بررسی رفتار سیستم مهار برای یک طرح مفهومی از توربین بادی شناور اسپار در شرایط بقاء

شیما تفضلی[۱]،روزبه شفقت[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی،گروه پژوهشی انرژی‌های دریاپایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ shima.tafazzoli@gmail.com
[۲] دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، گروه پژوهشی انرژی‌های دریا پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ rshafaghat@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۳/۱

کلمات کلیدی:
روش فراابتکاری
توربین بادی شناور اسپار
پارگی مهار
انسیس-آکوا

چکیده

این مقاله با روش فراابتکاری به انتخاب سیستم مهار کاتنری متشکل از زنجیر–کابل-زنجیر برای پایه توربین بادی شناور اسپار می‌پردازد. هدف، تحلیل هیدرودینامیکی سیستم مهار کاتنری و ارزیابی رفتار سازه در شرایط عادی و صدمه‌دیده است. تحلیل هیدرودینامیکی سازه شناور در نرم‌افزار ANSYS-AQWA انجام و نتایج مدل‌سازی هیدرودینامیکی با نتایج تجربی صحت‌سنجی شد. باتوجه‌به مشخصات سیستم مهار آزمایشگاهی و سختی مدنظر در عمق مورد مطالعه، زنجیر مناسب برای سازه در ابعاد اصلی انتخاب و با بررسی تغییرات اعمال‌شده بر روی آن و تبدیل سیستم مهار شامل زنجیر به سیستم مهار شامل زنجیر–کابل-زنجیر، رفتار سازه و سیستم مهار درصورت پارگی یکی از خطوط مهار، در شرایط بقاء و برای دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ساله بررسی شد. باتوجه‌به این‌که زنجیر ابتدایی متصل به سازه، نقش کنترل‌کننده بر روی رفتار دینامیکی سازه دارد، هرچه از طول این زنجیر کاسته و به طول زنجیر لنگر افزوده شود، تنش و دامنه حرکات سازه در درجات آزادی سرج، هیو و پیچ افزایش می‌یابد.

Investigating the Behavior of the Mooring System for a Conceptual Design of a Spar Floating Wind Turbine under Survival Conditions

Shima Tafazzoli[1], Rouzbeh Shafaghat[2*]

[1] M.Sc. Student, Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology; shima.tafazzoli@gmail.com
[2] Associate Professor, Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology; rshafaghat@nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Mar. 2019
Accepted: 22 May 2019

Keywords:
Meta-heuristic
Spar floating wind turbine
Mooring line disconnection
ANSYS - AQWA

ABSTRACT

In this paper, selecting of an appropriate mooring system for spar platform of a wind turbine consisting of chain–cable–chain is investigated based on a meta-heuristic method. The purpose is to investigate the hydrodynamic behavior of the structure and the mooring system in a normal and damaged conditions. ANSYS-AQWA software is applied to hydrodynamics analysis and the numerical results were first verified by experimental results. According to the characteristics of the experimental mooring system and designed stiffness in the desired depth of the sea, an appropriate chain is selected for the prototype model and then by investigating the changes applied to it and replacing a chain mooring system with a mooring system including chain–cable–chain, the survival behavior of the structure and mooring system evaluated for the 100-years return period, considering one of the mooring line disconnection. According to the controlling role of the initial chain connected to the structure, it was also observed that the decreasing the length of the initial chain and increasing the anchor chain length, the tension as well as the amplitude of the structural movements in the degrees of surge, heave and pitch increases.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

۱ – مقدمه

با توجه به مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان و جایگاه روش‌های جذب انرژی در این خصوص، نصب توربین‌های باد و استحصال انرژی باد در دریا به‌صورت روزافزون اهمیت می‌یابد. بسته به عمق آب و ضرورت نصب توربین‌ها، پایه‌های متفاوتی برای توربین بادی در نظر گرفته‌شده است. هزینه‌ی توربین‌های بادی نصب‌شده‌ی فراساحلی با افزایش عمق آب، بیشتر می‌شود؛ بنابراین با در نظر گرفتن فاکتورهای طراحی و نیز مباحث اقتصادی، استفاده از پایه‌ی مناسب برای هر عمق عملیاتی تعریف‌شده، مهم است. به‌طورکلی دو نوع پایه برای برقرار نگه‌داشتن توربین‌های بادی وجود دارند:

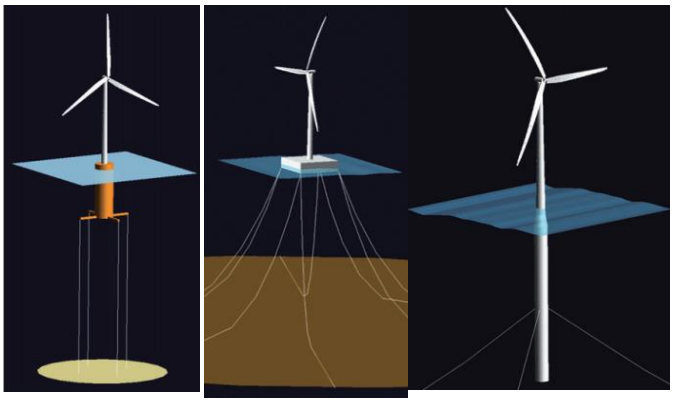
۱. پایه‌های ثابت
۲. پایه‌های شناور

در نواحی کم‌عمق دریا از توربین‌های بادی با پایه‌های ثابت استفاده می‌شود؛ ولی با افزایش عمق آب از یک مقدار مشخص، استفاده از این نوع پایه‌ها مشکل و پرهزینه خواهد شد. یکی از راه‌کارهای رهایی از این مشکلات، به‌کارگیری توربین‌های بادی شناور است. توربین‌های بادی شناور برای عمق‌های زیاد به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱):

- شناور اسپار[۱]: اساس برقراری تعادل در این نوع پایه‌ها وزنه‌های متعادل‌کننده[۲] است. این نوع پایه‌ها از یک بویه استوانه‌ای شناور (ساخته‌شده از فولاد زنگ نزن یا بتن) تشکیل‌شده است. بویه توسط زنجیرها و دستگیره‌هایی به کف دریا متصل می‌شود.
- سکوی نیمه شناور[۳]: اساس متعادل نگه‌داشتن این سکوها نیروی شناوری[۴] است. این سکوها معمولاً از یک شناور و چند مهارکننده زنجیری[۵] تشکیل‌شده است.
- سکوی پایه کششی[۶]: اساس متعادل نگه‌داشتن این سکوها، نیروهای ناشی از مهارکننده‌ها[۷] است. در این سازه‌ها مهارکننده‌ها باید تحت کشش اولیه قرار بگیرند و هزینه‌ی طراحی و ساخت این دسته از سکوها به نسبت بیشتر است.

در خصوص پایداری و نوع استقرار توربین‌های بادی فراساحل مطالعات متعددی توسط محققین انجام‌شده است؛ به‌طورمعمول بررسی‌ها به‌گونه‌ای بوده است تا سازه بتواند در طول عمر خود در برابر نیروهای محیطی مقاومت نماید.

نیلسن و همکاران (۲۰۰۶)، آنالیز پاسخ دینامیک یک توربین بادی اسپار با مهار زنجیری را برای پروژه‌ی هایوند[۸] شرکت استات‌اویل[۹] مورد مطالعه قراردادند. مقایسه‌ای از نتایج آزمایشگاهی مدل و شبیه‌سازی‌های عددی در گزارش‌های آن‌ها ارائه‌شده است[۱].



الف)شناور اسپار ب) سکوی نیمه شناور ج)سکوی پایه کششی

شکل ۱- انواع پایه‌های توربین بادی شناور [۲]

اوتسونومیا و همکاران (۲۰۰۹)، حرکت یک توربین بادی شناور فراساحلی از نوع اسپار را مورد آزمایش قراردادند. نمونه‌ی اصل مدل پیشنهادی شامل یک توربین ۲MW به قطر ۸۰ و ارتفاع هاب ۵۵ متر می‌باشد. آبخور فونداسیون شناور اسپار این نمونه ۶۰ متر و دارای مقاطع عرضی دایره‌ای به قطرهای ۱۲، ۸/۴ و ۴/۸ متر به ترتیب در بخش‌های تحتانی، میانی و فوقانی است. همچنین در این مدل از سیستم مهار زنجیر استفاده‌شده است. در این تحقیق حرکت توربین بادی شناور فراساحلی مذکور تحت امواج منظم و تصادفی همراه با اعمال یک نیروی یکنواخت افقی به‌عنوان نیروی باد یکنواخت موردمطالعه قرارگرفته است. تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه موج مرکز تحقیقات دریایی ملی ژاپن با استفاده از یک مدل مقیاس $\frac{1}{22.5}$ صورت گرفته‌اند و درنهایت نتایج آزمایشگاهی به‌منظور صحت‌سنجی با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است[۳].

کریمی راد (۲۰۱۱) مطالعاتی را درزمینهٔ مدل‌سازی دینامیکی سکوی اسپار تحت اثر نیروهای محیطی نامناسب و طوفانی انجام داد[۴]. برومنت و همکاران (۲۰۱۲)، در مقاله‌ای بهینه‌سازی سیستم مهار یک توربین بادی شناور را با تحلیل در قلمرو فرکانس موردمطالعه قراردادند. البته این تحلیل شامل بهینه‌سازی تعداد خطوط مهار نیست؛ ضمن این‌که از بعضی نیروهای مهم هیدرودینامیکی در آن صرف‌نظر شده است[۵].

رزاقیان و همکاران (۲۰۱۴)، به آنالیز هیدرودینامیکی سکوی پایه کششی ISSC در حالت صدمه‌دیده ناشی از انقطاع یک تاندون در شرایط نامناسب دریایی پرداخته است. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار المان مرزی Moses و در امواج منظم مطابق با شرایط خلیج مکزیک انجام‌گرفته است[۶].

یو و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی مشخصات هیدرودینامیکی و پاسخ دینامیکی توربین بادی شناور OC3-Hywind پرداختند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

آن‌ها در این تحقیق مشخصات پاسخ حرکت و بارهای ناشی از مهاربندی وارد به سیستم را تحت اثر شرایط مختلف دریا و اثرات ناشی از باد و موج بر سیستم، موردمطالعه قراردادند. در این پژوهش از کد شبیه‌سازی عددی FAST در حوزه زمان استفاده شد و تحلیل حوزه فرکانس آن از روش تبدیل فوریه سریع به‌دست‌آمده است[۷].

کتابداری و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی عددی پایه توربین بادی اسپار مهارشده با سه مهار کاتنری در خلیج‌فارس پرداختند و در زوایای مختلف تابش موج، زوایای مربوط به بیشترین تحرکات سازه در موج و جریان و بیشترین نیروی مهاری را به‌دست آوردند[۸].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۵)، بخش شناور و سیستم مهاربندی یک توربین بادی شناور اسپار با مهار زنجیری را با استفاده از نرم‌افزار Ocraflex شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش با محاسبه‌ی بارهای وارده بر توربین بادی، تحلیل هیدرودینامیکی بر روی سیستم مهاربندی صورت گرفت و کشش خطوط مهاری تحت شرایط بارگذاری مختلف مطالعه شد. درنهایت با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، یک طراحی بهینه برای خطوط مهاری موردنظر ارائه گردید[۹].

توکلی و همکاران (۲۰۱۶)، یک طرح مفهومی از توربین بادی شناور اسپار را در معرض موج با دوره‌های تناوب متفاوت در دو حالت با چرخش پره و بدون چرخش پره بررسی کردند. آن‌ها اثرات نیروی ژیروسکوپ را در شش درجه آزادی گزارش کردند؛ نتایج بیان‌گر آن بود که تنها نیروی امواج بر حرکت توربین بادی مؤثر است و نیروی ژیروسکوپ و پیشران بر حرکت توربین بادی شناور اسپار تأثیری ندارد[۱۰].

اسماعیل‌پور و همکاران (۲۰۱۶)، به شبیه‌سازی عددی چندین هندسه مختلف برای صفحات شناور یک توربین بادی شناور با سه درجه آزادی هیو، اسوی و رول پرداختند. به‌منظور شبیه‌سازی عددی مسئله، از کد توسعه‌یافته در محیط نرم‌افزار متلب بر اساس روش المان مرزی (روش مرسوم اویلری-لاگرانژی) استفاده‌شده است. برای حرکت در راستای هیو و اسوی هندسه مربعی و برای راستای رول هندسه ذوزنقه‌ای به‌عنوان مناسب‌ترین پلتفرم معرفی شد[۱۱].

صمدی و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی رفتار مهارها و سازه‌ی اسپار خرپایی به صوت عددی و با استفاده از نرم‌افزار Moses، به روش تئوری تفرق سه‌بعدی پرداختند. نمودارهای عملگر دامنه پاسخ (RAO) در شش درجه آزادی به‌دست آمد. سپس پاسخ‌های به‌دست‌آمده، با پاسخ‌های مدل حل عددی به روش المان محدود مقایسه و صحت‌سنجی شد[۱۲].

کتابداری و همکاران (۲۰۱۸)، اثرات چیدمان خطوط مهار بر روی پاسخ هیدرودینامیکی سکوی اسپار خرپایی را در مقیاس واقعی و به‌صورت عددی با استفاده از تئوری تفرق موردبررسی قراردادند[۱۳].

غفاری و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیرات سیستم مهار کاتنری بویه دار را بر روی رفتار هیدرودینامیکی سکوی پایه کششی در شرایط محیطی دریای مازندران برای دوره بازگشت صدساله موردمطالعه قراردادند. در این مطالعه از نرم‌افزار ANSYS-AQWA و تئوری تفرق سه‌بعدی موج استفاده‌شده است[۱۴].

نصرت زاده و همکاران (۲۰۱۹)، به تأثیر قطع‌شدگی خطوط مهار بر پاسخ دینامیکی توربین با پایه TLP با استفاده از نرم‌افزار متلب پرداختند. توربین بادی با معادلات غیرخطی به‌صورت دقیق مدل‌سازی شد؛ به‌طوری‌که این مدل‌سازی برای زوایای انحراف بزرگ سازه در شرایط قطع‌شدگی خطوط مهاری، جواب‌گو باشد؛ همچنین در این پژوهش نشان داده شد که قطع شدن خطوط مهاری منجر به جابه‌جایی‌ها و نوسانات شدید سازه نمی‌گردد[۱۵].

در پژوهش حاضر، ابتدا با توجه به رفتار هیدرودینامیکی سازه در سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ و همچنین نیروی کششی در خطوط مهار، با استفاده از یک روش فراابتکاری، یک سیستم مهار مناسب برای یک طرح مفهومی از توربین بادی شناور اسپار به‌دست آمد؛ همچنین با ساده‌سازی، خطوط دلتالاین حذف‌شده، اثر آن به‌صورت سختی یاو به سیستم وارد شد. سیستم مهار تعریف‌شده متشکل از زنجیر – کابل - زنجیر می‌باشد که در نهایت رفتار سازه و سیستم مهار در سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ در صورت پارگی یکی از خطوط مهار بررسی شد.

۲- معرفی مدل هندسی

شبیه‌سازی برای مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۵۰ و با الگوبرداری از نمونه اصلی توربین بادی شناور اسپار OC3-Hywind (برای تولید ۱۲۸ کیلووات توان) [۱۶]انجام‌شده است (شکل ۲). نسبت مقیاس برای مدل آزمایشگاهی با توجه شبیه‌سازی پارامترهای اصلی موج مانند دوره و ارتفاع موج انتخاب شد؛ در راستای امکان‌سنجی نصب توربین‌های بادی، شرایط موج ۱۷ نقطه در دریای مازندران برای دوره بازگشت ۱۵ ساله بررسی شد. برای انتخاب شرایط موج در حوضچه تست نیاز به اطلاعات موجود در این مناطق می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که دوره موج در دریای مازندران در محدوده‌ی ۱/۶ تا ۸/۹ ثانیه و ارتفاع موج در محدوده ۰/۰۵۳ تا۴/۱۸۰ متر می‌باشد.

نسبت مقیاس برای هر پارامتر فیزیکی مهم در این مسئله توسط تشابه فرود تعریف‌شده است. جدول ۱، مقیاس تشابه را برای پارامترهای اصلی موج بیان می‌کند. ارتفاع ۳/۵ متر به‌عنوان ارتفاع ماکزیمم موج در دریای مازندران انتخاب شد. برای تعمیم دادن مشخصات تانک موج به دریای واقعی از مقیاس ۱:۵۰ به استناد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

نسبت تشابه فرود استفاده شد. پارامترهای مقیاس شده در جدول ۲ قابل‌مشاهده هستند.

همچنین برای مدل کردن سختی سیستم مهار به کابل فولادی گالوانیزه نمره ۱۴ و با قطر ۲ میلی‌متر، فنرهای فولادی ضدزنگ متصل شده است. انتخاب نوع و قطر کابل سیستم مهار برگرفته از مدل هونک و همکاران[۱۷] می‌باشد. تغییرات ایجادشده به‌منظور رسیدن به پایداری و با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه انجام گرفت؛ همچنین با توجه به محدوده سختی مد نظر برای نمونه‌ی اصلی و با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه، با استفاده از تشابه فرود با مقیاس ۱:۵۰، فنری با سختی ۳۰/۹۶ نیوتن بر متر انتخاب شده است. تست‌ها در تانک موج گروه پژوهشی انرژی‌های دریاپایه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شد. ابعاد تانک موج به ترتیب ۱۱، ۳ و ۳ متر در طول، عرض و ارتفاع می‌باشند[۱۰]. شکل ۳ نمایی از تانک موج و سامانه موج ساز را نشان می‌دهد.

شکل ۴ مدل توربین بادی شناور را در تانک موج نشان می‌دهد. در تست‌های آزمایشگاهی، یک انتهای مهار به سازه و انتهای دیگر به لنگر تعبیه‌شده در بستر تانک متصل شده است. مهارها با زوایای ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرارگرفته‌اند. مشخصات سیستم مهار در حالت تجربی در جدول ۳ آورده شده است. مبدأ مختصات از روی خط آب در نظر گرفته‌شده است.



شکل۲-نمایی از نمونه‌ی اصلی OC3-Hywind[۱۸]

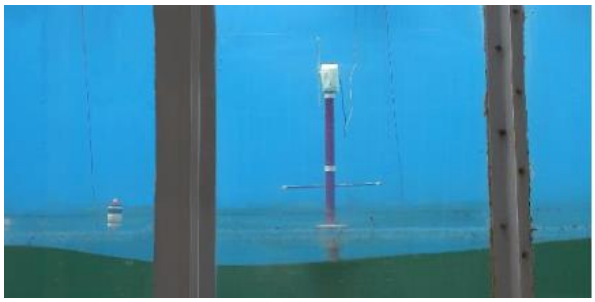


الف)سامانه موج ساز



ب) سمت راست تانک موج

شکل ۳-نمایی از سامانه موج ساز و تانک موج



شکل ۴- نمای از جانب توربین بادی شناور اسپار

جدول۱-نسبت تشابه فرود برای پارامترهای اصلی موج

متغیر	ابعاد	واحد	نسبت تشابه
ارتفاع موج	L	m	λ
دوره موج	T	s	$\sqrt{\lambda}$

جدول۲-قانون تشابه در تانک موج

	تانک موج	دریای مازندران
مینیمم دوره موج(s)	۰/۲۵	۱/۷۵
ماکزیمم دوره موج(s)	۱/۱	۸/۲۵
ارتفاع ماکزیمم موج(m)	۰/۰۷	۳/۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

جدول ۳- مشخصات سیستم مهار در تست‌های تجربی

نوع کابل	فولاد گالوانیزه
قطر کابل (mm)	۲
سختی فنر متصل به کابل (N/m)	۳۰/۹۶
محل اتصال کابل به سازه (cm)	-۳۰
شعاع بستر (cm)	-۲۸۲
طول کابل (cm)	۳۰۰

۲-۱- مهاربندی توربین بادی شناور اسپار

برای سازه در مقیاس واقعی، سیستم مهار کاتنری تعریف می‌شود. سیستم مهار کاتنری متشکل از زنجیر – کابل - زنجیر می‌باشد. بخش میانی مهار از کابل تشکیل می‌شود تا وزن زنجیر و هزینه‌های مربوط به آن کاهش یابد؛ همچنین استفاده از زنجیر در بخش ابتدایی سیستم مهار مانع شلاقی شدن سازه می‌شود. در ضمن وجود زنجیر در انتها و قسمت لنگر باعث افزایش مقاومت سیستم مهار و لنگر در برابر نیروهای محیطی خواهد شد.

مهارهای زنجیری کاتنری به‌طورمعمول در بسیاری از مهاربندی‌ها و لنگراندازی در اعماق، برای آب‌های کم‌عمق و متوسط استفاده می‌شوند. با افزایش عمق آب، وزن زنجیر و کابل بیش‌ازحد بزرگ‌شده، نیروهای عمودی واردشده بر شناور از طرف مهارها افزایش می‌یابد؛ البته با افزایش طول این کابل‌ها هزینه‌ها نیز افزایش خواهد یافت. یکی از روش‌های حل مشکل وزن کابل‌های مهار در آب‌های عمیق، استفاده از طناب‌های الیاف مصنوعی به‌جای سیم‌های سنگین و تغییر سیستم کابل‌های کاتنری به سیستم کابل‌های کشیده مستقیم[۱۰] است؛ اما ممکن است امنیت سیستم مهار کاتنری را نداشته باشد.

با درنظر گرفتن محدوده سختی مورد نظر در عمق مورد بررسی، زنجیر پین‌دار با قطر ۸۷ میلی‌متر برای سازه در ابعاد واقعی از مرجع[۱۹] انتخاب و طراحی سیستم مهاربندی بر طبق آیین‌نامه DNV Position Mooring انجام‌شده است[۲۰]. جدول ۴ مشخصات زنجیر را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات فیزیکی زنجیر مورداستفاده

مؤلفه		**واحد**
کیفیت	RQ4	-
طول	۴۱۵/۲۵	m
قطر	۸۷	mm
مدول الاستیسیته	۶۵۳۲۰۰	KN
وزن در آب	۱۴۱۴/۷	N/m
مقاومت شکست	۷۶۸۲	KN

همچنین مشخصات کابل میانی نیز در جدول ۵ ارائه‌شده است.

جدول ۵-مشخصات کابل میانی مهار

نوع	**جرم(Kg)**	**مدول الاستیسیته(KN)**	**قطر(m)**
6 Strand IWRC	۲۱/۲۸	۳/۴۶ ×۱۰^{۵}	۰/۰۷۶۲

۳- معادلات حاکم

۳-۱-تئوری تفرق سه‌بعدی (مبنای تحلیل المان مرزی)

در تئوری تفرق نیروی موج توسط محاسبه انتگرال فشار روی سطح خیس شده جسم به‌دست می‌آید. این روش زمانی قابل‌استفاده است که اولاً ابعاد جسم در مقایسه با دامنه حرکت موج بزرگ باشد و بتوان از نیروهای ناشی از لزجت سیال صرف‌نظر کرد؛ ثانیاً جسم آن‌قدر بزرگ باشد که ابعاد آن در برابر طول موج دریا قابل‌توجه بوده، میدان موج را در اثر تفرق و انتشار موج تحت تأثیر قرار دهد[۲۱]. در تئوری تفرق میدان جریان سیال توسط تابع پتانسیل جریان بیان می‌شود؛ بنابراین باید تابع پتانسیل در معادله لاپلاس صدق کند و هم‌چنین شرایط مرزی هم با شرط مرزی سطح جسم، شرط مرزی سطح آزاد و بستر دریا و شرط مرزی بینهایت، ارضا شود. با استفاده از اصل برهم‌نهی پتانسیل‌ها می‌توان بیان داشت که پتانسیل کلی از سه ترم پتانسیل موج برخوردی، پتانسیل موج تفرق و پتانسیل حاصل از ۶ درجه آزادی جسم در آب ساکن به وجود می‌آید. به جمع پتانسیل حاصل از موج و پتانسیل حاصل از تفرق موج، پتانسیل فرود - کریلف می‌گویند[۲۲].

$$\phi_t = \phi_I + \phi_D + \sum_{R=1}^{6} \phi_R \qquad (۱)$$

φ_I پتانسیل موج برخوردی، φ_D پتانسیل موج متفرق شده و φ_R پتانسیل حاصل از ۶ درجه حرکت جسم در آب ساکن است. پتانسیل موج برخوردی و پتانسیل موج متفرق شده، نیروی محرک موج را شامل شده، پتانسیل حاصل از ۶ درجه آزادی حرکت جسم، نیروی جرم افزوده و نیروی میرایی را شامل می‌شود. با حل معادله لاپلاس و اعمال شرایط مرزی می‌توان نوشت:

$$\phi_0 = \frac{\zeta_0 g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{ik(x\cos\theta + y\sin\theta)} \qquad (۲)$$

که در اینجا ζ_0 دامنه موج برخوردی، K عدد موج، θ جهت موج و ω فرکانس موج است. با در نظر گرفتن این معادله، رابطه (۳) به‌صورت به‌دست می‌آید:

$$\phi = -i\omega \left\{ (\phi_0 + \phi_7)\zeta_0 + \sum_{j=1}^{6} \phi_j \zeta_j \right\} \qquad (۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

تغییرات زمانی پتانسیل، عامل ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی است. با عنایت به این موضوع، فشار کلی از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{p}{\rho} = -gz - \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad (۴)$$

که با در نظر گرفتن معادله لاپلاس، فشار هیدرودینامیکی از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد:

$$p_h = -i\omega\rho\phi \qquad (۵)$$

با انتگرال‌گیری از توزیع فشار اطراف سطح خیس سازه (تئوری تفرق)، نیروهای هیدرودینامیکی روی بدنه سازه به‌دست خواهد آمد. در این قسمت تمامی ضرایب هیدرودینامیکی مانند جرم افزوده، ماتریس میرایی و دیگر مشخصات هیدرودینامیکی به‌دست می‌آیند.

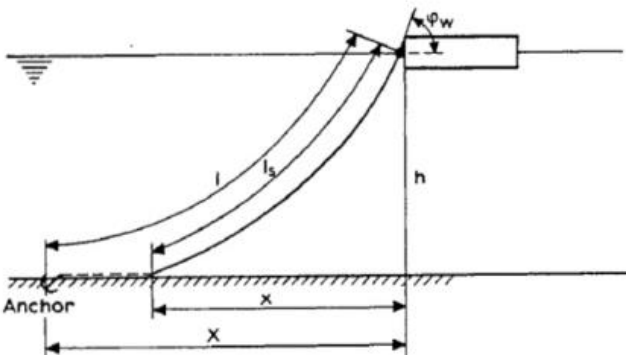
۳-۲-روابط ارائه‌شده برای یک خط مهار

سکوهای اسپار با توجه به ماهیت شناور بودن، در معرض بارهای محیطی می‌باشند؛ ازاین‌رو بررسی این نیروها و بررسی تنش‌های وارد بر سیستم مهاربندی و طراحی یک سیستم مهاربندی مناسب بر مبنای آن همواره موردبحث و بررسی بوده است. سیستم مهاربندی سبب ایجاد نیروهای بازگرداننده در صفحه‌ی افقی می‌شود و لذا حرکات در درجات آزادی سرج، اسوی و یاو را کنترل می‌کند. شکل ۵ نمای کلی از یک خط مهار را نشان می‌دهد.

در برآورد نیروهای مهار از حرکت دینامیکی مهارها صرف‌نظر شده است؛ هم‌چنین نیروی مهار در هر موقعیت سکو برابر نیروی استاتیکی در آن موقعیت است. در تعیین روابط حاکم بر تغییر شکل و تغییرات نیروهای مهارها از مقاومت خمشی مهارها صرف‌نظر شده، فرض می‌شود نیروی داخلی مهارها، تنها شامل نیروی کششی می‌شود. طول کشیده شده مهار و فاصله اتصال مهارها تا بستر دریا به‌صورت روابط زیر ارائه می‌گردد:

$$l_s = a\sin\left(\frac{x}{a}\right) \qquad (۶)$$

$$h = a\left[\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1\right] \qquad (۷)$$



شکل ۵-نمایی از یک سازه مهارشده با یک خط مهار[۲۳]

a به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a = \frac{T_H}{w} \qquad (۸)$$

که T_H نیروی افقی قابل‌تحمل توسط سیستم مهاربندی و w وزن واحد طول سیستم مهار می‌باشد. حداکثر نیروی قابل‌تحمل توسط سیستم مهاربندی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$T_{Max} = T_H + wh \qquad (۱۰)$$

و همچنین حداقل طول مهار و طول افقی کل مهاربندی X به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$l_{\min} = h\left(2\frac{T_{Max}}{wh} - 1\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۱)$$

$$X = l - l_s + x \qquad (۱۲)$$

۴- مدل‌سازی عددی

با توجه به معادلات حاکم و شرایط معرفی‌شده، از نرم‌افزار ANSYS-AQWA برای شبیه‌سازی مجموعه‌ی توربین بادی شناور استفاده‌شده است. در نرم‌افزار ANSYS-AQWA، تحلیل به روش المان مرزی انجام می‌شود؛ بدین‌صورت که با مش زدن مرز مشترک سازه و سیال، سطح آزاد آب، بستر دریا و منطقه دور از سازه و برقراری معادله لاپلاس و شرایط مرزی، تابع پتانسیل به‌دست می‌آید؛ درنهایت از طریق تابع پتانسیل، خروجی‌های هیدرودینامیکی شناور استخراج می‌شود. در این نرم‌افزار برای بخش‌های حجیم شناور، مدل پانل‌های تفرق و برای اجزاء با مقطع کوچک از المان موریسون استفاده می‌گردد. همچنین کابل‌های مهار به‌صورت مجموعه‌ای از المان‌های موریسون مدل می‌گردد.

معادله موریسون در شرایط خاص اعم از کوچک بودن سازه در مقایسه با طول موج و یا در المان‌هایی با لبه‌های تیز استفاده می‌شود که در این شرایط اثرات لزجت حائز اهمیت خواهد بود؛

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

همچنین برای سکوهای شناور به علت اندرکنش سیال و المان‌های سازه در فواصل نزدیک به هم استفاده از تئوری تفرق الزامی است. تئوری تفرق موج به‌صورت خطی برای حالاتی است که ارتفاع امواج محرک و دامنه تحریک سازه، هر دو کوچک باشند. درسازه‌های حجیم، نیروهای اینرسی نسبت به نیروی درگ غالب است و برای تحلیل آن‌ها به روش المان مرزی با استفاده از تئوری تفرق، سیال غیر لزج در نظر گرفته می‌شود که از اصول نرم‌افزار ANSYS-AQWA نیز می‌باشد. در فرکانس کم امواج نیروهای لزجت، علاوه بر میرایی، نیروی دریفت نیز تولید می‌کنند و در این حالات ترم میرایی ویسکوز در محاسبات لحاظ می‌شود. در ضمن مشخصات پارامترهای مهم تعریف‌شده برای سازه مدل در نرم‌افزار ANSYS-AQWA در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- پارامترهای مهم تعریف‌شده در نرم‌افزار ANSYS-AQWA

شعاع ژیراسیون رول (R_{XX})	۰/۵۳۵(m)
شعاع ژیراسیون پیچ(R_{YY})	۰/۵۳۵(m)
شعاع ژیراسیون یاو(R_{ZZ})	۰/۱۱۴(m)
جرم	۲۰/۹۹(kg)
آبخور	۰/۹۲(m)
ارتفاع برج	۸۰(cm)
قطر برج	۴(cm)
عمق قسمت بویانسی	۸۵(cm)
قطر قسمت بویانسی	۱۶(cm)

۴-۱- خطوط مهار

نرم‌افزار ANSYS-AQWA قادر است، دو نوع مهاربندی زنجیری و کشیده را مدل‌سازی نماید. همچنین آنالیزهای طراحی اعم از آنالیز پارگی، آنالیز تنش، آنالیز خستگی روی خطوط مهار نیز در این نرم‌افزار قابل‌بررسی است. خروجی‌های هیدرودینامیکی و سازه‌ای عبارت‌اند از[۶]:

- ضرایب جرم افزوده و ضرایب میرایی در شش درجه آزادی
- دامنه پاسخ و فازهای حرکات در شش درجه آزادی برای فرکانس‌ها و جهات مختلف امواج به‌صورت اپراتور دامنه پاسخ
- مقادیر نیروها در خطوط مهار و اتصالات
- موقعیت، شتاب و سرعت در شش درجه آزادی نقاط مرجع سازه در حالت سالم و صدمه‌دیده
- تراز آب و دامنه حرکات نقاط نسبت به هم

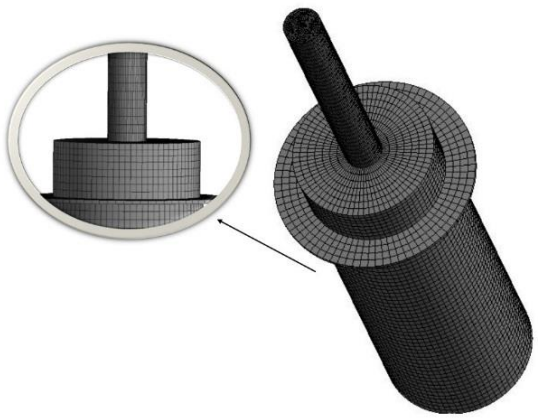
ازجمله قابلیت‌های مهم نرم‌افزار ANSYS-AQWA، غیرفعال کردن یک یا همه‌ی خطوط مهار می‌باشد که یکی از فرایندهای طراحی در آیین‌نامه‌های API و ISO می‌باشد.

۴-۲- تولید شبکه

در نرم‌افزار ANSYS-AQWA برای تولید شبکه، با توجه به‌دقت موردنیاز برای خروجی گرفتن، فقط کافی است فاصله المان‌ها وارد گردد؛ ولی در این مرحله باید کنترل شود که حداکثر فرکانس‌های مش‌بندی از حداکثر فرکانس موج بیشتر نگردد که این امر باعث به وجود آمدن جواب‌های اشتباه خواهد شد. همچنین ریزتر بودن ابعاد سلول‌های شبکه، هم باعث دقت و هم باعث افزایش محاسبات می‌شود که در زمان محاسبه‌ی نیروی وارده به سازه، این امر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند[۲۴].

۴-۲-۱-استقلال حل عددی از شبکه

شکل ۶ نمایی از سازه مش‌زده را در نرم‌افزار نشان می‌دهد. همچنین جدول ۷ سایز و تعداد المان‌های مش را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول ۷ و برای ارزیابی استقلال حل عددی از شبکه، در شکل ۷، اپراتور دامنه‌ی پاسخ حرکت پیچ، به ازای اندازه‌های مختلف المان مش نشان داده‌شده است. همان‌طور که از شکل ۷ به‌وضوح مشخص است، از مورد ۵ به بعد، اپراتور دامنه پاسخ تغییری نکرده است؛ بنابراین اندازه المان مش را ۰/۰۵ متر در نظر گرفته می‌شود.



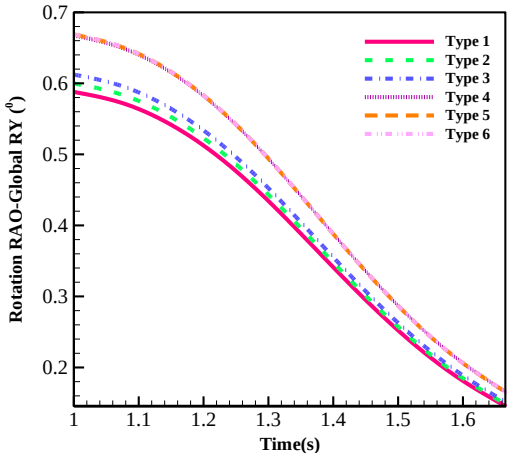
شکل ۶- نمای مش زده از توربین بادی شناور

جدول ۷-مشخصات مش

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
سایز المان (متر)	۰/۳	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳
تعداد المان‌ها	۱۹۹	۱۰۱۶	۱۲۹۴	۱۹۶۶	۳۵۸۲	۹۸۵۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

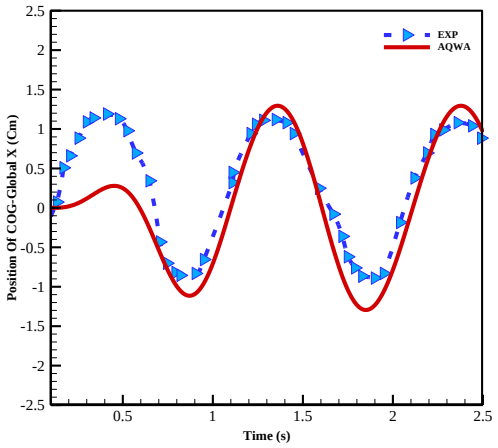


شکل ۷-اپراتور دامنه پاسخ حرکت پیچ به ازای اندازه‌های متفاوت المان مش

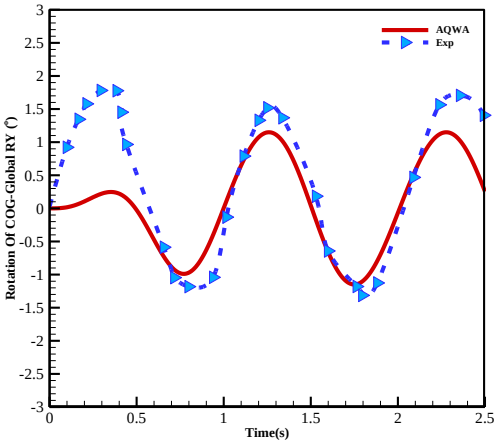
۵-صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج عددی پایه توربین بادی شناور اسپار با نتایج تجربی موجود برای موجی منظم به ارتفاع ۶ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه مقایسه شدند؛ به این منظور یک حرکت خطی و یک حرکت چرخشی موردبررسی قرار گرفت (شکل‌های ۸ و ۹).

همان طور که مشاهده می‌شود، در بازه ی ۰-۱ ثانیه تفاوت محسوسی در نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود؛ زیرا در مدل عددی حرکت سازه از ثانیه صفر شروع شده، سپس به‌آرامی دامنه نوسانات آن شکل می‌گیرد؛ اما در مدل آزمایشگاهی، ثانیه صفر از زمانی در نظر گرفته می‌شود که نوسانات سازه کاملاً شکل‌گرفته است. در کل تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.



شکل ۸-مقایسه نتایج عددی و تجربی حرکت سرج مرکز جرم سازه در راستای X



شکل۹-مقایسه نتایج عددی و تجربی حرکت پیچ در راستای RY

۶- نتایج و بحث

۶-۱- انتخاب بهینه‌ی طول لنگر

همان‌طور که اشاره‌شده است، مهار موردنظر به سه بخش زنجیر – کابل - زنجیر تقسیم‌بندی می‌شود. دو قسمت ابتدا و انتهای آن زنجیر پین دار با قطر ۸۷ میلی‌متر بخش میانی از کابلی با قطر ۷۶ میلی‌متر استفاده‌شده است. طیف موج جانسوآپ با ارتفاع شاخص موج ۱۰/۵ متر، حداکثر دوره تناوب ۱۶/۲۵ ثانیه، سرعت باد ۳۸ متر بر ثانیه و همچنین سرعت جریان ۱/۲۶ متر بر ثانیه در راستای صفر درجه شمالی با بیشترین درصد احتمال وقوع بر روی سکو اعمال می‌شود.

شایان ذکر است که در مرحله‌ی نخست فرض می‌شود که در مهار کاتنری موردنظر، طول زنجیر ابتدایی و انتهای باهم برابر بوده، به‌منظور بهینه‌سازی، برای کابل میانی اندازه‌های متفاوتی در نظر گرفته‌شده است (جدول ۸). شکل ۱۰ نمایی شماتیک از خطوط مهار و همچنین ترتیب نام‌گذاری آن‌ها را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

جدول ۸- موردهای بررسی قرار داده‌شده

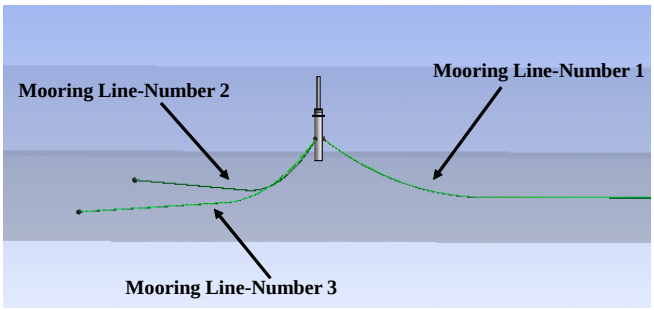
Type 1	طول کابل ۵۰ متر
Type 2	طول کابل ۱۰۰ متر
Type 3	طول کابل ۱۵۰ متر

ابتدا نیروی کششی ایجادشده در خط مهار موردبررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نزدیکی مهار شماره ۲ به جهت موج برخوردی، تنها به تحلیل و ارزیابی این مهار پرداخته می‌شود. برای این منظور تاریخچه زمانی جابه‌جایی در راستای X، Y و همچنین دوران در راستای RY توربین بادی شناور در نقطه مرکز جرم کل سازه COG موردبررسی قرار می‌گیرد. جدول ۹ مقادیر بیشینه نیروی کششی و همچنین پیک دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

همراه موقعیت زمانی متناظر آن‌ها به ازای طول‌های مختلف کابل مهار را نشان می‌دهد.



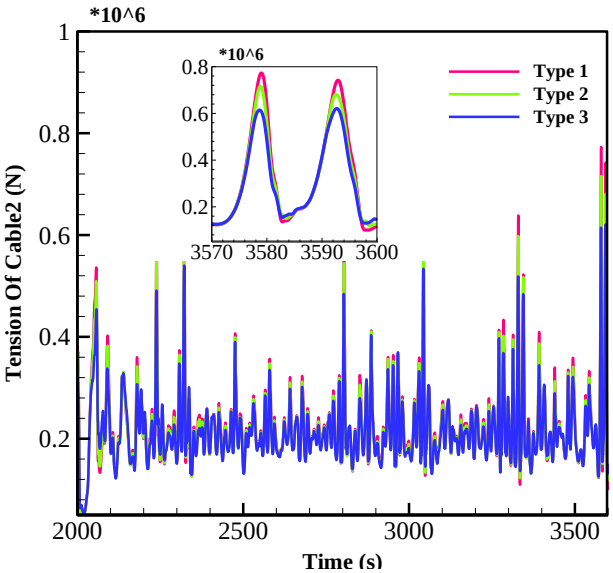
شکل ۱۰-شکل شماتیک و شماره مهارها

شکل ۱۱ تحلیل حوزه زمان نیروی کششی مهار را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر، مقادیر بیشینه نیروی کششی مهار در موقعیت‌های زمانی متناظر در این شکل بزرگ‌نمایی شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، با افزایش طول کابل میانی برای یک سیستم مهار کاتنری (کابل / زنجیر) نیروی کششی در تمامی خطوط مهار کاهش می‌یابد.

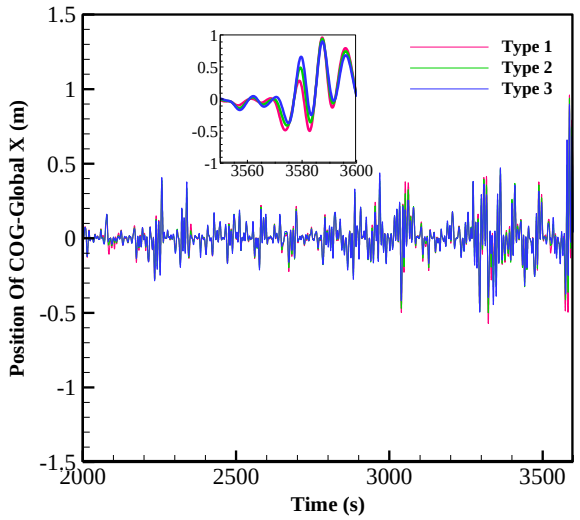
شکل ۱۲ تحلیل حوزه زمان را برای حرکت سرج نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش طول کابل، دامنه نوسانات حرکت سرج کاهش‌یافته، این به دلیل افزایش نیروی بازگردان به سبب افزایش بازو لنگر می‌باشد.

شکل ۱۳ دامنه نوسانات حرکت هیو را در حوزه زمان برای بازه‌ای ۴۵ دقیقه‌ای نشان می‌دهد؛ در این شکل نیز پیک نوسانات در زمان‌های متناظرشان نیز به‌صورت بزرگ‌نمایی نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشخص است، افزایش طول کابل میانی تأثیر بسیار ناچیزی بر روی حرکت خطی هیو می‌گذارد و هرچه طول کابل کمتر و به همان نسبت طول زنجیر بیشتر باشد، دامنه نوسانات حرکت هیو، بهبود می‌یابد؛ دلیل آن وزن بیشتر سیستم مهار در این حالت است که مانع نوسانات بیشتری در راستای قائم سازه در برابر نیروهای محیطی می‌شود.

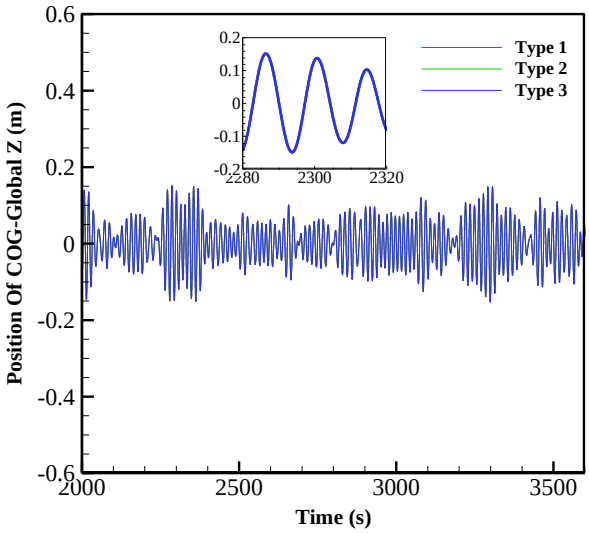
شکل ۱۴ مقادیر تحلیل حوزه زمان را برای نوسانات حرکت پیچ نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که در زمان تقریباً یکسان با افزایش طول کابل میانی دامنه نوسانات حرکت پیچ افزایش می‌یابد (جدول ۹).



شکل ۱۱- تحلیل حوزه زمان نیروی کششی در مهار شماره۲



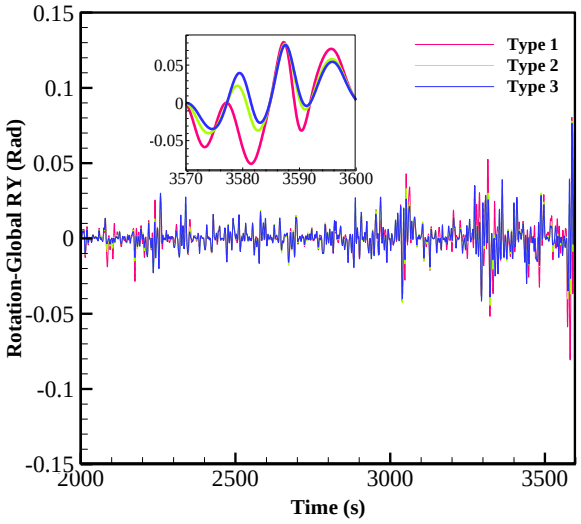
شکل ۱۲- دامنه نوسانات حرکت سرج در حوزه زمان



شکل ۱۳- دامنه نوسانات حرکت هیو در حوزه زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]



شکل ۱۴- دامنه نوسانات حرکت پیچ در حوزه زمان

جدول ۹- مقادیر بیشینه و زمان متناظرشان

	مؤلفه	Type 1	Type 2	Type 3
مقدار بیشینه	نیروی کششی(نیوتون)	۷/۳۴*۱۰^۶	۷/۱۵*۱۰^۶	۶/۲*۱۰^۶
	سرج(متر)	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹
	هیو(متر)	۰/۱۵۱۵۵	۰/۱۵۱۵۶	۰/۱۵۱۵۸
	پیچ(رادیان)	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸
زمان متناظر با مقدار بیشینه(ثانیه)	نیروی کششی	۳۵۷۹	۳۵۷۸/۸	۳۵۹۲/۷
	سرج	۳۵۸۷/۴	۳۵۸۷/۴	۳۵۸۷/۵
	هیو	۲۲۸۶/۴	۲۲۸۶/۴	۲۲۸۶/۴
	پیچ	۳۵۸۷/۶	۳۵۸۷/۵	۳۵۸۷/۵

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، به‌منظور جلوگیری از شلاقی شدن سازه، در بخش ابتدایی سیستم مهار از زنجیر استفاده می‌شود و همچنین به‌منظور کاهش نیروهای وارده بر لنگر، در بخش انتهایی نیز از زنجیر استفاده‌شده است. نکته مهم این است که طول زنجیر در قسمت انتهایی لنگر باید از قسمت ابتدایی بیشتر باشد. به این منظور از زنجیر قسمت ابتدایی کاسته و به قسمت انتهایی اضافه می‌شود.

در بخش قبلی، برای یک مهاری سه‌بخشی (کابل در بخش میانی و زنجیر در بخش‌های ابتدایی و انتهایی) طول کابل میانی بهینه‌سازی شد و طول بهینه برای آن، ۱۵۰ متر به‌دست‌آمده است. در این مرحله، برای ارزیابی بیشتر لنگر، از بخش زنجیر در قسمت بالا کاسته و به قسمت پایینی اضافه می‌شود. جدول ۱۰ جزییات بیشتری را از این بررسی‌ها نشان می‌دهد.

برای شروع بررسی‌ها در ابتدا مقدار نیروی کششی برای خط مهار شماره ۲ و سپس دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ برای بازه‌ای ۴۵ دقیقه‌ای ارائه‌شده است. جدول ۱۱ مقادیر بیشینه نیروی کششی و همچنین پیک دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ را به همراه موقعیت زمانی متناظر آن‌ها به ازای مقدار مشخصی از افزایش طول زنجیر بستر و به همان مقدار کاهش طول زنجیر ابتدایی نشان می‌دهد.

جدول۱۰-موردهای بررسی قرار داده‌شده

ردیف	کاهش زنجیر متصل به سازه و افزودن آن به زنجیر متصل به لنگر
۱	۲۵ متر
۲	۵۰ متر
۳	۷۵ متر

شکل ۱۵ تحلیل حوزه زمان نیروی کششی مهار را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر، مقادیر بیشینه نیروی کششی در موقعیت‌های زمانی متناظر در این شکل بزرگ‌نمایی شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزایش طول زنجیر لنگر و کاهش طول زنجیر بخش بالایی متصل به سازه، نیروی کششی در تمامی خطوط افزایش می‌یابد.

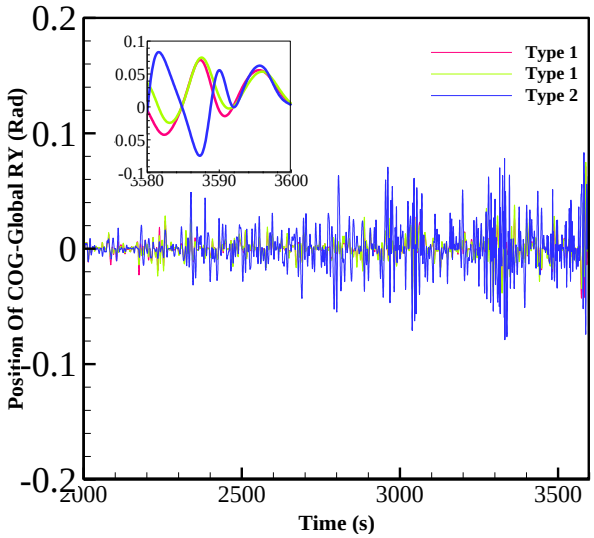
شکل ۱۶ تحلیل ۴۵ دقیقه‌ای دامنه نوسانات حرکت سرج را به ازای موارد ذکرشده در جدول ۱۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزودن طول زنجیر لنگر و کاهش طول زنجیر ابتدایی متصل به سازه، دامنه نوسانات حرکت سرج روندی صعودی می‌یابد. با کاهش طول زنجیر ابتدایی، سازه دستخوش نوسانات زیادی می‌شود؛ بنابراین حرکت سرج در حوزه زمان افزایش می‌یابد؛ همچنین انتظار می‌رود که این روند افزایشی برای حرکات هیو و پیچ نیز برقرار باشد.

شکل ۱۷ تاریخچه زمانی جابه‌جایی مرکز جرم کل سازه توربین بادی شناور (COG) را در راستای Z نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با کاهش طول زنجیر ابتدایی، سازه در راستای هیو دارای نوسانات بیشتری می‌شود.

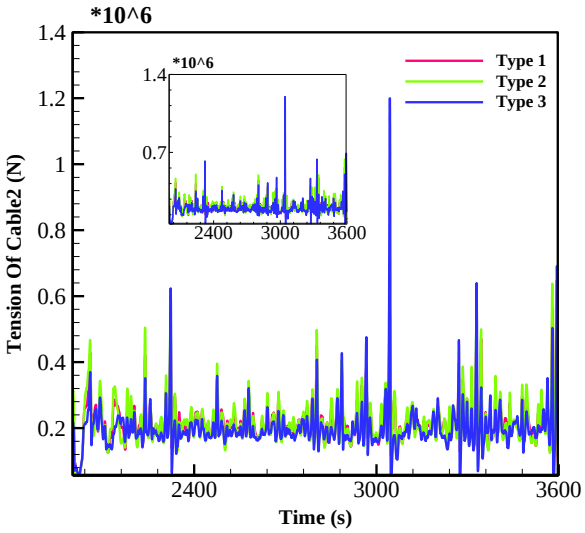
شکل ۱۸ دامنه نوسانات حرکت پیچ را برای بازه‌ای ۴۵ دقیقه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که در گذشته ذکر شد و انتظار می‌رود، با کاهش طول زنجیر ابتدایی و افزودن همان مقدار به طول زنجیر بستر، دامنه نوسانات حرکت پیچ روندی صعودی می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]



شکل ۱۸- دامنه نوسانات حرکت پیچ در حوزه زمان

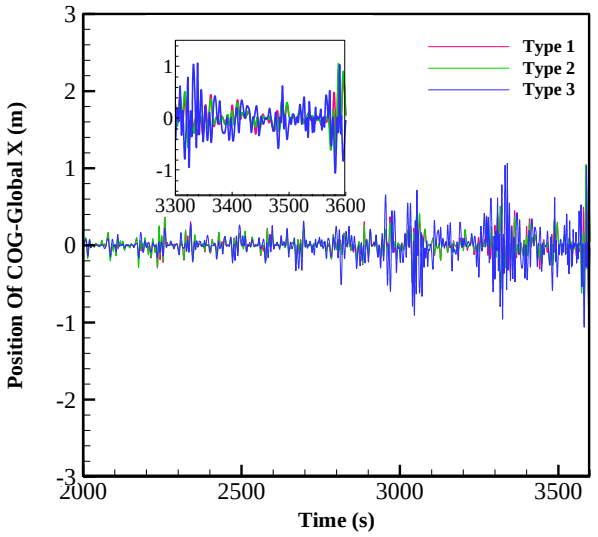


شکل ۱۵- تحلیل حوزه زمان نیروی کششی در مهار شماره ۲

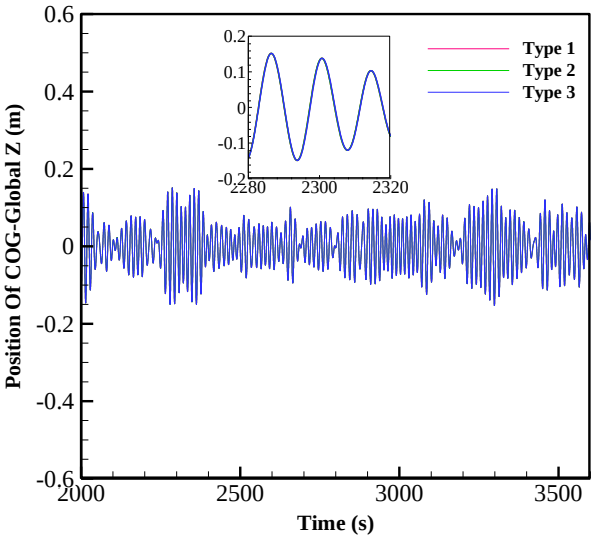
بر اساس جدول ۱۱، در تمامی تحلیل‌هایی که اثر افزایش - کاهش طول زنجیر بررسی شد، در نمونه‌ی افزایش - کاهش ۲۵ متر رفتار مناسبی از سازه دیده می‌شود. یکی از ساده‌سازی‌های انجام‌شده در مدل‌سازی سیستم مهاربندی، حذف اتصال دلتای میان خطوط مهاری است که باعث می‌شود سیستم مهاربندی نیازمند اضافه کردن یک فنر یاو به‌منظور دستیابی به سختی یاو مناسب برای سیستم باشد [۲]. فنر یاو اضافی موردنیاز در این سیستم دارای سختی ۸۱/۵ *MNm/rad* می‌باشد. این سختی باید به‌صورت یک لنگر اضافه یعنی $M_z^{restoring}$ حول محور z به سیستم اضافه شود. درنهایت نیز سیستم مهار با در نظر گرفتن تمامی شرایط فوق و همچنین با توجه به شرایط محیطی اعمال‌شده، بهینه‌سازی شده است. مشخصات سیستم مهار انتخاب‌شده در جدول ۱۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۱۱-مقادیر بیشینه و زمان متناظرشان

	مؤلفه	Type 1	Type 2	Type 3
مقدار بیشینه	نیروی کششی(نیوتون)	۶/۴*۱۰^۶	۱۱/۹*۱۰^۶	۱۳/۳*۱۰^۶
	سرج(متر)	۰/۹۲	۱/۰۴	۱/۰۵
	هیو(متر)	۰/۱۵۱۵۷۳	۰/۱۵۱۵۷۷	۰/۱۵۱۵۷۹
	پیچ(رادیان)	۰/۰۷۴۸	۰/۰۸۳۱	۰/۰۸۳۱
زمان متناظر با مقدار بیشینه(ثانیه)	نیروی کششی	۳۵۹۲/۸	۳۵۹۳	۳۰۴۴/۲
	سرج	۳۵۸۷/۴	۳۵۸۷/۳	۳۳۳۸/۹
	هیو	۲۲۸۶/۴	۲۲۸۶/۴	۲۲۸۶/۵
	پیچ	۳۵۸۷/۵	۳۵۸۷/۴	۳۵۸۹/۱



شکل ۱۶- دامنه نوسانات حرکت سرج در حوزه زمان



شکل ۱۷- دامنه نوسانات حرکت هیو در حوزه زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

جدول ۱۲-مشخصات سیستم مهار کاتنری

مؤلفه	بخش اول	بخش دوم	بخش سوم
	زنجیر پین دار	کابل فولادی	زنجیر پین دار
طول هر بخش (m)	۸۲/۶۲	۱۵۰	۱۸۲/۶۲
جرم بر واحد طول (kg/m)	۱۴۴/۲	۲۱/۲۸	۱۴۴/۲
مساحت مقطع معادل (m^2)	۱/۱۸	۰/۰۰۳۱	۱/۱۸
مدول الاستیسته (N)	۰/۰۸۷	۰/۰۷۶۲	۰/۰۸۷
ضریب درگ عرضی	۲/۴	۱/۸	۲/۴

۶-۲- از دست دادن مهار

بارگذاری محیطی و پاسخ سازه، ملاحظات مهم طراحی برای مهارها می‌باشد. این اثرات بایستی برای هر دو حالت نرمال و حدی به‌دقت تحقیق و بررسی شود. شرایط محیطی نرمال به‌صورت متناوب در طول عمر سازه و زمان ساخت وارد می‌شود؛ درحالی‌که شرایط حدی تنها در حالات خاص و با احتمال رخ داد کم در طول عمر سازه رخ می‌دهد. بر اساس آیین‌نامه API حداقل دوره بازگشت برای شرایط حالت حدی ۱۰۰ سال است. در این شرایط بایستی تمامی زیرسیستم‌های حیاتی، پایداری و مقاومت خوبی داشته باشند. در این شرایط قابلیت اعتماد سازه‌های شناور باید برای هر دو حالت سالم و صدمه‌دیده بررسی شود تا به طراحان درک صحیحی از عملکرد سازه در شرایط سالم و سناریوهای مختلف صدمه‌دیدگی بدهد[۶]. با توجه به ارتفاع زیاد موج در دریای مازندران و با در اختیار داشتن مشخصات موج برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله همان‌طور که قبلاً ذکر شد، شبیه‌سازی عددی از دست دادن یکی از مهارها (مهار شماره ۲ به دلیل نزدیکی با جهت موج صفر درجه شمالی) برای ۴۰۰۰ثانیه تحلیل، در این شرایط جوی انجام شد که در ادامه تحلیل حوزه زمان برای توربین بادی شناوری با از دست دادن یکی از مهارها در شرایط بقا بررسی می‌شود. برای این منظور تاریخچه زمانی جابه‌جایی در راستای X، Y و همچنین دوران در راستای RY توربین بادی شناور در نقطه مرکز جرم کل سازه (COG) در صورت پارگی یکی از مهارها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شبیه‌سازی برای یک ساعت و شش دقیقه تحلیل رفتار سازه بدون یک خط مهار به‌گونه‌ای انجام‌شده است که پارگی مهار از ثانیه ۰/۱ تا ۴۰۰۰ انجام شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، در صورت پارگی یکی از خطوط مهار، دامنه نوسانات حرکت سرج، هیو و پیچ افزایش می‌یابد. جدول ۱۳ مقادیر بیشینه تنش و همچنین پیک دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ را به‌همراه موقعیت زمانی متناظر آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۱۳- مقادیر بیشینه و زمان متناظرشان

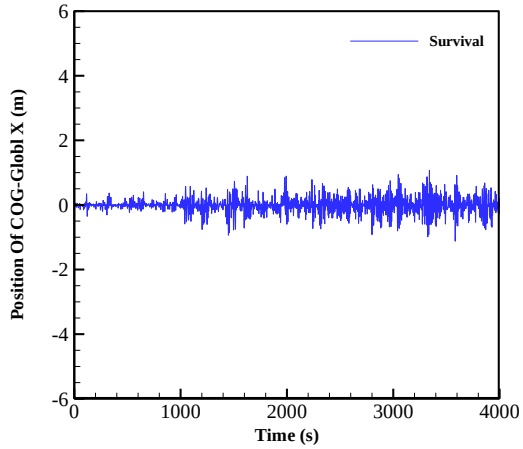
مؤلفه	بیشینه حرکت	زمان متناظر بیشینه	واحد
سرج	۱/۰۶	۳۳۴۰	متر
هیو	۰/۱۷۳۷	۱۴۵۹/۵	متر
پیچ	۰/۰۸۴	۳۳۴۰	رادیان

همان‌طور که از شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، بیشینه دامنه نوسانات حرکت سرج ۱/۰۶متر بوده، در زمان ۳۳۴۰ ثانیه رخ می‌دهد که نسبت به حالت سالم مقدار پیک نوسانات افزایش‌یافته و نیز در زمان زودتری رخداده است. شایان‌ذکر است که بیشینه دامنه نوسانات حرکت سرج در حالت سالم، ۰/۹۲ متر بوده، در زمان ۳۵۸۷/۴ ثانیه رخ می‌دهد.

بیشینه دامنه نوسانات حرکت هیو در حالتی که سیستم مهار سالم است و هیچ‌گونه پارگی در خطوط مهار وجود ندارد، مقدار ۰/۱۵۱۵متر و زمان متناظر آن نیز ۲۲۸۶/۴ ثانیه می‌باشد؛ زمانی که یکی از مهارها دچار پارگی می‌شود، بیشینه دامنه نوسانات حرکت هیو به ۰/۱۷۳۷متر افزایش یافته، زمان متناظر آن نیز در ثانیه ۳۳۴۰ ام رخ می‌دهد که نسبت به حالت سالم در زمانی دیرتری رخداده است؛ ولی در حالت کلی دامنه نوسانات حرکت هیو نسبت به حالت سالم افزایش‌یافته است.

بیشینه دامنه حرکت پیچ در حالت پارگی یکی از مهارها، ۰/۰۸۴ رادیان است و در حالتی که همه‌ی خطوط مهار سالم هستند، ۰/۰۷۴ رادیان می‌باشد که بیان‌کننده‌ی افزایش نوسانات حرکت پیچ در صورت پارگی خط مهار می‌باشد. همچنین زمان متناظر برای پیک حرکت پیچ در حالت صدمه‌دیده ۳۳۴۰ ثانیه می‌باشد که در مقایسه با زمان متناظر برای پیک حرکت پیچ در حالت سالم (در ثانیه ۳۵۸۷/۵)، زودتر رخ می‌دهد.

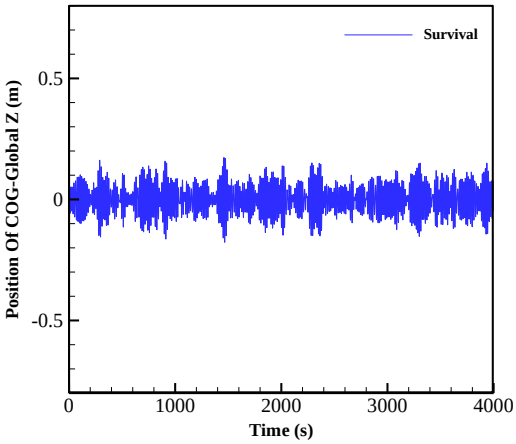
شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ تحلیل حوزه زمان را برای حرکت‌های سرج، هیو و پیچ در صورت از دست رفتن مهار نشان می‌دهد.



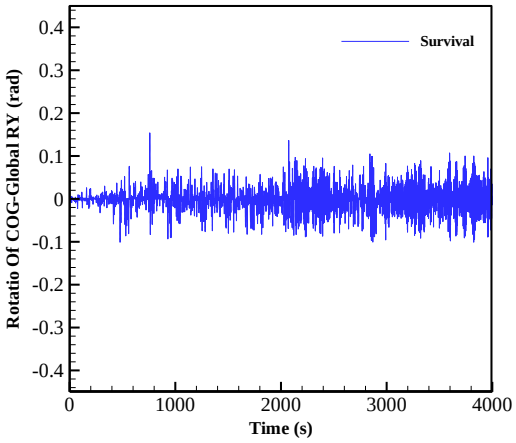
شکل ۱۹- دامنه نوسانات سرج در حوزه زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]



شکل ۲۰- دامنه نوسانات هیو در حوزه زمان



شکل ۲۱-دامنه نوسانات پیچ در حوزه زمان

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا سیستم مهاربندی کاتنری برای یک طرح مفهومی از توربین بادی شناور اسپار تعریف شد و سپس به بررسی اثرات سیستم مهار بر روی رفتار هیدرودینامیکی - سازه‌ای ، با در نظر گرفتن شرایط محیطی دریای مازندران و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-AQWA پرداخته‌شده است. همچنین از دست رفتن یکی از خطوط مهار، در شرایط بقاء و برای دوره بازگشت صدساله بررسی‌شده است. مهم‌ترین نتایج این بررسی به‌صورت زیر ارائه‌شده است:

۱- تحلیل هیدرودینامیکی سازه شناور در نرم افزار ANSYS-AQWA انجام گرفته است و نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی صحت‌سنجی شدند. نتایج نشان می‌دهند که تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی برقرار است.

۲- با افزایش طول کابل میانی برای یک سیستم مهار کاتنری (کابل / زنجیر)، به دلیل کاهش وزن سیستم مهار، تنش در تمامی خطوط مهار کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش طول کابل، دامنه نوسانات حرکت سرج کاهش می‌یابد، زیرا سبب افزایش نیروی بازگردان به سبب افزایش بازو لنگر می‌شود.

۴- هرچه طول کابل کمتر باشد، دامنه نوسانات حرکت هیو، بهبود می‌یابد؛ زیرا وزن سیستم مهار در این حالت افزایش‌یافته، مانع نوسانات بیشتری در راستای قائم سازه در برابر نیروهای محیطی می‌شود.

۵- با افزایش طول کابل میانی، دامنه نوسانات حرکت پیچ افزایش می‌یابد.

۶- با افزایش طول زنجیر لنگر و کاهش طول زنجیر بخش بالایی متصل به سازه، تنش در تمامی خطوط افزایش می‌یابد.

۷- با افزودن طول زنجیر لنگر و کاهش طول زنجیر ابتدایی متصل به سازه، دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ روندی صعودی خواهد داشت؛ زیرا کاهش طول زنجیر ابتدایی متصل به سازه، حالت کنترل‌کننده بر رفتار دینامیکی سازه را بر عهده دارد.

۸-در صورت پارگی یکی از خطوط مهار، دامنه نوسانات حرکات سرج، هیو و پیچ افزایش می‌یابد؛ همچنین بیشینه دامنه نوسانات حرکات سرج و هیو در زمانی زودتر از حالت سالم رخ می‌دهد.

کلید واژگان:

1- Spar Buoy
2-Ballast Stabilized
3-Semi Submersible Platform
4-Buoyancy Stabilized
5-Catenary Mooring
6- Tension Leg platform
7- Mooring Line Stabilized
8- Hywind
9- Statoil
10- Taut

۹-مراجع

1-Nielsen, F. G., Hanson, T. D. & Skaare, B., (2006, January). *Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines*. In 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pp. 671-679.

2-Jonkman, J. M., (2009), *Dynamics of offshore floating wind turbines-model development and verification*, Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, vol. 12, no. 5, pp. 459–492.

3-Utsunomiya, T., Sato, T., Matsukuma, H. & Yago, K., (2009, January). *Experimental validation for motion of a spar-type floating offshore wind turbine using 1/22.5 scale model*. In ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp. 951-959.

4-Karimirad, M. & Moan, T., (2011), *Extreme*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]

16-Jonkman, J., (2010), *Definition of the Floating System for Phase IV of OC3 (No. NREL/TP-500-47535).* National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
17-Hong, S., Lee, I., Park, S. H., Lee, C., Chun, H. H. & Lim, H. C., (2015), *An experimental study of the effect of mooring systems on the dynamics of a SPAR buoy-type floating offshore wind turbine*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 7, no. 3, pp. 559–579.
18-*Our offshore wind projects - Our offshore wind projects - equinor.com*. [Online]. Available: https://www.equinor.com/en/what-we-do/new-energy-solutions/our-offshore-wind-projects.html. [Accessed: 09-Mar-2019].
19-Wichers, J., (2013), *Guide to Single Point Moorings*, WMooring.
20-Veritas, D. N., (2010), *Offshore standard DNV-OS-E301 position mooring*. Det Norske Veritas: Høvik, Norway.
21-Canonsburg, A. D., (2017), *Aqwa Reference Manual*.
22-Ghaisari, H., Tabeshpour, M. R. and Seif, M. S., (2015), *Numerical and Experimental Modeling of Spar Platform*, 6th international conference of offshore industries..(In Persian)
23-Faltinsen, O., (1993), *Sea loads on ships and offshore structures*, vol. 1. Cambridge university press.
24-Panahi, R., Yazdan dust, M., (2016), *Fatigue analysis of SPM mooring due to lenght of mooring line and direction of wave incident*. Iranian Journal of Marine Science and Technology, pp. 11-20. (In Persian)
Dynamic Structural Response Analysis of Catenary Moored Spar Wind Turbine in Harsh Environmental Conditions, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 133, no. 4, p. 041103.
5-Brommundt, M., Krause, L., Merz, K. & Muskulus, M., (2012), *Mooring system optimization for floating wind turbines using frequency domain analysis*, Energy Procedia, vol. 24, pp. 289–296.
6-Razaghian, A., Seif, M. S. & Tabeshpour, M. R., (2014), I*nvestigation of tendons and TLP behavior in damaged condition*, International journal of maritime technology, vol. 9, no. 18, pp. 23–34.
7-Yu, M., Hu, Z. Q. & Xiao, L. F., (2015), *Wind-wave induced dynamic response analysis for motions and mooring loads of a spar-type offshore floating wind turbine*, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, vol. 26, no. 6, pp. 865–874.
8-Ketabdari,M., Moshayedi, B. and Boreyri, S., (2015), *Hydrodynamic analysis of Moored offshore wind turbine in six degrees of freedom at Persian Gulf*, 6th International Conference on Offshore Industries. (In Persian)
9-Zhang, D. P., Zhu, K. Q., Jing, B., Yang, R. Z. & Tang, Z. C., (2015, June), *Dynamic Analysis of the Mooring System for a Floating Offshore Wind Turbine Spar Platform*, International Confrence on Computer Information System AND industrial Applications, vol. 3, no. 3.5, p. 1.
10-Tavakoli, F., Shafaghat, R. and Alamian, R., (2016), *Experimental Study of the Effect of Gyroscope Force on the Stability of Spar Floating Wind Turbines*, 18th International Conference on Offshore Industries. (In Persian)
11-Esmaeelpour, K., Shafaghat, R., Alamian, R. & Bayani, R. (2016), *Numerical study of various geometries of breakwaters for the installation of floating wind turbines*, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 27–37.
12-Samadi, M. & Hassanabad, M. G., (2017), *Hydrodynamic response simulation of Catenary mooring in the spar truss fl oating platform under Caspian Sea conditions*, Journal of Ocean Engineering, pp. 241–246.
13-Ketabdari, M., Bakhtiari, M., Ghassemi, H., (2018), *Numerical analysis of the effects of mooring line configurations on the dynamic response of a truss spar platform in sea waves*, Iranian Journal of Marine Technology, vol. 5, no. 2, pp. 53–62. (In Persian)
14-Ghafari, H. & Dardel, M., (2018), *Parametric study of catenary mooring system on the dynamic response of the semi-submersible platform*, Journal of Ocean Engineering, vol. 153, pp. 319–332.
15-Nosratzadeh, M. A., Ettefagh, M. M., Hajinezhad Dehkharghani, P., (2019), *Investigation of Dynamic Response Changes in TLP Type Floating Wind Turbine with Broken Mooring Lines*, Journal of Marine Engineering , vol. 57. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.13.1]