجه به کاهش منابع طبیعی آب‌های کم‌عمق، توسعه اکتشاف و تولید به سمت منطقه آب‌های عمیق و عمیق‌تر منتقل شده است. انواع سازه‌های شناور وقتی به عنوان سکوهای تولیدی مشغول به عملیات هستند نیازمند مهار می‌باشند. استفاده از بویه در سیستم مهار کاتناری برای اعماق زیاد دریا می تواند موجب کاهش وزن و شعاع مهار گردد. در این مقاله پاسخ دینامیکی سکوی نیمه شناور امیرکبیر تحت تأثیر نیروهای باد و امواج در حوزه فرکانس و حوزه زمان محاسبه گردیده است. طیف موج جانسوآپ و طیف باد API به عنوان شرایط محیطی در نظر گرفته شده است و همچنین تأثیر اندازه بویه بر روی پاسخ حرکت سکوی نیمه شناور بررسی شده است. پاسخ دینامیکی سکوی نیمه شناور با استفاده از معادلات موریسون و تئوری تفرق محاسبه گردیده است و هر کابل مهار به‌صورت زنجیره‌ای از المان‌های موریسون تحت تأثیر نیروی خارجی مدل شده است. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار آکوا در حوزه زمان و حوزه فرکانس نشان می‌دهد که با افزایش اندازه بویه می‌تواند باعث افزایش حرکات سکوی نیمه شناور شده و در عوض باعث کاهش تنش‌های وارده بر کابل می باشد.

Effects of Buoy size on the frequency and time response in catenary mooring systemof the semi-submersible platform

Morteza Dardel*, Hamidreza Ghafari[1], Seyed Vahid Sepehr Mousavi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3- Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 484, Babol, Iran, dardel@nit.ac.ir.

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 November 2017
Accepted 17 January 2018
Available Online 25 January 2018

Keywords:
Semi-submersible
Buoy
catenary mooring system
three-dimensional radiation/diffraction theory

ABSTRACT

Due to the depletion of shallow water resources, the development of exploration and production has shifted towards the deep and ultra-deep water region. The types of floating platforms are all need to be moored when they are working as production platforms. Applying buoys to the catenary mooring system in deep water may reduce part of the weight and radius of a mooring. In this article, Dynamic responses of the Amirkabir semi-submersible platform was obtained under the combination of wind and wave loads in frequency domain and time domain simulation calculated. The JONSWAP wave spectrum and API wind spectrum are considered as environmental conditions, and also the effects of buoy size on the semisubmersible motion response are investigated. Dynamic responses of the semi-submersible platform determine by using the Morison equation and diffracting theory in AQWA ANSYS software and each dynamic mooring line is modeled as a chain of Morison-type elements subjected to various external forces. The obtained result from AQWA ANSYS in time and frequency domain shows that increasing buoy size, could increase motions of the semisubmersible platform but instead could decreasing the mooring line tension.

1- مقدمه

انواع سکوهای شناور وقتی که به‌عنوان سکوهای استخراج به کار گرفته می‌شوند نیازمند مهار[1] هستند. مهارهای زنجیری کاتناری[2] به‌طور معمول در بسیاری از مهاربندی‌ها و لنگراندازی در اعماق آب‌های کم عمق و متوسط استفاده می‌شود. با افزایش عمق آب، وزن زنجیر و کابل بیش از حد بزرگ شده و نیروهای عمودی که مهارها بر شناورهای مهار شده وارد می‌کنند افزایش می‌یابد و البته با افزایش طول این کابل‌ها هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابد و از لحاظ اقتصادی استفاده از چنین سیستمی مقرون به صرفه نیست. یکی از روش‌های حل مشکل وزن کابل‌های مهار به کار رفته در آب‌های عمیق استفاده از طناب‌های الیاف مصنوعی به‌جای سیم‌های سنگین و تغییر سیستم کابل‌های کاتناری به سیستم کابل‌های کشیده شده مستقیم است. گرچه این نوع سیستم ممکن است امنیت سیستم کابل مهار زنجیری کاتناری را نداشته باشد. در سیستم مهار کاتناری بخشی از زنجیر بر روی بستر اقیانوس قرار گرفته که موجب افزایش اطمینان این نوع سیستم‌ها تحت شرایط محیطی

[1] mooring
[2] catenary

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Dardel, H. Ghafari, S. V. Sepehr Mousavi, Effects of Buoy size on the frequency and time response in catenary mooring systemof the semi-submersible platform, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 209-218, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

بسیار سخت اقیانوس، نسبت به سیستم کابل‌های کشیده شده مستقیم می‌شود. استفاده از بویه[1] در سیستم کابل‌های زنجیری کاتناری می‌تواند یکی دیگراز روش‌های مؤثر برای حل مشکل وزن کابل‌ها باشد.

با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی صورت گرفته بر روی کابل‌های مهار همراه با بویه و مقایسه با کابل‌های مهار زنجیره‌ای قدیمی، مزایای استفاده از بویه در سیستم کابل‌های زنجیری منحنی شکل کاتناری می‌تواند شامل کاهش وزن سنگین زنجیر و سیم یک سیستم مهار، کاهش پیش تنش، همچنین کاهش شعاع کابل مهار، کاهش اثرگذاری نصب دیگر کابل‌ها، از بین بردن قسمتی از نیروی بازگردان و توانایی مقاومت بیشتر در برابر نیروهای سخت‌تر اقیانوس می‌باشد، در همین حال، معایب استفاده از بویه در سیستم کابل‌های کاتناری نیز شامل افزایش مدت زمان فرآیند نصب، احتمال بروز آسیب به بویه‌ها و ایجاد ویژگی‌های دینامیکی پیچیده‌تر نسبت به کابل مهار ترکیبی است.

مطالعات در مورد دینامیک کابل‌های دریایی همراه با بویه توسط بسیاری از محققان از سال‌های پیش آغاز شده است. ناکاجیما و همکاران [1] با استفاده از روش تفاضل محدود به محاسبه پاسخ دینامیکی کابل‌های مهار چندبخشی شامل بویه‌ها پرداختند. ماوراکوس و همکاران [2-4] به مطالعه تأثیرات بویه‌ها نظیر تعداد، اندازه و موقعیت اتصال بر روی تنش دینامیکی کابل‌های مهار به‌صورت عددی و تجربی پرداختند. وانگ [5] تحلیل استاتیکی کابل، زنجیر و بویه سیستم مهار را بررسی کرد و تأثیر کشیدگی کابل، اندازه و وزن بویه را به دست آورد.

وان و بروئن [6] به مقایسه روش‌های محاسبه دینامیکی حوزه فرکانس، حوزه زمانی و روش شبه استاتیکی با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند و همچنین نشان دادند که در محاسبه مسائل غیرخطی در تحلیل دینامیکی کابل‌های مهار دارای بویه باید روش حوزه زمانی مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیقات صورت گرفته توسط برخی از پژوهش‌گران بر روی کابل‌های مهار به‌طور عمده بر روی آنالیز کششی دینامیکی سیستم‌های کابل مهار تاکید شده است. مطالعات متعدد نشان می‌دهند که دینامیک سیستم مهار به شدت به پارامترهای طراحی خاص، مانند تعداد خطوط مهار، موقعیت مهار بر روی شناور، مواد، جهت‌گیری خطوط مهار و غیره بستگی دارد.. تحقیقات صورت گرفتهدر مورد دینامیک کابل‌های دریایی توسط بسیاری از محققان ازسال‌های پیش آغاز شده است. مظاهری و اینچچیک در سال 2004 از روش پاسخ محور برای پیش‌بینی نیروی مهاربندی استفاده کردند[7]. جوردان و برتلان آگوئدو در سال 2004 با ارائه یک الگوریتم انطباقی حساس به عمق، تخمین آنلاین ضرایب فیزیکی یک کابل را در محیط لزج میسر ساخته که ورودی‌های این الگوریتم نیروها و موقعیت‌هایی است که توسط تجهیزاتی روی خود شناور اندازه‌گیری شده‌اند [8]. گرت در سال 2005 با مطالعه یک سکوی نیمه شناور مهار شده در عمق 1800 متری خلیج مکزیک، تحلیل دینامیکی هم‌زمان را به دو روش دامنه فرکانسی و دامنه زمانی انجام داد [9]. پیتر دیویس و همکاران در سال 2008 تأثیر سختی الیاف در تعیین پاسخ‌های خطوط مهاربند در آب‌های عمیق را مورد بررسی قرار دادند [10]. استانسبرگ در سال 2008 تأثیر جریان به تنهائی و تأثیر جریان توأم با امواج را بر یک سازه شناور مهار شده در شرایط مختلف دریا بررسی نمود [11]. هیولانگ و همکاران در سال 2009 تأثیر سختی غیرخطی مهاربند در پاسخ هیدرودینامیک سازه شناور را مورد مطالعه قرار داده و فرمول جدیدی را برای ماتریس سختی غیرخطی برای مهاربند زنجیروار ارائه دادند [12]. اولاف والس در سال 2009 تأثیر جهت امواج بر حرکت‌های با فرکانس پائین سازه شناور و همچنین نیروی مهاربندها را مورد بررسی قرار داد [13]. تام لاسن و همکاران در سال 2009 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 [14]. ژانگ سو و همکاران نیز در سال 2009 مشکلات ناشی از شل شدن خطوط مهاربندی به دلیل کاهش کشش را مورد بررسی قرار دادند [15].

حسنی منش و کتابداری در سال 1395 به بررسی رفتار شناور FPSO در امواج منظم به در نظر گرفتن مهار سکو پرداختند. در این پژوهش پاسخ دینامیکی حرکتی سکو در 6 درجه آزادی مورد ارزیابی قرار گرفت [16]. کتابداری و صمدی سیستم مهار یک نمونه سکوی اسپار غیرکلاسیک اصولی را با بکارگیری تئوری تفرق سه‌بعدی در نرم‌افزار موزز مورد انالیز قرار دادند. پریود طبیعی حرکات سکو با مهارکاتناری نیز استخراج گردید و نشان داده شد که بیشینه حرکات سازه در دوره تناوب 18 ثانیه اتفاق افتاده است که مرتبط با پاسخ‌های حرکتی سکو به نیروهای هیدرودینامیکی امواج برخوردی با زاویه صفردرجه است [17]. کتابداری و شکهولایی با به‌کارگیری الگوریتم شبکه عصبی به بررسی تخمین تابع رفتار سکو و سیستم مهاربندی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که شبکه عصبی تعلیم‌یافته به خوبی توانسته است رفتارسکوی نیمه شناور را با تقریب بسیار مناسبی پیش‌بینی نمایند [18]. اثرات چیدمان خطوط مهار بر روی پاسخ هیدرودینامیکی سکوی اسپار خرپایی در مقیاس واقعی به‌صورت عددی و با استفاده از تئوری تفرق توسط کتابداری و همکاران مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که اثرات چیدمان‌های مختلف مهار بر روی دامنه حرکات در پریودهای کوچک ناچیز و در پریودهای بزرگتر قابل ملاحظه است همچنین دامنه حرکات با افزایش زاویه مهار نسب به موج از صفر تا چهل و پنج درجه افزایش می‌یابد [19]. پروره و همکاران نیز به مطالعه تاثیر زاویه برخورد امواج بر روی پاسخ دینامیکی سکوی مهار شده با 3 خط کانتاری پرداختند در این بررسی از نرم‌افزار المان مرزی موزز نتایج حوزه فرکانس پاسخ سکو مورد ارزیابی قرار گرفت [20].

دینامیک خط مهار با نقاط لنگرهای جاسازی شده در کف دریا توسط ژیونگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [21]. به این ترتیب آن‌ها ظرفیت مناسب برای نگه‌داری را مورد ارزیابی قرار دادند. منتاسیر و همکاران [22]. اثرات ساختار خط مهار بر پاسخ دینامیک سکوهای خرپایی را بررسی نمودند. آن‌ها چینش ساختار مهار برای بدست آوردن مطلوب‌ترین پاسخ سیستم را مورد بررسی قرار دادند. آزکونا و همکاران [23] یک مطالعه کامل از دینامیک مهار را انجام دادند. آن‌ها در ابتدا یک کد شبیه‌سازی براساس روابط جرم متمرکز را ارایه داده و سپس آن‌را برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی کردند. کد توسعه داده شده قابلیت پیش‌بینی کشش و انعطاف‌پذیری را داشته است.

در این مقاله تأثیر اندازه بویه بر روی مهار کاتناری جهت محاسبه پاسخ دینامیکی یک سکوی نیمه مغروق مشتمل بر 8 کابل مهار دارای آرایش 45 درجه با استفاده از نرم‌افزار آکوا بررسی شده است. برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی یک سازه بزرگ حجیم در امواج، روش پانل سه‌بعدی رایج‌ترین ابزار عددی است. این روش براساس تئوری پتانسیل سیال است و سطح سازه را توسط یک سری از پانل‌های تفرق[2] نمایش می‌دهد. روش

[1] Buoy

[2] diffracting panels

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

معادله موریسون نیز به طور گسترده‌ای برای اجزای بدنه که بلند و باریک می‌باشند، استفاده می‌شود.بنابراین به کار گیری هم زمان و ترکیبی از روش های تئوری تفرق سه‌بعدی و معادلات موریسون که در نرم‌افزار آکوا[1] انسیس انجام می‌پذیرد و همچنین تحلیل و بررسی پاسخ حرکت سازه مهار شده به‌صورت دینامیکی و در دو حوزه فرکانسی و زمانی و همچنین وجود بویه بر روی سیستم مهار، وجه تمایز این تحقیق نسبت به مطالعات صورت گرفته بر روی سازه های مهار شده با ترکیب کابل و زنجیر و بویه می باشد.

2- معرفی سکوی نیمه مغروق امیرکبیر و سیستم مهار

2-1- سکوی نیمه مغروق امیرکبیر

سکوی نیمه مغروق امیرکبیر مدل GVA 4000M است که توسط شرکت GVA سوئد طراحی و در کارخانه صدرای نکا و تحت کلاس DNV ساخته شده است. این سکو پایداری هیدرو استاتیک خود را از طریق مخازن بالاست تعبیه شده در ستون‌هایش تأمین می‌کند. ممان اینرسی سکوی امیرکبیر با استفاده از نرم‌افزار انسیس محاسبه و به همراه مشخصات هندسی در "جدول 1" آورده شده است. سکو برای عمق 1000 متری بررسی شده است. عمق آبخور در حالت عملیات با وزن جابجایی 28621 تن، برابر 19.5 متر، فاصله آزاد زیر عرشه 9 متر و همچنین چگالی ویژه آب 1.01 (تن بر متر مکعب) است [24].

در "شکل 1" نمای مش خورده سکوی نیمه مغروق امیرکبیر در نرم‌افزار آکوا انسیس نشان داده شده است.

2-2- سیستم مهاربندی

موقعیت سکو توسط 8 خط مهار متشکل از کابل و زنجیر با آرایش 45 درجه نسبت به یکدیگر و لنگرهای 20 تنی حفظ می‌گردد. مشخصات مربوط به مهار مورد استفاده در این تحلیل در "جدول 2" نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی سکوی نیمه مغروق امیرکبیر

Table1 Geometricdimensions of the Amirkabir semi-submersible

پارامتر	واحد	مقدار
طول کل	متر	98.6
عرض کل	متر	78.84
عرض خارج از پانتون	متر	73.4
طول پانتون	متر	80.56
عرض پانتون	متر	18.68
ارتفاع پانتون	متر	7.5
ارتفاع تا کف عرشه	متر	28.5
ارتفاع تا سقف عرشه	متر	36.5
قطر ستون‌ها	متر	12.9
فاصله طولی بین ستون‌ها	متر	54.72
فاصله عرضی بین ستون‌ها	متر	54.72
قطر بریس[2]	متر	2
ارتفاع مهار تا کف	متر	11.2
I_{xx}	کیلوگرم مترمربع	2.24×1010
I_{yy}	کیلوگرم مترمربع	1.99×1010
I_{zz}	کیلوگرم مترمربع	3.16×1010

[1] AQWA
[2] Brace

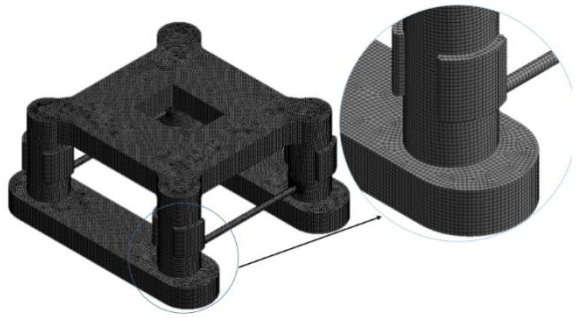

Fig.1 Meshing of semi-submersible platform in the ANSYS/AQWA

شکل 1 نمای مش خورده سکوی نیمه مغروق امیرکبیر در نرم‌افزار آکوا

جدول 2 مشخصات فیزیکی مهار مورد استفاده

Table 2 Mooring line properties

مؤلفه	واحد	بخش پایینی	بخش میانی	بخش بالایی
نوع	-	زنجیر پین دار	کابل	زنجیرپین دار
کیفیت	-	S3R	IWRS	S3R
طول	متر	1200	1000	500
قطر	میلی‌متر	76	86	76
مدول الاستیسیته	گیگاپاسکال	56	70	56
وزن در آب	کیلونیوتن/متر	1.08	0.26	1.08
مقاومت شکست	کیلونیوتن	5454	5101	5454

3- مساله

به‌منظور بررسی تأثیر اندازه بویه قرار گرفته بر روی خط مهار سکوی نیمه مغروق در پاسخ دینامیکی سکوی نیمه مغروق چهار نمونه مختلف بویه کروی شکل به ترتیب با قطرهای 2.2، 2.4، 2.6 و 2.8 متر انتخاب گردیده است.در "شکل 2" نمای شماتیک از آرایش سیستم مهار به‌صورت‌های نمای از بالا و همچنین نمایش تنها یک مهار، آن هم در چهار حالت مورد بررسی به‌صورت هم زمان و در نمای از پهلو آورده شده است. قابل ذکر است که خط چین نشان داده شده در شکل به‌عنوان زنجیر و خطوط میانی به‌عنوان کابل مورد استفاده در سیستم مهار در نظر گرفته می‌شود. محل قرارگیری بویه‌ها در تمامی چهار حالت یکسان و در فاصله 500 متری از سکو و دقیقا بر روی محل اتصال کابل و زنجیر بالایی در نظر گرفته شده است. تفاوت میان اندازه بویه بر روی حالت قرارگیری سیستم مهار به خوبی نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش اندازه بویه حالت قرارگیری مهار تغییر می‌یابد. براساس اطلاعات مربوط به امواج دریای خزر طیف موج مناسب برای شرایط دریای خزر از نوع طیف موج نامنظم جانسواپ[3] می‌باشد که برای محاسبه پاسخ وارد بر سکوی نیمه مغروق امیرکبیر در نظر گرفته شده است. بر این اساس ارتفاع شاخص موج 10.5 متر با دوره تناوب موج 11.53 ثانیه و سرعت باد 38 متر بر ثانیه و همچنین سرعت جریان 1.26 متر بر ثانیه در راستای صفر درجه شمالی می‌باشد.

4- معادلاتاساسی حاکم

4-1- معادلات هیدرودینامیکی سکوی شناور

در این تحقیق مدل‌سازی عددی پاسخ دینامیکی سکوی نیمه مغروق امیرکبیر تحت تاثیر شرایط محیطی دریا در عمق ثابت و با فرض ایده‌آل و

[3] JONSWAP

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

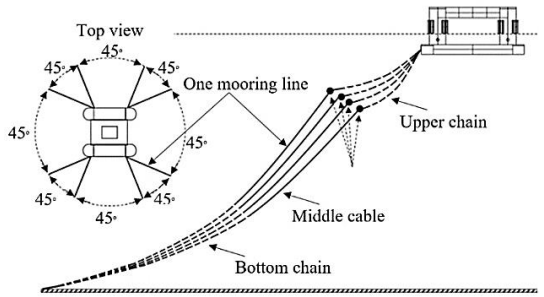

Fig. 2 The location of buoys in the mooring system for 4 case studies

شکل 2 موقعیت بویه‌ها در سیستم مهار برای 4 نمونه مورد بررسی

تراکم ناپذیر بودن سیال و در نظر گرفتن معادله لاپلاس به عنوان معادله حاکم انجام گرفته است. میدان جریان سیال اطراف جسم شناور توسط یک پتانسیل سرعت به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\Phi\left(\vec{X},t\right) = a_w \varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \tag{1}$$

در معادله بالا a_w دامنه موج برخوردی و ω فرکانس موج است. همچنین عبارت $\varphi(\vec{X})$ به مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده امواج تشعشع[1] ناشی از شش حالت عمومی حرکت جسم، موج برخوردی[2] و موج تفرق[3] تفکیک می‌شوند. توابع پتانسیل به‌صورت مختلط است؛ اما مقادیر فیزیکی نتایج مانند فشار سیال و حرکات جسم در تحلیل حوزه زمان با در نظر گرفتن تنها بخشی حقیقی به دست خواهد آمد. پتانسیل ناشی از امواج تحریک، تفرق و تشعشع به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} = \left[(\varphi_1 + \varphi_d) + \sum_{j=1}^{6} \varphi_{rj} x_j\right] e^{-i\omega t} \tag{2}$$

در معادله (2) عبارت φ_1 پتانسیل موج برخوردی مرتبه اول با دامنه موج واحد، φ_d پتانسیل موج تفرق متناظر، φ_{rj} پتانسیل موج تشعشع ناشی از حرکت jام با دامنه حرکتی واحد می‌باشد. هنگامی که پتانسیل سرعت موج معلوم باشد، توزیع فشار هیدرودینامیکی مرتبه اول با استفاده از معادله خطی برنولی محاسبه خواهد شد.

$$p^{(1)} = -\rho \frac{\partial \Phi\left(\vec{X},t\right)}{\partial t} = i\omega\rho\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} \tag{3}$$

با استفاده از توزیع فشار، نیروهای متغیر سیال با انتگرال فشار بر روی سطوح خیس بدنه محاسبه می‌گردند.برای به دست آوردن شکل کلی نیروها و گشتاورهای وارده بر بدنه شناور ابتدا بردار یکه عمود بر سطوح بدنه با 6 مؤلفه متناظر با حرکات جسم صلب ارائه می‌گردد به طوری که:

$$\begin{aligned}\left(n_1, n_2, n_3\right) &= \vec{n}\\ \left(n_4, n_5, n_6\right) &= \vec{r} \times \vec{n}\end{aligned} \tag{4}$$

در معادله (4)، $\vec{r} = \vec{X} - \vec{X}_g$ بردارمکان در یک نقطه بر روی سطح بدنه نسبت به مرکز جرم در سیستم مختصات کلی است. با در نظر گرفتن این نکته مؤلفه‌های نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی مرتبه اول می‌تواند به صورت فرم کلی زیر نوشته شود.

$$F_j e^{-i\omega t} = -\int_{S_0} p^{(1)} n_j dS = \left[-i\omega\rho \int_{S_0} \varphi(\vec{X}) n_j dS\right] e^{-i\omega t} \tag{5}$$

در معادله (5)، S_0 بیانگر سطح خیس متوسط بدنه شناور است.

[1] Radiation
[2] Incident wave
[3] Diffraction

با استفاده از معادله (2)، نیروی هیدرودینامیکی کل مرتبه اول به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$F_j = \left[\left(F_{Ij} + F_{dj}\right) + \sum_{k=1}^{6} F_{rjk} x_k\right] \text{ که } j = 1, \dots, 6 \tag{6}$$

نیروی فرود-کریلف jامناشی از موج برخوردی:

$$F_{Ij} = -i\omega\rho \int_{S_0} \varphi_I(\vec{X}) n_j dS \tag{7}$$

نیروی تفرق jام ناشی از تفرق موج:

$$F_{dj} = -i\omega\rho \int_{S_0} \varphi_d(\vec{X}) n_j dS \tag{8}$$

نیروی تشعشع jام ناشی از تشعشع موج با دامنه واحد در حرکت kام جسم صلب بدین صورت است.

$$F_{rjk} = -i\omega\rho \int_{S_0} \varphi_{rk}(\vec{X}) n_j dS \tag{9}$$

نیروهای سیال می‌تواند بیشتر در قالب مؤلفه‌های عمل و عکس‌العمل توضیح داده شود. نیروی عمل و یا نیروی تحریک موج، از نیروی فرود-کریلف و نیروی تفرق به وجود می‌آید. نیروی عکس‌العمل از نیروی تشعشع ناشی از امواج تشعشع تولید شده از حرکات جسم شناور به وجود می‌آید.

پتانسیل تفرق موج، φ_{rk}، دارای قسمت‌های حقیقی و موهومی است و با جایگزینی در معادله (9) جرم افزوده و ضریب میرایی موج به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}F_{rjk} &= -i\omega\rho \int_{S_0} \{\mathrm{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] + i\mathrm{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})]\} n_j dS\\ &= \omega\rho \int_{S_0} \mathrm{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS\\ &\quad - i\omega\rho \int_{S_0} \mathrm{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS\end{aligned} \tag{10}$$

به طوری که جرم افزوده و میرایی به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned}A_{jk} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_0} \mathrm{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS\\ B_{jk} &= -\rho \int_{S_0} \mathrm{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS\end{aligned} \tag{11}$$

اگر یک مسئله نیازمند بارگذاری موج بر یک جسم ثابت باشد، تنها نیروهای عمل موج وجود دارند. هنگامی که جسم شناور باشد، هر دو نیروهای عمل و عکس‌العمل سیال باید در نظر گرفته شود. شایان ذکر است که تمام نیروهای سیال محاسبه شده در بالا تنها تابع سطح خیس هندسه جسم هستند و مستقل از خصوصیات جرمی سازه است.

با فرض ایده‌آل بودن سیال و به‌کارگیری تئوری خطی هیدرودینامیک، برای محاسبه تشعشع و تفرق امواج، رفتار متقابل سیال و سازه توسط مجموعه معادلات زیر در مختصات مرجع ثابت توصیفمی‌گردد.تابع پتانسیل برای جریان تراکم‌ناپذیر، غیر- ویسکوز و غیر- چرخشی از حل معادله لاپلاس به‌دست می‌آید که در همه جای دامنه سیال، Ω به‌صورت معادله زیر قابل استفاده است [25].

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Z^2} = 0 \tag{12}$$

شرط مرزی روی سطح آزاد از معادله زیر پیروی می‌کند.

$$-\omega^2\varphi + g\frac{\partial\varphi}{\partial Z} = 0 \text{ در } Z = 0 \tag{13}$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

شرط مرزی سطح بدنه در سطح خیس متوسط بدنه S_0:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n}=\begin{cases}-i\omega n_j & \text{برای پتانسیل تشعشع}\\ -\frac{\partial\varphi}{\partial n} & \text{برای پتانسیل تفرق}\end{cases} \tag{14}$$

در عبارت بالا φ_1 نشان دهنده تابع پتانسیل سرعت برای توصیف سیستم موج سینوسی ورودی اولی هاست. شرط مرزی بستر دریا در عمق dنیز به صورت زیر است:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial Z}=0 \quad \text{در } Z=-\mathrm{d} \tag{15}$$

شرط تشعشع مناسب باید به این معادلات اضافه گردد. به طوری که با دور شدن موج از سازه: $\sqrt{x^2+y^2}\to\infty$ آشفتگی موج تعمیم یافته از بین می‌رود. نرم‌افزار آکوا تمامی ضرایب هیدرودینامیکی مانند جرم افزوده، ماتریس میرایی و دیگر مشخصات هیدرودینامیکی را به دست آورده و ذخیره می‌نماید. برای حل تابع پتانسیل سرعت سیال که توسط شرایط بالا کنترل می‌شود یک روش انتگرال‌گیری مرزی درآکوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش حوزه فرکانس ضربان‌دار تابع گرین معرفی شده است که از شرایط مرزی سطح آزاد خطی، شرط بستر دریا و شرط تشعشع میدان دور داده شده در معادله (13) و معادله (15)، پیروی می‌کند و شرایط زیر در میدان سیال برآورده می‌شود:

$$\Delta G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)=\frac{\partial^2 G}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 G}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2 G}{\partial Z^2}=\delta\left(\vec{X}-\vec{\xi}\right) \text{ که } X\epsilon\Omega \text{ و } \xi\epsilon\Omega \tag{16}$$

$\vec{\xi}=(\xi,\eta,\zeta)$ نشان‌دهنده مکان یک چشمه است و تابع دلتای دیراک به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\delta\left(\vec{X}-\vec{\xi}\right)=\begin{cases}0 & \text{که } \vec{X}-\vec{\xi}\neq 0\\ \infty & \text{که } \vec{X}-\vec{\xi}=0\end{cases} \tag{17}$$

تابع گرین نیز به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned}G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)&=\frac{1}{r}+\frac{1}{r_2}\\&+\int_0^\infty\frac{2(k+v)e^{-kd}\cosh[k(Z+d)]\cosh[k(\zeta+d)]}{k\sinh(kd)-v\cosh(kd)}j_0(kR)dk\\&+i2\pi\frac{(k_0+v)e^{-k_0d}\cosh[k_0(Z+d)]\cosh[k_0(\zeta+d)]}{\sinh(k_0d)+k_0d\cosh(k_0d)-vd\sinh(k_0d)}\\&j_0(k_0R)\end{aligned} \tag{18}$$

به طوری که J_0 تابع بسل نوع اول است و همچنین:

$$\begin{aligned}&R=[(X-\xi)^2+(Y-\eta)^2]^{\frac{1}{2}}\\&r=[R^2+(Z-\zeta)^2]^{\frac{1}{2}}\\&r_2=[R^2+(Z+\zeta-2d)^2]^{\frac{1}{2}}\\&v=\frac{\omega^2}{g}\\&k_0\tanh(k_0d)=v\end{aligned} \tag{19}$$

با استفاده از قضیه گرین، پتانسیل سرعت امواج تفرق و تشعشع می‌تواند به صورت معادله انتگرال فردهلم نوع دوم بیان شود:

$$c\varphi\left(\vec{X}\right)=\int_{S_0}\left\{\varphi\left(\vec{\xi}\right)\frac{\partial G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)}{\partial n\left(\vec{\xi}\right)}-G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)\frac{\partial\varphi\left(\vec{\xi}\right)}{\partial n\left(\vec{\xi}\right)}\right\}dS \tag{20}$$

در معادله بالا مقدار c به صورت زیر است.

$$c=\begin{cases}0 & \vec{X}\notin\Omega\cup S_0\\ 2\pi & \vec{X}\in S_0\\ 4\pi & \vec{X}\in\Omega\end{cases} \tag{21}$$

با معرفی توزیع چشمه بر روی سطح خیس متوسط، پتانسیل سیال به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\varphi\left(\vec{X}\right)=\frac{1}{4\pi}\int_{S_0}\sigma\left(\vec{\xi}\right)G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)dS \text{ که } \vec{X}\in\Omega\cup S_0 \tag{22}$$

که در آن قدرت چشمه بر روی سطح خیس متوسط بدنه را می‌توان با شرایط مرزی سطح بدنه که در معادله (14) داده شده است، به صورت زیر تعیین نمود.

$$\begin{aligned}\frac{\partial\varphi\left(\vec{X}\right)}{\partial n\left(\vec{X}\right)}&=-\frac{1}{2}\sigma\left(\vec{X}\right)\\&+\frac{1}{4\pi}\int_{S_0}\sigma\left(\vec{\xi}\right)\frac{\partial G\left(\vec{X},\vec{\xi},\omega\right)}{\partial n\left(\vec{X}\right)}dS \text{ که } \vec{X}\in S_0\end{aligned} \tag{23}$$

روش پانل ثابت هس- اسمیت[1] در نرم‌افزار آکوا- انسیس برای حل معادله فوق که در آن سطح خیس متوسط یک جسم شناور به پانل‌های چهارگوش یا مثلثی تقسیم شده است به کار گرفته می‌شود. به این صورت فرض می‌گردد که پتانسیل و قدرت چشمه در هر پانل ثابت باشد و به‌عنوان مقدار متوسط متناظر سرتاسر سطح پانل در نظر گرفته شود. در نهایت فرم انتگرال گسسته معادله (22) و معادله (23) به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned}&\varphi\left(\vec{X}\right)=\frac{1}{4\pi}\sum_{m=1}^{N_p}\sigma_m G\left(\vec{X},\vec{\xi}_m,\omega\right)\Delta S_m \text{ که } \vec{X}\in\Omega\cup S_0\\&\frac{\partial\varphi\left(\vec{X}_k\right)}{\partial n\left(\vec{X}_k\right)}=-\frac{1}{2}\sigma_k\\&+\frac{1}{4\pi}\sum_{m=1}^{N_p}\sigma_m\frac{\partial G\left(\vec{X}_k,\vec{\xi}_m,\omega\right)}{\partial n\left(\vec{X}_k\right)}\Delta S_m \text{ که } \vec{X}_k\in S_0, k=1,\dots,N_p\end{aligned} \tag{24}$$

در معادله (24) N_p تعداد کل پانل بر روی سطح خیس متوسط، ΔS_m سطح پانل mام و $\vec{\xi}_m$ و $\vec{X}_k$ به ترتیب مختصات مرکز هندسی پانل از پانل‌های mام و kام هستند.

2-4- معادلات سیستم مهار

به منظور بررسی نیروهای وارد بر کابل، هر خط مهار دینامیکی به عنوان یک زنجیره از المان‌های نوع موریسون تحت اثر نیروهای مختلف خارجی مدل می‌گردد. نیروهای هر المان از کابل مستقیماً درون یک سیستم کلی محاسبه و سپس ترکیب می‌شوند و با انتگرال در زمان تعیین می‌گردند."شکل 3" نیروهای وارد بر یک المان از کابل را نشان می‌دهد.

معادله حرکت یک المان کابل به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\vec{T}}{\partial s_e}+\frac{\partial\vec{V}}{\partial s_e}+\vec{w}+\vec{F}_h=m\frac{\partial^2\vec{R}}{\partial t^2}\\&\frac{\partial\vec{M}}{\partial s_e}+\frac{\partial\vec{R}}{\partial s_e}\times\vec{V}=-\vec{q}\end{aligned} \tag{25}$$

که در آن mجرم سازه در واحد طول، $\vec{q}$بارگذاری گشتاور توزیع شده در واحد طول، $\vec{R}$ بردار مکان اولین گره از المان کابل، ΔS_e و De به ترتیب طول و قطر المان، $\vec{w}$ و $\vec{F}_h$ وزن المان و بردار نیروی هیدرودینامیکی خارجی در واحد طول المان، $\vec{T}$ بردار نیروی تنش در اولین نقطه المان، $\vec{M}$ بردار گشتاور خمشی در اولین نقطه المان و $\vec{V}$ بردار نیروی برشی در نقطه متناظر است.

[1] Hess-Smith

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

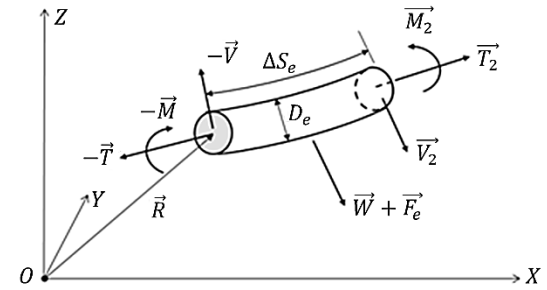

Fig. 3 Forces on a mooring element

شکل 3 نیروهای وارد بر یک المان مهار

نیروی هیدرودینامیکی، F_h، واقع بر روی یک المان کابل، متشکل از نیروی شناوری، نیروی درگ و جرم افزوده مربوط به نیروی تشعشع است:

$$F_h = F_b + F_d - m_a\left[\vec{a}_j،\vec{a}_{j+2}\right]^{\mathrm{T}} \tag{26}$$

در معادله (23)، m_a ماتریس جرم افزوده المان کابل و $\vec{a}_j$ شتاب کابل در گره j است. فرض می‌شود که بویه در گره $j+1$ المان وجود دارد. با توجه به این‌که سطح مقطع معادل کابل مهار A_{cj} می‌باشد و جرم آب جابجا شده توسط بویه به اندازه M_b می‌باشد، ماتریس نیروی شناوری المان به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$F_b = \left\{0،0،\frac{1}{2}\rho_w A_{cj} L_j g،0،0،\frac{1}{2}\left(\rho_w A_{cj} L_j + M_b\right)g\right\}^{\mathrm{T}} \tag{27}$$

که در آن ρ_w چگالی آب دریا است. نیروی درگ وابسته به زمان بر روی المان مهار همراه با بویه در یک فرم ساده به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$F_d(t) = \begin{Bmatrix} f_d(j) \\ f_d(j+1) - \frac{1}{2}C_{db}S_b\rho_w \begin{vmatrix} U_{j+1}(t) \\ -V_{j+1}(t) \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} U_{j+1}(t) \\ -V_{j+1}(t) \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \tag{28}$$

که در آن $V_j(t) = \left(v_{x_j}(t)،v_{y_j}(t)،v_{z_j}(t)\right)^{\mathrm{T}}$ شکل ماتریسی سرعت سازه در گره j و در زمان t است. $U_j = \vec{U}_j^{\mathrm{T}} = \left(U_{x_j}،U_{y_j}،0\right)^{\mathrm{T}}$ شکل ماتریسی سرعت جریان در مکان گره j است. C_{db} ضریب درگ بویه متصل شده در گره $j+1$ است؛ که دارای مساحت سطح تصویر شده S_b می‌باشند.

نیروی درگ در المان مهار به صورت معادله (29) است.

$$f_d(j) = -\frac{1}{4}C_x\rho_w D_j L_j \left|A_j \begin{Bmatrix} U_j(t) \\ -V_j(t) \end{Bmatrix}\right| A_j \begin{Bmatrix} U_j(t) \\ -V_j(t) \end{Bmatrix} - \frac{1}{4}C_d\rho_w D_j L_j \left|N_j \begin{Bmatrix} U_l(t) \\ -V_l(t) \end{Bmatrix}\right| N_j \begin{Bmatrix} U_j(t) \\ -V_j(t) \end{Bmatrix} \tag{29}$$

مقادیر C_d و C_x به ترتیب ضریب درگ عرضی و محوری است.

3-4- معادلات حرکت

نرم‌افزار آکوا مجموعه‌ای از معادلات جبری خطی را برای به دست آوردن پاسخ هارمونیک جسم با امواج منظم حل می‌کند. این ویژگی پاسخ معمولاً به‌عنوان اپراتورهای دامنه پاسخ (RAOs) شناخته می‌شود و متناسب با دامنه موج است.مجموعه‌ای از معادلات حرکت خطی از برهم‌کنش M سازه با ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به فرکانس به صورت زیر آورده شده است.

$$\left[-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{\mathrm{hys}}\right]\left[x_{jm}\right] = \left[F_{jm}\right] \tag{30}$$

در معادله بالا M_s ماتریس جرم سازه، $M_a = \left[A_{jm,kn}\right]$ و $C = \left[B_{jm,kn}\right]$ ماتریس $6M \times 6M$ جرم افزوده هیدرودینامیکی و ماتریس میرایی شامل اتصالات بین دو سازه می‌باشد. K_{hys} ماتریس سفتی هیدرواستاتیکی ترکیب شده می‌باشد که هر قطر ماترس 6×6 مجموع سختی هیدرواستاتیک مربوط به سازه‌های منفرد می‌باشد؛ و تمام عناصر غیرقطری ماتریس مجموع، صفر می‌باشد به‌طوری که هیچ برهم کنش هیدرواستاتیک بین سازه‌های مختلف وجود ندارد البته در این مقاله تنها یک سازه تنها وجود دارد.

معادله (30) رامی‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\left[x_{jm}\right] = H\left[F_{jm}\right] \tag{31}$$

به طوری که

$$H = \left\{-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{\mathrm{hys}}\right\}^{-1} \tag{32}$$

در معادله (32)، H تابع انتقال نامیده می‌شود که مربوط به نیروهای ورودی به پاسخ خروجی استدر معادلات ذکر شده، فرض بر این بود که هر یک از سازه‌ها در یک سیستم، صرفاً با پانل مدل شده باشند واپراتورهای دامنه پاسخ (RAOs) از یک سیستم هیدرودینامیکی توسط معادله (30) تعیین می‌شود.

در نرم‌افزار المان مرزی آکوا، هر سازه می‌تواند به وسیله ترکیبی از پانل‌ها و المان‌های موریسون مدل شود؛ و معادله المان‌های موریسون به معادلات حرکت در حوزه فرکانس اضافه شود. معادله حرکت سازه (30) می‌تواند به صورت زیر ارائه شود.

$$\left[-\omega_e^2(M_s + M_a') - i\omega_e(C') + K_{\mathrm{hys}}' + K_a\right]\left[x_{jm}\right] = \left[F_{jm}'\right] \tag{33}$$

در معادله بالا M_s ماتریس جرم سازه کل، M_a' ماتریس جرم افزوده کل ناشی از پانل تفرق والمان‌های موریسون، C' ماتریس میرایی هیدرودینامیکی ناشی از پانل تفرق، K_{hys}': ماتریس سفتی هیدرواستاتیک، K_a ماتریس سفتی سازه و $\left[F_{jm}'\right]$ مجموع نیروها و گشتاور فرود-کریلف و تفرق است. معادله حرکت سیستم سازه شناور در حوزه زمان در یک شکل انتگرالی کانولوشن بیان می‌گردد [26].

$$\{m + A_\infty\}\ddot{X}(t) + c\dot{X}(t) + KX(t) + \int_0^t R(t-\tau)\dot{X}(\tau)\,d\tau = F(t)\mathrm{s} \tag{34}$$

در معادله (34) m ماتریس جرم سازه، A_∞ ماتریس جرم افزوده سیال در فرکانس بی‌نهایت، c ماتریس میرایی شامل تأثیرات میرایی تشعشع خطی، K ماتریس سفتی کل شامل سفتی هیدرواستاتیک خطی و همچنین تمام سفتی‌های دیگر، مانند خطوط مهار و یا مفاصل و R ماتریس تابع ضربه سرعت است. ماتریس تابع ضربه شتاب می‌تواند در معادله حرکت به کار گرفته شود، به طوری که:

$$\{m + A_\infty\}\ddot{X}(t) + c\dot{X}(t) + KX(t) + \int_0^t h(t-\tau)\ddot{X}(\tau)\,d\tau = F(\mathrm{t}) \tag{35}$$

همچنین ماتریس تابع ضربه شتاب به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$h(t) = -\frac{2}{\pi}\int_0^\infty B(\omega)\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \{A(\omega) - A_\infty\}\cos(\omega t)\,d\omega \tag{36}$$

پارامترهای A_ω و B_ω به ترتیب ماتریس جرم افزوده و ماتریس میرایی هیدرودینامیکی می‌باشند. با جایگزین کردن نیروهای موج مرتبه اول و دوم در معادله (35)، معادله حرکت(36) حاصل می‌گردد.

$$\{m + A_\infty\}\ddot{X}(t) = F^{(1)}(t) + F^{(2)}(t) + F_c(t) + F_w(t) + F_t(t) - c\dot{X}(t) - KX(t) - \int_0^t h(t-\tau)\ddot{X}(\tau)\,d\tau \tag{37}$$

در معادله (37)، $F^{(1)}(t)$ نیرو و گشتاور تحریک مرتبه اول موج، یعنی مجموع نیروها و گشتاور فرود-کریلف[1] و تفرق، $F^{(2)}(t)$ نیروی تحریک موج مرتبه

[1] Froude-Krylov

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

دوم، $F_c(t)$ نیروی درگ جریانات زیرسطحی، $F_w(t)$ نیروی درگ باد و $F_t(t)$ نیروی مهار است.

5 – صحت‌سنجی

در این تحقیق جهت اعتبارسنجی مدل، نتایج نرم‌افزار آکوا انسیس با یک دامنه وسیعی از امواج در بازه دوره تناوب 5 تا 25 ثانیه برای سه حرکت هیو[1] سرج[2] و پیچ[3] سکوبه دست آمده و با نتایج تست تجربی انجام شده در مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف مقایسه شده. نتایج به صورت عملگر دامنه پاسخ (RAO) در "اشکال 4 تا 6" آورده شده است.

همان‌طور که در "اشکال 4 تا 6" نشان داده شده است نتایج بدست آمده از نرم‌افزار آکوا دارای مقادیر قابل قبولی نسبت به نتایج ارائه شده تست تجربی سکوی نیمه مغروق می‌باشد. قابل ذکر است که با توجه به این که سکوی مورد بررسی از نوع سازه‌های مهار شده در نزدیکی سطح آب می‌باشد لذا برای مدل‌سازی آزمایشگاهی از تشابه فرود استفاده می‌گردد. برای ساخت مدل آزمایشگاهی سکوی امیرکبیر از لحاظ تشابه هندسی مقیاس 1:143 انتخاب شده است. به منظور مدل کردن مهارهای سکو در آزمایشگاه از یک روش ابتکاری بهره گرفته شده است. به‌طوری که سختی هر خط مهار، به‌صورت فنری معادل در نظر گرفته شده است؛ اما این فنرها در خارج از آب قرار گرفته و نیروی آن از طریق نخ متصل به محل فیرلید، به مدل اعمال

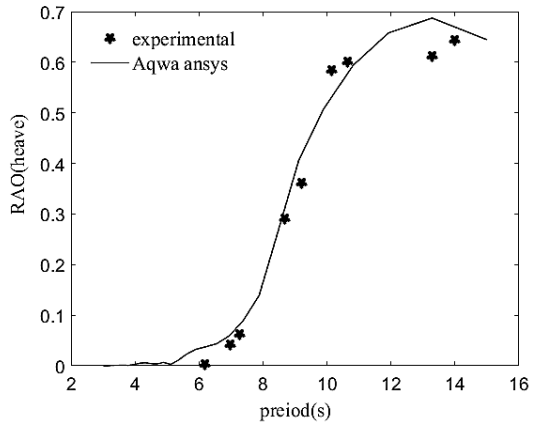

Fig. 4 RAO Comparison for model test: heave motion

شکل 4 مقایسه نتایج تجربی و عددی حرکت هیو

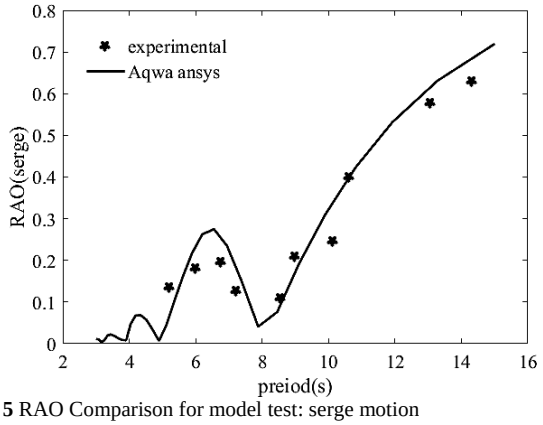

Fig. 5 RAO Comparison for model test: serge motion

شکل 5 مقایسه نتایج تجربی و عددی، حرکت سرج

می‌گردد [27]. در "شکل 7" نمای از روبروی این سکو به همراه طرح شماتیکی از نحوه مدل‌سازی خطوط مهار با استفاده از تسمه و فنر نشان داده شده است. با توجه به سفتی هر خط مهار، فنری معادل در نظر گرفته شد. فنر بیرون از آب قرار گرفته و نیروی آن از طریق تسمه متصل به محل فیرلید، به مدل منتقل می‌شود.

6- نتایج و بحث

با توجه به جهت نیروهای اعمالی به سکو که در زاویه صفر درجه و از روبرو به سکو می‌باشد، لذا مهم‌ترین حرکات سکو مربوط به سرج، هیو و پیچ است. در ادامه نتایج عددی چهار نمونه مورد مطالعه از اندازه متفاوت بویه موجود بر روی مهار در یک سیستم مهاربندی سکوی نیمه مغروق در حوزه فرکانس[4] و حوزه زمان[5] آورده شده است. این نتایج از طریق نرم‌افزار آکوا انسیس به دست آمده است.

"شکل 8" نشان می‌دهد که در ابتدا با افزایش اندازه بویه، شاهد کمتر بودن دامنه حرکت سرج هستیم ولی هر چه زمان تحلیل افزایش یابد دامنه

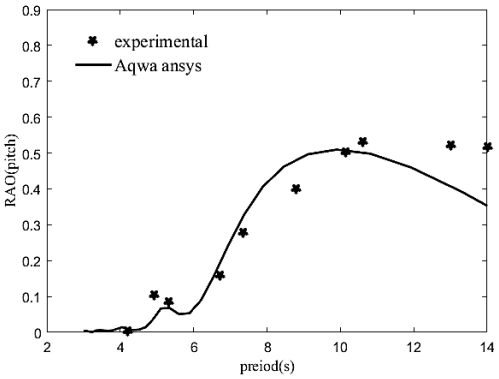

Fig. 6 RAO Comparison for model test: pitch motion

شکل 6 مقایسه نتایج تجربی و عددی حرکت پیچ

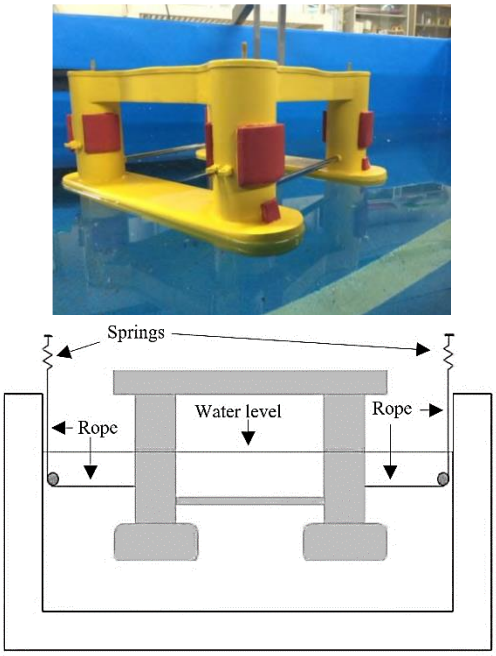

Fig. 7 Schematic design of mooring line system modeling [27]

شکل 7 طرح شماتیک مدل‌سازی سیستم خطوط مهار[27]

[1] heave
[2] serge
[3] pitch

[4] Frequency Domain
[5] Time Domain

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

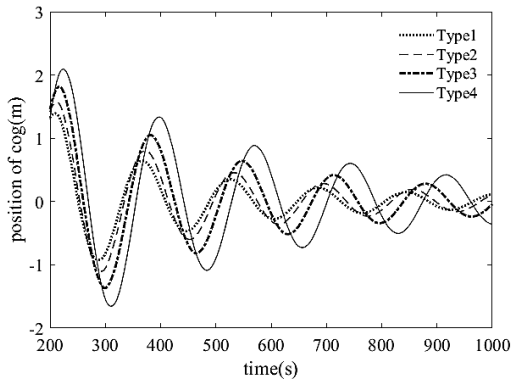

Fig. 8 Time response of serge motion

شکل 8 پاسخ زمانی حرکت سرج

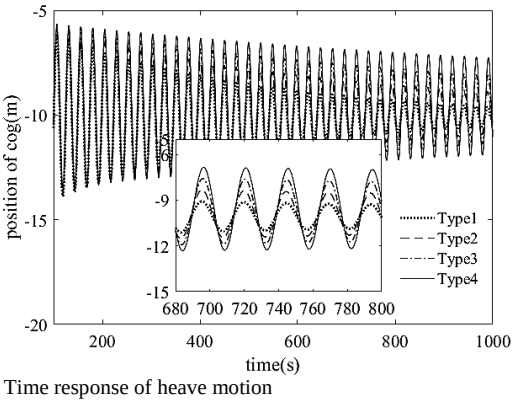

Fig. 9 Time response of heave motion

شکل 9 پاسخ زمانی حرکت هیو

حرکت سرج بیشتر می‌باشد. در "شکل 11" مشاهده می‌گردد که در حوزه فرکانس هرچه اندازه بویه بزرگ‌تر باشد دامنه فرکانس تشدید نیز بیشتر است. در حرکت هیو با بزرگ‌تر شدن اندازه بویه دامنه حرکت هیو نیز بیشتر می‌باشد (شکل 9). با توجه به "شکل 12" در حوزه فرکانس اندازه بزرگ‌تر بویه باعث افزایش دامنه فرکانس تشدید شده است.

در حرکت پیچ هرچه اندازه بویه بزرگ‌تر باشد دامنه حرکت نیز بزرگ‌تر خواهد بود و دامنه فرکانس تشدید نیز بزرگ‌تراست.

در "شکل 14" نشان داده شده است که با افزایش اندازه بویه، تنش وارد بر کابل کمتر می‌باشد و هرچه اندازه بویه کوچک‌تر شود تغییرات تنش وارد بر کابل در ابتدای تحلیل بیشتر است اما در مدت زمان کمتری نسبت به بویه‌های بزرگ‌تر به میرایی می‌رسد. همان‌طور که در "شکل 15"نشان داده شده است در تحلیل حوزه زمان دو فرکانس تشدید برای مهار وجود دارد قابل‌ذکر است که هر چه اندازه بویه بزرگ‌تر شود دامنه فرکانس تشدید کوچک‌تر می‌شود.

7- نتیجه‌گیری

توانایی مدل‌سازی و تحلیل مهارهای نگه‌دارنده به همراه بویه برای سازه‌های شناور در نرم‌افزار آکوا انسیس و استفاده از یک روش ترکیبی برای به‌دست آوردن پاسخ دینامیکی شناورها باعث شده است تا این نرم‌افزار به عنوان یکی از بهترین نرم‌افزارهای تحلیلی برای محاسبه پاسخ دینامیکی شناورها مورد توجه محققین قرار گیرد. در این نرم‌افزار برای اعضای حجیم شناور، مدل پانل‌های تفرق و برای اجزاء با مقطع کوچک از المان موریسون استفاده می‌گردد. همچنین کابل‌های مهار به صورت مجموعه‌ای از المان‌های موریسون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

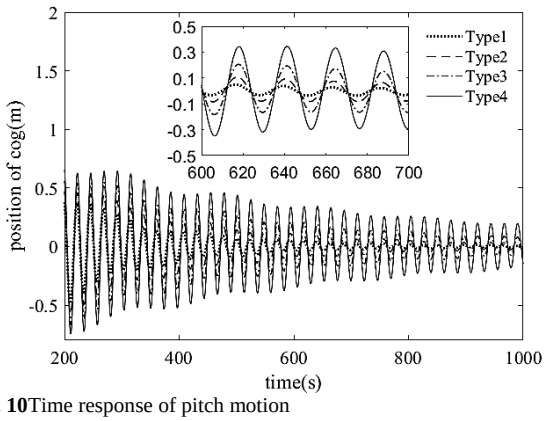

Fig. 10 Time response of pitch motion

شکل 10 پاسخ زمانی حرکت پیچ

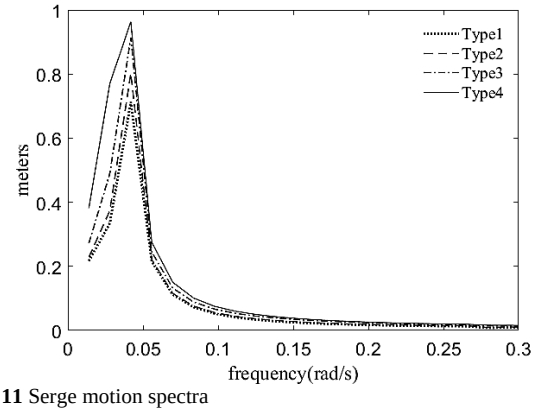

Fig. 11 Serge motion spectra

شکل 11 پاسخ فرکانسی حرکت سرج

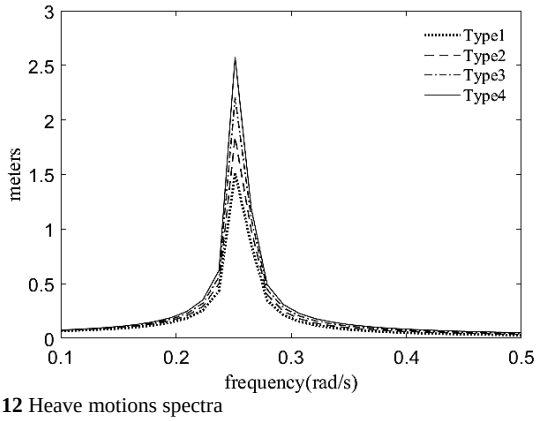

Fig. 12 Heave motions spectra

شکل 12 پاسخ فرکانسی حرکت هیو

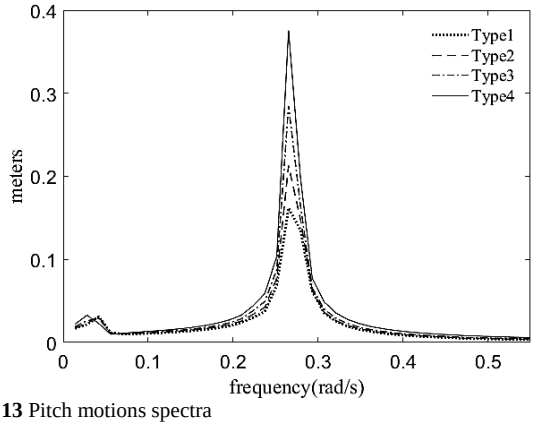

Fig. 13 Pitch motions spectra

شکل 13 پاسخ فرکانسی حرکت پیچ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

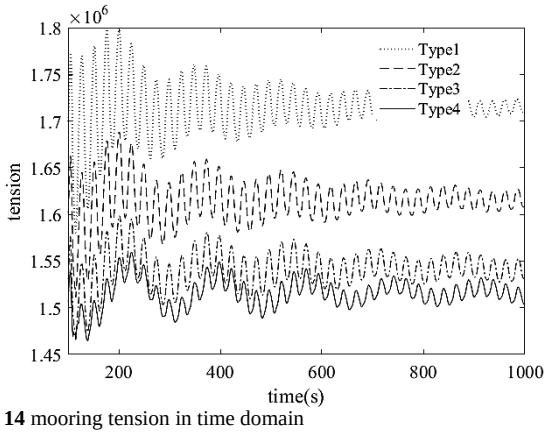

Fig. 14 mooring tension in time domain

شکل 14 تنش وارد بر مهار در حوزه زمان

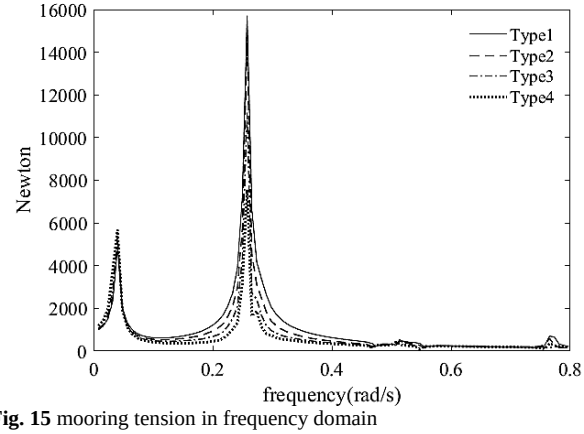

Fig. 15 mooring tension in frequency domain

شکل 15 پاسخ فرکانسی تنش وارد برمهار

با توجه به این‌که نیروهای وارد برسازه در راستای صفر درجه شمالی بر سکو وارد شده‌اند لذا پاسخ‌های دینامیکی مربوط به حرکات سرج، هیو و پیچ دارای اهمیت بیشتری بوده و در این مقاله تنها به این سه حرکت سکو پرداخته شده است. نتایج کلی تحلیل انجام شده به‌صورت زیر لیست می‌باشد:

أ. در حرکت هیو با بزرگ‌تر شدن اندازه بویه دامنه زمانی حرکت هیو نیز بیشتر می گردد.

ب. در حوزه فرکانس اندازه بزرگ‌تر بویه باعث افزایش دامنه فرکانس تشدید هیو شده است.

ت. در حرکت پیچ هرچه اندازه بویه بزرگ‌تر باشد دامنه حرکت نیز بزرگ‌تر خواهد بود و دامنه فرکانس تشدید نیز بزرگ‌تراست

ث. با افزایش اندازه بویه، تنش وارد بر کابل کمتر می‌باشد و هر چه اندازه بویه کوچک‌تر شود تغییرات تنش وارد بر کابل در ابتدای تحلیل بیشتر است اما در مدت زمان کمتری نسبت به بویه‌های بزرگ‌تر به میرایی می‌رسد.

ج. در تحلیل حوزه زمان دو فرکانس تشدید برای مهار وجود دارد قابل ذکر است که هر چه اندازه بویه بزرگ‌تر شود دامنه فرکانس تشدید کوچک‌تر می‌شود.

8- مراجع

[1] T. Nakajima, S. Motora, M. Fujino, On the dynamic analysis of multi-component mooring lines, *Offshore Technology Conference*, 3-6 May, Houston, Texas, 1982.

[2] S. Mavrakos, J. Chatjigeorgiou, Dynamic behaviour of deep water mooring lines with submerged buoys, *Computers & Structures*, Vol. 64, No. 1-4, pp. 819-835, 1997.

[3] S. Mavrakos, V. Papazoglou, M. Triantafyllou, and P. Brando, Experimental and numerical study on the effect of buoys on deep water mooring dynamics, *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*, 11-16 August, Edinburgh, The United Kingdom, 1991.

[4] S. Mavrakos, V. Papazoglou, M. Triantafyllou, and J. Hatjigeorgiou, Deep water mooring dynamics, *Marine Structures*, Vol. 9, No. 2, pp. 181-209, 1996.

[5] W. Dongjiao, Static analysis of a wire rope-chain- buoy/sinker mooring line, *China Offshore Platform*, Vol. 6, pp. 003, 2007.

[6] C. Kwan, F. Bruen, Mooring line dynamics: comparison of time domain, frequency domain, and quasi-static analyses, *Offshore Technology Conference*, 6-9 May, Houston, Texas, 1991.

[7] S. Mazaheri, A. Incesik, Predicting the Maximum Mooring Force of a Moored Floating Offshore Structure, *ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE, Vol. 51245, 2004.

[8] M. A. Jordán, R. Beltrán-Aguedo, Nonlinear identification of mooring lines in dynamic operation of floating structures, *Ocean Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 455-482, 2004.

[9] D. Garrett, Coupled analysis of floating production systems, *Ocean Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 802-816, 2005.

[10] P. Davies, P. Baron, K. Salomon, C. Bideaud, J.-P. Labbé, S. Toumit, M. Francois, F. Grosjean, T. Bunsell, A.-G. Moysan,., Influence of fibre stiffness on deepwater mooring line response. *ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.American Society of Mechanical Engineers, June 15–20, Vol. 1: Offshore Technology, Estoril, Portugal, 2008.

[11] C. T. Stansberg, Current effects on a moored floating platform in a sea state, *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 4: Ocean Engineering; Offshore Renewable Energy, June 15–20, Estoril, Portugal, 2008.

[12] R. Huilong, Z. Jian, F. Guoqing, L. Hui, and L. Chenfeng, Influence of nonlinear mooring stiffness on hydrodynamic performance of floating bodies, *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Vol. 1: Offshore Technology, May 31–June 5, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.

[13] O. J. Waals, The effect of wave directionality on low frequency motions and mooring forces, *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* OMAE2009 31 May – 05 June, 2009, Honolulu, Hawaii, USA, Vol. 79412, pp. 31, 2009.

[14]T. Lassen, E. Storvoll, A. Bech, Fatigue life prediction of mooring chains subjected to tension and out of plane bending,*ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Vol. 1: Offshore Technology, Honolulu, May 31–June 5, Hawaii, USA, 2009.

[15] Z. Su-xia, T. You-gang, L. Hai-xiao, Study on snap tension in mooring lines of deepwater platform, *ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Vol. 4, Ocean Engineering; Ocean Renewable Energy; Ocean Space Utilization, Parts A and B, May 31–June 5, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.

[16] M Hosseini Manesh, M. J. Ketabdari. S. Kazemi, Investigating the behavior of suspended floating FPSO in different incident angles waves, *18th Marine Industrial Conference*, Iranian Marine Engineering Society, 18 - 21 Oct. Kish Island, Iran, 2016.

[17] M. J. Ketabdari, M. Samadi, Hydrodynamic analysis of catenary mooring oil platform with cellular spars by numerical methods, *2nd National engineering conference on construction and evaluation of civil projects*, Semnan, Iran, 2015.

[18] M. J. Ketabdari, A. Shahoulaei, Analysis the behavior of semi-submersible platform with neural network, 1st Conference on strategic development of Civil, Architectural, Electrical and Mechanical of Iran, Golestan University, Golestan, Iran, 2015.

[19] The effect of catenary mooring layout on dynamic response of spar truss platform by numerical method, 18th Marine Industrial Conference, Iranian Marine Engineering Society, 18 - 21 Oct., Kish Island, 2016 .

[20] H. Parvareh, S. Jamei, A. Asvar, The effect of different incident angle of wave on ROA of different degrees of freedom of semi-submerssible Amirkabir platform 1st International conference on new research in engineerin science, Tehran, 1396.

[21] L. Xiong, J. Yang, W. Zhao, Dynamics of a taut mooring line accounting for the embedded anchor chains,*Ocean Engineering*, Vol. 121, pp. 403-413, 2016.

[22] O. A. Montasir, A. Yenduri, V. J. Kurian, Effect of mooring line configurations on the dynamic responses of truss spar platforms, *Ocean Engineering*, Vol. 96, pp. 161-172, 2015.

[23] J. Azcona, X. Munduate, L. González, and T. A. Nygaard, Experimental validation of a dynamic mooring lines code with tension and motion measurements of a submerged chain, *Ocean Engineering*, Vol. 129, pp.415-427, 2017.

[24] M. Armak, A. Gharebaghi, Effect of HEAVE plates on the dynamic response of Amirkabir semi-submersible platform, *International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures*, 20th November, Olympic Hotel Tehran, Iran, 2012.

[25] J. N. Newman, The theory of ship motions, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 221-283, 1979.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]

[26] W. E. Cummins, The Impulse Response Function and Ship Motions, pp. 1-11, David Taylor Model Basin Washington DC, David W. Taylor Model Basin , 1962.

[27]J. Rashidi, H. Borhani, M. S. Seif, M. R. Fathikazeroni, Simulation and experimental investigation on the effect of heave plate on heave response of semi-submersible platform, 17th Marine Industrial Conference, 22- 25 December, Kish Island, Iran, 2015.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.13.2]